

Relação hipsométrica em inventários pré-corte em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild

Hypsometric relation in pre-harvest inventory in stands of *Acacia mearnsii* De Wild

Carlos Roberto SANQUETTA¹; Alexandre BEHLING²; Ana Paula Dalla CORTE³; Marieli Sabrina RUZA⁴; Augusto SIMON⁵; Jackson Freitas Brilhante De SÃO JOSÉ⁶

¹ PhD em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná; carlos_sanquetta@hotmail.com

² Autor para correspondência. Mestrando em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná; Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação Carbono na Biomassa (BIOFIX), Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - Jardim Botânico - Campus III 80210-170 - Curitiba - Paraná – Brasil. alexandre.behling@yahoo.com.br

³ Doutorado em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. anapaulacorte@gmail.com

⁴ Graduando em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Paraná. marielisabrina93@gmail.com

⁵ Engenheiro Florestal. TANAC S. A.; aasimon@tanac.com.br

⁶ Engenheiro Florestal. TANAC S. A.; JFJose@tanac.com.br

Recebido em: 17-08-2012; Aceito em: 10-09-2013

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar modelos matemáticos para descrever a relação hipsométrica em *Acacia mearnsii* De Wild. (acácia-negra). O estudo foi conduzido em parcelas de 9 x 14 m, instaladas em povoamentos com sete anos de idade (final da rotação), situados nas regiões de maior concentração de plantios nos municípios de Cristal e Piratini, no Estado do Rio Grande do Sul (Brasil). Em cada parcela, todos os indivíduos foram mensurados quanto à altura total e diâmetro à altura do peito (dap). Foram testados 10 modelos matemáticos (de natureza logarítmica e aritmética), sendo a seleção do melhor modelo realizada em função do coeficiente de determinação ajustado (R^2), erro-padrão da estimativa ($S_{xy}\%$), índice de Schlaegel (IA) e análise gráfica dos resíduos. A equação de melhor desempenho foi $\ln h = 3,1851 - 3,8129 \times 1/dap - 5,3335 \times 1/dap^2$, apresentando IA de 0,53 e S_{xy} de 0,98%, podendo ser utilizada para a predição da altura em inventário pré-cortes.

Palavras-chave adicionais: Acácia-negra; altura; modelagem.

Abstract

The purpose of this work was to evaluate mathematical models to describe the hypsometric relation of *Acacia mearnsii* De Wild (black wattle). The study was conducted in seven year old 9x14 m sample plots (at the end of rotation) located in the municipalities of Cristal and Piratini, both situated in the region where the species is most widely cultivated in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. In each plot, all the individuals had their total height and diameter at breast height measured. Ten mathematical models were tested (of logarithmic and arithmetic nature). The selection of the best model was based on the adjusted determination coefficient (R^2), standard error of estimate ($S_{xy}\%$), Schlaegel index (IA), and graphic analysis of the residues. The model which presented the best result was the following : $\ln h = 3.1851 - 3.8129 \times 1/dbh - 5.3335 \times 1/dbh^2$ which showed a IA of 0.53 and S_{xy} of 0.98% and can be used to predict the height in pre-harvest inventories.

Additional keywords: *Acacia mearnsii*; heights; modeling.

Introdução

Acacia mearnsii De Wild. (acácia-negra) é uma leguminosa arbórea natural do sudoeste da Austrália, pertencente à família Fabaceae, cujo gênero reúne 1.200 espécies, sendo a terceira espécie florestal mais cultivada no Rio Grande do Sul. O principal uso da acácia-negra é a produção de taninos vegetais, extraídos da casca da árvore (SIMON, 2005), que são

utilizados principalmente no curtimento de couros.

O crescimento rápido da acácia-negra, associado ao aproveitamento integral da madeira, torna essa espécie ideal para reflorestamento e uso industrial. Sua contribuição aos mais variados segmentos econômicos e industriais é ampla, tanto pelo aproveitamento da casca para extração do tanino, quanto pelo uso da madeira para diversos fins, tais como a fabricação de celulose e papel, chapas de

aglomerados, carvão e lenha (SANTOS et al., 2001). No RS, os plantios de acácia-negra são realizados principalmente por pequenos produtores, que vendem a biomassa do fuste para a indústria exportadora de cavacos (para posterior produção de celulose e papel) e casca para a indústria de taninos, contribuindo, assim, na geração de empregos, direta e indiretamente. Segundo STEIN & TONIETO (1997), seu cultivo beneficia cerca de 40 mil famílias, exercendo, portanto, importante papel socioeconômico.

É comum ao final da rotação realizar um inventário florestal para determinar o volume da madeira do povoamento. Para tanto, tem-se tornado habitual o uso das equações de relação hipsométrica para auxiliar nesse processo. Assim, não é necessária a mensuração da altura de todas as árvores em uma determinada parcela, pois esta pode ser estimada a partir do diâmetro à altura do peito (dap). A associação existente entre essas variáveis permite determinar relações para descrever a altura como variável resposta a partir do diâmetro da árvore, sem perda de precisão, trazendo grande vantagem pela diminuição do tempo gasto no levantamento de dados, com conseqüente redução de custos (FINGER, 1992; VANCLAY, 1994; BARTOSZECK et al., 2002).

A relação hipsométrica descreve a relação entre o diâmetro à altura do peito e a altura das árvores, sendo essa relação, na maioria das vezes, representada por um modelo matemático (SCHIMIDT, 1977). De acordo com CHAPMAN & MEYER (1949), a relação hipsométrica não apresenta um relacionamento biológico definido, havendo grande variabilidade em altura para um mesmo diâmetro em sítio e idades diferentes. Tal situação também foi comprovada por outros autores, que concluíram que a relação hipsométrica é influenciada pela idade, sítio, densidade, tamanho da copa e espécie (LOETSCH et al., 1973; FINGER, 1992; SCOLFORO, 1997; BARTOSZECK et al., 2004).

Assim, a relação hipsométrica possibilita conhecer com precisão a altura das árvores, indiretamente, reduzindo o tempo e o custo do inventário florestal (ZANON et al., 1996). Dessa maneira, modelos matemáticos para descrever a relação hipsométrica têm sido testados por diversos pesquisadores para diversas espécies florestais. Segundo FINGER (1992), para se obter um modelo matemático para descrever a relação hipsométrica, devem-se testar vários modelos e selecionar aquele de melhor ajuste, segundo o critério de seleção usado. Para acácia-negra, dentre estes estudos, destacam-se aqueles conduzidos por PEREIRA et al. (2000), CALDEIRA et al. (2002), BARICHELLO et al. (2005) e SAIDELLES et al. (2009).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver equações para descrever a relação hipsométrica em povoamentos de acácia-negra ao final da rotação e verificar se as equações da literatura podem ser utilizadas para a estimativa da altura total nessa espécie.

Material e métodos

O presente estudo foi desenvolvido em plantios comerciais de acácia-negra, aos sete anos de idade (final da rotação), estabelecidos nos municípios de Cristal e Piratini, principais produtores desta espécie no Rio Grande do Sul.

Em cada município, foi selecionado um povoamento e, em cada povoamento, foi selecionada uma encosta de exposição norte, onde foram demarcadas três parcelas localizadas no terço superior, médio e inferior. O tamanho das parcelas foi de 9 x 14 m, equivalendo a 4 linhas de plantio e 10 plantas em cada linha. Ao total, foram instaladas seis parcelas e mensuradas 156 árvores. O espaçamento de plantio desses povoamentos foi de 3 x 1,5 metros (2.222 plantas por hectare).

Nas parcelas, todas as plantas foram mensuradas quanto à circunferência à altura do peito (cap) e a altura total (h), a fim de se obter o conjunto de dados para estabelecer a relação hipsométrica. A circunferência foi medida com fita métrica graduada; e a altura, com clinômetro eletrônico (*Haglöf*), acompanhado de trena digital (*Sonin Multi-Measure Combro-pró*, 10300) para a verificação da distância da árvore.

Análise dos dados e grau de esbeltez

Inicialmente, foi avaliada a distribuição dos indivíduos através da análise da frequência por classe de diâmetro e de altura total. O intervalo de classe utilizado foi de 2 cm e de 2 m, respectivamente, para estas duas variáveis.

Os dados foram avaliados por meio das estatísticas: média, variância, desvio-padrão, medidas de assimetria e de curtose, e da correlação de Pearson.

A assimetria foi avaliada quanto aos seguintes aspectos:

- Simétrica: moda = mediana = média aritmética.

- Assimetria à direita ou positiva, se: moda < mediana < média aritmética.

- Assimetria à esquerda ou negativa, se: moda > mediana > média aritmética.

Se o coeficiente de assimetria, em módulo, estivesse entre 0,15 e 1, a assimetria era considerada moderada. Se o mesmo fosse maior que 1, a assimetria era considerada forte.

A curtose refere-se ao grau de achatamento ou elevação relativa de uma distribuição, considerada usualmente em relação

à distribuição normal. PEREIRA & TANAKA (1990) e CRESPO (1998) definiram três tipos de curvas em relação à curtose:

- Leptocúrtica: distribuição que tem um pico relativamente alto, com excesso negativo, ou seja, coeficiente de curtose < 0,263.

- Platicúrtica: curva que apresenta um topo mais achatado, com excesso positivo, isto é, coeficiente de curtose > 0,263.

- Mesocúrtica: curva intermediária, com coeficiente de curtose igual a 0,263.

A significância da estimativa de correlação de Pearson, entre a altura total e o diâmetro à altura do peito, foi avaliada por meio do teste *t*, a 5% de significância. A correlação também foi avaliada pelos seguintes critérios (em módulo) propostos por CALLEGARI-JACQUES (2003):

- Correlação nula = 0;
- Correlação fraca = 0 | 0,3;
- Correlação regular = 0,3 | 0,6;
- Correlação forte = 0,6 | 0,9;
- Correlação muito forte: 0,9 | 1,0;
- Correlação plena: 1,0.

A relação altura (h) e diâmetro à altura do peito (dap) foi analisada por meio do grau de esbeltez (GE), expresso por:

$$GE = h / dap \quad (1)$$

Segundo DURLO & DENARDI (1998), o GE auxilia na compreensão da arquitetura das árvores e do grau de concorrência entre as árvores da comunidade, bem como na possível definição de práticas silviculturais. Essa variável também foi analisada por meio da estatística descritiva, assimetria e curtose da distribuição de frequências e associação com as variáveis altura e diâmetro à altura do peito. Além disso, ele define qual é a tendência do crescimento em altura em relação à do diâmetro à altura do peito.

Tabela 1 É Modelos de relação hipsométrica utilizados para cálculos da altura das árvores de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade. *Hypsometric relation models used for the estimation of seven year old Acacia mearnsii De Wild plants height.*

Autor	Modelo em sua forma linear	Modelo
CURTIS	$\ln h = b_0 + b_1 * 1/dap + e$	1
AZEVEDO et al. (2011)	$\ln h = b_0 + b_1 * d^2 + e$	2
*	$\ln h = b_0 + b_1 * 1/dap + b_2 * 1/dap^2 + e$	3
STOFFELS	$\ln h = b_0 + b_1 * \ln dap + e$	4
HENRIKSEN	$h = b_0 + b_1 * \ln dap + e$	5
*	$h = b_0 + b_1 * 1/dap + e$	6
AZEVEDO et al. (2011)	$h = b_0 + b_1 * d^2 + e$	7
*	$h = b_0 + b_1 * 1/dap + b_2 * 1/dap^2 + e$	8
PARABÓLICO	$h = b_0 + b_1 * dap + b_2 * dap^2 + e$	9
*	$h = b_0 + b_1 * 1/dap^2 + e$	10

*Citado por CALDEIRA et al. (2002). Em que: h = altura total (m); dap = diâmetro à altura do peito (cm); e = erro (aleatório) associado a cada estimativa.

Suficiência amostral

Para simular o tamanho da amostra necessário para o ajuste dos modelos, foi realizado o cálculo da suficiência amostral em relação às variáveis altura e diâmetro à altura do peito, em que:

$$n = \frac{t^2 CV^2}{E^2} \quad (2)$$

Em que: n - tamanho da amostra necessária; t - valor da probabilidade da distribuição de *Student*; CV - coeficiente de variação em porcentagem, e E - expectativa de erro, em relação à variável em questão, fixado em 10%.

Modelos hipsométricos testados

Foram testados 10 modelos (Tabela 1), que comumente são utilizados para estimar a altura em função do diâmetro à altura do peito.

Seleção da melhor equação

Foram utilizados cinco critérios para a avaliação da qualidade dos ajustes e para a escolha da melhor equação: coeficiente de determinação ajustado; erro-padrão da estimativa (em porcentagem); valor de F; índice de Schlaegel (IA, para o caso das equações logarítmicas), e análise gráfica dos resíduos (em porcentagem).

Para eliminar a discrepância logarítmica, os valores estimados pelas equações logaritmizadas foram corrigidos através da multiplicação entre a altura estimada de cada indivíduo pela expressão do Índice de Meyer ($IM = \frac{h}{dap^{1,3}}$). Desta forma, para o caso das equações logarítmicas, o S^2_{yx} e o índice de Schlaegel (que por sua vez, substitui o coeficiente de determinação ajustado) foram recalculados para unidades aritméticas.

Validação de equações existentes na literatura

No sentido de verificar o desempenho de equações que já foram propostas na literatura, foram testadas as desenvolvidas por BARICHELLO et al. (2005) e SAIDELLES et al. (2009). O desempenho das equações foi verificado através do teste de Qui-quadrado (χ^2) a 5% de probabilidade, para estabelecer a existência de diferenças estatisticamente significativas para o teste, pelo erro-padrão da estimativa (em porcentagem) e análise gráfica dos resíduos, em função dos valores estimados.

Resultados e discussão

Análise exploratória da relação diâmetro-altura e grau de esbeltez

As estatísticas obtidas para todos os valores mensurados são apresentadas na Tabela 2. A média encontrada para altura foi de 16,95 m para um intervalo de confiança variando de 16,47 a 17,43 m. O coeficiente de variação foi de 20,06%, para uma amplitude de 5,60 a 23,80 m. Já a média encontrada para o diâmetro à altura do peito foi de 12,79 cm, para um intervalo de confiança de 12,28 a 13,30 cm, e coeficiente de variação de 28,09% para uma amplitude de 3,66 a 21,49 cm.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas para altura e diâmetro à altura do peito, mensurados em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. *Descriptive statistics for the variables height and diameter at breast height measured in stands of seven year old Acacia mearnsii De Wild plants in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.*

Estatística	Altura (m)	Diâmetro (cm)
Média	16,95	12,79
Erro-padrão	0,24	0,26
Desvio-padrão	3,40	3,59
Intervalo (Máximo – Mínimo)	18,20	17,83
Mínimo	5,60	3,66
Máximo	23,80	21,49
Intervalo de confiança ($\alpha = 0,05$)	$16,47 \leq x \leq 17,43$	$12,28 \leq x \leq 13,30$

A distribuição da frequência observada (em porcentagem) em relação às classes de altura e diâmetro é apresentada na Figura 1. Foram observadas distribuições unimodais, com índice de assimetria de -0,54 para altura e -0,24 para o diâmetro à altura do peito, indicando uma distribuição assimétrica negativa e moderada. O índice de curtose para a altura foi de 0,51, revelando, assim, uma forma platicúrtica; já para o dap, o índice de curtose foi de -0,30, denotando um formato leptocúrtico, ou seja, distribuição que tem um pico relativamente alto, com excesso negativo.

FINGER (1982), avaliando a distribuição diamétrica da acácia-negra em diferentes idades, evidenciou, em povoamentos com idade de 4,5; 5,5; 6,5 e 7,5 anos, uma distribuição assimétrica à esquerda. Provavelmente, estas divergências em relação ao presente trabalho tenham sido em função do melhoramento genético dessa espécie, de tal forma a acentuar as frequências das árvores com diâmetros maiores, deslocando, assim, a moda para a direita da média. Em relação ao achatamento da curva, o mesmo autor também encontrou uma distribuição diamétrica platicúrtica.

Para a altura, as maiores frequências ocorreram entre os centros de classe 16 e 18

metros (Figura 1), que, juntas, representaram aproximadamente 52% das frequências dos indivíduos. Já para o diâmetro à altura do peito, as maiores frequências ocorreram entre os centros de classes 12 a 14 cm, representando 44% das frequências.

A análise da relação da altura com o diâmetro, em sua forma natural ou transformada, foi significativa ($p \leq 0,05$) para todos os casos (Figura 2). A transformação da variável diâmetro para seu inverso, inverso ao quadrado e logarítmica ocasionou uma melhora na relação com a altura. Quanto à intensidade das estimativas obtidas, todas apresentaram correlação forte (0,6 | 0,9) com a altura, sendo observados poucos pontos dispersos da tendência central da massa de dados.

A distribuição da frequência observada (em porcentagem) em relação às classes de grau de esbeltez é apresentada na Figura 3A. Foi observada uma distribuição unimodal, com índice de assimetria de 1,08, denotando uma assimetria positiva e forte. O índice de curtose foi de 3,15, revelando uma distribuição platicúrtica.

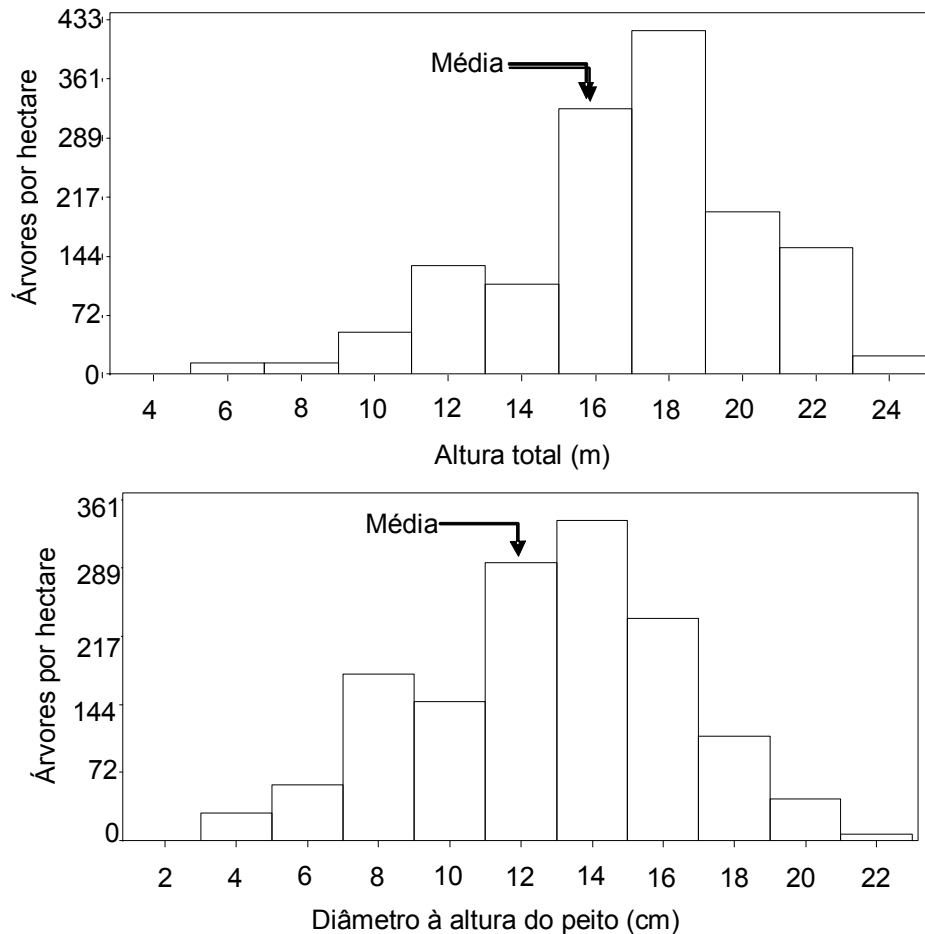


Figura 1 - Distribuição das frequências observadas de altura e diâmetro à altura do peito mensuradas em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. *Observed frequencies distribution of height and diameter at breast height measured in stands of seven year old Acacia mearnsii plants in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.*

A média encontrada para o grau de esbeltez foi de 1,39, para um intervalo de confiança variando de 1,34 a 1,43. O coeficiente de variação foi de 22,27%, para uma amplitude de 0,63 a 3,01. Segundo DURLO & DENARDI (1998), essa relação morfométrica auxilia na compreensão da arquitetura das árvores e do grau de concorrência entre as árvores da comunidade, bem como na possível definição de práticas silviculturais, como, por exemplo, no cálculo do número de árvores por hectare. O grau de esbeltez demonstrou-se fortemente correlacionado com o diâmetro à altura do peito (Figura 3B), ao contrário do que foi observado com a variável altura, em que se obteve uma correlação muito fraca (Figura 3A). Em relação ao diâmetro à altura do peito, o comportamento do grau de esbeltez apresentou uma tendência decrescente, ou seja, as árvores com menores diâmetros resultaram nos maiores valores, evidenciando, assim, maior crescimento em altura do que em diâmetro. Já em relação à altura, conforme SELLE & VUADEN (2010), a

diminuição do grau de esbeltez com o aumento da altura das árvores significa que estas, a cada metro que crescem em altura, crescem mais que um centímetro em dap, tornando-se mais robustas e estáveis.

TONINI & ARCO-VERDE (2005), ao estudarem a morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia, também observaram a diminuição do grau de esbeltez com o aumento do dap e da altura. SELLE & VUADEN (2010) observaram, em seu estudo, que a associação entre o grau de esbeltez com o dap é bem superior à constatada entre essa mesma variável e a altura total das árvores, assim como no presente caso.

Foi observado que aproximadamente 64% das frequências do grau de esbeltez estão alocadas nas classes entre 1,125 e 1,625, indicando que, nesse intervalo, está o ponto de equilíbrio morfométrico decorrente das demandas por luz, água, nutrientes e estabilidade dimensional, fatores decisivos para a sobrevivência dos indivíduos. Além disso, foi observado

que o grau de esbeltez baixo ou alto, dado pelo centro de classes de 0,75 e igual ou maior que 2, resulta em aproximadamente 10% das frequências, evidenciando, assim, um desequilíbrio vital. Árvores que se encontram nessas duas classes

são em decorrência da competição entre as árvores do povoamento, resultando em estiamento, e também por árvores que tiveram seu crescimento normal interrompido, por exemplo, devido à quebra das ponteiros.

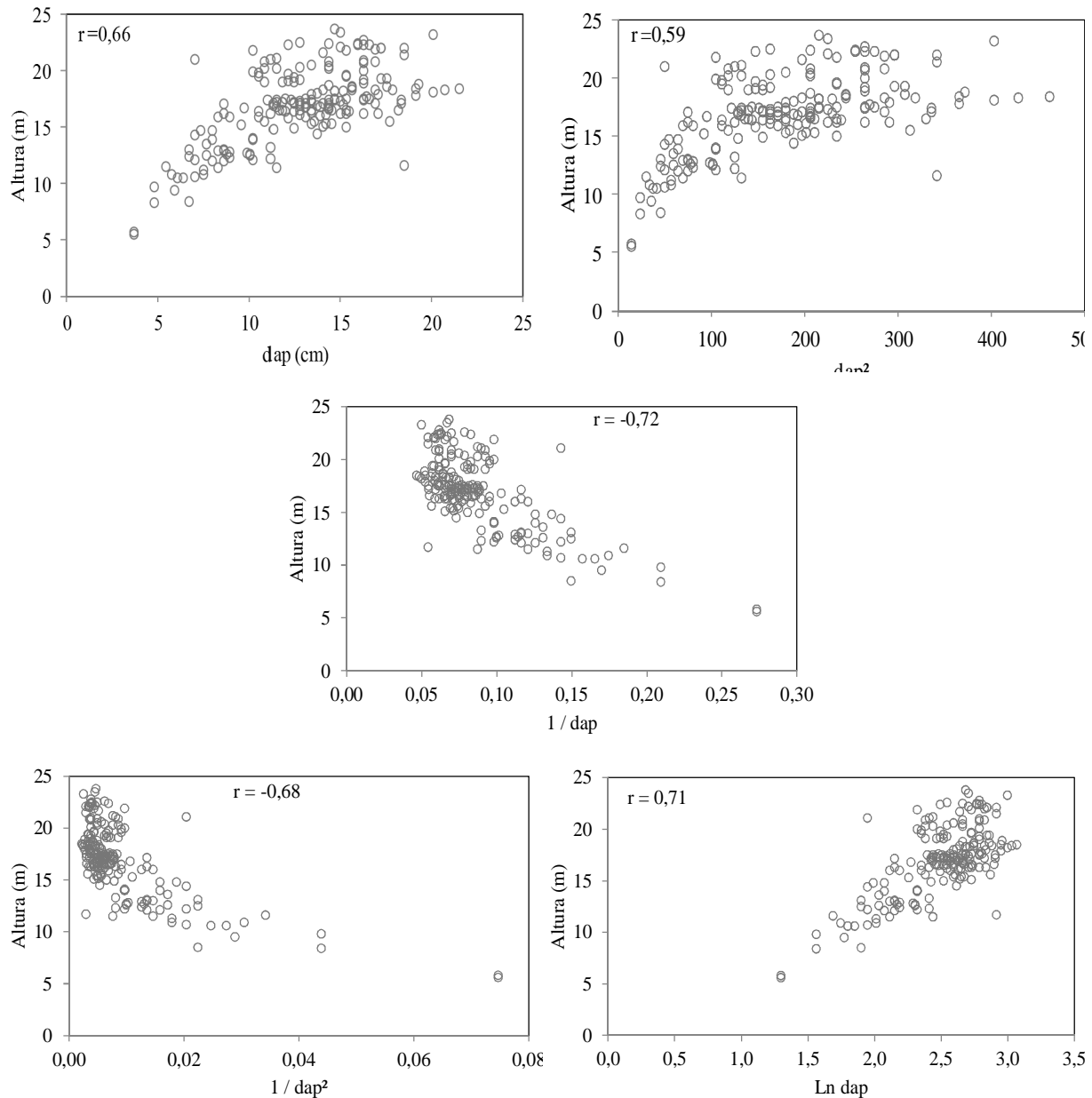


Figura 2 - Correlação entre a altura com: diâmetro à altura do peito (dap), dap ao quadrado (dap^2), inverso do dap ($1/d$), inverso do quadrado do dap ($1/d^2$) e logaritmo do dap ($\ln d$), de árvores mensuradas em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. *Correlations between plant height and diameter at breast height (dap), squared dap (dap^2), inverse of dap ($1/d$), inverse of the squared dap ($1/d^2$), and the logarithm of dap ($\ln d$) of seven year old *Acacia mearnsii* De Wild plants in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.*

Tamanho da amostra

A intensidade amostral para a variável altura e diâmetro à altura do peito atendeu à expectativa de erro fixada em 10%.

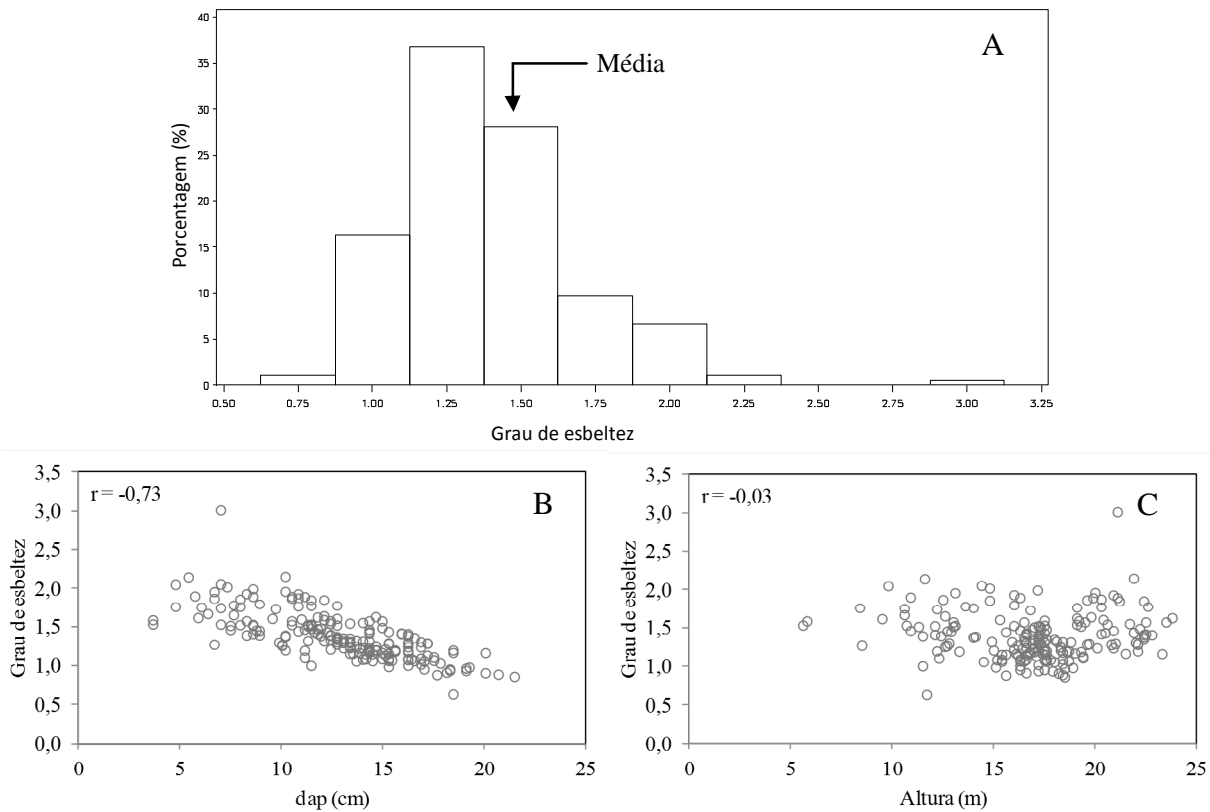


Figura 3 - Distribuição das frequências observadas do grau de esbeltez (A) e correlação entre o grau de esbeltez com o diâmetro à altura do peito (B) e altura (C) de árvores mensuradas em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. *Distribution observed frequencies of slenderness degree (A) and correlation between the degree of slenderness and diameter at breast height (B) and height (C) of seven year old Acacia mearnsii De Wild trees in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.*

Ajuste dos modelos

Na Tabela 3, são apresentadas as estatísticas do ajuste dos modelos testados. Todas as equações apresentaram valores

significativos de F, indicando que as mesmas podem explicar a variabilidade da altura total em função do diâmetro à altura do peito.

Tabela 3 - Estatísticas do ajuste de modelos de relação hipsométrica testados em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. *Statistics of the adjustment of models of the hypsometric relation tested in stands of seven year old Acacia mearnsii De Wild trees in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.*

Modelo	b ₀	b ₁	b ₂	R ² aj	S _{yx} %	IA	FM	F	α F
1	3,2581	-5,1930	----	0,63	13,94	0,52	1,01	335,064	3,91x10 ⁻⁴⁴
2	2,5490	0,0151	----	0,35	1,20	0,29	1,02	106,864	3,11x10 ⁻²⁰
3	3,1851	-3,8129	-5,3335	0,63	0,98	0,53	1,01	169,388	3,34x10 ⁻⁴³
4	1,4769	0,5315	----	0,56	1,04	0,46	1,01	254,004	4,18x10 ⁻³⁷
5	-1,5899	7,4097	----	0,50	14,17	---	---	196,570	2,67x10 ⁻³¹
6	23,0076	67,6945	----	0,52	13,92	---	---	210,715	8,33x10 ⁻³³
7	13,0168	0,0222	----	0,35	16,21	---	---	104,594	6,53x10 ⁻²⁰
8	22,6670	67,6954	0,0009	0,52	13,96	---	---	104,909	1,46x10 ⁻³¹
9	0,6136	2,2001	-0,0637	0,52	13,85	---	---	107,885	3,54x10 ⁻³²
10	19,0921	243,7790	----	0,46	14,77	---	---	165,456	8,76x10 ⁻²⁸

R²aj = Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx}% = Erro-padrão da estimativa em porcentagem; IA = Índice de Schaeffel; valor de F, FM = Fator de Meyer; αF = Valor da probabilidade dado pela distribuição de Fisher.

O modelo 3, dado por $\ln h = 3,1851 - 3,8129 \cdot 1/\text{dap} - 5,3335 \cdot 1/\text{dap}^2$, apresentou vantagem em relação aos demais para a estimativa da altura, denotando, assim, o maior IA - índice de Schlaegel (0,52), menor $S_{yx}\%$ (0,98%) e equilibrada distribuição de resíduos ao longo da linha estimativa (Figura 4). Do mesmo modo, o modelo 1, dado por $\ln h = 3,2581 - 5,1930 \cdot 1/\text{dap}$, revelou o segundo melhor desempenho, configurado pelas estatísticas do IA (0,51) e adequada distribuição de resíduos (Figura 1). Outros modelos também demonstraram bons ajustes, a exemplo do modelo 4, $\ln h = 1,4769 + 0,5315 \cdot \ln \text{dap}$, com $S_{yx}\%$ de 1,04%, IA de 0,46 e também adequada à distribuição de resíduos (Figura 4).

Os três modelos testados que apresentaram melhor desempenho foram os logarítmicos, uma vez que, para o presente caso, os mesmos demonstraram-se mais flexíveis, ou seja, conseguiram explicar melhor a variabilidade da altura em função do diâmetro à altura do peito. Resultados semelhantes também foram observados por SAIDELLES et al. (2009), em que as equações logarítmicas foram superiores em desempenho, quando comparadas com as aritméticas. BARTOSZECK et al. (2002), trabalhando com *Mimosa scabrella* Benth (bracatinga) na região metropolitana de Curitiba, indicaram que, entre 19 modelos matemáticos e genéricos testados, a equação logarítmica de Curtis foi a que apresentou melhores resultados para a estimativa da altura total das árvores, corroborando, também, o observado por ANDRADE et al. (2006) em um fragmento da Mata Atlântica, no Rio de Janeiro, e por AZEVEDO et al. (2011) em Vitória da Conquista, na Bahia, em um experimento com espécies de sete-cascas (*Alchornea triplinervia* (Spreng.) Müll. Arg.) e ipê-amarelo (*Tabebuia serratifolia* (Vahl) Nich).

Na Figura 4, são apresentadas as distribuições de resíduos ao longo da linha estimativa para os 10 modelos hipsométricos ajustados.

Seleção da melhor equação

O ajuste do modelo 3, $\ln h = 3,1851 - 3,8129 \cdot 1/\text{dap} - 5,3335 \cdot 1/\text{dap}^2$, foi o que apresentou melhores resultados em termos de erro-padrão da estimativa, índice de Schaegele e distribuição de resíduos ao longo de toda a linha estimativa. Portanto, foi a equação selecionada para prever a altura em povoamentos de acácia-negra ao final da rotação, em função do diâmetro à altura do peito (Figura 5). Esse mesmo modelo ajustado, porém sem a transformação da altura, foi selecionado por BARICHELLO et al. (2005) como sendo o melhor para a predição da altura, em povoamentos de acácia-negra com oito anos de idade.

Validação de equações existentes na literatura

Dois equações existentes na literatura foram avaliadas quanto ao desempenho para a estimativa da altura. A primeira ($h = 23,8636 - 130,0915 \cdot 1/\text{dap} + 240,2359 \cdot 1/\text{dap}^2$) é oriunda do trabalho conduzido por BARICHELLO et al. (2005) em povoamentos de acácia-negra, com oito anos de idade, no município de Minas do Leão-RS. A segunda ($\ln h = 1,3786 - 2,0796 \cdot 1/\text{dap}$) é resultante do trabalho realizado por SAIDELLES et al. (2009) em um povoamento de acácia-negra, com quatro anos de idade, na região de Arroio dos Ratos-RS, tendo sido a mais eficaz para estimar a altura total.

As duas equações ajustadas existentes na literatura foram testadas com o conjunto de dados do presente trabalho, objetivando-se sua validação. Os valores do teste de Qui-quadrado para ambas as equações não foram significativos, revelando, assim, que os valores estimados não diferem dos observados ($p > 0,05$). O erro-padrão da estimativa obtido foi de 16,52% e 15,13%, respectivamente, e a distribuição de resíduos demonstrou-se adequada (Figura 6). Dessa maneira, as equações obtidas por BARICHELLO et al. (2005) e SAIDELLES et al. (2009) demonstraram-se adequadas para prever a altura de povoamentos de acácia-negra.

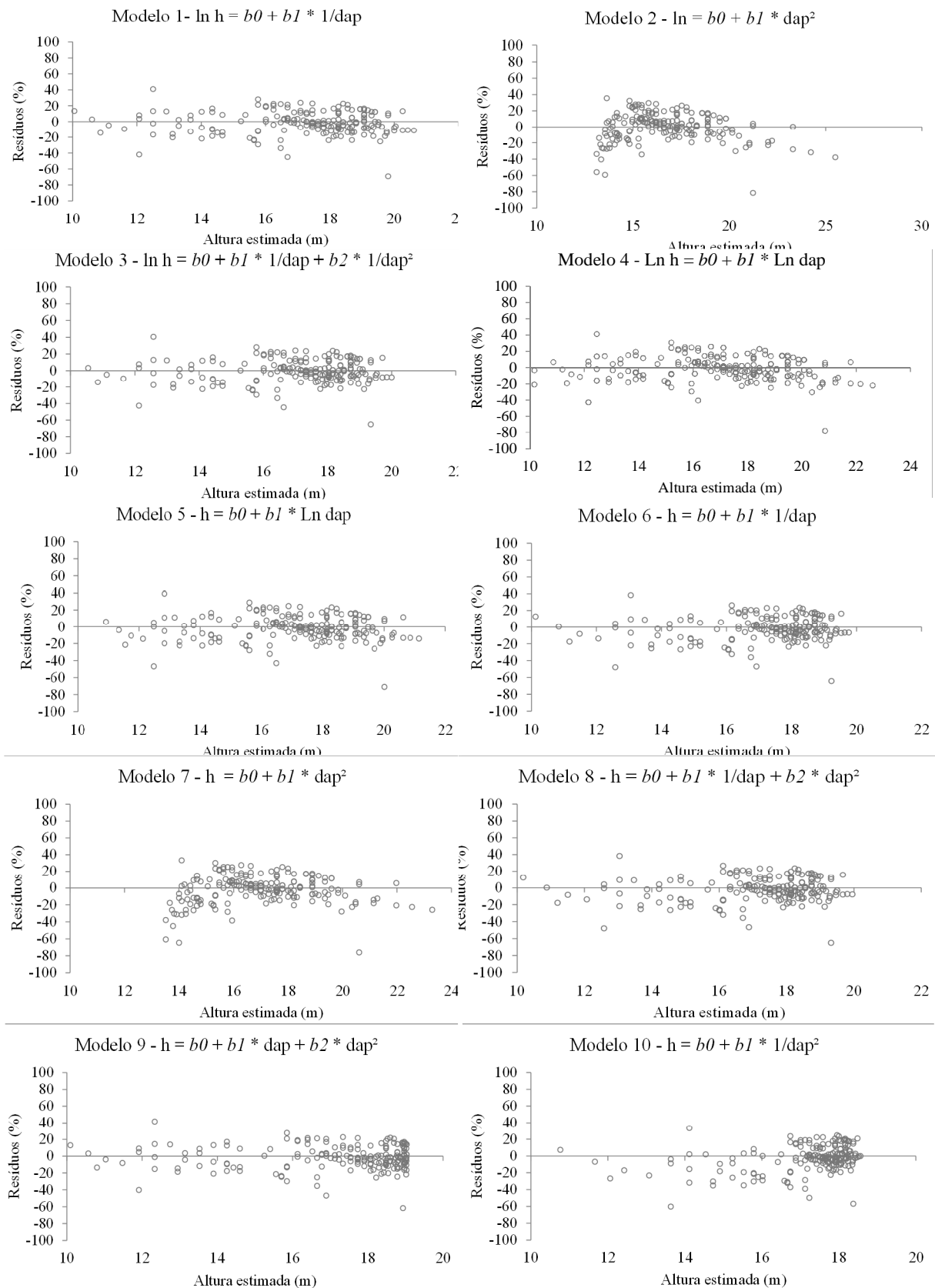


Figura 4 - Distribuição de resíduos obtidos a partir de funções matemáticas empregadas para descrever a relação hipsométrica em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. Residual distribution obtained from mathematical functions used to describe the hypsometric relation in stands of *Acacia mearnsii* De Wild with seven years old in the municipal districts of Cristal and Piratini, Rio Grande do Sul, Brazil..

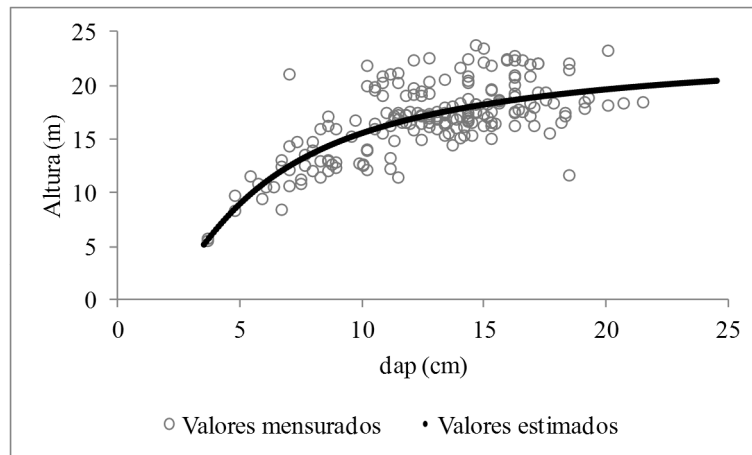


Figura 5: Comportamento da função $\ln h = 3,1851 - 3,8129 \ 1/dap - 5,3335 \ 1/dap^2$ para descrever a relação hipsométrica em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild, com sete anos de idade, nos municípios de Cristal e Piratini, Rio Grande do Sul. Behavior of the function $\ln h = 3.1851 - 3.8129 \ x \ 1/dap - 5.3335 \ x \ 1/dap^2$ to describe the hypsometric relation of seven year old *Acacia mearnsii* De Wild trees in the municipalities of Cristal and Piratini, state of Rio Grande do Sul, Brazil.

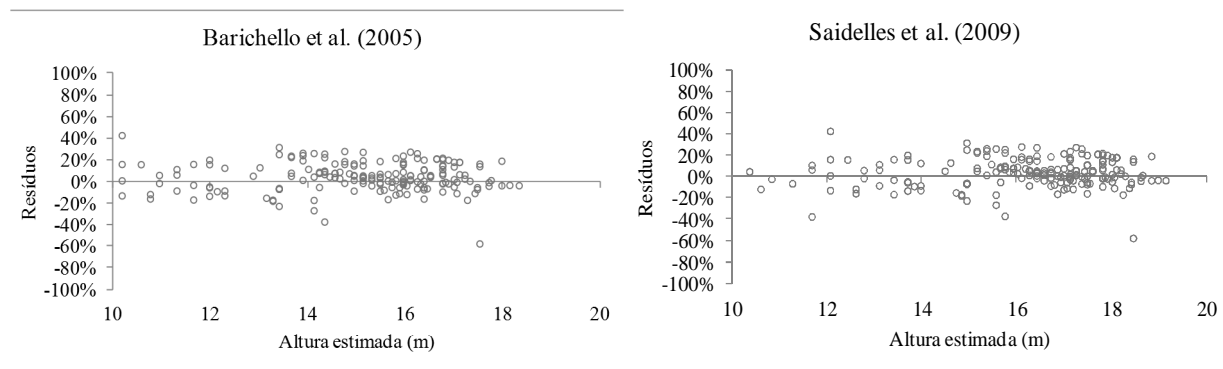


Figura 6: Distribuição dos resíduos em relação à altura estimada através da entrada de um novo conjunto de dados nas equações propostas por BARICHELLO et al. (2005) e SAIDELLES et al. (2009) para descrever a relação hipsométrica, em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild. Residual distribution regarding to the estimated height in relation to the entrance of a new dataset in the equations proposed by BARICHELLO et al. (2005) and SAIDELLES et al. (2009) to describe the hypsometric relation in stands of *Acacia mearnsii* De Wild.

Conclusões

A equação de relação hipsométrica, $\ln h = 3,1851 - 3,8129 \ 1/dap - 5,3335 \ 1/dap^2$, proporcionou o melhor ajuste para a relação altura e diâmetro, sendo apropriada para estimar a altura da acácia-negra ao final da rotação.

As equações citadas na literatura por BARICHELLO et al. (2005) e por SAIDELLES et al. (2009) também podem ser utilizadas para a estimativa da altura total das árvores de acácia-negra.

Agradecimentos

Ao Centro de Excelência em Pesquisas sobre Fixação de Carbono na Biomassa (BIOFIX) e à empresa TANAC S. A., por colaborar e conceder suporte financeiro à

pesquisa. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de estudo de mestrado.

Referências

ANDRADE, V. C. L.; MARTINS, S. V.; CALEGARILLO, N.; CHICHARRO, J. F. Influência de três sistemas de amostragem na estimativa da relação hipsométrica e do volume de árvores em um fragmento de Mata Atlântica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.70, p.31-37, 2006.

AZEVEDO, G. B.; SOUSA, G. T. de O.; SILVA, H. F.; BARRETO, P. dos A. B.; NOVAES, A. B. Seleção de modelos hipsométricos para quatro espécies florestais nativas em plantio misto no

- Planalto da Conquista na Bahia. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.7, n.12, p.1-13, 2011.
- BARICHELLO, L. R.; SCHUMACHER, M. V.; MUNARI, L. V. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.2, p.129-135, 2005.
- BARTOSZECK, A. C. P. S.; MACHADO, S. A.; AFONSO FILHO, F.; OLIVEIRA, E. B. Modelagem da relação hipsométrica para bracingais da região metropolitana de Curitiba - PR. **Floresta**, Curitiba, v.32, n.2, p.189-204, 2002.
- 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, MG, v.28, n.24, p.517-533, 2004.
- CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; SHEEREN, L. W.; BARICHELLO, L. R.; WATZLAWICK, L. F. **Relação hipsométrica para *Acacia mearnsii* com diferentes idades**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 10p. (Boletim Técnico, 45).
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística É Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: ArtMed, 2003. 207p.
- CHAPMAN, H. H.; MEYER, W. H. **Forest mensuration**. New York: McGraw-Hill, 1949. 522p.
- CRESPO, A. A. **Estatística Fácil**. 16th ed. São Paulo: Saraiva, 1998. 207p.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.55-66, 1998.
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, Centro de Pesquisas Florestais, 1992. 269p.
- FINGER, C. A. G. **Distribuição de diâmetros em acácia negra, *Acacia mearnsii* de Wild, em diferentes povoamentos e idades**. 1982. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F. HALLER, K. E. **Forest inventory**. Munchen: BLV Verlagsgesellschaft, 1973. v.2, 469p.
- PEREIRA, J. C.; CALDERIA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; SANTOS, E. M. Estimativa do conteúdo de nutrientes em um povoamento de *Acacia mearnsii* De Wild. no Rio Grande do Sul – Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.24, n.2, p.193-199, 2000.
- PEREIRA, W.; TANAKA, O. K. **Estatística - conceitos básicos**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1990. 371p.
- SAIDELLES, F. L. F.; CALDEIRA, M. V. W.; SCHUMACHER, M. V.; BALBINOT, R. Determinação do ponto de amostragem para a quantificação de micronutrientes em acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Floresta**, Curitiba, v.39, n.1, p.77-87, 2009.
- SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETTI JUNIOR, A.; SANTANA, D. L. Q. **O complexo gomose da acácia-negra**. Colombo: Embrapa-CPNF, 2001, p.8 (Instrução Técnica, 44)
- SCHIMIDT, P. B. Determinação indireta da relação hipsométrica para povoamentos de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v.8, n.1, p.24-27, 1977.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira**. Belo Horizonte: CEMIG, Lavras: UFLA: FAEPE, 1997. 292p.
- SELLE, G. L.; VUADEN, E. Crescimento de seis espécies nativas na região central do estado do Rio Grande do Sul. **Ambiência**, Guarapuava. v.6, n.1, p.169–192, 2010.
- SIMON, A. A. A cadeia produtiva da acácia-negra, aspectos econômicos, sociais e ambientais. In: STROHSCHOEN, A. G.; REMPEL, C. **Reflorestamento e recuperação ambiental: Ambiente e tecnologia: o desenvolvimento sustentável em foco**. Lajeado: Univates, 2005. p.149-166.
- STEIN, P. P.; TONIETTO, L. Black Wattle Silviculture in Brazil. In: BROWN, A. G.; KO, H. C. (Ed.). **Black wattle and its utilization**. Barton: RIRDC, 1997. p.78-82.
- TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.633-638, 2005.
- VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.
- ZANON, M. L. B.; FINGUER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; KLEIN, J. E. M.; COELHO, M. C. B. Funções para descrever a relação altura e diâmetro de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.26, n.1, p.87-90, 1996.