

IPEF, n.37, p.33-44, dez.1987

MODELOS DE EQUAÇÕES DE VOLUME E RELAÇÕES HIPSOMÉTRICAS PARA PLANTAÇÕES DE EUCALYPTUS NO ESTADO DE SÃO PAULO

HILTON THADEU ZARATE DO COUTO
ESALQ-USP, Depto. de Ciências Florestais
13400 - Piracicaba - SP

NELSON LUIZ MAGALHÃES BASTOS
Cia. Suzano de Papel e Celulose
R. Gal. Francisco Glicério, 354 - 2º andar
08600 - Suzano - SP

ABSTRACT - The use of volume equations is very important for the estimations of wood volume in modern forest inventory systems. We emphasize the need for research in model building using regression analysis, in order to have sound data base for decision-making. This research has been done in Cia. Suzano de Papel e Celulose, a pulp and paper company located in s. Paulo state, which uses eucalypt wood. Several regressions models of volume equations for estimating pulp wood and wood for energy are presented for each forest condition. We also show models that relate DBH to total height of the trees, commonly used in conjunction with volume tables.

RESUMO - Atualmente, nos sistemas de inventário florestal é imprescindível o estudo detalhado de equações volumétricas visando dar representatividade às informações sobre o volume de madeira que será obtido. Estas pesquisas necessitam de base cadastral de informações e recursos computacionais compatíveis com os níveis de precisão almejados. É objetivo deste trabalho apresentar a metodologia da geração das regressões, que dão suporte ao Sistema de Inventário Florestal Contínuo na Cia. Suzano de Papel e Celulose, no Estado de São Paulo. São apresentados modelos de equações de volume para madeira, para celulose e energia, assim como, modelos de relações hipsométricas comumente utilizados em conexão com as equações de volume para cada tipo florestal.

INTRODUÇÃO

O uso de equações de volume e relações hipsométricas em inventário florestal vem se constituindo em uma operação rotineira para cálculo de volume de madeira em pé e estimativa da altura das árvores através da relação DAP e altura.

A determinação da altura das árvores em pé através de instrumentos é uma operação onerosa e sujeita a erros. Desse modo, procura-se medir algumas alturas nas parcelas de inventário e, através de relações hipsométricas, estimar as demais. Em seguida, conhecendo-se a altura total e o DAP de cada árvore da parcela pode-se estimar o volume de cada uma, através das equações de volume. O método da equação de volume é o mais preciso dos métodos de determinação de volume de árvores em pé, contrapondo-se aos métodos de volume cilíndrico e da área basal. No método de volume cilíndrico, o volume real da madeira é obtido através da multiplicação do volume cilíndrico por um fator de

forma médio da floresta. O volume real é calculado através do método da área basal, pela multiplicação da área basal do povoamento, pela altura média e pelo fator de forma médio. Os dois últimos métodos apresentam erros conceituais, pois em um deles parte-se do princípio de que o somatório dos produtos é igual ao produto dos somatórios, o que matematicamente não é correto para as condições de alta variabilidade que ocorrem nos povoamentos florestais (couro, 1984).

A vantagem das equações de volume é o cálculo de volume sólido, árvore a árvore, através de modelos matemáticos, especialmente testados para apresentar os menores erros possíveis. As equações de volume, cujos modelos incluem como variável independente, a altura e o DAP da árvore, são mais gerais podendo abranger sítios diferentes. O uso do fator de forma médio deve ser restrito às condições locais de sítio. Qualquer extrapolação além desses limites pode ser perigosa sob o ponto de vista de previsão dos resultados finais.

As relações hipsométricas, ou sejam, as funções relacionando DAP e altura total da árvore, são bastante sensíveis às variações de sítio. Daí a necessidade de geração de parâmetros para cada parcela de amostragem localizada num determinado sítio. Essa geração é possível graças ao uso de computadores eletrônicos de grande velocidade de cálculo.

Este trabalho tem por objetivo o teste de diferentes modelos de equação de volume para madeira acima de 8 cm de diâmetro mínimo na ponta, com e sem casca (madeira para celulose com e sem casca), abaixo de 8 cm e acima de 4 cm de diâmetro na ponta, com casca (madeira para energia com casca) e de relações hipsométricas.

Além de testar os modelos matemáticos para diferentes espécies, idades, solos e clima, as melhores funções serão apresentadas. As equações citadas foram desenvolvidas com dados oriundos dos povoamentos florestais da Cia. Suzano de Papel e Celulose.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As primeiras tabelas de volume para espécies do gênero *Eucalyptus* publicadas no Brasil foram feitas por ANDRADE (1961) e HEINSDIJK (1965).

VEIGA (1984) afirma que apesar dos bons resultados que comprovadamente são obtidos na estimativa do volume de madeira através de equações o seu uso era pouco freqüente, por causa das dificuldades de cálculo e desconhecimento Sobre o assunto por parte de técnicos ligados à área florestal.

O primeiro trabalho abordando o assunto profundamente sob o ponto de vista estatístico foi realizado por VEIGA (1972), com ***Eucalyptus saligna***. Com a implantação de sistemas de inventário florestal em empresas e institutos, novos trabalhos foram sendo divulgados na literatura, como aqueles publicados no I Simpósio sobre Inventário Florestal, realizado em 1978, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba. Nesse Simpósio destacam-se os trabalhos do INSTITUTO FLORESTAL (1978), MACIEL (1978) e TORQUATO (1978), sobre ***Eucalyptus***.

Em geral, as equações de volume publicadas se restringem a uma determinada área, idade, espaçamento, notação ou espécie. PAULA NETO et alii (1978). apresentam modelos de equações de volume comercial de ***Eucalyptus microcorys*** em regime de alto fuste na região de Coronel Fabriciano, MG.

Tabela de volume para povoamentos de ***Eucalyptus grandis***, plantado no município de várzea Grande (MT). com 5 anos de idade, é apresentada por HIGUCHI et alii (1979).

Ainda PAULA NETO et alii (1975) produziram uma equação de volume para **Eucalyptus grandis** plantado na região de Viçosa, MG.

VEIGA & BRASIL (1981) testaram vários modelos de "equações de volume para **Eucalyptus propinqua** com 5 anos de idade plantado na região de Itupeva e Mogi Guaçu, SP.

Estudos sobre a influência do método de regeneração (talhadia e alto fuste) nos modelos e parâmetros das equações de volume, são apresentados por PAULA NETO et alii (1983).

COUTO (1983) estudou a influência dos espaçamentos sobre os modelos de equações de volume para **Eucalyptus urophylla**, **E. grandis** e **E. saligna**, com 2,5 anos de idade.

SILVA (1977) estudou diversos modelos de equação de volume para diferentes espécies de **Eucalyptus**, métodos de regeneração (talhadia e alto fuste) e região, no Estado de Minas Gerais.

Os primeiros estudos envolvendo a geração de equações de volume para cada situação florestal (espécie, idade, local, ciclo, rotação, etc.) foram realizados por BASTOS (1984).

No Inventário Florestal Nacional, coordenado pelo IBDF e realizado em diversos estados brasileiros, uma série de equações de volume foi desenvolvida, sem contudo entrar em detalhes quanto a espécie, idade, espaçamento, local, ciclo e rotação, etc..

MATERIAL E MÉTODOS

Características de Cada Estrato

Iniciou-se a determinação de equações volumétricas na Cia. Suzano de Papel e Celulose em 1982 para os cálculos de volume para celulose (com e sem casca) e energia. Anualmente, novas equações são geradas para o inventário do ano seguinte. Determinam-se inicialmente os estratos ou tipos florestais predominantes no ano que serão utilizadas as equações e procuram-se no ano anterior tipos semelhantes. Nesses tipos serão realizadas as coletas das árvores-amostra para o cálculo do volume real sólido com casca e sem casca para celulose, o volume real sólido para energia e relações hipsométricas. Caso existam equações já desenvolvidas em tipos semelhantes, novas equações não serão geradas, utilizando-se assim aquelas já desenvolvidas. Esse procedimento é necessário para suprir o I.F.C. (Inventário Florestal Contínuo) de equações suficientes para obter os menores erros possíveis no cálculo do volume da árvore em pé.

A Cia. Suzano de Papel e Celulose atua em duas regiões distintas do Estado de São Paulo, internamente denominadas de Oeste e Leste.

A região Oeste caracteriza-se por apresentar solos de diferentes níveis de fertilidade e relevo plano, enquanto que a região Leste situa-se na Serra do Mar, próxima ao litoral do Estado, com solos de textura argilosa e fertilidade mediana, alta pluviosidade e topografia acidentada. Há, portanto, uma grande variação edafo-climática e topográfica nos dados estudados. Dentro das regiões ocorre uma primeira estratificação em nível de 10cal. Cada local é identificado por situações de solo e clima específicos. Desta maneira, na estratificação em nível de local, a variabilidade entre sítios é minimizada. Nota-se, portanto, que a estratificação considerou os seguintes itens:

- características do sítio (solo, clima, declividade, etc.),
- espécie

- idade
- ciclo
- rotação

Na Tabela 1 são apresentadas as características dos estratos amostrados para a geração das equações volumétricas, até o ano de 1987.

Os locais são representados por fazendas situadas nos municípios constantes na Tabela 2.

Amostragem

Após a caracterização dos estratos é definida a distribuição do DAP que indicará o número de classes diamétricas que deverá ser amostrado.

São abatidas no mínimo 80 árvores uniformemente distribuídas em intervalo de classe de amplitude igual a 2,0 cm. A partir de 1983 o número mínimo de árvores-amostra foi de 100 indivíduos. O número de indivíduos por classe é fixo, pois se espera que as regressões que serão geradas tenham o mesmo nível de erro em todas as classes de diâmetros (COUTO, 1984). Portanto, o número de indivíduos por estrato pode variar, pois é função do número de classes do tipo florestal que por sua vez representa a variabilidade do povoamento.

Nas árvores selecionadas são coletadas as seguintes variáveis: DAP e altura total com e sem casca de cada torete nos quais a árvore será desdobrada.

Estas medidas são obtidas com e sem casca até o diâmetro mínimo de 8 cm (madeira para celulose) e os diâmetros existentes entre 8,0 e 4,0 cm com casca (madeira para energia). A cubagem das árvores é feita pelo método de Smalian, originando as seguintes variáveis por árvore:

- volume sólido para celulose com casca
- volume sólido para celulose sem casca
- volume sólido para energia com casca.

Modelos Testados

Testaram-se diversos modelos de regressões (simples e múltiplos) através de métodos lineares e métodos não lineares, procurando-se correlacionar as variáveis DAP, altura e volumes, obtendo-se, então, as equações volumétricas para os três níveis de utilização:

Modelos Lineares Clássicos

CLUTTER et alii (1983) apresentam os modelos matemáticos mais utilizados para geração de tabelas de volume. Os modelos testados foram os seguintes:

$$V = a + b (DAP^2 * H) \text{ (Modelo de Spurr)}$$

$$\text{Ln}V = a + b (DAP^2 * H)$$

$$\text{Ln}V = a + b \text{Ln}(DAP^2 * H)$$

$$\text{Ln}V = a + b \text{Ln}DAP^2 + c \text{Ln}H \text{ (Modelo de Schumacher - Hall)}$$

onde $DAP^2 = DAP * DAP$

Ln = logaritmo neperiano

V = volume

H = altura total da árvore

Modelos Não Lineares

Quando se lineariza através de transformação logarítmica um modelo não linear e estimam-se os parâmetros através do método dos quadrados mínimos, o erro que deveria ser aditivo torna-se multiplicativo, influenciando os resultados dos testes de ajustamento. Utilizaram-se, portanto, modelos não-lineares, mas linearizáveis, estimando-se os parâmetros através do método de Marquardt contido no Statistical Analysis System (SAS, 1985). Os modelos testados foram os seguintes:

$$V = a * (DAP^{**b}) * (H^{**c})$$

$$V = a * (DAP^2 * H)^{**b}$$

onde ** = exponenciação

Tabela 1 - Caracterização dos estratos utilizados no Inventário Florestal Contínuo da Cia. Suzano de Papel e Celulose no Estado de São Paulo.

Estrato	Espécie	Idade	Local	Rotação	Ciclo	Ano Coleta
01	E. saligna	3-5	9/13	2	1	
02	E. saligna	6-8	9/13	2	1	
03	E. saligna	9	9/13	1	1	
04	E. saligna	9	9/13	1	1	1982
05	E. saligna	6-8	1/2/3/5/6/7	2	1	
06	E. saligna	6-7	19/12/14/16/19	2	1	
07	E. saligna	7-8	11/15	1	1	
08	E. saligna	3-4	11/15	2	1	
09	E. saligna	5-6	11/15	2	1	
10	E. saligna	8	10/12/14/16/19	1	1	
11	E. saligna	3-5	10/12/14/16/19	2	1	1983
12	E. saligna	9	1/2/3/5/6/7	1	1	
13	E. saligna	3-5	1/2/3/5/6/7	2	1	
14	E. saligna	9	1/2/3/5/6/7	2	1	
15	E. grandis	3	9/13	1	2	
16	E. saligna	3-4	1/2/3/5/6/7	1	2	1984
17	E. grandis	3	11/15	1	2	
18	E. saligna	3-4	11/15	1	2	
19	E. grandis	3	1/2/3/5/6/7	1	2	
20	E. saligna	3	10/12/14/16/19	1	2	
21	E. saligna	4	10/12/14/16/19	1	2	
22	E. grandis	4	11/15	1	2	1985
23	E. saligna	5	11/15	1	2	
24	E. grandis	4	9/13	1	2	
25	E. saligna	5	1/2/3/5/6/7	1	2	
26	E. saligna	3	9/13	1	2	
27	E. grandis	5	9/13	1	2	
28	E. saligna	6	1/2/3/5/6/7	1	2	
29	E. grandis	4	1/2/3/5/6/7	1	2	
30	E. grandis	5	11/15	1	2	1986
31	E. saligna	6	11/15	1	2	
32	E. saligna	5	10/12/14/16/19	1	2	
33	E. grandis	3	10/12/14/16/19	1	2	
34	E. grandis	4	10/12/14/16/19	1	2	
35	E. saligna	5-6	17	1	1	
36	E. saligna	6	17	1	1	
37	E. saligna	6	17	2	1	
38	E. grandis	6	9/13	1	2	1987
39	E. saligna	4	9/13	1	2	
40	E. grandis	5	1/2/3/5/6/7	1	2	
41	E. grandis	6	11/15	1	2	
42	E. grandis	5	10/12/14/16/19	1	2	

Tabela 2 - Relação dos municípios abrangidos pela amostragem no Estado de São Paulo.

LOCAL	MUNICÍPIOS
1	Biritiba Mirim
2	Salesópolis
3	Mogi das Cruzes
5	Biritiba Mirim
6	Santos
7	Biritiba Mirim
9	Paraibuna
10	Sarapui / Salto de Pirapora
11	Itapetininga
12	São Miguel Arcanjo
13	São Luiz do Paraitinga
14	São Miguel Arcanjo
15	Angatuba / Itatinga / Bofete / Botucatu / Pardinho
16	Pilar do Sul / São Miguel Arcanjo
17	Itararé
19	Angatuba / Itapetininga

Modelos Obtidos Através do Procedimento Passo a Passo (STEPWISE)

Algumas vezes os modelos clássicos lineares e não-lineares não mostram resultados satisfatórios quanto ao ajuntamento dos valores observados, ou seja, o modelo que explica a relação entre o volume e as variáveis DAP e H não se encontram entre os modelos convencionais testados. Nesse caso, utiliza-se de uma técnica conhecida como análise de regressão passo a passo que testa uma série de variáveis independentes simples, combinadas, transformadas, etc., com o volume e altura simples ou logaritmizadas. As variáveis independentes testadas foram:

a) para volume (V e LnV)

DAP, H, DAP**2, DAP*DAP*H, LnDAP, LnH, H**2, Ln(DAP*DAP*H), DAP*H, DAP*H*H, (DAP**3)*H

b) para relação hipsométrica (H, LnH)

DAP, DAP**2, LnDAP, 1/DAP, 1- 1/DAP

Dentro do procedimento passo a passo, a opção utilizada foi a seleção para frente (FORWARD) apresentada no sistema SAS (1985).

A vantagem desta seleção é mostrar o modelo com o menor número de variáveis independentes, que são relacionadas com a variável dependente (volume ou altura.).

Seleção do Melhor Modelo de Regressão

O objetivo final de testar vários modelos de regressão é obter um modelo que apresente condições de explicar o fenômeno estudado, com baixa possibilidade de erro. Para essa escolha utilizam-se diversos critérios concomitantes:

- Coeficiente de determinação (R²);
- Teste F;

- c) Distribuição dos erros (BELSLEY et alii, 1980);
- d) Índice de FURNIVAL (FURNIVAL, 1961);
- e) C(p) de Mallows (DRAPER & SMITH, 1981);
- f) Somatória dos desvios absolutos;
- g) Contribuição relativa das variáveis independentes.

Computação dos Dados

Para a geração dos modelos de regressão e testes estatísticos, foi utilizado o sistema SAS, versão 5- 1985, instalado num computador IBM 4381 (16 Mb de memória real de processamento) modelo P13, com 13,5 Gb de memória em área de disco, pertencente a DATAMIL, empresa coligada a Cia. Suzano de Papel e Celulose.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o cálculo dos volumes para celulose e energia, estabeleceu-se um banco de dados com todas as informações necessárias para testar os diferentes modelos de regressão.

Todos os modelos clássicos, lineares e não lineares, através do procedimento passo a passo foram testados para cada conjunto de dados (estrato ou tipo florestal).

No caso das relações hipsométricas apenas o procedimento passo-a-passo (seleção para frente) foi utilizado, pois se pretendia obter um modelo logarítmico ou simples, com uma ou, no máximo, duas variáveis independentes, pois sua aplicação no inventário florestal exige o cálculo dos parâmetros do modelo para cada parcela. Caso o modelo fosse complexo em relação ao número de variáveis independentes, o consumo de memória para o cálculo dos valores estimados seria muito alto.

Entretanto, essa limitação não impediu que se selecionassem modelos com alta precisão. Colocaram-se também restrições aos modelos hipsométricos, para evitar extrapolações que viessem a apresentar valores estimados negativos ou superiores àqueles utilizados na estimativa dos parâmetros.

Na seleção de modelos para volume para celulose com e sem casca, observou-se que o modelo selecionado para volume com casca apresentava-se como o melhor modelo para volume sem casca apresentando, entretanto, parâmetros diferentes. Isto ocorreu em todos os estratos.

Os testes de seleção de modelos foram aplicados para cada condição, ou seja, no caso dos modelos lineares clássicos o valor do R² e teste F eram os primeiros a serem observados, escolhendo-se sempre O modelo de maior valor. Entretanto quando esses valores eram próximos, escolhiam-se dois ou três modelos. Para comparar equações logarítmicas com as simples, utilizou-se o índice de Furnival, que apresenta características próprias para esse tipo de comparação.

Para a seleção de modelos gerados pelo procedimento passo a passo, utilizou-se, além dos valores de R² e r, o índice de C(p) de Mallows e a significância das variáveis independentes concomitantemente.

Após essa primeira seleção dentro de cada classe de modelos (lineares, não lineares e passo a passo) e por estrato, obteve-se um mínimo de três e máximo de oito modelos para celulose, energia e relação hipsométrica, que posteriormente passariam por outros testes de seleção. Além dos testes já citados, utilizou-se a diagnose através da distribuição dos erros em relação aos valores estimados da variável dependente e o somatório dos desvios absolutos. Os erros deveriam estar uniformemente distribuídos ao longo da linha de referência zero. Caso isso não ocorresse, ou seja, o modelo não apresentasse o mesmo erro

de estimativa para valores altos e baixos, ele era descartado, mesmo que apresentasse alto R² e F.

O modelo que apresentasse baixo valor do parâmetro somatório dos desvios absolutos em cada classe de DAP era o escolhido.

Os modelos não lineares apresentaram, dependendo do conjunto de dados, problemas de não-convergência, o que impediu a estimativa dos parâmetros. Quando havia convergência, constantemente o modelo não apresentava boas estimativas e os erros eram altos.

O modelo que apresentou melhor ajustamento para os dados de volume para celulose foi o da variável combinada. Dos 42 estratos estudados, 29 apresentaram aquele modelo como o adequado, o que representa cerca de 70% do total (Tabela 3). Esse modelo mostra que o tronco da árvore para produção de celulose tem a forma de um parabolóide, o que é explicado pelo termo $DAP \cdot DAP \cdot H$. Entretanto, todos os modelos possuem como variável independente o termo $DAP \cdot DAP \cdot H$ ou o seu logaritmo. Antes da utilização de cada modelo com os seus respectivos parâmetros, verificou-se a amplitude de utilização do modelo através da simulação de DAP e altura de árvores. Quando os valores do fator de forma (volume real total com casca/volume cilíndrico com casca) chegavam a ser superiores a 0,6 ou inferiores a 0,4 ou mudavam rapidamente o seu valor com o aumento ou diminuição do DAP ou altura, os limites de utilização das equações para cada estrato eram fixados.

Nota-se também na Tabela 3, que apenas 30% dos modelos apresentaram duas variáveis independentes, sendo que todos os demais apresentaram apenas uma variável independente. Os modelos mais simples, além de demandarem menor esforço computacional, são mais gerais e não sofrem o problema de instabilidade dos parâmetros estimados (multicolinearidade). Os modelos para determinação do volume de madeira para energia não seguiram os modelos clássicos lineares e não lineares. Todos foram definidos através do procedimento passo a passo. É importante ressaltar que 50% dos modelos escolhidos (Tabela 4) apresentaram entre as variáveis independentes a variável $(DAP^{**3}) \cdot H$, o que pode ser explicado biologicamente por ter o topo do tronco da árvore a forma de um tronco de cone. A dificuldade em selecionar modelos com uma única variável independente pode ser explicada pelas variações que sofre o topo do tronco da árvore bastante influenciado pela copa, que por sua vez é influenciada pela densidade do povoamento, ritmo de crescimento e competição. Por outro lado, em alguns estratos a frequência de árvores que teriam o fuste inteiro para energia é maior que em outros estratos de menor idade ou menor crescimento. A percentagem em volume de madeira para energia diminui com o aumento do DAP e altura da árvore, enquanto que a madeira para celulose aumenta.

Dos modelos de relações hipsométricas cerca de 45% são exponenciais e 38% semilogarítmicos (Tabela 5). Isto é explicado pelo fato de que acima de um determinado DAP, os valores de altura mudam pouco atingindo uma assintota, que é função do índice de sítio. Como os micros sítios são um problema para generalizar as relações hipsométricas a solução encontrada para os inventários florestais foi a estimativa dos parâmetros do modelo para cada estrato por parcela e os parâmetros refletiriam as variações de sítio melhorando a estimativa das alturas em função dos DAPs.

Todos os modelos apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5 apresentam os valores do teste F altamente significativos, ou seja, com apenas 1% de probabilidade de não acontecer o fenômeno (regressão). Os valores dos coeficientes de determinação dos modelos para estimar volume para celulose são altos, acima de 0,97. Para os modelos que estimarão os

volumes para energia, os valores são mais baixos variando de 0,45 a 0,90, pelos problemas já discutidos.

Embora superiores a 0,82, os coeficientes de determinação das relações hipsométricas apresentam pouca importância após a escolha do melhor modelo, pois cada parcela de inventário terá seus próprios parâmetros e os coeficientes de determinação deverão ser altos, pois a variação de sítio dentro de uma parcela é pequena.

O modelo da variável combinada mais freqüente, para estimar o volume de madeira para celulose, apresenta o valor do coeficiente de regressão (b) que representa a inclinação da reta relacionado com a forma do tronco da árvore. Quanto maior o valor de b, mais cilíndrica a forma do tronco.

O valor da intersecção (a) também se relaciona com a forma do tronco. O maior valor de a corresponde a uma forma mais cilíndrica do tronco. Nota-se, entretanto, que não existe influência de um único fator (espécie-idade-rotação ou local) sobre o valor dos parâmetros. Todos esses fatores devem influir conjuntamente e interativamente nos parâmetros.

A análise dos parâmetros dos modelos de equações volumétricas para energia não conduz a explicações biológicas; pois a grande variação de modelos é seguida de grande variação nos valores dos parâmetros dentro de um mesmo modelo para diferentes estratos. Como os modelos geralmente contêm duas ou mais variáveis independentes, o seu uso deve ser cuidadoso, por causa dos problemas de multicolinearidade. Qualquer extrapolação pode levar a resultados absurdos. O mesmo não acontece com os modelos de relações hipsométricas, que apresentam um máximo de 2 variáveis independentes, com predomínio dos modelos exponenciais (ou logaritmizados).

Os valores dos parâmetros do modelo exponencial estão diretamente relacionados com o índice de sítio. Esse modelo possui ainda como vantagem passar pela origem (quando o DAP é zero, a altura também é zero) e se ajustar bem a povoamentos jovens (CURTIS, 1967). As constantes mudanças no nível de utilização da madeira da árvore (diâmetro limite para cada tipo de utilização, celulose ou energia) recomendam o uso de modelos que permitam estimar volumes a diferentes padrões de utilização. Esses modelos são discutidos por COUTO (1977) e CAO (1978).

CONCLUSÕES

1 - O sistema proposto de eleição dos melhores modelos e a escolha do modelo mais representativo das relações entre DAP e Altura e dessas variáveis com volume para celulose e energia apresentam resultados satisfatórios de estimativas.

2 - Não se pode utilizar um único modelo para uma espécie, rotação, idade ou local. Os Parâmetros também são específicos para cada condição florestal.

3 - O modelo da variável combinada é o que predomina entre os modelos de estimativa de volume de madeira para celulose.

4 - Os modelos para estimar madeira para energia não seguem os modelos tradicionais da estimativa de volume. Deve-se usar o procedimento de análise de regressão passo a passo (seleção para frente), incluindo entre as variáveis independentes (DAP**3) * H para a escolha do modelo adequado.

5 - As relações hipsométricas seguem principalmente uma função exponencial, cuja assíntota corresponde ao índice de sítio.

6 - O valor dos parâmetros das equações de volume para celulose não mostram a influência de um único fator (espécie, idade, local, rotação e ciclo) sobre eles, não permitindo generalização das equações.

7 - Deve-se testar modelos mais flexíveis que permitam estimar volumes a diferentes padrões de utilização.

Tabela 3 - Modelos de equações volumétricas para celulose com casca (dm³) utilizados no I.F.C. no Estado de São Paulo.

ESTRATO	Nº DE CLASSES DIAMETRAIS	Nº DE ÁRVORES	MODELOS SELECIONADOS	R ²	F
1	8	55	IVCCC = (- 7.0335 + 0.03553 * D2H)	0.9695	1683,32
2	12	73	IVCCC = (-13.5420 + 0.02577 * D2H + 0.00741 * DM2)	0.9686	1063,41
3	10	80	IVCCC = (- 4.7817 + 1.15310 * LD2H)	0.9704	2559,85
4	13	71	IVCCC = (-17.0887 + 0.03625 * D2H)	0.9887	6032,40
5	8	72	IVCCC = (-13.9701 + 0.03778 * D2H)	0.9754	2781,76
6	8	84	IVCCC = (-10.1091 + 0.03796 * D2H)	0.9880	6774,50
7	8	84	IVCCC = (-12.5403 + 0.03800 * D2H)	0.9765	3413,91
8	7	89	IVCCC = (-15.2526 + 0.03989 * D2H)	0.9892	7980,41
9	8	89	IVCCC = Exp (-7.71326 - 0.00011 * D2H + 1.58325 * LD2H)	0.9912	4865,52
10	10	99	IVCCC = Exp (-6.07179 - 0.00003 * D2H + 1.33574 * LD2H)	0.9960	11851,89
11	15	88	IVCCC = (-16.3478 + 0.03977 * D2H)	0.9920	16697,74
12	11	97	IVCCC = (-17.6563 + 0.02269 * D2H + 0.00923 * DM2)	0.9829	4857,29
13	8	89	IVCCC = (-12.8211 + 0.03756 * D2H)	0.9904	8986,68
14	12	101	IVCCC = (-14.3732 + 0.03559 * D2H)	0.9923	12851,35
15	6	80	IVCCC = (-17.3898 + 0.03347 * D2H)	0.9722	2730,10
16	7	83	IVCCC = (-18.6966 + 0.03431 * D2H)	0.9829	4659,89
17	7	77	IVCCC = (-24.3846 + 0.03589 * D2H)	0.9799	3659,55
18	7	83	IVCCC = (-40.0116 + 0.01303 * D2H + 0.51764 * D2)	0.9768	1687,11
19	7	98	IVCCC = (+45.7625 + 0.03653 * D2H - 24.1547 * LH)	0.9876	3772,74
20	6	74	IVCCC = Exp (-15.3232 - 0.00048 * D2H + 2.65053 * LD2H)	0.9634	933,48
21	7	84	IVCCC = Exp (-25.1255 + 0.03599 * D2H)	0.9905	8534,36
22	7	86	IVCCC = (-38.9699 + 0.02206 * D2H + 0.36273 * D2)	0.9888	3657,52
23	7	84	IVCCC = (-21.6895 + 0.03606 * D2H)	0.9847	5270,78
24	7	86	IVCCC = Exp (-17.2629 + 3.01540 * LD2H- 0.00993 * DM)	0.9799	2031,02
25	7	95	IVCCC = (-22.0705 + 0.03683 * D2H)	0.9856	6409,37
26	6	75	IVCCC = (-28.4774 + 0.03831 * D2H)	0.9728	2606,96
27	8	116	IVCCC = (-24.6651 + 0.03722 * D2H)	0.9908	12224,30
28	8	117	IVCCC = (-24.8388 + 0.03746 * D2H)	0.9869	8639,01
29	8	120	IVCCC = (-20.1937 + 0.03462 * D2H)	0.9870	8961,60
30	8	107	IVCCC = (-72.1906 + 5.55969 * D + 0.03029 * D2H)	0.9928	7200,57
31	8	98	IVCCC = (-21.5607 + 0.03676 * D2H)	0.9836	5753,76
32	9	117	IVCCC = (-25.3854 + 0.03678 * D2H)	0.9897	11063,77
33	5	70	IVCCC = (-29.8913 + 0.04063 * D2H)	0.9664	1958,00
34	7	90	IVCCC = (-26.0636 + 0.03752 * D2H)	0.9865	6409,89
35	9	156	IVCCC = (-24.1171 + 0.03742 * D2H)	0.9905	16139,31
36	10	158	IVCCC = Exp (-11.2908 + 2.08084 * LD2H- 0.00396 * DM)	0.9817	4151,55
37	6	125	IVCCC = (-22.4944 + 0.03998 * D2H)	0.9774	5312,50
38	9	140	IVCCC = (-22.1061 + 0.03629 * D2H)	0.9901	13862,92
39	8	95	IVCCC = (-22.5804 + 0.03607 * D2H)	0.9892	8549,11
40	9	139	IVCCC = (-24.2198 + 0.03672 * D2H)	0.9927	18609,77
41	9	124	IVCCC = (-77.5979 + 5.72869 * D + 0.03183 * D2H)	0.9945	10907,76
42	8	105	IVCCC = (-83.1733 + 7.11447 * D + 0.02910 * D2H)	0.9927	6951,38

Nota: Os códigos das variáveis e parâmetros encontram-se na Tabela 6.

Tabela 4 - Modelos de equações volumétricas para energia com casca (dm³) utilizados no I.F.C. no Estado de São Paulo.

ESTRATO	Nº DE CLASSES	Nº DE ÁRVORES	MODELOS SELECIONADOS	R ²	F
1	8	88	IVEN = Exp (- 3.6965 - 0.00114 * D2H + 2.817800 * LH + 0.000039 * D3H)	0.6173	45,17
2	12	99	IVEN = Exp (- 3.3199 - 0.00085 * D2H + 2.570100 * LH + 0.000027 * D3H)	0.5383	36,92
3	10	94	IVEN = Exp (- 6.5130 - 0.21120 * H + 4.893700 * LH - 0.009565 * D2 + 0.000000 * D3H)	0.6487	34,62
4	13	83	IVEN = Exp (- 2.1064 - 0.00045 * D2H + 1.986400 * LH + 0.000011 * D3H)	0.6299	45,40
5	8	84	IVEN = Exp (- 3.5011 - 0.00107 * D2H + 2.659100 * LH + 0.000038 * D3H)	0.4652	23,20
6	8	90	IVEN = Exp (- 3.1769 - 0.00071 * D2H + 2.353690 * LH + 0.000023 * D3H)	0.4852	27,02
7	7	94	IVEN = Exp (- 3.3383 - 0.00069 * D2H + 2.455520 * LH + 0.000019 * D3H)	0.5778	41,05
8	7	87	IVEN = Exp (- 1.5456 + 1.57751 * LH - 0.000015 * D3H)	0.4545	34,99
9	8	92	IVEN = (- 47.5214 - 0.01454 * D2H + 10.577010 * LD2H + 0.000479 * D3H)	0.5206	31,86
10	10	84	IVEN = Exp (- 2.7882 - 0.00067 * D2H + 2.236930 * LH + 0.000021 * D3H)	0.4993	26,59
11	15	94	IVEN = Exp (- 3.5726 - 0.00114 * D2H + 2.651560 * LH + 0.000042 * D3H)	0.6472	55,06
12	11	103	IVEN = Exp (- 3.9160 - 0.00066 * D2H + 2.600530 * LH + 0.000021 * D3H)	0.5834	30,07
13	8	101	IVEN = (- 52.2414 - 0.01116 * D2H + 28.118040 * LH + 0.000399 * D3H)	0.4892	30,97
14	12	73	IVEN = Exp (- 5.1425 - 0.00068 * D2H + 3.053740 * LH + 0.000020 * D3H)	0.5975	34,15
15	6	120	IVEN = Exp (- 8.0183 - 1.16522 * D + 9.684130 * LD + 0.000034 * D3H)	0.9027	358,85
16	7	119	IVEN = Exp (- 9.1885 - 0.41531 * H + 6.850090 * LH)	0.6341	100,50
17	7	120	IVEN = Exp (- 10.2289 + 5.35591 * LH - 0.000550 * DH2)	0.7612	186,50
18	7	119	IVEN = (-131.7902 + 64.7207 * LH - 0.138490 * DH)	0.5645	75,17
19	7	140	IVEN = Exp (- 7.2775 - 1.05864 * D + 8.998450 * LD + 0.000024 * D3H)	0.7101	111,03
20	6	120	IVEN = Exp (- 28.5936 - 1.25695 * H + 18.704560 * LH)	0.6614	114,25
21	7	118	IVEN = Exp (- 10.8122 - 0.40596 * H + 7.400590 * LH)	0.7401	163,73
22	7	123	IVEN = Exp (- 13.1530 - 0.52295 * H + 8.924240 * LH)	0.6542	113,52
23	7	119	IVEN = Exp (- 7.3512 + 4.20327 * LH - 0.008460 * DH)	0.7400	165,08
24	7	126	IVEN = Exp (- 17.5837 - 0.58568 * H + 10.870090 * LH)	0.6680	123,77
25	7	140	IVEN = Exp (- 4.2522 - 0.48943 * D + 5.391520 * LD)	0.6962	156,99
26	6	120	IVEN = Exp (- 7.4364 + 4.30096 * LH - 0.000450 * DH2)	0.6958	133,84
27	8	160	IVEN = (-151.2077 - 18.5499 * D + 155.665040 * LD + 0.000356 * D3H)	0.6145	82,91
28	8	160	IVEN = Exp (- 4.5326 + 3.16237 * LH - 0.006520 * DH)	0.6234	129,93
29	8	160	IVEN = (-148.0948 - 5.22562 * H + 92.724010 * LH)	0.5156	83,57
30	8	144	IVEN = (-114.0663 + 55.4671 * LH - 0.103440 * DH)	0.6691	142,56
31	8	136	IVEN = (-111.2750 + 54.9524 * LH - 0.109710 * DH)	0.5111	69,52
32	9	153	IVEN = (- 85.4267 - 0.01593 * D2H + 17.609790 * LD2H + 0.000501 * D3H)	0.6230	82,36
33	5	120	IVEN = Exp (- 7.3219 + 4.26805 * LH - 0.000500 * DH2)	0.7997	233,58
34	7	126	IVEN = Exp (- 16.1556 - 0.64571 * H + 10.736960 * LH)	0.7338	169,50
35	9	207	IVEN = (- 92.7975 - 0.01031 * D2H + 45.746920 * LH + 0.000311 * D3H)	0.5065	69,45
36	10	200	IVEN = (-119.5363 - 0.01310 * D2H + 56.812640 * LH + 0.000402 * D3H)	0.6444	118,38
37	6	198	IVEN = (- 57.5155 + 10.3406 * LH + 8.256390 * LD2H - 0.000391 * D3H)	0.5303	73,02
38	9	180	IVEN = Exp (- 13.7167 - 0.43341 * H + 8.587760 * LH)	0.6578	170,15
39	8	128	IVEN = Exp (- 15.0113 - 0.55674 * H + 9.774050 * LH)	0.6325	107,59
40	9	180	IVEN = Exp (- 4.2565 + 2.94483 * LH - 0.005190 * DH)	0.6395	156,96
41	9	162	IVEN = Exp (- 5.8095 + 3.47175 * LH - 0.005510 * DH)	0.5488	96,72
42	8	144	IVEN = Exp (- 5.5730 + 3.46538 * LH - 0.006250 * DH)	0.6244	117,20

Nota: Os códigos das variáveis e parâmetros encontram-se na Tabela 6

Tabela 5 - Modelos de relações hipsométricas (m) utilizados no I.F.C. no Estado de São Paulo.

ESTRATO	Nº DE CLASSES DIAMETRAIS	Nº DE ÁRVORES	MODELOS SELECIONADOS	R2	F
1	8	88	IH = Exp (1.12612 + 0.68554 * LD)	0.9398	1341,68
2	12	99	IH = Exp (1.20753 + 0.68620 * LD)	0.9052	925,70
3	10	94	IH = Exp (1.04995 + 0.77176 * LD)	0.9460	1611,40
4	13	91	IH = Exp (1.11922 + 0.71665 * LD)	0.9391	1372,37
5	8	95	IH = Exp (1.08919 + 0.72384 * LD)	0.8648	595,06
6	8	95	IH = Exp (1.05258 + 0.75914 * LD)	0.9373	1391,24
7	7	98	IH = (- 9.56964 + 11.52619 * LD)	0.8713	650,25
8	7	105	IH = (- 3.95154 + 8.14898 * LD)	0.8482	575,52
9	8	104	IH = Exp (1.36004 + 0.59300 * LD)	0.8247	480,03
10	10	109	IH = Exp (1.02927 + 0.75835 * LD)	0.9432	1778,45
11	15	104	IH = (26.04794 - 87.80748 * ID)	0.8737	705,77
12	11	109	IH = Exp (1.14582 + 0.71475 * LD)	0.9417	1729,75
13	8	104	IH = (- 8.33734 + 10.44245 * LD)	0.8809	754,61
14	12	108	IH = (- 9.21268 + 11.54155 * LD)	0.9267	1339,94
15	6	120	IH = Exp (1.69604 + 0.08596 * D)	0.8823	877,07
16	7	119	IH = Exp (1.09451 + 0.68961 * LD)	0.9261	1466,75
17	7	120	IH = Exp (- 1.17956 + 4.36925 * ID)	0.9032	1101,13
18	7	119	IH = Exp (1.41272 + 0.57009 * LD)	0.8916	962,65
19	7	140	IH = (5.37067 + 0.92519 * D)	0.8397	722,95
20	6	120	IH = Exp (- 1.25626 + 4.42862 * ID)	0.9150	1270,56
21	7	118	IH = Exp (0.97398 + 0.79281 * LD)	0.9662	3316,43
22	7	123	IH = (- 6.07834 + 10.09995 * LD)	0.9147	1296,16
23	7	119	IH = (- 6.35801 + 9.94429 * LD)	0.9289	1529,57
24	7	126	IH = Exp (1.45163 + 0.60977 * LD)	0.9521	2465,15
25	7	140	IH = Exp (1.06035 + 0.71297 * LD)	0.9125	1439,31
26	6	120	IH = (- 3.81570 + 8.20185 * LD)	0.8786	853,64
27	8	160	IH = (- 8.27717 + 11.61551 * LD)	0.9511	3071,99
28	8	160	IH = Exp (1.01768 + 0.74964 * LD)	0.9389	2429,52
29	8	160	IH = Exp (0.96144 + 0.79449 * LD)	0.9479	2873,92
30	8	144	IH = (- 8.84125 + 11.67919 * LD)	0.9302	1893,62
31	8	136	IH = (- 7.40504 + 10.63870 * LD)	0.9010	1220,79
32	9	153	IH = Exp (0.94698 - 0.00062 * D2 + 0.85504 * LD)	0.9609	1843,32
33	5	120	IH = Exp (- 2.07134 + 5.36533 * ID)	0.9064	1142,51
34	7	126	IH = (- 6.74456 + 10.13827 * LD)	0.9507	2393,19
35	9	207	IH = (- 9.43241 + 11.01295 * LD)	0.9325	2830,15
36	10	200	IH = (- 9.53641 + 11.73874 * LD)	0.9533	4040,58
37	6	198	IH = Exp (1.18287 + 0.64775 * LD)	0.7984	776,06
38	9	180	IH = (- 8.39573 + 11.90471 * LD)	0.9178	1988,73
39	8	128	IH = (- 5.74374 + 9.96235 * LD)	0.9401	1979,05
40	9	180	IH = Exp (0.72044 - 0.00074 * D2 + 0.97324 * LD)	0.9574	1988,68
41	9	162	IH = Exp (1.39406 + 0.63894 * LD)	0.9479	2912,30
42	8	144	IH = (- 7.60478 + 10.89179 * LD)	0.9369	2170,89

Nota: Os códigos das variáveis e parâmetros encontram-se na Tabela 6

Tabela 6 - Relação da codificação das variáveis utilizadas nas equações volumétricas e relações hipsométricas.

VARIÁVEL	SIGNIFICADO
H	Altura total comercial (m)
LH	Logaritmo neperiano da variável H
D	Diâmetro a altura do peito DAP (cm)
LD	Logaritmo neperiano da variável D
DH	DAP * Altura
D2	DAP**2
DH2	DAP*(Altura**2)
D2H	DAP*(Altura**3)
LD2H	Logaritmo neperiano da variável D2H
ID	1/DAP
IDD	1 - (1/DAP)
VCCC	Volume sólido com casca para celulose (dm ³)
VEM	Volume sólido com casca para energia (dm ³)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, E.N. **O eucalipto**. 2 ed., Jundiaí, Cia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. 681p.
- BASTOS, N.L.M. Inventário florestal na Cia. Suzano de Papel e Celulose. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2, Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba, IPEF, 1984. p.11-26.
- BELSLEY, O.A. et alii. **Regression diagnostics: Identifying influential data and sources of co linearity**. New York, John Wiley, 1980. 292p.
- CAO, Q.V. Prediction of cubic-foot volume of loblolly pine to any top diameter limit and any point on tree bole. Blacksburg, 1978. (Tese-Mestrado-UPISU) p.38-58.
- CLUTTER, J.L. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Wiley, 1983. 351p.
- COUTO, H.T.Z. do. Volume and dry weight prediction with alterable utilization standards for five hardwoods species in the southeastern United States. Raleigh, 1977. 84p. (Tese-Doutoramento-NCSU).
- COUTO, H.T.Z. do. Equações de volume e peso para estimar biomassa de **Eucalyptus**. In: SIMPOSIO ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL. CONVÊNIO CESP/IPEF, 1983. Relatório final. São Paulo, CESP, 1983. p.38-58.
- COUTO, H.T.Z. do. Sistemas integrados de levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2, Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba, IPEF, 1984. p.121-7.

- CURTIS, R.O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, Madison, **13**(4): 365-75, 1967.
- DRAPER, N. & SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York, John Wiley, 1981. 709p.
- FURNIVAL, G.M. An index for comparing equation used in constructing volume tables. **Forest Science**, Madison, **7**(4) 337-41, 1961.
- HEINSDIJK, D. Plantações de eucalipto no Brasil. Boletim do Setor de Inventário Florestal, Rio de Janeiro, (10): 1-69, 1965.
- HIGUCHI, N. et alii. Tabela de volume para povoamento de **Eucalyptus grandis** plantado no município de várzea Grande (MT). **Floresta**, Curitiba, **10**(1): 43-7, 1979.
- INSTITUTO FLORESTAL. Inventário florestal do Estado de São Paulo. **Boletim Informativo. IPEF**, Piracicaba, **6**(17): 1-22, 1978.
- MACIEL, R. Inventário florestal na Aracruz. **Boletim Informativo IPEF**. Piracicaba, **6**(17): 101-44, 1978.
- PAULA NETO, F. et alii. Análise de equações volumétricas para **Eucalyptus** spp. segundo o método de regeneração na região de José de Melo-MG. **Revista Arvore**, Viçosa, **7**(1): 56-70, 1983.
- PAULA NETO, F. et alii. Estimativa do volume comercial para **Eucalyptus microcorys** em regime de alto fuste na região de Coronel Fabriciano-MG. **Brasil Florestal**, **9**(34): 57-61, abr./jul. 1978.
- PAULA NETO, F. et alii. Tabela de volume para **Eucalyptus grandis**. **Revista Ceres**, Viçosa, 22: 212-22, mai./jun. 1975.
- SAS. **SAS user's guide**: statistics: version 5. Washington, SAS Institute, 1985. 356p.
- SILVA, J.A.A. da Análise de equações volumétrica para a construção de tabelas de volume comercial para **Eucalyptus** spp., segundo a espécie, região e método de regeneração. Viçosa, 1977. 93p (Tese-Mestrado-UFV).
- TORQUATO, M.C. Inventário florestal na Companhia Agrícola e Florestal Santa Barbara. Boletim Informativo. **IPEF**, Piracicaba, **6**(17): 55-100, 1978.
- VEIGA, R.A.A. Equações volumétricas para **Eucalyptus saligna** Smith em ocasião de primeiro corte. Botucatu. 1972. 174p.(Tese-Livre-Docência-UNESP)
- VEIGA, R.A.A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 2, Piracicaba, 1984. **Anais**. Piracicaba, IPEF, 1984. p.93-102.

VEIGA, R.A.A. & BRASIL, M.A.M.. Peso de matéria seca e volume de **Eucalyptus propinqua** Deane ex Maiden - equações. **Boletim Técnico - Instituto Florestal**. São Paulo, **35**(2): 73-84, dez. 1981.