

Tabela de volume do povoamento para florestas nativas de *Araucaria angustifolia* nos estados da região sul do Brasil

SEBASTIÃO A. MACHADO*
WALQUÍRIA PIZATTO**

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver equações de volume do povoamento para florestas primárias e secundárias de *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze. Os dados provieram de 323 unidades amostrais de 20x125 m, distribuídas em toda a região de ocorrência natural do pinheiro nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, obtidos por ocasião do inventário florestal realizado no sul do Brasil pela Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná- FUPEF em convênio com o extinto IBDF. O processo de amostragem usado foi o estratificado com alocação ótima. As informações computadas a nível de unidade amostral foram: área basal por hectare, volume comercial com e sem casca por hectare, diâmetro médio, altura comercial média e número de árvores por hectare. Foram ajustadas 19 equações de volume do povoamento selecionadas na literatura para todo o conjunto de dados. O processo *Stepwise* foi também utilizado com a finalidade de encontrar que variáveis independentes seriam as melhores para explicar a variação do volume por hectare, tanto para as florestas primárias como para as secundárias. Os resultados mostraram que a combinação da área basal com a altura média constitui-se na melhor variável independente para o ajuste de equações de volume do povoamento para florestas naturais de pinheiro na região sul do Brasil.

Palavras-chave: volume do povoamento, equação de volume, *Araucaria angustifolia*

ABSTRACT

Stand volume table for natural forests of *Araucaria angustifolia* in the Brazilian southern states. The purpose of this research was to develop stand volume equations for both primary and secondary *Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze. forests. The data came from 323 sample plots distributed throughout the Paraná pine region in the states of Parana, Santa Catarina and Rio Grande do Sul. The survey methodology was the stratified sampling with optimum allocation. Computed information at sample plot level included: basal area per hectare, commercial volume over and inside bark per hectare, average DHB, average height and number of trees per hectare. Nineteen stand volume equations were fitted for the whole data. The Stepwise regression procedure was also used to select independent variables which were most correlated to the variation of volume per hectare for both primary and secondary araucaria forests. The results showed that the combination of basal area per hectare with average height was the best independent variable to fit stand volume equations for natural *Araucaria angustifolia* forests in the southern region of Brazil.

Key words: stand volume table, volume equations, *Araucaria angustifolia*

*Eng. florestal, M.Sc., Ph.D., Professor Senior, Departamento de Silvicultura e Manejo - UFPR, bolsista do CNPq

**Eng. florestal, bolsista de Aperfeiçoamento do CNPq

INTRODUÇÃO

O pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia* (Bert) O. Ktze.) é uma das espécies florestais nativas mais importantes do Brasil. No passado as florestas com pinheiros cobriam uma vasta região nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Hoje esta espécie é encontrada em áreas reduzidas em maciços florestais primários e secundários. No entanto, o pinheiro, pelo que representou e ainda pode representar para a região, merece ser melhor conhecido.

Esta pesquisa procurou propor uma alternativa que permita estimar o volume por unidade de área, partindo-se de medições ou estimativas de variáveis facilmente obtidas no campo, tais como área basal por hectare e altura média.

Pela importância do tema, a literatura contém inúmeras pesquisas publicadas. Como no caso de equações de volume individual, muitos modelos matemáticos têm sido testados para o ajuste de equações de volume do povoamento. SPURR (1952) em uma vasta pesquisa testou vários tipos de equações de regressão com diferentes combinações da área basal, altura média, idade, índice de sítio e altura dominante como variáveis independentes de modelos. Este autor chegou à conclusão que a área basal por unidade de área e a altura média ou altura dominante foram as variáveis independentes que melhor explicavam as variações de volume por unidade de área.

MACHADO (1973), trabalhando com dados de um bosque secundário natural da floresta tropical úmida em Turrialba, Costa Rica, verificou que somente a área basal por hectare (G) como variável independente foi responsável por 93 % da variação do volume por hectare.

FERREIRA (1976) utilizou o modelo da variável combinada $V = b_0 + b_1 G h_{dom}$ para estimar diretamente o volume cilíndrico de *Eucalyptus alba* e *Eucalyptus saligna* por unidade de área em função de diferentes médias de alturas em combinação sempre com a área basal por hectare. Constatou que a combinação da área basal com altura média das cinco maiores árvores da parcela resultou na equação mais precisa.

SILVA (1979), trabalhando com dados de medições de 766 parcelas amostrais em povoamentos de *Eucalyptus* spp em toda região do cerrado brasileiro, também concluiu que a equação da variável combinada, tanto na sua forma aritmética como logarítmica, se ajustava bem aos dados.

FIGUEIREDO FILHO (1983) estudou modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área. Usando dados oriundos de uma floresta tropical úmida na Amazônia brasileira, este autor salientou que os modelos logarítmicos testados foram sempre superiores aos aritméticos. As variáveis independentes usadas nos modelos matemáticos foram: área basal por hectare, altura comercial média e suas combinações e transformações.

Dentre vários modelos aritméticos e logarítmicos pré-selecionados da literatura, ROSOT (1989) destacou que o mais eficiente foi o de Stoat para ajustar dados de povoamentos de *Pinus taeda* com 13 anos de idade, localizados no município de Pirai do Sul - Paraná. Mais recentemente UNG &

OUELLET (1991) testaram modelos tipo equação de Schumacher para o ajuste de equações de volume do povoamento para *Picea mariana* na província de Quebec - Canadá. Usaram a área basal por hectare, a altura média ou a altura dominante como variáveis independentes. O melhor resultado foi encontrado ao utilizar o modelo: $V = b_0 + G^{b_1} h_{dom}^{b_2}$.

Neste trabalho procurou-se testar vários modelos de regressão pré-selecionados na literatura, bem como desenvolver novos modelos pelo processo *Stepwise* para estimar o volume por hectare para florestas nativas primárias e secundárias de pinheiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados nesta pesquisa provieram basicamente do inventário florestal do pinheiro no Sul do Brasil, realizado na região de ocorrência natural da *A. angustifolia*, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, abrangendo uma área total de aproximadamente 160.000 km². Este inventário florestal foi realizado nos anos de 1977 e 1978 pela Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná - FUPEF, do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, em convênio com IBAMA (extinto IBDF).

Ao todo foram instaladas e medidas 323 parcelas de 20x125 m (2.500 m²), sendo 142 localizadas em florestas primárias tipo I e 181 em florestas secundárias tipo II. O processo de amostragem usado foi o estratificado com alocação ótima. Para efeito prático, a área total foi dividida em 8 unidades de trabalho. Toda a metodologia de amostragem, medições e características de solos, relevo, vegetação, clima, localização, bem como os resultados obtidos estão exaustivamente descritos no relatório final do referido inventário florestal.

Partindo-se da existência das fichas de campo do Inventário Florestal do Pinheiro no Sul do Brasil, a metodologia empregada na pesquisa consistiu em:

- a) digitação de diâmetros-DAP em centímetros, alturas médias- \bar{h} em metros, com aproximação para decímetros de todas as árvores de pinheiros contidas em cada uma das 323 unidades amostrais, bem como a referida tipologia florestal e unidade de trabalho em que se encontrava a parcela amostral;
- b) estimativa do volume com e sem casca de cada árvore, usando equação de volume desenvolvida para o pinheiro por ocasião do inventário florestal referido anteriormente;
- c) computação do volume com e sem casca para cada uma das 323 unidades amostrais de 2.500 m² de área, provenientes da somatória dos volumes individuais;
- d) computação de área basal, altura comercial média, diâmetro médio e número de árvores por unidade amostral e;
- e) elaboração de planilha de dados básicos para a presente pesquisa, contendo as seguintes informações a nível de parcela amostral: número da

parcela, tipologia florestal à qual pertence, volume com casca e volume sem casca por hectare, área basal por hectare, altura média, DAP médio e número de árvores por hectare.

Com base nos dados da planilha mencionada no item "c" foi desenvolvida uma matriz de correlação linear simples para que se pudesse observar a tendência de associação entre as variáveis. As variáveis principais puras e transformadas encontram-se relacionadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Adotando-se a metodologia de análise de regressão e usando o programa estatístico *Statistica*, foram inicialmente testados 19 modelos matemáticos que relacionavam a variável dependente volume por hectare com uma ou mais variáveis independentes. Estes modelos, constantes da Tabela 4, foram selecionados da literatura e aplicados para o total dos dados. Utilizando o processo *Stepwise* novas equações foram desenvolvidas tanto para o total dos dados como para cada uma das tipologias separadamente.

Na comparação de equações foram usados critérios de seleção tais como: erro padrão da estimativa, coeficiente de determinação múltiplo e análise gráfica de resíduos. Os erros padrões das estimativas foram recalculados no caso das equações logarítmicas para que fossem comparáveis aos das equações aritméticas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

CORRELAÇÃO LINEAR SIMPLES

A Tabela 1 apresenta a correlação linear simples entre as variáveis que mais fortemente se correlacionaram com o volume por hectare, ao se considerar os dados independentemente da tipologia florestal. Como se observa nessa tabela os produtos Gh e G^2h , tanto na forma logarítmica como aritmética, seguidas da área basal, foram as variáveis independentes mais altamente correlacionadas com o volume. Outras possíveis variáveis independentes, tais como d , h e número de árvores por hectare apresentaram baixa correlação com o volume por hectare.

Esta mesma situação foi observada ao se analisar separadamente as tipologias I e II, bem como ao se fazer os mesmos testes de correlação linear simples para cada uma das 8 unidades de trabalho. As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados obtidos para as tipologias I e II respectivamente. Observe-se nas Tabelas 1, 2 e 3 que a correlação linear simples da área basal por hectare-G com o volume por hectare-V foi sempre acima de 0,82. Ao se incluir a altura média- h , obtendo-se a variável Gh , a correlação dessa com o volume foi sempre acima de 0,98. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por SPURR (1952), FERREIRA (1976), SILVA (1979), FIGUEIREDO FILHO (1983) e ROSOT (1989).

Tabela 1 - Matriz de correlação linear simples para o total dos dados
 Table 1 - Simple linear correlation matrix for the whole data

| variáveis dependentes dependent variables | variáveis independentes/independent variables | | | | | | |
|--|---|------------|--------------|---------|-----------|----------------|------------------|
| | G | $G\bar{h}$ | $G^2\bar{h}$ | $\ln G$ | $\ln G^2$ | $\ln G\bar{h}$ | $\ln G^2\bar{h}$ |
| Vc/c | 0,8904 | 0,9902 | 0,9258 | - | - | - | - |
| $\ln Vc/c$ | - | - | - | 0,9302 | 0,9302 | 0,9960 | 0,9867 |
| Vs/c | 0,8821 | 0,9928 | 0,9279 | - | - | - | - |
| $\ln Vs/c$ | - | - | - | 0,9235 | 0,9235 | 0,9951 | 0,9852 |

Tabela 2 - Matriz de correlação linear simples para os dados da tipologia I
 Table 2 - Simple linear correlation matrix for the type I forest data (142 plots)

| variáveis dependentes dependent variables | variáveis independentes/independent variables | | | | | | |
|--|---|------------|--------------|---------|-----------|----------------|------------------|
| | G | $G\bar{h}$ | $G^2\bar{h}$ | $\ln G$ | $\ln G^2$ | $\ln G\bar{h}$ | $\ln G^2\bar{h}$ |
| Vc/c | 0,8442 | 0,9887 | 0,9293 | - | - | - | - |
| $\ln Vc/c$ | - | - | - | 0,8952 | 0,8952 | 0,9938 | 0,9803 |
| Vs/c | 0,8821 | 0,9928 | 0,9279 | - | - | - | - |
| $\ln Vs/c$ | - | - | - | 0,8842 | 0,9235 | 0,9935 | 0,9753 |

Tabela 3 - Matriz de correlação linear simples para os dados da tipologia II
 Table 3 - Simple linear correlation matrix for the type II forest data (181 plots)

| variáveis dependentes dependent variables | variáveis independentes/independent variables | | | | | | |
|--|---|------------|--------------|---------|-----------|----------------|------------------|
| | G | $G\bar{h}$ | $G^2\bar{h}$ | $\ln G$ | $\ln G^2$ | $\ln G\bar{h}$ | $\ln G^2\bar{h}$ |
| Vc/c | 0,8968 | 0,9883 | 0,9031 | - | - | - | - |
| $\ln Vc/c$ | - | - | - | 0,9270 | 0,9270 | 0,9960 | 0,9857 |
| Vs/c | 0,8957 | 0,9917 | 0,9168 | - | - | - | - |
| $\ln Vs/c$ | - | - | - | 0,9208 | 0,9208 | 0,9943 | 0,9820 |

AJUSTE DOS MODELOS PRÉ-SELECIONADOS

Os resultados dos testes aplicados aos 19 modelos pré-selecionados da literatura são apresentados nas Tabelas 4 e 5, com os estimadores de precisão F, R², Syx % e análise gráfica de resíduos de todas as equações, que serviram de base para a seleção dos melhores modelos. Nas 19 equações testadas os erros variaram de 10,51 % a 75,17 % para o volume comercial com casca e de 9,16 % a 76,39 % para o volume comercial sem casca, indicando péssimo ajuste de alguns destes modelos. Os piores modelos quase sempre envolviam o diâmetro médio aritmético (\bar{d}), o número de árvores (N) e a combinação área basal (G) com o número de árvores, como variáveis independentes

Tabela 4 - Modelos testados com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume com casca em m³/ha para o total dos dados

Table 4 - Tested models with respective coefficients and main statistics for volume over bark for the whole data

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|--|---|----------------|--------|-------|----------|
| 1 $V = b_0 + b_1 G$ | $b_0 = -45,3072$ $b_1 = 15,8500$ | 0,7921 | 95,84 | 34,26 | 1228,16 |
| 2 $V = b_0 + b_1 N$ | $b_0 = 264,6005$ $b_1 = 10,7642$ | 0,0022 | 210,32 | 75,17 | 0,72 |
| 3 $V = b_0 + b_1 \bar{d}$ | $b_0 = -53,3094$ $b_1 = 5,6828$ | 0,3821 | 165,25 | 59,07 | 200,14 |
| 4 $V = b_0 + b_1 \bar{d}^2$ | $b_0 = 110,5642$ $b_1 = 0,0427$ | 0,3731 | 166,45 | 59,49 | 192,68 |
| 5 $V = b_0 + b_1 G^2$ | $b_0 = 116,8615$ $b_1 = 0,2911$ | 0,7314 | 108,96 | 38,94 | 877,73 |
| 6 $V = b_0 + b_1 GN$ | $b_0 = 184,3111$ $b_1 = 0,2029$ | 0,1991 | 188,15 | 67,25 | 81,03 |
| 7 $V = b_0 + b_1 G \bar{h}$ | $b_0 = 20,1596$ $b_1 = 0,6538$ | 0,9804 | 23,40 | 10,51 | 16145,60 |
| 8 $V = b_0 + b_1 N \bar{d}$ | $b_0 = 81,1242$ $b_1 = 0,1975$ | 0,2563 | 181,30 | 64,80 | 111,98 |
| 9 $V = b_0 + b_1 \bar{d}^2 \bar{h}$ | $b_0 = 160,6892$ $b_1 = 0,0013$ | 0,3834 | 165,08 | 59,00 | 201,25 |
| 10 $V = b_0 + b_1 G^2 \bar{h}$ | $b_0 = 132,5390$ $b_1 = 0,0129$ | 0,8566 | 79,61 | 28,45 | 1924,71 |
| 11 $V = b_0 + b_1 G + b_2 G^2$ | $b_0 = -26,9183$ $b_1 = 13,8559$ $b_2 = 0,0402$ | 0,7929 | 95,67 | 34,19 | 617,53 |
| 12 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G$ | $\ln b_0 = 1,968516$ $b_1 = 1,184592$ | 0,8648 | 95,37 | 34,09 | 2060,80 |
| 13 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2$ | $\ln b_0 = 1,9685$ $b_1 = 0,5923$ | 0,8648 | 95,37 | 34,09 | 2060,77 |
| 14 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln GN$ | $\ln b_0 = 2,7274$ $b_1 = 0,4634$ | 0,4292 | 187,09 | 66,87 | 243,16 |
| 15 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2 N$ | $\ln b_0 = 2,2535$ $b_1 = 0,3642$ | 0,6035 | 160,47 | 57,36 | 491,15 |
| 16 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2 \bar{h}$ | $\ln b_0 = 0,6211$ $b_1 = 0,5546$ | 0,9735 | 43,27 | 15,47 | 11821,10 |
| 17 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G \bar{h}$ | $\ln b_0 = -0,1428$ $b_1 = 0,9678$ | 0,9920 | 30,50 | 10,90 | 39966,00 |
| 18 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln \bar{d}^2 \bar{h}$ | $\ln b_0 = 0,1167$ $b_1 = 0,4810$ | 0,4018 | 161,94 | 57,88 | 217,28 |
| 19 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln N \bar{d}$ | $\ln b_0 = -0,5066$ $b_1 = 0,8634$ | 0,4055 | 184,12 | 65,81 | 220,654 |

Tabela 5 - Modelos testados com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume sem casca em m³/ha para o total dos dados

Table 5 - Tested models with respective coefficients and main statistics for volume inside bark for the whole data

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|--|---|----------------|--------|-------|----------|
| 1 $V = b_0 + b_1 G$ | $b_0 = -35,6629$ $b_1 = 12,0038$ | 0,7774 | 75,82 | 36,81 | 1125,62 |
| 2 $V = b_0 + b_1 N$ | $b_0 = 200,2931$ $b_1 = 0,5158$ | 0,0022 | 210,32 | 75,17 | 0,72 |
| 3 $V = b_0 + b_1 \bar{d}$ | $b_0 = -43,1853$ $b_1 = 4,3287$ | 0,3794 | 126,61 | 60,14 | 197,84 |
| 4 $V = b_0 + b_1 \bar{d}^2$ | $b_0 = 81,5071$ $b_1 = 0,0326$ | 0,3712 | 127,44 | 60,53 | 191,13 |
| 5 $V = b_0 + b_1 G^2$ | $b_0 = 87,0617$ $b_1 = 0,2206$ | 0,7188 | 85,82 | 40,48 | 824,29 |
| 6 $V = b_0 + b_1 GN$ | $b_0 = 139,1532$ $b_1 = 0,1517$ | 0,1903 | 144,62 | 68,69 | 76,68 |
| 7 $V = b_0 + b_1 G \bar{h}$ | $b_0 = 11,5503$ $b_1 = 0,5011$ | 0,9856 | 19,28 | 9,16 | 22051,90 |
| 8 $V = b_0 + b_1 N \bar{d}$ | $b_0 = 61,3786$ $b_1 = 0,1483$ | 0,2472 | 139,45 | 66,23 | 106,72 |
| 9 $V = b_0 + b_1 \bar{d}^2 \bar{h}$ | $b_0 = 118,9468$ $b_1 = 0,0010$ | 0,3881 | 125,71 | 59,71 | 205,27 |
| 10 $V = b_0 + b_1 G^2 \bar{h}$ | $b_0 = 97,7159$ $b_1 = 0,0099$ | 0,8606 | 60,00 | 28,50 | 1989,58 |
| 11 $V = b_0 + b_1 G + b_2 G^2$ | $b_0 = -21,0031$ $b_1 = 10,4141$ $b_2 = 0,0321$ | 0,7783 | 75,68 | 35,94 | 566,15 |
| 12 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G$ | $b_0 = 1,6495$ $b_1 = 1,1937$ | 0,8524 | 75,43 | 35,83 | 1861,22 |
| 13 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2$ | $\ln b_0 = 1,6495$ $b_1 = 0,5968$ | 0,8524 | 75,43 | 35,83 | 1861,20 |
| 14 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln GN$ | $\ln b_0 = 2,4286$ $b_1 = 0,4644$ | 0,4184 | 143,89 | 68,34 | 232,63 |
| 15 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2 N$ | $\ln b_0 = 1,9462$ $b_1 = 0,3659$ | 0,5912 | 124,02 | 58,91 | 466,64 |
| 16 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G^2 \bar{h}$ | $\ln b_0 = 0,2746$ $b_1 = 0,5609$ | 0,9666 | 34,53 | 16,40 | 9317,11 |
| 17 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G \bar{h}$ | $\ln b_0 = -0,5122$ $b_1 = 0,9813$ | 0,9901 | 25,32 | 12,03 | 32210,10 |
| 18 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln \bar{d}^2 \bar{h}$ | $\ln b_0 = 0,2738$ $b_1 = 0,4900$ | 0,4048 | 123,59 | 58,70 | 220,01 |
| 19 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln N \bar{d}$ | $\ln b_0 = -0,7982$ $b_1 = 0,8630$ | 0,3933 | 141,65 | 67,28 | 209,78 |

Os modelos que mais se destacaram, numa análise global dos critérios de seleção, foram o 7, 16 e 17, mesmo assim apresentando erros superiores a 9 % e inferiores a 16,5 %, para volume comercial com e sem casca.

Com base nos estimadores de precisão procurou-se selecionar o melhor modelo para o grupo das equações aritméticas e para o das logarítmicas, para volume comercial com e sem casca.

Analisando-se os resultados obtidos, considerando-se principalmente o erro padrão da estimativa, o modelo 7 apresentou-se como o melhor no grupo das aritméticas, e o modelo 17 no grupo das logarítmicas, para volume comercial com e sem casca. Estas equações apresentaram uma boa distribuição gráfica residual, como mostra a Figura 1, embora a equação 7 tenha se mostrado tendenciosa para o limite inferior dos dados.

OBTENÇÃO DOS MODELOS PELO PROCESSO *STEPWISE*

Utilizando o processo *Stepwise*, procurou-se compor um modelo de regressão a partir da inclusão ou exclusão sucessiva de variáveis independentes.

Os modelos elaborados nesta fase resultaram não tendenciosos, conforme constatado através da análise dos resíduos. Os níveis de precisão, que podem ser observados nas Tabelas 6 e 7, para volume comercial com e sem casca, foram melhores em relação aos resultados obtidos nas 19 equações pré-selecionadas na literatura, já citados anteriormente. Obteve-se erros que variaram de 9,13 % a 10,32 % para volume comercial com casca e de 8,21 % a 9,12 % para volume comercial sem casca, com o número de variáveis dos modelos variando de 2 a 7.

Como melhores modelos para volume com casca, as equações 2 (aritmética) e 4 (logarítmica) destacaram-se, sendo que a equação aritmética 2 apresenta um número grande de variáveis, dificultando a sua utilização. Para volume comercial sem casca os melhores modelos foram o 2 e o 3, sendo que a equação aritmética 2 apresenta novamente um número grande de variáveis independentes. As distribuições residuais destas equações são ilustradas na Figura 2 (a) e (b).

Para as tipologias I e II foram desenvolvidos também modelos pelo processo *Stepwise*, para volume comercial com e sem casca. Na tipologia I, os erros variaram de 7,96 % a 8,25 % para volume comercial com casca e de 7,05 % a 7,65 % para volume comercial sem casca como mostram as Tabelas 8 e 9.

Nas Tabelas 10 e 11 apresentam-se os estimadores de precisão para a tipologia II, sendo que os erros variaram de 9,85 % a 12,25 % para volume comercial com casca e de 9,52 % a 10,85 % para volume comercial sem casca. Em todos os casos o número de variáveis independentes incluídas foi de 2 até 9.

Os melhores modelos para a tipologia I, em volume comercial com casca, foram o 2 (aritmético), 3 e 4 (logarítmicos), todos com poucas variáveis, e para volume comercial sem casca, os modelos 2 e 4, sendo que o 2 apresentou um número grande de variáveis. A Figura 2 (c) e (d) mostra a distribuição residual da melhor equação.

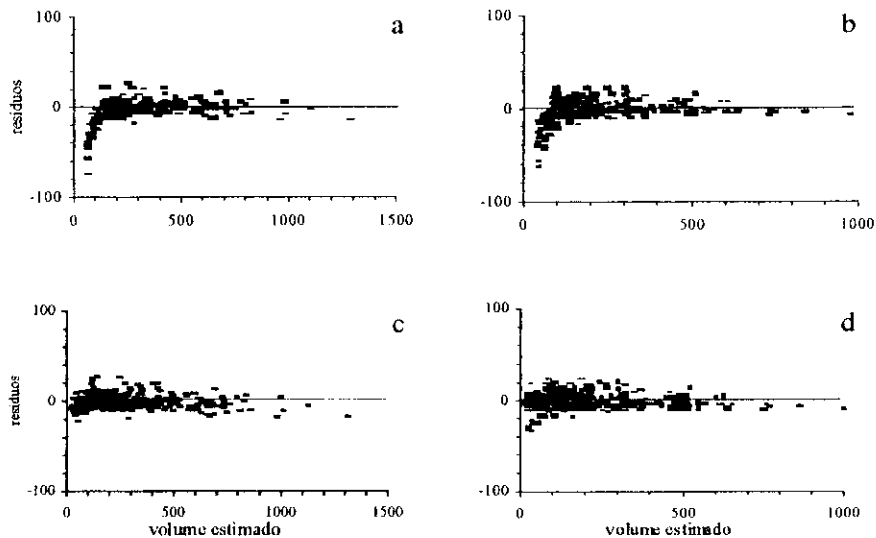


Figura 1 – Distribuição dos resíduos percentuais do volume comercial (m^3/ha) para as equações: 7 – (a) com casca, (b) sem casca e 17 – (c) com casca, (d) sem casca para o total dos dados

Figure 1 – Residual distribution (in percentage) of commercial volume (m^3/ha) for equations: 7 – (a) over bark, (b) inside bark and 17 – (c) over bark, (d) inside bark for the whole data

Para a tipologia II, os melhores modelos foram o 2 e o 4 para volume comercial com casca sendo que o modelo aritmético 2 apresentou 9 variáveis independentes, tornando mais difícil a sua utilização. A Figura 2 (e) mostra a distribuição residual do modelo 4. Para volume comercial sem casca os modelos 1, 3 e 4 apresentaram bons resultados, porém os modelos 1 e 3 apresentaram um número maior de variáveis, enquanto que o modelo 4 apresentou um valor de F mais significativo e uma boa distribuição residual, como mostra a Figura 2 (f).

CONCLUSÃO

Analisando-se as 19 equações selecionadas na literatura tanto para volume comercial com casca quanto para volume comercial sem casca observou-se que os valores das estatísticas R^2 e S_{xy} variaram bastante de equação para equação devido ao fato de que estes modelos não foram elaborados especificamente para os dados desta pesquisa. A alta variabilidade em florestas naturais, sítios diferentes e mesmo intervenções parciais podem ter contribuído para o mau ajuste dessas equações. De uma maneira geral, percebe-se que a melhor equação de volume do povoamento de *Araucaria angustifolia*

Tabela 6 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial com casca em m³/ha para o total dos dados
 Table 6 - Equations obtained from the *Stepwise* process with respective coefficients and main statistics for commercial volume over bark given in m³/ha for the whole data

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|---|---|----------------|-------|-------|----------|
| 1 $V=b_0+$ b_1G+ $b_2N\bar{d}+$ $b_3G+\bar{h}$ $b_4G^2\bar{h}$ | $b_0=-4,342249$ $b_1=3,81144$ $b_2=-0,022732$ $b_3=0,6255$ $b_4=-0,001712$ | 0,9849 | 25,86 | 9,24 | 5240,64 |
| 2 $V=b_0+$ b_1N+ b_2G^2+ $b_3N\bar{d}+$ $b_4G\bar{N}+$ $b_5G\bar{h}+$ $b_6G^2\bar{h}+$ $b_7\bar{d}^2\bar{h}$ | $b_0=-0,184409$ $b_1=1,009568$ $b_2=0,104234$ $b_3=-0,023118$ $b_4=-0,036382$ $b_5=0,786938$ $b_6=-0,005589$ $b_7=-0,000075$ | 0,9853 | 25,53 | 9,13 | 3073,74 |
| 3 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln G\bar{h}+$ $b_2\ln \bar{d}^2\bar{h}$ | $\ln b_0=0,060689$ $b_1=0,996693$ $b_2=-0,033934$ | 0,9931 | 28,87 | 10,32 | 23224,30 |
| 4 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln G+$ $b_2\ln N\bar{d}+$ $b_3\ln G\bar{h}$ | $\ln b_0=0,285661$ $b_1=0,185777$ $b_2=-0,051538$ $b_3=0,860382$ | 0,9932 | 28,25 | 10,09 | 15725,50 |

incluiu como variável independente a combinação da área basal (G) e altura média (\bar{h}).

No desenvolvimento de equações pelo processo *Stepwise* obteve-se excelentes resultados para as mais variadas combinações de variáveis independentes. Novamente a combinação do produto $G\bar{h}$ entrou como variável independente em todas as equações, concluindo-se ser esta a melhor entre todas as variáveis testadas em equações de volume do povoamento para *Araucaria angustifolia*.

Devido à maior simplicidade e diferença pouco significativa no que se refere ao ajuste e à precisão da melhor equação obtida pelo processo *Stepwise*, recomenda-se o uso da equação número 17 para a construção da tabela de volume do povoamento, tanto para volume comercial com casca como para volume comercial sem casca, para florestas de *Araucaria angustifolia*.

Tabela 7 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial sem casca em m³/ha para o total dos dados
 Table 6 - Equations obtained from the *Stepwise* process with respective coefficients and main statistics for commercial volume inside bark given in m³/ha for the whole data

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|--|--|----------------|-------|-------|----------|
| 1 $V=b_0+$ b_1G+ b_2h+ $b_3N\bar{d}+$ $b_4G\bar{h}+$ $b_5G^2\bar{h}$ | $b_0=13,5162,98$ $b_1=1,417100$ $b_2=-0,352706$ $b_3=0,012604$ $b_4=0,552346$ $b_5=-0,001577$ | 0,9883 | 17,40 | 8,26 | 5429,77 |
| 2 $V=b_0+$ b_1N+ b_2G+ $b_3N\bar{d}+$ $b_4G\bar{h}+$ $b_5G^2\bar{h}+$ $b_6G^2\bar{h}+$ | $b_0=0,243039$ $b_1=0,526487$ $b_2=1,111940$ $b_3=-0,024497$ $b_4=0,572532$ $b_5=0,786938$ $b_6=-0,001577$ | 0,9884 | 17,29 | 8,21 | 4583,67 |
| 3 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln G^2N+$ $b_2\ln G\bar{h}+$ $b_3\ln \bar{d}^2\bar{h}$ | $\ln b_0=-0,206898$ $b_1=-0,018432$ $b_2=1,055118$ $b_3=-0,052498$ | 0,9911 | 19,17 | 9,10 | 11937,50 |
| 4 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln N\bar{d}+$ $b_2\ln G\bar{N}+$ $b_3\ln G\bar{h}$ | $\ln b_0=-0,121679$ $b_1=-0,103057$ $b_2=0,066886$ $b_3=0,969114$ | 0,9910 | 19,19 | 9,12 | 11879,9 |

BIBLIOGRAFIA CITADA

- FERREIRA, C. A. 1976. A estimativa do volume de madeira aproveitável para celulose, em povoamentos de *Eucalyptus* sp. Dissertação. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba. 112 p.
- FIGUEIREDO FILHO, A. 1983. Estudos de modelos matemáticos para estimar o volume por unidade de área em uma floresta tropical úmida na Amazônia Brasileira. Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba. 150 p.
- FUNDAÇÃO DE PESQUISAS FLORESTAIS DO PARANÁ-FUPEF & INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL-IBDF. 1978. Inventário Florestal do Pinheiro no Sul do Brasil. Relatório Final. Curitiba. 327 p.
- MACHADO, S. A. 1973. Aplicabilidade de equações de regressão em inventários florestais. In: Congresso Florestal Brasileiro, 2., FIEP, Curitiba. p. 175-77.

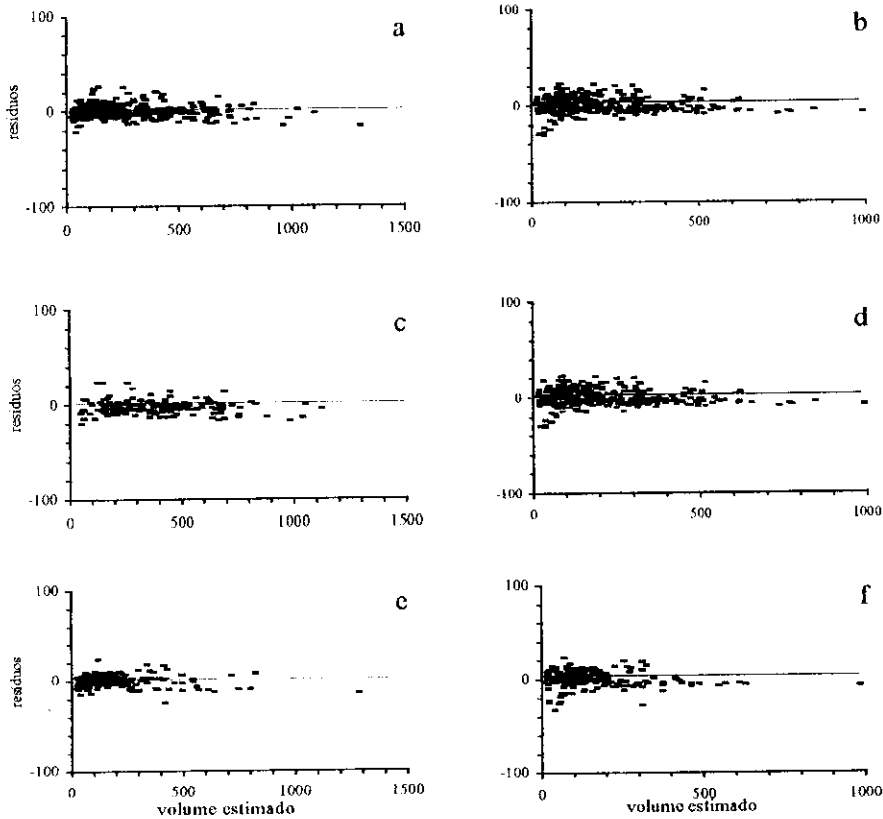


Figura 2 – Distribuição dos resíduos percentuais do volume comercial (m^3/ha) para as equações: 4 e 3 - (a) com casca, (b) sem casca para o total dos dados; 4 - (c) com casca, (d) sem casca para a tipologia I e 4 - (e) com casca, (f) sem casca para a tipologia II, processo *Stepwise*

Figure 2 – Residual distribution (in percentage) of commercial volume (m^3/ha) for equations: 4 and 3 - (a) over bark, (b) inside bark for the whole data; 4 - (c) over bark, (d) inside bark for type I and 4 - (e) over bark, (f) inside bark for type II, *Stepwise* process

ROSOT, M. A. D. 1989. **Estudo comparativo de métodos para a avaliação volumétrica por unidade de área de *Pinus taeda* L.** Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba. 163 p.

SILVA, J. A. 1979. **Estimativa do volume por hectare e sua composição em povoamentos de *Eucalyptus* spp nos cerrados em Minas Gerais e Mato Grosso do Sul.** Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Curitiba. 85 p.

SPURR, S. H. 1952. **Forest Inventory.** Ronald Press, New York. 476 p.

UNG, C. H & OUELLET, D. 1991. Stand volume tables. Application to black spruce stands of Lefel-sur-Quévillon. **Forestry Chronicle**, 67(6):712-715.

Tabela 8 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial com casca em m³/ha para a tipologia I
 Table 8 - Equations obtained from the *Stepwise process* with respective coefficients and main statistics for commercial volume over bark in m³/ha for the primary araucaria forests - type I

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|---|---|----------------|---------|-------|---------|
| 1 $V=b_0+$ b_1G+ $b_2N\bar{d}+$ $b_3G\bar{h}$ | $b_0= 14,319910$ $b_1= 3,087848$ $b_2= -0,022162$ $b_3= 0,573039$ | 0,9805 | 30,0871 | 7,98 | 2367,74 |
| 2 $V=b_0+$ b_1G^2+ $b_2G\bar{h}+$ $b_3G^2\bar{h}$ | $b_0= 6,079960$ $b_1= 0,057289$ $b_2= 0,707950$ $b_3= -0,003297$ | 0,9806 | 30,0232 | 7,96 | 2378,03 |
| 3 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln G\bar{h}+$ $b_2\ln \bar{d}^2\bar{h}$ | $\ln b_0= 0,100100$ $b_1= 0,990403$ $b_2= -0,034214$ | 0,9896 | 31,1390 | 8,25 | 6703,55 |
| 4 $\ln V=\ln b_0+$ $b_1\ln N\bar{d}+$ $b_2\ln GN+$ $b_3\ln G\bar{h}$ | $\ln b_0= 0,125452$ $b_1= -0,063707$ $b_2= 0,059013$ $b_3= 0,938280$ | 0,9896 | 31,0520 | 8,23 | 4474,35 |

Trabalho submetido em 20.04.96 e aceito em 04.12.96

Tabela 9 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial sem casca em m³/ha para tipologia I
 Table 9 - Equations obtained from the *Stepwise* process with respective coefficients and main statistics for commercial volume inside bark in m³/ha for the primary araucaria forests - type I

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|---|---|----------------|---------|-------|---------|
| 1 $V=b_0 + b_1 G \bar{h}$ | $b_0 = 15.602183$ $b_1 = 0.499221$ | 0.9828 | 21.7466 | 7.65 | 8065.95 |
| 2 $V=b_0 + b_1 N + b_2 G^2 + b_3 N \bar{d} + b_4 G \bar{h} + b_5 G^2 \bar{h} + b_6 d^2 \bar{h}$ | $b_0 = 1.984579$ $b_1 = 0.676769$ $b_2 = 0.027624$ $b_3 = -0.026682$ $b_4 = 0.606081$ $b_5 = -0.002485$ $b_6 = -0.000069$ | 0.9854 | 20.0654 | 7.05 | 1583.94 |
| 3 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln N \bar{d} + b_2 \ln G \bar{h} + b_3 \ln d^2 \bar{h}$ | $\ln b_0 = -0.193962$ $b_1 = -0.032024$ $b_2 = 1.028799$ $b_3 = -0.034979$ | 0.9891 | 21.4940 | 7.56 | 4248.10 |
| 4 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln N \bar{d} + b_2 \ln GN + b_3 \ln G \bar{h}$ | $\ln b_0 = -0.152187$ $b_1 = -0.101079$ $b_2 = 0.060196$ $b_3 = 0.977508$ | 0.9891 | 21.4595 | 7.54 | 4248.63 |

Tabela 10 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial com casca em m³/ha para a tipologia II
 Table 10 - Equations obtained from the *Stepwise* process with respective coefficients and main statistics for commercial volume over bark in m³/ha for the secondary araucaria forests - type II

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F' |
|--|---|----------------|---------|-------|----------|
| 1 $V=b_0 + b_1 \bar{h} + b_2 G \bar{h} + b_3 G^2 \bar{h}$ | $b_0 = 21,242598$ $b_1 = -2,150572$ $b_2 = 0,856705$ $b_3 = -0,003992$ | 0,9836 | 21,9283 | 10,78 | 3595,51 |
| 2 $V=b_0 + b_1 G + b_2 \bar{h} + b_3 \bar{d} + b_4 G^2 + b_5 \bar{d}^2 + b_6 N \bar{d} + b_7 GN + b_8 G \bar{h} + b_9 \bar{d}^2 \bar{h}$ | $b_0 = 76,555090$ $b_1 = 9,744794$ $b_2 = 2,275119$ $b_3 = -3,785269$ $b_4 = -0,135915$ $b_5 = 0,034151$ $b_6 = -0,104186$ $b_7 = 0,058471$ $b_8 = 0,629431$ $b_9 = -0,000516$ | 0,9863 | 20,0333 | 9,85 | 1440,53 |
| 3 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln G + b_2 \ln G \bar{h}$ | $\ln b_0 = -0,058183$ $b_1 = 0,096964$ $b_2 = 0,904122$ | 0,9928 | 26,9445 | 13,25 | 12476,00 |
| 4 $\ln V = \ln b_0 + b_1 \ln N \bar{d} + b_2 \ln GN + b_3 \ln G \bar{h}$ | $\ln b_0 = 5,009112$ $b_1 = -1,297958$ $b_2 = 0,662174$ $b_3 = 0,959751$ | 0,9943 | 24,9123 | 12,25 | 10420,20 |

Tabela 11 - Equações resultantes do processo *Stepwise* com respectivos coeficientes e principais estatísticas para volume comercial sem casca em m³/ha para tipologia II
 Table 11 - Equations obtained from the *Stepwise* process with respective coefficients and main statistics for commercial volume inside bark in m³/ha for secondary araucaria forests - type II

| equação | coeficientes | R ² | Syx | Syx % | F |
|--|--|----------------|---------|-------|---------|
| 1 V=b ₀ + b ₁ G+ b ₂ h+ b ₃ G ² + b ₄ Gh+ b ₅ d ² h | b ₀ = -18.502438 b ₁ = 1.928649 b ₂ = 1.286594 b ₃ = -0.033466 b ₄ = 0.488339 b ₅ = -0.000117 | 0.9875 | 14.5373 | 9.53 | 2853.70 |
| 2 V= b ₀ + b ₁ G+ b ₂ h+ b ₃ d+ b ₄ G ² + b ₅ Nd+ b ₆ Gh | b ₀ = 2.781455 b ₁ = 4.370450 b ₂ = 1.728721 b ₃ = -0.684617 b ₄ = -0.039704 b ₅ = -0.025801 b ₆ = 0.440675 | 0.9876 | 14.5234 | 9.52 | 2382.83 |
| 3 lnV=lnb ₀ + b ₁ lnG+ b ₂ lnNd+ b ₃ lnGh+ b ₄ ln ² h | lnb ₀ = 4.519588 b ₁ = 0.211313 b ₂ = -0.609308 b ₃ = 1.392889 b ₄ = -0.351065 | 0.9908 | 16.2274 | 10.63 | 4825.21 |
| 4 lnV=lnb ₀ + b ₁ lnNd+ b ₂ lnGN+ b ₃ lnGh | lnb ₀ = 4.518225 b ₁ = -1.264079 b ₂ = 0.642363 b ₃ = 0.974006 | 0.9906 | 16.5487 | 10.85 | 6327.34 |