

SISTEMA DE EQUAÇÕES PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO EM POVOAMENTOS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* HILL EX MAIDEN. SEM DESBASTE BASEADO NO MODELO DE CLUTTER

AN EQUATION SYSTEM TO SIMULATE THE GROWTH AND THE YIELD IN STANDS OF UNTHINNED *EUCALYPTUS GRANDIS* HILL EX MAIDEN BASED ON THE CLUTTER MODEL

César Santana¹
Anabel Aparecida de Mello²
Rozane de Loyola Eisfeld³
Carlos Roberto Sanquetta⁴

RESUMO

O objetivo principal deste estudo foi desenvolver um sistema de equações baseado no modelo compatível de crescimento e produção de Clutter para projeção do volume futuro em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, conduzidos sob regime 'pulpwood'. Para tal fim foram utilizados dados provenientes de cento e quarenta e quatro parcelas permanentes do inventário florestal contínuo da empresa, considerando os anos de 1996 a 2002. As parcelas foram localizadas em povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, plantados entre 1991 e 1994, com espaçamento inicial de 3 x 2 m, localizados na região conhecida como "norte-pioneiro" do estado do Paraná. O modelo de Clutter foi utilizado para simular o crescimento e a produção prognosticando o volume total e o volume comercial. Como resultado, foi construída uma tabela de produção de área basal, volume total e volume comercial, ao longo dos anos para as diferentes classes de sítio. Pelas análises realizadas pode-se concluir que o sistema baseado no modelo de Clutter foi eficiente para estimar a produção

¹ Engenheiro Florestal da Intenational Paper do Brasil, Arapoti-PR. cesar.santana@ipaperbr.com

² Dra. em Ciências Florestais, Pesquisadora do Laboratório de Inventário Florestal, UFPR. Av. Lothário Meissner, 3400, Jardim Botânico, Curitiba-PR, anabelmello@fyahoo.ufpr.br

³ M. Sc. em Ciências Florestais, Pesquisadora do Laboratório de Inventário Florestal, UFPR. Av. Lothário Meissner, 3400, Jardim Botânico, Curitiba-PR, rozaneloyolaeisfeld@hotmail.com

⁴ Dr. em Ciências Florestais, Professor do Curso de Engenharia Florestal da UFPR. Av. Lothário Meissner, 3400, Jardim Botânico, Curitiba-PR. sanqueta@floresta.ufpr.br

Recebido para publicação em 01/03/2005 e aceito em 02/12/2005

Ambiência	Guarapuava, PR	v.1 n.2	p. 239-256	jul./dez. 2005	ISSN 1808 - 0251
-----------	----------------	---------	------------	----------------	------------------

futura de povoamentos não desbastados de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. na região nordeste do Paraná.

Palavras-chave: Modelo de Clutter; crescimento e produção; *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

ABSTRACT

The main objective of this study was to develop an equation system based on the Clutter model for compatible growth and yield to project the future volume in stands of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., conducted under the pulpwood regime. Thus, data of a hundred forty four permanent plots of the continuous forest inventory of a company were used, ranging from years 1996 to 2002. The permanent plots were located in stands of *Eucalyptus grandis* RiU ex Maiden., planted between 1991 and 1994, with initial spacing of 3 m x 2 m, located in the northern region of the Parana state, known as the “pioneering North”. The Clutter model was used to simulate growth and yield, in order to make a prognosis of the total volume and of the commercial volume as well. Thus, it was constructed a table of production of the basal area, of the total volume and of the commercial volume, along the years for the different sites. After analysis, it can be concluded that the system based on the Clutter model was efficient to estimate the future yield of stands of unthinned *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. in the northeast region of the Parana state.

Key words: Clutter model; growth and yield; *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden

INTRODUÇÃO

Informações confiáveis do crescimento e da produção dos povoamentos são essenciais para o planejamento das atividades de manejo florestal. Segundo Burkhart (1979), a maioria das análises de estratégia de manejo requer a predição do crescimento e da produção em conjunto com dados econômicos de custos e receitas. Conforme Avery e Burkhart (1995), as decisões de manejo florestal são baseadas em informações sobre condições de recursos atuais e futuros. Como as florestas constituem sistemas biológicos dinâmicos que estão continuamente mudando, os modelos de crescimento e produção são necessários para projetar estas mudanças e fornecer informações relevantes para auxiliar nas tomadas de decisões.

As primeiras tabelas de produção que forneciam os volumes médios de povoamentos em várias idades, crescendo em vários sítios, foram desenvolvidas na

Alemanha, no final do século XVIII. (SPURR, 1952). Nos Estados Unidos, Buckman (1962) e Clutter (1963) foram os primeiros pesquisadores a explicitar o reconhecimento das relações matemáticas entre crescimento e produção. Clutter (1963) derivou modelos analíticos compatíveis para crescimento e produção em volume cúbico de *Pinus taeda*, assegurando que a forma algébrica do modelo de produção poderia ser derivada pela integração matemática do modelo de crescimento. Mais tarde, Sullivan e Clutter (1972) refinaram esta técnica, através de modificações nos modelos de Clutter, passando a estimar a produção e o crescimento cumulativo como uma função da idade inicial do povoamento, da área basal inicial, do índice de local e da idade futura. Quando a idade futura é igual à idade atual, o modelo de projeção é reduzido a um modelo convencional de produção. Assim, ele é simultaneamente um modelo de produção para condições atuais e um modelo de projeção ou crescimento para condições futuras.

A maioria dos sistemas de predição de crescimento e produção florestal é expressa na forma de equações matemáticas ou sistemas de equações inter-relacionadas. Desta maneira, os computadores podem ser usados para gerar predição para qualquer combinação de “inputs” (idade, sítio e densidade) do povoamento. O uso destas estimativas juntamente com modelos de análise econômica apropriada - gera decisões relativas a idades ótimas de colheita, níveis de densidade de plantio, níveis de desbaste e outras atividades de manejo.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de equações baseado no modelo de Clutter para a predição do volume futuro de povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. não desbastados, com o propósito de fornecer suporte para o ordenamento do estoque florestal da empresa, considerando a demanda de abastecimento de uma fábrica de papel.

MATERIAIS E MÉTODOS

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo caracteriza-se por plantios de sementes de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. adquiridas de APS's instaladas na região de Bofete/SP. Os plantios foram realizados entre os anos de 1991 e 1994 em espaçamento 3 x 2 m, pertencem à empresa International Paper do Brasil, e a fertilização baseou-se em aplicação 500 kg/ha de calcário (CaCO_3) em área total seguido de 90g de 05:30:10 por cova de plantio. Os povoamentos estão distribuídos em diferentes hortos/projetos na região ‘norte-pioneiro’ do Paraná, abrangendo variações em formação geológica e precipitação, conforme especificado na Tabela a seguir.

Tabela 1. Relação de solos e precipitação predominante por horto/projeto

Projeto	Ds_Grupo_Solo	Precipitação (mm)
Barra Mansa 1	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO	1.484
Barra Mansa 2	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO	
Planalto	PODZOLICO VERMELHO AMARELO	
Salto Cavalcante	CAMBISSOLO	
São Nicolau 1	CAMBISSOLO	
São Nicolau 2	LATOSSOLO VERMELHO	
Caetê 1	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO	1.427
Caetê 2	LATOSSOLO VERMELHO ESCURO	

Segundo a classificação de Koeppen, o clima predominante da região é do tipo CF, uma transição entre os domínios Cfa e Cfb, onde a temperatura do mês mais quente situa-se em torno dos 22° C e no inverno as geadas são menos frequentes.

DESCRIÇÃO DA BASE DE DADOS

Foram empregadas informações geradas pelas remedições que ocorreram entre os anos de 1996 e 2002, das cento e quarenta e quatro parcelas permanentes do inventário florestal contínuo. Os dados foram analisados e consistidos, e os “outliers” retirados.

As parcelas possuem formato retangular com 600 m² de área. A amostragem realizada é denominada casual simples, com intensidade de aproximadamente uma parcela para cada doze hectares. Em cada uma das parcelas foram coletadas as informações de DAP (diâmetro à altura do peito) e qualidade de todas as árvores (fator determinante para medição ou não da sua altura) além da HT (altura total) das árvores pertencentes às três primeiras linhas da parcela. Os números de parcelas medidas, em função da localidade dentro da empresa e das idades nas quais elas foram medidas, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Relação das parcelas utilizadas e as idades em que foram medidas

Horto/Projeto	Nº de parcelas	Idades de remedição (anos)									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barra Mansa 1	5										
Barra Mansa 2	41										
Planalto	2	2	3	4	5	6					
Salto Cavalcante	2		3	4	5	6	7				
São Nicolau 1	37		3	4	5	6					
São Nicolau 2	33			4	5	6	7	8			
Caetê 1	10				5	6	7	8	9		
Caetê 2	14		3	4	5	6	7	8	9		
Total	144										

SISTEMA DE EQUAÇÕES

Equações Hipsométricas

A partir dos pares de dados altura e diâmetro, foi possível ajustar modelos hipsométricos para estimar as demais alturas. Foram testados os seguintes modelos, consagrados na área florestal, por projeto:

- a) Stoffels: $Ln\ ht = \beta_0 + \beta_1 Ln(dap)$
 b) Curtis: $Ln\ ht = \beta_0 + \beta_1 / dap$
 c) Parábola: $ht = \beta_0 + (\beta_1 + \beta_2 \cdot dap) \cdot dap$
 d) Henricksen: $ht = \beta_0 + \beta_1 Ln(dap)$

Sendo:

- ht: altura total (m);
 dap: diâmetro à altura do peito (cm);
 Ln: logaritmo natural.

Equação Volumétrica

O modelo volumétrico foi desenvolvido a partir de transformações do modelo de Schumacher e Hall (1933) e permite estimar com precisão os volumes com e sem casca, para diferentes diâmetros superiores comerciais, além do volume total, de modo consistente e compatível. (LEITE *et al.*, 1995). Este modelo possui a seguinte formulação matemática:

$$v = \beta_0 \cdot dap^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2} \cdot e^{\beta_3(TX / dap)} \left[1 - \left(\frac{d}{dap} \right)^{1+\beta_4 \cdot d} \right] + \varepsilon$$

Sendo:

- v: volume (m³);
 $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$: coeficientes;
 dap: diâmetro a altura do peito com casca (cm);
 h: altura total (m);
 TX: variável binária (se TX = 0 - volume com casca e se TX = 1 - volume sem casca);
 d: diâmetro superior comercial, com casca (cm).

O número de árvores utilizadas, por classe de diâmetro e por classe de altura, para ajustar o modelo de múltiplos volumes está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Frequência por classe de diâmetro e por classe de altura das árvores utilizadas no ajuste da equação volumétrica

Classe de dap (cm)	Classe de ht (m)												Total
	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	24-26	26-28	28-30	30-32	32-34	34-36	36-38	
9-11	1												1
11-13		1		1	2								4
13-15		2			1	1							4
15-17			1			7	4						12
17-19					1	3	1	16	6				27
19-21					1	1	5	7	11	2	1		28
21-23						1	3	7	9	2	2		24
23-25								1	5	3	1		10
25-27								2	3	5	3	2	15
27-29								1		1		6	8
29-30											1	1	2
Total	1	3	1	1	5	13	13	34	34	13	8	9	135

CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO

Foram utilizadas as informações de altura média das árvores dominantes na idade do povoamento, obtidas de cinquenta e cinco parcelas do inventário florestal contínuo, considerando uma idade índice de sete anos (oitenta e quatro meses).

Os modelos utilizados para ajuste foram o de Chapman e Richards, ajustado de maneira não linear e o de Schumacher, ajustado linearmente, e suas formulações matemáticas são descritas como:

a) Chapman e Richards: $hd = \beta_0 [1 - \text{Exp}(-\beta_1 \cdot I)]^{\beta_2}$

b) Schumacher: $\ln(hd) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/I)$

Isolando o b_0 , tem-se:

a) Chapman e Richards:
$$\beta_0 = \frac{S}{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_0)]^{\beta_2}}$$

b) Schumacher:
$$\beta_0 = \ln(S) - \beta_1 \left(\frac{1}{I_0} \right)$$

Substituindo o valor de b_0 no modelo, pode-se obter a altura dominante para cada índice de sítio e idade pelas expressões apresentadas a seguir, que definem um conjunto de curvas anamórficas de índices de local.

a) Chapman e Richards:
$$hd = Sx \frac{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I)]^{\beta_2}}{[1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_0)]^{\beta_2}}$$

b) Schumacher:
$$\ln(hd) = \ln(S) + \beta_1 \left[\left(\frac{1}{I} \right) - \left(\frac{1}{I_0} \right) \right]$$

Sendo:

S: índice de sítio (m);

I_0 : idade índice (anos);

hd e I: já definidos anteriormente.

MODELO DE CLUTTER

Relações funcionais do tipo $V = f(I, S, B)$ resultam em informações mais detalhadas. Nesse caso, o crescimento, a produção e a idade técnica de colheita são diferenciados por índices locais e densidade inicial. O modelo de Clutter foi o escolhido por tratar-se de um modelo do tipo povoamento total, de densidade variável, compatível, explícito e consistente. É do tipo povoamento total porque a variável estimada é o volume por unidade de área, independentemente da classe de tamanho da árvore. É do tipo densidade variável porque permite estimar a produção para diferentes níveis de área basal inicial. Tem característica compatível, pois a equação de crescimento quando integrada fornece a equação de produção e a derivada desta resulta na equação de crescimento. Trata-se de um modelo explícito porque a produção em volume é calculada diretamente. É consistente, porque as estimativas podem ser obtidas projetando-se a área basal ano a ano, ou diretamente de um para qualquer outro ano, com intervalos irregulares e, ainda, porque ao estimar a produção para uma mesma idade resultam em valores idênticos àqueles observados. (TREVIZOL, 1985).

O modelo de Clutter consiste em equações simultâneas, onde variáveis dependentes aparecem como variáveis explicativas. Neste caso, o ajuste do modelo para estimar a área basal e a produção futura foi obtido simultaneamente. Cabe considerar que o melhor e mais indicado método para ajuste deste tipo de modelo é o método dos mínimos quadrados em dois estágios, que garante consistência e baixa tendenciosidade.

Para ajuste do modelo de Clutter foi utilizado o software EVIEWS, empregado no ramo da Econometria, que disponibiliza o método dos mínimos quadrados em dois estágios para ajuste das equações simultâneas.

O modelo de Clutter é composto de três equações básicas, que possuem a seguinte formulação matemática:

Modelo da Produção Presente

$$\text{Ln}(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I^{-1} + \beta_3 \text{Ln}(B)$$

Modelo da Produção Futura

$$\text{Ln}(V_2) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I^{-1} + \beta_3 (I_1 / I_2) \cdot \text{Ln}(B_1) + \beta_4 (1 - I_1 / I_2) + \beta_5 (1 - I_1 / I_2) \cdot S$$

Modelo da Área basal futura

$$\text{Ln}(B_2) = (I_1 / I_2) \cdot \text{Ln}(B_1) + \alpha_0 \cdot (1 - I_1 / I_2) + \alpha_1 (1 - I_1 / I_2) \cdot S$$

Sendo:

- I_1 : idade inicial (meses);
- I_2 : idade futura (meses);
- B_1 : área basal inicial (m²/ha);
- B_2 : área basal futura (m²/ha);
- V : volume atual (m³/ha);
- V_2 : volume futuro (m³/ha);
- S : índice de sítio (m);
- Ln: logaritmo natural.

Para que ocorra a projeção do crescimento, é necessário o conhecimento preliminar da área basal em uma idade inicial. Neste trabalho foram testados modelos para se obter tal variável em função do sítio, considerando uma idade inicial de trinta e seis meses. Alguns autores também calculam esse valor a partir da média aritmética das parcelas que possuem a idade inicial definida, nos diferentes sítios.

Os modelos testados para gerar a área basal inicial foram:

- a) Quadrático: $B = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 S^2$
- b) Linear: $B = \beta_0 + \beta_1 S^{-1}$
- c) Exponencial $\text{Ln}B = \beta_0 + \beta_1 S^{-1}$

Sendo:

- B : área basal (m²/ha);
- S : índice de sítio local (m);
- Ln: logaritmo natural.

Obtido o valor da primeira área basal, as projeções para as idades seguintes foram geradas a partir do modelo de projeção da área basal futura. A projeção do volume total e comercial foi realizada utilizando-se o seguinte modelo:

$$\text{Ln}(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 I^{-1} + \beta_3 (B_2)$$

Sendo:

B_2 : área basal projetada (m^2/ha);

I, V, S, Ln: já definidos anteriormente.

Vale ressaltar que para o cálculo do volume comercial foi adotado um diâmetro mínimo de 8 cm sem casca.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

EQUAÇÕES HIPSOMÉTRICAS

Os resultados encontrados no ajuste das equações hipsométricas escolhidas em cada projeto estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos ajustes das equações hipsométricas

Horto/Projeto	Modelo	Coeficientes			R^2 aj	Syx
		β_0	β_1	β_2		
Barra Mansa 1	Curtis	3,8490	-8,9700	-	0,911	5,9%
Barra Mansa 2	Curtis	4,1050	-12,80	-	0,528	5,2%
Planalto	Parábola	-2,1710	2,3990	-0,0364	0,966	6,4%
Salto Cavalcante	Stofells	1,1280	0,74460	-	0,872	8,4%
São Nicolau 1	Curtis	4,0960	-13,23	-	0,973	3,7%
São Nicolau 2	Parábola	3,3680	1,8000	-0,0260	0,861	9,0%
Caetê 1	Curtis	4,0190	-9,4380	-	0,739	2,9%
Caetê 2	Curtis	4,1570	-13,38	-	0,921	5,1%

Pela análise de resíduos, pode-se observar que em geral os modelos tiveram tendenciosidade considerada satisfatória, com exceção do modelo de Curtis ajustado para os projetos Caetê 1, Caetê 2 e Barra Mansa 2, o qual, apesar de obter coeficientes de determinação (R^2 ajust.) satisfatórios, tenderam a superestimar a real altura das árvores. A dificuldade de se obter um ajuste satisfatório com os modelos testados para estes projetos deve-se principalmente à ‘baixa’ disponibilidade de árvores cubadas nestes projetos.

EQUAÇÃO VOLUMÉTRICA

Os resultados encontrados no ajuste da equação de múltiplos volumes para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados do ajuste da equação de múltiplos volumes

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2 aj	Syx
0,000048	1,720483	1,180736	-3,00555	0,228531	0,985	6,1%

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5, o erro obtido para estimativa do volume total, utilizando o modelo de múltiplos volumes, foi de 6,1%.

Figura 1. Gráfico de resíduos no ajuste das equações hipsométricas por projeto

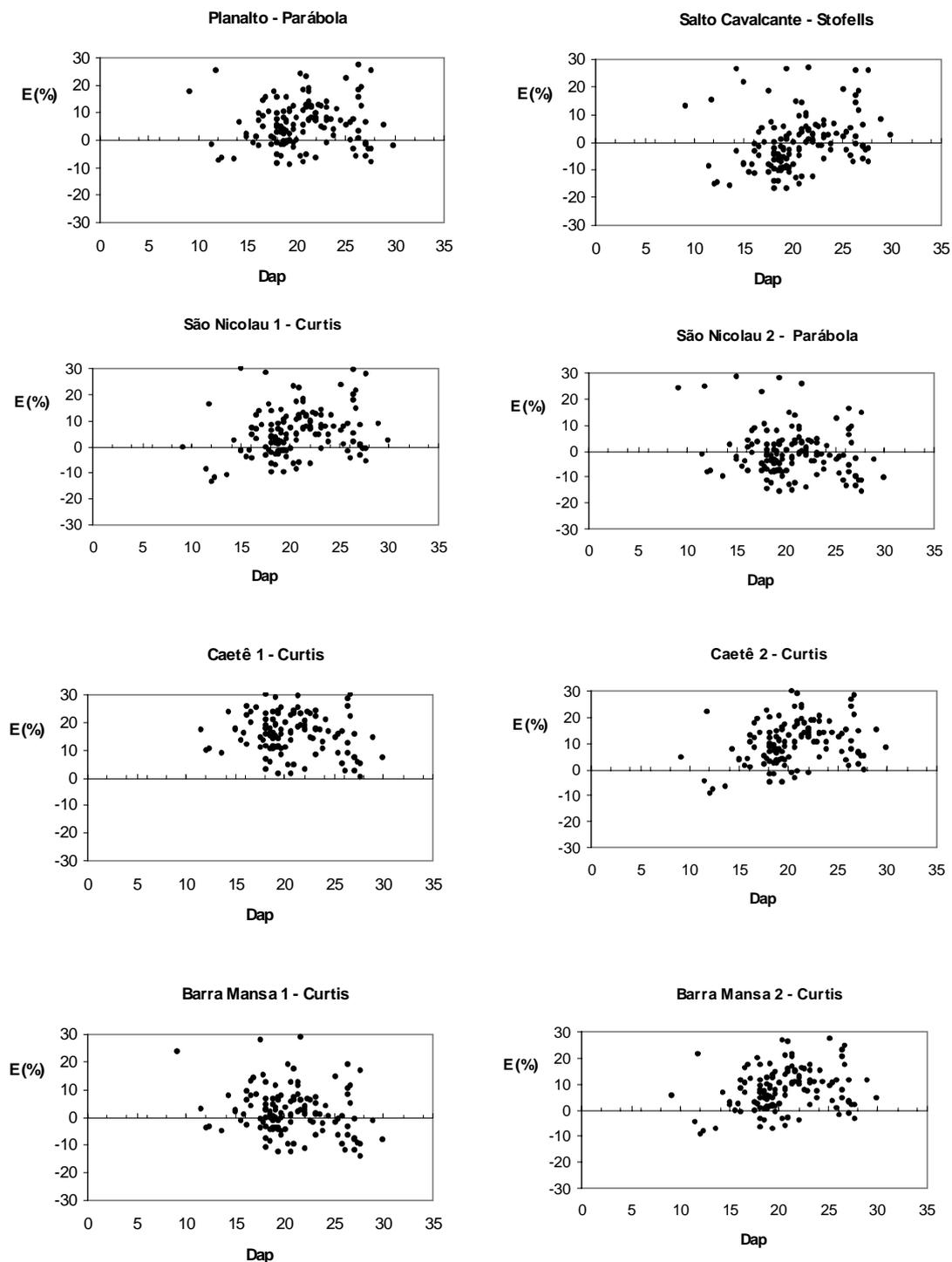
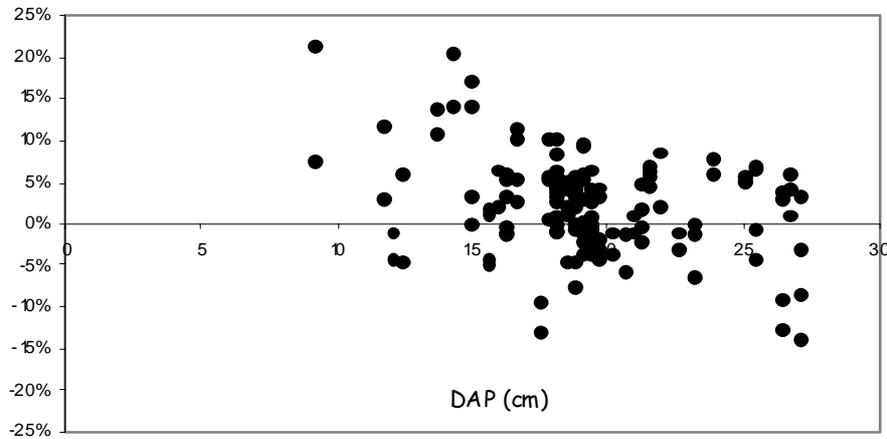


Figura 2. Gráfico de resíduos no ajuste da equação de múltiplos volumes

O gráfico de resíduos mostra uma pequena subestimativa de volume nos menores diâmetros (abaixo de 18cm). Entretanto, devido à dificuldade em se conseguir estimar com precisão volumes de sortimento, resíduos em torno de 20% são valores bastante aceitáveis.

CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO

Tabela 6. Resultados dos ajustes das equações de sítio

Modelo	Coeficientes			Qualidade do Ajuste	
	β_0	β_1	β_2	R^2 aj	Syx
Chapman e Richards	41,31532	0,29482	1,47880	0,864	7,25%
Schumacher	3,95793	-3,10687	-	0,862	7,29%

Com base nessas estatísticas, foi escolhido o modelo de Chapman e Richards. Ele obteve um coeficiente de determinação de 0,86, um erro padrão da estimativa de 2,08 metros, equivalente a 7,25% e resíduos sem tendenciosidades, como mostra a Figura 3.

Adotou-se como Idade Índice ou Idade de Referência a idade de sete anos, uma vez que esta se aproxima mais da idade de rotação silvicultural utilizada na empresa.

Foram definidas cinco classes de sítio, sendo estipulado o limite inferior e superior que estão sintetizadas na Tabela 7.

Graficamente, as curvas de sítio são apresentadas na Figura 4 e na Tabela 8 são apresentados os limites das alturas dominantes por idade e para cada classe de sítio.

Figura 3. Gráfico de resíduos no ajuste da equação de sítio

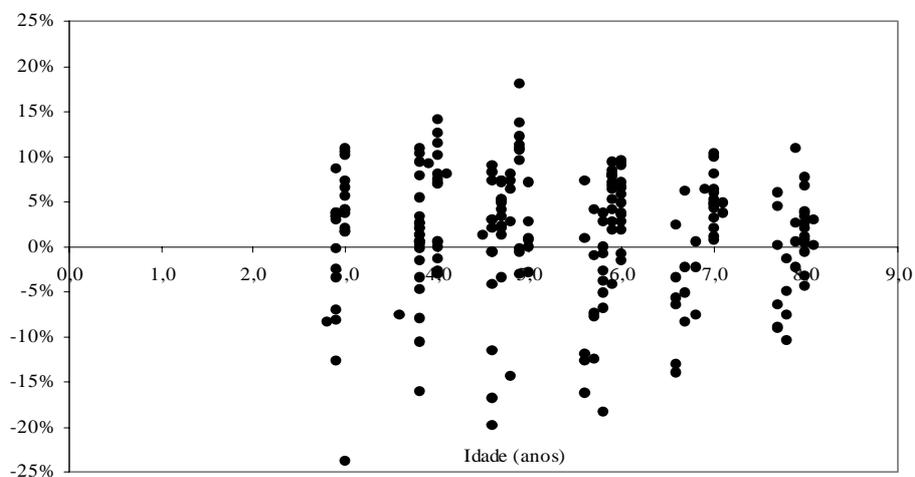


Tabela 7. Limites inferiores e superiores para cada classe com seu respectivo índice de sítio

Classes	Limite Inferior (m)	Limite Superior (m)	IS (m) aos 7 anos
Classe V	26,80	29,60	28,20
Classe IV	29,60	32,40	31,00
Classe III	32,40	35,20	33,80
Classe II	35,20	38,00	36,60
Classe I	38,00	40,80	39,40

Figura 4. Curvas de sítio ajustadas para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. na área de estudo e dispersão dos dados observados

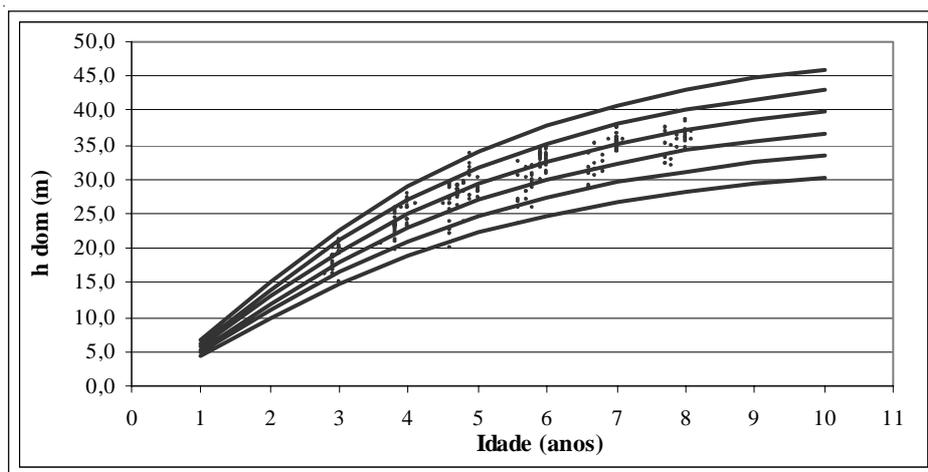


Tabela 8. Limites inferiores e superiores de altura dominante para cada idade nas diferentes classes de sítio

Idade	Classe V (m)		Classe IV (m)		Classe III (m)		Classe II (m)		Classe I (m)	
	Lim Inf	Lim Sup	Lim Inf	Lim Sup	Lim Inf	Lim Sup	Lim Inf	Lim Sup	Lim Inf	Lim Sup
1	4,35	4,81	4,81	5,26	5,26	5,71	5,71	6,17	6,17	6,62
2	9,91	10,94	10,94	11,98	11,98	13,01	13,01	14,05	14,05	15,08
3	14,90	16,46	16,46	18,02	18,02	19,57	19,57	21,13	21,13	22,69
4	19,03	21,01	21,01	23,00	23,00	24,99	24,99	26,98	26,98	28,96
5	22,30	24,63	24,63	26,96	26,96	29,29	29,29	31,62	31,62	33,95
6	24,85	27,44	27,44	30,04	30,04	32,63	32,63	35,23	35,23	37,83
7	26,80	29,60	29,60	32,40	32,40	35,20	35,20	38,00	38,00	40,80
8	28,28	31,24	31,24	34,19	34,19	37,15	37,15	40,10	40,10	43,06
9	29,41	32,48	32,48	35,55	35,55	38,62	38,62	41,70	41,70	44,77
10	30,25	33,41	33,41	36,57	36,57	39,73	39,73	42,89	42,89	46,05

MODELO DE CLUTTER

Para a estimativa da área basal inicial, foi utilizado o modelo exponencial que obteve as melhores estatísticas de ajuste. A equação gerada para a estimativa da área basal futura possui a seguinte formulação matemática:

$$B_2 = \exp \left[\frac{I_1}{I_2} \ln(B_1) + 3,727084 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + 0,007974 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) S \right]$$

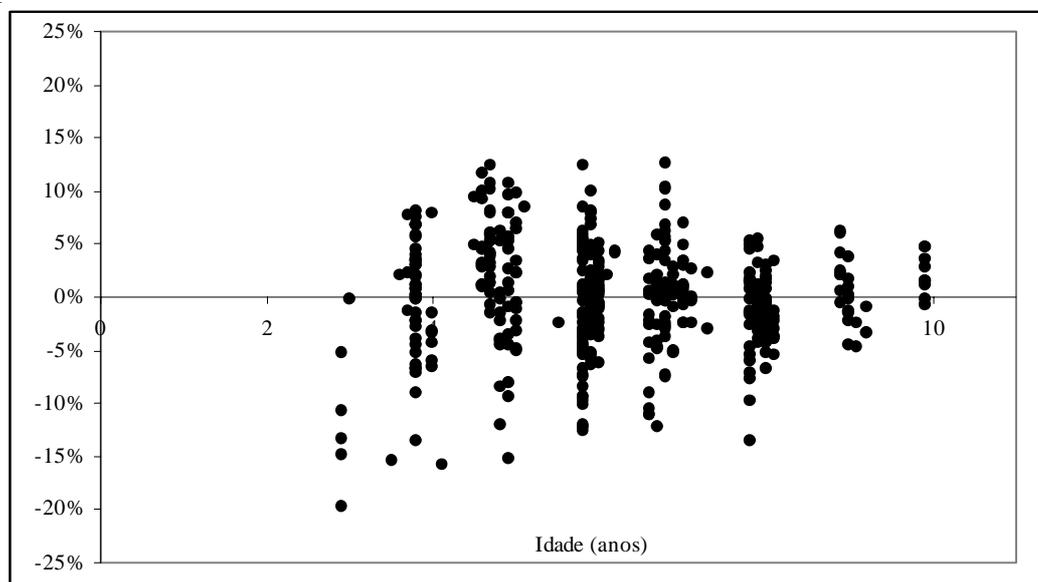
O coeficiente de determinação (R^2) obtido através do ajuste foi de 0,96 e o erro padrão da estimativa foi de 3,9%.

A equação gerada para a estimativa da produção total futura possui a seguinte formulação matemática:

$$V = \exp \left[1,770678 + 0,018839S - 29,293060 \frac{1}{I} + 1,154695 \ln(B_2) \right]$$

O coeficiente de determinação (R^2) obtido através do ajuste foi de 0,98 e o erro padrão da estimativa foi de 4,4%, o gráfico de resíduos não apresentou tendências (Figura 5).

Figura 5. Gráfico de resíduos no ajuste do modelo de Clutter para volume total



Para a estimativa da produção comercial futura gerou-se uma equação com a seguinte formulação matemática:

$$V = \exp \left[0,856732 + 0,024489S - 36,75456 \frac{1}{I} + 1,322543 \ln(B_2) \right]$$

O coeficiente de determinação (R^2) obtido através do ajuste foi de 0,80 e o erro padrão da estimativa foi de 15,6%.

A partir do modelo ajustado, pode-se construir a tabela de produção em que a área basal, o volume total e o volume comercial estimados para cada índice de sítio encontram-se apresentados na Tabela 9.

Analisando os resultados obtidos na Tabela 9, pode-se inferir que, para uma situação média de capacidade produtiva na área de estudo (Sítio III - 33,8m), o IMA (incremento médio anual) comercial aos 7 anos (rotação silvicultural média) encontra-se em torno de 51,2 m³/ha/ano. Há condições extremamente favoráveis em que o IMA comercial chega a 68,3 m³/ha/ano aos 7 anos (Sítio I - 39,4m). Isto, para plantios advindos de sementes (APS).

Tabela 9. Área Basal, volume total e volume comercial prognosticados através das equações geradas, para os diferentes sítios

Idade (anos)	Sítio V - 28,2m			Sítio IV - 31,0m			Sítio III - 33,8m			Sítio II - 36,6m			Sítio I - 39,4m		
	G	VT	VC	G	VT	VC	G	VT	VC	G	VT	VC	G	VT	VC
3	12,97	85,42	50,20	15,17	107,86	66,10	17,28	132,18	84,11	19,30	158,28	104,25	21,22	186,15	126,55
4	18,36	156,34	102,56	20,76	189,91	129,20	23,02	225,58	158,65	25,15	263,35	190,98	27,15	303,31	226,35
5	22,61	224,68	157,45	25,06	266,67	193,16	27,34	310,88	232,15	29,48	357,44	274,62	31,48	406,53	320,84
6	25,98	286,13	209,54	28,41	334,39	252,55	30,66	384,99	299,22	32,77	438,17	349,86	34,74	494,20	404,84
7	28,69	340,06	257,00	31,07	393,05	305,85	33,28	448,51	358,69	35,34	506,78	415,92	37,28	568,18	478,01
8	30,91	387,08	299,52	33,24	443,71	353,09	35,39	502,95	410,92	37,41	565,19	473,52	39,30	630,84	541,43
9	32,75	428,10	337,40	35,02	487,58	394,82	37,12	549,81	456,76	39,09	615,24	523,79	40,95	684,31	596,52
10	34,30	464,03	371,13	36,52	525,78	431,72	38,57	590,43	497,08	40,50	658,46	567,82	42,32	730,34	644,60

G = área basal, em m^2/ha ; VT = volume total, em m^3/ha ; VC = volume comercial, em m^3/ha .

Estes índices confirmam relatos de Scolforo (1998), que afirma que os maiores índices conhecidos de produtividade em espécies do gênero *Eucalyptus* no Brasil são encontrados no norte do estado do Espírito Santo, no Sul da Bahia e Nordeste do Paraná.

As Figuras 6, 7 e 8 representam as curvas de projeção da área basal, do volume total e do volume comercial, respectivamente, nos diferentes sítios, obtidas pelo ajuste do modelo de Clutter.

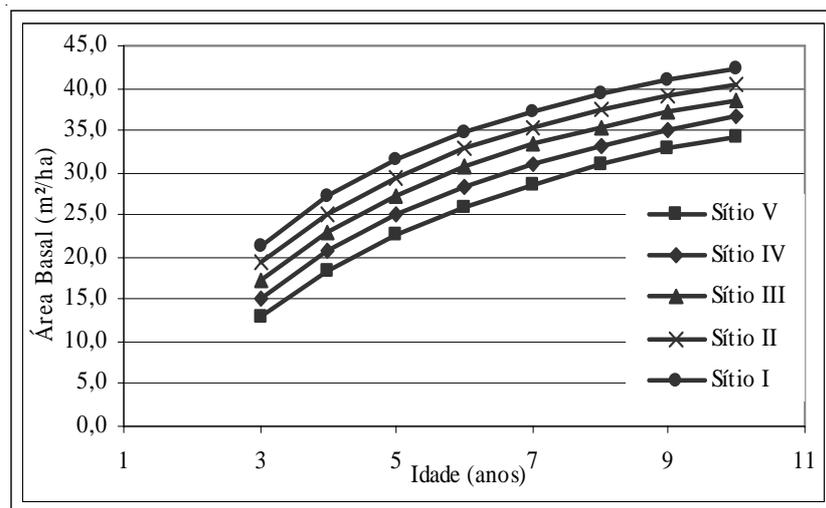
Figura 6. Curvas de projeção da área basal para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, em função da idade, nos diferentes sítios

Figura 7. Curvas de projeção do volume total para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em função da idade, nos diferentes sítios

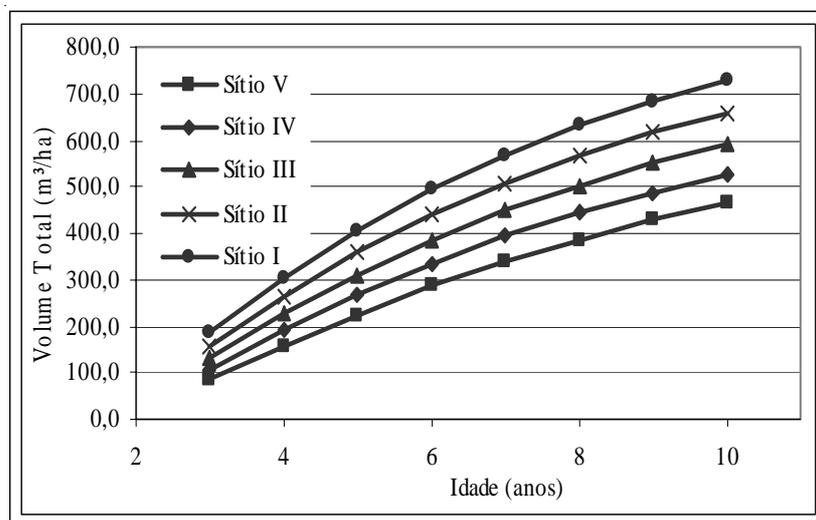
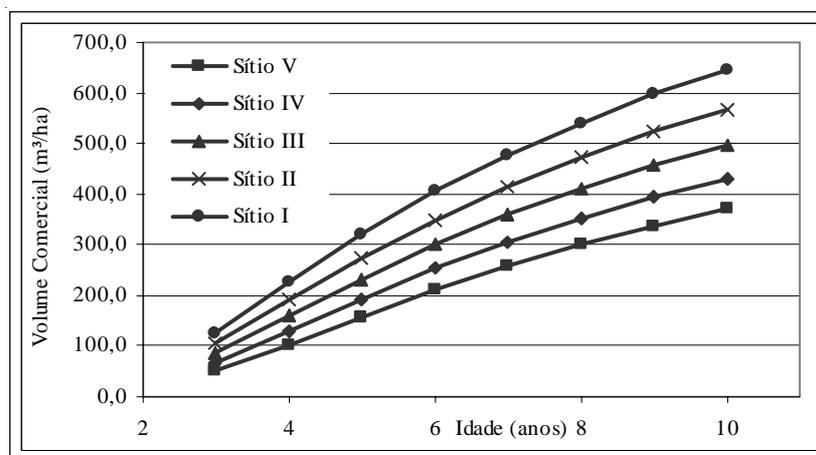


Figura 8. Curvas de projeção do volume comercial para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. em função da idade, nos diferentes sítios



Como era de se esperar, pode-se observar pela análise do comportamento biológico do modelo de Clutter nas Figuras 6, 7 e 8 que para uma determinada área basal inicial, quanto maior o índice de local, maior a produção futura, considerando-se o avanço da idade.

CONCLUSÕES

Considerando a necessidade de se obter uma equação de prognose para predição do volume ao longo do tempo nos povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden., a classificação da capacidade produtiva por meio de índices locais é uma ferramenta essencial para a construção de um modelo consistente que estime o volume em função da idade, área basal e índice de sítio;

Tanto o modelo de Schumacher quanto o modelo de Chapman e Richards foram considerados adequados para a classificação de sítio de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. na área de estudo. A qualidade do ajuste das duas equações foi semelhante e satisfatória;

Conhecendo-se a variabilidade genética dos plantios por sementes (APS), a necessidade de uniformidade nas características físico-químicas da madeira para alguns processos industriais (Kraft, TMP, etc) que ocorrem em empreendimentos instalados na região e os avanços da ‘Silvicultura Clonal’ em espécies de *Eucalyptus*, seria muito interessante para o setor florestal da região a consolidação de um programa de ‘Clonagem’ com a formação de bancos clonais específicos para o contexto e condições regionais.

Este trabalho apresentou um modelo de crescimento e produção que poderá servir de base para profissionais que necessitem prognosticar o crescimento e a produção de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. não desbastados no nordeste do Paraná e em regiões semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. *Forest measurements*. New York: McGRAW-HILL, 1994. 432 p.
- BUCKMAN, R. E. *Growth and yield of red pine in Minnesota*. Washington D. C.: [s.n], 1962. p. (Boletim Técnico, 1272).
- BURKHART, H. E. Growth and Yield of Southern Pines - State of the Art. Presented at the *Southern Forest Economists Workshop*, Chapel Hill, North Carolina. Pages 1-11. (1979)
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science*, v.9, n.3, p.354-371, 1963.
- LEITE, H. G.; GUIMARÃES, D. P.; CAMPOS, J. C. C. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. *Revista Árvore*, v.19, n.1, p.65-79, 1995.
- RIOS, M. G. D. V. *Um modelo de crescimento e produção aplicado a plantações de Eucalyptus pellita*. Viçosa: UFV, 1993. 89p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1993.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of the timber volume. *Journal of Agriculture Research*, v. 47, n. 9, p. 719-34, 1933.

SCOLFORO, J. R. S. Modelagem do Crescimento e da Produção de Florestas Plantadas e Nativas. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998, 441 p.

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

SULLIVAN, A. D. & CLUTTER, J. L. A simultaneous growth and yield model for loblolly pine. *Forest science*, Washington (18): 76-86, 1972.

TREVIZOL, T. L. *Análise de um modelo compatível de crescimento e produção em plantações de Eucalyptus grandis (W. Hill ex Maiden)*. Viçosa: UFV, 1985. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1985.