

EQUAÇÕES DE VOLUME PARA UMA FLORESTA SECUNDÁRIA NO
PLANALTO DO TAPAJÓS-BELTERRA, PA.
(Volume equations for a secondary Forest in the Tapajós plateau-Belterra,
PARÁ)

José Natalino Macedo Silva^{*}
Manoel Sebastião Pereira de Carvalho^{**}

RESUMO

Foram desenvolvidas equações volumétricas para uma floresta secundária situada no planalto do Tapajós-Belterra, Pará. Foram medidas 60 árvores-amostra de diversas espécies para produzir equações genéricas e 60 árvores-amostra de ***Vochysia maxima***, obedecendo-se a uma distribuição uniforme das árvores nas classes de diâmetro. Testaram-se onze modelos encontrados na literatura e examinou-se a distribuição dos resíduos relativos $\left[(y_i - \hat{y}) / \sqrt{QM \text{ resíduo}} \right]$, detectando-se onze pontos discrepantes (outliers) no conjunto de dados para as equações genéricas e doze nos dados de ***Vochysia maxima***. A remoção desses dados discrepantes melhorou sensivelmente os resultados gerais das equações testadas, chegando, em certos casos, a aumentar em 60% a precisão das equações. A utilização de uma distribuição uniforme das observações, não obstante tenha melhorado a precisão das equações, não eliminou por completo o problema de tendenciosidade das estimativas dos volumes nas classes diamétricas extremas. De um modo geral, as equações tendo como variáveis independentes o diâmetro e a altura, obtidas pela regressão passo a passo, resultaram melhores que os modelos pré-concebidos.

PALAVRAS-CHAVE: equações de volume, análise de regressão, dados discrepantes, floresta secundária, Amazônia.

ABSTRACT

Single and two parameter volume equations were developed for a secondary forest located in the Tapajós plateau-Belterra, Pará. Sixty sample-trees of several species were measured to produce general equation and sixty ***Vochysia maxima*** trees were measured to obtain equations for this particular species. The sample trees were measured according to an uniforme distribution. Eleven models found in the literature and two equations obtained by stepwise regression were compared. The tables of the relative residuals $\left[(y_i - \hat{y}) / \sqrt{MS \text{ residual}} \right]$ showed eleven outliers in the dataset for the general equation and twelve in the dataset for ***Vochysia maxima*** equation. By omitting the outliers the precision of the equations was increased by 60%. Although the use of a uniform distribution has improved the precision of the equations it did not completely removed the bias (parameter) in the estimates of the

^{*} Eng. Florestal, M.Sc., Pesquisador da EMBRAPA – Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido – CPATU.

^{**} Eng Florestal, Bolsista do PIEP/CNPq/EMBRAPA.

volume in extreme diameter classes. The two parameter equations obtained by stepwise regression showed better results than the models found in the literature.

KEY-WORDS: volume equations, regression, outliers, secondary forest, Amazon.

1. INTRODUÇÃO

As florestas secundárias da Região Amazônica brasileira constituem uma fonte alternativa de matéria-prima para diversas aplicações, tais como madeira serrada, chapas de partículas, celulose e energia, dentre outras.

As informações sobre o volume e/ou biomassa desse tipo florestal são escassas, especialmente na Amazônia brasileira, onde maior ênfase tem sido dada às florestas primárias.

Estudos sobre a dinâmica da regeneração natural e crescimento desse tipo florestal foram recentemente estabelecidos em um povoamento de 132 ha, com aproximadamente 40 anos de idade, situado em Belterra, Município de Santarém, Estado do Pará (SILVA et al. 1983).

O levantamento da situação atual do referido povoamento, com relação ao volume, área basal e densidade, foi realizado através de inventário florestal (SILVA et al. 1984). A estrutura horizontal do povoamento foi analisada por CARVALHO et al. (1984). Para a quantificação dos volumes individuais das árvores, decidiu-se pela utilização de equações de volume, cuja obtenção é o objetivo do presente trabalho

2. MATERIAL E MÉTODOS

Dada a importância econômica e a abundância de *Vochysia maxima* no povoamento, optou-se por desenvolver uma equação para essa espécie em particular e outra geral para qualquer espécie. Para isso, mediram-se 60 indivíduos de *Vochysia maxima* e 60 árvores de diversas espécies que ocorrem na floresta estudada. Tentou-se obter uma distribuição uniforme das árvores-amostra na amplitude de diâmetros como mostram as Figuras 1a 1c. Este procedimento objetivou dar uma melhor representatividade em cada classe, na tentativa de diminuir o erro de estimativa e, especialmente, a tendenciosidade geralmente observada nas estimativas dos volumes nas classes diamétricas extremas. DEMAERSCHALK & KOZAK (1974) sugerem esse tipo de distribuição quando não há certeza da linearidade do modelo.

As árvores foram medidas em pé, em intervalos de 2 metros até a altura comercial, utilizando-se uma escada. Os diâmetros nas diversas alturas foram medidos com uma fita diamétrica e a altura comercial foi medida com uma trena comum. Os volumes reais foram calculados pela fórmula de Smalian, descrita por HUSCH et al. (1972).

Para a determinação da equação de volume de duas entradas testaram-se sete modelos usuais de equação sugeridos por LOETSCH et al (1973), equações 1 a 7, Tabela 1, e utilizou-se o processo de regressão passo a passo para a determinação de um modelo particular. Nesse processo foram consideradas as variáveis, d , h , d^2 , h^2 , dh , d^2h e dh^2 , onde:

d = diâmetro à altura do peito (DAP)

h = altura comercial.

O nível de significância para a variável entrar ou sair do modelo foi de 5%.

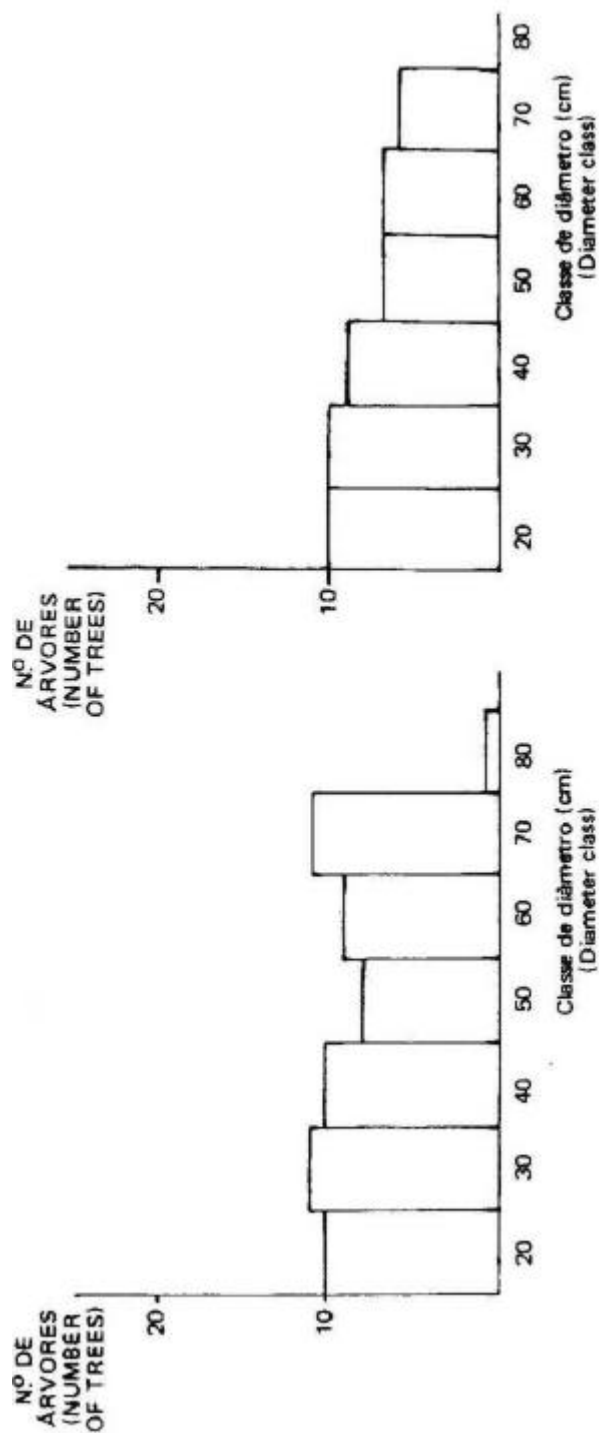


FIGURA 1a: Distribuição de frequência das árvores-amostras para a equação genérica: dados originais. (Frequency distribution of sample trees for the general equation. Original data).

FIGURA 1b: Distribuição de frequência das árvores-amostras para a equação genérica: dados sem "outliers". (Frequency distribution of sample trees for the general equations. Data without outliers).

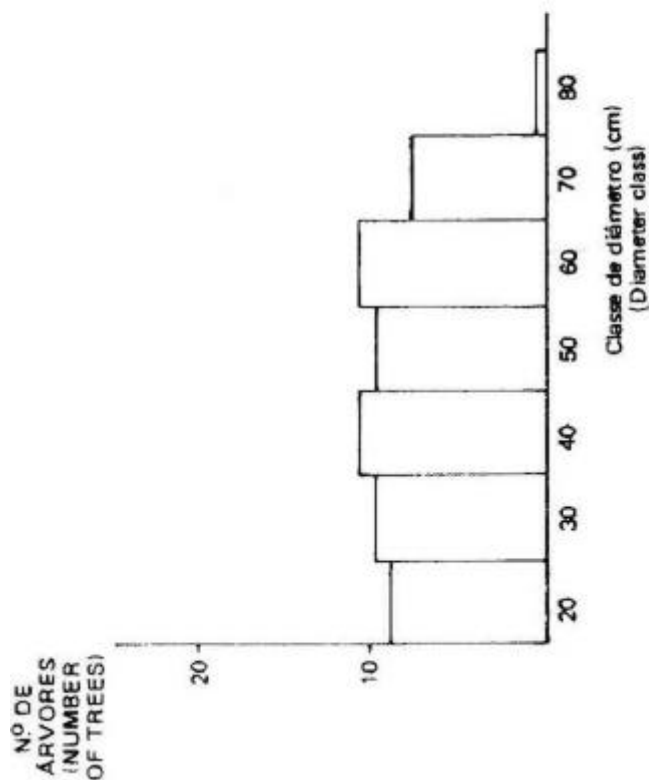


FIGURA 1c: Distribuição de frequência das árvores-amostras de *Vochysia maxima*: dados originais. (Frequency distribution of *Vochysia maxima* trees Original data).

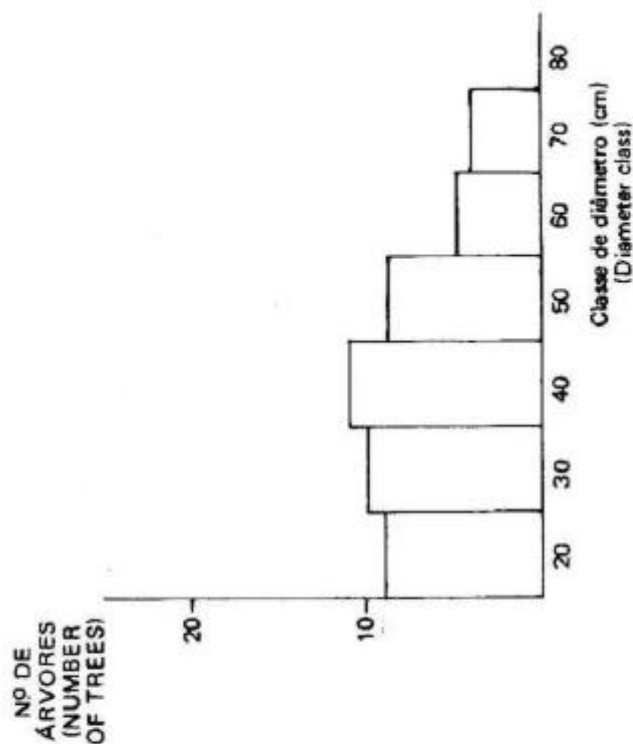


FIGURA 1d: Distribuição de frequência das árvores-amostras de *Vochysia maxima*: dados sem "outliers". (Frequency distribution of *Vochysia maxima* trees Data without outliers).

Para o teste de equações de uma entrada, utilizaram-se quatro modelos apresentados por LOETSCH et al. (1973), dois aritméticos e dois logarítmicos (Equações 8 a 11, Tabela 1).

TABELA 1. Equações testadas para estimar o volume de *Vochysia maxima* e das demais espécies de uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará.
(Equations tested to estimate the volume of *Vochysia maxima* and other species of a secondary forest in the Tapajós plateau, Belterra, Pará).

Nº	Autor (Author)	Fórmula (Form)
01	Spurr (1952)	$V = b_0 + b_1 d^2 h$
02	Stoate	$V = b_0 + b_1 d^2 + b_2 d^2 h + b_3 h$
03	Näslund	$V = b_0 + b_1 d^2 + b_2 d^2 h + b_3 d h^2 + b_4 h^2$
04	Meyer	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 + b_3 d h + b_4 d^2 h + b_5 h$
05	Meyer modificada	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2 + b_3 d h + b_4 d^2 h + b_5 h$
06	Schumacher-Hall	$\ln V = b_0 + b_1 \ln d + b_2 \ln h$
07	Spurr (1952)	$\ln V = b_0 + b_1 \ln (d^2 d)$
08	Kopecky-Gehrhardt	$V = b_0 + b_1 d^2$
09	Hohenadl-Krenn	$V = b_0 + b_1 d + b_2 d^2$
10	Husch (1963)	$\ln V = b_0 + b_1 \ln d$
11	Brenac	$\ln V = b_0 + b_1 \ln d + b_2 \frac{1}{d}$

- V = volume comercial
(commercial volume)
- d = DAP
(DBH)
- h = altura comercial
(commercial height)
- ln = logaritmo natural ou neperiano
(natural or neperian logarithm)
- b₁ = coeficientes de regressão
(regression coefficients).

Na análise dos resultados foram considerados os seguintes critérios: coeficiente de determinação (R²), desvio padrão da regressão, valor do teste (F) e soma dos quadrados dos resíduos. Além desses, realizou-se uma análise de resíduos para detectar a existência de pontos discrepantes (outliers). Segundo DRAPER & SMITH (1981), um "outlier" entre resíduos é aquele que é bem maior do que os outros em valores absolutos, encontrando-se afastado da média, três, quatro ou mais desvios padrões.

As análises das equações de regressão (números 1 a 7, Tabela 1), foram realizadas com e sem a omissão dos "outliers" para verificar os benefícios trazidos

com a retirada dos dados anormais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Equações com duas variáveis independentes.

Da análise da tabela de resíduos foram detectados onze "outliers" no conjunto de dados para produzir equações genéricas e doze nos dados de ***Vochysia maxima***. A distribuição de frequências das observações por classe de diâmetro sem "outliers" é mostrada nas figuras 1b e 1d.

Nas Tabelas 2 e 3 encontram-se os resultados obtidos com as equações propostas na literatura (números 1 a 7), utilizando o conjunto de dados originais e sem "outliers". Estão também indicados os resultados do teste t para os coeficientes de regressão. Nas equações logarítmicas, os valores dos desvios padrões ($s_y.x$) estão transformados em valores aritméticos, através do Índice de Furnival (FURNIVAL 1961).

Observando-se os resultados das equações genéricas (dados sem "outliers"), verifica-se que os menores desvios padrões percentuais ($s_y.x\%$) foram obtidos com as equações 2 e 3. Contudo, a equação 2 apresentou os coeficientes b_0 , b_1 e b_3 não significativos, isto é, iguais a zero pelo teste t. O mesmo ocorreu com os coeficientes b_0 , b_1 , b_3 e b_4 da equação 3. À exceção dos coeficientes de variável combinada (d^2h), todos os demais coeficientes da equação 5 foram não significativos. As equações logarítmicas de números 6 e 7 apresentaram coeficientes significativos.

Embora a equação 1 apresente o coeficiente b_0 não significativo, foi selecionada como a melhor dentre as equações propostas na literatura, por ser a de mais simples aplicação e por apresentar erro de apenas oito centésimos de metro cúbico. A variável combinada d^2h apresenta fortíssima correlação com o volume, pois só ela explica 99% da variação daquele parâmetro.

Os resultados das equações para ***Vochysia maxima*** sem "outliers" (Tabela 3) mostraram, além de melhora geral de R^2 , $s_y.x$, F e SQ Resíduos, que muitos coeficientes passaram a ser significativos pelo teste t, ou seja, passaram a explicar parte da variação do volume. Este fato é particularmente notável na equação 4. Na situação com "outliers" todos os coeficientes foram não significativos, enquanto que sem "outliers" todos foram significativos, à exceção de b_5 , cuja probabilidade foi de 5,5%, praticamente no limite de significância.

Embora de mais simples aplicação, a equação 1, de Spurr, citado por LOETSCH et al. (1973), foi selecionada dentre as equações propostas na literatura porque, ao se analisar a distribuição dos resíduos, detectou-se tendenciosidade nos limites extremos de diâmetro. A equação superestima os volumes de árvores pequenas (entre 20 e 30 cm de diâmetro) e há uma leve tendência de subestimar os volumes das árvores de maiores diâmetros, entre 65 e 75 cm.

Neste caso, optou-se por eleger a equação de Schumacher-Hall, citado por LOETSCH et al. (1973), que apresentou um desvio-padrão de apenas 5 centésimos de metro cúbico. Este erro, em percentagem da média do volume foi de 4,41%. Nesta equação, não se observou tendência na estimativa dos volumes, tanto de árvores de pequenos, como de grandes diâmetros.

A amplitude de variação dos resíduos situou-se dentro de mais ou menos dois desvios padrões, tanto para a equação genérica como para a equação de ***Vochysia maxima***.

TABELA 2. Resultados do ajuste de equações volumétricas genéricas para uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará. Dados originais e sem "outliers".
(General volume equations for a secondary forest in the Tapajós plateau, Belterra, Pará. Original data and data without outliers.)

Equação Nº (Equation No.)	Coefficientes significativos (Significant Coefficients)	R ²	sy.x	sy.x%	F	SQ resíduo (Residual SS)
Dados originais (Original data)						
01	b ₁	0,97674	0,18407	12,64	2.436,010	1,96529
02	b ₂	0,97835	0,18075	12,41	843,545	1,82957
03	b ₂	0,97900	0,17959	12,33	641,279	1,77394
04	—	0,97852	0,18331	12,59	492,139	1,81470
05	b ₄	0,97843	0,18204	12,50	623,759	1,82269
06	b ₀ , b ₁ , b ₂	0,98431	0,18269*	12,54	1.788,790	0,78088
07	b ₀ , b ₁	0,97901	0,11746*	8,06	2.705,610	1,04500
Sem "outliers" (Without outliers)						
01	b ₁	0,99020	0,98579	7,68	4.761,300	0,34591
02	b ₁ , b ₂	0,99480	0,06368	5,70	2.893,130	0,18253
03	b ₂	0,99490	0,06364	5,70	2.173,070	0,17823
04	b ₄	0,99480	0,06488	5,81	1.672,710	0,10101
05	b ₄	0,99480	0,06428	5,75	2.129,730	0,18184
06	b ₀ , b ₁ , b ₂	0,99070	0,07580*	6,78	2.469,840	0,30859
07	b ₀ , b ₁	0,98000	0,10920*	9,77	2.304,070	0,66863

* Índice de Furnival
(Furnival's Index).

R² = coeficiente de determinação
(coefficient of determination)

sy.x = desvio padrão da regressão
(regression standard deviation)

sy.x% = desvio padrão percentual
(regression standard deviation percent)

TABELA 3. Resultados do ajuste de equações volumétricas para *Vochysia maxima* em uma floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra - Pará. Dados originais sem "outliers".
(Volume equations for *Vochysia maxima* in a secondary forest in the Tapajós plateau, Belterra, Pará. Original data without outliers).

Equação N° (Equation No.)	Coefficientes significativos (Significant Coefficients)	R ²	sy.x	sy.x%	F	SQ resíduo (Residual SS)
Dados originais (Original data)						
01	b ₁	0,95348	0,19783	12,87	1,183,790	2,26999
02	b ₁ , b ₂	0,96672	0,17026	11,16	542,381	1,62350
03	b ₂	0,96675	0,17174	11,16	399,830	1,62229
04	—	0,96682	0,17313	11,26	314,765	1,61872
05	b ₄	0,96675	0,17173	11,16	399,869	1,62214
06	b ₀ , b ₁ , b ₂	0,98710	0,08970*	5,83	2,181,610	0,37999
07	b ₀ , b ₁	0,98037	0,10970*	7,13	2,896,720	0,57844
Sem "outliers" (Without outliers)						
01	b ₀ , b ₁	0,99140	0,07389	5,76	5,361,730	0,25116
02	b ₀ , b ₂ , b ₃	0,99500	0,05753	4,48	2,958,240	0,14567
03	b ₀ , b ₂	0,99500	0,05813	4,53	2,173,630	0,14331
04	b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ , b ₄	0,99600	0,05271	4,11	2,117,060	0,11669
05	b ₁ , b ₃ , b ₄	0,99530	0,05627	4,39	2,320,220	0,13617
06	b ₀ , b ₁ , b ₂	0,99350	0,05650*	4,41	3,486,030	0,13829
07	b ₀ , b ₁	0,98900	0,07300*	5,70	4,146,130	0,23663
* Índice de Fournival (Fournival's Index).						
R ²	= coeficiente de determinação (coefficient of determination)					
sy.x	= desvio padrão da regressão (regression standard deviation)					
sy.x%	= desvio padrão percentual (regression standard deviation percent)					

3.1.1. Comparação entre os melhores modelos pré-concebidos e os encontrados através da regressão passo a passo.

Na Tabela 4, compararam-se os melhores resultados obtidos com os modelos encontrados na literatura, com aqueles obtidos através da regressão passo a passo.

TABELA 4. Comparação dos melhores resultados de equações encontrados com modelos pré-concebidos e através de regressão passo a passo.
(Comparison of the best equations found with pre-determined models with those found with stepwise regression).

Equation (Equation)	R^2	sy.x	sy.x%	F	SQ Resíduo (Residual SS)
Genérica: $V = b_0 + b_1 d^2 h$ (General)	0,9902	0,08579	7,68	4.761,3	0,34591
Genérica reg. passo a passo: (General stepwise regression) $V = b_0 + b_1 d^2 h + b_2 dh^2$	0,9947	0,06364	5,69	4.345,2	0,18633
<i>Vochysia</i> : (<i>Vochysia</i>) $\ln V = b_0 + b_1 \ln d + b_2 \ln h$	0,9935	0,05650	4,41	3.486,0	0,13829
<i>Vochysia</i> reg. passo a passo: (<i>Vochysia</i> stepwise regression) $V = b_0 + b_1 h + b_2 d^2 h$	0,9950	0,05741	4,47	4.455,7	0,14832

Os melhores resultados apresentados na Tabela 4 foram obtidos com a exclusão dos "outliers". Essa exclusão chegou, em certos casos, a melhorarem mais de 60% a precisão das equações (Tabelas 2 e 3).

Para todas as quatro equações, a tabela de resíduos revelou uma distribuição satisfatória, com uma variação dentro de mais ou menos dois desvios padrões e, praticamente, não mostrando tendenciosidade.

Para o modelo genérico, optou-se pela escolha da equação obtida pela regressão passo a passo (Tabela 4), cujos principais critérios de avaliação foram melhores do que os obtidos com a equação proposta na literatura.

Para *Vochysia maxima*, considerando-se os principais critérios de avaliação (Tabela 4), praticamente não houve diferenças entre os modelos comparados. Preferiu-se, no entanto, selecionar a equação obtida pela regressão passo a passo, por ser de mais simples aplicação.

São as seguintes as equações selecionadas:

– Equação genérica: $V = 0,0688 + 6,7043 \times 10^{-5} d^2 h - 4,6272 \times 10^{-5} d h^2$ – <i>Vochysia maxima</i>: $V = 0,2928 - 0,0191 h + 5,3832 \times 10^{-5} d^2 h$	
--	--

3.2. Equações com uma variável independente.

Os resultados para as equações com uma variável independente são apresentados na Tabela 5.

A precisão obtida com os modelos de uma entrada foram inferiores aos verificados com os modelos de duas entradas. Os erros percentuais situaram-se entre 18% e 38% para os primeiros e entre 4% e 9% para os últimos. A inclusão da variável altura geralmente aumenta bastante a precisão das estimativas, porém aumenta os custos do levantamento. Em certos casos, o aumento em precisão não é compensado, dado o aumento significativo nos custos do inventário. Este fato é particularmente verdadeiro em florestas tropicais, onde é muito difícil obter-se a altura total ou comercial com bastante precisão. Por esse motivo, alguns autores preferem utilizar equações de uma entrada para a quantificação dos volumes de árvores nessas florestas.

TABELA 5. Resultados do ajuste de equações volumétricas de uma entrada para uma floresta secundária do planalto do Tapajós, Belterra - Pará. Dados sem "outliers"
(Results of single-entry volume equations for a secondary forest in the Tapajós plateau, Belterra, Pará. Data without outliers).

Equação N.º (Equation No.)	Coefficientes significativos (Significant Coefficients)	R ²	sy.x	sy.x%	F	SQ residuo (Residual SS)
<i>Equação genérica</i> (General volume equation)						
10	b ₁	0,91104	0,25491	23,11	501,811	3,1840
11	b ₁	0,91104	0,25755	23,35	245,791	3,1840
12	b ₀ , b ₁	0,91089	0,20120*	18,24	500,914	3,0097
13	b ₀ , b ₁	0,91139	0,20270*	18,38	246,836	2,9931
<i>Vochysia maxima</i> (<i>Vochysia maxima</i> volume equation)						
10	b ₀ , b ₁	0,89447	0,26371	19,49	432,822	3,4772
11	b ₀ , b ₁	0,90956	0,24661	18,22	246,404	2,9801
12	b ₀ , b ₁	0,94783	0,52570*	38,84	908,399	1,2349
13	b ₁ , b ₂	0,95185	0,51020*	37,70	484,298	1,1398

* Índice de Furnival
(Furnival's Index).

R² = coeficiente de determinação
(coefficient of determination)

sy.x = desvio padrão da regressão
(regression standard deviation)

sy.x% = desvio padrão percentual
(regression standard deviation percent)

Para a equação genérica (Tabela 5), os modelos logartímicos produziram melhores resultados que os modelos aritméticos, considerando-se como principais critérios de avaliação, nesse caso, o coeficiente de correlação e o desvio padrão da regressão. Para *Vochysia maxima*, ao contrário, as equações aritméticas produziram melhores resultados.

Com base nos critérios de avaliação anteriormente mencionados, selecionaram-se as equações número 10 (Husch) e número 09 (Hohenadl-Krenn), citados por LOETSCH et al. (1973), para o modelo genérico e para *Vochysia maxima*, respectivamente.

Foram as seguintes as equações selecionadas:

— Equação genérica: $\ln V = -7,7760 + 2,0690 \ln d$ — <i>Vochysia maxima</i>: $V = 0,7346 + 0,0459 d + 6,3842 \times 10^{-5} d^2$	
--	--

4. CONCLUSÕES

— a exclusão de pontos discrepantes (outliers) na análise de equações volumétricas para a floresta secundária em estudo, melhorou sensivelmente os resultados dos critérios usados para a seleção de equações, aumentando em até 60% a precisão;

— o uso de uma distribuição uniforme das árvores-amostra melhorou a precisão, mas não eliminou completamente o problema de estimativas tendenciosas nas classes de diâmetro extremas; e

— as equações encontradas através da regressão passo a passo, de um modo geral, mostraram-se superiores, em termos de precisão, às equações pré-concebidas.

5. REFERÊNCIAS

- CARVALHO, J.O.P. de; ARAÚJO, S.M. & CARVALHO, M.S.P. de. **Estrutura horizontal de uma floresta secundária no planalto do Tapajós em Belterra, Pará**. Belém, EMBRAPA-CPATU. Trabalho apresentado no 1º Simpósio do Trópico Úmido, Belém, 1984.
- DEMAERSCHALK, J.P. & KOZAK, A. Suggestions and criteria for more effective regression sampling. **Can. J. For. Res.**, 4:341-8, 1974.
- DRAPER, N.R. & SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed., New York, J.Wiley, 1981. 709p.
- FURNIVAL, G.M. An index for comparing equations used in constructing volume tables. **For. Sci.**, 7(4):337-41, 1961.
- HUSCH, B.; MILLER, C.I. & BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 2 ed. New York, The Ronald Press Co, 1972. 410p.
- LOETSCH, F.; ZÖHRER, F. & HALLER, K.E. **Forest inventory**. Munich, BLV, 1973. v.2. 469p.

- SILVA, J.N.M.; LOPES, J. do C.A.; CARVALHO, J.O.P. de & COSTA, H.B. da. Crescimento de ***Vochysia maxima*** (guaruba-verdadeira) em povoamento de regeneração natural espontânea. In: **Relatório técnico anual CPATU-1982**. Belém, 1983. p.161-2.
- SILVA, J.N.M.; CARVALHO, J.O.P. de; LOPES, J.do C.A. & MONTAGNER, L.H. **Regeneração natural de *Vochysia maxima* em floresta secundária no planalto do Tapajós, Belterra, Pará**. Belém, EMBRAPA-CPATU. Trabalho apresentado no 1º Simpósio do Trópico Úmido, Belém, 1984.