

Ajuste de relação hipsométrica para espécies da Floresta Amazônica

Adjustment of the hypsometric relationship for species of Amazon Forest

André Felipe Hess^{1(*)}

Evaldo Muñoz Braz²

Fábio Thaines³

Patrícia Povoá Mattos⁴

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo testar e selecionar modelos para ajuste da relação hipsométrica. Os dados foram obtidos de floresta nativa situada no município de Lábrea, no estado do Amazonas, com área de 6.000 hectares, inserida no Projeto de Manejo Florestal Seringal Iracema II. Foram testados dez modelos, incluindo polinômios, modelos de potência, logarítmicos, hiperbólicos, aritméticos e não lineares. Os não lineares foram ajustados pelo método de Gauss. Utilizaram-se como critério de seleção do ajuste dos modelos os parâmetros estatísticos do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), o erro padrão da estimativa ($Syx\%$), o coeficiente de variação ($CV\%$), o valor de F e a análise gráfica dos resíduos. As melhores estatísticas foram para os modelos não lineares com $R^2_{aj.}$ de 0,97 e erro padrão de 13,1% e o modelo hiperbólico com $R^2_{aj.}$ 0,90 e erro padrão de 6,02%, devido a sua fundamentação biológica, demonstrando superioridade destes modelos contra os modelos lineares.

Palavras-chave: modelos hipsométricos; Floresta Amazônica; validação de modelos dendrométricos.

1 Dr.; Engenheiro Florestal; Professor do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC; Endereço: Avenida Luiz de Camões, 2090, Conta Dinheiro, CEP: 8852-000, Lages, Santa Catarina, Brasil; E-mail: hessandre@yahoo.com.br (*) Autor para correspondência.

2 Dr.; Engenheiro Florestal; Pesquisador A na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Florestas; Endereço: Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba, Caixa Postal: 319, CEP: 83411-000, Colombo, Paraná, Brasil; E-mail: evaldo@cnpf.embrapa.br

3 Engenheiro Florestal; Diretor Proprietário na Tecnologia e Manejo Florestal, Tecman Ltda, Endereço: Rua Luiz Zacarias da Silva, 601, Estação Experimental, CEP: 69912-620, Rio Branco, Acre, Brasil; E-mail: fabiothaines@tecman.eng.br

4 Dra.; Engenheira Agrônoma; Pesquisadora na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Florestas; Endereço: Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba, Caixa Postal: 319, CEP: 83411-000, Colombo, Paraná, Brasil; E-mail: povoaa@cnpf.embrapa.br

Abstract

This study aimed to test and select models to fit the hypsometric relation. Data were obtained from native forest situated in the Municipality of Lábrea, Amazonas State, with an area of 6.000 hectares, included in Forest Management Project Iracema Rubber II. We tested 10 models, including polynomial models, power, and logarithmic, hyperbolic, and non-linear arithmetic. The non-linear were adjusted by the method of Gauss. It was used as a criterion for selecting the adjustment of the models the statistical parameters of the coefficient of determination ($R^2_{adj.}$), the standard error of estimate ($S_{yx}\%$), the coefficient of variation ($CV\%$), the value of F and graphical residual analysis. The best statistics were for models with nonlinear with $R^2_{aj.}$ of 0.97 and standard of 13,1%, and the hyperbolic model with $R^2_{aj.}$ of 0.90 and standard of 6,02%, due to its biological foundation, demonstrating the superiority of these models against linear models.

Keywords: hypsometric models; Amazon forest; validation of models dendrometric.

Introdução

Gerar equações com confiabilidade estatística para estimar a relação hipsométrica, bem como a distribuição diamétrica de espécies florestais é de extrema importância para o manejo sustentável das florestas nativas. Principalmente, devido à dificuldade de encontrar a relação entre o diâmetro e a altura correspondente do fuste, pois em muitos casos, as árvores apresentam uma porção de tronco pouco aproveitável, ou disforme, o que ocasiona a presença de valores altos em diâmetros e baixos em altura, sendo o contrário também verificado.

Chapman e Meyer (1949) afirmaram que a curva de altura sobre o diâmetro não apresenta um relacionamento biológico bem definido, tanto em espécies nativas quanto plantadas, como altura sobre idade e diâmetro sobre idade. Os mesmos autores afirmaram que quando se constrói uma curva para diferentes sítios ou idades, a curva hipsométrica mostrará uma grande variabilidade em altura para um mesmo diâmetro. Devido a essa grande variabilidade de alturas, para uma mesma classe de diâmetro para povoamentos ou florestas de

idade avançada, a relação hipsométrica não é uma relação dendrométrica muito forte, resultando normalmente em coeficientes de determinação (R^2) baixos e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) alto (MACHADO et al., 1994).

Assim, quando se usam equações para ajuste da relação hipsométrica, esta apresenta, muitas vezes, estatísticas com valores não significativos e “outliers”, gerando dúvidas e pouca confiabilidade no seu emprego, ocasionando, assim, incertezas na geração de parâmetros dendrométricos (por exemplo, o volume), podendo-se estar subestimando ou superestimando os valores.

Segundo Batista et al. (2001), a presença de observações extremas “outliers” num conjunto de dados pode ter uma influência diferenciada no desempenho de diferentes modelos ajustados por regressão linear e não linear. Este ponto é particularmente crítico no caso de modelos de relação hipsométrica, nos quais o objetivo central é obter estimativas da altura de árvores individuais.

A relação hipsométrica é um instrumento essencial na prática tradicional do inventário florestal. Ker e Smith (1957)

descreveram uma técnica de mensuração que ainda hoje é regra na maioria dos inventários em florestas plantadas. A técnica consiste em medir o diâmetro de todas as árvores na parcela de inventário, mas selecionar algumas poucas árvores, em geral de 5 a 10, para mensuração da altura. Utilizando os dados das árvores em que o diâmetro e altura foram medidos, constrói-se uma curva altura-diâmetro (relação hipsométrica), com a qual se estimam as alturas das demais árvores, resultando em redução do custo de inventário (BATISTA et al., 2001).

Esta relação é comumente simbolizada por “h/d” e fatores como espécie, posição sociológica, idade, tamanho de copa, densidade, sítio e práticas silviculturais, em geral, podem afetar e influenciar o vínculo das variáveis (MACHADO et al., 2008). Como o objetivo da relação hipsométrica é o de obter a altura de árvores individuais, dois aspectos fundamentais devem ser considerados na sua construção, como apontado por Batista, et al. (2001). O primeiro é o sistema de amostragem das árvores para medição de altura e do modo de agrupamento destas para o ajuste da curva altura-diâmetro. O segundo é qual o melhor modelo a ser utilizado, isto é, como os modelos respondem às particularidades da amostra utilizada no ajuste e como ela influencia o desempenho dos modelos quando estes estimam a altura das árvores que tiveram somente o diâmetro medido. A proporção das árvores nas diferentes classes de diâmetro na amostra de ajuste também pode influenciar o ajuste de modo diferenciado entre os modelos.

Este trabalho teve como objetivo ajustar e selecionar modelos matemáticos de relação hipsométrica para altura do fuste de espécies da Amazônia.

Material e Métodos

Caracterização e localização da área de estudo

A área de realização desta pesquisa está situada no município de Lábrea, no estado do Amazonas, limite entre os estados do Acre e Rondônia, com área total de 6.000 hectares, inserida no Projeto de Manejo Seringal Iracema II, cujas coordenadas geográficas são 9°39'41”S e 66°41'49”W.

O clima é quente e úmido (Am – conforme classificação de Köppen), com um período sem precipitação de três meses por ano. A temperatura média é de 25 °C, com umidade relativa do ar situando-se entre 80 a 85% e precipitação média anual de 2.250mm.

Os solos predominantes são podzólicos e latossolos vermelho-amarelo, distróficos. O relevo é suavemente ondulado, com erosão laminar. A área está inserida na micro bacia do rio Ituxi. A propriedade apresenta apenas cursos d’água de regime temporário.

A floresta é predominantemente densa com árvores emergentes, também com ocorrência de Floresta Aberta com bambu e palmeiras. No inventário florestal prospectivo (DAP \geq 50 cm), foram identificadas 124 espécies, com volume médio total de madeira para esse diâmetro de aproximadamente 64 m³. ha⁻¹. As principais espécies comerciais encontradas foram *Manikara huberi* (Ducke) Chevalier, *Tabebuia* spp., *Cedrela odorata* L.; *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr.; *Peltogyne* sp.; *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.; *Ceiba pentandra* (L.) Gaerth.; *Couratari* sp. e *Parkia multijuga* Benth.

Ajuste dos modelos hipsométricos

Para analisar o comportamento dos modelos e sua tendência no ajuste, utilizaram-se 63 pares de dados de diâmetro à altura do peito (DAP) e de altura do fuste (hf) das espécies citadas acima. Os modelos foram ajustados aos dados e a curva ajustada foi comparada com a tendência observada nos dados.

Todos os critérios de estabilidade foram baseados na diferença entre a altura observada e altura predita pelos modelos. A estabilidade dos

modelos de relação hipsométrica é, portanto, crítica para a qualidade das estimativas de altura. O termo “estabilidade” deve ser entendido como a qualidade de um modelo produzir estimativas confiáveis, sem viés e com variância pequena, ao ser aplicado a um conjunto de dados que não é idêntico ao utilizado para ajustá-lo, mas provém da mesma população (BATISTA et al., 2001).

Foram avaliados dez modelos matemáticos, constantes na tabela 1, encontrados em: Finger (1992), Bartoszeck et al. (2004), Barros et al. (2004), Batista et al. (2001).

Tabela 1 - Modelos hipsométricos testados para estimar altura do fuste em função do diâmetro

Número	Modelo	Natureza
1	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2$	Polinômio
2	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d^3$	Polinômio
3	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot 1/d^2$	Hiperbólico
4	$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot d$	Polinômio
5	$lnh = \beta_0 + \beta_1 \cdot 1/d$	Exponencial - Curtis
6	$lnh = \beta_0 + \beta_1 \cdot lnd$	Potência - Stofells
7	$h = 1,3 + \left[1 / \left(\beta_0 + \beta_1 \cdot 1/d\right)\right]^2$	Aritmético
8	$d/\sqrt{h} = \beta_0 + \beta_1 \cdot d$	Hiperbólico
9	$h = \beta_0 \cdot (1 - \exp^{-\beta_1 \cdot d})$	Mitscherlich
10	$h = \beta_0 \cdot (1 - \exp^{-\beta_1 \cdot d})^{\beta_2}$	Chapman-Richards

Fonte: Autores (2011).

Nota: h=altura do fuste em (m); d=diâmetro à altura do peito em cm; ln=logaritmo neperiano; β_0 ; β_1 =coeficientes dos modelos.

Com o objetivo de selecionar o melhor modelo de regressão, analisou-se o ajuste de cada equação comparativamente, observando-se os critérios estatísticos definidos pelo: coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa, coeficiente de variação, valor de F e a distribuição gráfica dos resíduos.

A análise gráfica dos resíduos em um ajuste de regressão é determinante como critério de escolha de um modelo, mesmo que as estimativas de ajuste de precisão estejam

apresentando valores aceitáveis. A dispersão dos pontos ao longo do eixo da variável independente indica de forma clara se o ajuste subestima ou superestima a variável dependente (MACHADO et al., 2008).

Ainda segundo o mesmo autor, o erro padrão da estimativa (Syx) informa a qualidade do ajuste e o quanto, relativamente, o modelo erra em média ao estimar a variável dependente. No caso de ajustes logarítmicos, ocorre uma discrepância, devido à transformação matemática, ao se efetuar a

operação inversa para se obter a variável de interesse. A correção dessa discrepância foi realizada pelo Índice de Furnival.

Resultados e Discussão

A tabela 2 apresenta as características das estatísticas de dispersão do diâmetro e altura do fuste das espécies do estudo.

Os coeficientes e parâmetros estatísticos dos dez modelos de relação hipsométrica para altura do fuste estão resumidos na tabela 3.

Tabela 2 - Características da dispersão dos dados de diâmetro e altura do fuste (hf)

Características	dap (cm)	hf (m)
Máximo	141,6	25,2
Mínimo	51,9	8,2
Média	79,2	16,6
Desvio padrão	15,6	3,3
Coeficiente de variação %	19,8	20,04

Fonte: Autores (2011).

Tabela 3 - Coeficientes e parâmetros estatísticos das equações ajustadas

Modelo n°	Coeficientes dos modelos			Parâmetros estatísticos			
				R ² aj.	Syx(%)	CV%	F
1	9,70337	0,16203	-0,000548	0,18	13,2	11,62	7,54
2	-9,06682	0,82299	-0,00803	0,000027	0,17	13,3	11,66
3	21,98002	-16981		0,20	13,1	11,49	15,71
4	13,5554	0,06822		0,19	13,1	11,57	14,71
5	3,25066	-24,11898		0,21	0,66	3,85	16,59
6	1,61119	0,30401		0,20	0,66	3,87	16,11
7	0,19854	3,13038		0,21	0,08	0,07	17,07
8	2,77678	0,19462		0,90	6,02	5,34	567,29
9	22,0320	0,0258		0,97	13,1	8,61	2313,48
10	22,1226	0,0249	0,9528	0,97	13,2	8,69	1516,19

Fonte: Autores (2011).

Nota: b₀, b₁, b₂, b₃=coeficientes do modelo; R²_{aj.}=coeficiente de determinação ajustado; Syx: erro padrão da estimativa em %; CV%: coeficiente de variação em %; F=valor de F.

Pela tabela 3 observa-se que os modelos testados apresentam variação em seus parâmetros estatísticos, com valores de coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj.}), variando entre 0,97 até o valor de 0,17 para o modelo 2. O erro padrão da estimativa (Syx%) apresentou diferença entre os modelos e, o teste F foi significativo para todos os modelos testados. Percebe-se ainda, que os modelos de mesma natureza apresentaram estatísticas semelhantes.

Como pode ser observado na tabela 3, sete dos dez modelos apresentaram valores baixos de R²_{aj.}, demonstrando assim uma baixa correlação entre as variáveis dependente e independente. Os valores de Syx% variaram de 0,08 a 13,2, aceitável para os modelos de melhor desempenho.

Machado et al. (1994), analisando o comportamento da relação hipsométrica para *Pinus ellittottii* afirmaram que o baixo valor do coeficiente de determinação é explicado pela

homogeneidade dos dados, gerada pela baixa variação das alturas em relação à amplitude diamétrica. Neste trabalho, por se tratar de espécies nativas, as quais apresentam fustes tortuosos, pouco aproveitáveis, acabaram gerando uma maior discrepância na relação h/d, isto é, diâmetros elevados e alturas pequenas, ou alturas elevadas com diâmetro menor, gerando assim, uma baixa correlação dessas duas variáveis e valores de R^2_{aj} não elevados, bem como um menor desempenho das demais estatísticas, quando comparado ao ajuste de variáveis dendrométricas com maior correlação biológica.

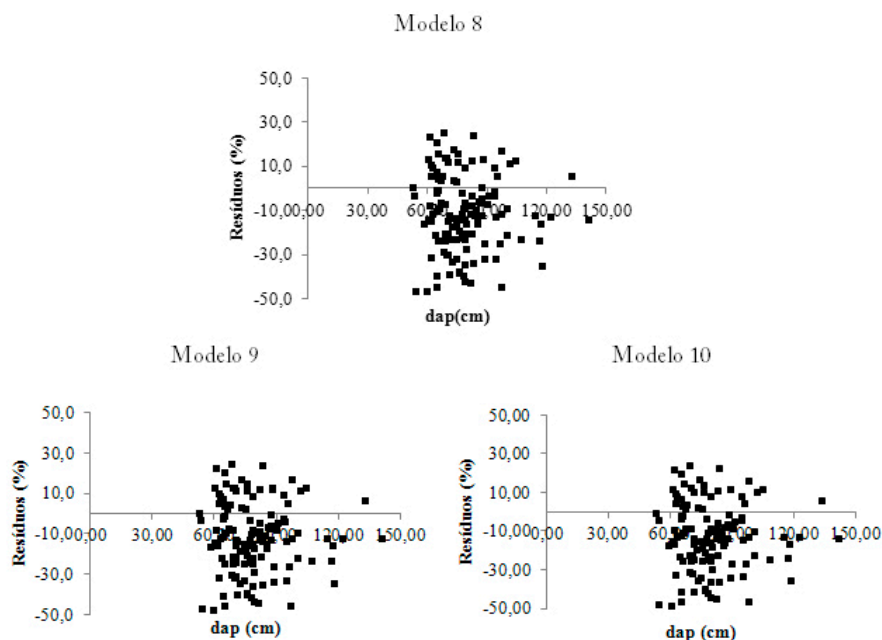
Azevedo et al. (1999), ao analisar a relação hipsométrica para quatro espécies da Amazônia ocidental, em quatro diferentes idades, em plantios homogêneos, concluíram que a relação h/d varia de acordo com a idade do povoamento, não podendo ser utilizada

uma equação comum para povoamentos de diferentes idades.

Batista et al. (2001) concluíram que a fundamentação biológica na forma funcional dos modelos não lineares parece justificar a superioridades em termos de estabilidade, contra os modelos lineares, no ajuste de diferentes dados de altura-diâmetro. Os modelos não lineares se mostram menos sensíveis às particularidades da amostra utilizada para o ajuste, pois o padrão da curva altura-diâmetro é fortemente ditada pelas propriedades biológicas do modelo.

Dos modelos testados, os modelos 8, 9 e 10 apresentaram melhor desempenho nos critérios estatísticos, sendo os escolhidos para proceder à análise gráfica dos resíduos. A figura 1 apresenta o gráfico da distribuição dos resíduos no ajuste destes modelos, respectivamente, hiperbólico e não linear.

Figura 1 - Distribuição gráfica dos resíduos em metros, em função do DAP para altura do fuste



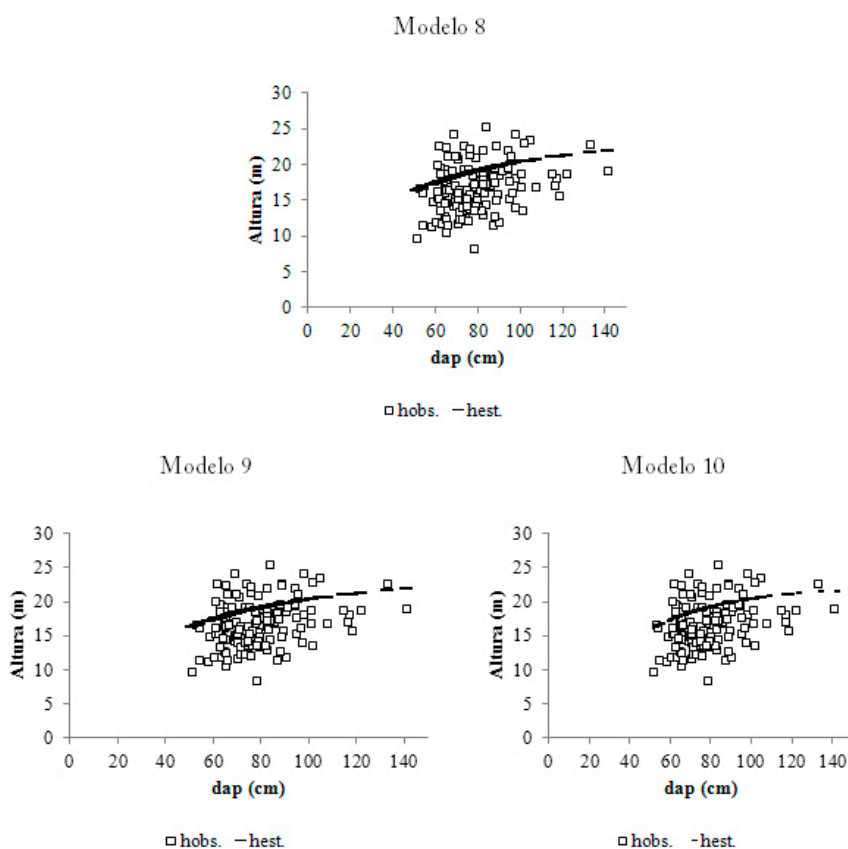
Fonte: Autores (2011).

Analisando-se a figura 1, pode-se observar que as distribuições gráficas de resíduos tiveram comportamento semelhante, com valores residuais enquadrando-se entre 30 e -50%, e demonstram tendência de superestimativa dos valores estimados de altura, com a maior parte dos pontos concentrando-se entre -10 a-20%, sendo que essa tendência já pode ser observada nos

dados originais. Observa-se também que os modelos testados tendem a superestimar os valores de altura do fuste, principalmente para os maiores diâmetros.

Para auxiliar na análise dos modelos, traçaram-se as linhas estimativas da variável dependente sobre os dados observados de altura (m) pelo DAP (cm) para os quatro modelos considerados, conforme figura 2.

Figura 2 - Curva ajustada pelos modelos sobre os pontos observados



Fonte: Autores (2011).

Pode-se notar, na figura 2, que a linha estimativa da regressão é similar para os modelos testados, comportando-se de maneira razoável aos dados observados em toda a extensão de distribuição do diâmetro, sem discrepâncias acentuadas, contudo,

denota-se a tendência dos modelos a superestimar os valores de altura.

Nota-se, ainda, que as curvas hipsométricas são pouco íngremes, como se espera em povoamentos com idades já avançadas, ou então, crescendo em sítios de

qualidade média ou baixa (MACHADO et al., 2008).

Neste estudo, verifica-se que a tendência a superestimar a altura é devido à natureza dos dados, pois como comentado anteriormente, há uma discrepância da relação h/d em espécies nativas, devido ao pouco aproveitamento do fuste, sendo que a regressão se ajustou aos dados na mesma proporcionalidade em que estes foram medidos. Machado et al. (2008) comentam ainda que, em florestas maduras, a competição entre indivíduos faz com que surjam extratos diferentes, ocorrendo indivíduos em posições sociológicas diferentes e uma variação diferente para as variáveis diâmetro e altura, possibilitando, ao longo dos anos, uma curva hipsométrica mais estável, ocorrendo uma associação de diferentes diâmetros para uma mesma altura, sendo que a relação h/d pode ser afetada por fatores externos tais como densidade, posição sociológica, etc.

Conclusão

A análise do desempenho dos modelos para os dados da floresta em estudo indicam que:

- os modelos não lineares explicaram melhor a fundamentação biológica da relação h/d, em termos de estabilidade quando comparados aos modelos lineares.

- o ajuste das equações e a estimativa gerada pelos modelos tende a superestimar os valores de altura, com resíduos variando de 30 a -50%, necessitando cuidados no ajuste de equações de volume.

- os modelos não lineares, com dois e três coeficientes e o modelo hiperbólico foram os que apresentaram as melhores estatísticas por melhor explicar a relação biológica entre o diâmetro e a altura.

- os resultados do ajuste mostraram que há necessidade de cautela nos ajustes da relação h/d para os dados levantados, pois essa relação mostrou-se baixa nos dados coletados a campo, indicando para floresta superestimativa no ajuste da variável altura.

Referências

AZEVEDO, C. P. de; MUROYA, K.; GARCIA, L. C.; LIMA, R. M. B. de; MOURA, J. B. de; NEVES, E. J. M. Relação hipsométrica para quatro espécies florestais em plantio homogêneo e em diferentes idades na Amazônia ocidental. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 5-29, jul./dez., 1999.

BARROS, D. A. de; MACHADO, S. do A.; ACERBI JUNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.45, p. 3-28, jul./dez., 2004.

BARTOSZECK, A. C. P. S.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E. B. Dinâmica da relação hipsométrica em função da idade, do sítio e da densidade inicial de povoamentos de bracinga da região metropolitana de Curitiba, Paraná. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 517-533, 2004.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo de três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, n.60, p.149-163, dez. 2001.

CHAPMAN, H. H.; MEYER, W.H. **Forest mensuration**. New York: Mcgraw-Hill, 1949. 522 p.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos da biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 269 p.

KER, J.; SMITH, J. Sampling for height-diameter relationships. **Journal os forestry**, v.55, n.3, p.205-207, 1957.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R.; FIGURA, M. A.; PEREIRA, E. M.; TÊO, S. J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n.56, p.5-16, jan./jun., 2008.

MACHADO, S. A.; BAILEY, R. L.; BASSO, S. F.; BEVILACQUA JUNIOR, V. G. Análise do comportamento da relação hipsométrica com respeito à idade para plantações de *Pinus elliotti* no Paraná. **Revista Cerne**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 5-12, 1994.