

SELEÇÃO DE EQUAÇÕES DE VOLUME E PESO SECO COMERCIAL PARA *Pinus taeda*

Hilton Thadeu Zarate do Couto¹; Sílvia Cristina Vettorazzo¹

RESUMO: Sete modelos matemáticos foram avaliados quanto ao seu desempenho para selecionar equações de volume e peso seco comercial do fuste, com e sem casca, para árvores de *Pinus taeda* com 6 e 11 anos de idade, plantadas na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná. Com base nos critérios adotados para avaliação comparativa, o modelo da variável combinada ($Y = \beta_0 + \beta_1 d^2h$) foi considerado o mais apropriado, tanto em termos de precisão como pelo ajustamento obtido para estimar os volumes e pesos para árvores com 6 anos de idade e para o agrupamento de todas as árvores estudadas. Para as plantações com 11 anos de idade, o melhor modelo para estimar volume e peso foi o que empregou a variável independente d^2 ($Y = \beta_0 + \beta_1 d^2$), selecionado pela simplicidade e boa precisão.

PALAVRAS-CHAVES: Análise de regressão, equação de volume, equação de peso, *Pinus taeda*

SELECTION OF MERCHANTABLE VOLUME AND DRY WEIGHT EQUATIONS FOR *Pinus taeda*

ABSTRACT: Seven mathematical models were evaluated in their prediction ability to estimate merchantable-stem volume and dry weight, both inside and outside bark, for 6 and 11-years-old *Pinus taeda* trees, planted in Telêmaco Borba, State of Paraná. On the basis of criteria used for comparative analysis, the combined variable model ($Y = \beta_0 + \beta_1 d^2h$) was judged to be the most suitable, due to accuracy and precision of the estimates of individual tree volumes and dry weights for 6-year-old plantations and for grouping of all trees studied. For 11-year-old plantations, the best model to estimate volume and dry weight used the independent variable d^2 ($Y = \beta_0 + \beta_1 d^2$), selected due to simplicity and good prediction ability.

KEY WORDS: regression analysis, volume equation, weight equation, *Pinus taeda*.

¹ Departamento de Ciências Florestais da ESALQ-USP, CP. 9, 13418-900 - Piracicaba-SP.

1. INTRODUÇÃO

Nos inventários florestais, um dos principais objetivos é a obtenção de estimativas de volume ou peso, sendo para isso muito utilizadas as equações de volume ou peso, comercial ou total, que têm geralmente a seguinte forma funcional: $Y = f(d, h)$, sendo Y o volume (v) ou peso (p) individual da árvore, d é o DAP e h é a altura total da árvore. Essas equações de volume e peso servem para estimar volumes e pesos individuais de árvores e, com base em algum método de amostragem, pode-se estimar o volume ou peso de um povoamento florestal (Spurr, 1952; Veiga, 1981; Husch, Miller e Beer, 1982; Clutter et al., 1992).

A escolha de equações é um fase importante no trabalho do inventário florestal, já que qualquer erro de tendência na estimativa do volume ou peso por árvore terá reflexos na estimativa da população, causando uma sub ou sobre avaliação da produção (Campos et al., 1985). Nos últimos 170 anos, as estimativas quantitativas do volume das árvores têm evoluído, com o desenvolvimento de um número considerável de modelos matemáticos para ajustar equação de volume (Schumacher e Hall, 1933; Stoate, 1945; Spurr, 1952; Cunia, 1964; Loetsch, Zohrer e Haller, 1973; Husch et al., 1982). Por outro lado, somente nas últimas décadas as equações de peso ou biomassa têm sido determinadas em resposta ao aumento da necessidade de tais informações (Burkhardt e Strub, 1973; Young, 1976; Madgwick, 1976; Madgwick e Kreh, 1980; Brasil et al., 1983; Couto, 1983; Valeri, Soares e Monteiro, 1989). Nos inventários florestais, os modelos que têm

sido mais utilizados para estimar os volumes e pesos dos componentes das árvores para diferentes condições edafo-climáticas e espécies florestais são o logarítmico de Schumacher e Hall e o da variável combinada de Spurr, principalmente pela precisão e ajustamento obtidos e pela facilidade de utilização (Ferreira, Melo e Kajira, 1977; Paula Neto et al., 1983; Campos, Trevizol Júnior e Paula Neto, 1985; Silva et al., 1994).

O objetivo deste trabalho foi analisar vários modelos matemáticos sugeridos na literatura, com a finalidade de compará-los quanto ao desempenho, para selecionar equações de volume e peso seco comercial, com e sem casca, para *Pinus taeda* plantados na região de Telêmaco Borba, Estado do Paraná

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em seis talhões comerciais (área total \approx 60 ha) de *Pinus taeda*, com 6 e 11 anos de idade (16, 020A, 020B, 172, 173, 183), classificados como sendo de média produtividade, localizados na Guarda Florestal Trinita da Fazenda Monte Alegre, de propriedade da KLABIN Fabricadora de Papel e Celulose S.A., Município de Telêmaco Borba, PR. Na região, a altitude média é de 600 m e o clima é o subtropical úmido com chuvas em todas as estações do ano, podendo ocorrer seca no período de inverno, sendo denominado de Cfa pela classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 19°C e a pluviosidade média anual é de 1475 mm. As unidades de solos predominantes na área estudada foram

os Latossolos Vermelho-Escuro e Vermelho-Amarelo álicos, com textura média. O espaçamento inicial das plantações com 6 anos de idade foi de 2,5 x 1,5 m, enquanto naquelas com 11 anos, foi de 2,5 x 1,7 m. As plantações mais velhas sofreram um desbaste

do tipo seletivo e sistemático com 7 anos de idade. A Tabela 1 apresenta a caracterização dos talhões estudados, com base em dados do inventário de parcelas permanentes, as quais tinham área aproximada de 600 m².

Tabela 1.

Características das plantações de *Pinus taeda* estudadas.

Characteristics to the studied Pinus taeda plantations.

Talhão	Idade do plantio (anos)	DAP médio (cm)	Altura média (m)	Altura média dominante (m)	Nº de árvores por hectare	Área basal média (m ² ha ⁻¹)
016	6	12,4	11,1	12,8	2602	33,0
020A	6	11,0	9,0	10,7	2436	24,3
020B	6	11,6	8,3	9,7	2411	27,4
172	11	18,3	15,4	16,4	1057	28,9
173	11	17,6	14,7	16,5	1186	30,4
183	11	20,5	17,6	19,3	1070	37,1

Em cada talhão, nas proximidades das parcelas permanentes, foram selecionadas 8 árvores-amostra, sendo uma árvore em cada classe de DAP, cujo intervalo de classe foi de 2 cm, totalizando-se 48 árvores-amostra. Após o abate de cada árvore, foram feitas medições da altura total e da altura comercial considerando-se o tronco principal até um diâmetro limite comercial com casca de 8 cm, e também foram retirados discos de madeira em três posições do tronco: ao nível do solo, a 50 e 100% da altura comercial. Em cada posição foram extraídos 2 discos com espessura de 4 cm, sendo um disco para determinação da densidade básica da madeira e outro para tomada do diâmetro, com e sem casca, após secagem em estufa. Para calcular o volume comercial por árvore, procedeu-se conforme o método de Smalian, descrito por Husch et al. (1982), utilizando-se os

comprimentos e diâmetros do tronco, com e sem casca, nas posições 0, 50 e 100% da altura comercial. O peso seco comercial foi determinado em função do volume total para cada torete, da densidade básica média do torete e da somatória final dos valores obtidos para cada árvore. A densidade básica dos discos foi determinada pela relação entre o peso da matéria seca do disco após secagem em estufa a 105°C e o volume verde, determinado pelo método da balança hidrostática. Os valores de DAP, altura, volume e peso seco obtidos para as árvores-amostra são apresentados na Tabela 2.

Para estimar a produção de volume e peso comercial das árvores, testaram-se os seguintes modelos matemáticos para ajustar as equações de volume e peso, sendo aplicado o método dos mínimos quadrados para o ajuste:

Tabela 2.

Valores mínimo, médio e máximo das variáveis estudadas nas 48 árvores-amostra, com 6 e 11 anos de idade.

Minimum, average and maximum values of the studied variables in the 48 sample trees, with 6 and 11 years of age.

Variável	6 anos			11 anos		
	mínimo	média	máximo	mínimo	média	máximo
DAP (cm)	9,0	14,1	20,0	12,9	19,4	28,0
Altura total (m)	9,0	10,6	12,4	13,0	16,0	18,9
Volume comercial com casca (m ³)	0,0175	0,0782	0,1849	0,0808	0,2458	0,4756
Volume comercial sem casca (m ³)	0,0154	0,0661	0,1566	0,0645	0,2076	0,4119
Peso seco comercial com casca (kg)	7,490	26,898	60,620	31,750	99,786	184,360
Peso seco comercial sem casca (kg)	6,580	22,691	51,640	25,220	84,005	157,930

- (1) $Y = \beta_0 + \beta_1 d$
- (2) $Y = \beta_0 + \beta_1 d^2$
- (3) $Y = \beta_0 + \beta_1 d^2 h$
- (4) $Y = \beta_0 + \beta_1 d^2 + \beta_2 h + \beta_3 d^2 h$
- (5) $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln d$
- (6) $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln d^2 h$
- (7) $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h$

onde: Y = volume (m³) ou peso (kg); d = DAP (cm); h = altura total das árvores (m); ln = logaritmo neperiano.

Esses modelos foram ajustados para cada idade e para o agrupamento das idades com a finalidade de aumentar o tamanho da amostra.

Para a escolha dos melhores modelos de volume e peso, foram adotados os seguintes critérios: (a) exame do quadro da análise da variância (soma de quadrados dos resíduos (SQR), quadrado médio dos resíduos (QMR) e teste F para o modelo completo e teste F sequencial); (b) análise das medidas de precisão: coeficiente de determinação (R²), erro padrão da estimativa ou erro padrão residual. (Sy.x) e erro padrão da estimativa

expresso como uma porcentagem da média aritmética da variável dependente (Sy.x%), sendo, neste caso, interpretado de forma análoga ao coeficiente de variação; (c) distribuição gráfica dos valores residuais e (d) exame das estimativas dos parâmetros da equação pelo teste t (Couto, 1977; Draper e Smith, 1981; Ahrens, 1983; Campos et al., 1985). Para o processamento dos dados e análises estatísticas utilizaram-se os procedimentos do pacote estatístico SAS (SAS, 1990).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análises de regressão foram empregadas para o ajustamento dos 7 modelos de volume e peso seco comercial, com e sem casca, a partir de dados de árvores-amostra provenientes de plantações com 6 e 11 anos de idade. As estimativas dos parâmetros e as principais estatísticas para esses modelos de volumes, com e sem casca, e modelos de pesos, com e sem casca, são apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 3.

Coefficientes de regressão e principais estatísticas dos 7 modelos de volume comercial com casca testados para árvores de *Pinus taeda* com 6 e 11 anos de idade.

Regression coefficients and main statistics of the 7 commercial volume models with bark tested for Pinus elliottii trees with 6 and 11 years of age.

Modelo	Coeficientes				F	R ²	Sy.x	Sy.x%
	β_0	β_1	β_2	β_3				
Plantações com 6 anos de idade								
(1)	-0,12175	0,01418			298,40	0,9491	0,0110	14,07
(2)	-0,02350	0,00049			570,53	0,9727	0,0081	10,30
(3)	-0,00880	0,000038			1229,87	0,9872	0,0054	6,86
(4)	-0,00343	-0,00007	-0,00033	0,00004	364,30	0,9874	0,0059	7,50
(5)	-9,83755	2,71220			426,47	0,9638	0,0073	9,28
(6)	-11,51271	1,15628			750,09	0,9791	0,0057	7,20
(7)	-12,02733	2,17161	1,53173		369,41	0,9801	0,0059	7,47
Plantações com 11 anos de idade								
(1)	-0,26284	0,02625			918,55	0,9808	0,0179	7,28
(2)	-0,01638	0,00066			1078,37	0,9836	0,0161	6,55
(3)	0,01613	0,000035			545,68	0,9681	0,0231	9,38
(4)	-0,19848	0,00105	0,01175	-0,000025	404,57	0,9870	0,0156	6,35
(5)	-8,09205	2,23788			913,00	0,9807	0,0178	7,22
(6)	-9,98595	0,97741			967,88	0,9817	0,0228	9,29
(7)	-9,17934	2,07922	0,55423		499,79	0,9833	0,0200	8,10
Todas as plantações								
(1)	-0,26288	0,02543			488,83	0,9314	0,0339	20,38
(2)	-0,05022	0,00070			786,31	0,9562	0,0271	16,28
(3)	-0,00104	0,000037			1786,67	0,9802	0,0182	10,94
(4)	-0,08107	0,00026	0,00591	-0,000019	736,37	0,9848	0,0164	9,86
(5)	-10,05804	2,85461			539,04	0,9374	0,0315	18,90
(6)	-11,03642	1,09662			2466,52	0,9856	0,0243	14,58
(7)	-11,15636	2,04288	1,30608		1322,01	0,9869	0,0237	14,23

Todos os modelos testados para ajustar equações de volume e peso apresentaram valores de F altamente significativos ($P < 0,01$), indicando que esses modelos podem explicar uma alta proporção da variabilidade observada do volume e peso das árvores-amostra.

Pode-se verificar, pelos resultados apresentados nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, que nas

plantações com 6 anos o modelo (1) foi o que apresentou os piores resultados, com os mais baixos valores de R² e com os erros percentuais mais altos. Quatro modelos propostos mostraram precisão bastante aceitável para estimar os volumes e pesos individuais de árvores, com e sem casca, sendo os seguintes em ordem decrescente de precisão: o modelo (3) da variável combinada

(Spurr, 1952; Madgwick, 1976), com erro padrão percentual variando entre 6,1 e 6,9%; o modelo logarítmico (6) da variável combinada (Spurr, 1952 e Madgwick, 1976), com erro percentual entre 6,3 e 7,2%; o modelo logarítmico (7) de Schumacher e Hall (1933), com erro percentual entre 6,5 e 7,5% e o modelo (4), conhecido como modelo

australiano (Stoate, 1945), com erro percentual entre 6,6 e 7,5%. Comparando-se o melhor modelo (3) com o pior modelo (1) para estimar volumes de árvores com e sem casca, constatou-se uma diferença no erro padrão percentual em torno de 7% e, para estimar pesos com e sem casca, essa diferença caiu para 6%.

Tabela 4.

Coefficientes de regressão e principais estatísticas dos 7 modelos de volume comercial sem casca testados para árvores de *Pinus taeda* com 6 e 11 anos de idade.

Regression coefficients and main statistics of the 7 commercial volume models without bark tested for Pinus elliottii trees with 6 and 11 years of age.

Modelo	Coeficientes				F	R ²	Sy.x	Sy.x%
	β_0	β_1	β_2	β_3				
Plantações com 6 anos de idade								
(1)	-0,10547	0,01216			323,70	0,9529	0,0091	13,71
(2)	-0,02121	0,00042			682,10	0,9771	0,0063	9,57
(3)	-0,00853	0,000033			1603,20	0,9901	0,0040	6,09
(4)	0,00682	-0,000074	-0,00145	0,000039	480,54	0,9904	0,0044	6,62
(5)	-10,09112	2,74314			520,89	0,9702	0,0056	8,39
(6)	-11,76532	1,16683			831,79	0,9811	0,0042	6,33
(7)	-11,90686	2,299489	1,27009		391,45	0,9812	0,0042	6,79
Plantações com 11 anos de idade								
(1)	-0,23546	0,02287			944,19	0,9813	0,0154	7,41
(2)	-0,02110	0,00058			1362,81	0,9870	0,0125	6,02
(3)	0,00744	0,000031			575,32	0,9697	0,0196	9,43
(4)	-0,15522	0,00092	0,00848	-0,000021	515,30	0,9898	0,0121	5,81
(5)	-8,49597	2,30854			875,80	0,9799	0,0144	6,91
(6)	-10,45462	1,01104			920,47	0,9808	0,0199	9,59
(7)	-9,60647	2,15289	0,56607		474,58	0,9824	0,0171	8,21
Todas as plantações								
(1)	-0,22842	0,02186			507,70	0,9338	0,0286	20,35
(2)	-0,04593	0,00061			906,25	0,9618	0,0217	15,46
(3)	-0,00332	0,000032			1990,28	0,9822	0,0148	10,54
(4)	-0,06089	0,00023	0,00396	-0,000017	781,56	0,9857	0,0137	9,73
(5)	-10,32756	2,88836			617,63	0,9449	0,0249	17,71
(6)	-11,28929	1,10612			2806,27	0,9873	0,0195	13,90
(7)	-11,35665	2,12780	1,22376		1410,41	0,9877	0,0194	13,80

Tabela 5.

Coefficientes de regressão e principais estatísticas dos 7 modelos de peso seco comercial com casca testados para árvores de *Pinus taeda* com 6 e 11 anos de idade.

Regression coefficients and main statistics of the 7 commercial volume models with bark tested for Pinus elliottii trees with 6 and 11 years of age.

Modelo	Coeficientes				F	R ²	Sy.x	Sy.x%
	β_0	β_1	β_2	β_3				
Plantações com 6 anos de idade								
(1)	-38,73497	4,65301			348,38	0,9561	3,342	12,43
(2)	-6,43455	0,15952			666,84	0,9766	2,442	9,08
(3)	-1,53808	0,01243			1093,02	0,9856	1,859	6,91
(4)	3,20367	0,00031	-0,53044	0,01279	326,53	0,9859	2,024	7,53
(5)	-3,53079	2,54178			592,95	0,9737	2,253	8,39
(6)	-5,05900	1,07814			751,88	0,9792	1,884	7,01
(7)	-4,75400	2,23981	0,85562		359,46	0,9796	1,869	6,95
Plantações com 11 anos de idade								
(1)	-99,19555	10,26999			398,02	0,9567	10,634	10,67
(2)	-2,72067	0,25838			414,58	0,9584	10,150	10,17
(3)	10,21425	0,01371			274,91	0,9385	12,673	12,70
(4)	-92,67723	0,49091	5,67733	-0,01425	145,23	0,9646	10,206	10,23
(5)	-1,78318	2,13138			401,53	0,9571	10,381	10,43
(6)	-3,60124	0,93458			435,89	0,9603	12,156	12,18
(7)	-3,07543	1,95026	0,65867		209,68	0,9610	11,488	11,54
Todas as plantações								
(1)	-106,67464	10,18634			289,56	0,8894	17,652	27,05
(2)	-21,63392	0,28232			391,74	0,9158	15,400	23,59
(3)	-2,56945	0,01500			810,97	0,9575	10,944	16,77
(4)	-38,11336	0,04092	3,18393	-0,01062	321,20	0,9659	10,084	15,45
(5)	-4,28968	2,91671			310,98	0,8962	16,259	24,91
(6)	-5,42402	1,13701			1178,71	0,9704	12,939	19,83
(7)	-5,80426	1,79735	1,80107		983,80	0,9825	11,994	18,38

Pela análise de introdução de variáveis pelo teste F parcial, verificou-se que além da variável independente d^2h , nenhuma outra variável independente apresentou contribuição significativa para explicar uma parte da variabilidade dos volumes e pesos, sendo, portanto, selecionado o modelo (3) para árvores com 6 anos de idade, gerando-se as seguintes equações para estimar os

volumes e pesos, com e sem casca, com as respectivas medidas de precisão:

$$v_{cc} = -0,008801 + 0,0000381 d^2h$$

$$R^2 = 0,9872$$

$$Sy.x = 0,005363$$

$$v_{sc} = -0,008532 + 0,0000326 d^2h$$

$$R^2 = 0,9901$$

$$Sy.x = 0,004028$$

Tabela 6.

Coefficientes de regressão e principais estatísticas dos 7 modelos de peso seco comercial sem casca testados para árvores de *Pinus taeda* com 6 e 11 anos de idade.

Regression coefficients and main statistics of the 7 commercial volume models without bark tested for Pinus elliottii trees with 6 and 11 years of age.

Modelo	Coeficientes				F	R ²	Sy.x	Sy.x%
	β_0	β_1	β_2	β_3				
Plantações com 6 anos de idade								
(1)	-33,51887	3,98495			366,53	0,9582	2,791	12,30
(2)	-5,87027	0,13669			771,28	0,9797	1,945	8,57
(3)	-1,66002	0,01065			1265,74	0,9875	1,479	6,52
(4)	6,48215	-0,00664	-0,88475	0,01179	403,71	0,9886	1,559	6,87
(5)	-3,78502	2,57224			589,47	0,9736	1,755	7,75
(6)	-5,31188	1,08847			608,38	0,9744	1,482	6,54
(7)	-4,63211	2,36312	0,59253		309,05	0,9763	1,480	6,53
Plantações com 11 anos de idade								
(1)	-89,28570	8,94973			419,97	0,9589	9,016	10,73
(2)	-5,40216	0,22536			474,87	0,9635	8,272	9,85
(3)	5,96277	0,01194			289,85	0,9415	10,754	12,80
(4)	-72,37885	0,42818	4,13327	-0,01218	167,48	0,9691	8,289	9,87
(5)	-2,20585	2,21334			372,32	0,9539	8,591	10,25
(6)	-4,09159	0,97026			396,86	0,9566	10,492	12,49
(7)	-3,48645	2,03384	0,65278		191,34	0,9575	9,792	11,69
Todas as plantações								
(1)	-92,44396	8,73310			303,14	0,8938	14,791	26,91
(2)	-19,66110	0,24247			435,34	0,9236	12,546	22,83
(3)	-3,16320	0,01285			895,26	0,9613	8,926	16,24
(4)	-28,66578	0,03693	2,22759	-0,00936	328,91	0,9667	8,526	15,51
(5)	-4,56161	2,95026			339,32	0,9041	13,066	23,77
(6)	-5,67653	1,14610			1253,04	0,9721	10,454	19,02
(7)	-5,99900	1,88794	1,70929		889,00	0,9807	9,993	18,18

$$p_{c,c} = -1,538083 + 0,012433 d^2h$$

$$R^2 = 0,9856$$

$$Sy.x = 1,858701$$

$$p_{s,c} = -1,660022 + 0,010647 d^2h$$

$$R^2 = 0,9875$$

$$Sy.x = 1,479091$$

Nas plantações com 11 anos de idade, constatou-se a superioridade de 4 modelos para estimar volume e peso, sendo os seguintes em ordem decrescente de precisão: o modelo (4), com erros percentuais de 5,8 e 6,4%, respectivamente para estimar volumes sem e com casca e erros de 10% para estimar pesos com e sem casca; o modelo (2) que emprega a variável independente d^2 (Loetsch,

Zohrer e Haller, 1973), com erros de 6 e 6,6%, respectivamente para estimar volumes sem e com casca e erros de 10% para estimar pesos com e sem casca; o modelo logarítmico da variável independente d (Madgwick, 1976), com erros percentuais de 6,9 e 7,2%, respectivamente para estimar volumes sem e com casca e erros de 10% para estimar pesos com e sem casca e o modelo (1), que emprega a variável independente d , com erros de 7,4 e 7,3% para volumes sem e com casca e erros de 10,7% para estimar pesos com e sem casca. Entre os modelos matemáticos testados para ajustar equações de volume e peso para árvores com 11 anos de idade, o menos preciso foi o da variável combinada (3), entretanto, como já discutido, este foi o melhor modelo para as árvores com 6 anos de idade.

Analisando-se a distribuição gráfica dos resíduos das soluções dos modelos de volume e peso para árvores com 11 anos de idade, verificou-se que as equações referentes aos modelos (2) e (4) apresentaram amplitudes aproximadas de dispersão dos resíduos variando entre 20 e 30% para volumes com e sem casca e entre 40 e 45%, para pesos com e sem casca.

Pela análise de introdução de variáveis pelo teste F parcial, constatou-se que além da variável d^2 , nenhuma outra variável independente, quando acrescida ao modelo, apresentou contribuição significativa para explicar uma parte da variabilidade dos volumes e pesos, com e sem casca, para árvores com 11 anos de idade. Assim sendo, o melhor modelo para estimar os volumes e pesos, com e sem casca, foi o modelo (2), sendo selecionado pela sua simplicidade e boa precisão. A partir desse modelo, foram

geradas as seguintes equações para estimar os volumes e pesos, com e sem casca, para árvores com 11 anos de idade:

$$\begin{aligned} v_{cc} &= -0,016380 + 0,000661 d^2 \\ R^2 &= 0,9836 \\ Sy.x &= 0,016097 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{sc} &= -0,021102 + 0,000577 d^2 \\ R^2 &= 0,9870 \\ Sy.x &= 0,012491 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{cc} &= -2,720673 + 0,258379 d^2 \\ R^2 &= 0,9584 \\ Sy.x &= 10,1504 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{sc} &= -5,402157 + 0,225362 d^2 \\ R^2 &= 0,9635 \\ Sy.x &= 8,27219 \end{aligned}$$

Os 7 modelos matemáticos foram também ajustados para o total de árvores das duas idades, sendo as estimativas dos coeficientes e as principais estatísticas apresentadas nas Tabelas 3, 4, 5 e 6. Constatou-se que os modelos da variável combinada (3) e o australiano (4) foram os que apresentaram os melhores resultados. Para o modelo (3), os erros percentuais foram de aproximadamente 11% para estimar volumes com e sem casca e de 16% para estimar pesos com e sem casca, enquanto, para o modelo (4), os erros percentuais foram de aproximadamente 10% para estimar volumes com e sem casca e de 15% para estimar pesos com e sem casca.

Como essas estatísticas não forneceram base conclusiva quanto ao julgamento do grau de exatidão dos modelos (3) e (4), pela análise do comportamento dos valores residuais das equações referentes a ambos

modelos pode-se verificar que a distribuição dos resíduos da equação da variável combinada (3) foi mais uniforme para os diâmetros estudados, sendo assim, considerada a mais homogênea.

Verificou-se, pela análise de introdução de variáveis pelo teste F parcial, que além da variável combinada, nenhuma outra variável independente, quando acrescentada ao modelo, contribuiu significativamente para explicar uma parte da variabilidade dos volumes e pesos, com e sem casca, para todas as árvores. Assim, as equações para estimar os volumes e pesos com casca para o total das árvores das duas idades foram:

$$v_{c c} = -0,001035 + 0,000037 d^2h$$

$$R^2 = 0,9802$$

$$Sy.x = 0,01820$$

$$v_{s c} = -0,003315 + 0,000032 d^2h$$

$$R^2 = 0,9822$$

$$Sy.x = 0,01482$$

$$p_{c c} = -2,569453 + 0,014999 d^2h$$

$$R^2 = 0,9575$$

$$Sy.x = 10,9441$$

$$p_{s c} = -3,163200 + 0,012853 d^2h$$

$$R^2 = 0,9613$$

$$Sy.x = 8,92592$$

Com o agrupamento de todas as árvores das duas idades, houve diminuição da precisão das estimativas fornecidas pelas equações resultantes do ajuste dos melhores modelos para cada idade, principalmente para as árvores com 6 anos. Nas estimativas dos volumes com e sem casca, os erros percentuais passaram de aproximadamente

6% para 11%, respectivamente nos modelos por idade e para o agrupamento das idades, enquanto nas estimativas dos pesos com e sem casca, os erros percentuais passaram de 7 e 10%, respectivamente para árvores com 6 e 11 anos de idade, para 16%. Este fato pode ser explicado pelo aumento da variabilidade dos dados provenientes do agrupamento das idades, pois árvores com mesmo diâmetro tiveram uma relativa variação de alturas entre as plantações mais jovens não desbastadas e as mais velhas, que haviam sofrido desbaste. O grau de associação entre DAP e altura total das árvores diminuiu com a idade da plantação e com o agrupamento de todas as árvores das duas idades, enquanto os graus de associação entre volumes com e sem casca e DAP aumentaram com a idade, mas caíram com o agrupamento de todas as árvores. Já os graus de associação entre pesos com e sem casca e DAP não foram influenciados pela idade da plantação, mas diminuíram com o agrupamento de todas as árvores. Machado et al. (1994), estudando o comportamento de *Pinus elliotti* no Estado do Paraná, verificaram a existência de efeitos significativos da idade e de alterações na estrutura natural dos povoamentos pelos desbastes sobre a relação hipsométrica.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados, pode-se concluir que o modelo da variável combinada foi o que apresentou os melhores resultados para estimar volume e peso comercial, com e sem casca, para árvores com 6 anos de idade e para o total das árvores das duas idades estudadas. Para plantações com 11 anos de

idade, o modelo selecionado para estimar volume e peso comercial, com e sem casca, foi o da variável independente d^2 , que aliou simplicidade e boa precisão. Ao ajustar os modelos propostos para o total das árvores das duas idades, verificou-se diminuição da precisão das estimativas dos volumes e pesos das árvores, principalmente para as mais jovens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, S. Importância da distribuição de resíduos de regressão na seleção de equações de volume. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.609-614, 1983.
- BRASIL, M.A.M.; VEIGA, R.A. de A.; COELHO, L.C.C. et al. Peso de matéria seca da madeira de cinco espécies do gênero *Pinus* aos 20 anos de idade. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.739-741, 1983.
- BURKHART, H.E.; STRUB, M.R. Dry weight estimates for loblolly pine: a comparison of two techniques. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS, SECTION 4.01: Mensuration, growth and yield. Maine: University of Maine, 1973. p.29-40.
- CAMPOS, J.C.C.; TREVIZOL JÚNIOR, T.L.; PAULA NETO, F. de. Ainda, sobre a seleção de equações de volume. **Revista Árvore**, Viçosa, v.9, n.2, p.115-126, 1985.
- CLUTTER, J.L.; FORSTON, J.C.; PIENAAR, L.V. et al. **Timber Management**: a quantitative approach. Malabar: Krieger Publ. Co, 1992. p.3-29.
- COUTO, H.T.Z. do. Equações de volume e peso para estimar a biomassa de *Eucalyptus*. In: SIMPÓSIO SOBRE ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL. CESP/ IPEF: São Paulo, 1983. p.38-58.
- COUTO, H.T.Z. do. Tabelas de volume para brotação de touças de *Eucalyptus saligna* Sm. **IPEF**, Piracicaba, n.15, p.117-121, 1977.
- CUNIA, T. Weighted least squares method and construction of volume tables. **Forest Science**, Washington, v.10, p.180-191, 1964.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1981. 709p.
- FERREIRA, C.A.; MELLO, H. do A.; KAJIYA, S. Estimativa do volume de madeira aproveitável para celulose em povoamentos de *Eucalyptus* spp.: determinação de equações para o cálculo do volume de povoamentos de *Eucalyptus* spp. **IPEF**, Piracicaba, n.14, p.29-50, 1977.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEER, T.W. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1982. 402p.
- LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, K.E. **Forest inventory**. Munique: BLV-Verlag, 1973. v.2. 469p.
- MACHADO, S.A.; BAILEY, R.L.; BASSO, S.F. et al. Análise do comportamento da relação hipsométrica com respeito à idade para plantações de *Pinus elliotti* no Estado do Paraná. **Cerne**, Lavras, v.1, n.1, p.5-12, 1994.
- MADGWICK, H.A.I. Mensuration of forest biomass. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS CONGRESS, 16, OSLO BIOMASS STUDIES, SECTION 4.01: Mensuration, growth and yield. Oslo: University of Maine, 1976. p.13-27.
- MADGWICK, H.A.I.; KREH, R.E. Biomass estimation for virginia pine trees and stands. **Forest Science**, Washington, v.26, n.1, p.107-111, 1980.
- PAULA NETO, F.de ; SOUZA, A.L.de; QUINTAES, P.C.G. et al. Análise de equações volumétricas para *Eucalyptus* spp., segundo o método de regeneração na região de São José de Melo, MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v.7, n.1, p.56-70, 1983.
- SAS INSTITUTE. **SAS User's guide**: Statistics. Release 6.03. Cary: SAS Institute Inc.,1990. 584p.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.dos. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.
- SILVA, J.A.A.da; MACHADO, S.A.; BORDERS, B.E. et al. Aumento da precisão de modelos volumétricos através do uso da transformação de Box e Cox. **Cerne**, Lavras, v.1, n.1, p.13-16, 1994.
- SPURR, S.H. **Forest inventory**. New York: Ronald Press, 1952. 476p.
- STOATE, I.N. The use of a volume equation in pine stands. **Australian Forestry**, Camberra, v.9, p.48-52, 1945.
- VALERI, S.V.; SOARES, R.V.; MONTEIRO, R.F.R. Exportação de biomassa de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades. **Revista Floresta**, Curitiba, v.19, n.1/2, p.23-29, 1989.

VEIGA, R.A.de A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 1981, Piracicaba. **Primeiro...** Piracicaba: IPEF, 1981. p.93-102.

YOUNG, H.E. A summary and analysis of weight table studies. In: INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS CONGRESS, 16, OSLO BIOMASS STUDIES, SECTION 4.01: Mensuration, growth and yield. Oslo: University of Maine, 1976. p.251-259.