

**AVALIAÇÃO DE POVOAMENTOS DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) NA  
MICRORREGIÃO DO BAIXO RIO ACRE**

**EVANDRO ORFANÓ FIGUEIREDO**

**2005**

---

**EVANDRO ORFANÓ FIGUEIREDO**

**AVALIAÇÃO DE POVOAMENTOS DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) NA  
MICRORREGIÃO DO BAIXO RIO ACRE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração em Florestas de Produção, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2005**

---

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Figueiredo, Evandro Orfanó

Avaliação de povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) na  
microrregião do Baixo Rio Acre / Evandro Orfanó Figueiredo. -- Lavras :  
UFLA, 2005.

301p. : il.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Dissertação (Mestrado) - UFLA.

Bibliografia.

1. Volumetria. 2. Classificação de sítio florestal. 3. Prognose por classe  
diamétrica. 4. Função de afilamento. 5. Avaliação econômica. I.  
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-634.9285

**EVANDRO ORFANÓ FIGUEIREDO**

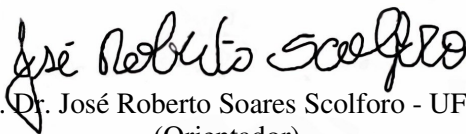
**AVALIAÇÃO DE POVOAMENTOS DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) NA  
MICRORREGIÃO DO BAIXO RIO ACRE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do curso de Mestrado em Engenharia Florestal, área de concentração em Florestas de Produção, para a obtenção do título de “Mestre”.

Aprovada em 14 de fevereiro de 2005.

Prof. Dr. Antônio Donizette de Oliveira - UFLA

Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho – UFPr



Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo - UFLA  
(Orientador)

**LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL**

## Everybody's free

(por Baz Luhrmann)

Nunca deixem de usar filtro solar.

Se eu pudesse dar só uma dica sobre o futuro, seria esta:

Use filtro solar.

Aproveite bem, o máximo que puder o poder e a beleza da juventude.

Ou então esquece. Você nunca vai entender mesmo o poder e a beleza da juventude até que tenham se apagado.

Não se preocupe com o futuro.

Ou então preocupe-se, se quiser, mas saiba que a preocupação é tão eficaz quanto mascar chiclete para tentar resolver uma equação de álgebra.

Todo o dia, enfrente pelo menos uma coisa que te meta medo de verdade.

Cante.

Não seja leviano com o coração dos outros.

Não ature gente de coração leviano.

Não perca tempo com a inveja.

Às vezes se está por cima, às vezes por baixo.

A peleja é longa.

E no fim, é você contra você mesmo.

Não esqueça os elogios que receber, esqueça as ofensas.

Se conseguir isso, me ensine.

Guarde as antigas cartas de amor.

Jogue fora os extratos bancários velhos.

Estique-se.

Não se sinta culpado por não saber o que fazer da vida.

As pessoas mais interessantes que eu conheço não sabiam, aos 22, o que queriam da vida.

Alguns dos quarentões mais interessantes que eu conheço ainda não sabem.

Tome bastante cálcio.

Seja cuidadoso com os joelhos, você vai sentir falta deles.

Talvez você case, talvez não.

Talvez tenha filhos, talvez não.

Talvez se divorcie aos quarenta, talvez dance ciranda em suas Bodas de Diamante.

Dance

Dedique-se a conhecer seus pais. É impossível prever quando eles terão ido embora de vez.

Seja legal com os seus irmãos, eles são a melhor ponte com o seu passado e possivelmente quem vai sempre mesmo te apoiar no futuro.

Entenda que amigos vão e vêm, mas nunca abra mão de uns poucos bons.

More uma vez em Nova York, mas vá embora antes de endurecer.

More uma vez no Havaí, mas se mande antes de amolecer.

Viaje.

Cuidado com os conselhos que comprar.

Mas seja paciente com aqueles que os oferecem.

Conselho é uma forma de nostalgia.

Compartilhar conselhos é um jeito de pescar o passado do lixo,

Esfregá-lo, repintar as partes feias e reciclar tudo para mais do que vale.

Mas no filtro solar, acredite...'

## **DEDICO**

A Deus, por me guiar e acolher a qualquer tempo.

A minha mãe, Tereza, pelo amor, carinho e apoio em todas as fases de minha vida.

Ao meu pai, Figueiredo, pelos ensinamentos dos quais somente um pai é capaz.

## **OFEREÇO**

A meu caminho iluminado chamado por Symone, minha esposa amada e querida.

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por tudo que fizeram por min.

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, por proporcionar minha qualificação e total apoio para a realização dos trabalhos.

Ao professor José Roberto Scolforo, pela dedicação à minha formação profissional desde o curso de especialização, em 1997, e pela extraordinária capacidade de ensinar e orientar, as quais foram especialmente importantes para minha qualificação e muitos de meus colegas.

Ao professor Antônio Donizette de Oliveira, pela orientação e ensinamentos.

Ao professor/colega Cláudio Thiersch, pela colaboração, paciência, amizade, disponibilidade e importante troca de idéias.

Aos professores do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, cujos ensinamentos serão de significativa importância para meu desenvolvimento profissional.

A Madeireira Floresta, em nome do amigo Luiz Aiji Yonekura, pelo completo apoio para realização deste trabalho.

A Madeireira Chalana, em nome do amigo Jandir Artuso, pela amizade e companheirismo à minha família e pelo apoio aos trabalhos desenvolvidos.

A Reflorestadora Amazônia Viva, em nome do companheiro Kleber, pelo apoio técnico e troca de idéias.

Aos meus irmãos, Gustavo e Lilian, pelo sempre pronto apoio aos nossos queridos pais e irrestrito apoio para solucionar minhas demandas, que não foram poucas.

À minha querida família acreana/paraibana: Jediel, Marlene, Paulo, João (Bola), Marizete, Socorro, Júnior e Daniel, pelo carinho, alegria e paciência.



Aos padrinhos Ceicinha e Nicolau, pela amizade e apoio à minha família e especialmente aos meus pais.

Aos colegas de Lavras e da pós-graduação: Sandro e Silvinha, Breno, Pimentel e Sônia, Adauta, Elvis, Edmilson, Lucas, Luciano (Bodinho), Lílian, Fred, Hermógenes, Marcela, Gelyce, Vagner, Simone, Charles, Vanete, Cinthia, Débora, Nádia, Leonardo, Ivana, Daniel, Rodrigo, Samurai, Zigoto, Totonho e Fernanda, Ivonise, Gláucia, Dimas, Mônica, Claudião e Gentil, pelos bons momentos de amizade e companheirismo.

Ao Macedo e Eliseu, pela valiosa ajuda na coleta dos dados. Ao Sebastião Galvão, pela colaboração nos trabalhos de campo e na Fazenda Alfenas.

Às pessoas que foram importantes na minha formação e vida profissional: Prof. Edson Ferreira de Carvalho, Prof. Leônidas Dantas de Assis, João Izidro de Melo Neto, Jurandi Pinheiro de Oliveira Filho, Prof. José Roberto Scolforo, Prof. Mauro Jorge Ribeiro, Prof. Maria José Maia de Faria, Judson Ferreira Valentim e Ivandir Soares Campos.

A Symone, minha amada esposa, por sua companhia, amor, carinho, e sua valiosa dedicação em todas as nossas conquistas.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE TABELAS.....	i
LISTA DE FIGURAS.....	v
RESUMO GERAL .....	ix
GENERAL ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO 1.....	1
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	6
2.1 Teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.).....	6
2.1.1 Descrição da espécie florestal teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.).....	6
2.1.2 Demandas edafoclimáticas da teca .....	8
2.1.3 Características bioecológicas da teca.....	10
2.1.4 Histórico dos plantios de teca nos trópicos.....	11
2.1.5 Perspectivas econômicas dos plantios de teca .....	15
2.2 Sítio florestal.....	16
2.2.1 Altura das árvores dominantes.....	18
2.2.2 Fontes de dados para construção de curvas de índice de sítio .....	19
2.2.3 Tipos de curvas de índice de sítio .....	24
2.2.3.1 Principais métodos para construção de curvas de índice sítio .....	26
2.2.3.1.1 Método da curva-guia .....	26
2.2.3.1.2 Método da equação das diferenças ou diferença algébrica .....	29
2.3 Volume .....	36
2.3.1 Perfil ou forma da árvore.....	36
2.3.2 Cubagem rigorosa.....	37
2.3.3 Funções de volume .....	39
2.3.4 Funções de forma.....	41
2.3.5 Fator de forma.....	44
2.3.6 Análise residual para os modelos de regressão.....	45
2.4 Planejamento da atividade florestal .....	48
2.4.1 Rotação florestal .....	50
2.4.2 Avaliação econômica de povoamentos florestais .....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
CAPÍTULO 2 - Uma nova abordagem para seleção de equações para a predição do volume total e comercial de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	63
1 RESUMO.....	64
2 ABSTRACT .....	65
3 INTRODUÇÃO .....	66
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	68
4.1 Caracterização das áreas de estudo .....	68
4.1.1 Denominação, localização e acesso .....	68

4.1.2	Clima.....	69
4.1.3	Geomorfologia .....	70
4.1.4	Solos .....	71
4.2	Caracterização dos plantios.....	72
4.3	Cubagem rigorosa .....	74
4.4	Percentual de volume de casca e fator de forma.....	76
4.5	Ajuste de modelos de regressão com variáveis Dummy.....	76
4.6	Construção dos modelos para estimar volume de árvores individuais, considerando as variáveis Dummy.....	77
4.7	Análise residual para observações influentes em modelos lineares.....	80
4.8	Seleção da equação de regressão .....	82
4.9	Diagnóstico de normalidade .....	84
4.10	Teste de identidade de modelo.....	86
5	RESULTADO E DISCUSSÃO .....	88
5.1	Estimativas de casca dos povoamentos de teca .....	88
5.2	Fator de forma dos povoamentos de teca.....	90
5.3	Seleção das equações volumétricas com a variável Dummy .....	92
5.3.1	Análise residual para observações influentes.....	93
5.3.2	Equações volumétricas de simples entrada.....	95
5.3.3	Equações volumétricas de dupla entrada .....	98
5.3.4	Efeito da aplicação das variáveis Dummy .....	104
5.4	Diagnóstico de normalidade .....	107
5.5	Teste de identidade de modelos .....	108
6	CONCLUSÕES .....	112
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
	ANEXOS .....	115
	CAPÍTULO 3 - Avaliação de métodos e modelos para a construção de curvas de índice de sítio para <i>Tectona grandis</i> L.f., na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre.....	126
1	RESUMO.....	127
2	ABSTRACT .....	128
3	INTRODUÇÃO .....	129
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	131
4.1	Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados .....	131
4.2	Base de dados.....	131
4.3	Classificação de sítio florestal .....	134
4.3.1	Método da curva guia ou média.....	134
4.3.2	Método da diferença algébrica proposto por Bailey e Clutter .....	135
4.3.3	Método da diferença algébrica proposto por Alder .....	136
4.3.4	Seleção do melhor modelo de classificação de sítio .....	137
4.3.5	Teste de anamorfismo .....	138
5	RESULTADO E DISCUSSÃO .....	138

5.1 Análise de tronco completa.....	138
5.2 Classificação de sítio pelo método da curva guia ou média .....	140
5.3 Classificação de sítio pelo método da diferença algébrica, proposto por Bailey & Clutter .....	144
5.4 Classificação de sítio pelo método da diferença algébrica, proposto por Alder.....	147
5.6 Seleção do modelo e procedimento de obtenção das curvas de índice de sítio.....	149
5.7 Teste de anamorfismo para o modelo selecionado .....	153
6 CONCLUSÃO .....	156
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157
ANEXOS .....	159
CAPÍTULO 4 - Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	166
1 RESUMO.....	167
2 ABSTRACT .....	168
3 INTRODUÇÃO.....	169
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	171
4.1 Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados .....	171
4.2. Cubagem rigorosa.....	171
4.3 Ajuste dos modelos de afilamento .....	172
4.3.1 Modelos de afilamentos .....	172
4.3.1.1 Polinômio de quinto grau (Schöpfer, 1966).....	172
4.3.1.2 Polinômio de potências fracionárias e inteiras (Hradetzky, 1976).....	176
4.3.1.3 Modelo de Goulding & Murray (1976) .....	178
4.4 Precisão e acuracidade dos modelos de afilamento .....	181
4.5 Teste de identidade de modelo.....	183
5 RESULTADO E DISCUSSÃO .....	185
5.1 Seleção das variáveis dos modelos Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976) pelo processo estatístico <i>Stepwise</i> .....	185
5.2 Precisão dos modelos polinomiais na estimativa dos diâmetros.....	188
5.3 Acurácia dos modelos para estimar diâmetros ao longo do fuste .....	189
5.4 Acurácia dos modelos para estimar volumes ao longo do fuste .....	194
5.5 Teste de identidade de modelos .....	199
6 CONCLUSÕES .....	202
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	203
ANEXO A .....	205
ANEXO B.....	210
CAPÍTULO 5 - Seleção de funções densidade de probabilidade para projeção da produção, por classe diamétrica, para povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	215

1 RESUMO.....	216
2 ABSTRACT .....	217
3 INTRODUÇÃO .....	218
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	220
4.1 Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados .....	220
4.2 Base de dados dos povoamentos de teca.....	220
4.3 Classificação de sítio florestal .....	221
4.4 Ajustes das distribuições contínuas para representação da estrutura diamétrica dos povoamentos de teca.....	222
4.4.1 Distribuição lognormal .....	224
4.4.2 Distribuição gama pelo método dos momentos .....	225
4.4.3 Distribuição Weibull pelo método dos percentis .....	226
4.4.4 Distribuição $S_B$ pelo método dos momentos.....	229
4.5 Seleção da distribuição de maior acuracidade .....	230
4.6 Desenvolvimento ou seleção de modelos dos atributos do povoamento.....	231
4.7 Projeção do crescimento e da produção.....	232
4.9 Definição da rotação técnica.....	234
5 RESULTADO E DISCUSSÃO .....	234
5.1 Inventário florestal.....	234
5.2 Ajustes das distribuições contínuas da estrutura diamétrica.....	236
5.3 Seleção das distribuições testadas.....	239
5.4 Modelos para prognose do crescimento e da produção .....	242
5.5 Modelo hipsométrico genérico e funções para estimativa de volume	244
5.6 Prognose por classe diamétrica do número de indivíduos .....	246
5.7 Estimativa da rotação técnica.....	249
5.8 Estimativa de rendimento de múltiplos produtos.....	252
6 CONCLUSÕES .....	255
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	256
ANEXOS .....	260
CAPÍTULO 6 - Análise econômica de povoamentos não desbastados de <i>Tectona grandis</i> L.f. na microrregião do Baixo Rio Acre. ....	266
1 RESUMO.....	267
2 ABSTRACT .....	268
3 INTRODUÇÃO .....	269
4 MATERIAL E MÉTODOS .....	270
4.1 Base de dados.....	270
4.2 Denominação, localização e características dos povoamentos avaliados .....	270
4.3 Estrutura de custos .....	271
4.4 Estrutura de receitas.....	275
4.4.1 Preço da madeira.....	275

4.4.2	Previsão de rendimento volumétrico .....	276
4.5	Critérios para avaliação econômica .....	277
4.5.1	Valor presente líquido (VPL).....	277
4.5.2	Taxa interna de retorno (TIR) .....	278
4.5.3	Benefício (custo) periódico equivalente (B(C)PE) .....	278
4.5.4	Valor esperado da terra (VET).....	279
4.6	Determinação da rotação econômica .....	279
4.7	Análise de sensibilidade.....	280
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	280
5.1	Rendimento volumétrico para múltiplos produtos da madeira .....	280
5.2	Rotação econômica ótima dos povoamentos de teca .....	283
5.3	Taxa interna de retorno (TIR) e valor esperado da terra (VET) .....	285
5.4	Análise de sensibilidade quanto aos juros e ao preço da madeira.....	287
6	CONCLUSÕES .....	291
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	292
	ANEXOS .....	294

## LISTA DE TABELAS

		<b>Página</b>
<b>TABELA 1.1</b>	Modelos para forma não-segmentados, nas suas formas de estimativa de diâmetro ao longo do fuste (...continua.....)	43
<b>TABELA 2.1</b>	Características dos povoamentos de teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.) estudados	74
<b>TABELA 2.2</b>	Frequência de árvores cubadas de <i>Tectona grandis</i> L.f. para os quatro povoamentos, nas diferentes classes de diâmetro	75
<b>TABELA 2.3</b>	Arranjo matemático das variáveis Dummy para os quatro grupos volumétricos de interesse	77
<b>TABELA 2.4</b>	Modelos volumétricos de simples entrada para o volume de madeira comercial e total, com e sem casca, empregando-se as variáveis Dummy	78
<b>TABELA 2.5</b>	Modelos volumétricos de dupla entrada para o volume de madeira comercial e total, com e sem casca, empregando-se as variáveis Dummy (...continua...)	78
<b>TABELA 2.6</b>	Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares	86
<b>TABELA 2.7</b>	Hipóteses de identidade de modelos testadas para as equações selecionadas de simples e dupla entrada, considerando todas as combinações entre as áreas de estudo	88
<b>TABELA 2.8</b>	Estatísticas do percentual de casca para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. para as idades de 2 a 4 anos, de 5 a 7 anos, e de 8 a 9,52 anos	89
<b>TABELA 2.9</b>	Estatísticas da estimativa dos valores do fator de forma para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. nas idades de 2 a 4 anos, de 5 a 7 anos, e de 8 a 9,52 anos	91
<b>TABELA 2.10</b>	Coefficientes de determinação e as principais estatísticas das seis equações (simples entrada) de volume total e comercial com e sem casca, com as variáveis Dummy, ajustados para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados	96
<b>TABELA 2.11</b>	Coefficientes de determinação e as principais estatísticas das treze equações (dupla entrada) de volume total e comercial com e sem casca, com as variáveis Dummy, ajustados para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados (...continua...)	100

<b>TABELA 2.12</b>	Resultados do diagnóstico de normalidade para as equações de Kopecky-Gehrhardt e Scolforo et al. (modelo 1), considerando individualmente volume total com casca ( $V_1$ ), volume total sem casca ( $V_2$ ), volume comercial com casca ( $V_3$ ) e volume comercial sem casca ( $V_4$ ).....	108
<b>TABELA 2.13</b>	Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo testado foi Kopecky-Gehrhardt com a variável Dummy .....	109
<b>TABELA 2.14</b>	Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo testado foi Scolforo et al. (modelo 1) com a variável Dummy .....	111
<b>TABELA 3.1</b>	Modelos testados pelo método da curva-guia para expressar a capacidade produtiva dos diferentes locais, em função da idade (...continua...) .....	134
<b>TABELA 3.2</b>	Modelos testados para expressar a capacidade produtiva dos diferentes sítios em função da idade, pelo método da diferença algébrica, procedimento proposto por Bailey & Clutter (1974) .....	136
<b>TABELA 3.3</b>	Modelos testados para expressar a capacidade produtiva dos diferentes sítios em função da idade, pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980).....	137
<b>TABELA 3.4</b>	Resultados estatísticos dos modelos testados pelos métodos da curva guia, diferença algébrica proposto por Bailey e Clutter (1974) e diferença algébrica proposto por Alder (1980).....	150
<b>TABELA 3.5</b>	Classes de sítio adotadas para <i>Tectona grandis</i> L.f., para os três povoamento estudados na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre, considerando o modelo de Chapman & Richard polimórfica, ajustado pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974).....	152
<b>TABELA 3.6</b>	Parâmetros estimados para relação índice de sítio – altura das árvores dominantes para diferentes idades.....	154
<b>TABELA 4.1</b>	Frequência de árvores cubadas de <i>Tectona grandis</i> L.f. para os quatro povoamentos, nas diferentes classes de diâmetro.....	172
<b>TABELA 4.2</b>	Estatísticas utilizadas para a avaliação das estimativas dos diâmetros e volumes de <i>Tectona grandis</i> L.f., em quatro povoamentos na microrregião do Baixo Rio Acre, estado do Acre .....	182



<b>TABELA 4.3</b>	Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares .....	184
<b>TABELA 4.4</b>	Hipóteses de identidade para o modelo de afilamento selecionado, considerando todas as combinações entre as áreas de estudo.....	185
<b>TABELA 4.5</b>	Resumo do processo estatístico de seleção de variáveis por <i>Stepwise</i> para o modelo Hradetzky (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	186
<b>TABELA 4.6</b>	Resumo do processo estatístico de seleção de variáveis por <i>Stepwise</i> para o modelo Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	187
<b>TABELA 4.7</b>	Parâmetros estimados e medidas de precisão para os modelos polinomiais de Schöepfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos <i>Tectona grandis</i> L.f. estudados .....	188
<b>TABELA 4.8</b>	Ranking final para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste, e valores percentuais para todas as vezes que o modelo alcançou maior pontuação em cada posição do fuste .....	191
<b>TABELA 4.9</b>	Ranking final para estimativa dos volumes ao longo do fuste, e valores percentuais para todas as vezes em que o modelo alcançou maior pontuação em cada posição do fuste .....	196
<b>TABELA 4.10</b>	Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo de afilamento testado foi Goulding & Murray (1976) .....	200
<b>TABELA 4.11</b>	Parâmetros estimados/calculados, potências e medidas de precisão para os modelos polinomiais de Goulding & Murray (1976), para as áreas 1, 2, 3 e 4 individualmente e o conjunto das áreas 2 e 3, conforme indicação de agrupamento do teste de identidade de modelos .....	201
<b>TABELA 5.1</b>	Especificações dos múltiplos produtos da madeira para a <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	233
<b>TABELA 5.2</b>	Características e estimativas para área basal e volume dos dois povoamentos de teca inventariados, Rio Branco, estado do Acre, 2004.....	235
<b>TABELA 5.3</b>	Valores de Kolmogorov-Smirnov de máxima divergência entre as distribuições observadas e as	

	distribuições teóricas lognormal, gama, Weibull e $S_B$ testadas para cada unidade amostral dos dois povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	240
<b>TABELA 5.4</b>	Ranqueamento das distribuições teóricas, segundo o resultado de divergência para o teste de Kolmogorov-Smirnov .....	242
<b>TABELA 5.5</b>	Equações expressam os atributos dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. a serem projetados .....	243
<b>TABELA 5.6</b>	Parâmetros estimados/calculados, potências e medidas de precisão para os modelos polinomiais Goulding & Murray (1976), para as áreas 1 e 3 ajustadas individualmente, conforme indicação do teste de identidade de modelos .....	246
<b>TABELA 5.7</b>	Equações volumétricas selecionadas para gerar a compatibilidade do modelo de afilamento de Goulding & Murray (1976) .....	249
<b>TABELA 5.8</b>	Incremento médio anual do volume de <i>Tectona grandis</i> L.f. nas principais regiões produtoras do mundo (...continua...).....	251
<b>TABELA 6.1</b>	Custos, em reais por hectare, de todas operações florestais nos dois povoamentos de teca estudados na microrregião do Baixo Rio Acre .....	272
<b>TABELA 6.2</b>	Preços estimados para a madeira da teca em tora originária dos dois povoamentos na microrregião do Baixo Rio Acre .....	276
<b>TABELA 6.5</b>	Critérios de avaliação econômica para determinação da REO para os povoamentos estudados.....	283
<b>TABELA 6.6</b>	Estimativas para a TIR e para o VET, considerando-se os investimentos dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. das áreas 1 e 3, nas idades entre 5 a 30 anos, município de Rio Branco, estado do Acre.....	287

## LISTA DE FIGURAS

		<b>Página</b>
<b>FIGURA 1.1</b>	Mapa dos países com plantios comerciais de teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.).....	15
<b>FIGURA 1.2</b>	Curvas anamórficas de índice de sítio .....	25
<b>FIGURA 1.3</b>	Curvas polimórficas de índice de sítio.....	26
<b>FIGURA 1.4</b>	Perfil de uma árvore e as suas possíveis formas da base à ponta .....	36
<b>FIGURA 2.1</b>	Mapa de localização das áreas de estudo (Sempre Verde, São Francisco I e São Francisco II) com plantios de teca, nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil .....	68
<b>FIGURA 2.2</b>	Mapa da pluviosidade média anual do estado do Acre, com destaque para os municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil (ACRE, 2000 - modificado).....	70
<b>FIGURA 2.3</b>	Mapa geomorfológico dos municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil (ACRE, 2000 - modificado).....	71
<b>FIGURA 2.4</b>	Povoamento de teca variedade <i>Tennasserim</i> , com densidade de 2.083 árvores.ha <sup>-1</sup> e idade de 9,52 anos. Em que (a) panorâmica e (b) interior do povoamento. (Área 1 - Colônia Sempre Verde – Rio Branco, Acre, 2004).....	72
<b>FIGURA 2.5</b>	Povoamento de teca variedade <i>Tennasserim</i> , com densidade de 1.111 árvores.ha <sup>-1</sup> e idade de 7,4 anos (Área 3 - Colônia São Francisco I – Rio Branco, Acre, 2004).....	73
<b>FIGURA 2.6</b>	Distribuição do percentual de casca em relação ao DAP, para os quatro povoamentos de teca .....	90
<b>FIGURA 2.7</b>	Distribuição do fator de forma em relação ao DAP, para os quatro povoamentos de teca .....	91
<b>FIGURA 2.8</b>	Distribuição dos volumes (calculados pelo fator de forma) em função do DAP (a) e da altura total das árvores cubadas rigorosamente (b) .....	92
<b>FIGURA 2.9</b>	Distribuição da estatística <i>Cook's D</i> em função do DAP, antes e após a retirada da observação influente para as equações ajustadas de Meyer, Scolforo (modelo 1), Naslund e Spurr.....	94
<b>FIGURA 2.10</b>	Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm), para as seis equações volumétricas testadas, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	97

<b>FIGURA 2.11</b>	Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm) para as equações volumétricas de Honner, Meyer, Naslund, Ogaya, Schumacher não-linear, Schumacher linearizada e Scolforo et al. (Mod. 1 e 2), considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	102
<b>FIGURA 2.12</b>	Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm) para as equações volumétricas de Scolforo et al. (Mod. 3), Spurr (1952) (Mod. 1), Spurr (logarítmica), Stoate (1945) (australiana) e Takata, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	103
<b>FIGURA 2.13</b>	Predição dos volumes totais e comerciais para o modelo Scolforo et al. (modelo 1), por meio de ajustes independentes e com o emprego da variável Dummy, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. ....	105
<b>FIGURA 2.14</b>	Predição dos volumes totais e comerciais: (a) resultados de predição do modelo Scolforo et al. (modelo 1), ajustado pela variável Dummy; (b) resultados de predição do modelo Scolforo et al. (modelo 1) para volume com casca e Schumacher e Hall não linear para volume sem casca, ajustados de forma independente, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.; e, (a 1) e (b 1) ampliação da parte destacada dos gráficos (a) e (b).....	106
<b>FIGURA 3.1</b>	(a) Identificação das árvores dominantes; (b) abate das árvores (c) codificação dos discos; (d) lixamento dos discos; (e) aplicação de resina; (f) marcação das linhas referenciais de mensuração dos anéis de crescimento; (g) digitalização dos discos; e, (h) processamento das imagens e mensuração dos discos de teca .....	133
<b>FIGURA 3.2</b>	Perfis das árvores dominantes, sendo: (A) árvore dominante da unidade amostral 9 da área 1, (B) árvore dominante da unidade amostral 6 da área 3 e (C) árvore dominante da unidade amostral 2 da área 4.....	139
<b>FIGURA 3.3</b>	Resíduo percentual, em função da idade (anos), para os 10 primeiros modelos testados pelo método da curva-guia .....	141

<b>FIGURA 3.4</b>	Resíduo percentual, em função da idade (anos), para os modelos de 11 a 15, testados pelo método da curva-guia .....	142
<b>FIGURA 3.5</b>	Resíduo percentual em função da idade, para os modelos: Schumacher anamórfica (modelo 16), Schumacher polimórfica (modelo 17), Chapman & Richard anamórfica (modelo 18), Chapman & Richard polimórfica (modelo 19), Bailey & Clutter anamórfica (modelo 20) e Bailey & Clutter polimórfica (modelo 21), testados pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974).....	145
<b>FIGURA 3.6</b>	Resíduo percentual em função da idade, para os modelos: Schumacher anamórfica (modelo 22), Schumacher polimórfica (modelo 23), Chapman & Richard anamórfica (modelo 24) e Chapman & Richard polimórfica (modelo 25), testados pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980).....	147
<b>FIGURA 3.7</b>	Curvas polimórficas de índice de sítio geradas pelos três modelos com melhor estabilidade de classificação, em que: Chapman & Richard polimórfica (modelo 19 – primeiro mais estável); Schumacher polimórfica (modelo 17 – segundo mais estável); e, Bailey & Clutter polimórfica (modelo 21 – terceiro mais estável) .....	151
<b>FIGURA 4.1</b>	Diâmetros médios reais e estimados pelos modelos polinomiais de Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	193
<b>FIGURA 4.2</b>	Volumes médios reais e estimados pelos modelos polinomiais de Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f.....	198
<b>FIGURA 5.1</b>	Distribuições diamétricas observadas e teóricas contínuas dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f., em que: distribuição observada da área 1 (a) e área 3 (b); distribuição lognormal área 1 (c) e área 3 (d); distribuição gama área 1 (e) e área 3 (f); distribuição Weibull área 1 (g) e área 3 (h); e, distribuição $S_B$ área 1 (i) e área 3 (j) .....	237

<b>FIGURA 5.2</b>	Cobertura dos dosséis dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. na (a) área 1 com 2.083 árvores.ha <sup>-1</sup> e (b) área 3 com 1.111 árvores.ha <sup>-1</sup> , Rio Branco, Acre, 2004 .....	238
<b>FIGURA 5.3</b>	Comportamento da altura média para <i>Tectona grandis</i> L.f. nas idades 5, 10, 15, 20, 25 e 30 anos: (a) povoamento da área 1, com densidade inicial de 2.083 árvores.ha <sup>-1</sup> e (b) povoamento da área 3, com densidade inicial de 1.111 árvores.ha <sup>-1</sup> .....	245
<b>FIGURA 5.4</b>	Prognose de sobrevivência por classe diamétrica pela função Weibull para os povoamentos da área 1 (a) e área 3 (b) .....	247
<b>FIGURA 5.5</b>	Curvas projetadas para o ICA volume e IMA volume, para as áreas 1 (a) e 3 (b) .....	250
<b>FIGURA 5.6</b>	Rendimento volumétrico por categoria comercial para os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. nas áreas 1 e 3, em seus respectivos anos de rotação técnica estimado .....	253
<b>FIGURA 6.1</b>	Sensibilidade do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico equivalente (B(C)PE) mediante a oscilação da taxa mínima de atratividade (TMA), considerando-se os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, estado do Acre .....	288
<b>FIGURA 6.2</b>	Sensibilidade do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico equivalente (B(C)PE) mediante a oscilação do preço da madeira, considerando-se os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, estado do Acre .....	289

## RESUMO GERAL

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Avaliação de povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) na microrregião do Baixo Rio Acre**. 2005. 301p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Os estudos foram realizados em povoamentos de *Tectona grandis* L.f., com densidades e idades distintas, em propriedades da Madeireira Floresta Ltda e Madeireira Chalana Ltda, localizadas nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, estado do Acre. O objetivo foi estudar aspectos biométricos e do comportamento da espécie, visando: selecionar modelos volumétricos gerais de simples e dupla entrada, com a variável dummy para a obtenção de volumes total e comercial, com e sem casca; selecionar o método e modelo que apresentaram classificação de sítio mais estável para as árvores dominantes nos povoamentos avaliados; avaliar a acurácia dos modelos polinomiais propostos por Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), na estimativa dos diâmetros e volumes ao longo do fuste; selecionar uma função densidade probabilidade que melhor represente as distribuições diamétricas dos povoamentos; ajustar modelos que representem os atributos dos povoamentos; projetar o crescimento e produção por classe diamétrica e o rendimento de múltiplos produtos da madeira na idade de rotação silvicultural; determinar a rotação econômica ótima (REO) para os povoamentos estudados; avaliar a viabilidade econômica de povoamentos de teca não desbastados, e analisar a sensibilidade dos indicadores econômicos quanto à oscilação da taxa mínima de atratividade (TMA) e da redução da receita. A base de dados foi composta por 36 unidades amostrais de 400 m<sup>2</sup>. Em torno delas foram selecionadas as árvores dominantes representativa de cada unidade amostral, com a finalidade de proceder a análise de tronco completa. Ao todo foram cubadas 160 árvores de acordo com a classe diamétrica diagnosticadas pelo inventário florestal. Para seleção das equações de volume com a variável Dummy, os modelos foram divididos em simples (DAP) e dupla entrada (DAP e altura) e a melhor equação foi avaliada pelo teste de identidade de modelo. Os critérios para seleção dos modelos foram o  $R^2$ ,  $R^2_{ajustado}$ , erro padrão residual ( $S_{y,x}$ ) e erro de predição

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

(*Press<sub>p</sub>*), esta última apenas para modelos lineares. Na classificação de sítios florestais foram testados quinze modelos pelo método da curva média ou curva guia, três modelos ajustados na forma anamórfica e polimórfica pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974), e, dois modelos ajustados nas formas anamórfica e polimórfica pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980). Para os ajustes das funções de afilamento foram empregadas as estatísticas de Parresol et al. (1987) para avaliar a acurácia dos modelos e aplicados testes de identidade de modelos. Para prognose por classe diamétrica foram realizadas as seguintes etapas: ajuste e seleção das distribuições diamétricas (f.d.p.); desenvolvimento e seleção de modelos dos atributos do povoamento, tendo o critério de seleção da equação mais precisa sido por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e distribuição gráfica dos resíduos; seleção do modelo hipsométrico genérico; ajuste da função de afilamento; estimar a rotação técnica e o rendimento de múltiplos produtos da madeira na idade de rotação. Na análise econômica foram adotados os seguintes critérios: o valor presente líquido (VPL) e o benefício periódico equivalente (B(C)PE) para avaliar a viabilidade técnica e a determinação da REO; a taxa interna de retorno (TIR) para avaliar a taxa de crescimento do investimento; o valor esperado da terra (VET) para mensurar o custo de oportunidade do patrimônio terra, e, na análise de sensibilidade, avaliou-se o comportamento do VPL e do B(C)PE, mediante a oscilação da TMA e da redução das receitas. Os resultados foram: (a) os modelos Kopezky-Gehrhardt, para categoria de simples entrada e o modelo Scolforo et al. (modelo 1), para categoria de dupla entrada, foram os modelos volumétricos com a variável Dummy selecionados; o teste de identidade de modelos mostrou não haver possibilidade de utilização de uma única equação para os povoamentos avaliados, somente foi possível a junção por meio de subgrupos; as equações ajustadas se mostram compatíveis para os volume totais e comerciais com e sem casca; (b) para classificação de sítio, o método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974) propiciou ajustes superiores aos demais métodos e o modelo de Chapman & Richard (polimórfica) foi o que apresentou melhor desempenho; o teste de anamorfismo para o modelo selecionado demonstrou que a base de dados segue um padrão anamórfico; porém, a ausência de observações em todas as faixas de índice de sítio para todas as idades não garantiu boa performance dos modelos anamórficos; (c) na seleção do modelo de afilamento, o modelo que gerou as melhores estimativas de diâmetros e volumes ao longo do fuste foi o modelo Goulding & Murray (1976), seguido pelos modelos Hradetzky (1976) e Schöepfer (1966); o teste de identidade de modelo mostrou ser mais adequado realizar ajustes independentes para as áreas 1 e 4 e para o subgrupo 2 e 3; (d) na prognose por classe diamétrica, a função densidade de probabilidade Weibull pelo método dos percentis foi a que melhor representou a distribuição diamétrica das unidades amostrais; no povoamento com densidade



inicial de 2.085 árvores.ha<sup>-1</sup>, foi estimada a rotação técnica aos 19 anos de idade, enquanto no povoamento com densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>, a rotação técnica foi prevista para os 24 anos. O povoamento mais denso apresentou maior produção, porém, com menor percentual de madeira com dimensões para serraria; as estimativas de crescimento e produção dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. avaliados são compatíveis com as principais regiões produtoras no mundo e (e) na avaliação econômica, a REO baseada na maximização dos valores do VPL e B(C)PE, considerando uma taxa mínima de atratividade de 10%, ficou prevista para os 25 anos de idade na área mais densa e aos 27 anos de idade na área de menor densidade, e os povoamentos de teca avaliados são viáveis economicamente, para uma TMA de 10% a.a.

Palavra-chave: volumetria, variáveis dummy, classificação de sítio, prognose por classe diamétrica, função de afilamento, avaliação econômica, identidade de modelos, diagnóstico de regressão, estimativas de volumes.

## GENERAL ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Evaluation of teak stands (*Tectona grandis* L.f) in Baixo Rio Acre micro region.** . 2005. 301p. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The studies were undertaken in stands of *Tectona grandis* L.f; with distinct densities and ages on farms of the Madeireira Floresta Ltda and Madeireira Chalana Ltda, situated in the towns of Rio Branco and Acrelandia, state of Acre. The objective was to study biometric and behavioral aspects of the species, aiming to: select general one way and two way volumetric models with the dummy variable for obtaining total and commercial volumes, with and without bark; select both the method and model which presented the most stable classification of site for the dominant trees in the evaluated stands; evaluate the accuracy of the polynomial models proposed by Schöepfer (1966), Hradetzky (1976) and Goulding & Murray (1976) in the estimate of the diameters and volumes along the bole; select a probability density function which best represent the diameter distributions of the stands; fit models which represents the stands attributes; project growth and yield per diameter class and the yield of multiple wood products at the age of silvicultural rotation, determine optimum economic rotation (OER) for the investigated stands; evaluate the economic viability of no thinned teak stands and survey the sensitivity of the economic indicators estimating the oscillation of the minimum attractiveness rate (MAR) and cut reduction. The data base was made up of 36 sampling units of 400 m<sup>2</sup>. Around them were selected the dominant trees representative of each sampling unit with the purpose of proceeding the complete trunk analysis. In the whole, 160 trees were scaled according to the diameter class diagnosed by the forest inventory. For screening of the volume equation with dummy variable, the models were divided into one way (diameter at breast height – d.b.h.) and two way (d.b.h. and height) and the best equation was evaluated by the model identity test. The criteria for model selection were  $R^2$ ,  $R^2$  adjusted, residual standard error ( $S_{yx}$ ) and prediction error ( $Press_p$ ), this latter only for linear models. In the classification of forest sites were tested fifteen models by the average curve method or guide curve, three models adjusted in the anamorphic and polymorphic form by the algebraic difference method proposed by Bailey & Clutter (1974) and two models adjusted in the anamorphic and polymorphic forms by the algebraic difference method proposed by Alder (1980). For the fits of the tapering functions were employed the statistics of Parresol et al. (1987) to evaluate the accuracy of the models and applied tests of model identity. For

prognosis per diameter class, the following steps were performed: fit and selection of the diameter equations (f.d.p.), development and selection of the stand attributes, the criterion of selection of the most precise equation having been by means of the determination coefficient ( $R^2$ ), residual standard error ( $S_{yx}$ ) and graphical distribution of residues; selection of the generic hypsometric model; fit of the tapering function, estimate a technical rotation and yield of multiple wood products at the rotation age. In the economic analysis were adopted the following criteria: net present value (NPV) and equivalent periodic benefit (EPB) to evaluate the technical viability and OER determination; return internal rate (TIR) to evaluate the investment growth rate; the expected land value (NPV) to measure the opportunity cost of the land patrimony and in the sensitivity analysis, the behavior of the NPV and EPB was evaluated by means of the oscillation of MAR and cut reduction. The results were: (a) Kopezky-Gehrhardt for the one way rank and Scolforo et al. model (model 1) for two way rank were the volumetric models with dummy variable selected; the identity test of models showed that there is no possibly of utilizing a single equation for the evaluated stands, only the junction by means of subgroups was possible; the adjusted equations proved compatibility for the total and commercial volumes with and without bark; (b) for site classification, the algebraic difference method proposed by Bailey & Clutter (1974) provided a superior fitting to the other methods and Chapman & Richard model (polymorphic) was the one which presented best performance; the anamorphism test for the selected model showed the database follows the anamorphic standard; but, the absence of observations in all the site index ranges for the ages didn't warrant a good performance of anamorphic models ; (c) in the selection of the tapering model, the model which generated the best estimates of diameter and volumes along the bole was the Goulding & Murray model (1976), followed by the models of Hradetzky (1976) and Schöpfer (1966), the model identity test proved to be more adequate to perform independent fits for areas 1 and 4 and subgroups 2 and 3; (d) in the prognosis per diameter class, the Weibull percentile probability density function was the one which best represented the diameter distribution of the sampling units, in the stand with an initial density of 2.085 trees.ha<sup>-1</sup>, the technical rotation was estimated at 19 years old while in the stand with an initial density of 1.111 tree.ha<sup>-1</sup>, the technical rotation was foreseen for the 24 years old. The densest stand presented higher yield, but, with lowest percent of saw mill wood, the growth estimates and stand yields of *Tectona grandis* L. evaluated are compatible with the world's main growing regions and (e) in the economic evaluation, the OER based upon the maximization of the values of the NPV and EPB, taking into account a minimum attractiveness rate of 10% was foreseen for the 25 year of age in the area with the greatest density and at 27 years of age in the area of lowest density and the evaluated teak stands are viable economically for a MAR of 10% per year.

Key-words: volumetry, dummy variables, site classification, prognosis per diameter class, tapering function, economic evaluation, model identity, regression diagnostic, volume estimates.

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser); Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-adviser)

## **CAPÍTULO 1**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As empresas industriais madeireiras na Amazônia que, por sua natureza, consomem matéria-prima florestal, são obrigadas, perante a legislação a manter, dentro de um raio em que a exploração e transporte sejam julgados econômicos, um serviço organizado, que assegure o plantio de espécies florestais, em terras próprias ou pertencentes a terceiros, cuja produção, sob exploração racional, seja equivalente ao consumido para o seu abastecimento. Esta determinação legal levou à sistemática ampliação das áreas de reflorestamento na Amazônia. Desde 2002, o empreendedor florestal pode fazer a opção de recolher fundos para o órgão ambiental ou implantar projetos de reposição florestal.

O reflorestamento praticado na Amazônia tornou-se um desafio para os utilizadores de matéria-prima florestal, visto serem incipientes os estudos e pesquisas capazes de subsidiar a adoção de procedimentos técnicos adaptados às condições regionais, bem como as experiências bem sucedidas de reflorestamento na Amazônia.

O tempo comprovou que o comportamento de algumas espécies nativas implantadas em reflorestamento não apresentou desempenho satisfatório. Muitas delas sofreram severos ataques de pragas e fitomoléstias, outras não resistiram às práticas silviculturais inadequadas, a exemplo dos reflorestamentos com mogno (*Swietenia macrophylla* King.) e cedro (*Cedrella odorata* L.), ambos fortemente atacados pela broca (*Hypsipyla grandella*), que destrói o meristema apical promovendo um crescimento irregular do tronco, e não permitindo seu aproveitamento comercial. Por outro lado, espécies exóticas, como a teca (*Tectona grandis* L.f.), adaptaram-se muito bem, provavelmente pelo rápido crescimento inicial e rusticidade.

Inicialmente, os plantios de teca limitavam-se aos países da Ásia Tropical, principalmente Índia, Myanmar e Tailândia, cujo objetivo era o de

compensar o esgotamento das populações naturais de teca que eram exploradas de forma predatória. Posteriormente, a teca começou a ser plantada em novas zonas tropicais, particularmente na África Ocidental, América Central e América do Sul, sobretudo no Brasil e Costa Rica, onde os plantios são caracterizados pela elevada densidade de indivíduos e com rotações mais curtas que as praticadas no sudeste asiático.

No estado do Acre, os reflorestamentos com teca têm o objetivo de, em curto prazo, cumprir as exigências da legislação vigente; em médio prazo, obter respostas do comportamento da espécie implantada e, em longo prazo, substituir a matéria-prima nativa por produção originária de plantios. Porém, práticas importantes de monitoramento silvicultural são negligenciadas, o que inviabiliza a aplicação de tratamentos corretos de condução dos plantios.

Atualmente, a teca é a principal espécie dos reflorestamentos na Amazônia Ocidental. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) recebe freqüentemente a demanda de empresas requerendo a instalação de reflorestamentos puros de teca. A pouca informação existente sobre o comportamento da espécie na região e a falta de adoção de práticas silviculturais corretas preocupam os órgãos ambientais sobre a liberação de plantios puros. Por outro lado, produtores agroflorestais e empresas madeireiras realizam de forma independente o plantio da espécie (Figueiredo, 2001).

Entre as principais demandas tecnológicas para os plantios de teca em novas regiões tropicais, Nair & Souvannavong (2000) indicam a necessidade de estudos para avaliação do crescimento e rendimento em regime de curta rotação; estudos sobre a silvicultura, com destaque para desbaste e desrama; manejo de nutrientes e controle de pragas e doenças, especialmente a aplicação de medidas de controle biológico.

O objetivo desta dissertação foi estudar aspectos biométricos e do comportamento da espécie para estimar o crescimento e rendimento de povoamentos de *Tectona grandis* L.f. na microrregião do Baixo Rio Acre, visando o emprego de práticas silviculturais para o manejo da espécie, bem com avaliar a economicidade destes plantios.

Os objetivos específicos foram:

- selecionar modelos volumétricos gerais de simples e dupla entrada, com a variável dummy, para a obtenção de volumes total e comercial, com e sem casca;
- avaliar a possibilidade de agrupar as equações de volume de simples e dupla entrada, assim com as funções de afilamento;
- selecionar o método e o modelo que apresentaram classificação de sítio mais estável para as árvores dominantes nos povoamentos avaliados;
- avaliar a acurácia dos diferentes modelos polinomiais na estimativa dos diâmetros e volumes ao longo do fuste;
- selecionar uma função densidade probabilidade que melhor represente as distribuições diamétricas dos povoamentos;
- ajustar modelos que representem os atributos dos povoamentos, tais como: sobrevivência, área basal, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, média aritmética dos diâmetros, diâmetro percentil, modelo hipsométrico genérico, dentre outros;
- definir a idade de rotação técnica/silvicultural dos povoamentos estudados;
- projetar o crescimento e a produção por classe diamétrica e o rendimento de múltiplos produtos da madeira na idade de rotação silvicultural;



- determinar a rotação econômica ótima (REO) para os povoamentos estudados, avaliar a viabilidade econômica de povoamentos de teca não desbastados; e,
- analisar a sensibilidade dos indicadores econômicos quanto à oscilação da taxa mínima de atratividade (TMA) e da redução da receita.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Teca (*Tectona grandis* L.f.)

#### 2.1.1 Descrição da espécie florestal teca (*Tectona grandis* L.f.)

A *Tectona grandis* L.f., conhecida comumente como teca ou *teak* (Índia, Siam, Birmânia, Indonésia, Estados Unidos e Inglaterra), *teck* (França), *ojati* (Java), *may sak* (Laos) e *tiek* (Alemanha), é uma árvore caducifólia de grande porte, pertencente à família das Verbenaceae, com crescimento sazonal determinado. É natural das florestas tropicais de monção do sudeste da Ásia (Índia, Myanmar, Tailândia e Laos), onde pode alcançar até 60 metros de altura total. A teca produz uma das madeiras tropicais mais valiosas e com propriedades mais conhecidas (Kaosa-Ard, 1983; Weaver, 1993; Pandey & Brown, 2000; Somarriba et al., 1999; Centeno, 2003; Tsukamoto Filho et al., 2003).

As folhas da teca são opostas, elípticas, coriáceas e ásperas ao tato, dotadas de pecíolos curtos ou ausentes e ápice e base agudos. Nos indivíduos adultos, as folhas, em média, possuem 30 a 40 centímetros de comprimento por 25 centímetros de largura. No entanto, nos indivíduos mais jovens, com até 3 anos de idade, as folhas podem atingir o dobro dessas dimensões (Matricardi, 1989).

Em ambientes naturais, a teca apresenta um tronco retilíneo, com dimensões e forma variados, de acordo com o local e condições de crescimento, podendo atingir o diâmetro de 0,9 a 2,4 metros.

A teca possui flores monóicas, brancas e pequenas, dotadas de pecíolos curtos, dispostas em grandes e eretas inflorescências do tipo panícula. As flores são recobertas por pêlos finos, tendo um cálice de cor cinza-pálido, com seis lóbulos. A corola é esbranquiçada e tem forma de funil, com um tubo curto e

seis lóbulos estendidos. O pistilo contém um ovário de quatro células, um estilete delgado e um estigma de dois lóbulos. As flores se abrem poucas horas depois do amanhecer e o melhor período para a polinização ocorre entre as 11:30 h e 13:00 h. (Weaver, 1993).

A teca é uma espécie de polinização cruzada, porém, a incompatibilidade consigo mesma é bastante elevada. As sementes resultantes da autopolinização podem ocorrer, porém, sua germinação é pobre quando comparada com as sementes resultantes de polinização cruzada (Schubert, 1974; Weaver, 1993).

Seus frutos consistem de drupas subglobosas com aproximadamente 1,2 centímetro de diâmetro, recobertas por uma grossa camada marrom. As inflorescências surgem entre os meses de junho a setembro na Amazônia Ocidental e os frutos amadurecem entre 3 a 22 meses após sua formação. Este ciclo determina que os frutos maduros caem gradualmente na próxima estação seca. Os frutos possuem, geralmente, de 1 a 3 sementes e raramente 4 sementes, conjunto que é envolvido por uma vesícula membranosa (Schubert, 1974).

As cepas de teca rebrotam facilmente aos serem cortadas ou danificadas e seu crescimento inicial é rápido. A teca também desenvolve uma copa vigorosa logo após a operação de desrama (Weaver, 1993).

A espécie produz uma raiz pivotante grossa e larga. Na base do tronco pode ocorrer a formação de sapopemas (Kaosa-Ard, 1983; Cardoso, 1991; Pandey & Brown, 2000). Para Kaosa-Ard (1999), citado por Krishnapillay (2000), as sapopemas aparecem em diversas estratégias de manejo e sua vinculação esta em função do material genético empregado. Próximo à extremidade, sua aparência é esbranquiçada e delicada, podendo depois, no sentido do colo da árvore, tornar-se de cor pardo-claro e lenhosa.

De acordo com Wadsworth (1997), a madeira da teca possui fibras retas, uma textura mediana e oleosa ao tato, e uma fragrância suave depois de seca.

Sua madeira seca rapidamente a céu aberto (com pouca exposição ao sol) e de maneira satisfatória. Apresenta um alburno amarelado ou esbranquiçado, geralmente delgado, contrastando com o cerne que é castanho-amarelo-dourado. Podem ser observados anéis de crescimento nítidos e diferenciados nos cortes transversais. A densidade básica da madeira de teca seca é considerada dura e pesada, com valores variando de 0,55 a 0,68 g/cm<sup>3</sup>. Estudos demonstram que a durabilidade da madeira diminui quando tem anéis de crescimento largos e quando a madeira é originária de plantios jovens. Uma taxa de crescimento muito acelerada, principalmente na etapa inicial de desenvolvimento, diminui significativamente a durabilidade da madeira, reduzindo seu valor econômico.

A madeira da teca é muito utilizada na indústria de construção naval, devido à sua resistência à ação do sol, calor, frio, água de chuva e de mar, além de ser facilmente trabalhada. Também é amplamente utilizada na construção de móveis, estruturas, pisos, peças torneadas, chapas, painéis, postes e dormentes (Cardoso, 1991).

Suas propriedades físico-mecânicas caracterizam-se pela facilidade de secagem e estabilidade dimensional, possibilitando estabelecer a teca como um padrão para avaliação das madeiras de todas as outras espécies de folhosas (Cardoso, 1991).

### **2.1.2 Demandas edafoclimáticas da teca**

A espécie tolera uma grande variedade de climas, porém cresce melhor em condições tropicais moderadamente úmidas e quentes. Grande parte da área de distribuição natural da teca se caracteriza por climas do tipo monzonal, com uma precipitação entre 1.300 e 2.500 mm por ano e uma estação seca de 3 a 5 meses. Porém, a espécie suporta precipitações baixas de 500 mm/ano até altas

intensidades pluviométricas de até 5.100 mm/ano (Kaosa-Ard, 1983; Weaver, 1993).

Krishnapillay (2000) aponta que estudos de crescimento e produção de plantios de teca, realizados na Malásia, em regiões com pluviosidades de 2.500, 2.600, 2.700 e 2.800 mm/ano, não mostraram diferenças significativas. O rendimento dos plantios em climas quentes e úmidos tem atraído o estabelecimento de empreendimentos florestais de maior porte.

Para Pandey & Brown (2000), a espécie apresenta seu melhor desenvolvimento em regiões onde a precipitação anual fica entre 1.250 mm a 3.750 mm, temperatura mínima de 13°C a 17 °C e máxima entre 39°C a 43 °C.

Kaosa-Ard (1983) aponta que as geadas representam um dos mais importantes fatores limitantes à distribuição da teca. As geadas afetam tanto as mudas quanto as árvores jovens ou adultas. Os principais prejuízos acontecem nas partes suculentas do meristema apical, gemas, folhas, casca e câmbio jovem.

A teca é uma espécie florestal exigente por luz e não tolera a sombra ou supressão da luz em qualquer fase de ciclo de vida. Para alcançar um adequado desenvolvimento, requer que não ocorra impedimento de luz sobre sua copa (Matricardi, 1989; Pandey & Brown, 2000).

A árvore da teca pode crescer em diversos solos e formações geológicas (Chaves & Fonseca, 1991). A qualidade de seu desempenho depende da profundidade, estrutura, porosidade, drenagem e da capacidade de retenção de água.

Devido às raízes serem sensíveis à deficiência de oxigênio, a espécie se desenvolve melhor em solos com boa aeração. Esta característica de alta demanda por oxigênio leva a espécie a concentrar entre 65% a 80% de sua biomassa radicular fina nos primeiros 30 cm de solo, com a maior concentração entre 10 e 20 cm (Weaver, 1993; Krishnapillay, 2000).

O desenvolvimento é melhor em solos profundos, bem drenados e férteis, especialmente em solos aluviais de diversas origens. O potencial hidrogeniônico (pH) ótimo do solo é de 6,5 a 7,5. A disponibilidade de cálcio é também um fator limitante, visto que a falta de cálcio traduz-se em raquitismo das árvores (Chaves & Fonseca, 1991; Krishnapillay, 2000).

Weaver (1993) aponta que regiões de relevo acidentado, solos com problemas de drenagem e altitudes maiores de 1000 metros também influenciam o desempenho da espécie de forma negativa.

### **2.1.3 Características bioecológicas da teca**

A maioria dos patógenos de plantios de teca tem sido identificada na Índia, com poucas ocorrências registradas em plantações na África, América Latina e algumas regiões de floresta nativa nos países de origem. Apesar de sua ocorrência, existe pouca informação disponível acerca de sua consequência econômica.

Para Matricardi (1989), a teca é uma espécie relativamente resistente ao ataque de insetos e doenças graves, tanto em seu ambiente natural quanto nas plantações.

Na Índia, a principal praga tem sido a larva-desfolhadora (*Hyblaea puera* Cramer ordem Lepidóptera), praga que ocasionou uma perda de 44% no aumento volumétrico. O desfolhamento intenso pode ocasionar bifurcações, diminuindo o valor econômico do fuste (Weaver, 1993).

No estado de Mato Grosso, constatou-se a ocorrência de *Hyblaea puera* pela primeira vez em plantios homogêneos de teca nos municípios de Cáceres e Rosário Oeste, em 1997 e 1998, respectivamente, no início da estação chuvosa (outubro). O fato de *Hyblaea puera* iniciar seus ataques no início do período

chuvoso pode estar, provavelmente, correlacionado à época de maior disponibilidade de folhas jovens (Peres-Filho et al., 2002).

A espécie tem a reputação de ser resistente ao fogo. De maneira particular isso ocorre quando os incêndios ocorrem com pouca intensidade e não alcançam elevadas temperaturas. As árvores de até 3 anos de idade rebrotam depois de um incêndio de superfície. As árvores com maior tamanho e idade têm melhor proteção por sua casca, no entanto, mesmas as de maior porte podem sofrer danos permanentes pelo fato de sua casca não ser suficientemente grossa para suportar altas temperaturas de determinados incêndios florestais. O fogo estimula o crescimento demasiado de brotações laterais na parte inferior do fuste, causa manchas na madeira diminuindo seu valor econômico, e possibilita o acesso de agentes patógenos na base do tronco (Weaver, 1993).

#### **2.1.4 Histórico dos plantios de teca nos trópicos**

A primeira plantação de teca ocorreu em 1680, no Sri Lanka (Pandey & Brown, 2000). Posteriormente, durante os séculos XVIII e XIX, o Império Britânico dependia da madeira da teca para a construção de navios; com a preocupação de garantir o futuro suprimento de madeira, iniciaram suas plantações na Índia (Laurie, 1937; Pandey & Brown, 2000). A partir de então, tem sido plantada em várias regiões do planeta para construção naval, móveis e carpintaria em geral (Weaver, 1993).

Em decorrência da intensa exploração dos estoques nativos presentes na Ásia, a teca começou a ficar escassa por volta de 1830, época em que se intensificaram os plantios nas regiões do sudeste asiático (Wadsworth, 1997).

Em Java e em algumas ilhas menores do arquipélago da Indonésia e Filipinas, as plantações de teca começaram em 1880 e 80 anos depois já havia quase 850.000 hectares (Weaver, 1993; Wadsworth, 1997). Essas plantações de

teca produziram para a região uma abundância de madeira barata para móveis, depósitos de madeira e o aumento da disponibilidade de lenha. Para Pandey & Brown (2000), nesta região a teca era plantada, preferencialmente, por meio do método taungya, em que os povoamentos florestais faziam uma associação temporal com cultivos agrícolas (Nunifu & Murchison, 1999; Pandey & Brown, 2000). No sistema taungya, os agricultores eram convocados a semear a teca, entre suas culturas tradicionais de arroz de sequeiro e algodão. Após o abandono da agricultura, os jovens povoamentos de teca já ocupariam o terreno (Lamprecht, 1990).

Segundo Keogh (1982), a teca foi introduzida na região que inclui o Caribe, Américas Central e do Sul (Venezuela e Colômbia) em, pelo menos, 19 oportunidades. Keogh (1982) e Weaver (1993) mencionam que a primeira introdução da espécie na região do Caribe ocorreu por volta de 1880, nos Jardins Botânicos Reais em Trinidad.

Na África, a introdução comercial da teca ocorreu inicialmente na Nigéria, em 1902, com sementes procedentes da Índia e Myanmar (Horne, 1966, citado por Pandey & Brown, 2000). Em seguida, em 1905, Ghana iniciou seus plantios, sendo atualmente um dos principais países com plantios de teca, com extensas florestas industriais (Pandey & Brown, 2000).

Os plantios comerciais em Trinidad somente foram estabelecidos a partir de 1913, por meio de incentivos do poder público, com a variedade *Tennasserim* de procedência da Birmânia (Myanmar) para Trinidad. Posteriormente, em 1926, sementes de procedência do Sri Lanka foram enviadas para o Panamá, plantadas no Jardim Botânico de Summit. Atualmente, estas duas procedências de teca são amplamente distribuídas na América Latina. Originalmente, a espécie era cultivada em Trinidad, visando à produção de lenha para caldeiras de usinas de açúcar e para olarias, entre outros usos menos nobres (Keogh, 1982; Weaver, 1993; Pandey & Brown, 2000; Schmincke, 2000).



Entre 1927 e 1929, as plantações de teca surgiram em Honduras, nos arredores de Lancetilla, por meio da *United Fruit Company* (Wadsworth, 1997; Pandey & Brown, 2000). Também em 1927 ocorreu a introdução da teca em Côte d'Ivoire (África Ocidental), com sementes procedentes de Togo (Maldonado & Louppe, 2000).

Depois da Segunda Guerra Mundial, em todas as regiões tropicais do mundo, tiveram início várias plantações industriais. Estudos realizados por Wadsworth (1997) apontam que em 1975, havia-se plantado 1,193 milhão de hectares na Indonésia, 430.000 hectares em Filipinas, e 394.000 hectares na Tailândia. Em Filipinas, a taxa de crescimento das plantações em 1975 era de 18.000 ha/ano, porém, em 1990 ocorreu uma redução da área plantada para 290.000 ha.

Na Nigéria, no pós-segunda guerra, o ritmo de crescimento foi menos acelerado em decorrência do modelo de estabelecimento das plantações de teca que empregava o sistema taungya.

A expansão dos plantios de teca na América Latina não seguiu o mesmo ritmo de crescimento registrados no sudeste asiático. No final da década de 1970, as regiões com maiores áreas plantadas com teca na América Latina eram: Trinidad, com 9.700 ha; Porto Rico, com 800 ha; Colômbia e Venezuela, com 560 ha, cada; Costa Rica, com 300 ha; El Salvador, com 230 ha; Cuba, com 200 ha e Nicarágua, com 60 ha, perfazendo um total de 12.410 hectares (Weaver, 1993; Wadsworth, 1997).

Na década de 1970, pequenas áreas de plantio também foram estabelecidas no sul da Flórida e no Havaí, na tentativa de buscar sua adaptabilidade (Whitesell & Walters, 1976).

Em 1971, a Serraria Cáceres S.A. iniciou o plantio de teca, no Sítio Castiçal do Jauru, em Cáceres, Mato Grosso. Os resultados iniciais de crescimento da espécie na região estimularam a ampliação das florestas de teca

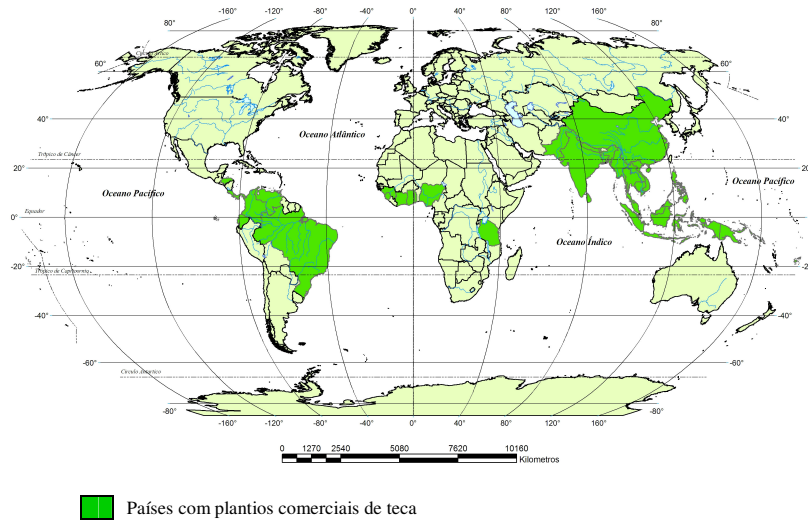
(Matricardi, 1989). O material genético introduzido é da variedade *Tennasserim*, procedente de Myanmar, Birmânia, de onde foram trazidos pelos britânicos para Trinidad, no início do século XX (Centeno, 2003).

As estatísticas sobre o reflorestamento com teca no Brasil são bastante escassas, no entanto, muitas áreas com florestas de teca são observadas nos estados do Mato Grosso, Goiás, Rondônia, Pará, Acre e Amazonas. Segundo Centeno (2003), uma única empresa florestal na região de Cáceres já havia plantado mais de 13.000 hectares da espécie e havia uma previsão de investimento em novos plantios entre 2.500 a 3.000 ha/ano.

No Acre os plantios com teca iniciaram-se em 1994, com a finalidade de cumprir a reposição florestal obrigatória em atendimento à legislação ambiental vigente. A espécie, na região de Acre e Rondônia, tornou-se a preferida para compor os projetos de reflorestamento, em decorrência do baixo rendimento dos povoamentos com espécies nativas (Figueiredo, 2001).

Segundo Weaver (1993), Krishnapillay (2000) e Pandey & Brown (2000), atualmente, os principais países com plantios comerciais de teca são (Figura 1.1):

- na Ásia e Oceania: Bangladesh, Camboja, China, Filipinas, Fiji, Ilhas Salomão, Indonésia, Laos, Malásia, Myanmar, Nepal, Papua Nova Guiné, Paquistão, Sri Lanka, Tailândia, Timor Leste e Vietnã;
- na África: Cote d'Ivoire, Ghana, Guiné, Nigéria, Serra Leoa, Tanzânia e Togo; e,
- na América Latina: Brasil, Colômbia, Costa Rica, El Salvador, Equador, Guatemala, Honduras, Panamá, Trinidad-Tobago e Venezuela.



**FIGURA 1.1** Mapa dos países com plantios comerciais de teca (*Tectona grandis* L.f.)

### 2.1.5 Perspectivas econômicas dos plantios de teca

Atualmente, a teca é a terceira espécie de folhosas tropicais com maior área plantada no mundo, ficando atrás dos plantios de eucaliptos e acácias. Mundialmente, a área plantada com teca excede os 2 milhões de hectares. Sua madeira é de alto valor no mercado internacional, no qual registram-se preços bem mais elevados que o do mogno (*Swietenia macrophylla* King) (Veit, 1996; Pandey & Brown, 2000; Krishnapillay, 2000; Tsukamoto Filho et al., 2003).

Durante a última década, um dos fatores que impulsionaram os investimentos privados em plantios de teca na Índia, Ghana, Costa Rica e Brasil, foi o desenvolvimento de uma estratégia de comercialização para madeiras jovens e de pequena dimensão. Na Costa Rica, a produção de teca visa atender ao mercado norte-americano, e o metro cúbico da madeira em tora pode chegar a 1.000 dólares (Maldonado & Louppe, 2000).

Finger et al. (2001) afirmam que o desequilíbrio entre a oferta e a procura determinou a continuada valorização da madeira de teca, cujo preço registrou um ganho médio de 8,32% a.a., em dólar norte-americano, entre 1970 e 1999.

Na Índia, o corte da teca oriunda de florestas nativas foi proibido desde 1986, nas principais regiões produtoras. Na Tailândia e na República Democrática Popular de Laos, desde 1989, está proibida totalmente a exploração industrial dos bosques naturais. As restrições impostas para a exportação de toras existentes em outros países produtores, particularmente Indonésia, Filipinas, Vietnã, Malásia peninsular e Ghana, também influenciam e continuarão influenciando na elevação dos preços da madeira no comércio mundial de teca (Pandey & Brown, 2000).

## **2.2 Sítio florestal**

Segundo Scolforo (1997a), sítio florestal é definido como a capacidade de uma região em produzir madeira e, quando associado à ecologia, o sítio é definido como expressões integradas de todas as influências biológicas e ambientais no crescimento das árvores.

De acordo com Jones (1969), citado por Campos & Leite (2002), a avaliação da capacidade produtiva pode ser definida em três categorias: avaliação da qualidade do lugar pela vegetação indicadora, avaliação por fatores climáticos, edáficos, fisiográficos e bióticos e avaliação por meio da relação altura dominante e idade, com a definição de índice de local.

Davis (1966) cita a definição de sítio, dada pela Sociedade Americana de Engenheiros Florestais, como sendo uma área considerada segundo os seus fatores ecológicos em relação à sua capacidade de produzir florestas ou outra vegetação sob a combinação de condições biológicas, climáticas e edáficas.

Para Clutter et al. (1983) e Scolforo (1997a), os métodos para predizer o crescimento de florestas podem ser classificados em diretos e indiretos. Os métodos diretos avaliam a qualidade do sítio a partir de atributos do ambiente, levando em consideração características, como clima, solo e vegetação. Os métodos indiretos utilizam-se basicamente de indicadores na própria vegetação, que refletem as interações de todos estes fatores de sítio.

Nos métodos diretos, os atributos ou fatores do ambiente podem ser classificados como fatores primários, os quais são independentes do ecossistema, tais como: macroclima, topografia e rocha de origem. Podem também ser classificados como atributos secundários, os quais são desenvolvidos e influenciados por componentes do ecossistema, tais como: microclima, solo florestal, matéria orgânica e lençol freático (Scolforo, 1997a).

Para Tonini et al. (2001), os atributos ou fatores de sítio têm sido menos precisos como indicadores do crescimento potencial do que predições baseadas em fatores de crescimento, devido à complexidade e ao grande número de variáveis que envolvem esse tipo de levantamento. Devido a isso, a grande maioria das avaliações segue o caminho dos métodos indiretos, ou seja, estima a qualidade do sítio por meio de parâmetros obtidos na própria vegetação.

Scolforo (1997a) aponta que, nos métodos indiretos, a mensuração da altura das árvores, numa determinada idade, tem se apresentado como o indicador mais estável e de fácil aplicação. Deve-se considerar que para muitas espécies e em muitos locais, o crescimento em altura está fortemente correlacionado com crescimento potencial do volume, sendo tanto maior quanto melhor a qualidade do sítio.

Dentre os parâmetros da vegetação, a altura dominante é a variável dendrométrica que melhor se enquadra nos pré-requisitos para um bom indicador de sítio, que são: facilidade de determinação a campo, possuir boa correlação com a produção volumétrica, indicar a qualidade do sítio para todas

as idades do povoamento e ser independente da densidade do povoamento (Burger, 1976; Keogh, 1982).

Para Scolforo (1997a), para aquelas espécies que têm a altura das árvores dominantes e, ou, co-dominantes afetadas pela densidade do povoamento ou pelos cortes intermediários (desbaste), não se deve fazer uso da altura para efetuar classificação da qualidade do local pois não se chegaria a resultados nada confiáveis.

Na espécie teca, a altura das árvores dominantes ou dominantes e co-dominantes normalmente é independente dos tratamentos silviculturais. O emprego da altura dominante permite a comparação de taxas de crescimento entre plantações da mesma idade, embora estas áreas estejam sob diferentes regimes de manejo (Keogh, 1982).

Os métodos que se baseiam na altura para classificação da qualidade do sítio usam as curvas de índice de sítio. O índice de sítio expressa em termos médios o desenvolvimento em altura das árvores dominantes ou dominantes e co-dominantes numa idade definida como sendo idade de referência, a qual deve ser a mais próxima possível da idade de rotação (Scolforo, 1997a).

### **2.2.1 Altura das árvores dominantes**

Scolforo (1997a) cita vários conceitos sobre a definição de árvores dominantes, que são:

- altura média das 100 árvores mais grossas por hectare (Assmann);
- altura média das 100 árvores mais altas por hectare (Hart);
- altura média das árvores com DAP maior ou igual a  $\bar{D} + 1,5$  desvio padrão (Naslund);

- altura média correspondente ao DAP médio de 20% das árvores grossas do povoamento (Weise); e,
- altura média das 30 árvores mais altas por hectare (Lewis).

Keogh (1982) sugere que a altura dominante para plantações de teca deveria ser considerada como a altura total das 100 árvores de maior diâmetro por hectare, pois é mais simples de ser obtida, além de ser uma tendência de procedimento entre os países com plantações da espécie.

### **2.2.2 Fontes de dados para construção de curvas de índice de sítio**

Para Campos & Leite (2002), as curvas de índice de sítio podem ser construídas utilizando-se dados de alturas dominantes e idades obtidos a partir de parcelas temporárias; alturas dominantes e idades, oriundos de uma rede de parcelas permanentes; e alturas dominantes e idades obtidas da análise completa de tronco (ANATRO).

Scolforo (1997a) indica que as parcelas permanentes são a fonte de dados desejável para construção das curvas de índice de sítio, visto que possibilitam o acompanhamento do desenvolvimento das árvores contidas na parcela e, conseqüentemente, o padrão de desenvolvimento em altura das árvores consideradas para efeito da construção das curvas de índice de sítio. Porém, esta alternativa apresenta como inconveniente ser um meio demorado e até certo ponto oneroso de se obter dados, já que se necessita de uma série de medições periódicas.

Keogh (1990) estima que, para se construir uma boa base de dados para a classificação de sítio em plantios de teca, é necessário pelo menos o registro das alturas dominantes ( $H_{dom}$ ) por um período de 5 anos.

Dados advindos de análise de tronco também são eficientes para o propósito de classificação e se equiparam aos dados de parcelas permanentes,

podendo ser coletados num tempo mais curto. No entanto, nem sempre é possível identificar com precisão os anéis de crescimento em espécies de folhosas, ficando a técnica restrita a espécies de coníferas e algumas folhosas (Campos & Leite, 2002).

Para Nanang & Nunifu (1999), a principal razão para negligenciar a carência de estudos sobre a classificação de sítios florestais na região tropical é a ausência de parcelas permanentes instaladas e remedidas com a frequência necessária, além da incapacidade da maioria das espécies presentes nos trópicos para a formação de anéis de crescimento anuais ou sazonais.

Em decorrência da ausência de amostras permanentes para a classificação de sítio e prognose de produção, Malende & Temu (1990) adotaram a amostragem de uma árvore para cada amostra temporária instalada aleatoriamente. As árvores amostradas eram mensuradas por meio da contagem dos anéis de crescimento à altura de toco (0,05 m), a 1,3 m (DAP) e a intervalos de 2 metros até a ponta do fuste (com diâmetro de 1 cm).

A teca exhibe verdadeiros anéis anuais com madeira porosa entre anéis, os quais são ferramentas úteis para determinação da idade e da taxa de crescimento das árvores para avaliação da produção (Prya & Bhat, 1998).

O estudo de anéis de crescimento desenvolveu-se num campo das ciências florestais, a dendrocronologia, conceituada como a ciência que permite a datação dos anéis de crescimento do lenho das árvores e de peças de madeira, incluindo a aplicação das informações registradas em sua estrutura para estudos ambientais e históricos (Bollmann et al., 2001).

A existência dos anéis de crescimento tem sido verificada há muito tempo, desde as primeiras observações, feitas na Grécia antiga. Leonardo da Vinci, no século XVI, reconheceu em árvores de pinus, na Toscana, Itália, a relação entre os anéis de crescimento e o clima, relatando que “os anéis de crescimento mostram o número de anos das árvores e, de acordo com sua



espessura, os anos mais e menos secos, sendo que os anéis são mais espessos na região Norte do que no sul do país” (Bollmann et al., 2001).

No entanto, considera-se que a dendrocronologia como ciência teve início na Alemanha, com os trabalhos sistemáticos de Theodor e Robert Hartig, em meados do século XIX, Bruno Huber, em meados do século XX e nos Estados Unidos, com Andrew E. Douglass, a partir do início do século XX (Bollmann et al., 2001).

Para Wehr (1998), o estudo dos anéis de crescimento se aprimorou e aprofundou a partir do século XVI, após as contribuições na área de anatomia da madeira.

O crescimento em diâmetro das árvores ocorre por meio da superposição de camadas de tecido. Esta superposição de tecidos é facilmente visualizada em regiões onde existe significativa diferença climática entre as estações do ano (Scolforo, 1997a). Regiões de climas temperados ou regiões onde existam meses biologicamente secos propiciam o surgimento de anéis de crescimento.

A primeira camada de tecidos é menos densa e corresponde ao período de altas temperaturas e boa disponibilidade hídrica. Esta camada assume uma coloração mais clara, denominada de lenho inicial ou primaveril. A segunda camada de tecidos corresponde à fase de redução do crescimento da árvore, ocorrendo naturalmente nos meses de temperaturas baixas e de pouca precipitação pluviométrica. O tecido vegetal desta segunda fase é caracterizado por uma coloração mais escura, com maior densidade de células, denominada de lenho de fecho, tardio, outonal ou estival (Trovati, 1982; Burger & Richter, 1974; Scolforo, 1997a; Prya & Bhat, 1998; Figueiredo, 2001; Lima, 2002).

A atividade cambial das árvores e, em consequência, a formação dos anéis de crescimento, é influenciada pelo seu genótipo (crescimento, forma, longevidade, sensibilidade dos anéis e da estrutura anatômica da madeira entre outros), fatores bióticos (associações com micorrizas, microorganismos

patogênicos, entre outros) e abióticos (luz, temperatura, água, nutrientes, vento, poluição do solo, do ar, fogo e outros) (Bollmann et al., 2001).

A principal técnica para avaliar o crescimento de anéis de crescimento é a análise de tronco. A técnica possibilita verificar como uma árvore cresce, em altura e diâmetro, e como ela muda de forma à medida que aumenta em volume (Campos & Leite, 2002).

Em decorrência da grande longevidade que podem alcançar indivíduos de algumas espécies vegetais, Burger & Richter (1974) consideram que os troncos de árvores constituem documentos históricos de grande valor.

A análise de tronco pode ser completa ou parcial. Na análise completa de tronco (ANATRO), cortam-se e medem-se os anéis em seções transversais em diferentes alturas. A análise parcial de tronco é realizada com a árvore em pé, utilizando-se uma sonda de Pressler (Campos & Leite, 2002).

O principal objetivo da ANATRO é obter dados para a construção de curvas de índice de sítio local que são curvas (ou tabelas) empregadas na classificação e comparação da qualidade de locais diferentes, o que exige relacionar a altura das árvores dominantes com a idade para cada espécie particular. Para isso, é exigida a seleção de número adequado de árvores dominantes para uma análise de regressão. Essas árvores-amostra devem ser dispersas nos diferentes locais da população amostrada (Campos & Leite, 2002).

Kramer & Kozwloski (1972) descrevem que os anéis de crescimento anual constituem normalmente em círculo completo. A largura dos anéis de crescimento é de grande significância nas propriedades tecnológicas da madeira, determinando, muitas vezes, o valor de mercado das árvores. A espessura é influenciada por fatores como espécie, duração do período biologicamente ativo, temperatura, umidade, qualidade do solo, luminosidade e manejo silvicultural.

Nas regiões de clima tropical, o crescimento tanto pode ser afetado por épocas de seca e chuva, sem que os anéis correspondam a um período anual de

crescimento. Desse modo, o surgimento de mais de um anel de crescimento durante o período de um ano constitui um falso anel de crescimento (SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL - SENAI, 1988).

Para Prys & Bhat (1998) e Lima (2002), o aparecimento de falsos anéis em *Tectona grandis* L.f. pode ser em virtude de perda temporária das folhas provocadas por geadas, manifestação de fitomoléstias e ataque de insetos ou devido a estímulos de crescimento fora do período de crescimento, decorrentes de verânicos, carência nutricional, eliminação de concorrentes, dentre outros fatores de importância secundária. O aparecimento de falsos anéis decorrentes do ataque insetos somente é possível quando o período de desfolha é superior a três semanas, sendo as maiores responsáveis pelo aparecimento de falsos anéis as condições climáticas com marcantes períodos de secas.

A ocorrência de falsos anéis frequentemente leva a equívocos na tarefa de determinação da idade e da taxa de crescimento. Falsos anéis contínuos ou descontínuos são mais freqüentes em teca na fase juvenil (entre 0 a 2 anos) que em árvores maduras, visto que pequenas mudanças nas condições ambientais podem alterar o ritmo de crescimento permitindo o surgimento de falsos anéis de crescimento (Prys & Bhat, 1998).

Prys & Bhat (1998), estudando a formação de falsos anéis de crescimento em teca (em plantios na Índia), decorrentes do desfolhamento do povoamento florestal pela infestação de insetos, relataram o aparecimento de falsos anéis bem visíveis e distintos dos verdadeiros anéis.

Em uma análise de tronco, estes falsos anéis podem ser muitas vezes detectados e desconsiderados por não apresentarem um limite tão nítido como os anéis anuais (verdadeiros). Nos falsos anéis, a camada de tecido mais espessa decresce gradativamente, tanto para o interior como para o exterior do tronco, enquanto que, em anéis verdadeiros, no limite entre o lenho tardio e o primaveril, sua transição é sempre abrupta (Burger & Richter, 1974).

Segundo Krishnapillay (2000), é errônea a crença de que os anéis de crescimento da teca, que dão a estrutura nos troncos, somente aparecem em árvores de teca que crescem em zonas com marcada estação pluviométrica e seca. Em regiões onde a intensidade pluviométrica é alta e bem distribuída, também é possível a leitura dos anéis de crescimento.

O processamento de imagens para mensuração dos anéis de crescimento tem se mostrado como uma eficiente ferramenta. A imagem de uma fatia de madeira, obtida via *scanner* a partir do material original, é processada digitalmente, utilizando um software. Após a aplicação de técnicas de realce de contraste, os anéis de crescimento são digitalizados, poligonizados e mensurados, tendo com fundo a imagem da fatia (Rosot et al., 2001).

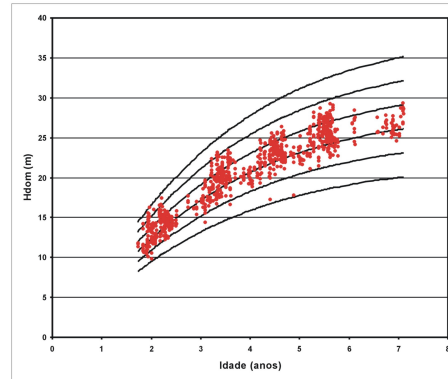
### **2.2.3 Tipos de curvas de índice de sítio**

Os índices de sítios são construídos geralmente a partir de equações de regressão. As curvas de índice de sítio podem ser anamórficas (harmônicas/isomórficas) ou polimórficas, o que dependerá do método de análise e da procedência dos dados (Prodan et al., 1997; Campos & Leite, 2002).

As curvas anamórficas são caracterizadas por apresentarem uma mesma relação de distância entre as curvas da mesma família (Figura 1.2), o que significa que os coeficientes que representam a inclinação da curva ( $\beta_1$  ou  $\beta_2$ , conforme o modelo) são constantes para todas as curvas de sítio e, conseqüentemente, o ponto de inflexão é o mesmo para a família de curvas. A oscilação dos valores da constante ( $\beta_0$ ) somente ocorre em relação ao ponto de intersecção (Prodan et al., 1997; Scolforo 1997a; Campos & Leite, 2002).

Para Scolforo (1997a), um problema deste método é a proporcionalidade entre as curvas de índice de sítio, visto que, em sítios mais produtivos, a curva de crescimento em altura tende a ter forma sigmóide mais pronunciada. Já em

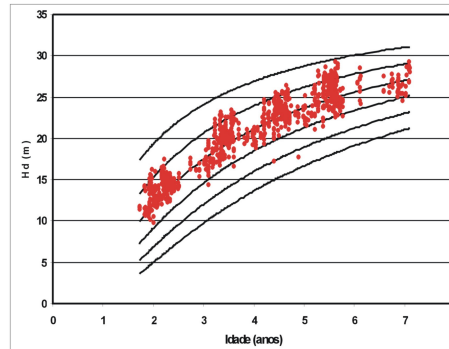
sítios menos produtivos, o padrão de crescimento da altura tende a ser mais alisado, ou seja, o ponto de inflexão é atingido mais tarde que os dos sítios mais produtivos.



**FIGURA 1.2** Curvas anamórficas de índice de sítio

Segundo Prodan et al. (1997), desde da década de 1970, tem se comprovado que a proporcionalidade apontada pela curva média entre a altura e a idade é independente, e a forma das curvas de sítio depende das particularidades relacionadas com altura-idade observadas em diferentes classes de sítio, portanto, as curvas de sítio assumirão diversas formas (curvas polimórficas).

As curvas polimórficas se caracterizam por não apresentarem proporcionalidade no crescimento da altura das árvores dominantes (Figura 1.3), entre classes de sítio diferentes. Nesse caso, a taxa de crescimento relativa em altura é dependente dos fatores do sítio, sendo, então, desenvolvidas as curvas de sítio polimórficas para refleti-las (Scolforo, 1997a).



**FIGURA 1.3** Curvas polimórficas de índice de sítio

### 2.2.3.1 Principais métodos para construção de curvas de índice sítio

Segundo Prodan et al. (1997) e Campos & Leite (2002), as principais alternativas metodológicas para a construção das curvas de índice de sítio são:

- método da curva-guia ou curva-média;
- método da diferença algébrica;
- método de Hammer;
- método da predição dos parâmetros; e,
- método da atribuição preliminar de índices de local.

No entanto, os métodos mais empregados são o método da curva guia (curvas anamórficas) e o método da diferença algébrica (curvas anamórficas e polimórficas) (Prodan et al., 1997; Nunifu & Murchison, 1999).

#### 2.2.3.1.1 Método da curva-guia

Segundo Scolforo (1997a), o método da curva-guia ou média passou a ser empregado a partir do final da década de 1930, com a introdução da regressão linear múltipla no meio florestal.

As curvas são construídas mediante a seleção de um modelo de regressão envolvendo as variáveis altura dominante ( $H_{dom}$ ) e idade ( $I$ ), conforme citado por Batista & Couto (1986), Matricardi (1989), Scolforo & Machado (1988a), Scolforo & Machado (1988b), Keogh (1990), Prodan et al. (1997), Scolforo (1997a), Nanang & Nunifu (1999), Nunifu & Murchison (1999) e Campos & Leite (2002).

Após a definição dos parâmetros do(s) modelo(s), será definida a melhor equação que representa a curva do índice de local médio. Esta curva é denominada de curva-guia ou curva média, que representa a estimativa do crescimento médio ao longo do tempo.

Com base na equação representante da curva-guia, uma equação de índices de sítio é obtida quando se considera a idade ( $I$ ) do povoamento igual à idade-referência ( $I_{ref}$ ) e a altura dominante igual ao índice de sítio ( $H_{dom} = S$  e  $I = I_{ref}$ ). Com o manuseio da equação isola-se  $\beta_0$  e obtém-se a altura dominante ( $H_{dom}$ ) para cada sítio na idade de referência ( $I_{ref}$ ). Dessa forma é feita a construção das curvas anamórficas.

Exemplificando o modelo de Chapman e Richard, tem-se:

$$H_{dom} = \sigma_1 \left[ 1 - \exp(-\sigma_2 \times I) \right]^{1/(1-\sigma_3)} + \varepsilon_i$$

Simplificando:

$$H_{dom} = \beta_1 \left[ 1 - \exp(-\beta_2 \times I) \right]^{\beta_3} + \varepsilon_i$$

$$\beta_3 = 1/(1-\sigma_3)$$

em que:

$H_{dom}$  = altura dominante;

$I$  = idade (em anos);

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = parâmetros a serem estimados;

exp = exponencial; e,

$\varepsilon_i$  = erro de estimativa.

Para definir as classes de sítios e seus respectivos índices, inicialmente define-se a idade de referência (mais próxima possível da idade de rotação, de acordo com as idades dos povoamentos estudados). Em seguida é calculado, por meio da equação ajustada, o índice de sítio na idade de referência. Para o modelo de Chapman e Richard, o índice de sítio é expresso por:

$$S = \beta_1 \left[ 1 - \exp(-\beta_2 \times I_{ref}) \right]^{\beta_3} + \varepsilon_i$$

em que:

S = índice de sítio (na idade de referência);

$I_{ref}$  = idade de referência (em anos);

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  = parâmetros estimados;

exp = exponencial; e,

$\varepsilon_i$  = erro de estimativa.

O índice de sítio na idade de referência é a altura média das árvores dominantes e para fins de convenção é adotado o valor central da classe média. A construção das demais classes ocorre com a subtração e adição de um valor “X” do valor central, delimitando, desse modo, a amplitude de cada classe. Assim, o procedimento é repetido sucessivamente até se obter todas as classes que englobem os valores observados. Para este estudo foi adotado um valor de amplitude de classe de 3 metros para todos os métodos e modelos testados.

Para a construção das curvas de sítio foram calculados fatores de classes dividindo-se os valores inferiores e superiores de cada classe pelo valor de índice de sítio na idade de referência.

Os fatores de classes têm a função de construir a curva de classe de sítio, pois a mesma estabelece uma relação entre os valores inferior e superior de cada



classe com o valor estimado na idade de referência definida para cada modelo testado. Esta relação fornece um coeficiente que será multiplicado pela altura dominante estimada em cada idade de observação, construindo-se uma das linhas limites da classe de sítio, este procedimento é feito para cada altura dominante estimada e em cada idade, considerando as classes de sítio.

Para calcular o fator de classe para o intervalo inferior da classe central do modelo de Chapman e Richard, deve-se subtrair, do valor de índice de sítio, o resultado da amplitude de classe dividido por dois e, posteriormente, dividir pelo índice de sítio, conforme equação abaixo:

$$f_{is} = \frac{\left[ \beta_1 \left[ 1 - \exp(-\beta_2 \times I_{ref}) \right]^{\beta_3} + \varepsilon_i \right] - \left( \frac{AM_{Classe}}{2} \right)}{\beta_1 \left[ 1 - \exp(-\beta_2 \times I_{ref}) \right]^{\beta_3} + \varepsilon_i}$$

em que:

$f_{is}$  = fator de classe;

$AM_{Classe}$  = amplitude de classe;

$I_{ref}$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\exp$  e  $\varepsilon_i$  foram definidos anteriormente.

#### 2.2.3.1.2 Método da equação das diferenças ou diferença algébrica

Segundo Clutter et al. (1983), o método da diferença algébrica é utilizado somente com dados oriundos de parcelas permanentes ou de análise completa de tronco (ANATRO), podendo produzir um conjunto de curvas anamórficas ou polimórficas.

O pressuposto básico deste método é que todo par de observações se aplica à mesma relação altura-idade. Dessa forma empregando pares consecutivos de idade e altura dominante, os modelos são ajustados (Prodan et al., 1997).

Para Scolforo (1997a), uma das vantagens deste procedimento é a obtenção de curvas de índice de sítio polimórficas ou anamórficas, independente

da escolha da idade de referência, além da altura na idade referência ser igual ao índice de sítio, não necessitando de qualquer ajuste ou correção quando curvas polimórficas estiverem sendo geradas.

O princípio do método é fundamentado no manuseio das equações, de maneira a trabalhar o parâmetro específico do sítio.

Considerando o modelo  $\ln H_{\text{dom}} = \alpha + \beta I^{-1}$  (1), sua taxa de crescimento em altura é  $(\delta H / \delta I) = - H_{\text{dom}} (\beta / I^2)$ , a qual é função do parâmetro  $\beta$  e da idade, mas não envolve o parâmetro  $\alpha$ . Se  $\alpha$  é constante sobre os sítios mas  $\beta$  é um parâmetro específico do sítio, ou seja, tem diferentes valores de  $\beta_i$ , então tem-se um conjunto de curvas altura-idade polimórficas. Se for assumido que  $\alpha$  é o parâmetro específico do sítio e  $\beta$  é constante para todos os sítios, então curvas anamórficas serão geradas (Scolforo, 1997a).

De acordo com Keogh (1990), Prodan et al. (1997), Scolforo (1997a), Nanang & Nunifu (1999), Nunifu & Murchison (1999) e Campos & Leite (2002), os modelos não-lineares são mais frequentemente adotados.

Experiências com ajustes de modelos pelo método da diferença algébrica foram realizadas por Bailey & Clutter (1974), Borders et al. (1984), Gonzalez et al. (1992), Cunha Neto et al. (1996), Scolforo (1992), Prodan et al. (1997), Nunifu & Murchison (1999), Cecere (2000) e Campos & Leite (2002).

Sua aplicação pode ser realizada de duas maneiras. O primeiro procedimento proposto por Bailey & Clutter (1974) consiste em ajustar o modelo a partir de sua forma anamórfica ou polimórfica, em que os arquivos de dados são estruturados em pares de  $H_{\text{dom1}} / I_1$  e  $H_{\text{dom2}} / I_2$ .

A seguir, apresenta-se como gerar a formulação da diferença algébrica (procedimento Bailey & Clutter) para o modelo de Schumacher não linear. Neste método existem dois caminhos. A primeira alternativa gera curvas anamórficas; dessa forma assume-se que o  $\beta_0$  está no lugar do parâmetro específico de sítio sendo  $\beta_1$  constante para todos os sítios. Exemplificando o método, considere

uma árvore num determinado sítio florestal (i), nas idades sucessivas  $I_1$  e  $I_2$ . Assim, o modelo de Schumacher assume a seguinte forma, isolando o  $\beta_0$ .

$$\begin{aligned}
 H_{dom(2)} &= \beta_0 \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_2}\right)\right) \text{ (modelo de Schumacher)} \\
 H_{dom(1)} &= \beta_{0i} \exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right) \therefore H_{dom(2)} = \beta_{0i} \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_2}\right)\right) \\
 \frac{H_{dom(1)}}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)} &= \beta_{0i} \therefore \frac{H_{dom(2)}}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)} = \beta_{0i} \\
 \frac{H_{dom(1)}}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)} &= \frac{H_{dom(2)}}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)} \\
 H_{dom(1)} \times \frac{1}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)} &= \frac{H_{dom(2)}}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)} \\
 H_{dom(1)} \times \frac{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)}{\exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)} &= H_{dom(2)} \\
 H_{dom(1)} \times \left[ \exp\left(\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_2}\right)\right) - \left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)\right) \right] &= H_{dom(2)} \tag{1.1}
 \end{aligned}$$

em que:

$H_{dom(1)}$  e  $H_{dom(2)}$  = altura média das 100 árvores de maior diâmetro por hectare nas idades  $I_1$  e  $I_2$ , respectivamente;

$\beta_0$  = parâmetro específico para o sítio i;

$\beta_1$  = parâmetro comum relativo ao sítio; e,

exp = exponencial.

Na expressão 1.1 coloca-se o  $\beta_1$  em evidência e obtém-se o modelo para estimativa da altura dominante na idade ( $I_2$ ). O modelo expresso pela equação para 1.2 será a base para construção das classes de sítio, pois as mesmas serão dimensionadas considerando-se os valores limites das estimativas do modelo ajustado dado por:

$$H_{dom(2)} = H_{dom(1)} \times \left[ \exp \left( \beta_1 \left( \frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right) \right) \right] \quad (1.2)$$

Substituindo a segunda idade de observação ( $I_2$ ) pela idade de referência ( $I_{ref}$ ) na expressão 1.2 tem-se o índice de sítio:

$$S = H_{dom(1)} \times \left[ \exp \left( \beta_1 \left( \frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_{ref}} \right) \right) \right] \quad (1.3)$$

Para construir as curvas de sítio nas várias idades, basta isolar  $H_{dom1}$ , na expressão 1.3:

$$H_{dom(1)} = \frac{S}{\exp \left( \beta_1 \left( \frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_{ref}} \right) \right)}$$

Em que S (sítio) é o limite inferior e superior de cada classe.

Para gerar curvas polimórficas,  $\beta_0$  é constante para todos os sítios, mas  $\beta_1$  é o parâmetro específico do sítio, ou seja, apresenta diferentes valores, de modo que cada sítio tem um valor  $\beta_i$ . Desse modo obtém-se um conjunto de curvas polimórficas. Exemplificando o método para o modelo Schumacher e

nas mesmas condições anteriores, o modelo assume a seguinte forma, isolando o  $\beta_1$ .

$$H_{dom(2)} = \beta_0 \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_2}\right)\right) \quad (\text{modelo de Schumacher})$$

$$H_{dom(1)} = \beta_0 \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_1}\right)\right) \therefore H_{dom(2)} = \beta_0 \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)$$

em que:

$H_{dom(1)}$ ;  $H_{dom(2)}$ ;  $\beta_0$ ;  $\beta_i$ ; e,  $\exp$  foram definidos anteriormente.

$$\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0} = \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_1}\right)\right) \therefore \frac{H_{dom(2)}}{\beta_0} = \exp\left(-\beta_i \left(\frac{1}{I_2}\right)\right)$$

$$\left(\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0}\right)^{I_1} = \exp(-\beta_i) \therefore \left(\frac{H_{dom(2)}}{\beta_0}\right)^{I_2} = \exp(-\beta_i)$$

$$\left(\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0}\right)^{I_1} = \exp(-\beta_i) \therefore \left(\frac{H_{dom(2)}}{\beta_0}\right)^{I_2} = \exp(-\beta_i)$$

$$\left(\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0}\right)^{I_1/I_2} = \left(\frac{H_{dom(2)}}{\beta_0}\right)$$

$$\boxed{H_{dom(2)} = \left(\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0}\right)^{I_1/I_2} \times \beta_0} \quad (1.4)$$

Na expressão 1.4, substituindo-se a segunda idade de observação ( $I_2$ ) pela idade de referência, o valor de  $H_{dom(2)}$  é igual ao índice de sítio para o referido valor de altura dominante observada, sendo:

$$S = \left(\frac{H_{dom(1)}}{\beta_0}\right)^{I_1/I_{ref}} \times \beta_0 \quad (1.5)$$

Se desejada a expressão que propiciará a estimativa das alturas das dominantes para as várias idades vinculadas a qualquer índice de sítio, basta isolar  $H_{dom(1)}$  na expressão 1.5, tem-se:

$$H_{dom} = \beta_0 \left( \frac{S}{\beta_0} \right)^{\frac{I_{ref}}{I}}$$

A segunda alternativa para ajustar os modelos pela diferença algébrica é fundamentada no procedimento proposto por Alder (1980), em que o ajuste deve ser realizado como no caso da curva média e nas formas polimórficas e anamórficas, posteriormente, pelo manuseio da equação, isola-se o parâmetro específico da família de curvas.

Exemplificando o modelo de Schumacher (expressão 1.6) empregado para a construção de curvas anamórficas de índice de sítio, deve-se inicialmente ajustar o modelo considerando a base de dados original, ou seja, idade de observação ( $I$ ) e altura dominante ( $H_{dom}$ ), tem-se o modelo:

$$H_{dom} = \beta_{0i} \exp\left(-\beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right)\right)$$

No caso de curvas anamórficas isola-se o  $\beta_0$  como parâmetro específico do sítio e conserva-se o  $\beta_1$  como parâmetro comum. Posteriormente, obtém-se o novo  $\beta_0$  de acordo com o intervalo de cada classe de sítio, da mesma forma que no método da curva média. O novo  $\beta_0$  de cada classe de sítio florestal será obtido com o manuseio da seguinte expressão (modelo logaritimizado):

$$\ln(H_{dom}) = \beta_{0i} - \beta_{1e} \left(\frac{1}{I_1}\right) \quad (1.6)$$

Substituindo, na expressão 1.6 a altura dominante ( $H_{dom}$ ) por sítio ( $S$ ) e a idade de observação ( $I_1$ ) pela idade de referência ( $I_{ref}$ ), basta isolar o  $\beta_{0i}$  e obter o parâmetro de cada sítio, tem-se:

$$\ln(S) = \beta_{0i} - \beta_{1e} \left( \frac{1}{I_{ref}} \right)$$

$$\ln(S) + \beta_{1e} \left( \frac{1}{I_{ref}} \right) = \beta_{0i}$$

em que:

S = sítio florestal, que corresponde aos limites inferior, central e superior de cada classe de sítio;

$I_{ref}$  = idade de referência;

$\beta_{0i}$  = parâmetro específico para o sítio i a ser calculado para os limites de cada classe de sítio;

$\beta_{1e}$  = parâmetro comum relativo ao sítio já estimado no modelo original; e,

ln = logaritmo neperiano.

Dessa forma, para os “n” intervalos de classes de sítio será calculado um  $\beta_0$  com base no sítio (S), que corresponde aos limites inferior, médio e superior de cada classe e na idade de referência ( $I_{ref}$ ), que é fixa para todos os sítios.

No modelo de Schumacher para a obtenção de curvas polimórficas, o parâmetro que define a forma da curva é o  $\beta_1$ , e o mesmo procedimento realizado para construir a curva anamórfica deve ser repetido, porém isolando-se agora o  $\beta_1$  e conservando-se o  $\beta_0$  (parâmetro comum relativo ao sítio, para o caso de curvas polimórficas), sendo:

$$\ln(S) = \beta_{0i} - \beta_{1e} \left( \frac{1}{I_{ref}} \right)$$

$$\left[ \frac{(\ln(S) - \beta_{0i})}{\left( \frac{1}{I_{ref}} \right)} \right] = -\beta_{1e} \quad \text{multiplicando-se por } (-1), \text{ tem-se:}$$

$$-\left[ \frac{(\ln(S) - \beta_{0i})}{\left(\frac{1}{I_{ref}}\right)} \right] = \beta_{1e}$$

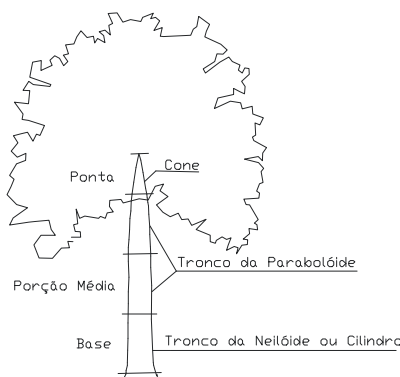
em que:

S;  $I_{ref}$ ;  $\beta_{0i}$ ;  $\beta_{1e}$ ; e, ln foram definidos anteriormente.

## 2.3 Volume

### 2.3.1 Perfil ou forma da árvore

Todas as árvores têm uma forma de fuste típica, que varia de espécie para espécie, porém, depende do sítio, densidade de plantio, disponibilidade de água, fatores intrínsecos à espécie, dentre outros (Prodan et al., 1997). O tronco de uma árvore se assemelha a determinados sólidos geométricos de fórmulas conhecidas. Pode ser representado pela sobreposição de sólidos geométricos, iniciando por um cilindro ou neilóide na porção mais baixa, parabolóides nas porções medianas e por um cone na ponta (Figura 1.4) (Campos, 1988; Scolforo & Figueiredo Filho, 1993; Prodan et al., 1997; Scolforo, 1997b; Campos & Leite, 2002).



**FIGURA 1.4** Perfil de uma árvore e as suas possíveis formas da base à ponta



Dessa maneira, a simples soma dos volumes de cada seção permitiria contornar o problema da irregularidade da forma e gerar uma boa estimativa do volume total do tronco da árvore. Entretanto, dada a impossibilidade de identificar os limites entre o início e o fim de cada figura geométrica ao longo do tronco, é comum assumir uma forma geral, parabólica, para o tronco inteiro (Campos & Leite, 2002). Porém, a dificuldade de identificar as mudanças nas formas geométricas no fuste levou ao desenvolvimento de metodologias (fórmulas) para fazer a cubagem rigorosa (Gomes, 1957).

### **2.3.2 Cubagem rigorosa**

A cubagem rigorosa consiste na realização de mensurações sucessivas dos diâmetros ao longo do fuste (Gomes, 1957).

A frequência dos dados de cubagem está diretamente relacionada com a variação em diâmetro e forma das árvores do povoamento. Para melhor atendimento dessa variação, as árvores devem abranger todas as classes de diâmetro à altura do peito (DAP) a partir de um diâmetro mínimo especificado, considerando intervalos de classe diamétrica (Campos & Leite, 2002).

Scolforo (1998a) recomenda as seguintes posições para a mensuração de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.: 0,05 m; 0,70 m; 1,30 m; 2,30 m e, a partir de então, em seções que podem variar entre 1 e 2 metros.

As árvores podem ser mensuradas por meio de dois métodos de cubagem rigorosa: absolutos e relativos (Scolforo, 1998a; Cabacinha, 2003).

Os métodos absolutos não apresentam vínculo com o comprimento do fuste. Nos métodos relativos, as posições de mensuração são tomadas de maneira a representar um percentual do comprimento total da árvore,

possibilitando a confrontação e comparação dos volumes individuais de árvores de portes distintos, porém com a mesma forma.

Fazem parte do método absoluto de cubagem rigorosa as fórmulas de Smalian, Huber, Newton e Hossfeld.

Veiga (1984), Scolforo (1998a) e Campos & Leite (2002) preconizam que, na mensuração das seções de árvores a serem cubadas, deve-se: medir sempre o DAP e a altura total; as seções devem iniciar-se o mais próximo possível do solo, normalmente em torno de 0,05 m; o comprimento das seções deve ser entre 1 e 2 metros, de maneira a controlar o efeito da conicidade do fuste e que as seções sejam regulares; quando se pretende o volume total, a última seção (ponta da árvore) deve ser calculada como se fosse um cone e, quando se pretende obter o volume comercial, a última seção da árvore pode ter seu volume obtido pela fórmula normal selecionada.

A fórmula de Huber mede apenas um diâmetro no centro da tora; é exato, quando a forma do tronco se aproximar de um cilindro. Contudo, se a forma do tronco for cônica ou tender a de um neilóide, os erros no cálculo do volume podem ser consideráveis (Manassés & Peichl, 1986).

Campos (1988), Prodan et al. (1997) e Scolforo (1998a) consideram a fórmula de Newton o procedimento de mensuração rigorosa mais preciso na determinação volumétrica, uma vez que se exige um maior número de medições de diâmetros numa determinada seção do tronco.

Young et al. (1967), citados por Bertola (2002), realizaram cubagem rigorosa em 465 toras de diferentes espécies e verificaram que os volumes obtidos, tanto pela fórmula de Huber quanto pela fórmula de Smalian, apresentaram erros, quando comparados com os volumes determinados pelo xilômetro. Entretanto, observaram que os erros decorrentes do emprego da fórmula de Huber eram significativamente menores que erros originados pela fórmula de Smalian.

### 2.3.3 Funções de volume

As estimativas de volume podem ser realizadas por meio de funções de volume de árvores, com modelos de simples, dupla e tripla entrada, e o procedimento pode seguir várias metodologias. A equação de volume para árvores individuais é a mais utilizada (Scolforo, 1998a).

Essas equações de volume e peso servem para estimar volumes e pesos individuais de árvores e, com base em algum método de amostragem, pode-se estimar o volume ou peso de um povoamento florestal (Veiga, 1981; Husch et al., 1972; Clutter et al., 1992).

Os volumes dos fustes podem ser obtidos por meio dos fatores de forma, método dos dois diâmetros e de uma relação hipsométrica associada a uma equação de volume, o que propicia estimativas precisas e com menores custos quando comparados com as equações que têm como variáveis independentes o diâmetro e a altura. Volumes por unidade de área são alcançados por equações de povoamento e, para estimar os múltiplos produtos da madeira, deve-se utilizar as funções de afilamento (Franco, 1996; Prodan et al., 1997; Scolforo, 1998a; Campos & Leite, 2002).

A escolha de equações é uma fase importante no trabalho do inventário florestal, já que qualquer erro de tendência na estimativa do volume ou peso por árvore terá reflexos na estimativa da população, causando uma sub ou sobre avaliação da produção (Campos et al., 1985).

As equações de simples entrada, em que o volume é função somente do diâmetro das árvores, são normalmente aplicadas quando a correlação entre o diâmetro e a altura é muito forte, ou seja, onde há bastante homogeneidade no desenvolvimento em altura das árvores de mesmo diâmetro. Por sua vez, as equações de dupla entrada, em que o volume é em função do diâmetro e da

altura, são aplicadas para povoamentos em que há uma maior heterogeneidade no desenvolvimento da altura das árvores com mesmo diâmetro (Scolforo, 1997b).

O sucesso dos procedimentos depende de uma amostragem representativa do maciço florestal, em que as árvores selecionadas, para fins de ajustes de modelos, representem a variabilidade da amplitude em diâmetro e altura do povoamento (Franco et al., 1997).

Scolforo & Silveira (1996), testando modelos volumétricos de simples e dupla entrada para barbatimão, apontaram que as equações baseadas em dupla entrada são superiores às de simples entrada, demonstrando que a heterogeneidade na relação altura-diâmetro praticamente descarta o emprego dos modelos de simples entrada. Neste caso, o diâmetro não está fortemente correlacionado com a altura, ou seja, o diâmetro não explica bem o desenvolvimento da altura. Couto & Vettorazzo (1999), estudando modelos volumétricos para *Pinus taeda*, também chegaram às mesmas conclusões que Scolforo & Silveira (1996).

Nos modelos de tripla entrada, o volume é estimado em função do diâmetro, da altura e de uma medida que expressa a forma da árvore (f) (Scolforo, 1997b). Estes modelos praticamente não são utilizados no Brasil e sua aplicação é complexa, visto que a forma da árvore é uma variável difícil de ser quantificada e, quando se faz cubagem rigorosa, esta já é controlada. Por este motivo, a variável forma usualmente não é significativa nos modelos.

Nunifu & Murchison (1999), ajustando modelos volumétricos para teca em Gana (África Ocidental), concluíram que os melhores resultados foram alcançados pelo modelo Stoate (Australiana).

Pinheiro & Veiga (1984), avaliando modelos de equações de volume para espécies do gênero *Pinus*, concluíram que os modelos de Naslund e

Schumacher & Hall logarítmico foram os que propiciaram as melhores estatísticas.

Veiga et al. (2000), estudando equações de volume para *Acácia mangium* Willd, concluíram que uma modificação da equação de Meyer foi o mais adequado para estimar os volumes totais e comerciais com e sem casca.

### **2.3.4 Funções de forma**

As funções de forma, afilamento, *taper* ou adelgamento são utilizadas para expressar a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do fuste (Scolforo, 1997b; Campos & Leite, 2002; Prodan et al., 1997), permitindo estimar o diâmetro em qualquer altura ao longo do fuste, a partir das variáveis DAP e altura total. Com estas informações, as funções de forma possibilitam a estimativas de múltiplos produtos das árvores, melhorando assim o planejamento das florestas de produção.

Comparativamente às equações de volume, as funções de forma têm precisão equivalente, embora sejam muito mais interessantes, na medida em que se consegue estimar volume de qualquer porção da árvore. Entretanto, as funções de forma podem acarretar em erros quando adotadas para estimativas por área, tendo em vista que os ajustes são realizados para um restrito número de indivíduos quando comparados com as dimensões amostrais dos inventários (Kirchner et al., 1989). No entanto, tais erros podem ser diminuídos quando se aumenta o espectro amostral, o que implica no aumento dos custos do processo (Scolforo, 1997b).

Embora as bases teóricas das funções de afilamento sejam bastante antigas, sua aplicabilidade data da década de 1960, uma vez que os maiores

impulsos no sentido de torná-las usuais no dia-a-dia só aconteceram a partir dos avanços da informática (Scolforo, 1997b).

Segundo Scolforo (1997b) e Campos & Leite (2002), os modelos de forma podem ser dos seguintes tipos:

- modelos simplificados: que não consideram a altura total, mas a distância entre um diâmetro qualquer ( $d$ ) e a extremidade da árvore, além do DAP;
- modelos polinomiais: são aqueles baseados principalmente na comparação entre a variável dependente  $(d/DAP)^2$  ou  $(d/D_{0,1})^2$  e os polinômios formados pela variável independente  $(h/H_i)$ ;
- modelos sigmóides: utilizam transformações de variáveis de modo que o modelo se assemelha à forma natural dos troncos. Trata-se de expressões matemáticas que geram um perfil semelhante a uma curva sigmóide;
- modelos segmentados: consistem no uso de submodelos justapostos, cada um representando uma porção do tronco. A união dos submodelos se dá por meio da imposição de restrições ao modelo geral;
- modelos definidos por meio de análise multivariada: baseiam-se na aplicação de análise multivariada (análise de componentes principais) para investigar as variações existentes na estrutura dos dados e definir o modelo de regressão a ser utilizado para descrever o perfil do tronco; e,
- modelos trigonométricos.

Além das vantagens referentes à flexibilidade e amplitude das informações geradas, as funções de afilamento apresentam ainda o princípio da compatibilidade entre o volume total e os volumes comerciais estimados. Tal princípio garante que a soma dos volumes comerciais seja sempre menor que o volume total (Scolforo, 1997b).

Assis et al. (2001), estudando modelos de forma para *Pinus taeda*, concluíram que o modelo de Clark III et al. (1991) é o mais flexível dos modelos, já que foi o único a propiciar estimativas acuradas do volume

Silva (1996) comparou modelos de razão volumétrica, *taper* e um modelo para múltiplos volumes para estimar o volume comercial em árvores de eucalipto e concluiu que todos os métodos testados geravam estimativas confiáveis para estimação dos volumes comerciais e totais.

Assis (1998) comparou dois modelos polinomiais não-segmentados e duas razões de volume para estimativa de diâmetros ao longo do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, com ajustes por estrato e por classe diamétrica. Para as duas espécies estudadas, o modelo polinomial proposto por Hradetzky (1976), conhecido como polinômio de potências fracionárias e inteiras, foi o mais estável nas estimativas de diâmetros comerciais.

Na Tabela 1.1 encontram-se alguns modelos de forma encontrados na literatura.

**TABELA 1.1** Modelos para forma não-segmentados, nas suas formas de estimativa de diâmetro ao longo do fuste (...continua...)

<b>Modelos</b>	<b>Autoria</b>
$\frac{d_i}{DAP} = \frac{h_i^2}{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^2} + \varepsilon_i$	Prodan (1965), citado por Scolforo (1997b)
$d_i = DAP \cdot \left[ \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^5 \right] + \varepsilon_i$	Schöepfer (1966)
$\frac{d_i^2}{DAP^2} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{h_i}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{ht}\right)^2 + \varepsilon_i$	Kozak et al. (1969)
$\left(\frac{d_i}{DAP}\right)^2 = \left(\frac{ht - h_i}{ht - 1,3}\right)^{2\beta_1} \cdot \exp(\beta_2 T x) + \varepsilon_i$	Omerod modificado (1973), citado por Campos & Leite (2002)
$\left(\frac{d_i}{DAP}\right)^2 = 10^{2\beta_0} \cdot DAP^{(2\beta_1 - 2)} \cdot ht^{2\beta_2} \cdot (ht - h_i)^{2\beta_3} \cdot \exp(\beta_4 T x) + \varepsilon_i$	Demaerschalk (1976)

**TABELA 1.1** Cont.

<b>Modelos</b>	<b>Autoria</b>
$d_i = DAP \left[ \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i}{ht} \right)^{p_1} + \beta_2 \left( \frac{h_i}{ht} \right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left( \frac{h_i}{ht} \right)^{p_n} \right] + \varepsilon_i$	Hradetzky (1976)
$d_i^2 = \frac{\hat{V}}{K \cdot ht} \left[ \beta_1 \left( \frac{L}{ht} \right) + \beta_2 \left( \frac{L}{ht} \right)^2 + \dots + \beta_n \left( \frac{L}{ht} \right)^{p_n} \right] + \varepsilon_i$	Goulding & Murray (1976)
$\left( \frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{\frac{h_i}{ht}} + \beta_2 \left( \frac{h_i}{ht} \right) + \beta_3 Tx + \varepsilon_i$	Garcia (1993)

em que:

DAP = diâmetro à altura do peito (cm);

$d_i$  = diâmetro (cm);

$K = \pi/40000$ ;

$\hat{V}$  = volume estimado pela equação de volume individual (m<sup>3</sup>);

$p_i$  = expoentes a serem selecionados;

$h_i$  = altura (m);

$h_t$  = altura total (m);

$L = (h_t - h_i)$ ;

$\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados;

$Tx = 0$  para diâmetro com casca e  $Tx = 1$  para diâmetro sem casca; e,

$\varepsilon_i$  = erro de estimativa.

### 2.3.5 Fator de forma

O fator de forma é uma opção antiga e que deve ser utilizada em situações que não se tenha nenhuma informação ou, ainda, necessite de rapidez do trabalho de inventário. Ele fornece estimativas confiáveis, desde que se controle idade, espaçamento e sítio (Franco et al., 1997).

Devido à incerteza da forma do fuste, o emprego do fator de forma ( $f$ ), definido pela razão entre o volume do fuste ( $V_{\text{fuste}}$ ) e o volume de um cilindro de



altura igual à altura da árvore (H) e com diâmetro igual ao DAP ( $V_{cil.}$ ) (Campos & Leite, 2002), isto é:

$$f = \frac{V_{fuste}}{V_{cil.}}$$

O motivo de se considerar a altura do cilindro igual à altura total da árvore é a garantia da consistência de resultados, uma vez que essa altura é facilmente mensurável com a árvore em pé. Como a forma entre árvores é variável, o usual é empregar um fator de forma médio (Campos & Leite, 2002).

### 2.3.6 Análise residual para os modelos de regressão

São consideradas observações influentes aquelas que provocam diferenças substanciais nos valores calculados da estatística, na presença e ausência da observação. Segundo Souza (1998), as estatísticas de modelos lineares podem ser fortemente afetadas ou influenciadas por umas poucas observações. Dessa forma são de grande importância a identificação destes casos ou observações influentes e a avaliação de seu impacto.

Para a avaliação dos impactos das possíveis observações influentes para modelos lineares, são freqüentemente adotados os seguintes medidores de atipicidade: elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS, DFBETAS, distância Cook's, dentre outras.

A diagonal principal da matriz H, no caso  $h_{ii}$ , ou seja, a  $i$ -ésima da diagonal da matriz H, compõe a formulação das principais estatísticas para identificação de pontos atípicos, é expressa por:

$$h_{ii} = X_i (X' X)^{-1} X_i$$

A matriz  $H = \{h_{ij}\}$  corresponde à matriz que multiplica o vetor de valores observados para gerar o vetor de valores preditos, sendo:

$$H = X(X'X)^{-1}X' \Rightarrow \hat{Y} = X(X'X)^{-1}X'Y \Rightarrow \hat{Y} = HY$$

em que:

$X_i$  = i-ésima observação da variável independente;

$X'$  = matriz transposta da variável independente;

$X$  = matriz da variável independente; e,

$(X'X)^{-1}$  = inversa do resultado da multiplicação da matriz transposta e da matriz da variável independente.

Exemplificando, para a obtenção das estimativas pela matriz H para um modelo de regressão linear simples ( $Y = \beta_0 + \beta_1 X$ ), o procedimento é:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{21} \\ Y_{31} \\ Y_{41} \\ \dots \\ Y_{n1} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{12} \\ 1 & X_{22} \\ 1 & X_{32} \\ 1 & X_{42} \\ \dots & \dots \\ 1 & X_{n2} \end{bmatrix}$$

Multiplicando  $X'X$ , tem-se:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{n2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & X_{12} \\ 1 & X_{22} \\ 1 & X_{32} \\ \dots & \dots \\ 1 & X_{n2} \end{bmatrix} \Rightarrow X'X = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{bmatrix}$$

A coluna de números “1s” na matriz de delineamento X pode ser vista como uma variável  $X_0$  aproximadamente 1 no modelo de regressão linear.

Multiplicando  $X'Y$ , tem-se:

$$X'Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{n2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{21} \\ Y_{31} \\ Y_{41} \\ \dots \\ Y_{n1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i Y_i \end{bmatrix}$$

Para a obtenção dos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$ , obtém-se inicialmente a

determinante de  $X'X$ , em que:

$$\begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix} = (n \times \sum_{i=1}^n X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n X_i)$$

Posteriormente, realiza a inversão:

$$\begin{vmatrix} n & -\sum_{i=1}^n X_i \\ -\sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix} \times \frac{1}{(n \times \sum_{i=1}^n X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n X_i)} = (X'X)^{-1}$$

Para a obtenção dos parâmetros basta:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} = (X'X)^{-1} X'Y$$

Os valores estimados para Y são obtidos:

$$\hat{Y} = X(X'X)^{-1} X'Y \quad \text{ou} \quad \hat{Y} = HY$$

em que:

$$H = X(X'X)^{-1} X'$$

⇓

$$\begin{vmatrix} 1 & X_{12} \\ 1 & X_{22} \\ 1 & X_{32} \\ \dots & \dots \\ 1 & X_{n2} \end{vmatrix} \times \left( \begin{vmatrix} n & -\sum_{i=1}^n X_i \\ -\sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 \end{vmatrix} \times \frac{1}{(n \times \sum_{i=1}^n X_i^2) - (\sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n X_i)} \right) \times \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{n2} \end{vmatrix}$$

⇓

$$H = \begin{bmatrix} h_{ii} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & \dots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{ii} & h_{23} & h_{24} & \dots & h_{2n} \\ h_{31} & h_{32} & h_{ii} & h_{34} & \dots & h_{3n} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & h_{ii} & \dots & h_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n1} & h_{n2} & h_{n3} & h_{n4} & \dots & h_{ii} \end{bmatrix}$$

## 2.4 Planejamento da atividade florestal

No planejamento da atividade florestal devem-se considerar dois elementos básicos para a tomada de decisão gerencial e que possam ser baseadas em critérios técnicos. A primeira é o conhecimento e o domínio de toda a estrutura de custos, preços e taxas de juros. O outro aspecto é o conhecimento da produção presente e futura que cada sítio florestal que cada espécie pode propiciar ao longo do tempo. Essa informação pode ser obtida com a utilização de técnicas de modelagem de crescimento e de produção. Com estes métodos torna-se possível avaliar e realizar tomadas de decisão consistentes, como: quando realizar o desbaste, o momento da rotação técnica e econômica ótimas por sítio florestal, entre outras possibilidades (Scolforo e Maestri, 1998).

Rezende et al. (1983) consideram que o empreendedor, ao se decidir por um investimento na área florestal, necessita ter muita convicção no que diz respeito às informações utilizadas, pois um erro cometido poderá demandar muito tempo para ser corrigido, visto que os empreendimentos florestais caracterizam-se pela longa rotação.

Neste contexto, o planejamento florestal deve empregar as técnicas disponíveis para melhor projetar a produção florestal para determinado mercado. Com isso, os modelos de programação matemática podem ser adotados no

desenvolvimento de políticas ótimas de corte das florestas (Menezes et al., 1990).

Segundo Scolforo (1998b) a distinção entre predição e projeção é mais complexa do que a comparação entre a palavra presente e futuro pode sugerir. A diferença básica é que predição não envolve projeção da densidade do povoamento, enquanto que projeção da produção sim.

A modelagem do crescimento e da produção florestal segue duas tendências predominantes: os modelos biométricos e os modelos baseados em processo.

Os modelos baseados em processo podem ser considerados um tema da ciência florestal ainda em desenvolvimento, pois a aplicação, demandam estudos ecofisiológicos e, para Scolforo (1998b), sua aplicação prática é vislumbrada para mais longo prazo.

Os modelos biométricos buscam representar indiretamente os fatores ambientais e os tratamentos silviculturais no crescimento e produção dos povoamentos florestais. Para isso são empregados como fonte de variação o sitio florestal, a área basal e a idade. Os modelos biométricos ainda podem ser categorizados em modelos de povoamento, modelos por classe diamétrica e modelos para árvores individuais.

Burkhardt et al. (1981) enfatizam que os modelos de povoamento devem ser geralmente aplicados quando estimativas gerais sobre a população são desejadas, sendo estes procedimentos computacionalmente eficientes. Este modelo não fornece elementos para que se proceda a uma avaliação econômica das várias opções de utilização dos produtos florestais, além de serem inflexíveis para analisar desbastes a serem simulados no povoamento.

Para Scolforo (1998b), os modelos de distribuição por classe diamétrica possibilitam a avaliação econômica de produtos discriminados por classe de tamanho. Computacionalmente, é mais dispendioso que o modelo para todo o

povoamento, além de ser inflexível para analisar uma "ampla" faixa de desbastes, a serem simulados no povoamento. Os modelos para árvore individual apresentam um máximo detalhamento e flexibilidade para avaliar opções de utilização e tratamentos no povoamento, entretanto, suas aplicações são mais dispendiosas.

#### **2.4.1 Rotação florestal**

Campos & Leite (2002) definem que a rotação florestal ou idade técnica de colheita é aquela em que o incremento médio anual é máximo; nesta idade, este incremento é igual ao incremento corrente anual.

A determinação da idade de corte de um povoamento é uma das fases mais importantes no conjunto das técnicas de manejo e planejamento florestal. No caso específico do empresário florestal, em que o objetivo principal é a maximização do lucro, esta fase reveste-se da maior importância, em razão do alto custo do empreendimento (Resende et al., 2004).

Scolforo & Maestri (1998) enfatizam que o máximo incremento médio anual indica a máxima produção do povoamento florestal, ou seja, a rotação silvicultural ou técnica, se esta for a opção gerencial. No entanto, este critério não leva em consideração os custos, a dimensão dos produtos florestais, a renda e a taxa de juros.

Ratificando o conceito acima, Bentley & Teeguarden (1965) afirmam que uma empresa florestal pode utilizar as melhores técnicas de produção e plantio de mudas, usar os clones mais adaptados, obter uma excelente estrutura florestal, adotar técnicas de proteção e ainda ficar muito aquém dos resultados econômicos potencialmente tangíveis, caso a rotação e ou colheitas intermediárias não forem realizadas no momento adequado.

Scolforo & Maestri (1998), Rezende & Oliveira (2001) e Resende et al. (2004) apontam que um dos procedimentos mais empregados para a definição da rotação econômica é o critério de maximização do valor presente líquido (VPL).

Contudo, estudos sobre a rotação técnica consistem num importante instrumento para definir a ocupação de sítios florestais, de maneira a planejar uma menor competição entre plantas, melhoria no incremento de indivíduos remanescentes, dentre outras estratégias (Scolforo, 1998b).

Dentre os muitos trabalhos realizados sobre a rotação florestal podem-se destacar, entre outros, os estudos desenvolvidos por Malende & Temu (1990), Lopes (1990), Resende (1991), Rezende et al. (1994), Rodriguez et al. (1997), Nunifu & Murchison (1999), Silva et al. (1999), Souza et al. (2001) e Soares et al. (2003).

#### **2.4.2 Avaliação econômica de povoamentos florestais**

Na atividade florestal, a base para o planejamento está na determinação dos regimes de manejo, principalmente no que se refere à idade para o corte final ou rotação do povoamento, de maneira que possibilite a máxima rentabilidade (Oliveira, 1995).

Critérios econômicos para a avaliação de empreendimentos florestais em diversas formas de manejos, sítios e espécies têm sido estudados em diversos trabalhos, tais como Bentley & Teengarden (1965), Scolforo (1990), Souza et al. (2001), Gomes et al. (2002) e Tsukamoto Filho et al. (2003), dentre outros.

Rezende & Oliveira (1993), citados por Acerbi Júnior (1998), apontam que os métodos mais indicados para análise econômica florestal são os que consideram o valor do capital no tempo, isto é, que atribuem diferentes ponderações às receitas líquidas, em função de sua distribuição ao longo do tempo. Dentre estes métodos, os mais empregados são o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), o Benefício (Custo) Periódico

Equivalente (B(C)PE), a Razão Benefício-Custo (B/C) e o Custo Médio de Produção (CMPr).

Quando se adota o VPL como o critério principal na avaliação de projetos concorrentes há necessidade de corrigir os horizontes de tempo, quando se comparam alternativas de horizontes distintos. Como vantagem, o VPL traz, implicitamente, a consideração do tamanho do projeto ou o volume do capital investido (Silva et al. 2002).

Rezende (1991), citado por Acerbi Júnior (1998), trabalhou com os critérios Valor Presente Líquido (VPL), Benefício Periódico Equivalente (B(C)PE) e Custo de Produção Atualizado (CPA), para a determinação da rotação econômica em povoamento de eucalipto. As análises econômicas para o Valor Presente Líquido (VPL) e Custo de Produção Atualizado (CPA) foram efetuadas tomando-se como critério de equiparação os horizontes no infinito. No caso do Benefício Periódico Líquido (B(C)PE), não houve a necessidade de se considerar o horizonte infinito, por ser o próprio critério um método para igualar horizontes, pois os benefícios são analisados em um único período de tempo.

O Benefício (Custo) Periódico Equivalente (B(C)PE) é a parcela periódica e constante necessária ao pagamento de uma quantia ao VPL da opção de investimento em análise, ao longo de sua vida útil. Dessa forma, um projeto será considerado economicamente viável se apresentar B(C)PE positivo, indicando que os benefícios periódicos são maiores que os custos periódicos (Rezende & Oliveira, 2001).

Para Rezende & Oliveira (2001), a comparação entre projetos convencionais e economicamente independentes entre si pode ser feita, sem nenhum problema, pelo método TIR. Neste caso, as decisões de aceitação ou rejeição de cada projeto são perfeitamente coincidentes com as do método do VPL.



Silva et al. (2002) conceituam o critério Razão Benefício/Custo (B/C) como a razão entre o valor atual das receitas e o valor atual dos custos. O projeto é economicamente viável se apresentar a razão  $B/C > 1$ . O projeto é tanto mais indicado economicamente quanto maior a razão B/C.

O CMPr é utilizado quando se deseja operar com o custo médio mínimo, independentemente da quantidade produzida e do tempo de duração do investimento. O CMPr resulta da relação entre o Custo Total Atualizado (CTj) e a Produção Total Equivalente (QTj), sendo necessário que esses valores sejam convertidos num mesmo período de tempo (Rezende & Oliveira, 2001).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACERBI JÚNIOR, F.W. **Definição de regimes de desbastes e poda economicamente ótimos para *Pinus taeda***. 1998. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ALDER, D. **Forest volume estimation and yield prediction: yield prediction**. Rome: FAO, 1980. v.2. 194 p. (FAO Forestry Paper 22/2).
- ASSIS, A.L. de. **Acuracidade na estimativa de volumes comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. 1998. 183p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ASSIS, A.L. de et al. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v.7, n.1, p.20-40, 2001.
- BAILEY, R.L.; CLUTTER, J.L. Base age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, v.20, n.2, p.155-159, 1974.
- BATISTA, J.L.F.; COUTO, H.T.Z. Escolha de modelos matemáticos para construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus* sp no estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, v.32, p.33-42, 1986.
- BENTLEY, W.; TEENGUARDEN, D. Financial maturity: a theory review. **Forest Science**, Washington, v.11, n.3, p.76-87, Mar. 1965.
- BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. 2002. 42p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, MG, Viçosa, MG.
- BOLLMANN, H.A. et al. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC/COMPED/INGP, 2001. p.117-143.
- BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L.; WARE, K.D. Slash site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method. **Forest Science**, v.30, n.2, p.423-441, 1984.
- BURGER, D. **Ordenamento florestal**. 2.ed. Curitiba: UFPR, 1976. Não paginado.
- BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1974. 293p.
- BURKHART, H.E.; CAO, Q.V.; WARE, K.D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Virginia: School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59p. (Publ. FWS, 2).

- CABACINHA, C.D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa.** 2003. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- CAMPOS, J.C.C. **Dendrometria.** Viçosa, MG: UFV, 1988. 43p.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** Viçosa, MG: UFV, 2002. 407p.
- CAMPOS, J.C.C.; TREVIZOL JÚNIOR, T.L.; PAULA NETO, F. de. Ainda, sobre a seleção de equações de volume. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.9, n.2, p.115-126, 1985.
- CARDOSO, N.S. **Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com atividade cambial de árvores de teca (*Tectona grandis* L.f.) – Verbenaceae.** 1991. 117p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- CECERE, S. **Construção de curvas de índice de sítio para plantios clonais de *Eucalyptus grandis* através do método da diferença algébrica.** 2000. 19p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- CENTENO, J.C. **Plano de manejo do povoamento de Teca – Floresteca.** 2003. 14p. Disponível em: <<http://www.floresteca.com.br>>. Acesso em: 09 dez. 2003.
- CHAVES, E.; FONSECA, W. **Teca (*Tectona grandis* L.f.) espécie de árbol de uso múltiple en América Central.** Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 1991. 47p. (Informe Técnico, 179).
- CLARK III, A.; SOUTER, R.A.; SCHLAEGEL, B.E. **Stem profile equations for Southern tree species.** USDA: Southeastern Forest Experiment Station, 1991. 113p. (Research Paper, SE 282).
- CLUTTER, J.L. et al. **Timber management: a quantitative approach.** New York: J. Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CLUTTER, J.L.; FORSTON, J.C.; PIENAAR, L.V. **Timber management: a quantitative approach.** Malabar: Krieger, 1992. p.3-29.
- COUTO, H.T. do.; VETTORAZZO, S.C. Seleção de equações de volume e peso seco para *Pinus taeda*. **Revista Cerne**, Lavras, v.5, n.1, p.69-80, 1999.
- CUNHA NETO, F.R. et al. Uso da diferença algébrica para construção de curvas de índice de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luiz Antônio – SP. **Revista Cerne**, Lavras, v.2, n.2, p.10-26, 1996.

- DAVIS, K.P. **Forest management, regulation and valuation**. USA: Mc Graw Hill, 1966. 519p.
- DEMAERSCHALK, J.P. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.3, n.1, p.90-94, 1976.
- FIGUEIREDO, E.O. **Reflorestamento com teca (*Tectona grandis* L.f.) no Estado do Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 28 p. (Documentos, 65).
- FINGER, Z.; FINGER, F.A.; DRESCHER, R. Teca (*Tectona grandis* L.f.): plante esta idéia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria, RS: UFSM, 2001. CD-ROM.
- FRANCO, E.J. **Estudo dos métodos estimativos de volume, biomassa e níveis de produtividade para *Eucalyptus camaldulensis***. 1996. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- FRANCO, E.J. et al. Eficiência dos métodos para estimativa volumétrica de *Eucalyptus camaldulensis*. **Cerne**, Lavras, v.3, n.1, p.82-116, 1997.
- GARCIA, S.L.R.; LEITE, H.G.; YARED, J.A.G. Análise do perfil do tronco de morototó (*Didymopanax morototonii*) em função do espaçamento. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO; CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., 1993, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba, PR, Biosfera, 1993. n.2, p. 485-491.
- GOMES, A.M.A. **Medição dos arboredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.
- GOMES, F. dos S. et al. Efeitos do sítio e de cenários de custos e preços na análise de regimes de manejo com e sem desbaste em *Pinus taeda* L. **Revista Cerne**, Lavras, v.8, n.1, p. 13-31, 2002.
- GONZALEZ, A.M.F.; SMITH, D.M.; MALDONADO, H.R. Site index for *Pinus caribaea* var. *honolurensis* in "La Sabana", Oaxaca, Mexico. **Commonwealth Forestry Review**, v.71, n.1, p.47-51, 1992.
- GOULDING, C.J.; MURRAY, J.C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, Rotorua, v.5, n.3, p.313-322, Feb. 1976.
- HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abränger keiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungs projekten)**. Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146 p. (Abt. Biometric und Informatik, 21).
- HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 2.ed. New York: J. Willey & Sons, 1972. 410p.

- KAOSA-ARD, A. Teak (*Tectona grandis* L.f.) natural distribution and related factors. **Silvicultura**, São Paulo, v.30, n.2, p.173-179, 1983.
- KEOGH, R.M. Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.4, p.143-153, 1982.
- KEOGH, R.M. Growth rates of teak (*Tectona grandis*) in the Caribbean/Central-American region. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.35, p.311-314, 1990.
- KIRCHNER, F.F. et al. O uso de funções spline no cálculo de volumes de árvores. **Floresta**, Curitiba, v.19, n.1, p.116-122, 1989.
- KOZAK, A.; MUNRO, D.D.; SMITH, J.H.G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forest Chronicle**, Toronto, v.45, n.4, p.278-283, 1969.
- KRAMER, J. P.; KOZWLOSKI, K. **Fisiologia das árvores**. Lisboa: Fundação Gulbenkian, 1972. 745 p.
- KRISHNAPILLAY, B. Silvicultura y ordenación de plantaciones de teca. **Unasyva**, Roma, v.51, n.201, p.14-21, 2000.
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas; possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn, Alemanha: GTZ, 1990. 343 p.
- LAURIE, M.V. The beginning of teak plantations in India. **Indian Forester**, Dehra Dun, v.63, n.3, p.151-154, 1937.
- LIMA, C.K.P. **Anéis de crescimento: aspectos gerais**. 2002. 41p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- LOPES, H.V.S. **Análise econômica dos fatores que afetam a rotação de povoamentos de eucaliptos**. 1990. 188p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, MG, Viçosa, MG.
- MALDONADO, G.; LOUPPE D. Desafios para la teca em Cote d'Ivoire. **Unasyva**, Roma, v.51, n.201, p.36-44, 2000.
- MALENDE, Y.H.; TEMU, A.B. Site-Index Curves and Volume Growth of Teak (*Tectona grandis*) at Mtibwa - Tanzania. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.31, p.91-99, 1990.
- MANASSÉS, J.P.; PEICHL, B. Medição da madeira e inventário florestal. In: \_\_\_\_\_. **Manual do técnico florestal: apostila do Colégio Florestal de Irati**. Campo Largo: Ingra, 1986. v.3, p.88.

MATRICARDI, W.A.T. **Efeitos dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L.f.) cultivada na Grande Cáceres – Mato Grosso.** 1989. 135p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, São Paulo.

MENEZES, L.F.; SCHNEIDER, P.R.; KLEIN, J.E. Planejamento da produção sustentada de matéria-prima florestal para empresas verticalizadas. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão: SBS/SBEF, 1990. p.6-22.

NAIR, C.T.S.; SOUVANNAVONG, O. Nuevos temas de investigación en la ordenación de la teca. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.45-54, 2000.

NANANG, D.M.; NUNIFU, T.K. Selecting a functional form for anamorphic site index curve estimation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.118, p.211-221, 1999.

NUNIFU, T.K.; MURCHISON, H.G. Provisional yield models of Teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p.171-178, 1999.

OLIVEIRA, E.B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para a avaliação técnica e econômica de regimes de manejo.** 1995. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

PANDEY, D.; BROWN, C. La teca: uma visión global. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.3-13, 2000.

PARRESOL, B.R.; HOTVEDT, J.E.; CAO, Q.V.A. Volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 17, n.3, p.250-259, Mar. 1987.

PERES-FILHO, O.; DORVAL, A.; BERTI-FILHO, E. Ocorrência de *Hyblaea puera* (Cramer, 1777) (Lepidóptera: Hyblaeidae) em teca no Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.61, n.1, p.59-60, 2002.

PINHEIRO, G.S.; VEIGA, R.A. de A. Comparação de modelos de equações de volume para espécies do gênero *Pinus* na estação experimental de Mogi Guaçu-SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, São Paulo, v.38, n.1, p.83-93, 1984.

PRODAN, M. et al. **Mensura florestal.** San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 1997. 586p.

- PRYA, P.B.; BHAT, K.M. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.108, p.215-222, 1998.
- RESENDE, R.R. **Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de eucalipto**. 1991. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, MG.
- RESENDE, R.R. et al. Emprego de um modelo de crescimento e produção para determinação da rotação em povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.28, n.2, p.219-225, 2004.
- REZENDE, J.L.P.; BARROS, A.A.A.; OLIVEIRA, A.D. Tratamento da inflação nos programas de investimentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.7, n.1, p. 44-55, 1983.
- REZENDE, J.L.P; OLIVEIRA, A.D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 389p.
- REZENDE, J.L.P. et al. A importância do custo da terra na determinação da idade ótima de corte de povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.18, n.1, p.45-55, 1994.
- RODRIGUEZ, L.C.E.; BUENO, A.R.S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, n.51, p.15-28, jun. 1997.
- ROSOT, M.A.D.; DISPERAT, A.A.; FILHO, A.F. Medição da área de anéis de crescimento usando imagens digitais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.25, n.1, p. 79-88, 2001.
- SCHMINCKE, K.H. Plantaciones de teca en Costa Rica: la experiencia de la empresa Precious Woods. **Unasyva**, Roma, v. 51, n. 201, p. 29-37, 2000.
- SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände Schriftenreihe Bad.** [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966. Não paginado.
- SCHUBERT, T.H. Teak: *Tectona grandis* L.f.. In: USDA. FORESTA SERVICE. **Seeds of Woody plants in the United States**. Washington, D.C., 1974. p.803-804.
- SCOLFORO, J.R.S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1990. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- SCOLFORO, J.R.S. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, v.45, p.40-47, 1992.
- SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal**: métodos para classificação de sítios florestais. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997a. 151p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal 2**: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997b. 292p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal**: medição e volumetria de árvores. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998a. 310p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998b. 463p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2**: volumetria. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126p.
- SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio, para plantações de *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v.18, n.112, p.140-158, jun./dez. 1988a.
- SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v.18, n.1-2, p.159-173, 1988b.
- SCOLFORO, J.R.S.; MAESTRI, R. O manejo de florestas plantas. In: SCOLFORO, J.R.S. **Manejo florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 443p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S.; SILVEIRA, V. O uso dos modelos para quantificar o potencial tanante e da madeira do barbatimão (*Striphynodendron adstringens*) existente no Alto e Médio Rio Grande. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE ECOSSISTEMAS FLORESTAIS, 4., 1996, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: BIOSFERA, 1996. p.313-314.
- SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo S/A. **Celulose e papel**: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. São Paulo: Escola SENAI "Theobaldo de Nigris", 1988. 559 p.
- SILVA, G.F. **Alternativa para estimar o volume comercial em árvores de eucalipto**. 1996. 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Universidade Federal de Viçosa, MG.



- SILVA, M.L. da.; FONTES, A.A.; LEITE, H.G. Rotação econômica em plantações de eucalipto não-desbastadas e destinadas a multiprodutos. **Revista Árvore**, v.23, n.4, p.403-412, 1999.
- SILVA, M.L. da; JACOVINE, L.A.G.; VALVERDE, S.R. **Economia florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 178 p.
- SOARES, T.S. et al. Avaliação econômica de plantações de eucalipto submetidas a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p.481-486, 2003.
- SOMARRIBA, E. et al. Linderos de *Tectona grandis* L.f. en el trópico húmedo de Costa Rica y Panamá. **Revista Forestal Centro Americana**, Turrialba, n.28, out./dez. 1999. (Comunicación técnica). Disponível em: <<http://catie.ac.cr/informacion/rfca/rev28/comtec1.htm>>. Acesso em: 10 maio 2001.
- SOUZA, A.N. de; REZENDE, J.L.P. de; OLIVEIRA, A.D. de. Momento ótimo de substituição de povoamentos de *Eucalyptus* spp – o caso da tecnologia constante. **Revista Cerne**, Lavras, v.7, n.2, p.93-103, 2001.
- SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-SEA, 1998. 505 p.
- TONINI, H. et al. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm., na região de Piratini no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v.31, n.3, p.417-423, 2001.
- TROVATI, L.R. **Resposta da densidade dos anéis de crescimento de *Pinus ocarpa* Schiede aos fatores climáticos**. 1982. 97p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia)-USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- TSUKAMOTO FILHO, A.A. et al. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p.487-494, 2003.
- VEIGA, R.A.de A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 1., 1981, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1981. p.93-102.
- VEIGA, R.A. de A. **Dendrometria e inventário florestal**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1984. 108p. (Boletim Didático, 1).
- VEIGA, R.A. de A.; CARVALHO, C.M. BRASIL, M.A.M. Determinação de equações de volume para árvores de *Acácia mangium* Willd. **Cerne**, Lavras, v.6, n.1, p.103-107, 2000.

VEIT, L.f. Plante seu fundo de aposentadoria. **Revista Silvicultura**, São Paulo, v.17, n.68, p.20-22, 1996.

WADSWORTH, F.H. **Forest production for tropical América**. Whanshiton, D.C.:USDA. Forest Service, 1997. 561p. (Agriculture Handbook, 710).

WEAVER, P. L. **Tectona grandis L.f. Teak**. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1993. 18p.

WEHR, N.J. **Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de Araucária angustifolia (Bert) O. Ktze, através da microdensitometria de raios X**. 1998. 92p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras)-USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

WHITESSELL, C.D.; WALTERS, G.A. **Species adaptability trials for man-made forests in Hawaii**. Berkeley, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1976. 30p. (Res. Paper PSW-118).

## **CAPÍTULO 2**

### **UMA NOVA ABORDAGEM PARA SELEÇÃO DE EQUAÇÕES PARA A PREDIÇÃO DO VOLUME TOTAL E COMERCIAL DE *Tectona grandis* L.f.**

## 1 RESUMO

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Uma nova abordagem para seleção de equações para a predição do volume total e comercial de *Tectona grandis* L.f.** 2005. Cap. 2, p. 63-125. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Os estudos foram realizados em povoamentos de *Tectona grandis* L.f., com densidades e idades distintas, em propriedades da Madeireira Floresta Ltda e Madeireira Chalana Ltda, localizadas nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, estado do Acre. Os objetivos foram: selecionar modelos volumétricos gerais de simples e dupla entrada, com a variável dummy para a predição de volumes total e comercial, com e sem casca e, avaliar a possibilidade de gerar uma única equação para diferentes povoamentos. A base de dados foi composta por 159 árvores cubadas rigorosamente de acordo com a classe diamétrica diagnosticada pelo inventário florestal. Dezenove modelos matemáticos foram testados quanto ao desempenho das equações gerais para predição dos volumes de árvores de *Tectona grandis* L.f. com 2,54; 6,45; 7,40; e, 9,52 anos de idade, em quatro áreas plantadas na microrregião do Baixo Rio Acre, tendo os modelos sido divididos em duas categorias: simples (DAP) e dupla entrada (DAP e altura). As equações selecionadas foram avaliadas pelo teste de identidade de modelo. Com base nos critérios de  $R^2$ ,  $R^2_{ajustado}$ , erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e erro de predição ( $Press_p$ ), esta última apenas para modelos lineares, os modelos Kopecky-Gehrhardt, para categoria de simples entrada e o modelo Scolforo et al. (modelo 1), para categoria de dupla entrada, foram os modelos selecionados. O teste de identidade de modelos mostrou não haver possibilidade de utilização de uma única equação para as quatro áreas, somente foi possível a junção de áreas em subgrupos. As equações ajustadas se mostram compatíveis para os volume totais e comerciais com e sem casca.

Palavra-chave: Volumetria, teca, variáveis Dummy, identidade de modelos, diagnóstico de regressão, estimativas de volumes.

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **A new approach to selection of equations for prediction of total and commercial volume of *Tectona grandis* L.f.** 2005. Chap. 2. p. 63-125. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The studies were undertaken in stands of *Tectona grandis* L.f; with distinct densities and ages on farms of the Madeireira Floresta Ltda and Madeireira Chalana Ltda, situated in the cities of Rio Branco and Acrelândia, state of Acre. The objectives were: to select general one way and two way volumetric models with the dummy variable for prediction of total and commercial volumes with and without bark, and evaluate the possibility to generate an only for different stands. The database was made up of 159 trees scaled rigorously according to the diameter class diagnosed by the forest inventory. Nineteen mathematical models were tested concerning the performance of the general equations for predicting the volumes of the trees of *Tectona grandis* L.f of 2,54, 6,45, 7,40 and 9,52 years of age on four areas planted in the Baixo Rio Acre micro region , the models having been divided in two simple categories: one way (d.b.h.) and two way (d.b.h. and height). The equations selected were evaluated by the model density test. On the basis of the criteria of  $R^2$ ,  $R^2$  adjusted, residual standard error and prediction error ( $Press_p$ ), this latter only for linear models, the Kopezky-Gehrhardt for one way category and the Scolforo et al. (model 1) for two way category were the selected models. The model identity test showed that there is no possibility of utilizing a single equation for the four areas, only the junction of areas in subgroups was possible. The fit equations proved to be compatible to the total and commercial volumes with and without a bark.

Key-words: volumetry, teak, Dummy variables, model identity, regression diagnostic, volume estimates

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser); Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-adviser)

### 3 INTRODUÇÃO

Nos diagnósticos florestais, um dos principais objetivos é a obtenção de estimativas de volume total e comercial (com e sem casca), sendo para isso muito utilizadas as equações de volumes comerciais ou totais, ajustadas de forma independente. Essas equações servem para estimar volumes individuais de árvores e, com base num procedimento de amostragem de campo, pode-se estimar o volume de um povoamento florestal (Veiga, 1981).

No entanto, o ajuste de forma independente não garante que, para todos os indivíduos amostrados, haverá compatibilidade entre os volumes totais e comerciais com e sem casca, ou seja, que o volume comercial em determinada situação não será igual ou superior ao volume total. Esta garantia somente poderia ser dada se as equações de volume fossem ajustadas de maneira simultânea, em que numa única equação se pudessem obter todas as formas de volume de interesse (volume total e comercial, com e sem casca).

Uma possibilidade para promover a compatibilidade das estimativas, obtendo uma equação geral que calcule todos os volume de acordo com o interesse, consiste na adoção da variável Dummy.

Ignorar a possibilidade de ocorrer em determinadas situações incompatibilidade entre os modelos ajustados para distintos volumes é correr o risco de cometer sérias falhas de super ou subestimativas para determinados grupos de árvores. Se estas árvores compõem o principal grupo comercial, isto se traduz em significativos prejuízos para o suprimento da indústria florestal.

Este trabalho objetivou:

- testar seis modelos volumétricos de simples entrada (diâmetro à altura do peito - DAP) com o emprego da variável Dummy, para obter numa única equação o volume total e comercial (com e sem casca) e compará-los quanto ao desempenho;

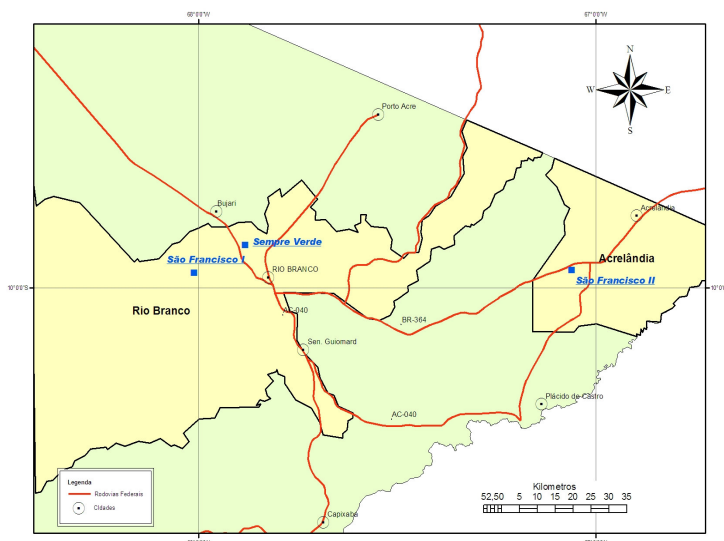
- testar treze modelos volumétricos de dupla entrada (DAP e altura) com o emprego da variável Dummy, para obter numa única equação o volume total e comercial (com e sem casca) e compará-los quanto ao desempenho;
- demonstrar a compatibilidade das estimativas dos volumes totais e comerciais (com e sem casca) para os modelos selecionados;
- testar o atendimento do quesito de normalidade dos resíduos para os modelos selecionados, considerando os volumes de interesse; e,
- proceder à análise residual para dezenove modelos volumétricos, considerando a variável Dummy;
- testar a possibilidade de agrupar as equações de diferentes povoamentos por meio do teste de identidade dos modelos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização das áreas de estudo

#### 4.1.1 Denominação, localização e acesso

Os estudos foram realizados em quatro povoadamentos de teca plantados em três propriedades rurais denominadas de Sempre Verde, São Francisco I e São Francisco II, nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, situados na microrregião do Baixo Rio Acre, no estado do Acre (Figura 2.1).



**FIGURA 2.1** Mapa de localização das áreas de estudo (Sempre Verde, São Francisco I e São Francisco II) com plantios de teca, nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil

O imóvel Sempre Verde é de propriedade da Madeireira Floresta Ltda. e está localizado no município de Rio Branco, margem esquerda da rodovia federal BR-364, km 8, sentido Rio Branco–Sena Madureira, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude 09°53′37,9″S e longitude 67°53′40,8″W.



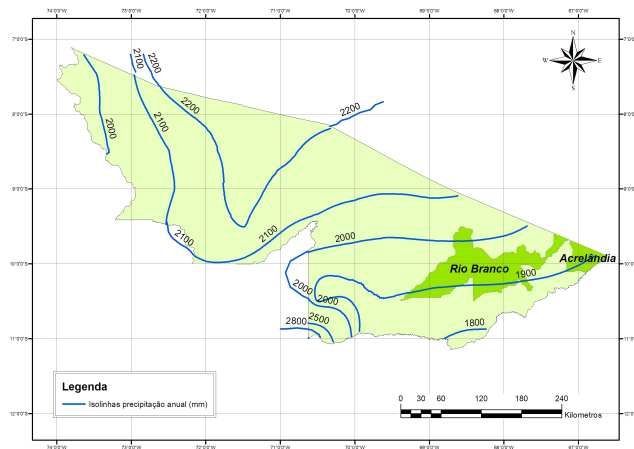
A colônia São Francisco I pertence à empresa Madeireira Chalana Ltda., e está localizada em Rio Branco, na margem direita da rodovia estadual AC-40 (também conhecida por Transacreana), km 18, sentido Rio Branco–rio Iaco. O povoamento de teca da colônia São Francisco I está situado nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 10°01'26,7"S e longitude 67°57'27,9"W.

Localizada nas proximidades da BR-364, sentido Rio Branco–Porto Velho, com acesso secundário pelo ramal Bengala (construído e mantido pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA), a colônia São Francisco II é a terceira propriedade estudada com povoamentos de teca. Pertencente à Madeireira Chalana Ltda., o imóvel está situado no município de Acrelândia (extremo leste do estado do Acre), nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 09°59'45,6"S e longitude 67°06'02,1" W.

#### **4.1.2 Clima**

Considerando a classificação Bioclimática de Bagnouls/Gaussen, o clima prevalecente nas áreas de estudo caracteriza-se por xeroquimência subtermaxérica severa, com de 1 a 3 meses de período seco, com temperatura média do mês mais frio superior a 15°C, existindo de 21 a 40 dias biologicamente secos. Nos meses mais frios, é freqüente a ocorrência de ondas de frio, com duração de 3 a 8 dias, com a temperatura caindo bruscamente até 4°C, este fenômeno é conhecido regionalmente como friagem (INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DO ACRE - IMAC, 1991).

O período chuvoso inicia-se normalmente em outubro, prolongando-se até maio. A precipitação do trimestre mais chuvoso (os meses de janeiro, fevereiro e março) gira em torno dos 800 a 850 mm e do trimestre mais seco (os meses de junho, julho e agosto) entre 100 a 150 mm e precipitação anual entre 1.800 a 2.000 mm (Figura 2.2).



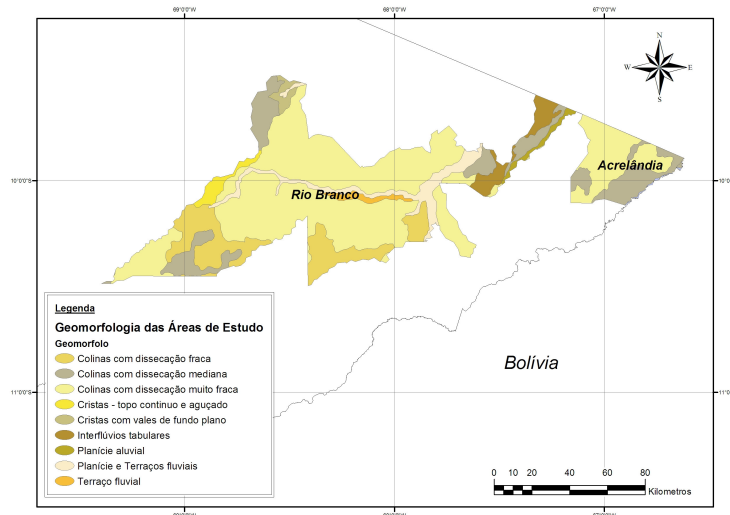
**FIGURA 2.2** Mapa da pluviosidade média anual do estado do Acre, com destaque para os municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil (ACRE, 2000 - modificado)

A temperatura climática nos meses mais quentes é de 34°C a 38°C, com temperatura média anual de 24°C a 26°C. A umidade relativa é bastante elevada variando de 85% a 90%.

#### 4.1.3 Geomorfologia

Nos municípios de Rio Branco e Acrelândia, as feições geomorfológicas predominantes são as formações de colinas, caracterizadas pelo relevo de topo pouco convexo, separada por vale em V e, eventualmente, por vale de fundo plano, mapeado como índice de dissecação muito fraco (Figura 2.3).

Outras duas categorias significantes na região são as formações de colinas com dissecação fraca e colinas com dissecação mediana. A primeira caracteriza-se por relevos de topo pouco convexos, separados por vales em V e, eventualmente, por vales de fundo plano, mapeados com índice de dissecação fraca. A segunda categoria mantém as mesmas características, diferenciando-se somente no índice de dissecação (ACRE, 2000).



**FIGURA 2.3** Mapa geomorfológico dos municípios de Rio Branco e Acrelândia, Acre, Brasil (ACRE, 2000 - modificado)

#### 4.1.4 Solos

As classes de solos predominantes na microrregião do Baixo Rio Acre são os argissolos eutróficos e distróficos e os latossolos. Os argissolos apresentam como característica marcante o horizonte B textural e a baixa atividade de argila. Os argissolos eutróficos são solos pouco intemperizados e, quando não se encontram em áreas íngremes, apresentam grande potencial agrícola. Os argissolos distróficos caracterizam por serem bastante lixiviados e quimicamente pobres, mas apresentam propriedades físicas favoráveis à agricultura (Acre, 2000).

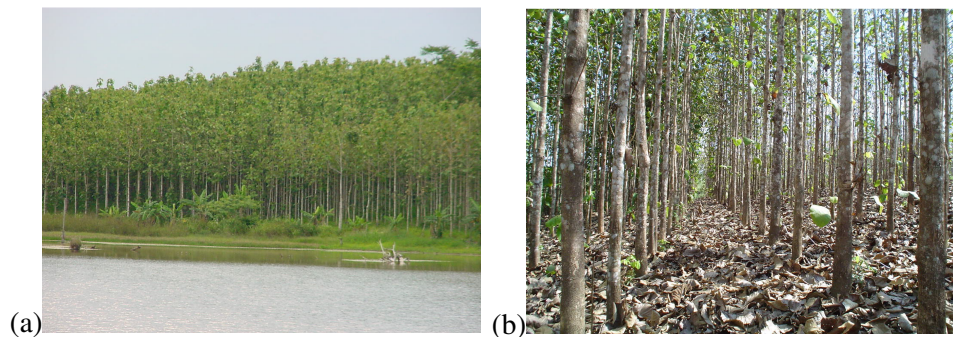
Os latossolos também se fazem presentes, principalmente em Acrelândia, distribuídos em pequenas manchas de solos. São solos altamente intemperizados, com características físicas favoráveis à agricultura, porém, com pouca reserva de nutrientes (Acre, 2000). Suas principais características são a

coloração, relacionada à forma de ferro (hematita ou goethita), o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do ataque sulfúrico associado ao material de origem e as características morfológicas como pouca diferenciação entre horizontes, profundidade e estrutura. Os solos dos povoamentos estudados são classificados por argissolos eutróficos.

#### 4.2 Caracterização dos plantios

Os quatro povoamentos de teca selecionados para estudo apresentam as seguintes características:

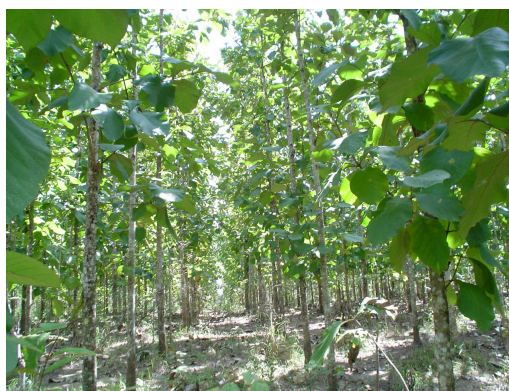
A **Área 1**, localizada na colônia Sempre Verde, constitui-se num povoamento de teca instalado em janeiro de 1995. A densidade inicial do povoamento foi de 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> (espaçamento de 2 X 2,4 metros) (Figura 2.4). Originalmente o referido talhão consistia numa pastagem de *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria humidicola* na qual, três anos após a implantação da floresta, praticamente ocorreu o desaparecimento das gramíneas no interior do povoamento.



**FIGURA 2.4** Povoamento de teca variedade *Tennasserim*, com densidade de 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> e idade de 9,52 anos. Em que (a) panorâmica e (b) interior do povoamento. (Área 1 - Colônia Sempre Verde, Rio Branco, Acre, 2004)

A **Área 2**, também localizada na colônia Sempre Verde, foi implantada em janeiro de 2002, numa densidade de 1.667 árvores.ha<sup>-1</sup>, no espaçamento de 2 x 3 metros. Anteriormente, a área era ocupada por um povoamento de faveira (*Schyzolobium* sp.), o qual apresentou uma alta mortalidade pela manifestação de pragas e doenças, inviabilizando técnica e economicamente sua permanência. Este povoamento de faveira foi abatido e incorporado ao solo, juntamente com as gramíneas predominantes do local (*Brachiaria decumbens*).

A **Área 3** está localizada no imóvel São Francisco I, foi implantada em janeiro de 1997, com densidade inicial de 1.111 árvores. ha<sup>-1</sup> da espécie teca (variedade *Tennasserim*) e 556 árvores.ha<sup>-1</sup> da espécie mogno (*Swietenia macrophylla* King), porém, dois anos após o plantio, a população de mogno limitava-se a poucas árvores, em decorrência do forte ataque de broca (*Hypsipyla grandella*) e à intensa competição imposta pela teca. Atualmente, pode-se considerar a área como um povoamento puro de teca com 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>, plantadas em filas duplas de 3 x 2 metros e com 4 metros entre fileiras duplas (Figura 2.5). A área, antes da implantação do povoamento, era ocupada por gramíneas da espécie *Brachiaria brizantha* cv. Marandú.



**FIGURA 2.5** Povoamento de teca variedade *Tennasserim*, com densidade de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup> e idade de 7,4 anos (Área 3 - Colônia São Francisco I – Rio Branco, Acre, 2004)

A **Área 4**, localizada na colônia São Francisco II, município de Acrelândia, foi instalada em janeiro de 1999, no espaçamento de 2 x 3 metros, perfazendo uma densidade inicial de 1.667 árvores.ha<sup>-1</sup>. Anteriormente, a área era ocupada unicamente por pastagens da espécie *Brachiaria brizantha* cv. Marandú.

O material genético dos quatro povoamentos é da variedade *Tennasserim*, de procedência da Birmânia (Myanmar) para Trinidad, e foi adquirido da Serraria Cáceres S.A. no estado de Mato Grosso.

Na Tabela 2.1 encontra-se a caracterização dos povoamentos estudados, com base em dados do inventário de parcelas, as quais apresentam área de 400 m<sup>2</sup>.

**TABELA 2.1** Características dos povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) estudados

Características	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
Denominação	Sempre Verde	Sempre Verde	São Francisco I	São Francisco II
Localização	Rio Branco	Rio Branco	Rio Branco	Acrelândia
Solos	Argissolos	Argissolos	Argissolos	Argissolos
Material genético	<i>Tectona grandis</i> L.f. var. <i>Tennasserim</i>			
Área (ha)	1,4835	4,8553	2,3913	2,4528
Altitude (m)	202,96	195,27	192,96	207,77
Idade (ano)	9,52	2,54	7,40	6,45
DAP médio (cm)	12,66	5,39	11,92	10,68
Altura média (m)	12,63	5,29	12,17	9,17
Nº de árvores inventariadas por ha	2.015	1.391	1.065	1.412
Área basal méd. (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	27,02	3,40	12,13	13,48
Altura dominante (m)	16,76	8,58	14,80	12,10
Dmin (cm)	6,89	2,15	8,25	6,69
Dmax (cm)	19,68	8,13	15,59	16,05

### 4.3 Cubagem rigorosa

A amostra das árvores a serem cubadas rigorosamente baseou-se na distribuição diamétrica dos povoamentos, cujas classes de diâmetro foram

construídas com um DAP mínimo de 5 cm e as amplitudes de classes e frequências distribuídas conforme Tabela 2.2.

**TABELA 2.2** Frequência de árvores cubadas de *Tectona grandis* L.f. para os quatro povoamentos, nas diferentes classes de diâmetro

Número de classes	Classe de diâmetro (cm)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Frequência
		Idade (anos)				
		9,52	2,54	7,40	6,45	
1	5  —— 9	15	15	15	15	60
2	9  —— 13	15	-	15	15	45
3	13  —— 17	15	-	15	15	45
4	17  —— 21	10	-	-	-	10
<b>Total</b>		<b>55</b>	<b>15</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>160</b>

Em cada área, nas proximidades das parcelas permanentes, foram selecionadas as árvores-amostra; para cada árvore-amostra foram realizadas determinações de altura total ( $H_t$ ), DAP e altura comercial até o diâmetro limite de 3 cm e duas medidas de espessura de casca em todas as posições de diâmetro ao longo do fuste. Os diâmetros foram medidos nas alturas de 0,00 m, 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00m, 1,30 m, 1,50 m e, posteriormente, a cada 0,50 m, até atingir a altura comercial. Com as tomadas de diâmetro nas citadas alturas absolutas optou-se pelo método de Smalian, para calcular os volumes, conforme descrito por Husch et al. (1982).

Com o procedimento da cubagem foi possível obter os volumes totais e comerciais, com e sem casca, fator de forma e porcentagem de casca de cada árvore amostrada. As árvores empregadas na classificação de sítio ajudaram a constituir as duas últimas classes diamétricas. Ao todo 160 árvores compuseram a base de dados para cubagem rigorosa.

#### **4.4 Percentual de volume de casca e fator de forma**

Para a obtenção dos percentuais de casca nas diversas idades dos povoamentos e do fator de forma, foram consideradas as informações dendrométricas de todas as árvores cubadas rigorosamente e árvores dominantes que compuseram a amostragem da análise de tronco completa (ANATRO).

A análise de tronco completa fornece informações dendrométricas de todos os anos anteriores, possibilitando obter as informações dos anos correspondente ao intervalo de idade dos povoamentos. Porém, os dados de casca de anos anteriores somente são possíveis reconstituir por meio de procedimentos estimativos. Assim, foi selecionado um modelo linear para estimar o diâmetro com casca das medidas de diâmetro originárias da análise de tronco. Para seleção do modelo consideraram-se os mesmos critérios estabelecidos para seleção de modelos lineares de volume.

As estimativas de médias, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, erro padrão da média e intervalo de confiança, calculadas a 5% de significância, empregaram valores percentuais volume de casca e do fator de forma das árvores amostradas, correspondentes aos seguintes intervalos de idade: 2 a 4 anos, 5 a 7 anos; 8 a 9,52 anos (povoamento mais antigo).

#### **4.5 Ajuste de modelos de regressão com variáveis Dummy**

A variável Dummy possibilita a realização de agrupamentos de regressões ajustadas para diferentes conjuntos de dados (Scolforo, 1997). Ao proceder o agrupamento de regressões, a variável Dummy funciona como um delimitador dos valores preditos, permitindo uma compatibilidade entre as variáveis de interesse, tais como: altura total e comercial, volume com casca e sem casca, diferentes clones, entre outras possibilidades.



Sua aplicação pode ser feita de maneira a introduzir a variável Dummy em cada grupo de interesse, no caso: volume total com casca ( $V_1$ ), volume total sem casca ( $V_2$ ), volume comercial com casca ( $V_3$ ) e volume comercial sem casca ( $V_4$ ). Assim, a variável Dummy assume valor de 1 quando a observação pertence ao grupo e assume valor de 0 (zero) quando a observação pertence a um grupo distinto. A Tabela 2.3 demonstra o arranjo da variável Dummy para os quatro grupos de interesse para ajuste dos modelos de volumétricos.

**TABELA 2.3** Arranjo matemático das variáveis Dummy para os quatro grupos volumétricos de interesse

Grupos de interesse	Var. Dummy	Grupos de interesse			
		$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$
volume total com casca ( $V_1$ )	$D_1$	1	0	0	0
volume total sem casca ( $V_2$ )	$D_2$	0	1	0	0
volume comercial com casca ( $V_3$ )	$D_3$	0	0	1	0
volume comercial sem casca ( $V_4$ )	$D_4$	0	0	0	1

A associação entre as variáveis Dummy com o modelo de regressão volumétrico a ser ajustado permite construir o modelo geral em que cada grupo volumétrico é representado pela variável Dummy de valor 1.

#### **4.6 Construção dos modelos para estimar volume de árvores individuais, considerando as variáveis Dummy**

Foram comparados modelos de simples e dupla entrada para estimar volumes totais e comerciais, com e sem casca, de árvores individuais, por meio da inclusão da variável Dummy, a partir das quais foram construídos modelos gerais para serem ajustados, conforme Tabelas 2.4 e 2.5.

Os modelos foram ajustados para o conjunto de dados dos quatro povoamento de teca e, posteriormente, avaliados pela identidade de modelos.

**TABELA 2.4** Modelos volumétricos de simples entrada para o volume de madeira comercial e total, com e sem casca, empregando-se as variáveis Dummy

Modelos gerais com as variáveis Dummy	Autores
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP^2D_1 + \beta_6DAP^2D_2 + \beta_7DAP^2D_3 + \beta_8DAP^2D_4 + \varepsilon_i$	Kopezky-Gehrhart
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1DAP D_1 + \beta_2DAP D_2 + \beta_3DAP D_3 + \beta_4DAP D_4 + \beta_5DAP^2D_1 + \beta_6DAP^2D_2 + \beta_7DAP^2D_3 + \beta_8DAP^2D_4 + \varepsilon_i$	Dissescu-Meyer
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP D_1 + \beta_6DAP D_2 + \beta_7DAP D_3 + \beta_8DAP D_4 + \beta_9DAP^2D_1 + \beta_{10}DAP^2D_2 + \beta_{11}DAP^2D_3 + \beta_{12}DAP^2D_4 + \varepsilon_i$	Hohenald-Krenm
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = [\beta_1(DAP)^{\beta_2}]D_1 + [\beta_3DAP]^{\beta_4}]D_2 + [\beta_5(DAP)^{\beta_6}]D_3 + [\beta_7(DAP)^{\beta_8}]D_4 + \varepsilon_i$	Berkhout
$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5(\ln DAP) D_1 + \beta_6(\ln DAP) D_2 + \beta_7(\ln DAP) D_3 + \beta_8(\ln DAP) D_4 + \beta_9(DAP^{-1}) D_1 + \beta_{10}(DAP^{-1}) D_2 + \beta_{11}(DAP^{-1}) D_3 + \beta_{12}(DAP^{-1}) D_4 + \varepsilon_i$	Brenac
$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5(\ln DAP) D_1 + \beta_6(\ln DAP) D_2 + \beta_7(\ln DAP) D_3 + \beta_8(\ln DAP) D_4 + \varepsilon_i$	Husch

**TABELA 2.5** Modelos volumétricos de dupla entrada para o volume de madeira comercial e total, com e sem casca, empregando-se as variáveis Dummy (...continua...)

Modelos gerais com as variáveis Dummy	Autores
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = [DAP^2/(\beta_1 + \beta_2H_i^{-1})]D_1 + [DAP^2/(\beta_3 + \beta_4H_i^{-1})]D_2 + [DAP^2/(\beta_7 + \beta_6H_i^{-1})]D_3 + [DAP^2/(\beta_7 + \beta_8H_i^{-1})]D_4 + \varepsilon_i$	Honner
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP D_1 + \beta_6DAP D_2 + \beta_7DAP D_3 + \beta_8DAP D_4 + \beta_9DAP^2D_1 + \beta_{10}DAP^2D_2 + \beta_{11}DAP^2D_3 + \beta_{12}DAP^2D_4 + \beta_{13}DAP H_i D_1 + \beta_{14}DAP H_i D_2 + \beta_{15}DAP H_i D_3 + \beta_{16}DAP H_i D_4 + \beta_{17}DAP^2H_i D_1 + \beta_{18}DAP^2H_i D_2 + \beta_{19}DAP^2H_i D_3 + \beta_{20}DAP^2H_i D_4 + \beta_{21}H_i D_1 + \beta_{22}H_i D_2 + \beta_{23}H_i D_3 + \beta_{24}H_i D_4 + \varepsilon_i$	Meyer
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1DAP^2 D_1 + \beta_2DAP^2 D_2 + \beta_3DAP^2 D_3 + \beta_4DAP^2 D_4 + \beta_5DAP^2H_i D_1 + \beta_6DAP^2H_i D_2 + \beta_7DAP^2H_i D_3 + \beta_8DAP^2H_i D_4 + \beta_9DAP H_i^2 D_1 + \beta_{10} DAP H_i^2 D_2 + \beta_{11}DAP H_i^2 D_3 + \beta_{12}DAP H_i^2 D_4 + \beta_{13}H_i^2 D_1 + \beta_{14}H_i^2 D_2 + \beta_{15}H_i^2 D_3 + \beta_{16}H_i^2 D_4 + \varepsilon_i$	Naslund
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = [DAP^2(\beta_1 + \beta_2 H_i)]D_1 + [DAP^2(\beta_3 + \beta_4 H_i)]D_2 + [DAP^2(\beta_5 + \beta_6 H_i)]D_3 + [DAP^2(\beta_7 + \beta_8 H_i)]D_4 + \varepsilon_i$	Ogaya

**TABELA 2.5** Cont.

<b>Modelos gerais com as variáveis Dummy</b>	<b>Autores</b>
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = [\beta_1DAP^{\beta_2}H_i^{\beta_3}]D_1 + [\beta_4DAP^{\beta_5}H_i^{\beta_6}]D_2 + [\beta_7DAP^{\beta_8}H_i^{\beta_9}]D_3 + [\beta_{10}DAP^{\beta_{11}}H_i^{\beta_{12}}]D_4 + \varepsilon_i$	Schumacher e Hall NL
$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5(\ln DAP)D_1 + \beta_6(\ln DAP)D_2 + \beta_7(\ln DAP)D_3 + \beta_8(\ln DAP)D_4 + \beta_9(\ln H_i)D_1 + \beta_{10}(\ln H_i)D_2 + \beta_{11}(\ln H_i)D_3 + \beta_{12}(\ln H_i)D_4 + \varepsilon_i$	Schumacher e Hall (1933)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP/H_iD_1 + \beta_6DAP/H_iD_2 + \beta_7DAP/H_iD_3 + \beta_8DAP/H_iD_4 + \beta_9DAP^2H_iD_1 + \beta_{10}DAP^2H_iD_2 + \beta_{11}DAP^2H_iD_3 + \beta_{12}DAP^2H_iD_4 + \beta_{13}DAP^3H_iD_1 + \beta_{14}DAP^3H_iD_2 + \beta_{15}DAP^3H_iD_3 + \beta_{16}DAP^3H_iD_4 + \varepsilon_i$	Scolforo et al. (Modelo 1)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAPH_iD_1 + \beta_6DAPH_iD_2 + \beta_7DAPH_iD_3 + \beta_8DAPH_iD_4 + \beta_9DAP^3H_iD_1 + \beta_{10}DAP^3H_iD_2 + \beta_{11}DAP^3H_iD_3 + \beta_{12}DAP^3H_iD_4 + \beta_{13}DAPH_i^2D_1 + \beta_{14}DAPH_i^2D_2 + \beta_{15}DAPH_i^2D_3 + \beta_{16}DAPH_i^2D_4 + \varepsilon_i$	Scolforo et al. (Modelo 2)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5H_iD_1 + \beta_6H_iD_2 + \beta_7H_iD_3 + \beta_8H_iD_4 + \beta_9DAP^2H_iD_1 + \beta_{10}DAP^2H_iD_2 + \beta_{11}DAP^2H_iD_3 + \beta_{12}DAP^2H_iD_4 + \beta_{13}DAPH_i^2D_1 + \beta_{14}DAPH_i^2D_2 + \beta_{15}DAPH_i^2D_3 + \beta_{16}DAPH_i^2D_4 + \varepsilon_i$	Scolforo et al. (Modelo 3)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP^2H_iD_1 + \beta_6DAP^2H_iD_2 + \beta_7DAP^2H_iD_3 + \beta_8DAP^2H_iD_4 + \varepsilon_i$	Spurr (1952) (Modelo 1)
$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5\ln(DAP^2H_i)D_1 + \beta_6\ln(DAP^2H_i)D_2 + \beta_7\ln(DAP^2H_i)D_3 + \beta_8\ln(DAP^2H_i)D_4 + \varepsilon_i$	Spurr (logarítmica)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = \beta_1D_1 + \beta_2D_2 + \beta_3D_3 + \beta_4D_4 + \beta_5DAP^2D_1 + \beta_6DAP^2D_2 + \beta_7DAP^2D_3 + \beta_8DAP^2D_4 + \beta_9DAP^2H_iD_1 + \beta_{10}DAP^2H_iD_2 + \beta_{11}DAP^2H_iD_3 + \beta_{12}DAP^2H_iD_4 + \beta_{13}H_iD_1 + \beta_{14}H_iD_2 + \beta_{15}H_iD_3 + \beta_{16}H_iD_4 + \varepsilon_i$	Stoate (1945) (australiana)
$(V_1D_1 + V_2D_2 + V_3D_3 + V_4D_4) = [(DAP^2H_i).(\beta_1 + \beta_2DAP)^{-1}]D_1 + [(DAP^2H_i).(\beta_3 + \beta_4DAP)^{-1}]D_2 + [(DAP^2H_i).(\beta_5 + \beta_6DAP)^{-1}]D_3 + [(DAP^2H_i).(\beta_7 + \beta_8DAP)^{-1}]D_4 + \varepsilon_i$	Takata

em que:

- $V_1$  = volume total com casca;
- $V_2$  = volume total sem casca;
- $V_3$  = volume comercial com casca;
- $V_4$  = volume comercial sem casca;
- $D_1$  = variável Dummy para  $V_1$ ;
- $D_2$  = variável Dummy para  $V_2$ ;
- $D_3$  = variável Dummy para  $V_3$ ;
- $D_4$  = variável Dummy para  $V_4$ ;
- DAP = diâmetro à altura do peito;
- $H_i$  = altura total;

$\varepsilon_i$  = erro da estimativa;  
 $\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados; e,  
 $\ln$  = logaritmo neperiano.

#### 4.7 Análise residual para observações influentes em modelos lineares

Para a avaliação dos impactos das possíveis observações influentes para modelos lineares, foram adotados os seguintes medidores de atipicidade: elementos da diagonal principal da matriz H, DFFITS e distância Cook's.

Os elementos da diagonal da matriz H,  $h_{ii}$ , indicam a influência de  $y_i$  sobre o valor estimado  $\hat{Y}_i$ . Além disso, como a soma dos valores da diagonal principal de H é igual a "p", o número de parâmetros do modelo, espera-se uma influência média da ordem de  $p/n$ , em que n é o número de observações. Dessa maneira, a análise é realizada da seguinte forma: quanto maior  $h_{ii}$ , maior será a distância do valor observado em relação à média de todas as variáveis explicativas. Para Souza (1998), observações que tenham  $h_{ii}$  maior que duas vezes a sua média,  $2p/n$ , devem ser alvo de exame, visto que podem indicar a existência de pontos de "alavancagem" (*leverage*).

A estatística DFFITS considera os efeitos de alavancagem, ou seja, para a avaliação dos pontos extremos (*outliers*) (Ferreira, 1996). Estes pontos se afastam da mediana e afetam o valor da média de uma ou mais variáveis explicativas. São considerados influentes os pontos que afetam a linha de regressão de tal forma que sua retirada altere significativamente as estimativas. Assim, os pontos extremos devem ser identificados para avaliar seu grau de influência sobre as estimativas, por meio de uma análise de sensibilidade que consiste em repetir o procedimento de regressão eliminando-se os pontos extremos para verificar qual a sua influência sobre os parâmetros estimados (SAS, 1990). Não havendo modificações significativas, aceita-se que os pontos

extremos não são pontos influentes, ou seja, não afetam o modelo. A equação é dada por:

$$DFFITS_i = \left( \sqrt{\frac{h_{ii}}{1-h_{ii}}} \right) \times \left( \frac{e_i}{\sqrt{S^2_{(i)}(1-h_{ii})}} \right)$$

em que:

$h_{ii}$  = i-ésima diagonal da matriz de projeção no espaço preditor;  
 $e_i$  = i-ésimo resíduo; e,  
 $S^2_{(i)}$  = i-ésima variância após a deleção da observação analisada.

Conforme sugerido por Chatterjee & Hadi (1986), adotou-se o critério a seguir para considerar os pontos influentes na estatística DFFITS.

$$DFFITS_i = \left( 2 \sqrt{\frac{m+1}{n}} \right)$$

em que:

$m$  = número de parâmetros; e,  
 $n$  = número de observações.

A estatística Cook's D é definida por:

$$Cook's D_{(i)} = \left( \frac{1}{m} \right) \times \left( \frac{h_{ii}}{1-h_{ii}} \right) \times \left( \frac{e_i^2}{S^2(1-h_{ii})} \right)$$

em que:

$h_{ii}$  = i-ésima da diagonal da matriz de H no espaço preditor;  
 $m$  = número de parâmetros;  
 $e_i$  = i-ésimo resíduo studentizado; e,  
 $S^2(1-h_{ii})$  = a variância do resíduo da i-ésima observação.

A estatística *Cook's D* mede alterações em todos os parâmetros da regressão, decorrentes da exclusão da i-ésima observação. Nesta análise são considerados pontos influentes os valores maiores que  $(2 \times h_{ii(\text{médio})})$ .

Para o ajuste dos modelos lineares avaliados, somente foi considerado ponto influente quando a observação era significativa nos três critérios de identificação de atipicidade.

#### 4.8 Seleção da equação de regressão

Na análise de regressão é importante que o  $R^2$  não seja a única estatística de análise, pois outras estatísticas devem ser consideradas tais como: gráficos de resíduos, análise de variância, erro padrão da estimativa, critério  $Press_p$  (para modelos lineares), entre outras.

A avaliação da análise da variância (soma de quadrados dos resíduos – (SQR), quadrado médio dos resíduos (QMR) e teste F para o modelo completo) consiste no primeiro passo no processo de seleção, juntamente com a observação do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{Ajustado}$ ), em que:

$$R^2 = \left[ 1 - \left( \frac{SQ_{Resíduo}}{SQ_{Total}} \right) \right]$$

em que:

$R^2$  = coeficiente de determinação;

$SQ_{Resíduo}$  = soma de quadrados de resíduos; e,

$SQ_{Total}$  = soma de quadrados total.

O  $R^2_{Ajustado}$  é preferível como estatística de análise, visto que o  $R^2$  cresce com o simples incremento de variáveis no modelo, mesmo que o benefício provocado pelas variáveis seja pequeno. Isto será mais facilmente observado nas regressões múltiplas, sendo:

$$R^2_{Ajustado} = \left[ 1 - \left( \frac{(1 - R^2) \times (n - 1)}{n - m - 1} \right) \right]$$

em que:

$R^2_{Ajustado}$  = coeficiente de determinação ajustado;

$R^2$  = coeficiente de determinação;

n = número de dados utilizados no ajuste; e,

m = número de parâmetros, com exceção do intercepto.

O erro padrão da estimativa ou erro padrão residual ( $S_{y,x}$ ) mede a dispersão média entre os valores observados e estimados ao longo da linha da regressão. Menores valores no valor desta estatística indicam melhores ajustes. No caso de modelos com a variável dependente transformada, os valores do erro padrão residual foram corrigidos para a mesma unidade dos dados observados. O erro padrão pode ser obtido por:

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{SQ_{Res}}{(n - (m) - 1)}}$$

em que:

$S_{yx}$  = erro padrão residual;

$SQ_{Res}$  = soma de quadrados de resíduos;

n = número de dados utilizados no ajuste; e,

m = número de parâmetros, com exceção do intercepto.

O critério *PRESSp* (soma de quadrados de predição) é uma medida que avalia a qualidade dos valores ajustados por meio do modelo em questão, ou seja, avalia se a equação ajustada pode predizer os valores observados  $Y_i$ . É uma importante ferramenta para a seleção de modelos lineares. O critério *PRESSp* adota o seguinte procedimento: cada valor ajustado  $\hat{Y}$  para o critério *PRESS* é

obtido eliminando-se o  $i$ -ésimo caso do conjunto de dados, estimando a função de regressão para o modelo em questão com as  $(n-1)$  observações restantes e, então, usando a equação de regressão ajustada, para obter o valor predito ( $\hat{Y}_{i(i)}$ ) para a  $i$ -ésima observação. O erro de predição *PRESS* para o  $i$ -ésimo caso é dado por  $Y_i - \hat{Y}_{i(i)}$ . O critério *PRESS* ( $Y_i - \hat{Y}_{i(i)}$ ) é a soma de todos esses erros de predição quadráticos, sendo:

$$PRESS_p = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_{i(i)})^2$$

em que:

$PRESS_p$  = critério *PRESS* (soma de quadrados da predição);

$Y_i$  = valor da primeira estimativa; e,

$\hat{Y}_{i(i)}$  = valor predito para a  $i$ -ésima observação.

Essa estatística é analisada da seguinte forma: equações ajustadas que apresentam valores pequenos de  $PRESS_p$  são as melhores equações ajustadas (tem menor erro de predição).

A análise da distribuição gráfica dos valores residuais é um critério importante. Esta análise é decisiva na avaliação da qualidade das estimativas, pois permite detectar se há ou não tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo de toda a linha de regressão.

#### 4.9 Diagnóstico de normalidade

Uma das etapas finais do processo de diagnóstico em regressão envolve a avaliação da distribuição residual quanto a hipótese de normalidade. Pequenos desvios desta condição não são preocupantes, as situações de interesse são aquelas definidas por acentuada assimetria e de cauda pesada (Souza, 1998).

O principal elemento para a avaliação da distribuição residual é o resíduo padronizado. A padronização do resíduo é obtida por:



$$e_{\text{padronizado}} = \frac{Y_i - \hat{Y}}{\sqrt{\frac{SQ_{\text{res}}}{(n - (m) - 1)}}$$

em que:

$e_{\text{padronizado}}$  = erro padronizado;

$SQ_{\text{res}}$  = soma do quadrado do resíduo;

$Y_i$  = valor observado;

$\hat{Y}_i$  = valor estimado;

$n$  = número de dados utilizados no ajuste; e,

$m$  = número de parâmetros, com exceção do intercepto.

A normalidade da distribuição residual caracteriza-se por 68% dos valores do erro padronizado encontrarem-se entre -1 e +1 e 95% entre os valores de -1,98 e +1,98. Pequenos desvios nesses percentuais não são considerados problemáticos para o diagnóstico, portanto, para avaliar a significância destes desvios, os valores residuais devem ser submetidos a um procedimento formal de diagnóstico.

A técnica formal mais adequada para base de dados com  $n > 50$  é o teste de Kolmogorov-Smirnov. Este teste de aderência avalia a concordância entre a distribuição observada dos resíduos e uma determinada distribuição teórica. Avalia-se se os dados residuais se aproximam razoavelmente de uma determinada distribuição, no caso normal. Para isso, utiliza-se a função distribuição acumulada observada e compara-se com a teórica, determina-se o ponto em que estas distribuições mais divergem e avalia-se a sua significância (Ayres, 2000).

Seja  $F_0(X)$  uma distribuição teórica acumulada e  $S_n(X)$  uma distribuição observada em uma amostra de “n” observações. Encontra-se a seguir o maior valor das diferenças ( $D$ ) entre  $F_0(X)$  e  $S_n(X)$ , ou seja:

$$D = \max |F_0(X) - S_n(X)|$$

Compara-se o valor observado com o valor crítico tabelar bilateral.

#### 4.10 Teste de identidade de modelo

Após a seleção da melhor equação de regressão de simples e dupla entrada, foi empregado o teste de identidade de modelos.

No caso de modelos lineares foi empregado o procedimento descrito por Graybill (1976), com a finalidade de avaliar a necessidade de ajustes por grupos ou individuais, considerando-se as diferentes áreas estudadas.

O procedimento consiste na redução das soma dos quadrados. Para modelos lineares, o teste de identidade permite observar estatisticamente, por meio do teste F, a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões ajustadas para cada área de estudo isoladamente (modelo completo -  $\Omega$ ) e a soma do quadrado da regressão ajustada para conjunto das quatro áreas estudadas (modelo reduzido -  $w$ ).

Na Tabela 2.6 está demonstrado a arranjo para proceder ao cálculo das estatísticas da identidade de modelos para regressão linear.

**TABELA 2.6** Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Modelo completo	$(A \times p)$	S.Q.Reg.( $\Omega$ )		
Modelo reduzido	$p$	S.Q.Reg.( $w$ )		
Diferença para testar hipótese	$(A - 1)p$	S.Q.Reg.( $\Omega$ )- S.Q.Reg.( $w$ )	S.Q.(diferença)/ $(A - 1)p$	Q.M.(diferença)/ Q.M.(resíduo)
Resíduo	$N-(A \times p)$	S.Q.Total( $\Omega$ )-S.Q.Reg.( $\Omega$ )	S.Q.(resíduo)/ $N-(A \times p)$	
Total	$N$	S.Q.Total ( $\Omega$ )		

Em que: G.L. = grau de liberdade; S.Q. = soma dos quadrados; Q.M. = quadrado médio; F = teste F; A = número de áreas estudadas; p = número de parâmetros do modelo reduzido ( $w$ ); e, N = número de observações do modelo completo ( $\Omega$ ).

No caso de regressões não lineares, o procedimento foi proposto por Regazzi (2003), com a adoção do teste de razão de verossimilhança. Para uma das hipóteses de igualdade de modelos a serem testados contra as suas hipóteses alternativas, as estatísticas do teste da razão de máxima verossimilhança serão dadas por:

$$L = -n \cdot \ln \left( \frac{SQR_w}{SQR_\Omega} \right)$$

em que:

L = valor da razão de máxima verossimilhança.

S.Q.R.<sub>w</sub> = soma de quadrados dos resíduos do modelo ajustado para o conjunto de dados das quatro áreas estudadas (modelo reduzido – w);

S.Q.R.<sub>Ω</sub> = somatório das somas de quadrados dos resíduos de cada modelo ajustado para o subconjunto de cada área de estudo (modelo completo – Ω);

n = número de observações; e,

ln = logaritmo neperiano.

Os valores da razão de máxima verossimilhança foram comparados com o valores tabelados de  $\chi^2$ . Dessa maneira, sempre que “L” for maior que o valor de  $\chi^2$  tabelado, a 5% de significância, rejeita-se a hipótese de nulidade.

As hipóteses foram definidas da seguinte forma:

- $H_0$  = o modelo reduzido (w) ajustado para o conjunto {z} de dados das áreas estudadas é idêntico aos modelos completos ajustados para cada uma áreas pertencentes a {z}; e,
- $H_1$  = contrária a  $H_0$ .

A combinação dos quatro povoamentos estudados possibilitou a construção de onze hipóteses para avaliação do melhor modelo de regressão de simples e dupla entrada, conforme demonstrado na Tabela 2.7.

**TABELA 2.7** Hipóteses de identidade de modelos testadas para as equações selecionadas de simples e dupla entrada, considerando todas as combinações entre as áreas de estudo

Hipóteses	Áreas de estudos envolvidas
1	1, 2, 3 e 4
2	1, 2 e 3
3	1, 2 e 4
4	1, 3 e 4
5	2, 3 e 4
6	1 e 2
7	1 e 3
8	1 e 4
9	2 e 3
10	2 e 4
11	3 e 4

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Estimativas de casca dos povoamentos de teca

#### a) Modelo para estimativa do diâmetro com casca

Para os dados de cubagem advindos da ANATRO, o modelo selecionado para a obtenção do diâmetro com casca a partir do diâmetro sem casca foi o modelo linear definido pela equação  $D_{i(c/c)} = 0,16887 + (1,09865 \cdot D_{i(s/c)})$ . As estatísticas de precisão do modelo foram satisfatórias com  $R^2_{ajustado}$  de 98,87% e erro padrão residual de  $\pm 0,45$  cm para o diâmetro com casca estimado.

#### b) Efeito da idade no percentual de casca

As estimativas do percentual de casca, para os intervalos de idade de 2 a 4 anos, 5 a 7 anos, e de 8 a 9,52 anos, encontram-se na Tabela 2.8.

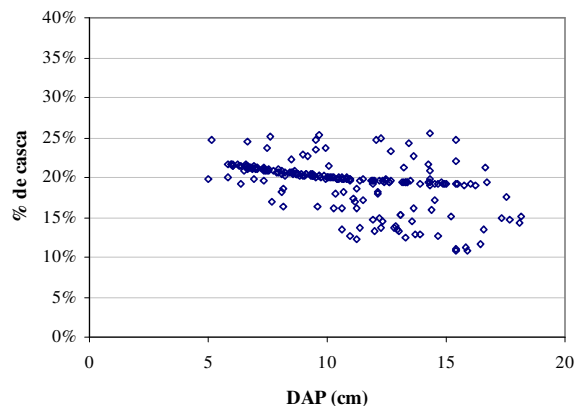
**TABELA 2.8** Estatísticas do percentual de casca para as árvores de *Tectona grandis* L.f. para as idades de 2 a 4 anos, de 5 a 7 anos, e de 8 a 9,52 anos

<b>Estatísticas</b>	<b>Idade de 1 a 4 anos</b>	<b>Idade de 5 a 7 anos</b>	<b>Idade de 8 a 9,52 anos</b>
N	54	102	85
Média	20,90%	19,08%	18,05%
Variância	0,0000231	0,0007070	0,0015317
Desvio padrão	0,00480585	0,026588692	0,039137
Variância da média	0,00000043	0,00000693	0,00001802
Erro padrão da média	0,000654	0,002633	0,004245
Coefficiente de variação	2,30%	13,94%	21,69%
<b>Intervalo de confiança</b>			
Inferior	20,77%	18,56%	17,20%
Superior	21,03%	19,59%	18,90%

Os resultados apontam um decréscimo da média do percentual de casca com o incremento da idade. Esta situação é esperada, visto que à medida que ocorre o incremento volumétrico, ocorre também uma redução da média do percentual de casca, estabelecendo assim uma menor proporção de casca nos maiores indivíduos. Esta redução não é mais acentuada, em decorrência da existência de árvores suprimidas (com menor diâmetro) nas idades mais avançadas, o que acarreta uma menor redução da média percentual de casca. Isso também reflete no valor do coeficiente de variação, pois o mesmo é acrescido na medida que ocorre o avanço da idade do povoamento, ou seja, em povoamentos não desbastados existe uma maior amplitude diamétrica com o incremento da idade.

### **c) Efeito do diâmetro e da posição sociológica no percentual de casca**

A relação da redução do percentual de casca com o diâmetro pode ser melhor observado na Figura 2.6.



**FIGURA 2.6** Distribuição do percentual de casca em relação ao DAP, para os quatro povoamentos de teca

A distribuição do percentual de casca aponta que as árvores suprimidas apresentam um percentual de casca médio de 23%, enquanto as árvores de maior diâmetro apresentam 15% de casca em média.

## 5.2 Fator de forma dos povoamentos de teca

### a) Efeito da idade no fator de forma

Com já esperado as estimativas do fator de forma apontam indivíduos mais cônicos com os povoamentos de maior idade. As estatísticas para o fator de forma para os intervalos de idades de 2 a 4 anos, de 5 a 7 anos, e de 7 a 9,52 anos encontram-se na Tabela 2.9.

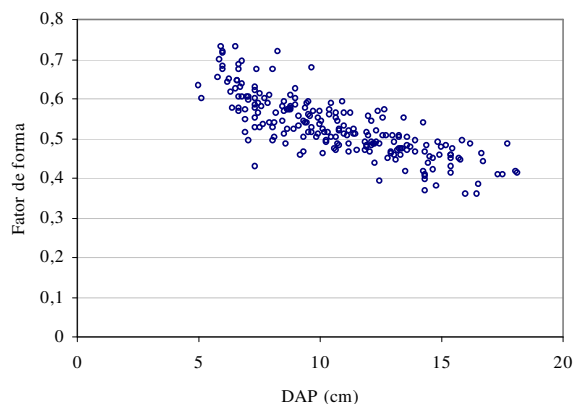
Por se tratar de valores médios do fator de forma registrado em quatro povoamentos de teca, com idades distintas, não representam possíveis oscilações dos valores quanto ao sítio florestal, tratamentos silviculturais e densidade.

**TABELA 2.9** Estatísticas da estimativa dos valores do fator de forma para as árvores de *Tectona grandis* L.f. nas idades de 2 a 4 anos, de 5 a 7 anos, e de 8 a 9,52 anos

<b>Estatísticas</b>	<b>Idade de 1 a 4 anos</b>	<b>Idade de 5 a 7 anos</b>	<b>Idade de 8 a 9,52 anos</b>
N	54	102	85
Média	0,61	0,52	0,48
Variância	0,0037762	0,0027230	0,0036403
Desvio padrão	0,0614509	0,05218218	0,060335
Variância da média	0,000070	0,00002670	0,00004283
Erro padrão da média	0,008362	0,005167	0,006544
Coefficiente de variação	10,10%	10,10%	12,49%
<b>Intervalo de confiança</b>			
Inferior	0,59	0,51	0,47
Superior	0,63	0,53	0,50

**b) Efeito do diâmetro e da posição sociológica no percentual de casca**

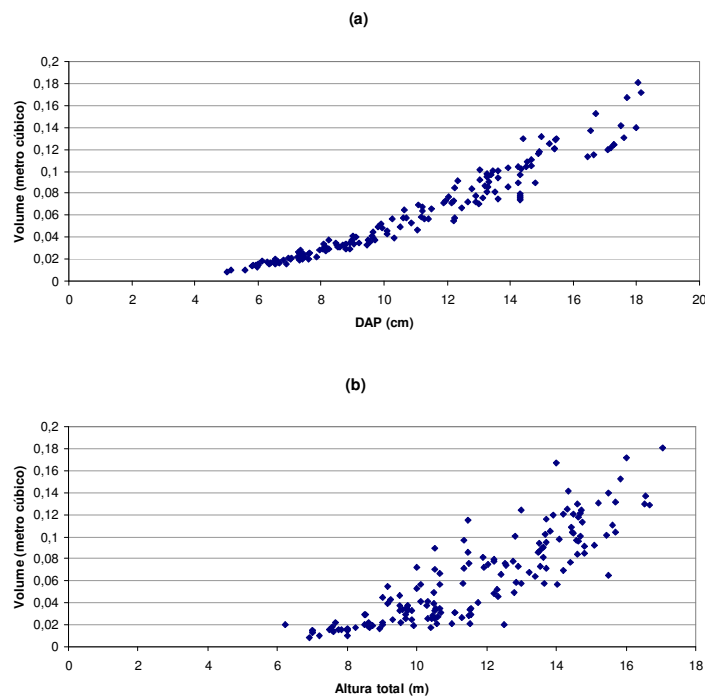
Os indivíduos de maior diâmetro estabelecem esta relação de maior conicidade, enquanto os indivíduos suprimidos (de menor diâmetro) constroem uma relação de maior proximidade com a forma cilíndrica. Isso pode ser verificado na Figura 2.7.



**FIGURA 2.7** Distribuição do fator de forma em relação ao DAP, para os quatro povoamentos de teca

### 5.3 Seleção das equações volumétricas com a variável Dummy

Um aspecto importante a ser considerado antes da seleção da melhor equação volumétrica é compreender a base dados a ser trabalhada. Um simples gráfico da distribuição dos volumes (calculados pelo fator de forma) em função do diâmetro à altura do peito (DAP) e/ou da altura total das árvores ( $H_t$ ), fornece um bom indicativo das dificuldades ou conveniências do emprego de um determinado modelo matemático. A Figura 2.8 demonstra o comportamento dos dados em função do DAP e da  $H_t$ , os quais apontam uma tendência linear da base de dados.



**FIGURA 2.8** Distribuição dos volumes (calculados pelo fator de forma) em função do DAP (a) e da altura total das árvores cubadas rigorosamente (b)



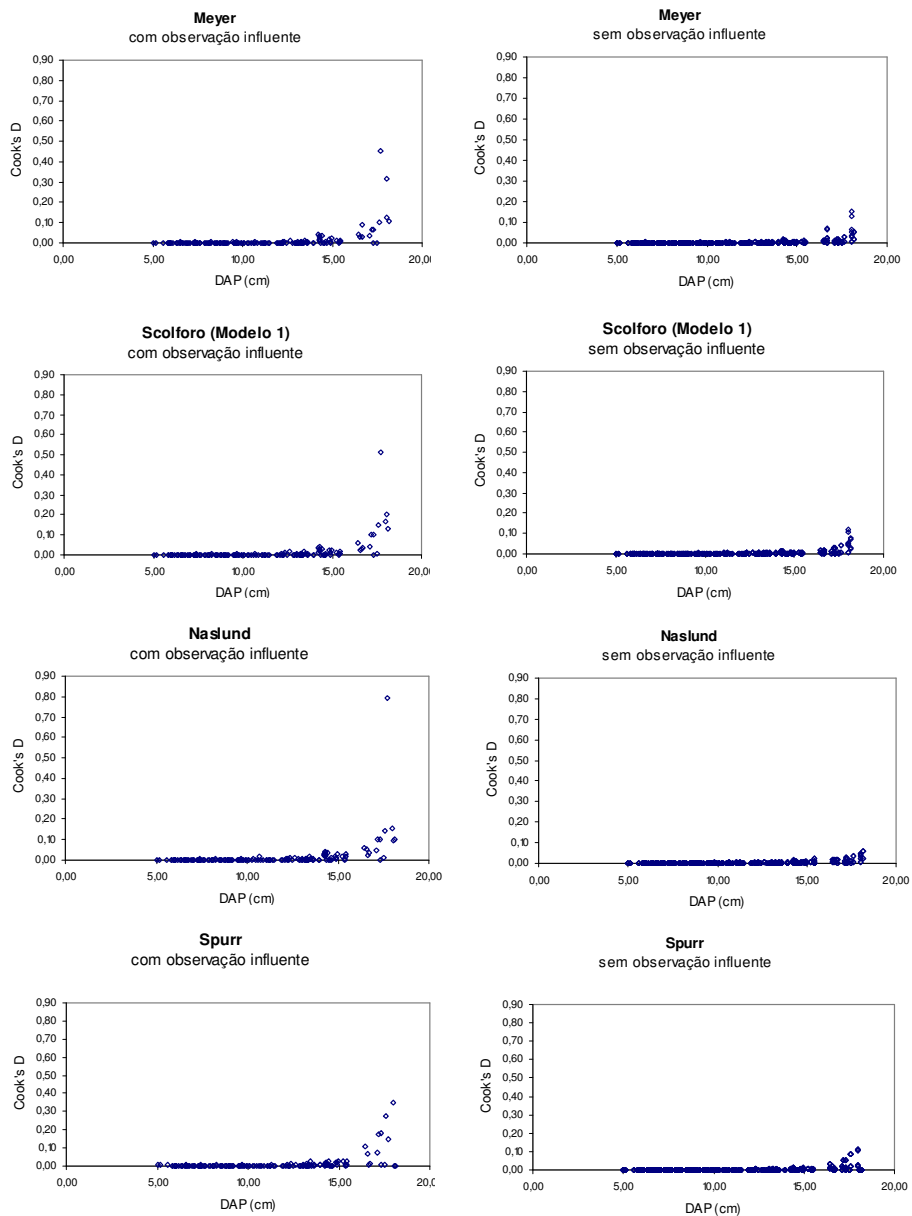
### 5.3.1 Análise residual para observações influentes

A análise residual para observações influentes apontou a existência de um *outlier* na última classe de diâmetro considerada no intervalo de maior ou igual a 17 cm e menor que 21 cm. Esse ponto influente foi significativo para as seguintes estatísticas: diagonal principal da matriz H, DFFITs e distância de *Cook*.

Em decorrência da forte influencia sobre a definição dos parâmetros e estatísticas dos modelos testados, optou-se pela retirada da observação. A permanência de apenas um ponto influente pode levar a superestimativas ou subestimativas, o que, na prática, significa que o ponto influente apresenta forte poder de alavancagem em relação à massa de dados.

Para Souza (1998), a questão crucial é o que fazer com as observações que são comprovadamente influentes; se essas observações resultam de forte discrepância da base de dados, é claro que devem ser omitidas.

Esta influência foi melhor evidenciada na diagnose feita pela estatística *Cook's D*. Em todos os modelos testados, a referida observação influente apresentou forte alavancagem dos resultados estimados, conforme exemplificado para equações de Meyer, Scolforo (modelo 1), Naslund e Spurr (1952) (modelo 1) (Figura 2.9), em que observam-se os resultados da estatística *Cook's D* antes e após a retirada da observação influente.



**FIGURA 2.9** Distribuição da estatística *Cook's D* em função do DAP, antes e após a retirada da observação influente para as equações ajustadas de Meyer, Scolforo (modelo 1), Naslund e Spurr

### 5.3.2 Equações volumétricas de simples entrada

Foram empregados seis modelos (simples entrada) para a obtenção dos volumes total e comercial, com e sem casca, adotando-se a metodologia da variável Dummy. As estimativas dos parâmetros e as principais estatísticas para esses modelos de volumes totais e comerciais, com e sem casca, são apresentadas nas Tabela 2.10.

Os seis modelos testados para ajustar equações de volume (total e comercial com e sem casca) com a adição da variável Dummy apresentaram valores de F altamente significativos ( $P < 0,01$ ), apontando que esses modelos podem explicar uma grande proporção da variabilidade observada dos volumes das árvores-amostra.

A equação linear de Husch obteve um alto valor para o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) sendo de 0,9981. Porém, a mesma apresentou os piores resultados para o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) com valor de  $\pm 0,00920 \text{ m}^3$  e de  $0,054689078 \text{ m}^3$  para o erro de predição ( $Press_p$ ), demonstrando assim ser a equação menos adequada. Resultado estatístico similar a Husch foi obtido pela equação de Berkhout não-linear, com erro padrão residual de  $\pm 0,00891 \text{ m}^3$ . O fraco desempenho do modelo não-linear de simples entrada provavelmente deve-se à natureza da distribuição dos dados dendrométricos das árvores de teca das quatro áreas estudadas.

Os melhores resultados podem ser verificados nos modelos lineares de Kopezky-Gehrhardt e de Hohenald-Krenm, com destaque para a primeira. O modelo Hohenald-Krenm apresenta o segundo menor valor de erro de predição ( $Press_p$ ) com  $0,050613 \text{ m}^3$  e o menor erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), com  $\pm 0,050613 \text{ m}^3$ .

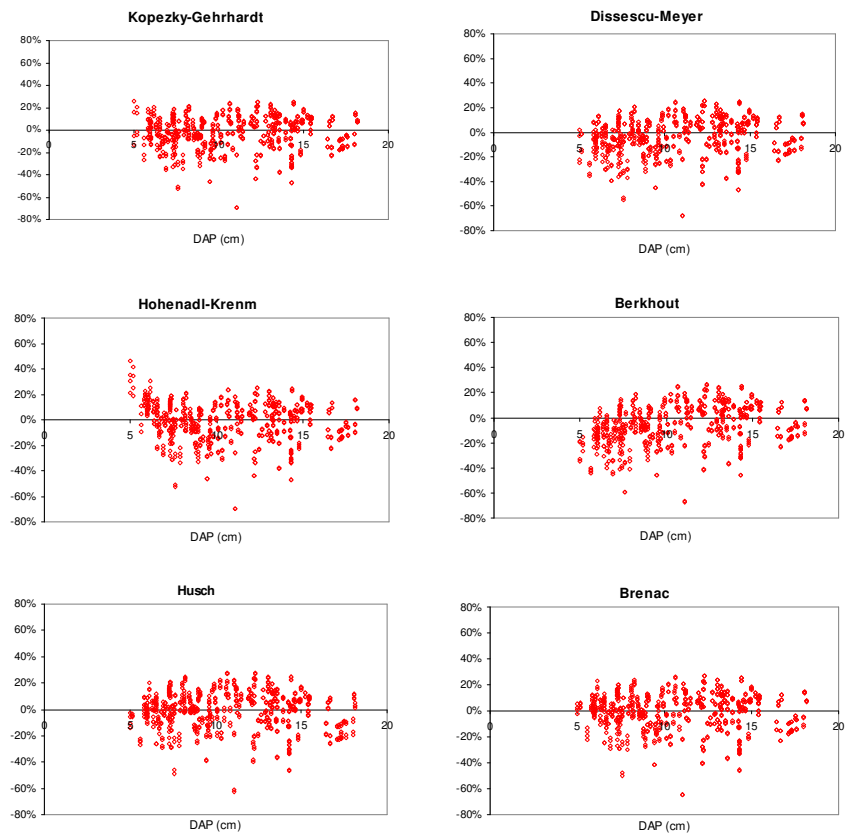
**TABELA 2.10** Coeficientes de determinação e as principais estatísticas das seis equações (simples entrada) de volume total e comercial com e sem casca, com as variáveis Dummy, ajustados para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados

Modelos	Equações ajustadas				
Kopezky-Gehrhardt	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00260011.D_1 - 0,00471255.D_2 - 0,00382298.D_3 - 0,00563735.D_4 + 0,000490956.(DAP^2).D_1 + 0,000417992.(DAP^2).D_2 + 0,000491848.(DAP^2).D_3 + 0,000418615.(DAP^2).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4439,03	0,9826	0,9824	0,050532 m <sup>3</sup>	±0,00882 m <sup>3</sup>
Dissescu-Meyer	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,000377691.DAP.D_1 - 0,000865117.DAP.D_2 - 0,000603866.DAP.D_3 - 0,00103572.DAP.D_4 + 0,000503817.(DAP^2).D_1 + 0,000454444.(DAP^2).D_2 + 0,000514291.(DAP^2).D_3 + 0,000462282.(DAP^2).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4400,81	0,9824	0,9822	0,05114 m <sup>3</sup>	±0,00885 m <sup>3</sup>
Hohenald-Krenm	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,0191949.D_1 - 0,00596987.D_2 - 0,0204753.D_3 - 0,00700841.D_4 + 0,00317815.(DAP).D_1 + 0,000240795.(DAP).D_2 + 0,00318916.(DAP).D_3 + 0,000262578.(DAP).D_4 + 0,000353006.(DAP^2).D_1 + 0,00040754.(DAP^2).D_2 + 0,00035342.(DAP^2).D_3 + 0,000407218.(DAP^2).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	2990,68	0,9829	0,9826	0,050613 m <sup>3</sup>	±0,00877 m <sup>3</sup>
Berkhout	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = (0,000426663.(DAP^{2,04162})).D_1 + (0,000245496.(DAP^{2,17617})).D_2 + (0,000381051.(DAP^{2,07954})).D_3 + (0,000219649.(DAP^{2,21366})).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4345,46	0,9441	0,9436		±0,00891 m <sup>3</sup>
Brenac	$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = 6,45395.D_1 - 7,63077.D_2 - 6,31914.D_3 - 7,49358.D_4 + 1,68379.(ln(DAP)).D_1 + 1,99376.(ln(DAP)).D_2 + 1,65496.(ln(DAP)).D_3 + 1,9644.(ln(DAP)).D_4 - 4,98495.(1/DAP).D_1 - 2,83597.(1/DAP).D_2 - 5,95708.(1/DAP).D_3 - 3,81136.(1/DAP).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	29996,29	0,9983	0,9982	0,054689 m <sup>3</sup>	±0,00883 m <sup>3</sup>
Husch	$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = 8,16904.D_1 - 8,60649.D_2 - 8,36869.D_3 - 8,80489.D_4 + 2,1999.(ln(DAP)).D_1 + 2,28738.(ln(DAP)).D_2 + 2,27172.(ln(DAP)).D_3 + 2,35901.(ln(DAP)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	43884,52	0,9982	0,9981	0,050668 m <sup>3</sup>	±0,00920 m <sup>3</sup>

Em que: F = teste F; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; R<sup>2</sup><sub>aj</sub> = coeficiente de determinação ajustado; Press<sub>p</sub> = estatística do erro de predição; S<sub>yx</sub> = erro padrão residual; V<sub>1</sub> = volume total com casca; V<sub>2</sub> = volume total sem casca; V<sub>3</sub> = volume comercial com casca; V<sub>4</sub> = volume comercial sem casca; D<sub>1</sub> = variável Dummy para V<sub>1</sub>; D<sub>2</sub> = variável Dummy para V<sub>2</sub>; D<sub>3</sub> = variável Dummy para V<sub>3</sub>; D<sub>4</sub> = variável Dummy para V<sub>4</sub>; DAP = diâmetro à altura do peito; e, ln = logaritmo neperiano.

Com desempenho semelhante à Hohenald-Krenm, o modelo Kopezky-Gehrhardt apresentou o melhor resultado para a estatística Press<sub>p</sub> com valor de 0,050532 m<sup>3</sup> e o segundo menor erro padrão residual. A definição da melhor

equação foi realizada com auxílio da distribuição gráfica dos resíduos percentuais, conforme Figura 2.10.



**FIGURA 2.10** Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm), para as seis equações volumétricas testadas, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

Para o modelo Hohenald-Krenm observa-se uma clara tendência de subestimativa para as árvores de menor diâmetro, enquanto o modelo não-linear de Berkhout demonstra forte superestimativa para os diâmetros entre 5 a 10 cm. Os modelos Dissescu-Meyer, Husch e Brenac apresentaram distribuição dos

resíduos mais equilibrados, porém, as estatísticas de precisão não foram as melhores. O modelo Kopezky-Gehrhardt apontou os melhores resultados gráficos e estatísticos, demonstrando ser a equação mais adequada, o que já foi confirmado pelo menor erro de predição, definido pela estatística  $Press_p$ .

### 5.3.3 Equações volumétricas de dupla entrada

Os modelos de dupla entrada geralmente conseguem melhores resultados estatísticos que os modelos de simples entrada, em decorrência de melhor representar as características da população amostrada. Esta tendência foi confirmada principalmente pelos resultados obtidos com os modelos lineares de dupla entrada.

Apesar do teste F mostrar-se altamente significativo em todas as equações ajustadas, ocorreram desempenhos bastante distintos entre as equações, no tocante às estatísticas de erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), distribuição gráfica dos resíduos percentuais e erro de predição ( $Press_p$ ) para os modelos lineares.

Os modelos Ogaya, Honner, Spurr (1952) (modelo 1), Scolforo et al. (modelo 3) e Schumacher apresentaram os maiores erros padrões residuais ( $S_{yx}$ ) e os piores erros de predição ( $Press_p$ ).

Os modelos Spurr logaritimizado, Scolforo et al. (modelo 2) e Stoate (1945) (australiana) mostraram precisão bastante aceitável para estimar os volumes totais e comerciais com e sem casca, sendo os seguintes em ordem decrescente de precisão: (a) o modelo geral Spurr logaritimizado com a variável Dummy, com erro padrão residual de  $\pm 0,005962 \text{ m}^3$  e erro de predição de  $0,022971 \text{ m}^3$ . Já no gráfico de distribuição dos resíduos percentuais o desempenho foi regular, com uma suave tendência de superestimativa para os indivíduos de menor diâmetro; (b) para o modelo Scolforo et al. (modelo 2), os

resultados estatísticos foram próximos aos alcançados por Spurr logaritimizado, porém, a análise gráfica dos resíduos percentuais aponta para uma nítida tendência de subestimativas dos menores diâmetros entre 5 e 6 cm e uma superestimativa para os diâmetros entre 6 e 10 cm, acarretando assim em piores resultados da estatística  $Press_p$ ; e, (c) o modelo Stoate (1945) (australiana) foi o que teve pior desempenho estatístico entre as três equações consideradas como de precisão intermediária.

Os modelos de melhor ajuste foram: Naslund, Scolforo et al. (modelo 1), Meyer e Takata. Excelentes resultados estatísticos para os valores de erro padrão residual foram obtidos por Naslund e Takata, porém, a análise gráfica aponta para uma maior dispersão dos resíduos, em que as oscilações percentuais do resíduo encontram-se entre 29,27% e -39,16%, para a equação ajustada de Naslund e entre 23,26% e -46,58% para Takata. Com pequena oscilação percentual dos resíduos (entre 26,68% e -38,80%) e com excelentes resultados para o erro padrão residual ( $\pm 0,00549 \text{ m}^3$ ) e erro predição de  $Press_p$ , o modelo Scolforo et al. (modelo 1) apresentou uma combinação desejável de excelentes estatísticas e boa distribuição dos resíduos. Esta combinação de resultados somente foi alcançada pelo modelo Meyer, porém, com desempenho inferior a Scolforo et al. (modelo 1). Os principais resultados estatísticos encontram-se na Tabela 2.11 e a distribuição dos resíduos percentuais nas Figuras 2.11 e 2.12.

Os modelos Scolforo et al. (modelo 3), Spurr (1952) (modelo 1) e Schumacher não-linear apresentam uma clara tendência de superestimativa dos volumes para as árvores de menores diâmetros (entre 5 a 10 cm). Ao confrontar os resultados do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das respectivas equações com a análise gráfica dos resíduos em percentagem, fica evidente que nem sempre o bom desempenho do  $R^2$  se repete na distribuição gráfica dos resíduos, portanto, a análise gráfica passa a ser primordial no processo de seleção.

**TABELA 2.11** Coeficientes de determinação e as principais estatísticas das treze equações (dupla entrada) de volume total e comercial com e sem casca, com as variáveis Dummy, ajustados para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados (...continua...)

Modelos	Equações ajustadas				
Honner	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = ((DAP^2) / (1130,34 + (13037,0/(1/H_1))))D_1 + ((DAP^2) / (793,268 + (23832,9/(1/H_1))))D_2 + ((DAP^2) / (1063,11 + (14314,6/(1/H_1))))D_3 + ((DAP^2) / (705,303 + (25454,0/(1/H_1))))D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	7318,44	0,9666	0,9662		±0,00685
Meyer	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,0343581.D_1 + 0,0224084.D_2 + 0,0352125.D_3 + 0,0230466.D_4 - 0,00313898.(DAP).D_1 - 0,00188088.(DAP).D_2 - 0,00360668.(DAP).D_3 - 0,00223171.(DAP).D_4 + 0,0000902912.(DAP^2).D_1 - 0,00000415264.(DAP^2).D_2 + 0,000121325.(DAP^2).D_3 + 0,0000191942.(DAP^2).D_4 + 0,00114818.(DAP.H_1).D_1 + 0,000710388.(DAP.H_1).D_2 + 0,00118019.(DAP.H_1).D_3 + 0,000735604.(DAP.H_1).D_4 - 0,0000132582.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,00000271493.((DAP^2).H_1).D_2 - 0,0000152584.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,00000115756.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,00703846.(H_1).D_1 - 0,00439492.(H_1).D_2 - 0,00719734.(H_1).D_3 - 0,00452149.(H_1).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	3853,03	0,9934	0,9932	0,0207 m <sup>3</sup>	±0,005494
Naslund	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,000520875.(DAP^2).D_1 + 0,000269155.(DAP^2).D_2 + 0,000526864.(DAP^2).D_3 + 0,000274547.(DAP^2).D_4 - 0,0000397081.((DAP^2).H_1).D_1 - 0,0000130422.((DAP^2).H_1).D_2 - 0,0000412381.((DAP^2).H_1).D_3 - 0,0000143344.((DAP^2).H_1).D_4 + 0,0000557028.(DAP.(H_1^2)).D_1 + 0,0000325218.(DAP.(H_1^2)).D_2 + 0,0000582336.(DAP.(H_1^2)).D_3 + 0,000034559.(DAP.(H_1^2)).D_4 - 0,00024856.(H_1^2).D_1 - 0,000134492.(H_1^2).D_2 - 0,000274174.(H_1^2).D_3 - 0,000154592.(H_1^2).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	6119,68	0,9937	0,9935	0,0191 m <sup>3</sup>	±0,00534
Ogaya	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4)=((DAP^2).(0,000240083+0,0000173388.H_1)).D_1+((DAP^2).(0,000115265+0,0000202725.H_1)).D_2+((DAP^2).(0,000219775+0,0000183899.H_1)).D_3+((DAP^2).(0,000099978+0,0000210583.H_1)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	7451,88	0,9672	0,9668		±0,00683
Schumacher e Hall NL	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4)=((0,000146.(DAP^{1,3737}).(H_1^{0,8839})).D_1+((0,000069.(DAP^{1,6281}).(H_1^{1,0416})).D_2)+((0,00013.(DAP^{1,6105}).(H_1^{0,8884})).D_3+((0,000062.(DAP^{1,6633}).(H_1^{1,046})).D_4)$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	7006,33	0,9768	0,9764		±0,005764
Schumacher e Hall (1933)	$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = 8,87276.D_1 - 9,45063.D_2 - 9,07965.D_3 - 9,65695.D_4 + 1,80842.(ln(DAP)).D_1 + 1,81779.(ln(DAP)).D_2 + 1,87621.(ln(DAP)).D_3 + 1,88501.(ln(DAP)).D_4 + 0,667632.(ln(H_1)).D_1 + 0,800847.(ln(H_1)).D_2 + 0,674498.(ln(H_1)).D_3 + 0,808362.(ln(H_1)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	54676,4	0,9990	0,9990	0,02517 m <sup>3</sup>	±0,00623
Scolforo et al. (Modelo 1)	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00790727.D_1 - 0,000837212.D_2 - 0,00975421.D_3 - 0,00226719.D_4 + 0,0104486.(DAP/H_1).D_1 + 0,00132776.(DAP/H_1).D_2 + 0,011314.(DAP/H_1).D_3 + 0,00200512.(DAP/H_1).D_4 + 0,0000542448.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000401267.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000541851.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000401134.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,00000138794.((DAP^3).H_1).D_1 - 0,000000790252.((DAP^3).H_1).D_2 - 0,00000138641.((DAP^3).H_1).D_3 - 0,000000791232.((DAP^3).H_1).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	5787,45	0,9933	0,9931	0,02024 m <sup>3</sup>	±0,00549

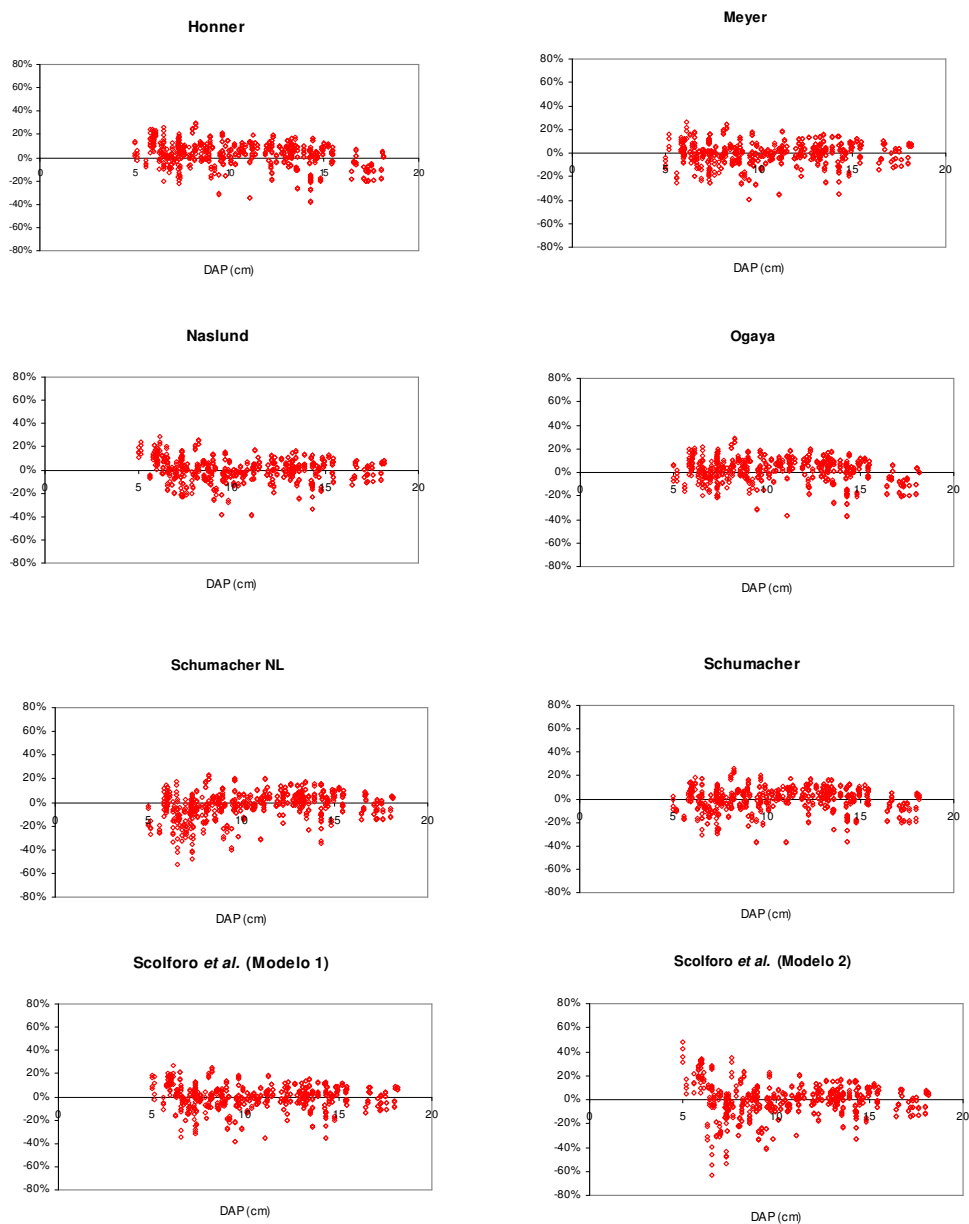
Em que: H<sub>1</sub> = altura total; e, F; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; Press<sub>p</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; DAP; e, ln foram definidos anteriormente.



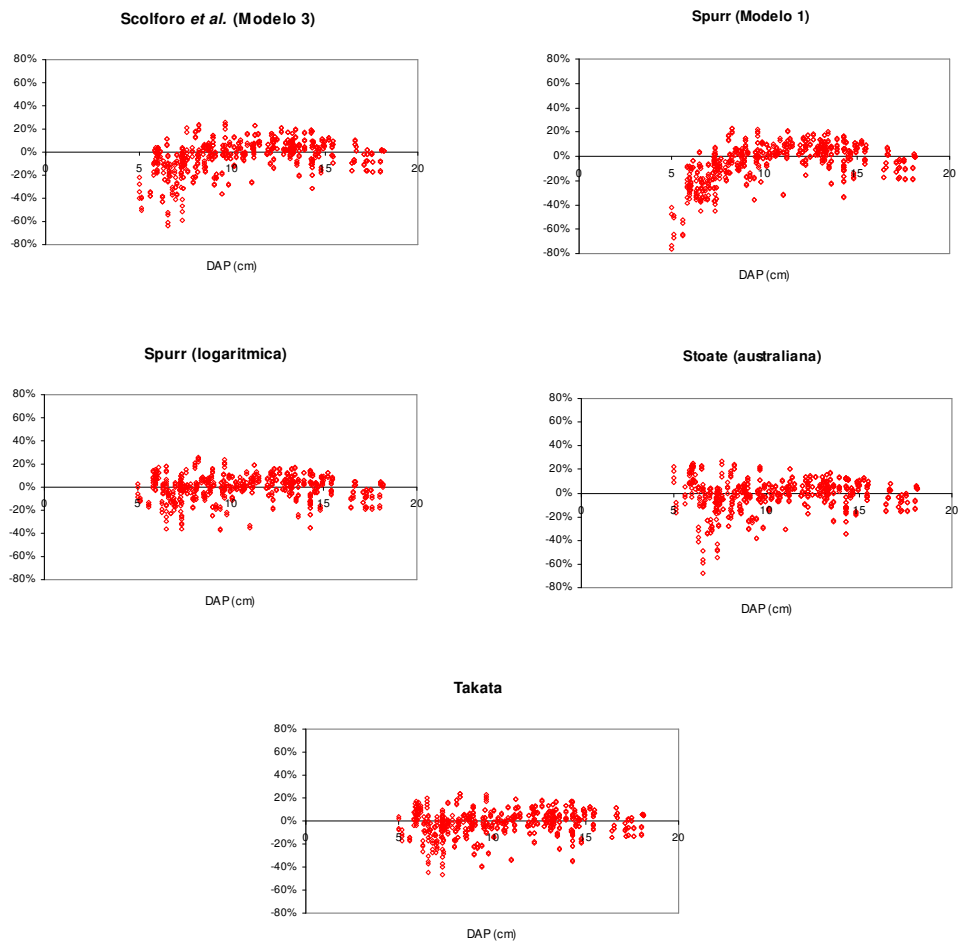
TABELA 2.11 Cont.

Modelos	Equações ajustadas				
Scolforo et al. (Modelo 2)	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4)=0,0137272.D_1 - 0,00819211.D_2 - 0,015153.D_3 - 0,00929495.D_4 + 0,000612366.(DAP.H_1).D_1 + 0,000375884.(DAP.H_1).D_2 + 0,000622013.(DAP.H_1).D_3 + 0,000383612.(DAP.H_1).D_4 + 0,000000449313.((DAP^3).H_1).D_1 + 0,000000506414.((DAP^3).H_1).D_2 + 0,000000456466.((DAP^3).H_1).D_3 + 0,000000510899.((DAP^3).H_1).D_4 - 0,00000974521.(DAP.(H_1^2)).D_1 - 0,00000205672.(DAP.(H_1^2)).D_2 - 0,0000104077.(DAP.(H_1^2)).D_3 - 0,00000256887.(DAP.(H_1^2)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4930,20	0,9922	0,9920	0,02367 m <sup>3</sup>	±0,005945
Scolforo et al. (Modelo 3)	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,0035587.D_1 + 0,00155873.D_2 - 0,00491863.D_3 + 0,000509331.D_4 + 0,00156414.H_1.D_1 + 0,000341605.H_1.D_2 + 0,00160098.H_1.D_3 + 0,000371883.H_1.D_4 + 0,0000286983.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000216472.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000291731.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000220005.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,000000670268.(DAP.(H_1^2)).D_1 + 0,00000473655.(DAP.(H_1^2)).D_2 - 0,00000123864.(DAP.(H_1^2)).D_3 + 0,00000430431.(DAP.(H_1^2)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4373,14	0,9912	0,9910	0,02638 m <sup>3</sup>	±0,006309
Spurr (1952) (Modelo 1)	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00980977.D_1 + 0,00557728.D_2 + 0,00864031.D_3 + 0,00469231.D_4 + 0,0000308468.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000264281.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000308843.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000264527.((DAP^2).H_1).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	8217,74	0,9905	0,9904	0,02762 m <sup>3</sup>	±0,006507
Spurr (logarítmica)	$[\ln(V_1)]D_1 + [\ln(V_2)]D_2 + [\ln(V_3)]D_3 + [\ln(V_4)]D_4 = 9,03746.D_1 - 9,52585.D_2 - 9,26317.D_3 - 9,75034.D_4 + 0,846604.(ln((DAP^2).H_1)).D_1 + 0,882585.(ln((DAP^2).H_1)).D_2 + 0,873918.(ln((DAP^2).H_1)).D_3 + 0,90984.(ln((DAP^2).H_1)).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	79643	0,9990	0,9990	0,02297 m <sup>3</sup>	±0,005962
Stoate (1945) (australiana)	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4)=0,0166666.D_1 - 0,00905838.D_2 - 0,0178712.D_3 - 0,0100128.D_4 + 0,000192926.(DAP^2).D_1 + 0,0000635447.(DAP^2).D_2 + 0,000200761.(DAP^2).D_3 + 0,000069824.(DAP^2).D_4 + 0,0000148007.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000199439.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000143974.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000196069.((DAP^2).H_1).D_4 + 0,00243366.(H_1).D_1 + 0,00148594.(H_1).D_2 + 0,00241216.(H_1).D_3 + 0,00147349.(H_1).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	4807,78	0,9920	0,9918	0,02409 m <sup>3</sup>	±0,00602
Takata	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = ((DAP^2).H_1)/(13687,4+1038,53.(DAP)).D_1 + (((DAP^2).H_1)/(21393,8+925,717.(DAP))).D_2 + (((DAP^2).H_1)/(14950,1+974,691.(DAP))).D_3 + (((DAP^2).H_1)/(22978,2+843,372.(DAP))).D_4$				
	F	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	Press <sub>p</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
	10875	0,9774	0,9772		±0,005663

Em que: H<sub>i</sub>; F; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; Press<sub>p</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; DAP; e, ln foram definidos anteriormente.



**FIGURA 2.11** Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm) para as equações volumétricas de Honner, Meyer, Naslund, Ogaya, Schumacher não-linear, Schumacher linearizada e Scolforo et al. (Mod. 1 e 2), considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.



**FIGURA 2.12** Distribuição dos resíduos percentuais em função do DAP (cm) para as equações volumétricas de Scolforo et al. (Mod. 3), Spurr (1952) (Mod. 1), Spurr (logaritmica), Stoate (1945) (australiana) e Takata, considerando o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

Os modelos Scolforo et al. (modelo 2) e Stoate (1945) (australiana) demonstram uma séria dificuldade de estimar o volume para os indivíduos entre 5 e 10 cm de DAP.

Os demais modelos apresentam uma similaridade na distribuição gráfica dos resíduos, no entanto, conforme mencionado anteriormente o modelo

Scolforo et al. (modelo 1) apresentou menor amplitude de distribuição dos resíduos, tendo apenas nove observações apresentando resíduos percentuais superiores a 30%, ressaltando que nenhuma dessas observações foi considerada como observação influente na análise residual. Para os modelos não lineares, os resultados estatísticos de precisão foram inferiores aos modelos lineares, exceto para o modelo não linear Takata, cujas estatísticas foram similares às dos melhores modelos lineares.

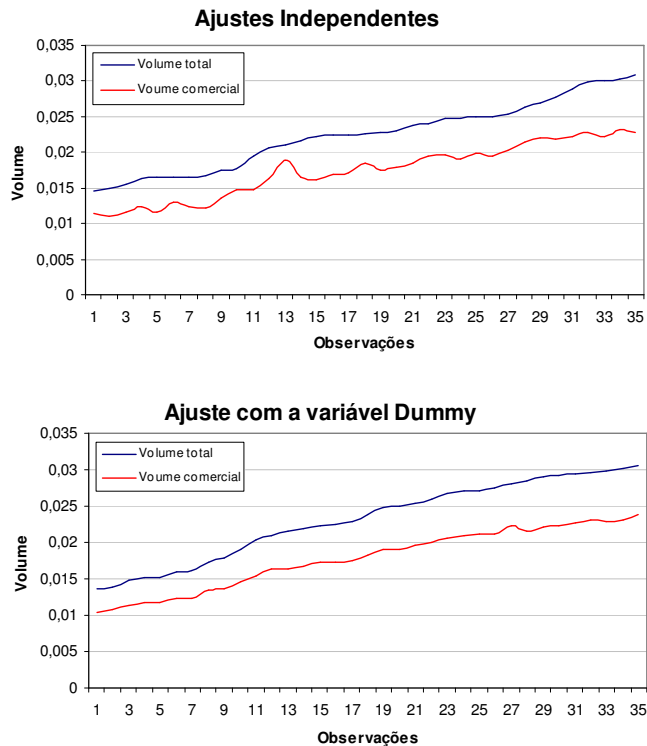
#### **5.3.4 Efeito da aplicação das variáveis Dummy**

A princípio, os modelos gerais com as variáveis Dummy, os quais possibilitam a obtenção de estimativas compatíveis de volumes, geram um certo grau de atenção na sua aplicação, devido ao maior número de variáveis. No entanto, após o ajustamento e seleção das melhores equações gerais, estas podem ser fragmentadas de acordo com a variável dependente de interesse (volume total com casca -  $V_1$ , volume total sem casca -  $V_2$ , volume comercial com casca -  $V_3$  e volume comercial sem casca -  $V_4$ ), sem que ocorram prejuízos na compatibilidade dos modelos. Todas as equações volumétricas (simples e dupla entrada) encontram-se na forma fragmentada, nas Tabelas 1.A, 2.A, 3.A, 4.A, 5.A e 6.A (nos anexos deste capítulo).

A maior importância de se empregar a metodologia com a variável Dummy para a obtenção de volumes diversos é a compatibilidade entre os resultados consolidados nas variáveis dependentes.

Esta compatibilidade se traduz em não haver riscos de superposição de resultados, tais como volume total ser igual ou menor que o volume comercial, isto para qualquer situação dentro da amplitude dos valores observados. Contrapondo a esta situação desejável, pode ocorrer superposição de resultados ou uma exagerada aproximação em determinados grupos de observações,

quando se ajusta a equação de forma independente. Esta possibilidade ocorreu com algumas equações ajustadas independentemente para volume total e comercial, exemplificadas graficamente com resultados preditos pelo modelo Scolforo et al. (modelo 1) ajustado independentemente e com o emprego da variável Dummy (Figura 2.13). Com a finalidade de facilitar a visualização, os gráficos da Figura 2.13 apenas apresentam uma proporção da base de dados geral.

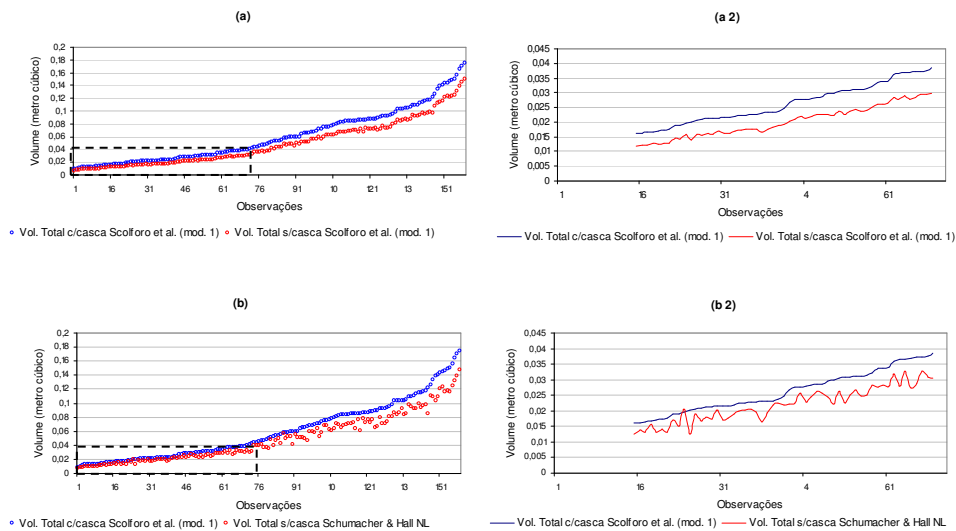


**FIGURA 2.13** Predição dos volumes totais e comerciais para o modelo Scolforo et al. (modelo 1), por meio de ajustes independentes e com o emprego da variável Dummy, considerando o conjunto de dados dos quatro povoados de *Tectona grandis* L.f.

Nos gráficos pode-se observar uma grande instabilidade dos valores

preditos para os modelos ajustados independentemente para volume total e comercial, chegando em determinados pontos a fortes oscilações, o que pode comprometer as estimativas para determinadas classes de diâmetro. Situação inversa é demonstrada pelo mesmo modelo ajustado com a variável Dummy, em que manteve-se a estabilidade do ajuste e sem a ocorrência de fortes oscilações, revelando assim a importância de modelos compatíveis e estáveis.

Uma situação extrema de incompatibilidade ocorre, por exemplo, quando se seleciona um modelo para a obtenção do volume total com casca e outro modelo para o volume total sem casca. O resultado deste procedimento equivocado pode-se observar no gráfico da Figura 2.14.



**FIGURA 2.14** Predição dos volumes totais e comerciais: (a) resultados de predição do modelo Scolforo et al. (modelo 1), ajustado pela variável Dummy; (b) resultados de predição do modelo Scolforo et al. (modelo 1) para volume com casca e Schumacher e Hall não linear para volume sem casca, ajustados de forma independente, considerando o conjunto de dados dos quatro povoados de *Tectona grandis* L.f.; e, (a1) e (b1) ampliação da parte destacada dos gráficos (a) e (b)

No gráfico (a) observa-se o comportamento dos valores estimados para volume total com casca e volume total sem casca, no qual foi utilizada a metodologia de ajuste com a variável Dummy para o modelo Scolforo et al. (modelo 1). Neste gráfico pode-se verificar que existe uma excelente combinação entre os valores de volumes, pois na medida que o volume total com casca cresce, o volume sem casca acompanha. Já para o gráfico (b) observa-se uma completa desarmonia entre os volumes, visto que, neste caso, foi empregado um ajuste independente para volume total com casca, com a seleção do modelo Scolforo et al. (modelo 1) e, para volume total sem casca, foi escolhido o modelo Schumacher e Hall (não linear).

#### **5.4 Diagnóstico de normalidade**

As avaliações da normalidade dos resíduos foram realizadas para as melhores equações de simples e dupla entrada com a variável Dummy, que foram Kopezky-Gehrhardt e Scolforo et al. (modelo 1), respectivamente.

Com o intuito de melhor avaliar os resultados para os volumes totais e comerciais com e sem casca, cada equação geral selecionada com a variável Dummy foi fragmentada para volume total com casca ( $V_1$ ), volume total sem casca ( $V_2$ ), volume comercial com casca ( $V_3$ ) e volume comercial sem casca ( $V_4$ ). Posteriormente, foram avaliadas pela distribuição do erro padronizado e pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, conforme apresentado na Tabela 2.12.

As equações de Kopezky-Gehrhardt e Scolforo et al., para volume total e comercial com casca, apresentaram um menor percentual de erros padronizados dentro da faixa entre -1,98 e +1,98. No entanto, esse menor percentual não foi considerado importante, visto que os testes de Kolmogorov-Smirnov mostraram que a divergência entre os pontos de maior distância entre a frequência teórica e a frequência observada não foi significativa para  $\alpha = 0,01$ , confirmando-se  $H_0$ .

As demais equações apresentaram resultados mais expressivos na confirmação de  $H_0$ , com destaque para a equação Scolforo et al. para volume total sem casca, em que 96,23% dos resíduos padronizados se apresentaram no intervalo de -1,98 e +1,98.

**TABELA 2.12.** Resultados do diagnóstico de normalidade para as equações de Kopezky-Gehrhardt e Scolforo et al. (modelo 1), considerando individualmente volume total com casca ( $V_1$ ), volume total sem casca ( $V_2$ ), volume comercial com casca ( $V_3$ ) e volume comercial sem casca ( $V_4$ )

Modelos selecionados	Percentual do erro padronizado		Teste Kolmogorov-Smirnov		
	(68,00%) -1 e +1	(95,00%) -1,98 e +1,98	Valor de D	D (Tabelado) $\alpha=0,01$	Teste
<b>Kopezky-Gehrhardt</b>					
Volume total com casca ( $V_1$ )	73.58%	89.94%	0.0968	0.1285	NS
Volume total sem casca ( $V_2$ )	76.10%	93.71%	0.1185	0.1285	NS
Volume comercial com casca ( $V_3$ )	73.58%	89.94%	0.0899	0.1285	NS
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )	76.73%	93.71%	0.1071	0.1285	NS
<b>Scolforo et al. (modelo 1)</b>					
Volume total com casca ( $V_1$ )	74.84%	89.94%	0.1154	0.1285	NS
Volume total sem casca ( $V_2$ )	76.73%	96.23%	0.0929	0.1285	NS
Volume comercial com casca ( $V_3$ )	71.70%	90.57%	0.1181	0.1285	NS
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )	74.84%	95.60%	0.1020	0.1285	NS

## 5.5 Teste de identidade de modelos

A finalidade principal do teste de identidade de modelo é avaliar se os ajuste volumétricos feitos para o conjunto de dados das quatro áreas apresentam características comuns ou se os ajustes deveriam ser realizados individualmente por área ou para subgrupos envolvendo duas ou três áreas.

Na Tabela 2.13 encontram-se os resultados do teste de identidade para o modelo Kopezky-Gehrhardt com a variável Dummy, na qual são apresentadas todas as possibilidades de combinações entre as quatro áreas estudadas.



Observa-se que um único ajuste para o modelo Kopezky-Gehrhardt não deve ser empregado para o conjunto das quatro áreas, pois existem diferenças significativas apontadas pelo teste F, em que o  $F_{\text{calculado}}$  (1,553) foi maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  (1,535).

**TABELA 2.13** Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo testado foi Kopezky-Gehrhardt com a variável Dummy

Combinações	QM (diferença)	QM (resíduo)	F (calculado)	F 5% (tabelado)	Teste
1, 2, 3 e 4	0,0001183	0,0000761	1,553	1,535	S
1, 2 e 3	0,0000681	0,0000811	0,840	1,667	NS
1, 2 e 4	0,0000853	0,0000831	1,027	1,667	NS
1, 3 e 4	0,0001745	0,0000827	2,110	1,662	S
2, 3 e 4	0,0001155	0,0000540	2,139	1,669	S
1 e 2	0,0000121	0,0000960	0,126	1,974	NS
1 e 3	0,0001154	0,0000913	1,264	1,963	NS
1 e 4	0,0001574	0,0000936	1,682	1,963	NS
2 e 3	0,0000061	0,0000466	0,130	1,980	NS
2 e 4	0,0000566	0,0000505	1,120	1,980	NS
3 e 4	0,0002215	0,0000612	3,621	1,965	S

Em que: S - significativo a 95% de probabilidade pela distribuição F; e, NS = não significativo a 95% de probabilidade, pela distribuição F.

Para as combinações das áreas {1, 2 e 3} e áreas {1, 2 e 4} podem ser ajustadas equações para o conjunto das duas combinações. Já para as combinações de áreas {1, 3 e 4} e {2, 3 e 4}, o teste F indica ser inadequado o agrupamento dos dados para a obtenção de equações reduzidas para estes conjuntos, visto que os valores do  $F_{\text{calculado}}$  foram altos e demonstram significativas diferenças a 95% de probabilidade.

Para combinação entre duas áreas, se mostram adequados os agrupamentos de áreas {1 e 2}, {1 e 3}, {1 e 4}, {2 e 3} e {2 e 4}; pois os resultados do teste F para estas combinações foram não significativos,

evidenciando que pode ser ajustado o modelo Kopezky-Gehrhardt com a variável Dummy, para as cinco combinações citadas.

A combinação entre as áreas {3 e 4} apresenta significativa diferença estatística, a 95% de probabilidade, quando se considera o modelo de Kopezky-Gehrhardt com a variável Dummy, devendo, neste caso, ser ajustado um modelo para área 3 e outro para a área 4. Percebe-se que quando ocorrem às áreas 3 e 4 numa mesma combinação, acarreta a impossibilidade de utilizar um único modelo para o referido conjunto. Isto é, demonstrado nos conjuntos das áreas {1, 2, 3 e 4}, {1, 3 e 4} e {2, 3 e 4}.

As equações ajustadas das combinações que apresentaram possibilidade de agrupamento e das áreas 3 e 4 (individualmente), encontram-se na Tabela 7.A (nos anexos deste capítulo).

Para o modelo 1 de Scolforo et al. com a variável Dummy, os resultados encontram-se apresentados na Tabela 2.14. Este modelo apresentou resultados de possibilidade de agrupamentos muito mais restritivos que o modelo de Kopezky-Gehrhardt. Geralmente os melhores modelos apresentam esta característica, ou seja, um número menor de áreas com possibilidade de empregar uma única equação ajustada.

O modelo Scolforo et al., a exemplo do modelo anterior (Kopezky-Gehrhardt), também não deverá ser empregado para o conjunto das quatro áreas, pois o teste F indicou existir diferenças significativas, a 95% de probabilidade.

A combinação das áreas {1, 2 e 3} pode ser ajustada em uma única equação, pois o valor do  $F_{\text{calculado}}$  (0,863) mostrou não haver diferença significativa entre ajustar um modelo para cada área ou empregar um modelo ajustado que inclua dados das três áreas.

Para as combinações de áreas {1, 2 e 4}, {1, 3 e 4} e {2, 3 e 4}, o teste F indica ser inadequado o agrupamento dos dados para a obtenção de equações reduzidas para estes conjuntos.

**TABELA 2.14** Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo testado foi Scolforo et al. (modelo 1) com a variável Dummy

Combinações	QM (diferença)	QM (resíduo)	F (calculado)	F 5% (tabelado)	Teste
1, 2, 3 e 4	0,000066652	0,000027082	2,461	1,380	S
1, 2 e 3	0,000025541	0,000029608	0,863	1,472	NS
1, 2 e 4	0,000072509	0,000029824	2,431	1,472	S
1, 3 e 4	0,000094406	0,000028663	3,294	1,466	S
2, 3 e 4	0,000052791	0,000019062	2,769	1,475	S
1 e 2	0,000028019	0,000035890	0,781	1,685	NS
1 e 3	0,000017437	0,000032206	0,541	1,671	NS
1 e 4	0,000133875	0,000032448	4,126	1,671	S
2 e 3	0,000031519	0,000017693	1,781	1,692	S
2 e 4	0,000006019	0,000018116	0,332	1,692	NS
3 e 4	0,000098812	0,000020530	4,813	1,674	S

Em que: S = significativo a 95% de probabilidade pela distribuição F e NS = não significativo a 95% de probabilidade, pela distribuição F.

Na combinação entre duas áreas, apenas 50% das combinações se mostram adequadas para serem agrupadas. Isto somente é possível para as áreas {1 e 2}, {1 e 3} e {2 e 4}. O teste F para estas combinações foi não significativo, afirmando que pode ser ajustado o modelo 1 de Scolforo et al. com a variável Dummy para as três combinações.

As combinações entre as áreas {1 e 4}, {2 e 3} e {3 e 4} demonstraram significativa diferença estatística, a 95% de probabilidade, quando se considera o modelo 1 de Scolforo et al. com a variável Dummy. Caso se pretenda estimativa volumétrica para as três combinações, o mais apropriado será o ajuste de um modelo para cada área.

As equações ajustadas das combinações com possibilidade de agrupamento {1, 2 e 3}, {1 e 2}, {1 e 3}, {2 e 4} e das áreas 1, 2, 3 e 4 (individualmente), encontram-se na Tabela 8.A (nos anexos deste capítulo).

## 6 CONCLUSÕES

- De modo geral, os modelos não-lineares apresentaram os piores resultados de erro padrão residual e distribuição percentual dos resíduos, exceto para o modelo Takata.
- Entre os modelos de simples entrada, a equação ajustada de Kopezky-Gehrhardt apresentou o melhor desempenho estatístico.
- Para os modelos de dupla entrada, a equação ajustada de Scolforo et al. (modelo 1) obteve a melhor combinação de resultados estatísticos.
- O emprego do método Dummy para a obtenção de diversas especificações de volume, possibilita compatibilidade entre os volumes total e comercial (com e sem casca) e maior estabilidade das estimativas.
- Os resíduos dos volumes total e comercial (com e sem casca), obtidos das equações selecionadas, atende aos quesitos de normalidade dos dados.
- As melhores equações não permitem o agrupamento de dados para o conjunto de todas as áreas estudadas, devendo no caso formar subgrupos de ajustes.
- Quanto melhor a equação, mais restritiva se torna para o agrupamento de dados, permitindo que o teste de identidade seja mais rigoroso.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACRE. Governo do estado do Acre. Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre. **Zoneamento ecológico-econômico: recursos naturais e meio ambiente – documento final**. Rio Branco: SECTMA, 2000, v.1, 116 p.

AYRES, M. **BioEstat 2.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas**. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, Brasília: CNPq, 2000, 272p.

CHATTERJEE, S.; HADI, A.S. Influential observations, high leverage points, and outliers in linear regression. **Statistical Science**, v.3, p.379-416, 1986.

FERREIRA, D.E. **Recursos computacionais na genética e melhoramento de plantas**. Lavras: UFLA, 1996. 80 p. Apostila.

GRAYBILL, J. **Theory and application of the linear model**. Belmont: Duxbury, 1976.

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEER, T.W. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: J. Wiley & Sons, 1982. 402p.

INSTITUTO DE MEIO AMBIENTE DO ACRE. Núcleo de Cartografia (Rio Branco, AC). **Atlas geográfico ambiental do Acre**. Rio Branco, 1991. 48p.

REGAZZI, A.J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. In: SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA A EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA–SEAGRO, 10.; REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA–RBRAS, 48., 2003, Lavras. **Anais...** Lavras, 2003, p. 33-39.

SAS INSTITUTE. **SAS User's guide: statistics**. Release 6.03. Cary, 1990. 584p.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.dos. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal 2: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292p. (Textos Acadêmicos).

SOUZA, G.S. **Introdução aos modelos de regressão linear e não-linear**. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-SEA, 1998. 505 p.

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

STOATE, I.N. The use of a volume equation in pine stands. **Australian Forestry**, Camberra, v.9, p.48-52, 1945.

VEIGA, R.A.de A. Uso de equações de volume em levantamentos florestais. In: SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL, 1., 1981, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1981. p.93-102.

## ANEXOS

### ANEXO A

		<b>Página</b>
<b>TABELA 1.A</b>	Equações ajustadas de Kopecky-Gehrhardt, Dissescu-Meyer, Hohenadl-Krenm e Berkhout para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy .....	117
<b>TABELA 2.A</b>	Equações ajustadas de Brenac e Husch para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy .....	118
<b>TABELA 3.A</b>	Equações ajustadas de Honner, Meyer e Naslund para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy .....	119
<b>TABELA 4.A</b>	Equações ajustadas de Ogaya, Schumacher e Hall NL, Schumacher e Hall (1933) e Scolforo et al. (modelo 1) para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy.....	120
<b>TABELA 5.A</b>	Equações ajustadas de Scolforo et al. (modelo 2), Scolforo et al. (modelo 3) e Spurr (1952) (modelo 1), para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy .....	121
<b>TABELA 6.A</b>	Equações ajustadas de Spurr (logarítmica), Stoate (1945) (australiana) e Takata, para volumes total e	

	comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy ..... 122
<b>TABELA 7.A</b>	Equações gerais ajustadas do modelo Kopezky- Gehrhardt, com a variável Dummy, de acordo com as possibilidades de agrupamento de áreas definidas pelo teste de identidade de modelos, para a obtenção de volume total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ), para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados ..... 123
<b>TABELA 8.A</b>	Equações gerais ajustadas do modelo 1 de Scolforo et al., com a variável Dummy, de acordo com as possibilidades de agrupamento de áreas definidas pelo teste de identidade de modelos, para a obtenção de volume total e comercial com e sem casca ( $V_1$ , $V_2$ , $V_3$ e $V_4$ ) para as árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f. dos quatro povoamentos estudados ..... 125



**TABELA 1.A** Equações ajustadas de Kopezky-Gehrhardt, Dissescu-Meyer, Hohenald-Krenm e Berkhout para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Kopezky-Gehrhardt</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,00260011 + 0,000490956.(DAP^2)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = -0,00471255 + 0,000417992.(DAP^2)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = -0,00382298 + 0,000491848.(DAP^2)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = -0,00563735 + 0,000418615.(DAP^2)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4439,03	0,9826	0,9824	0,05053 m <sup>3</sup>	±0,00882
<b>Dissescu-Meyer</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,000377691.DAP + 0,000503817.(DAP^2)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = -0,000865117.DAP + 0,000454444.(DAP^2)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = -0,000603866.DAP + 0,000514291.(DAP^2)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = -0,00103572.DAP + 0,000462282.(DAP^2)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4400,81	0,9824	0,9822	0,05114 m <sup>3</sup>	±0,00885
<b>Hohenald-Krenm</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,0191949 + 0,00317815.(DAP) + 0,000353006.(DAP^2)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = -0,00596987 + 0,000240795.(DAP) + 0,00040754.(DAP^2)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = -0,0204753 + 0,00318916.(DAP) + 0,00035342.(DAP^2)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = -0,00700841 + 0,000262578.(DAP) + 0,000407218.(DAP^2)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
2990,68	0,9829	0,9826	0,05061 m <sup>3</sup>	±0,00877
<b>Berkhout</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = (0,000426663.(DAP^{2,04162}))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = (0,000245496.(DAP^{2,17617}))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = (0,000381051.(DAP^{2,07954}))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = (0,000219649.(DAP^{2,21366}))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4345,46	0,9441	0,9436		±0,00891

Em que: F; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; Press<sub>p</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; e, DAP foram definidos anteriormente.

**TABELA 2.A** Equações ajustadas de Brenac e Husch para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Brenac</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$\ln(V_1) = 6,45395 + 1,68379.(\ln(DAP)) - 4,98495.(1/DAP)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$\ln(V_2) = -7,63077 + 1,99376.(\ln(DAP)) - 2,83597.(1/DAP)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$\ln(V_3) = -6,31914 + 1,65496.(\ln(DAP)) - 5,95708.(1/DAP)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$\ln(V_4) = -7,49358 + 1,9644.(\ln(DAP)) - 3,81136.(1/DAP)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
29996,2	0,9983	0,9982	0,05468 m <sup>3</sup>	±0,00883
<b>Husch</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$\ln(V_1) = 8,16904 + 2,1999.(\ln(DAP))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$\ln(V_2) = -8,60649. + 2,28738.(\ln(DAP))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$\ln(V_3) = -8,36869 + 2,27172.(\ln(DAP))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$\ln(V_4) = -8,80489 + 2,35901.(\ln(DAP))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4400,81	0,9824	0,9822	0,05114 m <sup>3</sup>	±0,00885

Em que: F; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; Press<sub>p</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; DAP; e, ln foram definidos anteriormente.

**TABELA 3.A** Equações ajustadas de Honner, Meyer e Naslund para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Honner</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = ((DAP^2) / (1130,34 + (13037,0.(1/H_i))))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = ((DAP^2) / (793,268 + (23832,9.(1/H_i))))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = ((DAP^2) / (1063,11 + (14314,6.(1/H_i))))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = ((DAP^2) / (705,303 + (25454,0.(1/H_i))))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
7318,44	0,9666	0,9662		±0,00685
<b>Meyer</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,0343581 - 0,00313898.(DAP) + 0,0000902912.(DAP^2) + 0,00114818.(DAP.H_i) - 0,0000132582.((DAP^2).H_i) - 0,00703846.(H_i)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = 0,0224084 - 0,00188088.(DAP) - 0,00000415264.(DAP^2) + 0,000710388.(DAP.H_i) + 0,00000271493.((DAP^2).H_i) - 0,00439492.(H_i)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = 0,0352125 - 0,00360668.(DAP) + 0,000121325.(DAP^2) + 0,00118019.(DAP.H_i) - 0,0000152584.((DAP^2).H_i) - 0,00719734.(H_i)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = 0,0230466 - 0,00223171.(DAP) + 0,0000191942.(DAP^2) + 0,000735604.(DAP.H_i) + 0,00000115756.((DAP^2).H_i) - 0,00452149.(H_i)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
3853,03	0,9934	0,9932	0,0207 m <sup>3</sup>	±0,00549
<b>Naslund</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,000520875.(DAP^2) - 0,0000397081.((DAP^2).H_i) + 0,0000557028.(DAP.(H_i^2)) - 0,00024856.(H_i^2)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = 0,000269155.(DAP^2) - 0,0000130422.((DAP^2).H_i) + 0,0000325218.(DAP.(H_i^2)) - 0,000134492.(H_i^2)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = 0,000526864.(DAP^2) - 0,0000412381.((DAP^2).H_i) + 0,0000582336.(DAP.(H_i^2)) - 0,000274174.(H_i^2)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = 0,000274547.(DAP^2) - 0,0000143344.((DAP^2).H_i).D_4 + 0,000034559.(DAP.(H_i^2)) - 0,000154592.(H_i^2)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
6119,68	0,9937	0,9935	0,0191 m <sup>3</sup>	±0,00534

Em que:  $H_i$ ;  $F$ ;  $R^2$ ;  $R^2_{aj}$ ;  $Press_p$ ;  $S_{yx}$ ;  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$ ;  $V_4$ ;  $D_1$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_4$ ; e,  $DAP$  foram definidos anteriormente.

**TABELA 4.A** Equações ajustadas de Ogaya, Schumacher e Hall NL, Schumacher e Hall (1933) e Scolforo et al. (modelo 1) para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Ogaya</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = ((DAP^2).(0,000240083+0,0000173388.H_i))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = ((DAP^2).(0,000115265+0,0000202725.H_i))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = ((DAP^2).(0,000219775+0,0000183899.H_i))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = ((DAP^2).(0,000099978+0,0000210583.H_i))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
7451,88	0,9672	0,9668		±0,00683
<b>Schumacher e Hall NL</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = (0,000146.(DAP^{1,5737}).(H_i^{0,8859}))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = (0,000069.(DAP^{1,6281}).(H_i^{1,0416}))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = (0,00013.(DAP^{1,6105}).(H_i^{0,8884}))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = (0,000062.(DAP^{1,6633}).(H_i^{1,046}))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
7006,33	0,9768	0,9764		±0,00576
<b>Schumacher e Hall (1933)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$\ln(V_1) = 8,87276 + 1,80842.( \ln(DAP) ) + 0,667632.( \ln(Ht) )$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$\ln(V_2) = - 9,45063 + 1,81779.( \ln(DAP) ) + 0,800847.( \ln(H_i) )$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$\ln(V_3) = - 9,07965 + 1,87621.( \ln(DAP) ) + 0,674498.( \ln(H_i) )$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$\ln(V_4) = - 9,65695 + 1,88501.( \ln(DAP) ) + 0,808362.( \ln(H_i) )$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
54676,4	0,9990	0,9990	0,0251 m <sup>3</sup>	±0,00623
<b>Scolforo et al. (modelo 1)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,00790727 + 0,0104486.(DAP/H_i) + 0,0000542448.( (DAP^2).H_i ) - 0,00000138794.( (DAP^3).H_i )$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = - 0,000837212 + 0,00132776.(DAP/H_i) + 0,0000401267.( (DAP^2).H_i ) - 0,000000790252.( (DAP^3).H_i )$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = -0,00975421 + 0,011314.(DAP/H_i) + 0,0000541851.( (DAP^2).H_i ) - 0,00000138641.( (DAP^3).H_i )$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = - 0,00226719 + 0,00200512.(DAP/H_i) + 0,0000401134.( (DAP^2).H_i ) - 0,000000791232.( (DAP^3).H_i )$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
5787,45	0,9933	0,9931	0,0202 m <sup>3</sup>	±0,00549

Em que:  $H_i$ ;  $F$ ;  $R^2$ ;  $R^2_{aj}$ ;  $Press_p$ ;  $S_{yx}$ ;  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$ ;  $V_4$ ;  $D_1$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_4$ ; e,  $DAP$  foram definidos anteriormente.

**TABELA 5.A** Equações ajustadas de Scolforo et al. (modelo 2), Scolforo et al. (modelo 3) e Spurr (1952) (modelo 1), para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Scolforo et al. (Modelo 2)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )	$V_1 = 0,0137272 + 0,000612366.(DAP.H_i) + 0,000000449313.((DAP^3).H_i) - 0,00000974521.(DAP.(H_i^2))$			
Volume total sem casca ( $V_2$ )	$V_2 = - 0,00819211 + 0,000375884.(DAP.H_i) + 0,000000506414.((DAP^3).H_i) - 0,00000205672.(DAP.(H_i^2))$			
Volume comercial com casca ( $V_3$ )	$V_3 = - 0,015153 + 0,000622013.(DAP.H_i) + 0,000000456466.((DAP^3).H_i) - 0,0000104077.(DAP.(H_i^2))$			
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )	$V_4 = - 0,00929495 + 0,000383612.(DAP.H_i) + 0,000000510899.((DAP^3).H_i) - 0,00000256887.(DAP.(H_i^2))$			
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4930,20	0,9922	0,9920	0,0236 m <sup>3</sup>	±0,00594
<b>Scolforo et al. (modelo 3)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )	$V_1 = 0,0035587 + 0,00156414.H_i + 0,0000286983.((DAP^2).H_i) - 0,000000670268.(DAP.(H_i^2))$			
Volume total sem casca ( $V_2$ )	$V_2 = 0,00155873.D_2 + 0,000341605.H_i + 0,0000216472.((DAP^2).H_i) + 0,00000473655.(DAP.(H_i^2))$			
Volume comercial com casca ( $V_3$ )	$V_3 = - 0,00491863 + 0,00160098.H_i + 0,0000291731.((DAP^2).H_i) - 0,00000123864.(DAP.(H_i^2))$			
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )	$V_4 = 0,000509331 + 0,000371883.H_i + 0,0000220005.((DAP^2).H_i) + 0,00000430431.(DAP.(H_i^2))$			
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4373,14	0,9912	0,9910	0,0263 m <sup>3</sup>	±0,00631
<b>Spurr (1952) (modelo 1)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )	$V_1 = 0,00980977 + 0,0000308468.((DAP^2).H_i)$			
Volume total sem casca ( $V_2$ )	$V_2 = 0,00980977 + 0,0000308468.((DAP^2).H_i)$			
Volume comercial com casca ( $V_3$ )	$V_3 = 0,00980977 + 0,0000308468.((DAP^2).H_i)$			
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )	$V_4 = 0,00980977 + 0,0000308468.((DAP^2).H_i)$			
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
8217,74	0,9905	0,9904	0,0276 m <sup>3</sup>	±0,00651

Em que:  $H_i$ ; F;  $R^2$ ;  $R^2_{aj}$ ;  $Press_p$ ;  $S_{yx}$ ;  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$ ;  $V_4$ ;  $D_1$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_4$ ; e, DAP foram definidos anteriormente.

**TABELA 6.A** Equações ajustadas de Spurr (logarítmica), Stoate (1945) (australiana) e Takata, para volumes total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), originários do modelo geral com a variável Dummy, para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados, e as principais estatísticas do modelo geral com a variável Dummy

Modelos		Equações ajustadas		
<b>Spurr (logarítmica)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$\ln(V_1) = 9,03746 + 0,846604.\ln((DAP^2).H_i)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$\ln(V_2) = -9,52585 + 0,882585.\ln((DAP^2).H_i)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$\ln(V_3) = -9,26317 + 0,873918.\ln((DAP^2).H_i)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$\ln(V_4) = -9,75034 + 0,90984.\ln((DAP^2).H_i)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
79643	0,9990	0,9990	0,0229 m <sup>3</sup>	±0,00596
<b>Stoate (1945) (australiana)</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = 0,0166666 + 0,000192926.(DAP^2) + 0,0000148007.((DAP^2).H_i) + 0,00243366.(H_i)$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = -0,00905838 + 0,0000635447.(DAP^2) + 0,0000199439.((DAP^2).H_i) + 0,00148594.(H_i)$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = -0,0178712 + 0,000200761.(DAP^2) + 0,0000143974.((DAP^2).H_i).D_3 + 0,00241216.(H_i)$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = -0,0100128 + 0,000069824.(DAP^2) + 0,0000196069.((DAP^2).H_i) + 0,00147349.(H_i)$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
4807,78	0,9920	0,9918	0,0240 m <sup>3</sup>	±0,00602
<b>Takata</b>				
Volume total com casca ( $V_1$ )		$V_1 = ((DAP^2).H_i)/(13687,4 + 1038,53.(DAP))$		
Volume total sem casca ( $V_2$ )		$V_2 = ((DAP^2).H_i)/(21393,8 + 925,717.(DAP))$		
Volume comercial com casca ( $V_3$ )		$V_3 = ((DAP^2).H_i)/(14950,1 + 974,691.(DAP))$		
Volume comercial sem casca ( $V_4$ )		$V_4 = ((DAP^2).H_i)/(22978,2 + 843,372.(DAP))$		
<b>Estatísticas</b>				
<b>F</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup><sub>aj</sub></b>	<b>Press<sub>p</sub></b>	<b>S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>)</b>
10875	0,9774	0,9772		±0,00566

Em que:  $H_i$ ;  $F$ ;  $R^2$ ;  $R^2_{aj}$ ;  $Press_p$ ;  $S_{yx}$ ;  $V_1$ ;  $V_2$ ;  $V_3$ ;  $V_4$ ;  $D_1$ ;  $D_2$ ;  $D_3$ ;  $D_4$ ;  $DAP$ ; e,  $\ln$  foram definidos anteriormente.

**TABELA 7.A** Equações gerais ajustadas do modelo Kopecky-Gehrhardt, com a variável Dummy, de acordo com as possibilidades de agrupamento de áreas definidas pelo teste de identidade de modelos, para a obtenção de volume total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ), para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados

Combinações	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
1, 2 e 3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,000967466.D_1 - 0,00343238.D_2 - 0,00218875.D_3 - 0,00435765.D_4 + 0,000482479.(DAP^2).D_1 + 0,000416391.(DAP^2).D_2 + 0,00048335.(DAP^2).D_3 + 0,000416997.(DAP^2).D_4$	0,9830	0,9827	±0,0089
1, 2 e 4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00318239.D_1 - 0,00543331.D_2 - 0,0043844.D_3 - 0,00634092.D_4 + 0,00048798.(DAP^2).D_1 + 0,000416726.(DAP^2).D_2 + 0,000489162.(DAP^2).D_3 + 0,000417558.(DAP^2).D_4$	0,9823	0,9820	±0,0091
1 e 2	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00144275.D_1 - 0,00389964.D_2 - 0,00261398.D_3 - 0,00478646.D_4 + 0,000476727.(DAP^2).D_1 + 0,000414175.(DAP^2).D_2 + 0,000477949.(DAP^2).D_3 + 0,000415033.(DAP^2).D_4$	0,9824	0,9819	±0,0096
1 e 3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,000179898.D_1 - 0,00325442.D_2 - 0,00127239.D_3 - 0,0040794.D_4 + 0,000478753.(DAP^2).D_1 + 0,000415541.(DAP^2).D_2 + 0,000479038.(DAP^2).D_3 + 0,00041569.(DAP^2).D_4$	0,9831	0,9828	±0,0095
1 e 4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00326267.D_1 - 0,00612389.D_2 - 0,00432375.D_3 - 0,00692095.D_4 + 0,000488266.(DAP^2).D_1 + 0,000419832.(DAP^2).D_2 + 0,000488816.(DAP^2).D_3 + 0,000420168.(DAP^2).D_4$	0,9823	0,9819	±0,0097
2 e 3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00364579.D_1 - 0,00419445.D_2 - 0,00497532.D_3 - 0,00520987.D_4 + 0,000516881.(DAP^2).D_1 + 0,000430822.(DAP^2).D_2 + 0,000517032.(DAP^2).D_3 + 0,000430959.(DAP^2).D_4$	0,9856	0,9851	±0,0067
2 e 4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00622501.D_1 - 0,00567397.D_2 - 0,00763069.D_3 - 0,00674091.D_4 + 0,000514057.(DAP^2).D_1 + 0,000410008.(DAP^2).D_2 + 0,00051597.(DAP^2).D_3 + 0,000411452.(DAP^2).D_4$	0,9833	0,9827	±0,0071
3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00267288.D_1 - 0,00376555.D_2 - 0,00381451.D_3 - 0,00463649.D_4 + 0,000511031.(DAP^2).D_1 + 0,000428276.(DAP^2).D_2 + 0,0005101.(DAP^2).D_3 + 0,00042758.(DAP^2).D_4$	0,9857	0,9851	±0,0076
4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00847702.D_1 - 0,00811783.D_2 - 0,00970856.D_3 - 0,00904544.D_4 + 0,000526364.(DAP^2).D_1 + 0,000423382.(DAP^2).D_2 + 0,000527346.(DAP^2).D_3 + 0,000424079.(DAP^2).D_4$	0,9839	0,9831	±0,0079

Em que: R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; e, DAP foram definidos anteriormente.

**TABELA 8.A** Equações gerais ajustadas do modelo 1 de Scolforo et al., com a variável Dummy, de acordo com as possibilidades de agrupamento de áreas definidas pelo teste de identidade de modelos, para a obtenção de volume total e comercial com e sem casca ( $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  e  $V_4$ ) para as árvores de *Tectona grandis* L.f. dos quatro povoamentos estudados (...continua...)

Combinações	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
1, 2 e 3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00383616.D_1+0,00752811.D_2 +$ $0,00210121.D_3 +0,0062155.D_4 - 0,00434595.(DAP/H_1).D_1 -$ $0,00965073.(DAP/H_1).D_2 -0,00359685.(DAP/H_1).D_3 -$ $0,00910485.(DAP/H_1).D_4 +$ $0,0000524504.((DAP^2).H_1).D_1 +$ $0,000039415.((DAP^2).H_1).D_2+0,0000524151.((DAP^2).H_1).D_3 +$ $0,0000394179.((DAP^2).H_1).D_4 -0,00000123296.((DAP^3).H_1).D_1 -$ $0,000000699698.((DAP^3).H_1).D_2 -0,00000123204.((DAP^3).H_1).D_3 -$ $0,000000700747.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9939	0,9937	±0,0054
1 e 2	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00241521.D_1 + 0,00712049.D_2 +$ $0,00026339.D_3 +0,00548685.D_4 - 0,00165966.(DAP/H_1).D_1 -$ $0,00763755.(DAP/H_1).D_2 -0,000516991.(DAP/H_1).D_3 -$ $0,00678182.(DAP/H_1).D_4 +$ $0,0000506644.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000361916.((DAP^2).H_1).D_2$ $+0,0000510876.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000365349.((DAP^2).H_1).D_4 -$ $0,00000115112.((DAP^3).H_1).D_1 - 0,00000053484.((DAP^3).H_1).D_2 -$ $0,00000117633.((DAP^3).H_1).D_3 -0,000000555359.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9935	0,9931	±0,0059
1 e 3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00421319.D_1 + 0,00788205.D_2 +$ $0,00261777.D_3 +0,00667484.D_4 - 0,00703721.(DAP/H_1).D_1 -$ $0,0125533.(DAP/H_1).D_2 -0,00613247.(DAP/H_1).D_3 -$ $0,0118894.(DAP/H_1).D_4 +$ $0,0000546092.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000418173.((DAP^2).H_1).D_2$ $+0,0000542595.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000415825.((DAP^2).H_1).D_4 -$ $0,00000132408.((DAP^3).H_1).D_1 - 0,000000801654.((DAP^3).H_1).D_2 -$ $0,00000130892.((DAP^3).H_1).D_3 -0,000000791935.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9943	0,9941	±0,0056
2 e 4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00766951.D_1 - 0,0020645.D_2 -$ $0,010556.D_3 -0,0043239.D_4 + 0,011897.(DAP/H_1).D_1 +$ $0,00406289.(DAP/H_1).D_2 +0,0137226.(DAP/H_1).D_3 +$ $0,0055002.(DAP/H_1).D_4 + 0,0000489947.((DAP^2).H_1).D_1+$ $0,0000386547.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000490259.((DAP^2).H_1).D_3$ $+0,0000387653.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,000000937409.((DAP^3).H_1).D_1$ $- 0,000000676827.((DAP^3).H_1).D_2 - 0,00000094646.((DAP^3).H_1).D_3$ $-0,000000689614.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9945	0,9941	±0,0041
1	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00219119.D_1 + 0,00688589.D_2 +$ $0,000353086.D_3 +0,00549067.D_4 -0,00439714.(DAP/H_1).D_1 -$ $0,0105257.(DAP/H_1).D_2 -0,00307739.(DAP/H_1).D_3 -$ $0,00953271.(DAP/H_1).D_4 +0,0000535084.((DAP^2).H_1).D_1 +$ $0,0000391762.((DAP^2).H_1).D_2 +0,0000534133.((DAP^2).H_1).D_3 +$ $0,0000391229.((DAP^2).H_1).D_4 -0,00000127296.((DAP^3).H_1).D_1 -$ $0,000000662453.((DAP^3).H_1).D_2 -0,00000127475.((DAP^3).H_1).D_3 -$ $0,000000665066.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9940	0,9935	±0,0064
2	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,0146049.D_1 - 0,0122865.D_2 -$ $0,0123227.D_3 -0,0104384.D_4 + 0,0207872.(DAP/H_1).D_1 +$ $0,0170528.(DAP/H_1).D_2 +0,0193691.(DAP/H_1).D_3 +$ $0,0158684.(DAP/H_1).D_4 + 0,0000477755.((DAP^2).H_1).D_1+$ $0,0000382899.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,000025013.((DAP^2).H_1).D_3+$ $0,0000206693.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,000000655295.((DAP^3).H_1).D_1 -$ $0,000000512008.((DAP^3).H_1).D_2 + 0,00000162371.((DAP^3).H_1).D_3$ $+0,00000125391.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9849	0,9792	±0,0028

Em que: H<sub>i</sub>; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; DAP; e, ln foram definidos anteriormente.



**TABELA 8.A Cont.**

Combinações	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> )
3	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,0104764.D_1 + 0,00657766.D_2 + 0,00890392.D_3 + 0,00539548.D_4 - 0,0154188.(DAP/H_1).D_1 - 0,0152031.(DAP/H_1).D_2 - 0,015437.(DAP/H_1).D_3 - 0,0152776.(DAP/H_1).D_4 + 0,0000557619.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,0000532985.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000569088.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000542503.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,00000134721.((DAP^3).H_1).D_1 - 0,00000152979.((DAP^3).H_1).D_2 - 0,00000142384.((DAP^3).H_1).D_3 - 0,00000159265.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9953	0,9948	±0,0045
4	$(V_1D_1+V_2D_2+V_3D_3+V_4D_4) = 0,00976977.D_1 - 0,00433153.D_2 - 0,012415.D_3 - 0,00641657.D_4 + 0,0130178.(DAP/H_1).D_1 + 0,00515698.(DAP/H_1).D_2 + 0,0146288.(DAP/H_1).D_3 + 0,00643602.(DAP/H_1).D_4 + 0,0000505921.((DAP^2).H_1).D_1 + 0,000040669.((DAP^2).H_1).D_2 + 0,0000506584.((DAP^2).H_1).D_3 + 0,0000408174.((DAP^2).H_1).D_4 - 0,0000010252.((DAP^3).H_1).D_1 - 0,000000788243.((DAP^3).H_1).D_2 - 0,00000103678.((DAP^3).H_1).D_3 - 0,000000803621.((DAP^3).H_1).D_4$	0,9950	0,9945	±0,0045

Em que: H<sub>1</sub>; R<sup>2</sup>; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>; S<sub>yx</sub>; V<sub>1</sub>; V<sub>2</sub>; V<sub>3</sub>; V<sub>4</sub>; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>; D<sub>3</sub>; D<sub>4</sub>; DAP; e, ln foram definidos anteriormente.

### **CAPÍTULO 3**

#### **AVALIAÇÃO DE MODELOS E MÉTODOS PARA A CONSTRUÇÃO DE CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Tectona grandis* L.f., NA MICRORREGIÃO DO BAIXO RIO ACRE, ACRE**

## 1 RESUMO

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Avaliação de métodos e modelos para a construção de curvas de índice de sítio para *Tectona grandis* L.f., na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre.** 2005. Cap. 3, p. 126-165. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Este estudo objetivou a seleção do método e modelo que apresentou classificação de sítio mais estável para as árvores dominantes de três povoamentos de *Tectona grandis* L.f. na microrregião do Baixo Rio Acre, no estado do Acre, com idade entre 6,45 a 9,52 anos. Foram testados quinze modelos pelo método da curva média ou curva guia, três modelos ajustados na forma anamórfica e polimórfica pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974) e dois modelos ajustados na forma anamórfica e polimórfica pelo método da diferença algébrica, proposto por Alder (1980). O método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974) propiciou ajustes superiores aos demais métodos e o modelo de Chapman & Richard (polimórfica) foi o que apresentou melhor desempenho. O teste de anamorfismo para o modelo selecionado demonstrou que a base de dados segue um padrão anamórfico; porém, a ausência de observações em todas as faixas de índice de sítio para todas as idades não garantiu boa performance dos modelos anamórficos.

Palavra-chave: Curva média, diferença algébrica, curvas anamórficas, curvas polimórficas, altura dominante.

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Evaluation of methods and models for the construction of site index curves for *Tectona grandis* L.f in the Baixo Rio Acre micro region, Acre.** 2005. Chap. 3. p. 126-165. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

This study aimed at the selection of the method and model which presented the most stable site classification for the dominant trees of three stands of *Tectona grandis* L.f. in the Baixo Rio Acre micro region in Acre state, aged between 6,45 to 9,52 years. Fifteen models were tested by the average curve or guide curve method, three models adjusted in the anamorphic and polymorphic form by the algebraic difference method proposed by the Bailey & Clutter (1974) and two models adjusted in the anamorphic and polymorphic form by the algebraic difference method proposed by Alder (1980). The algebraic difference method proposed by Bailey & Clutter (1974) provided fits superior than other methods and the Chapman & Richard model (polymorphic) was the one which showed best performance. The anamorphism test for the selected model demonstrated that the database follows an anamorphic standard; but the absence of observations in all the site index ranges for all the ages didn't warrant good performance of the anamorphic models.

Key-words: average curve, algebraic difference, anamorphic curves, polymorphic curves, dominant height.

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser); Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-adviser)

### 3 INTRODUÇÃO

O sítio florestal segundo o enfoque ecológico é definido como uma unidade geográfica uniforme, caracterizada por uma certa combinação estável dos fatores do meio. Já sob o enfoque de manejo florestal é conceituado como um fator de produção primário capaz de produzir madeira ou produtos florestais a eles associados. Apesar de diferentes estas duas definições não são conflitantes, mas sim devem ser entendidas de forma complementar.

Um dos principais instrumentos para a administração das florestas de produção plantadas é o conhecimento quantitativo do potencial do sítio para uma espécie. A produtividade dos sítios influencia o crescimento em diâmetro, em altura, em biomassa e diâmetro de copa, a estrutura do povoamento e conseqüentemente importa no manejo a ser adotado para o povoamento florestal. Na definição dos tratamentos silviculturais, como: podas, desbastes, definição da rotação técnica e econômica, práticas de fertilização e correção do solo, estimativas, diagnósticos e prognoses de produção entre outras.

Na literatura são encontradas algumas alternativas para a classificação da produtividade dos locais. Os métodos diretos avaliam a qualidade do sítio a partir de atributos do ambiente, levando em consideração características, como clima, solo e vegetação. Os métodos indiretos utilizam-se basicamente de indicadores na própria vegetação, que refletem as interações de todos estes fatores de sítio.

Nos métodos diretos, os atributos ou fatores do ambiente podem ser classificados como fatores primários, os quais são independentes do ecossistema, tais como: macroclima, topografia e rocha de origem. Podem também ser classificados como atributos secundários, os quais são

desenvolvidos e influenciados por componentes do ecossistema, tais como: microclima, solo florestal, matéria orgânica e lençol freático (Scolforo, 1997).

Dentre os métodos indiretos o de índice de sítio (baseia-se na altura média das árvores dominantes na idade de referência) é o mais universalmente utilizado para definir a potencialidade dos sítios florestais e assim o será até que métodos que conjuguem a soma de fatores ambientais possam ser traduzidos de forma numérica e acessível aos usuários do setor florestal.

Apesar de sua importância para o planejamento no meio florestal Keogh (1982 e 1990) e Nair & Souvannavong (2000) apontam que a classificação de sítio ainda é uma ferramenta negligenciada na administração florestal pelas empresas e produtores autônomos de madeira de *Tectona grandis* L.f. em todas as regiões produtoras do mundo.

O presente estudo teve como objetivo selecionar o modelo que gerou classificação de sítio mais estável para as árvores dominantes das unidades amostrais de três povoamentos de *Tectona grandis* L.f. situados na microrregião do Baixo Rio Acre. Para isso foram testados: quinze modelos pelo método da curva média ou curva guia; três modelos ajustados na forma anamórfica e polimórfica pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974) e, dois modelos ajustados na forma anamórfica e polimórfica, pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980) e também, considerando o melhor modelo e método de ajuste, avaliar a forma das curvas de sítio para espécie, se anamórfica ou polimórfica.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados

A classificação de sítios foi realizada nos três povoamentos de teca mais velhos localizados nas áreas 1, 3 e 4, cujas características são descritas nos itens 4.1 e 4.2 do capítulo 2.

### 4.2 Base de dados

Em decorrência de não haver acompanhamento do desenvolvimento dos povoamentos, por meio da altura dominante, houve a necessidade da realização de estudos cronodendrométricos, com emprego da análise de tronco completa (ANATRO).

Em cada uma das 10 unidades amostrais dos povoamentos 1, 3 e 4 foi instalada uma subparcela circular de 100 m<sup>2</sup>, na qual foi selecionada a árvore dominante, seguindo o conceito de Assmann, ou seja, as cem árvores com maior diâmetro por hectare. Assim, foram utilizadas 30 árvores, as quais contribuíram com 250 pares de dados altura-idade.

Foram retirados discos de 5 cm de espessura nas seguintes alturas: 0,00 m, 0,50 m, 1,00 m, 1,30 m, 2,00 m e, posteriormente, a cada metro até a ponta do fuste. Conforme sugerido por Figueiredo (2001), os discos foram secos em estufa e, posteriormente, lixados com lixa fina, visando destacar as camadas de crescimento do lenho.

Os discos foram marcados com grafite na extensão dos diâmetros a serem mensurados. A metodologia utilizada para a medição dos anéis foi a proposta por Baruso (1977), a qual consiste em identificar o maior diâmetro do disco e, então, no sentido anti-horário, marcar 45°. Neste ponto, faz-se uma cruz de forma ortogonal e procede-se à medição da espessura e contagem dos anéis de crescimento para se obter, respectivamente, o incremento em diâmetro e a idade em que este ocorreu. No caso dos discos apresentarem forma muito diferente da circular, ou nos casos de os discos apresentarem defeitos que não permitiram a aplicação da metodologia, traçaram-se raios em locais em que era possível a medição.

Posteriormente à marcação das posições de medidas, os discos foram digitalizados por sensor de varredura de linha (*scanner* de mesa), produzindo uma imagem bidimensional, conforme descrito por Gonzalez & Woods (2000). A resolução de imageamento foi de 300 dpi (*dots per inch*) e os arquivos gravados no formato TIFF (*Tagged Image File Format*).

As imagens digitais foram tratadas e mensuradas pelo *software* ENVI 4.0 (*Environment for Visualizing Images*). As imagens foram compostas pela combinação colorida RGB (*red-green-blue*), sendo posteriormente aplicado um contraste linear 2%, visando melhorar a qualidade da imagem. O passo seguinte foi a mensuração do número de *pixels* entre anéis, sendo que cada 300 *pixels* corresponde a uma polegada ou 2,54 centímetros. Visando o controle do processo de análise de imagens dos discos, adotou-se o procedimento em que a cada árvore analisada foram aleatorizados dois discos para a mensuração dos anéis utilizando o paquímetro. Todas as etapas do processo de obtenção, preparo, digitalização dos discos, bem como a mensuração dos anéis de crescimento, encontram-se no esquema da Figura 3.1.





**FIGURA 3.1** (a) Identificação das árvores dominantes; (b) abate das árvores (c) codificação dos discos; (d) lixamento dos discos; (e) aplicação de resina; (f) marcação das linhas referenciais de mensuração dos anéis de crescimento; (g) digitalização dos discos; e, (h) processamento das imagens e mensuração dos discos de teca

### 4.3 Classificação de sítio florestal

Para a classificação de sítio foram empregados os seguintes métodos: curva guia; diferença algébrica, proposto por Bailey & Clutter (1974) e diferença algébrica, proposto por Alder (1980).

Vale ressaltar, que todas as curvas de sítio geradas são consideradas curvas provisórias, pois a idade de referência foi de 9 anos (povoamento mais velho). A distância entre a idade de referência e a possível rotação dos povoamentos, faz com que haja necessidade de futuras atualizações das estimativas.

#### 4.3.1 Método da curva guia ou média

Este procedimento matemático começou a ser empregado com maior frequência a partir da introdução da regressão linear múltipla no meio florestal. Isso aconteceu no final da década de 1930 (Scolforo, 1997). Foram testados 15 modelos pelo método da curva-guia, os quais encontram-se na Tabela 3.1.

**TABELA 3.1** Modelos testados pelo método da curva-guia para expressar a capacidade produtiva dos diferentes locais, em função da idade (...continua...)

Identificação	Modelos	Autoria
Modelo 1	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(I) + \varepsilon_i$	Schumacher "log-log"
Modelo 2	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \varepsilon_i$	Schumacher linearizado
Modelo 3	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I^{0.2}) + \varepsilon_i$	Schumacher (com $\beta_2$ )
Modelo 4	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (I)^2 + \varepsilon_i$	
Modelo 5	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (I)^3 + \varepsilon_i$	
Modelo 6	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 I^{0.5} + \beta_2 I + \varepsilon_i$	
Modelo 7	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (I)^2 + \beta_3 I^{0.5} + \varepsilon_i$	

Em que:  $H_{dom}$  = altura dominante (altura média das 100 árvores de maior diâmetro por hectare);  $I$  = idade (em anos);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$  = parâmetros a serem estimados;  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $\varepsilon, \varepsilon_i$  = erro de estimativa.

**TABELA 3.1** Cont.

<b>Identificação</b>	<b>Modelos</b>	<b>Autoria</b>
Modelo 8	$H_{dom} = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 (1/I) + \varepsilon_i$	
Modelo 9	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(I) + \beta_2 [\ln(I)]^2 + \varepsilon_i$	
Modelo 10	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 (1/I)^2 + \varepsilon_i$	
Modelo 11	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \beta_2 (1/I)^2 + \beta_3 (1/I)^3 + \varepsilon_i$	
Modelo 12	$H_{dom} = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 I)] + \varepsilon_i$	Spillman
Modelo 13	$H_{dom} = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 I)]^{(1/(1-\beta_2))} + \varepsilon_i$	Chapman & Richard
Modelo 14	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 [(1/I)^{\beta_2}] + \varepsilon_i$	Bailey & Clutter
Modelo 15	$H_{dom} = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 I^{\beta_2})]^{\beta_3} + \varepsilon_i$	

Este procedimento consiste em selecionar os modelos de regressão, empregando-se uma base de dados de pares de altura média das dominantes e idade, advindos neste estudo de 30 árvores por meio da análise de tronco. A equação resultante do ajuste do modelo representa a curva média do índice de sítio ou curva-guia.

#### **4.3.2 Método da diferença algébrica proposto por Bailey e Clutter**

O método da diferença algébrica pode ser aplicado a partir de qualquer modelo que retrate a relação altura-idade, tanto para produzir famílias de curvas anamórficas, como polimórficas. Entretanto, é necessário que os dados sejam advindos de parcelas permanentes, de análise de tronco ou ainda de um grande número de parcelas temporárias (Cunha Neto et al., 1996).

O método da diferença foi proposto inicialmente por Bailey e Clutter (1974) para desenvolvimento de curvas de índice de sítio anamórficas ou polimórficas, invariantes em relação à idade de referência. Este método faz uso de pares de medidas consecutivas da variável a ser estimada. Foram testados os modelos apresentados na Tabela 3.2 para gerar curvas anamórficas e polimórficas.

**TABELA 3.2** Modelos testados para expressar a capacidade produtiva dos diferentes sítios em função da idade, pelo método da diferença algébrica, procedimento proposto por Bailey & Clutter (1974)

<b>Categoria de curva</b>	<b>Identificação</b>	<b>Modelos na forma de ajuste</b>	<b>Autores</b>
Anamórfica	Modelo 16	$H_{dom2} = H_{dom1} \cdot (\exp(\beta_1 \cdot ((1/I_1) - (1/I_2))))$	Schumacher &
Polimórfica	Modelo 17	$H_{dom2} = \beta_0 \cdot ((H_{dom1}/\beta_0)^{(1/I_2)})$	Hall
Anamórfica	Modelo 18	$H_{dom2} = H_{dom1} \cdot (((1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_2)) / (1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_1)))^{\beta_2})$	Chapman &
Polimórfica	Modelo 19	$H_{dom2} = \beta_0 \cdot ((H_{dom1}/\beta_0)^{(\ln(1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_2)) / \ln(1 - \exp(-\beta_1 \cdot I_1))))^{\beta_2})$	Richards
Anamórfica	Modelo 20	$H_{dom2} = H_{dom1} / (\exp(\beta_1 \cdot ((I_1^{-\beta_2}) - (I_2^{-\beta_2}))))$	Bailey & Clutter
Polimórfica	Modelo 21	$H_{dom2} = (\exp(\beta_0)) \cdot ((H_{dom1} / (\exp(\beta_0)))^{(1/I_2)^{\beta_2}})$	(3 parâmetros)

Em que:  $H_{dom(is)}$  = altura dominante na idade  $I_{is}$ ; exp = exponencial;  $\beta_{is}$  = coeficientes da regressão (a serem estimados);  $I_{is}$  = idade em anos em  $I_1$  e  $I_2$ ; ln = logaritmo neperiano; e,  $\epsilon_i$  = erro de estimativa.

### 4.3.3 Método da diferença algébrica proposto por Alder

O método de Alder é outro procedimento para ajustar curvas anamórficas e polimórficas pela diferença algébrica e preconiza que o ajuste deve ser realizado como no caso da curva média e as formas anamórfica ou polimórfica serão obtidas por manuseio da equação segundo o conceito da diferença algébrica.

Nesse método foram testados os modelos apresentados na Tabela 3.3 para gerar curvas anamórficas e polimórficas, em que os modelos 22 e 23 são originados do modelo Schumacher linearizado; e, os modelos 24 e 25 originados do modelo Chapman & Richards.

Para construção das curvas basta substituir nas formas anamórficas e polimórficas os valores de índice de sítio, idade de referência e os parâmetros obtidos no ajuste da curva média, com isso obter os parâmetros recalculados dos referidos modelos.

**TABELA 3.3** Modelos testados para expressar a capacidade produtiva dos diferentes sítios em função da idade, pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980)

<b>Categoria de curva</b>	<b>Ident.</b>	<b>Modelos na forma de ajuste</b>	<b>Obtenção do parâmetro específico da forma da curva</b>
Anamórfica	Modelo 22	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \varepsilon_i$	$\beta_0 = \ln(S) + (\beta_1 (I_{ref}^{-1}))$
Polimórfica	Modelo 23	$\ln(H_{dom}) = \beta_0 + \beta_1 (1/I) + \varepsilon_i$	$\beta_1 = (\ln(S) - \beta_0) / (I_{ref}^{-1})$
Anamórfica	Modelo 24	$H_{dom} = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 I)]^{\beta_2} + \varepsilon_i$	$\beta_0 = S / [1 - \exp(-\beta_1 I_{ref})]^{\beta_2}$
Polimórfica	Modelo 25	$H_{dom} = \beta_0 [1 - \exp(-\beta_1 I)]^{\beta_2} + \varepsilon_i$	$\beta_2 = \ln(S/\beta_0) / \ln[1 - \exp(-\beta_1 I_{ref})]$

Em que:  $H_{dom}$  = altura dominante (altura média das 100 árvores de maior diâmetro por hectare);  $I$  = idade (em anos);  $I_{ref}$  = idade de referência;  $S$  = índice de sítio;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  = parâmetros a serem estimados;  $\ln$  = logaritmo neperiano;  $e, \varepsilon_i$  = erro de estimativa.

#### 4.3.4 Seleção do melhor modelo de classificação de sítio

A seleção do melhor modelo foi baseada na performance estatística dos modelos testados, medidos pelos seguintes critérios: coeficiente de determinação ( $R^2$ ), média dos resíduos, erro padrão residual e erro percentual, gráfico de distribuição dos resíduos e, principalmente, estabilidade de classificação.

O procedimento para a avaliação da estabilidade consiste em avaliar a constância da classificação dos sítios para os modelos testados. Desse modo, a equação mais estável foi a selecionada considerando também os requisitos referentes às medidas de precisão e distribuição dos resíduos.

A estabilidade da equação foi medida por meio do desvio padrão das classificações de sítio nas diversas idades para cada parcela. Desse modo, a equação mais estável apresenta um maior número de parcelas com desvio padrão das classificações igual a zero (estabilidade total), portanto, quanto maior o número de parcelas com estabilidade total, melhor será a equação de classificação de sítio.

A estabilidade total pode ser definida como a capacidade do modelo ajustado de manter uma parcela classificada numa mesma classe de sítio do primeiro ao último ano observado.

#### **4.3.5 Teste de anamorfismo**

Conforme definido por Scolforo (1997), as curvas anamórficas caracterizam-se por apresentar uma taxa constante de crescimento relativo à altura para qualquer sítio. Nas curvas polimórficas, a taxa de crescimento relativo à altura depende dos fatores de sítios; portanto, é importante conhecer o comportamento dos dados com a realização do teste de anamorfismo.

Ajustados os modelos de classificação de sítios florestais e selecionado o melhor modelo, foram realizados os testes de anamorfismo para a equação que propiciou a melhor classificação de sítio. O teste de anamorfismo permite avaliar se as curvas apresentam comportamento polimórfico ou anamórfico, ou seja, as alturas dominantes numa mesma idade em distintos sítios apresentam taxa de crescimento semelhantes (anamorfismo).

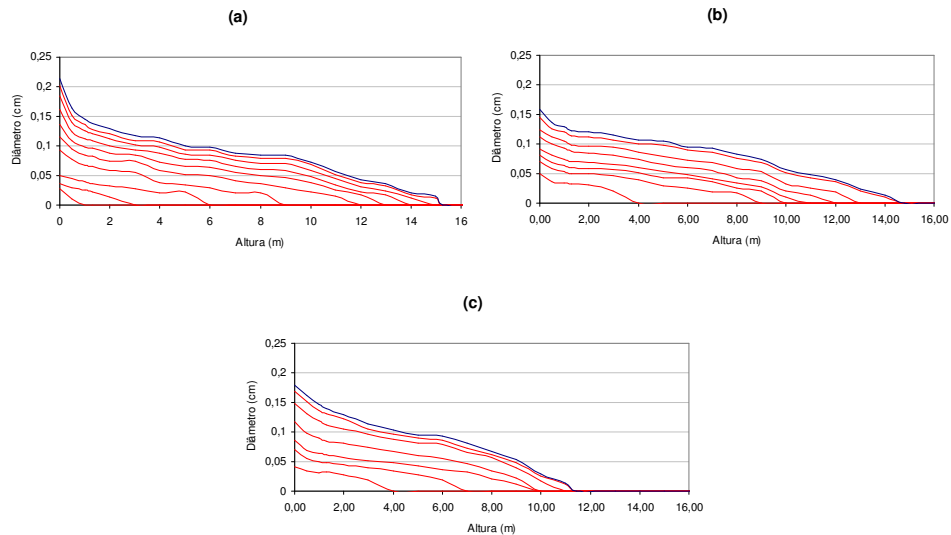
Segundo Scolforo (1997), o anamorfismo das curvas de sítio pode ser identificado a partir da verificação da existência de relação linear entre os índices de sítio e as alturas dominantes médias nas várias idades consideradas, expressando que o índice de sítio não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local.

## **5 RESULTADO E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análise de tronco completa**

A análise de tronco completa possibilitou resgatar uma série histórica de acompanhamento das alturas dominantes, em que cada árvore da área 1, com

9,52 anos de idade, permitiu o resgate de 10 pares de dados de altura-idade. Na Figura 3.2 observa-se um exemplar da reconstituição do perfil da árvore dominante, para uma parcela de cada área de estudo.



**FIGURA 3.2** Perfis das árvores dominantes, sendo: (a) árvore dominante da unidade amostral 9 da área 1, (b) árvore dominante da unidade amostral 6 da área 3 e (c) árvore dominante da unidade amostral 2 da área 4

Para a área 3, com 7,40 anos de idade, cada árvore gerou 8 pares de dados e na área 4, com 6,45 anos, cada árvore gerou 7 pares de dados.

Ao todo, foram obtidos 100 pares de dados para área 1, 80 para área 3 e 70 para área 4, perfazendo um total de 250 pares de dados. No entanto, somente foram empregados 220 pares de dados para a classificação de sítio, pois os dados do primeiro ano não foram utilizados.

O emprego de processo de digitalização dos discos de madeira permitiu significativos ganhos na rapidez do procedimento da ANATRO e facilidade na identificação de falsos anéis de crescimento, pois a possibilidade de ampliação

da imagem digital aliada a oscilação de contrastes permite prontamente identificar os verdadeiros anéis de crescimento. Outro aspecto é que a medida de espessura de cada anel de crescimento é feita pela contagem eletrônica do número de *pixels*, como as imagens foram digitalizadas numa resolução 300 dpi, cada pixel representa 0,008467 cm, ou seja, possibilita medidas bem mais rebuscadas dos anéis de crescimento.

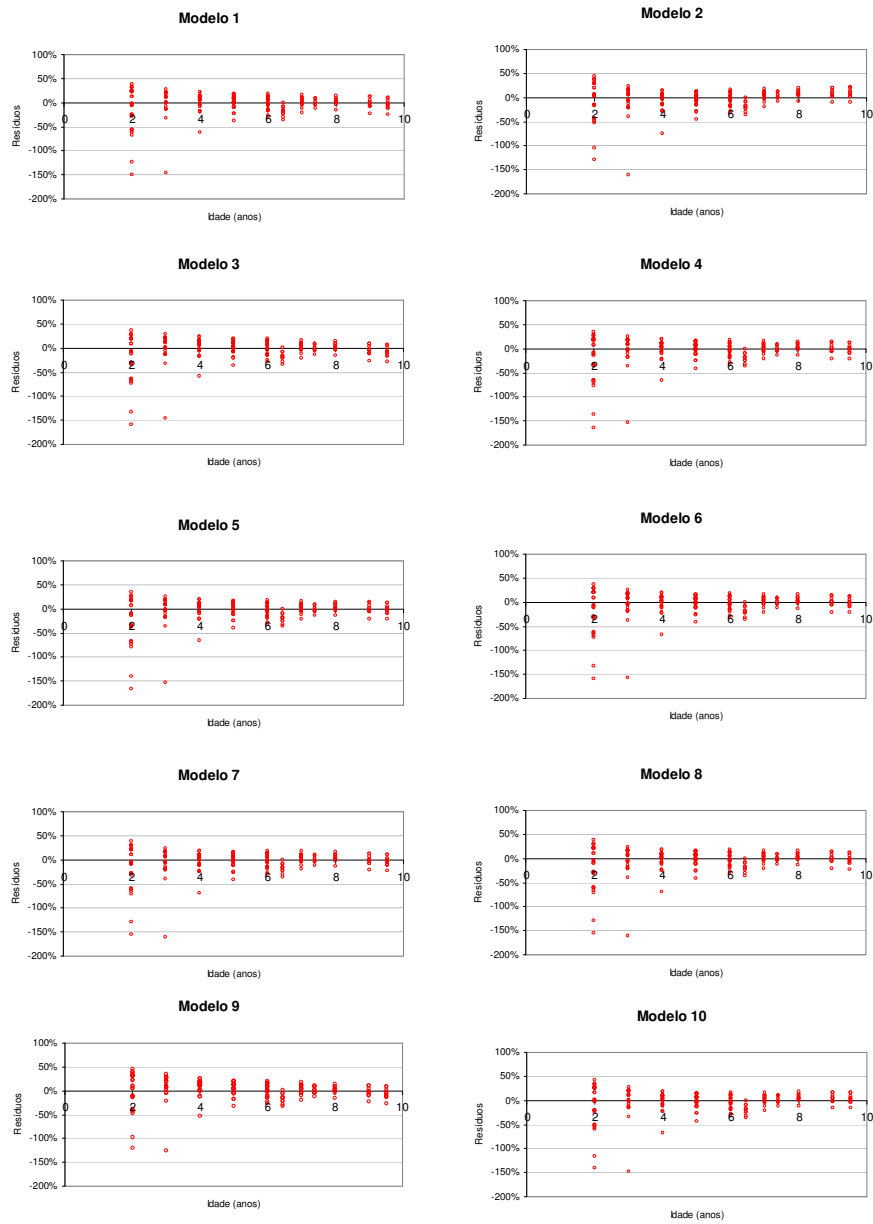
## **5.2 Classificação de sítio pelo método da curva guia ou média**

Os resultados estatísticos obtidos pela utilização do método da curva guia para classificação de sítio considerando os quinze modelos testados, demonstraram que modelos apresentaram bons ajustes, tendo a melhor estatística para o modelo sido: erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) de  $\pm 1,49$  metros, coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) de 77,71% e uma distribuição de resíduos percentuais, ora subestimados, ora superestimados.

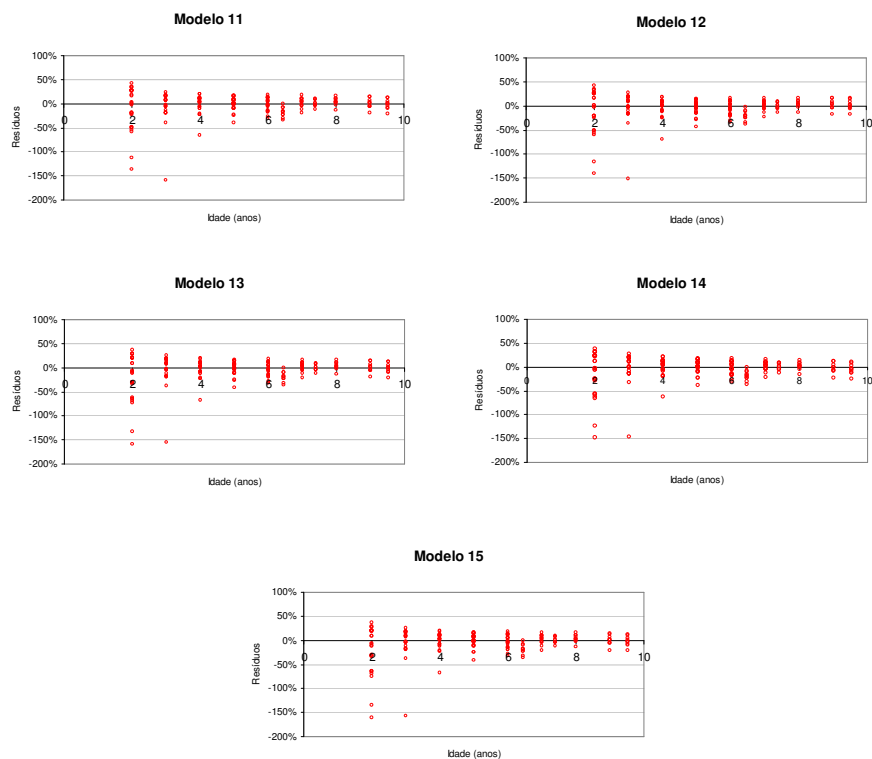
No entanto, a distribuição dos resíduos percentuais revela que o conjunto de modelos testados pelo método da curva-guia demonstrou grande dificuldade de ajuste para as menores idades.

Conforme demonstram as Figura 3.3 e 3.4, os resíduos percentuais para todos os modelos apresentam significativa superestimativa para as menores alturas dominantes (referente aos povoamentos mais jovens), chegando a inflacionar os valores estimados em mais de 160%. Já para as maiores alturas dominantes (povoamentos com idade mais elevada), os modelos acabaram subestimando as alturas em valores variando entre 30% a 46%.





**FIGURA 3.3** Resíduo percentual, em função da idade (anos), para os 10 primeiros modelos testados pelo método da curva-guia



**FIGURA 3.4** Resíduo percentual, em função da idade (anos), para os modelos de 11 a 15, testados pelo método da curva-guia

Esta baixa performance dos modelos pelo método da curva guia demonstra a dificuldade técnica de se adotar tal procedimento em decorrência das dificuldades de ajustamento das curvas de índice de sítio. Isso porque o estabelecimento do intervalo de classe de 3 metros, conforme já adotado por Malende & Temu (1990) e Keogh (1990), não permitiu contemplar a inclusão de todas as estimativas de alturas dominantes numa classe de sítio, mesmo empregando seis classes de sítio.

Para que se pudesse minimizar os efeitos de ajustes, haveria uma segunda alternativa, que seria a ampliação do intervalo entre classes de sítios,

sendo, para isso necessário ampliar o intervalo de classe 3 metros para 4 ou 5. Este procedimento foi adotado por Nunifu & Murchison (1999), ao utilizarem o método da curva guia para classificação de sítios em plantações de teca em Ghana.

Esta alternativa de ampliação do intervalo de classe é uma solução, quando se pretende que o polimorfismo seja exercitado no intervalo entre curvas. No entanto, 4 ou 5 metros de intervalo de classe é pouco realístico para a espécie, visto não tratar-se de uma espécie de intenso crescimento em altura nos primeiros anos. Dessa forma, a adoção de intervalos maiores apenas acaba dificultando o entendimento do comportamento da espécie e, conseqüentemente, as práticas de manejo.

Pode-se observar, nas Figuras 1.A, 2.A e 3.A (em anexo), que, mesmo com o emprego de seis classes de sítio, não foi possível a inclusão de estimativas de árvores dominantes nas menores idades, o que pode ser observado nos resultados dos modelos 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 14.

Esta dificuldade de inserção das alturas dominantes observadas (menores idades) numa determinada classe de sítio é decorrente do fraco resultado de ajustamento dos modelos pelo método da curva guia.

Nanang & Nunifu (1999) utilizando o método da curva guia, obtiveram bom resultados com os modelos de Chapman & Richard e Spillman para determinação do índice de sítio local em plantio de teca na África. Já os resultados para os modelos Chapman & Richard (modelo 13) e Spillman (modelo 12), para os povoamentos estudados, apresentaram os mesmos problemas de altos valores de resíduos que os demais, tendo apenas o modelo Chapman & Richard (modelo 13) possibilitado a inclusão de todas as alturas dominantes observadas (em todas as idades) numa determinada classe de sítio. No entanto, a forte instabilidade da classificação impossibilita seu emprego.

Keogh (1990) afirma que, na classificação de sítios dos plantios de teca, por meio do método da curva guia, têm-se preferido os modelos de Schumacher linearizado (modelo 2) e Schumacher “log-log” (modelo 1), devido basicamente, à facilidade do procedimento operacional de ajuste, o que nem sempre leva a resultados confiáveis.

### **5.3 Classificação de sítio pelo método da diferença algébrica, proposto por Bailey & Clutter**

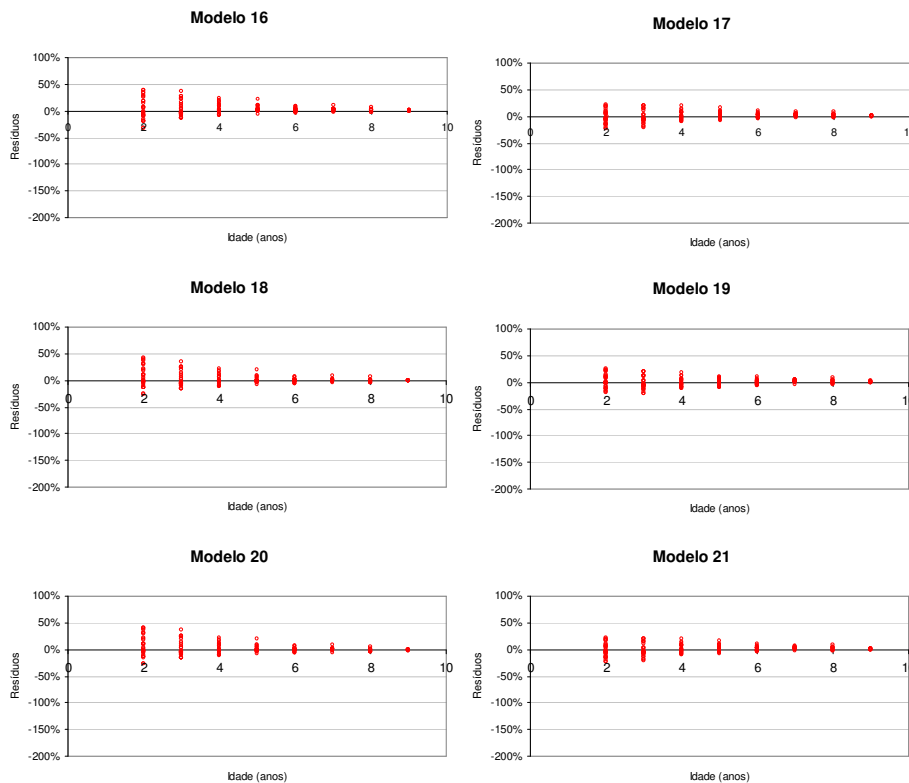
O método da diferença algébrica para classificação de sítio emprega uma combinação de pares sucessivos de alturas presente ( $H_{\text{dom}(1)}$ ) e futura ( $H_{\text{dom}(2)}$ ), respectivamente nas idades  $I_1$  e  $I_2$ , possibilitando o aumento da correlação da variável altura dominante com a variável idade, o que acarreta num melhor desempenho da equação ajustada.

Este desempenho reflete nos resultados estatísticos do melhor ajuste alcançado pelo modelo polimórfico de Chapman & Richard (modelo 19) com resultados de  $R^2$  de 90,90%,  $R^2_{\text{ajustado}}$  de 90,86%, erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) de  $\pm 0,98076$  m e excelente distribuição dos resíduos percentuais (Figura 3.5). Estes resultados são considerados excelentes para ajustes em classificação de sítio, principalmente no que se refere ao erro padrão residual ( $S_{yx}$ ), visto que os melhores resultados para teca giram em torno de  $\pm 1,24$  a  $\pm 1,26$  m, de acordo com Nunifu & Murchison (1999) e Nanang & Nunifu (1999).

Os demais modelos também apresentaram excelentes resultados, destacando aqueles alcançados pelos procedimentos polimórficos de ajuste.

Na distribuição dos resíduos, os resultados também revelaram performance superior dos modelos para a obtenção de curvas polimórficas. Observa-se que a grande dispersão residual nas idades mais jovens (o que

poderia sugerir a ocorrência de *outliers*), ocorrida nos ajustes pelo método da curva guia, agora não passa de uma discreta amplitude para as menores idades.



**FIGURA 3.5** Resíduo percentual em função da idade, para os modelos: Schumacher anamórfica (modelo 16), Schumacher polimórfica (modelo 17), Chapman & Richard anamórfica (modelo 18), Chapman & Richard polimórfica (modelo 19), Bailey & Clutter anamórfica (modelo 20) e Bailey & Clutter polimórfica (modelo 21), testados pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974)

Quando se avalia a distribuição residual para os modelos na forma polimórfica (modelos 17, 19 e 21), os resultados são satisfatórios. Apesar de

gerarem estimativas, ora superestimadas, ora subestimadas, não se verifica nenhuma grande distorção que propicie fortes equívocos de estimativas nas diversas alturas dominantes para cada idade.

Os bons resultados apresentados pelo método da diferença algébrica, independente de sua forma, demonstram que a estratégia de ajuste com pares de altura dominantes e idades sucessivas é uma poderosa ferramenta na obtenção de boas estimativas.

A forma anamórfica ajustada evidenciou a necessidade de estabelecer seis classes de sítios, para que as alturas dominantes nas menores idades fossem contempladas (Figura 4.A).

Já para as idades maiores, as curvas anamórficas dos três modelos ajustados necessitaram de apenas três classes. Esta redução de 50% do número de classes entre o segundo e o nono ano acarreta numa forte instabilidade de classificação da alternativa anamórfica de ajuste.

A alternativa polimórfica de ajuste para os três modelos apresentou melhor habilidade de manter uma proporcionalidade entre o número de classes entre as menores e maiores idades. Esta proporcionalidade somente é possível pela característica polimórfica que permite taxas de crescimento distintas entre as classes de sítio.

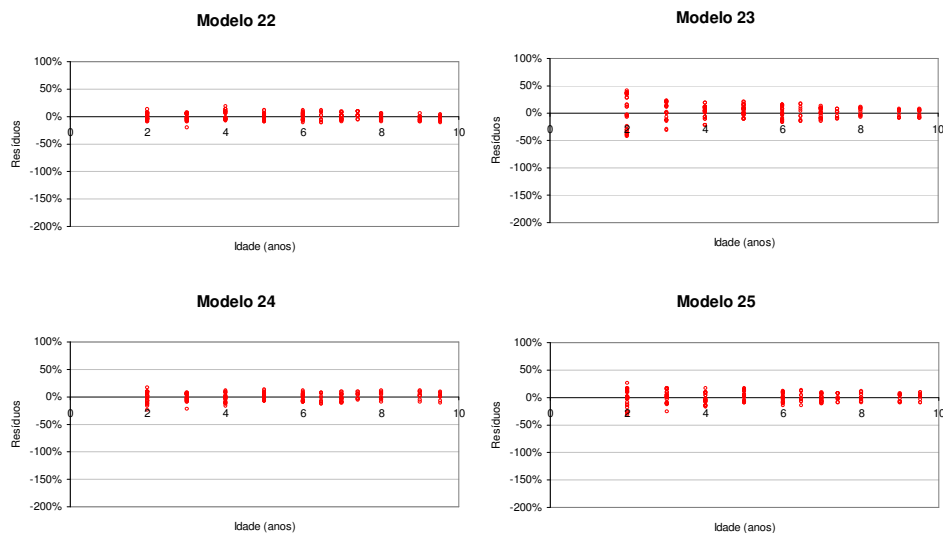
No caso do modelo Schumacher & Hall polimórfico (modelo 17), observa-se que o ajuste conseguiu enquadrar todas as observações em 3 classes de sítio. No entanto, percebe-se que houve um deslocamento de classificação da terceira para segunda classe e da segunda para a primeira classe. Este deslocamento ocorre na medida em que o povoamento vai ficando mais velho.

O modelo Chapman & Richard polimórfico (modelo 19) foi o que apresentou melhor capacidade de não permitir este deslocamento de forma mais intensa.

Já o modelo Bailey & Clutter polimórfico apresentou desempenho muito semelhante ao modelo de Schumacher & Hall polimórfico.

#### 5.4 Classificação de sítio pelo método da diferença algébrica, proposto por Alder

Os resultados gerados pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980) apresentaram resultados similares ao obtidos pelo procedimento proposto por Bailey & Clutter, no que diz respeito à distribuição dos resíduos percentuais em função da idade (Figura 3.6).



**FIGURA 3.6** Resíduo percentual em função da idade, para os modelos: Schumacher anamórfica (modelo 22), Schumacher polimórfica (modelo 23), Chapman & Richard anamórfica (modelo 24) e Chapman & Richard polimórfica (modelo 25), testados pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980)

As estatísticas de ajuste dos modelos não se diferenciam dos resultados obtidos com a curva média, visto que, pelo procedimento proposto por Alder, inicialmente, o ajuste é feito da mesma forma que o realizado no método da curva guia e, posteriormente, se faz o manuseio do modelo.

A diferenciação do procedimento se percebe nos resultados dos resíduos, em que as estimativas das alturas dominantes são realizadas por classe, pois, na medida que se obtém um novo parâmetro adequado a cada classe de sítio, as estimativas melhoram significativamente. Com erro percentual variando entre -21,27% e +18,63%, o modelo Schumacher & Hall anamórfica (modelo 22) apresentou a melhor distribuição residual entre os 25 modelos testados no três métodos de obtenção de curvas de índice de sítio. No entanto, este bom desempenho não garante a melhor estabilidade de classificação.

A segunda melhor performance de distribuição residual foi alcançada por Chapman & Richard anamórfica (modelo 24), com valores oscilando entre -23,30% e +17,32%.

A amplitude dos resíduos para ambos os modelos na forma polimórfica, apesar de mais dilatado que os modelos na forma anamórfica, também conseguiu bons resultados quando comparados com o conjunto dos demais modelos testados.

As curvas de índice de sítio também mantiveram desempenho equivalente aos resultados obtidos pelo procedimento de Bailey & Clutter (1974) (Figura 5.A). As curvas geradas pelo modelo de Schumacher & Hall anamórfica (modelo 22) apresentaram as mesmas características das curvas anamórficas ajustadas pelos outros procedimentos, ou seja, dificuldade de contemplar todas as observações para as idades mais jovens, apesar de considerar até seis classes de sítio e forte instabilidade de classificação, ocorrendo freqüentes mudanças de categoria de sítios. Estas mesmas características também foram registradas na



geração das curvas de índice de sítio pelo modelo Chapman & Richard anamórfica (modelo 24).

Nos modelos Schumacher & Hall polimórfica (modelo 23) e Chapman & Richard polimórfica (modelo 25), foram necessárias apenas três classes de sítio para que todas as observações fosse classificadas numa determinada classe. Isto possibilitou significativas vantagens em estabilidade de classificação demonstrando que ambos os modelos, na forma polimórfica são adequados.

As mudanças de classificação nos modelos polimórficos são mais fortemente evidenciadas no modelo Schumacher & Hall (modelo 23). Os resultados deste modelo revelam um deslocamento de dados maior da segunda para a primeira classe de sítio, principalmente a partir de 7 anos de idade.

Esta forte oscilação não é tão clara no modelo 25 e isto sobressai quando se avalia a estabilidade total, ou seja, a capacidade do modelo ajustado de manter uma parcela classificada numa mesma classe de sítio do primeiro ao último ano observado.

### **5.6 Seleção do modelo e procedimento de obtenção das curvas de índice de sítio**

Os resultados de avaliação da performance estatística dos modelos testados representados por coeficiente de determinação ( $R^2$ ), média dos resíduos, erro padrão residual, coeficiente de variação e número de parcelas com estabilidade total, encontram-se na Tabela 3.4.

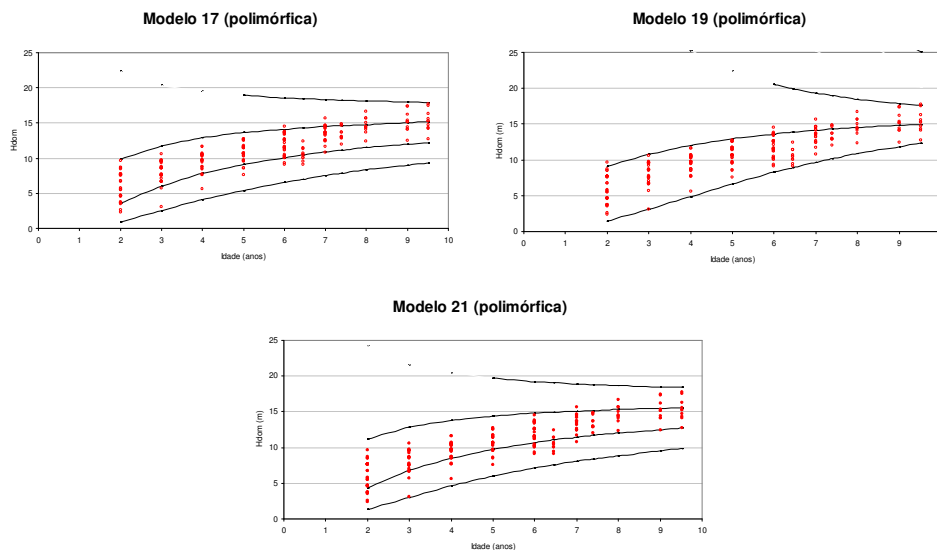
As melhores estatísticas de erro padrão residual, coeficiente de determinação e coeficiente de variação foram obtidas pelos modelos testados pelo método da diferença algébrica para a obtenção de curvas polimórficas.

**TABELA 3.4** Resultados estatísticos dos modelos testados pelos métodos da curva guia, diferença algébrica proposto por Bailey e Clutter (1974) e diferença algébrica proposto por Alder (1980)

Mod	Equação ajustada	Método	Tipos de curva	Média dos resíduos	Nº de UA com estab. total	R <sup>2</sup> (%)	R <sup>2</sup> (ajustado) (%)	S <sub>yx</sub> (± m)	S <sub>yx</sub> %	Dist. dos resíduos
1	$\ln(H_{dom}) = 1,33179 + 0,635883 \cdot (\ln(I_1))$	C.M	Amf	0,12894	0	70,6	70,53	1,51	14,33	Ruim
2	$\ln(H_{dom}) = 2,89287 - 2,41265 \cdot (1/I_1)$	C.M	Amf	0,15998	1	69,7	69,61	1,60	15,21	Ruim
3	$\ln(H_{dom}) = (0,367616 + (1,14896 \cdot (1/(I_1^{0,333485}))))$	C.M	Amf	0,13227	0	69,5	69,23	1,55	14,71	Ruim
4	$2,65133 + 1,91208 \cdot I_1 - 0,0595307 \cdot I_1^2$	C.M	Amf	-0,00002	0	77,6	77,43	1,50	14,08	Ruim
5	$3,14897 + 1,58996 \cdot I_1 - 0,00329864 \cdot (I_1^3)$	C.M	Amf	-0,00002	0	77,5	77,33	1,50	14,11	Ruim
6	$-1,96437 + 5,76162 \cdot (I_1^{1/2}) - 0,0309057 \cdot I_1$	C.M	Amf	-0,00001	1	77,8	77,59	1,50	14,03	Ruim
7	$-8,40645 - 2,95112 \cdot I_1 + 0,096029 \cdot (I_1^2) + 14,1048 \cdot (I_1^{1/2})$	C.M	Amf	0,00010	2	77,8	77,58	1,50	14,03	Ruim
8	$7,35386 + 0,938519 \cdot I_1 - 6,41359 \cdot (1/I_1)$	C.M	Amf	0,00000	2	77,9	77,71	1,49	13,99	Ruim
9	$\ln(H_{dom}) = 1,14776 + 0,924698 \cdot \ln(I_1) - 0,100469 \cdot (\ln(I_1)^2)$	C.M	Amf	0,50233	0	71,0	70,76	1,64	16,15	Ruim
10	$\ln(H_{dom}) = 3,08887 - 4,03441 \cdot (1/I_1) + 2,64984 \cdot ((1/I_1)^2)$	C.M	Amf	0,14040	1	70,8	70,53	1,53	14,53	Ruim
11	$\ln(H_{dom}) = 3,46466 - 8,90106 \cdot (1/I_1) + 21,0224 \cdot ((1/I_1)^2) - 20,3658 \cdot ((1/I_1)^3)$	C.M	Amf	0,13509	2	71,2	70,84	1,50	14,28	Ruim
12	$17,9308 \cdot (1 - \exp(-0,189861 \cdot I_1))$	C.M	Amf	0,02643	1	77,0	76,89	1,52	14,28	Ruim
13	$29,5523 \cdot ((1 - \exp(-0,050295 \cdot I_1))^{1/(1-0,49051)})$	C.M	Amf	0,00026	2	77,7	77,55	1,50	14,04	Ruim
14	$\ln(H_{dom}) = 117,824 + (-116,496 \cdot ((1/I_1)^{0,00550277}))$	C.M	Amf	0,13310	2	70,6	70,40	1,51	14,37	Ruim
15	$42,0747 \cdot (1 - \exp(-0,0618062 \cdot (I_1^{0,785471})))^{0,838495}$	C.M	Amf	-0,00028	1	77,7	77,46	1,50	14,07	Ruim
16	$H_{dom} \cdot (\exp(1,74498 \cdot ((1/I_1) - (1/I_2))))$	DA BC	Amf	0,24681	3	85,1	85,14	1,01	9,06	Regular
17	$16,9117 \cdot ((H_{dom} / 16,9117)^{(1/I_2)})$	DA BC	Pmf	0,07832	15	90,5	90,57	0,80	7,11	Bom
18	$H_{dom} \cdot (((1 - \exp(-0,156862 \cdot I_2)) / (1 - \exp(-0,156862 \cdot I_1)))^{0,740481})$	DA BC	Amf	0,10328	4	86,1	86,11	0,98	8,65	Regular
19	$15,9262 \cdot ((H_{dom} / 15,9262)^{(\ln(1 - \exp(-0,244059 \cdot I_2)) / (\ln(1 - \exp(-0,244059 \cdot I_1))))})$	DA BC	Pmf	0,01436	20	90,9	90,86	0,79	6,96	Bom
20	$H_{dom} / (\exp(-2,34473 \cdot ((I_1^{(0,364945)}) - (I_2^{(0,364945)}))))$	DA BC	Amf	0,10129	4	86,1	86,10	0,98	8,65	Regular
21	$(\exp(2,83749)) \cdot ((H_{dom} / (\exp(2,83749)))^{((1/I_2)^{0,982253})})$	DA BC	Pmf	0,07792	13	90,5	90,52	0,81	7,13	Bom
22	$\exp(2,89287 - 2,41265 \cdot (1/I_1))$	DA AI	Amf	0,15998	1	69,7	69,61	1,60	15,21	Bom
23	$\exp(2,89287 - 2,41265 \cdot (1/I_1))$	DA AI	Pmf	0,15998	13	69,7	69,61	1,60	15,21	Regular
24	$28,4146 \cdot (1 - \exp(-0,0549119 \cdot I_1))^{0,679045}$	DA AI	Amf	0,00061	2	77,7	77,55	1,50	14,04	Bom
25	$28,4146 \cdot (1 - \exp(-0,0549119 \cdot I_1))^{0,679046}$	DA AI	Pmf	0,00061	8	77,7	77,55	1,50	14,04	Bom

Em que: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação; R<sup>2</sup><sub>ajustado</sub> = coeficiente de determinação ajustado; S<sub>yx</sub> = erro padrão residual; S<sub>yx</sub>% = erro padrão residual percentual; H<sub>dom</sub> = altura dominante; exp = exponencial; I<sub>is</sub> = idade em anos em I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>; ln = logaritmo neperiano; C.M. = curva média; DABC = diferença algébrica método de Bailey & Clutter; DAAl = diferença algébrica método de Alder; Amf = anamórfica; e, Pmf = polimórfica.

O melhor modelo foi o de Chapman & Richard (modelo 19), seguido por Schumacher & Hall (modelo 17) e Bailey & Clutter (modelo 21). Os três modelos apresentaram excelentes resultados de distribuição dos resíduos percentuais. O modelo Chapman & Richard (modelo 19) apresentou estabilidade total na classificação de sítio de 20 unidades amostrais, ou seja, 66,67% das parcelas foram classificadas num determinado sítio e mantiveram sua classificação até o último ano observado, demonstrando ser o melhor resultado entre todos modelos e procedimentos avaliados. A Figura 3.7 apresenta as curvas polimórficas dos três modelos com melhor estabilidade.



**FIGURA 3.7** Curvas polimórficas de índice de sítio geradas pelos três modelos com melhor estabilidade de classificação, em que: Chapman & Richard polimórfica (modelo 19 – primeiro mais estável); Schumacher polimórfica (modelo 17 – segundo mais estável); e, Bailey & Clutter polimórfica (modelo 21 – terceiro mais estável)

A Tabela 3.5 apresentam os limites inferior e superior na idade de referência provisória (9 anos), para cada classe de sítio obtidas pelo modelo

Chapman & Richard polimórfica (modelo 19), ajustado pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974).

**TABELA 3.5** Classes de sítio adotadas para *Tectona grandis* L.f., para os três povoamentos estudados na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre, considerando o modelo de Chapman & Richard polimórfica, método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974)

Classes de sítio	Intervalo na idade de referência considerada (m)	Índices de sítio
I	12,0 — 15,0	13,5
II	15,0 — 18,0	16,5
III	18,0 — 21,0	19,5

Com desempenho um pouco inferior que Chapman & Richard (modelo 19), o modelo Schumacher & Hall (modelo 17) conseguiu manter a estabilidade total para as árvores dominantes de 15 unidades amostrais, sendo, portanto, a segunda melhor alternativa.

Os modelos Schumacher & Hall (modelo 23), pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980) e Bailey & Clutter três parâmetros (modelo 21), pelo método diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter, apresentaram a mesma quantidade de unidades amostrais totalmente estáveis. A estabilidade total para as árvores dominantes para 13 U.A., associada ao bom desempenho estatístico dos dois modelos, garante outra boa opção de seleção.

O método da curva média ou curva guia demonstrou ser para a base de dados estudada, um procedimento com menor precisão estatística, principalmente pelos fracos resultados na distribuição residual, além de gerar classificações altamente instáveis, em que todos os modelos testados não conseguiram manter a estabilidade total, nem mesmo para 10% das unidades amostrais.

O fraco desempenho da curva média está relacionado com a geração de curvas anamórficas. O conceito de uma mesma taxa de crescimento em altura para sítios distintos que compõem uma mesma família já demonstrou não representar acuradamente o crescimento de povoamentos florestais, conforme relatado por Scolforo (1997) e demonstrado nos resultados deste trabalho. No entanto, este procedimento ainda é bastante empregado para a classificação de sítios regionais (Keogh, 1982) e devido à facilidade de aplicação, também é bastante utilizado em plantios comerciais de teca (Keogh, 1990; Malende & Temu, 1990).

A experiência em classificação de sítios florestais no mundo inteiro e com várias espécies tem revelado que o método da diferença algébrica tem apresentado bons resultados estatísticos e de estabilidade de classificação. Estes resultados já foram apresentados por Bailey & Clutter (1974), Borders et al. (1984), Gonzalez et al. (1992), Cunha Neto et al. (1996), Scolforo (1992), Prodan et al. (1997), Nunifu & Murchison (1999), Cecere (2000) e Campos & Leite (2002).

### **5.7 Teste de anamorfismo para o modelo selecionado**

O teste de anamorfismo foi realizado para o modelo Chapman & Richard polimórfica (modelo 19). Após estabelecer a relação linear entre o índice de sítio e a altura dominante ( $S = \beta_0 + \beta_1 H_{dom} + \varepsilon_i$ ) nas idades em estudo, observou-se que, em todas as idades entre 2 a 9,52 anos, existiu uma alta correlação entre o índice de sítio e a altura das dominantes, em que os coeficientes de correlação (R) sempre foram maiores que 0,999. A interseção  $\beta_0$  foi aproximadamente igual a zero para todas as idades. A inclinação  $\beta_1$  foi igual a 1 na idade de referência de 9 anos, maior que 1 para menores idades e menor que 1 para maiores idades que a idade de referência (Tabela 3.6).

**TABELA 3.6** Parâmetros estimados para relação índice de sítio – altura das árvores dominantes para diferentes idades

Idades consideradas (anos)	$\beta_0$	$\beta_1$
2	0,0000000103361	2,1578
3	-0,0000000139211	1,6798
4	0,0000001289820	1,4364
5	0,0000000000000	1,2861
6	-0,0000000292859	1,1826
6,45	0,0000001571390	1,1450
7	0,0000002007970	1,1063
7,4	-0,0000001217630	1,0810
8	-0,0000000870151	1,0473
9	0,0000000000000	1,0000
9,52	-0,0000000225609	0,9789

Este comportamento indica que o índice de sítio não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local, o que indica que as curvas de índice de sítio para a *Tectona grandis* L.f. das áreas estudadas têm um padrão anamórfico. A dispersão das observações individuais em relação à linha de regressão sugere uma relação linear com intercepto zero, como sendo uma suposição válida para a maioria dos casos.

Estudos com diversas espécies também apresentaram o mesmo comportamento e foram registradas por Campos et al. (1985) para *Eucalyptus grandis* na região de Bom Despacho, MG; Scolforo e Machado (1988 a,b) para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina; Scolforo (1992) para *Pinus caribaea* var *hondurensis* na região de Agudos, SP e por Nanang & Nunifu (1999) para *Azadirachta indica* A. Juss. e *Tectona grandis* L.f. em Ghana setentrional.

Entretanto, os resultados de seleção dos modelos de classificação de sítio demonstraram que os modelos polimórficos são significativamente melhores que os modelos que geram curvas anamórficas. Scolforo (1997) afirma que evidências têm sido acumuladas no sentido de que curvas construídas de

maneira anamórfica freqüentemente não representam acuradamente o crescimento do povoamento.

Discute-se que a curva guia é bastante acurada somente quando as faixas de índice de sítio são representadas em todas as idades. Isto não ocorreu para nenhum dos modelos testados, pois, enquanto todas as faixas de índice de sítio eram representadas nas menores idades, apenas duas ou três faixas passavam a ser representadas nas maiores idades, o que provoca forte instabilidade do procedimento de classificação.

## 6 CONCLUSÃO

- Os modelos polimórficos ajustados pela diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974) apresentaram os melhores resultados estatísticos e de estabilidade de classificação de sítio.
- O modelo polimórfico de Chapman & Richard (modelo 19) apresentou os melhores resultados entre todos os 25 modelos para os três métodos testados.
- O modelo Schumacher & Hall (modelo 17), ajustado pelo método da diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974), conseguiu manter a estabilidade total para as árvores dominantes de 15 unidades amostrais, sendo, portanto, a segunda melhor alternativa.
- Os modelos Schumacher & Hall (modelo 23), pelo método da diferença algébrica proposto por Alder (1980), obtiveram bons resultados e apresentaram estatísticas similares ao modelo de Bailey & Clutter três parâmetros (modelo 21) ajustado pelo método diferença algébrica proposto por Bailey & Clutter (1974). No entanto, ambos os modelos apresentaram resultados inferiores aos modelos 19 e 17;
- Os resultados obtidos com os ajustes realizados pela curva média demonstraram forte superestimativas para as menores idades e grande instabilidade de classificação de sítios para as unidades amostrais avaliadas.
- O teste de anamorfismo para o modelo selecionado (modelo 19) demonstrou que a base de dados segue um padrão anamórfico; porém, a ausência de observações em todas as faixas de índice de sítio para todas as idades não garantiu boa performance dos modelos anamórficos.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDER, D. **Forest volume estimation and yield prediction: yield prediction..** Rome: FAO, 1980. v.2. 194p. (FAO Forestry Paper 22/2).
- BAILEY, R.L.; CLUTTER, J.L. Base age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, v.20, n.2, p.155-159, 1974.
- BARUSO, A.P. **A determinação de funções de crescimento mediante análise do tronco.** Curitiba: UFPR, 1977. (Tese não defendida).
- BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L.; WARE, K.D. Slash site index from a polymorphic model by joining (splining) nonpolynomial segments with an algebraic difference method. **Forest Science**, v. 30, n.2, p.423-441, 1984.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** Viçosa, MG: UFV, 2002. 407 p.
- CAMPOS, J.C.C.; TORQUATO, M.C.; RIBEIRO, G.A. Equações para calcular índices de local e incremento da altura em plantações puras de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.9, n.1, p.1-9, 1985.
- CECERE, S. **Construção de curvas de índice de sítio para plantios clonais de *Eucalyptus grandis* através do método da diferença algébrica.** 2000. 19p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CUNHA NETO, F.R. et al. Uso da diferença algébrica para construção de curvas de índice de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luiz Antônio – SP. **Revista Cerne**, Lavras, v.2, n.2, p.10-26, 1996.
- FIGUEIREDO, E.O. **Avaliação do crescimento da teca (*Tectona grandis* L.f.) pela análise de tronco.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2001b. 4 p. (Instrução Técnica, 35).
- GONZALEZ, A.M.F.; SMITH, D.M. ; MALDONADO, H.R. Site index for *Pinus caribaea* var. honolurensis in “La Sabana”, Oaxaca, Mexico. **Commonwealth Forestry Review**, v.71, n.1, p.47-51, 1992.
- GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais.** São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509p.
- KEOGH, R.M. Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.4, p.143-153, 1982.

KEOGH, R.M. Growth rates of teak (*Tectona grandis*) in the Caribbean/Central-American region. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.35, p.311-314, 1990.

MALENDE, Y.H.; TEMU, A.B. Site-Index Curves and Volume Growth of Teak (*Tectona grandis*) at Mtibwa - Tanzania. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.31, p.91-99, 1990.

NAIR, C.T.S.; SOUVANNAVONG, O. Nuevos temas de investigación en la ordenación de la teca. **Unasyuva**, Roma, v.51, n.201, p.45-54, 2000.

NANANG, D.M.; NUNIFU, T.K. Selecting a functional form for anamorphic site index curve estimation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.118, p.211-221, 1999.

NUNIFU, T.K.; MURCHISON, H.G. Provisional yield models of Teak (*Tectona grandis* Linn f.) plantations in northern Ghana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p.171-178, 1999.

PRODAN, M. et al. **Mensura florestal**. San José, Costa Rica: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 1997. 586p.

SCOLFORO, J.R.S. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **IPEF**, Piracicaba, v.45, p.40-47, 1992.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal**: métodos para classificação de sítios florestais. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997a. 151p. (Textos Acadêmicos).

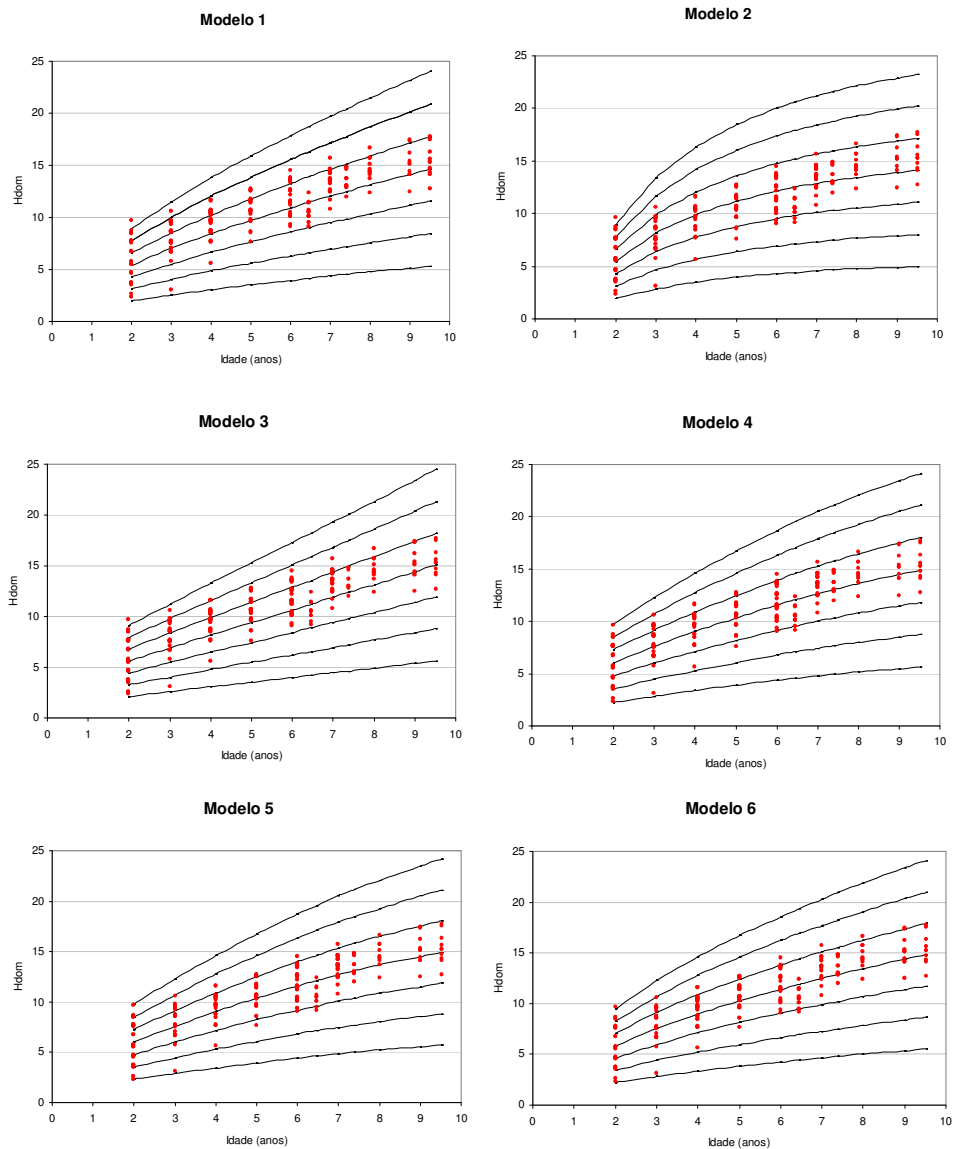
SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio, para plantações de *Pinus elliottii* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v.18, n.112, p.140-158, jun./dez. 1988a.

SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v.18, n.1-2, p.159-173, 1988b.

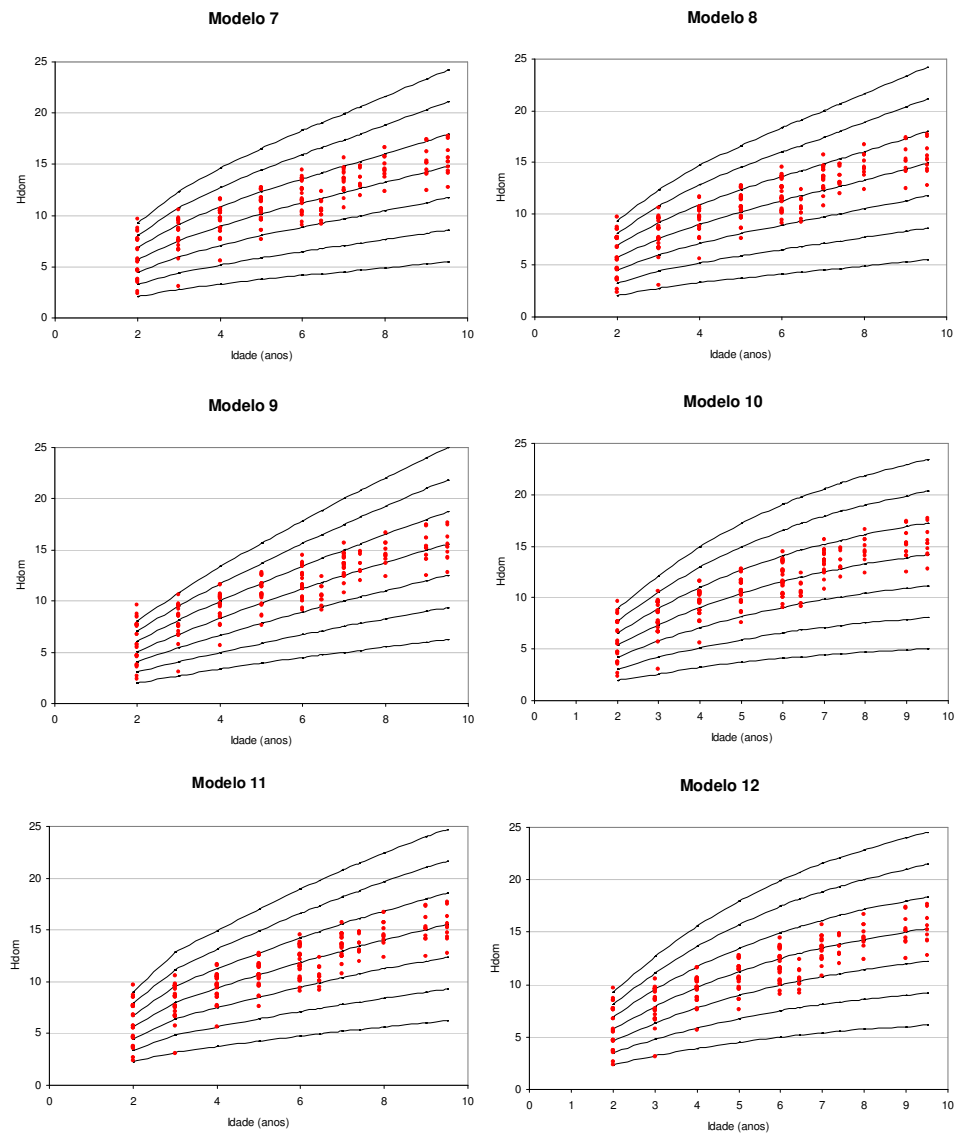
## ANEXOS

### ANEXO A

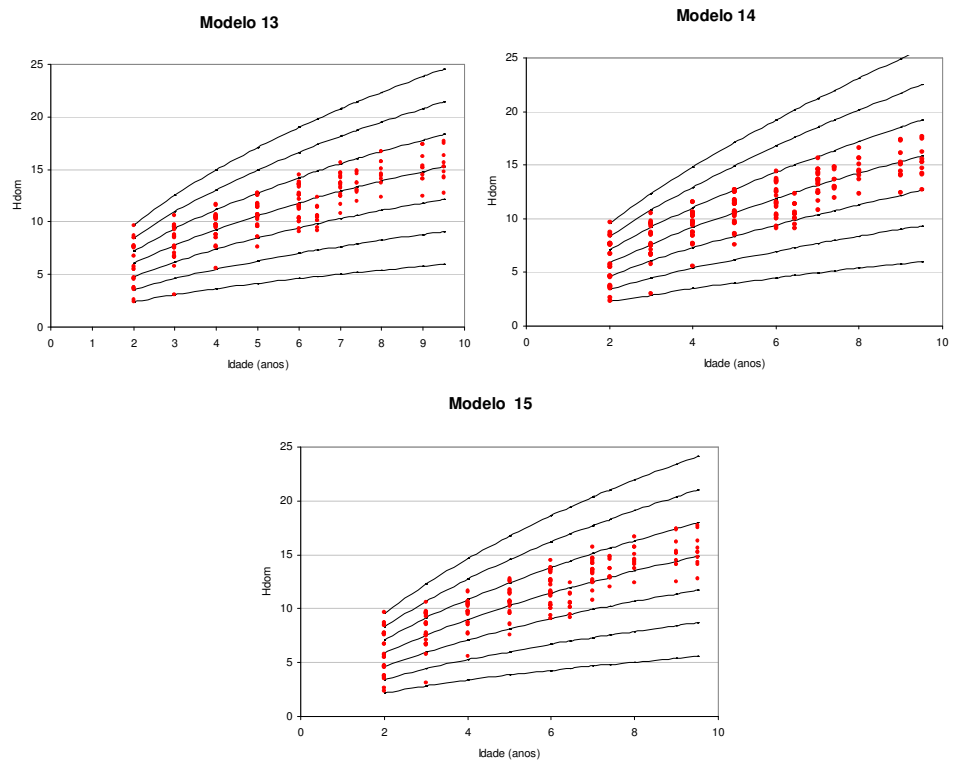
	<b>Página</b>
<b>FIGURA 1.A</b> Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 1 a 6).....	160
<b>FIGURA 2.A</b> Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 7 a 12).....	161
<b>FIGURA 3.A</b> Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 13 a 15).....	162
<b>FIGURA 4.A</b> Curvas anamórficas e polimórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da diferença algébrica proposto Bailey & Clutter (1974), considerando os modelos: Schumacher anamórfica e polimórfica (modelo 16 e 17), Chapman & Richard anamórfica e polimórfica (modelo 18 e 19) e Bailey & Clutter anamórfica e polimórfica (modelo 20 e 21).....	163
<b>FIGURA 5.A</b> Curvas anamórficas e polimórficas de índice de sítio, geradas para os três povoamentos de teca estudados pelo método da diferença algébrica proposto Alder (1980), considerando os modelos: Schumacher anamórfica e polimórfica (modelo 22 e 23) e Chapman & Richard anamórfica e polimórfica (modelo 24 e 25).....	164
<b>FIGURA 6.A</b> Índice de sítio em relação à altura dominante das idades de 2 a 7,40 anos, para <i>Tectona grandis</i> L.f., para os três povoamentos na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre.....	165



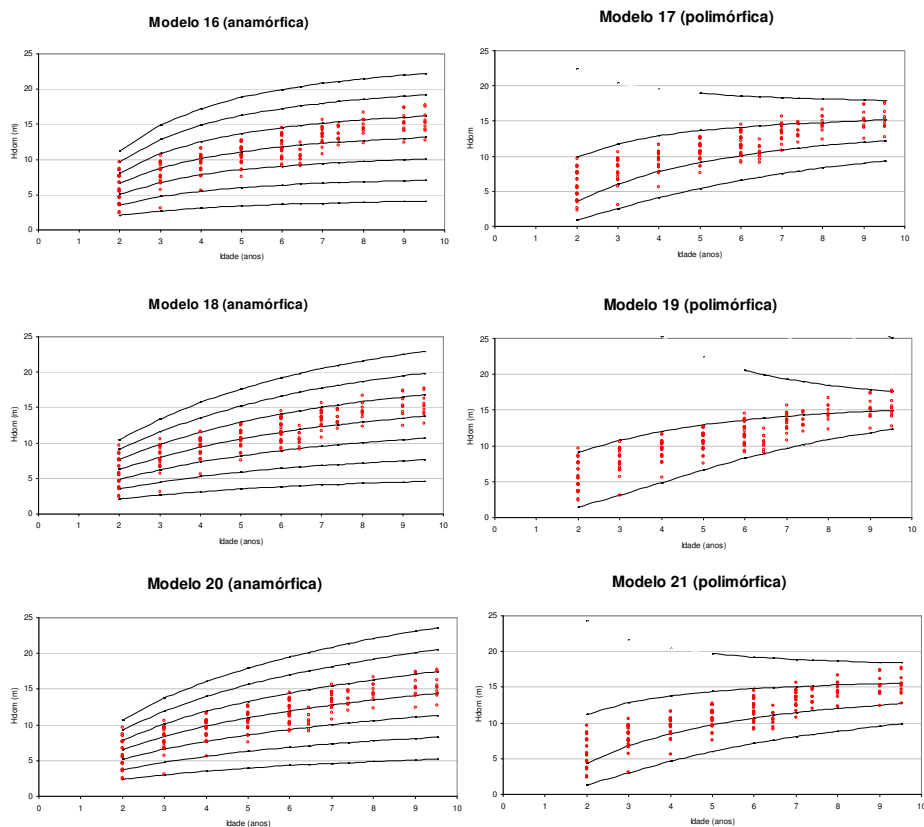
**FIGURA 1.A** Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 1 a 6)



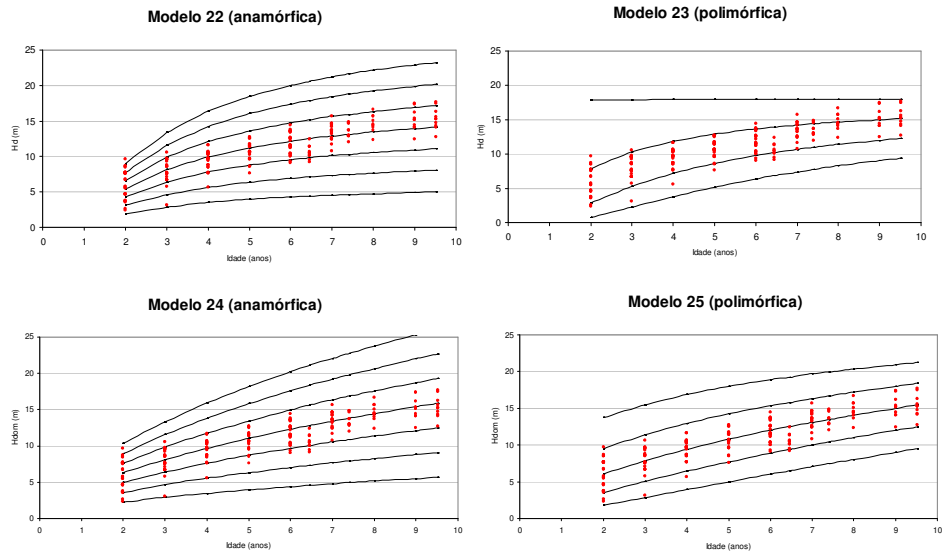
**FIGURA 2.A** Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 7 a 12)



**FIGURA 3.A** Curvas anamórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da curva guia (modelos de 13 a 15)

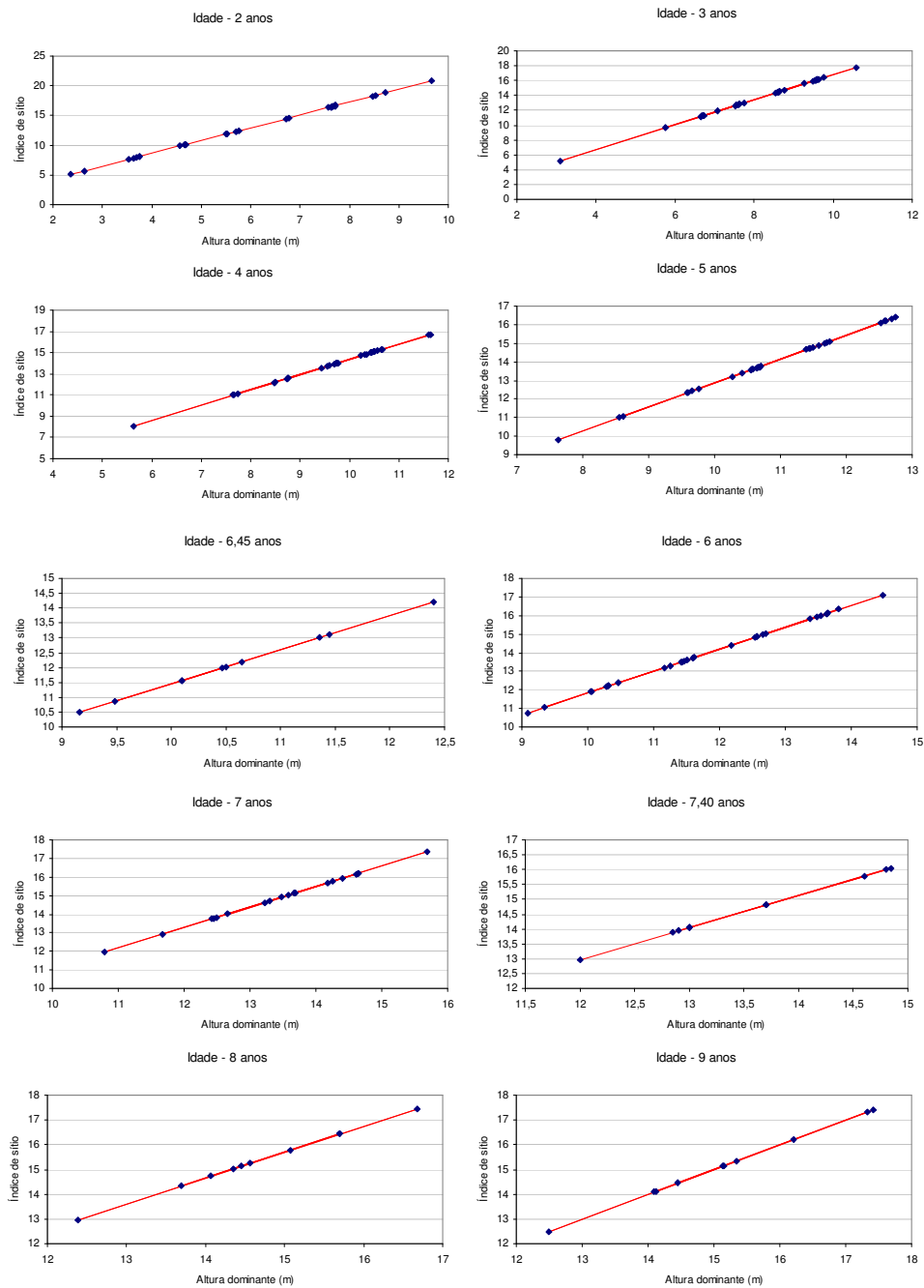


**FIGURA 4.A** Curvas anamórficas e polimórficas de índice de sítio geradas, para os três povoamentos de teca estudados, pelo método da diferença algébrica proposto Bailey & Clutter (1974), considerando os modelos: Schumacher anamórfica e polimórfica (modelo 16 e 17), Chapman & Richard anamórfica e polimórfica (modelo 18 e 19) e Bailey & Clutter anamórfica e polimórfica (modelo 20 e 21)



**FIGURA 5.A** Curvas anamórficas e polimórficas de índice de sítio, geradas para os três povoamentos de teca estudados pelo método da diferença algébrica proposto Alder (1980), considerando os modelos: Schumacher anamórfica e polimórfica (modelo 22 e 23) e Chapman & Richard anamórfica e polimórfica (modelo 24 e 25)





**FIGURA 6.A** Índice de sítio em relação à altura dominante das idades de 2 a 7,40 anos, para *Tectona grandis* L.f., para os três povoadamentos na microrregião do Baixo Rio Acre, Acre

## **CAPÍTULO 4**

### **SELEÇÃO DE MODELOS POLINOMIAIS PARA REPRESENTAR O PERFIL E VOLUME DO FUSTE DE *Tectona grandis* L.f.**

## 1 RESUMO

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L.f.** 2005. Cap. 4, p. 166-214. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

As estimativas do volume de madeira que possibilite a predição de múltiplos produtos viabilizam significativos ganhos na administração dos povoamentos florestais. A estimação precisa do volume de um povoamento florestal torna-se importante à medida que as empresas florestais integram verticalmente as suas atividades e o resíduo da elaboração de um produto torna-se matéria-prima para a elaboração de outro (Ahrens & Holbert, 1981). Os estudos realizados objetivaram avaliar a acurácia dos modelos polinomiais propostos por Schöepfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), na estimativa dos diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Tectona grandis* L.f. de quatro povoamentos localizados na microrregião do Baixo Rio Acre e, ainda, testar a identidade do melhor modelo polinomial, avaliando-se a adequação de manter as áreas agrupadas ou segregá-las em grupos menores ou individualmente. A base de dados foi constituída de 159 árvores cubadas rigorosamente pelo método de Smalian e pela análise de tronco completa. Na avaliação da acurácia dos modelos foram empregadas as estatísticas de desvio médio, desvio padrão das diferenças, soma dos quadrados dos resíduos relativo e resíduo percentual. O modelo que gerou as melhores estimativas de diâmetros e volumes ao longo do fuste foi o modelo Goulding & Murray (1976), seguido pelos modelos Hradetzky (1976) e Schöepfer (1966). O teste de identidade de modelo mostrou ser mais adequado realizar ajustes independentes para as áreas 1 e 4 e para o subgrupo 2 e 3.

Palavra-chave: Volumetria, função de afilamento, taper, identidade de modelos, teca, estimativas de diâmetros e volumes.

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Selection of polynomial models to represent the profile and volume of the bole of *Tectona grandis* L.f** . 2005. Chap. 4. p. 166-214. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The estimates of the volume of wood which enables the prediction of multiple products makes significant gains in the administration forest. The precise estimate of the volume of a forest stand become important as forest enterprises integrate vertically their activities and the residue of the manufacture of a product become the raw material for the manufacture of other (Ahrens & Holbert, 1981). The accomplished studies aimed to evaluate the accuracy of the polynomial models proposed by Schöepfer (1966), Hradetzky (1976) and Goulding & Murray (1976) in the estimate of the diameters and volumes along the bole of *Tectona grandis* L.f from four stands situated in the Baixo Rio Acre micro region and further, to test the identity of the best polynomial model by evaluating the adequacy of maintaining the grouped areas or segregate them into smaller groups or singly. The data base was made up of 159 trees scaled rigorously by the Smalian method and by the complete trunk analysis. in the evaluation of the accuracy of the models, the statistics of average deviation, standard deviation of differences, square summation of relative residue and percent residue. The model which generated the best estimates of diameters and volume along the bole was the Goulding & Murray (1976) model, followed by the models of Hradetzky (1976) and Schöepfer (1966). The model identity test proved more adequate to perform independent fit for areas 1 and 4 and for subgroup 2 and 3.

Key-words: Volumetry, tapering function, taper, identity of models , teak, diameter and volume estimates.

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser);  
Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-  
adviser)

### 3 INTRODUÇÃO

O planejamento e a otimização das atividades de exploração de florestas plantadas dependem da precisão das estimativas volumétricas para uma determinada área. As estimativas do volume de madeira que possibilite a predição de múltiplos produtos viabilizam significativos ganhos na administração dos povoamentos florestais.

A estimação precisa do volume de um povoamento florestal torna-se importante à medida que as empresas florestais integram verticalmente as suas atividades e o resíduo da elaboração de um produto torna-se matéria-prima para a elaboração de outro (Ahrens & Holbert, 1981).

Contudo, o desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o perfil da árvore e os estudos da acurácia de suas estimativas têm se tornado uma poderosa ferramenta na administração de empreendimentos florestais, sem que haja oneração dos custos do inventário florestal.

Entre as tendências de modelagem pode-se citar os:

- modelos simplificados: que não consideram a altura total, mas a distância entre um diâmetro qualquer ( $d$ ) e a extremidade da árvore, além do DAP;
- modelos polinomiais: são aqueles baseados principalmente na comparação entre a variável dependente  $(d/DAP)^2$  ou  $(d/D_{0,1})^2$  e os polinômios formados pela variável independente  $(h/H_i)$ ;
- modelos sigmóides: utilizam transformações de variáveis de modo que o modelo se assemelha à forma natural dos troncos. Trata-se de expressões matemáticas que geram um perfil semelhante a uma curva sigmóide;

- modelos segmentados: consistem no uso de submodelos justapostos, cada um representando uma porção do tronco. A união dos submodelos se dá por meio da imposição de restrições ao modelo geral;
- modelos definidos por meio de análise multivariada: baseiam-se na aplicação de análise multivariada (análise de componentes principais) para investigar as variações existentes na estrutura dos dados e definir o modelo de regressão a ser utilizado para descrever o perfil do tronco; e,
- modelos trigonométricos.

Além das vantagens referentes à flexibilidade e amplitude das informações geradas, as funções de afilamento apresentam ainda o princípio da compatibilidade entre o volume total e os volumes comerciais estimados. Tal princípio garante que a soma dos volumes comerciais seja sempre menor que o volume total (Scolforo, 1997).

Dessa maneira, torna-se cada vez mais importante a realização de estudos que promovam uma administração mais eficiente da matéria-prima florestal. Assim, os estudos objetivaram:

- estudar e avaliar a acurácia dos modelos polinomiais de quinto grau, proposto por Schöepfer (1966); o modelo polinomial com potências inteiras e fracionárias, proposto por Hradetzky (1976); e, o modelo de polinomial de Goulding & Murray (1976) para a estimativa dos diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Tectona grandis* L.f., considerando a base de dados de quatro povoamentos;
- averiguar se o melhor modelo para estimativas de diâmetro também será o melhor para estimativas de volume; e,
- testar a identidade do melhor modelo polinomial, avaliando-se a adequação de manter as áreas agrupadas ou segregá-las em grupos menores ou individualmente.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados**

Os ajustes para as funções de afilamento empregaram informações dendrométricas dos povoamentos das áreas 1, 2, 3 e 4, cujas características são as mesmas descritas nos itens 4.1 e 4.2 do capítulo 2.

### **4.2. Cubagem rigorosa**

A amostra das árvores a serem cubadas rigorosamente foi baseada na distribuição diamétrica dos povoamentos, cujas classes de diâmetro foram construídas com um DAP mínimo de 5 cm e as amplitudes de classes delimitadas a cada 4 centímetros.

Em cada área, nas proximidades das parcelas permanentes, foram selecionadas as árvores-amostra; para cada árvore-amostra foram realizadas determinações de altura total ( $H_t$ ), DAP e altura comercial até o diâmetro limite de 3 cm e duas medidas de espessura de casca em todas as posições de diâmetro ao longo do fuste.

Os diâmetros foram medidos nas alturas de 0,00 m, 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00m, 1,30 m, 1,50 m e, posteriormente, a cada 0,50 m até atingir a altura comercial. Com as tomadas de diâmetro nas citadas alturas absolutas, optou-se pelo método de Smalian para calcular os volumes, conforme descrito por Husch et al. (1982).

Também foram abatidas árvores dominantes para análise de tronco completa (ANATRO), visando à classificação de sítio. Estas árvores auxiliaram na composição da base de dados geral, principalmente para os indivíduos das duas últimas classes de diâmetro.

A operação de cubagem rigorosa e da análise de tronco permitiu a construção de uma base de dados de 159 árvores para ajustamento dos modelos de afilamento, em que 129 árvores oriundas da cubagem rigorosa e 30 árvores da análise completa de tronco, estas últimas auxiliaram a composição das classes diamétrica 3 e 4, conforme apresentado na Tabela 4.1.

**TABELA 4.1** Frequência de árvores cubadas de *Tectona grandis* L.f. para os quatro povoamentos, nas diferentes classes de diâmetro

Número de classes	Classe de diâmetro (cm)	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	Frequência
		Idade em anos				
		9,52	2,54	7,40	6,45	
1	5 — 9	15	15	15	15	60
2	9 — 13	15	-	15	15	45
3	13 — 17	15	-	15	15	45
4	17 — 21	9	-	-	-	9
<b>Total</b>		<b>54</b>	<b>15</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>159</b>

### 4.3 Ajuste dos modelos de afilamento

O procedimento de ajuste foi realizado considerando-se os diâmetros à altura de 1,3 m do solo (DAP) com casca, para a base de dados das quatro áreas de estudo em conjunto. Posteriormente, as equações ajustadas foram avaliadas pelo teste de identidade de modelos.

#### 4.3.1 Modelos de afilamentos

##### 4.3.1.1 Polinômio de quinto grau (Schöepfer, 1966)

Este é um dos modelos de afilamento mais difundidos no meio florestal. O modelo é expresso por:



$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i}{H_t} \right) + \beta_2 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^2 + \beta_3 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^3 + \beta_4 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^4 + \beta_5 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^5 + \varepsilon_i$$

em que:

- $\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados;
- $d_i$  = diâmetro comercial (cm) ou diâmetro correspondente a qualquer altura  $h_i$ , especificada ou comercial;
- DAP = diâmetro a 1,3 m de altura (cm);
- $H_t$  = altura total (m);
- $h_i$  = altura comercial (m); e,
- $\varepsilon_i$  = erro de estimativa.

Para a obtenção dos diâmetros a diversas alturas ao longo do fuste, basta isolar ( $d_i$ ), obtendo-se assim a função de afilamento, sendo:

$$d_i = DAP \cdot \left[ \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i}{H_t} \right) + \beta_2 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^2 + \beta_3 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^3 + \beta_4 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^4 + \beta_5 \left( \frac{h_i}{H_t} \right)^5 \right] \quad (4.1)$$

Para a obtenção do volume (V) de um sólido de revolução, inicialmente é necessário realizar a seguinte simplificação para que a equação possa ser integrada:

$$c_0 = \beta_0; \quad c_1 = \beta_1 / H_t; \quad c_2 = \beta_2 / H_t^2; \quad \dots; \quad c_5 = \beta_5 / H_t^5$$

Realizada a simplificação, a expressão 4.1 agora assume a seguinte forma:

$$d_i = DAP \cdot (c_0 + c_1 \cdot h_i + c_2 \cdot h_i^2 + c_3 \cdot h_i^3 + c_4 \cdot h_i^4 + c_5 \cdot h_i^5) \quad (4.2)$$

Para se obter o volume (V), é necessário integrar suas áreas seccionais (g<sub>i</sub>) entre os limites inferior (h<sub>1</sub>) e o superior (h<sub>2</sub>) que se deseja conhecer. No caso de uma árvore, se o volume total é desejado, então h<sub>1</sub> = 0 e h<sub>2</sub> = altura total da árvore. A representação da integral é mostrada a seguir:

$$V = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h \quad (4.3)$$

em que:

$$K = \pi / 40000;$$

d<sub>i</sub> = diâmetro correspondente a qualquer altura h<sub>i</sub> ao longo do fuste.

Substituindo (4.2) em (4.3), tem-se:

$$V = K \cdot DAP^2 \cdot \int_{h_1}^{h_2} (c_0 + c_1 h_i + c_2 h_i^2 + c_3 h_i^3 + c_4 h_i^4 + c_5 h_i^5)^2 \delta h_i \quad (4.4)$$

Antes de proceder a integração, é necessário elevar ao quadrado a expressão entre parênteses. Dessa forma tem-se:

$$\begin{aligned} & \frac{c_0 + c_1 h_i^2 + c_2 h_i^2 + c_3 h_i^3 + c_4 h_i^4 + c_5 h_i^5}{c_0 + c_1 h_i^2 + c_2 h_i^2 + c_3 h_i^3 + c_4 h_i^4 + c_5 h_i^5} \\ & \times \\ & \frac{c_0 c_5 h_i^5 + c_1 c_5 h_i^{(1+5)} + c_2 c_5 h_i^{(2+5)} + c_3 c_5 h_i^{(3+5)} + c_4 c_5 h_i^{(4+5)} + c_5^2 h_i^{(5+5)}}{c_0 c_4 h_i^4 + c_1 c_4 h_i^{(1+4)} + c_2 c_4 h_i^{(2+4)} + c_3 c_4 h_i^{(3+4)} + c_4^2 h_i^{(4+4)} + c_5 c_4 h_i^{(5+4)}} \\ & \frac{c_0 c_3 h_i^3 + c_1 c_3 h_i^{(1+3)} + c_2 c_3 h_i^{(2+3)} + c_3^2 h_i^{(3+3)} + c_4 c_3 h_i^{(4+3)} + c_5 c_3 h_i^{(5+3)}}{c_0 c_2 h_i^2 + c_1 c_2 h_i^{(1+2)} + c_2^2 h_i^{(2+2)} + c_3 c_2 h_i^{(3+2)} + c_4 c_2 h_i^{(4+2)} + c_5 c_2 h_i^{(5+2)}} \\ & \frac{c_0 c_1 h_i^1 + c_1^2 h_i^{(1+1)} + c_2 c_1 h_i^{(2+1)} + c_3 c_1 h_i^{(3+1)} + c_4 c_1 h_i^{(4+1)} + c_5 c_1 h_i^{(5+1)}}{c_0^2 + c_1 c_0 h_i^1 + c_2 c_0 h_i^2 + c_3 c_0 h_i^3 + c_4 c_0 h_i^4 + c_5 c_0 h_i^5} \\ & + \\ & \frac{c_0^2 + 2.(c_1 c_0 h_i^1) + 2.(c_2 c_0 h_i^2) + 2.(c_3 c_0 h_i^3) + 2.(c_4 c_0 h_i^4) + 2.(c_5 c_0 h_i^5)}{c_1^2 h_i^{(1+1)} + 2.(c_2 c_1 h_i^{(2+1)}) + 2.(c_3 c_1 h_i^{(3+1)}) + 2.(c_4 c_1 h_i^{(4+1)}) + 2.(c_5 c_1 h_i^{(5+1)})} \\ & \frac{+ c_2^2 h_i^{(2+2)} + 2.(c_3 c_2 h_i^{(3+2)}) + 2.(c_4 c_2 h_i^{(4+2)}) + 2.(c_5 c_2 h_i^{(5+2)})}{+ c_3^2 h_i^{(3+3)} + 2.(c_4 c_3 h_i^{(4+3)}) + 2.(c_5 c_3 h_i^{(5+3)})} \\ & \frac{+ c_4^2 h_i^{(4+4)} + 2.(c_5 c_4 h_i^{(5+4)})}{+ c_5^2 h_i^{(5+5)}} \end{aligned}$$

A integral então fica:

$$\begin{aligned}
V = \frac{\pi \text{DAP}^2}{40000} \int_{h_1}^{h_2} & \left[ c_0^2 + 2(c_1 c_0 h_i^1) + 2(c_2 c_0 h_i^2) + 2(c_3 c_0 h_i^3) + 2(c_4 c_0 h_i^4) + 2(c_5 c_0 h_i^5) \right. \\
& + c_1^2 h_i^{(1+1)} + 2(c_2 c_1 h_i^{(2+1)}) + 2(c_3 c_1 h_i^{(3+1)}) + 2(c_4 c_1 h_i^{(4+1)}) + 2(c_5 c_1 h_i^{(5+1)}) + c_2^2 h_i^{(2+2)} + 2(c_3 c_2 h_i^{(3+2)}) \\
& + 2(c_4 c_2 h_i^{(4+2)}) + 2(c_5 c_2 h_i^{(5+2)}) + c_3^2 h_i^{(3+3)} + 2(c_4 c_3 h_i^{(4+3)}) + 2(c_5 c_3 h_i^{(5+3)}) + c_4^2 h_i^{(4+4)} + 2(c_5 c_4 h_i^{(5+4)}) \\
& \left. + c_5^2 h_i^{(5+5)} \right] \quad (4.5)
\end{aligned}$$

Resolvendo a integral da expressão (4.5), obtém-se:

$$\begin{aligned}
V = \frac{\pi \text{DAP}^2}{40000} \int_{h_1}^{h_2} & \left[ c_0^2 h_i + 2c_1 c_0 \left( \frac{h_i^{(1+1)}}{1+1} \right) + 2c_2 c_0 \left( \frac{h_i^{(2+1)}}{2+1} \right) + 2c_3 c_0 \left( \frac{h_i^{(3+1)}}{3+1} \right) \right. \\
& + 2c_4 c_0 \left( \frac{h_i^{(4+1)}}{4+1} \right) + 2c_5 c_0 \left( \frac{h_i^{(5+1)}}{5+1} \right) + c_1^2 \left( \frac{h_i^{(1+1+1)}}{1+1+1} \right) + 2c_2 c_1 \left( \frac{h_i^{(2+1+1)}}{2+1+1} \right) + 2c_3 c_1 \left( \frac{h_i^{(3+1+1)}}{3+1+1} \right) \\
& + 2c_4 c_1 \left( \frac{h_i^{(4+1+1)}}{4+1+1} \right) + 2c_5 c_1 \left( \frac{h_i^{(5+1+1)}}{5+1+1} \right) + c_2^2 \left( \frac{h_i^{(2+2+1)}}{2+2+1} \right) + 2c_3 c_2 \left( \frac{h_i^{(3+2+1)}}{3+2+1} \right) + 2c_4 c_2 \left( \frac{h_i^{(4+2+1)}}{4+2+1} \right) \\
& + 2c_5 c_2 \left( \frac{h_i^{(5+2+1)}}{5+2+1} \right) + c_3^2 \left( \frac{h_i^{(3+3+1)}}{3+3+1} \right) + 2c_4 c_3 \left( \frac{h_i^{(4+3+1)}}{4+3+1} \right) + 2c_5 c_3 \left( \frac{h_i^{(5+3+1)}}{5+3+1} \right) + c_4^2 \left( \frac{h_i^{(4+4+1)}}{4+4+1} \right) \\
& \left. + 2c_5 c_4 \left( \frac{h_i^{(5+4+1)}}{5+4+1} \right) + c_5^2 \left( \frac{h_i^{(5+5+1)}}{5+5+1} \right) \right]_{h_2}^{h_1} + \mathcal{E}_i \quad (4.6)
\end{aligned}$$

Simplificando (4.6), tem-se:

$$\begin{aligned}
V = \text{K.DAP}^2 & \left[ c_0^2 h_i + c_1 c_0 h_i^2 + \frac{2}{3} c_2 c_0 h_i^3 + \frac{1}{2} c_3 c_0 h_i^4 \right. \\
& \left. + \frac{2}{5} c_4 c_0 h_i^5 + \frac{1}{3} c_5 c_0 h_i^6 + \frac{1}{3} c_1^2 h_i^3 + \frac{1}{2} c_2 c_1 h_i^4 + \frac{2}{5} c_3 c_1 h_i^5 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{3} c_4 c_1 h_i^6 + \frac{2}{7} c_5 c_1 h_i^7 + \frac{1}{5} c_2^2 h_i^5 + \frac{1}{3} c_3 c_2 h_i^6 + \frac{2}{7} c_4 c_2 h_i^7 \\
& + \frac{1}{4} c_5 c_2 h_i^8 + \frac{1}{7} c_3^2 h_i^7 + \frac{2}{7} c_4 c_3 h_i^8 + \frac{2}{9} c_5 c_3 h_i^9 + \frac{1}{9} c_4^2 h_i^9 \\
& + \frac{1}{5} c_5 c_4 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11} \Big]_{h_2}^{h_1} + \mathcal{E}_i
\end{aligned}$$

A equação também pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}
V = K.DAP^2 & \left[ c_0^2 h_i + c_1 c_0 h_i^2 + \left( \frac{2}{3} c_2 c_0 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_i^3 + \left( \frac{1}{2} c_3 c_0 + \frac{1}{2} c_2 c_1 \right) h_i^4 \right. \\
& + \left( \frac{2}{5} c_4 c_0 + \frac{2}{5} c_3 c_1 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_i^5 + \left( \frac{1}{3} c_4 c_1 + \frac{1}{3} c_5 c_0 + \frac{1}{3} c_3 c_2 \right) h_i^6 \\
& + \left( \frac{2}{7} c_5 c_1 + \frac{2}{7} c_4 c_2 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_i^7 + \left( \frac{1}{4} c_5 c_2 + \frac{2}{7} c_4 c_3 \right) h_i^8 \\
& \left. + \left( \frac{2}{9} c_5 c_3 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_i^9 + \frac{1}{5} c_5 c_4 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11} \right]_{h_2}^{h_1} + \mathcal{E}_i
\end{aligned}$$

#### 4.3.1.2 Polinômio de potências fracionárias e inteiras (Hradetzky, 1976)

Segundo Ferreira (2004), o modelo Hradetzky (1976) diferencia-se do modelo proposto por Schöpfer (1966) por apresentar potências fracionárias e inteiras como tentativa de melhor representar o perfil da árvore. Schöpfer (1966) já relatava que o polinômio do 5º grau, embora represente bem o perfil da árvore, não representa tão bem na porção inferior, já que há mais tortuosidade e sinuosidade na base da árvore, que nas partes superiores. Por isso, Hradetzky (1976) propôs potências mais apropriadas na descrição da forma da árvore, apontando como sugestão a construção do modelo pelo método *Stepwise*, para expoentes variando de 0,005 a 25.

O procedimento de seleção das potências inteiras e fracionárias empregou o método estatístico *Stepwise*. O procedimento *Stepwise* seleciona o conjunto de variáveis independentes que produza a melhor regressão (passo a passo), levando em consideração os valores mais elevados da estatística F (SAS, 1990).

O procedimento *Stepwise* inicia-se com um modelo considerando apenas o intercepto; posteriormente, ocorre uma inserção de uma variável independente por vez. A variável independente a ser incluída no modelo é aquela que tem a maior correlação com a variável dependente (y) e maior significância para o teste  $F_{(parcial)}$ . A inserção de novas variáveis segue o mesmo critério. Este procedimento possibilita que uma variável independente já adicionada ao modelo possa ser eliminada em um passo seguinte de seleção, por ter se tornado redundante devido à inclusão de outra variável. O número de variáveis retidas é baseado nos níveis de significância assumidos para a inclusão ou exclusão das variáveis (SAS, 1990).

Na execução deste procedimento foi considerado o nível de significância  $< 0,1500$  (teste F) para a entrada e saída da variável.

Os expoentes testados foram: 0,00005; 0,00001; 0,0009; 0,0007; 0,0006; 0,0004; 0,0002; 0,0001; 0,009; 0,008; 0,007; 0,006; 0,005; 0,004; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,2; 0,1; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; e, 95.

A forma de ajuste do polinômio é:

$$d_i = DAP \cdot \left[ \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i}{H_i} \right)^{p_1} + \beta_2 \left( \frac{h_i}{H_i} \right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left( \frac{h_i}{H_i} \right)^{p_n} \right] + \varepsilon_i \quad (4.7)$$

em que  $d_i$ , DAP,  $h_i$ ,  $H_i$ ,  $\beta_i$ , e  $\varepsilon_i$  foram definidos anteriormente.

Simplificando-se a expressão 4.7 por:  $c_0 = \beta_0$  e  $c_i = (\beta_i / H_i^{p_j})$ , em que  $i = 1, 2, \dots, n$ ; e,  $p_j =$  expoentes selecionados por meio do processo *stepwise*, a expressão (4.7) assume a forma:

$$d_i = DAP \cdot (c_0 + c_1 h_1^{p_1} + c_2 h_2^{p_2} + \dots + c_n h_n^{p_n}) + \varepsilon_i \quad (4.8)$$

O volume total ou de qualquer porção da árvore (sortimento) é obtido pela resolução da integral do polinômio (4.8), seguindo o mesmo procedimento adotado para o polinômio de quinto grau, ficando a expressão da seguinte forma:

$$\begin{aligned} V = K \cdot DAP^2 \cdot & \left[ c_0^2 h_i + 2c_0 c_1 \left( \frac{h_i^{(p_1+1)}}{p_1+1} \right) + 2c_0 c_2 \left( \frac{h_i^{(p_2+1)}}{p_2+1} \right) + \dots + \right. \\ & 2c_0 c_{(n-1)} \left( \frac{h_i^{(p_{(n-1)}+1)}}{p_{(n-1)}+1} \right) + 2c_0 c_n \left( \frac{h_i^{(p_n+1)}}{p_n+1} \right) + 2c_1 c_2 \left( \frac{h_i^{(p_1+p_2+1)}}{p_1+p_2+1} \right) + \\ & \dots + c_1 c_{(n-1)} \left( \frac{h_i^{(p_1+p_{(n-1)}+1)}}{p_1+p_{(n-1)}+1} \right) + 2c_1 c_n \left( \frac{h_i^{(p_1+p_n+1)}}{p_1+p_n+1} \right) + 2c_2 c_{(n-1)} \left( \frac{h_i^{(p_2+p_{(n-1)}+1)}}{p_2+p_{(n-1)}+1} \right) \\ & + 2c_2 c_n \left( \frac{h_i^{(p_2+p_n+1)}}{p_2+p_n+1} \right) + \dots + 2c_{(n-1)} c_n \left( \frac{h_i^{(p_{(n-1)}+p_n+1)}}{p_{(n-1)}+p_n+1} \right) + c_1^2 \left( \frac{h_i^{(2p_1+1)}}{2p_1+1} \right) \\ & \left. + c_2^2 \left( \frac{h_i^{(2p_2+1)}}{2p_2+1} \right) + \dots + c_{(n-1)}^2 \left( \frac{h_i^{(2p_{(n-1)}+1)}}{2p_{(n-1)}+1} \right) + c_n^2 \left( \frac{h_i^{(2p_n+1)}}{2p_n+1} \right) \right]_{h_1}^{h_2} + \varepsilon_i \end{aligned}$$

em que:

$c_{is}$ ,  $p_{is}$ , DAP, K,  $h_i$ , e  $\varepsilon_i$  foram definidos anteriormente.

#### 4.3.1.3 Modelo de Goulding & Murray (1976)

A proposta de Goulding & Murray foi a de estabelecer uma compatibilidade entre a função de afilamento e a equação de volume. Para isso,

procederam a modificações no modelo proposto por Schöepfer (1966) e apresentaram um modelo expresso por:

$$d_i^2 = \frac{\hat{V}}{KH} \left[ \beta_1 \left( \frac{L}{H_t} \right) + \beta_2 \left( \frac{L}{H_t} \right)^2 + \dots + \beta_n \left( \frac{L}{H_t} \right)^n \right] + \varepsilon_i \quad (4.9)$$

em que:

$\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados;

$d_i$  = diâmetro comercial (cm);

$K = \pi/40000$ ;

$\hat{V}$  = volume estimado pela equação de volume para árvore individual (m<sup>3</sup>);

$H_t$  = altura total (m);

$L = (H_t - h_i)$ ;

$h_i$  = altura comercial (m); e,

$\varepsilon_i$  = erro de estimativa.

A proposta de Goulding & Murray (1976) para a função de afilamento exige que já se tenha previamente ajustada uma equação para volume e as estimativas obtidas para cada árvore, visto que a função de afilamento apresentará compatibilidade com a equação de volume.

Para este ajuste, foi selecionado o modelo Scolforo (1997) (conforme resultados do capítulo 2), expresso pelo modelo:

$$\hat{V} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{DAP}{H_t} \right) + \beta_2 (DAP^2 H_t) + \beta_3 (DAP^3 H_t) + \varepsilon_i$$

em que:

DAP: diâmetro a 1,3 m do solo;

$\hat{V}$ ,  $\beta_{is}$ ,  $H_t$ , e  $\varepsilon_i$  foram definidos anteriormente.

Assim, o volume real advindo da cubagem rigorosa e da análise de tronco completa foi empregado para o ajuste do modelo e o volume estimado pelo modelo de Scolforo (1997) foi utilizado para a obtenção das estatísticas de acurácia.

A forma linearizada do polinômio apresentado (4.9), que possibilita a seleção das variáveis com distintas potências pelo procedimento estatístico *Stepwise*, é:

$$\frac{d^2KH}{\hat{V}} - \frac{2L}{H_t} = \beta'_2 \left( 3 \left( \frac{L}{H_t} \right)^2 - \frac{2L}{H_t} \right) + \beta'_3 \left( 4 \left( \frac{L}{H_t} \right)^3 - \frac{2L}{H_t} \right) + \beta'_n \left( (n+1) \left( \frac{L}{H_t} \right)^n - \frac{2L}{H_t} \right) + \varepsilon_i$$

Posteriormente ao ajuste deste modelo (linearizado), os coeficientes do modelo original (4.9) podem ser calculados como:

$$\beta_1 = 2 \cdot \left( 1 - \sum_{i=2}^n \beta'_i \right); \quad \beta_2 = 3 \cdot \beta'_2; \quad \beta_n = (n+1) \cdot \beta'_n.$$

Resolvendo-se a integral da expressão original (4.9), obtém-se a fórmula para cálculo dos volumes comerciais. Vale ressaltar que na expressão empregada, a distância do topo da árvore até um ponto h qualquer, os volumes estimados correspondem aos volumes da ponta da árvore até a uma altura h, e não ao volume da base da árvore até uma altura comercial (Scolforo, 1997).

Assim, o volume total ou o dos sortimentos pode ser obtido como:

$$V_c = \frac{\hat{V}}{H_t} \left[ \frac{\beta_1 L^2}{2H_t} + \frac{\beta_2 L^3}{3H_t^2} + \frac{\beta_3 L^4}{4H_t^3} + \dots + \frac{\beta_n L^{(n+1)}}{(n+1)H_t^n} \right]_0^h + \varepsilon_i$$



em que:

$V_c$  = volume comercial da ponta da árvore até a altura  $h$  (em  $m^3$ );  
 $\hat{V}$ ,  $L$ ,  $\beta_{is}$ ,  $H_t$  e  $\varepsilon_i$  foram definidos anteriormente.

Os expoentes testados foram: 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; e, 95.

#### 4.4 Precisão e acuracidade dos modelos de afilamento

A avaliação da precisão dos modelos de afilamento ajustados foi realizada considerando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ). Estas estatísticas permitem verificar se os modelos apresentaram ajustes satisfatórios, de maneira geral.

Também foram calculados a avaliação da acuracidade, que é a diferença entre o valor estimado (diâmetro ou volume) e o valor real. Para isto, foram adotadas as mesmas estatísticas já utilizadas por Parresol et al. (1987), Figueiredo Filho et al. (1996), Fischer (1997), Scolforo et al. (1998), Assis (1998) e Ferreira (2004). Estas estatísticas possibilitam realizar uma análise mais particularizada do desempenho das estimativas ao longo de todo o fuste, uma vez que podem ser calculadas para cada altura, em que foram tomados os diâmetros por ocasião da cubagem rigorosa.

As variáveis avaliadas pelas estatísticas de acuracidade foram o diâmetro e o volume (estimados) em cada posição de medição, os volumes parciais referentes às mesmas posições e, ainda, o volume total. As estatísticas para a avaliação dos diâmetros e volumes estimados encontram-se na Tabela 4.2.

Os resultados estatísticos de acurácia foram interpretados por meio da elaboração de um ranqueamento dos resultados dos modelos de afilamento

testados para estimar diâmetros ao longo do fuste, volumes parciais e volumes totais das árvores amostra. Este ranking foi feito para o conjunto das árvores.

**TABELA 4.2** Estatísticas utilizadas para a avaliação das estimativas dos diâmetros e volumes de *Tectona grandis* L.f., em quatro povoamentos na microrregião do Baixo Rio Acre, estado do Acre

Estatísticas	Diâmetros	Volumes
1) Desvio (D)	$\frac{\left(\sum_{i=1}^n Diff_i\right)}{n}$	$\frac{\left(\sum_{i=1}^n Diff_i\right)}{n}$
2) Desvio padrão das diferenças (SD)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( Diff_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Diff_i\right)}{n} \right)^2}{n-1}}$	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( Diff_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Diff_i\right)}{n} \right)^2}{n-1}}$
3) Soma do quadrado do resíduo relativo (SSRR)	$\sum_{i=1}^n \left( \frac{Diff_i}{d_i} \right)^2$	$\sum_{i=1}^n \left( \frac{Diff_i}{v_i} \right)^2$
4) Porcentagem dos resíduos (RP)	$\left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( Diff_i / d_i \right) \times 100}{n} \right]$	$\left[ \frac{\sum_{i=1}^n \left( Diff_i / v_i \right) \times 100}{n} \right]$

Em que:  $Diff_i = (V_i - V_{ei})$  ou  $(d_i - d_{ei})$  é o desvio dos volumes ou dos diâmetros;  $V_i$  = volume total ou comercial até o diâmetro  $i$  da árvore;  $V_{ei}$  = volume total ou comercial estimado;  $d_i$  = diâmetro da árvore na posição  $i$  do fuste;  $d_{ei}$  = diâmetro da árvore estimado para a posição  $i$  do fuste e  $n$  = número de árvores.

Considerando-se as estatísticas de desvio (D), desvio padrão das diferenças (SD), soma do quadrado do resíduo relativo (SSRR) e porcentagem dos resíduos (RP), atribui-se a nota quatro à equação que apresentou maior acuracidade em cada posição relativa de medição e, assim, de forma decrescente, até a nota um para a equação menos acurada. No caso de mesmo valor em qualquer das estatísticas para diferentes equações, estas receberam a mesma nota.

Por serem poucas árvores da amostra que alcançaram as alturas absolutas de 14,5, 15,5 e 16 metros, ocorreu a impossibilidade de cálculo da estatística de desvio padrão das diferenças. Porém, esse fato não prejudicou o processo de seleção, pois, neste caso, os valores das notas para o ranqueamento sempre foram zero.

O resultado final do ranqueamento foi definido pela soma das notas de todas as estatísticas; o melhor modelo foi aquele que apresentou maior soma de notas.

Para a atribuição das notas do ranqueamento foram consideradas duas situações para o modelo de Goulding & Murray (1976). Na primeira situação as estatísticas foram obtidas considerando-se os volumes reais advindos da cubagem rigorosa, possibilitando a simulação de uma situação fictícia em que todas as estimativas do modelo seriam compatíveis com o volume real das árvores e não com o volume estimado. A segunda situação foi a obtenção das estatísticas considerando-se o volume estimado. Esta é uma situação que simula a condição de campo, na qual têm-se os volumes estimados das árvores de uma amostra e não o volume real. Considerando estas duas situações para o modelo de Goulding & Murray (1976), foram ranqueados quatro modelos, tendo o modelo estimado com volume real sido apenas considerado para uma situação fictícia e não foi objeto de seleção.

#### **4.5 Teste de identidade de modelo**

Após a seleção da melhor equação de afilamento foi empregado o teste de identidade de modelos.

Para este caso, no qual os modelos são lineares, adotou-se o procedimento descrito por Graybill (1976) com a finalidade de avaliar a

necessidade de ajustes por grupos ou individuais, considerando as diferentes áreas estudadas.

O procedimento consiste na redução da soma dos quadrados. Para modelos lineares, o teste de identidade permite observar estatisticamente, por meio do teste F, a significância da diferença entre o total das somas dos quadrados das regressões ajustadas para cada área de estudo isoladamente (modelo completo -  $\Omega$ ) e a soma do quadrado da regressão ajustada para o conjunto das quatro áreas estudadas (modelo reduzido -  $w$ ).

A Tabela 4.3 demonstra o arranjo para proceder ao cálculo das estatísticas da identidade de modelos para regressão linear.

**TABELA 4.3** Análise de variância para o teste de identidade de modelos lineares

Fonte de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Modelo completo	$(A \times p)$	S.Q.Reg.( $\Omega$ )		
Modelo reduzido	P	S.Q.Reg.( $w$ )		
Diferença para testar hipótese	$(A - 1)p$	S.Q.Reg.( $\Omega$ )- S.Q.Reg.( $w$ )	S.Q.(diferença)/ $(A - 1)p$	Q.M.(diferença)/ Q.M.(resíduo)
Resíduo	$N-(A \times p)$	S.Q.Total( $\Omega$ )-S.Q.Reg.( $\Omega$ )	S.Q.(resíduo)/ $N-(A \times p)$	
Total	N	S.Q.Total ( $\Omega$ )		

Em que: G.L. = grau de liberdade, S.Q. = soma dos quadrados, Q.M. = quadrado médio, F = teste F, A = número de áreas estudadas, p = número de parâmetros do modelo reduzido ( $w$ ) e N = número de observações do modelo completo ( $\Omega$ ).

As hipóteses foram definidas da seguinte forma:

- $H_0$  = o modelo reduzido ( $w$ ) ajustado para o conjunto  $\{z\}$  de dados das quatro áreas estudadas é idêntico aos modelos completos ajustados para cada uma das áreas pertencentes a  $\{z\}$ ; e,
- $H_1$  = contrária a  $H_0$ .

A combinação dos quatro ambientes de produção possibilitou a construção de onze hipóteses para a avaliação do melhor modelo de afilamento, conforme demonstrado na Tabela 4.4.

**TABELA 4.4** Hipóteses de identidade para o modelo de afilamento selecionado, considerando todas as combinações entre as áreas de estudo

Hipóteses	Áreas de estudos envolvidas
1	1, 2, 3 e 4
2	1, 2 e 3
3	1, 2 e 4
4	1, 3 e 4
5	2, 3 e 4
6	1 e 2
7	1 e 3
8	1 e 4
9	2 e 3
10	2 e 4
11	3 e 4

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Seleção das variáveis dos modelos Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976) pelo processo estatístico *Stepwise*

Para a seleção das variáveis e suas respectivas potências para o modelo de afilamento Hradetzky (1976), foram testados 57 potências para a variável  $(h/H_i)^P$ , com valores entre 0,00005 a 95. As maiores potências buscam representar a base da árvore, enquanto as menores potências representam a ponta mais fina do fuste.

No processo estatístico de seleção de variáveis, foi selecionada inicialmente a variável com potência fracionária 0,5, cujo valor de F foi altamente significativo. Esta alternativa selecionada representou a variável que melhor explica a variável dependente, com valor do  $R^2_{(parcial)}$  de 92,24%. Posteriormente, foram selecionadas as variáveis com potências inteiras 5, 10 e 2 e de potências fracionárias 0,08, 0,004 e 0,006.

Como o procedimento *Stepwise* recalcula a significância (Teste F) de cada variável após a inclusão de uma nova variável no modelo, a rotina matemática apontou a necessidade de retirada da variável com potência 5, visto que o teste F indicou que a variável não foi significativa, para  $\alpha = 0,15$ , mostrando que a inserção da variável de potência 2 ou, ainda, sua combinação com as demais, tornou a variável de potência 5 redundante, portanto, não havendo necessidade de mantê-la na equação final.

As estatísticas do processo *Stepwise* para o modelo Hradetzky (1976) podem ser vistas na Tabela 4.5.

**TABELA 4.5** Resumo do processo estatístico de seleção de variáveis por *Stepwise* para o modelo Hradetzky (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

<i>Step</i>	Variáveis inseridas	Variáveis retiradas	Nº de variáveis	R <sup>2</sup> (parcial)	R <sup>2</sup> (modelo)	F	Pr > F
1	$(h_i/H_i)^{0,5}$		1	92,24%	92,24%	35560	<0,0001
2	$(h_i/H_i)^5$		2	0,44%	92,67%	178,46	<0,0001
3	$(h_i/H_i)^{0,8}$		3	0,36%	93,03%	154,29	<0,0001
4	$(h_i/H_i)^{10}$		4	0,09%	93,12%	39,35	<0,0001
5	$(h_i/H_i)^{0,004}$		5	0,08%	93,20%	34,49	<0,0001
6	$(h_i/H_i)^2$		6	0,04%	93,24%	17,79	<0,0001
7		$(h_i/H_i)^5$	5	0,00%	93,24%	1,48	0,2236
8	$(h_i/H_i)^{0,006}$		6	0,01%	93,24%	2,63	0,1047

Em que: *Step* = passos da inserção de variáveis do modelo pelo procedimento estatístico *Stepwise*, R<sup>2</sup><sub>parcial</sub> = coeficiente de determinação parcial referente a variável inserida, R<sup>2</sup><sub>modelo</sub> = coeficiente de determinação do modelo considerando todas as variáveis, F = teste F, Pr = probabilidade e  $h_i$  e  $H_i$  já foram definidos anteriormente.

O modelo Goulding & Murray (1976), após a aplicação do procedimento de *Stepwise* levou à seleção de seis variáveis que, posteriormente, foram utilizadas na realização dos cálculos para a obtenção dos parâmetros, formando uma equação de afilamento com sete parâmetros (sem intercepto).

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da seleção das seis variáveis. A primeira variável selecionada foi de potência 14, cujo coeficiente de determinação parcial foi de 83,75%, com valor de F de 15432,80.

**TABELA 4.6** Resumo do processo estatístico de seleção de variáveis por *Stepwise* para o modelo Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

<i>Step</i>	Variáveis inseridas	Variáveis retiradas	Nº de variáveis	R <sup>2</sup> (parcial)	R <sup>2</sup> (modelo)	F	Pr > F
1	(15.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>14</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		1	83,75%	83,75%	15432,8	<0,0001
2	(3.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>2</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		2	0,30%	84,05%	56,39	<0,0001
3	(12.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>11</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		3	0,41%	84,46%	79,2	<0,0001
4	(96.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>95</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		4	0,02%	84,48%	3,33	0,0683
5	(95.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>94</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		5	0,08%	84,56%	16,02	<0,0001
6	(94.(L/H <sub>i</sub> ) <sup>93</sup> )-(2.L)/H <sub>i</sub> )		6	0,03%	84,60%	6,1	0,0136

Em que: *Step* = passos da inserção de variáveis do modelo pelo procedimento estatístico *Stepwise*, R<sup>2</sup><sub>parcial</sub> = coeficiente de determinação parcial referente a variável inserida, R<sup>2</sup><sub>modelo</sub> = coeficiente de determinação do modelo considerando todas as variáveis, F = teste F, Pr = probabilidade e, L e H<sub>i</sub> já foram definidos anteriormente.

Em seguida, foram selecionadas as variáveis de potências 2, 11, 95, 94 e 93. Apesar da probabilidade de 6,83% do F<sub>(calculado)</sub> ser maior que o F<sub>(tabelado)</sub>, o nível de significância de 0,1500 preestabelecido no procedimento *Stepwise* avaliou não haver necessidade da retirada da variável de potência 95 do modelo. Dessa forma, houve apenas inserções de variáveis no modelo e nenhuma variável se tornou redundante com a entrada de uma nova variável selecionada durante o processo estatístico.

A seleção de potências altas em polinômios de afilamento pode acarretar sérias conseqüências para projeção de volume, no entanto, o modelo Goulding & Murray, por apresenta compatibilidade com a equação de volume, acaba estabelecendo uma consistência dos volume projetados, pois a equação de volume funciona como um delimitador para o modelo de afilamento.

## 5.2 Precisão dos modelos polinomiais na estimativa dos diâmetros

Os parâmetros de todos modelos polinomiais testados e as respectivas estatísticas de precisão encontram-se na Tabela 4.7.

**TABELA 4.7** Parâmetros estimados e medidas de precisão para os modelos polinomiais de Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos *Tectona grandis* L.f. estudados

Modelo	Parâmetros	Potências	R <sup>2</sup> (%)	S <sub>yx</sub>	S <sub>yx</sub> (%)	
Schöpfer (1966)	$\beta_0$	1,42341				
	$\beta_1$	-5,87387	$p_1$	1		
	$\beta_2$	23,23332	$p_2$	2		
	$\beta_3$	-47,6082	$p_3$	3	93,37%	0,009796
	$\beta_4$	44,77748	$p_4$	4		22,44%
	$\beta_5$	-15,89614	$p_5$	5		
Hradetzky (1976)	$\beta_0$	1,45312				
	$\beta_1$	56,698	$p_1$	0,006		
	$\beta_2$	-55,81008	$p_2$	0,004		
	$\beta_3$	4,80925	$p_3$	0,8	94,41%	0,99782
	$\beta_4$	-5,68952	$p_4$	0,5		11,25%
	$\beta_5$	-1,43696	$p_5$	2		
	$\beta_6$	0,12421	$p_6$	10		
Goulding & Murray (1976)	$\beta_1$	0,38091	$p_1$	1		
	$\beta_2$	1,14273	$p_2$	2		
	$\beta_3$	-3,3498	$p_3$	11		
	$\beta_4$	5,4984	$p_4$	14	96,47%	0,79258
	$\beta_5$	-229,35168	$p_5$	85		8,94%
	$\beta_6$	485,85628	$p_6$	90		
	$\beta_7$	-256,70016	$p_7$	95		

Em que:  $\beta_{is}$  = parâmetros estimados,  $p_{is}$  = potências selecionadas,  $R^2$  = coeficiente de determinação,  $S_{yx}$  = erro padrão residual e  $S_{yx}\%$  = erro padrão residual percentual.

As estatísticas de precisão dos modelos de afilamento oferecem um indicativo de qualidade dos modelos e demonstram a correlação entre as variáveis independentes e a variável dependente. Porém, não consistem no instrumento mais adequado para a tomada de decisão, sobre qual modelo apresenta o melhor desempenho.

O modelo Schöpfer (1966), apesar de apresentar valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro padrão residual percentual ( $S_{yx}\%$ ) aceitáveis, foi o modelo que apresentou os piores resultados com  $R^2$  de 93,37% e  $S_{yx}\%$  de 22,44%.



O modelo Goulding & Murray (1976) foi o ajuste com melhores resultados de  $R^2$  e  $S_{yx\%}$ , seguido pelo modelo Hradetzky (1976).

### **5.3 Acurácia dos modelos para estimar diâmetros ao longo do fuste**

As Tabelas 1.A, 2.A, 3.A e 4.A (no Anexo) apresentam as estatísticas de acuracidade referente ao resíduo percentual, desvio, soma de quadrados do resíduo relativo, desvio padrão das diferenças e as respectivas notas de ranqueamento, considerando as quatro estatísticas obtidas para os três modelos testados.

Para a base de dados avaliada, o modelo Schöpfer (1966) apresentou estatísticas que sempre apontaram uma capacidade inferior do modelo de prever os valores do diâmetro ao longo do fuste. Considerando-se as 4 estatísticas e as 36 posições no fuste, os modelos tiveram 144 oportunidades para pontuar e formar a nota final do ranking. No entanto, o modelo Schöpfer (1966) obteve os piores resultados estatísticos entre os modelos testados, em 66 ocasiões.

O modelo Hradetzky (1976) apresentou resultados estatísticos intermediários. Apesar de apresentar um grande número de estatísticas mal ranqueadas, os valores das estatísticas que receberam notas 2 e 3 permitiram que o modelo fosse superior ao modelo Schöpfer (1966).

As duas situações testadas para o modelo Goulding & Murray (1976) apresentaram excelentes estatísticas de acurácia. Como a situação em que foi considerado o volume real é um cenário fictício, ela não foi incorporada no processo de seleção.

Já na situação em que foi considerado o volume estimado, o modelo Goulding & Murray (1976) apresentou as melhores estatísticas de acurácia para o diâmetro estimado ao longo do fuste. Em apenas 6,61% das oportunidades de

pontuação, o modelo Goulding & Murray (1976) recebeu a pior nota; nas demais oportunidades foi o melhor resultado estatístico em 88,97% das ocasiões.

No caso do modelo Goulding & Murray (1976) com volume real (considerado apenas como referência no ranqueamento), destacam-se os resultados de desvio (D), cujos valores, para todos os diâmetros ao longo do fuste, foram muito próximos de zero, mostrando que, ao estabelecer uma compatibilidade com o volume real (dados de cubagem), cria-se uma situação fictícia de falsa acurácia, visto que esta situação em condições de trabalho de campo é tecnicamente inviável.

A Tabela 4.8 apresenta os resultados finais do ranqueamento dos modelos para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste.

O ranking final demonstra que o modelo Hradetzky (1976) obteve melhores estatísticas em duas posições na árvore, na posição de altura absoluta de 6 e 14,5 metros, a primeira posição na porção mediana do fuste e a outra na porção superior no fuste.

Nas demais posições do fuste (34 posições), o modelo Goulding & Murray (1976), com emprego do volume estimado, obteve sempre as melhores notas de ranqueamento.

O fato do modelo Schöpfer (1966) não ter sido selecionado em nenhuma oportunidade é um bom indicativo de que a estratégia de mesclar potências de alto valor e potências menores consiste numa boa alternativa para representar bem o perfil da árvore. Isso porque ao observar os resultados das estatísticas de acurácia e de ranqueamento, revela-se a dificuldade do modelo de Schöpfer (1966) para representar os diâmetros correspondentes à base da árvore, em que o referido modelo obteve os piores desempenhos de acurácia.

**TABELA 4.8** Ranking final para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste, e valores percentuais para todas as vezes que o modelo alcançou maior pontuação em cada posição do fuste

<b>Modelos avaliados no processo de seleção</b>					
<b>h<sub>i</sub></b> (m)	<b>Schöepfer</b> <b>(1966)</b>	<b>Hradetzky</b> <b>(1976)</b>	<b>Goulding &amp;</b> <b>Murray (1976)</b> (Volume estimado)	<b>Modelo selecionado</b>	<b>Goulding &amp; Murray</b> <b>(1976)</b> (Volume real)
0	11,0	5,0	13,0	Goulding & Murray	11,0
0,25	11,0	5,0	11,0	Goulding & Murray	13,0
0,5	4,0	11,0	15,0	Goulding & Murray	10,0
0,75	5,0	10,0	13,0	Goulding & Murray	12,0
1	6,0	12,0	14,0	Goulding & Murray	8,0
1,3	5,0	8,0	15,0	Goulding & Murray	12,0
1,5	7,0	6,0	11,0	Goulding & Murray	16,0
2	8,0	8,0	9,0	Goulding & Murray	15,0
2,5	10,0	4,0	11,0	Goulding & Murray	15,0
3	7,0	8,0	10,0	Goulding & Murray	15,0
3,5	10,0	6,0	10,0	Goulding & Murray	14,0
4	8,0	7,0	10,0	Goulding & Murray	15,0
4,5	5,0	8,0	11,0	Goulding & Murray	16,0
5	8,0	8,0	10,0	Goulding & Murray	14,0
5,5	7,0	9,0	12,0	Goulding & Murray	12,0
6	7,0	10,0	9,0	Hradetzky	14,0
6,5	5,0	7,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
7	5,0	7,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
7,5	6,0	6,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
8	10,0	6,0	11,0	Goulding & Murray	13,0
8,5	8,0	4,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
9	7,0	5,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
9,5	8,0	4,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
10	6,0	6,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
10,5	6,0	6,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
11	7,0	5,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
11,5	5,0	7,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
12	4,0	9,0	15,0	Goulding & Murray	12,0
12,5	4,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
13	4,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
13,5	4,0	8,0	15,0	Goulding & Murray	13,0
14	7,0	7,0	11,0	Goulding & Murray	15,0
14,5	6,0	12,0	3,0	Hradetzky	9,0
15	10,0	4,0	12,0	Goulding & Murray	14,0
15,5	3,0	6,0	12,0	Goulding & Murray	9,0
16	6,0	3,0	9,0	Goulding & Murray	12,0
<b>Total</b>	<b>240,0</b>	<b>253,0</b>	<b>420,0</b>		<b>497,0</b>
<b>Modelos de afilamento testados</b>					<b>Percentual (maior pontuação)</b>
Schöepfer (1966)					0,00% das posições na árvore
Hradetzky (1976)					5,56% das posições na árvore
Goulding & Murray (1976) (Volume estimado)					94,44% das posições na árvore

A inserção de potências altas e menores, selecionadas pelo processo estatístico *Stepwise* garantiu aos modelos Goulding & Murray (1976) e Hradetzky (1976) os melhores desempenhos de estimativas de diâmetros ao longo do fuste.

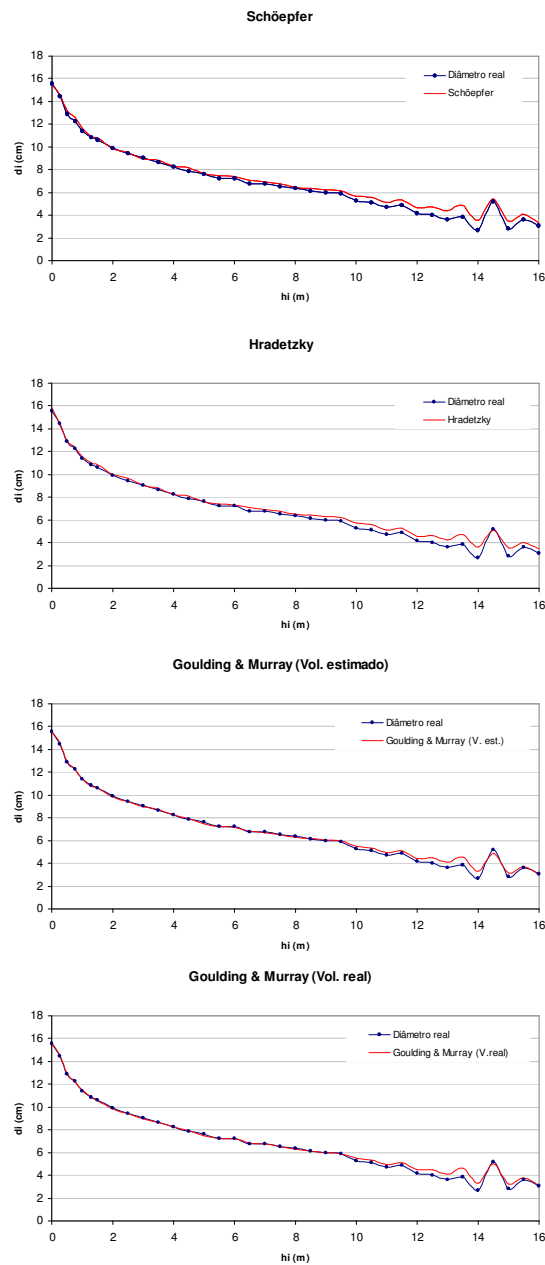
A Figura 4.1 demonstra o perfil médio das árvores, considerando os diâmetros médios reais e estimados para a base de dados estudada e o conjunto dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

Os perfis apresentados para os modelos testados, revelam a excelente acurácia para as estimativas do modelo Goulding & Murray (1976) com volume estimado e com o volume real. Para os diâmetros nas maiores alturas, houve dificuldade de estimativa.

O fato de um menor número de árvores alcançar as maiores alturas também provocou a oscilação do perfil nas alturas entre 13,5 e 16 metros.

O perfil médio que representa o resultado do ajuste do modelo Schöpfer (1966) demonstra dificuldade para estimar os valores da base e da ponta do fuste. Percebe-se, que na ponta do fuste ocorre uma instabilidade das estimativas para os diâmetros entre as alturas 0 e 2 metros, resultado já apontado pelas estatísticas de acurácia.

O perfil médio retratado pelo modelo Hradetzky (1976) apresentou desempenho muito semelhante ao modelo de Goulding & Murray (1976) com volume estimado, porém o polinômio de potências inteiras e fracionárias distancia mais a linha das estimativas desde a altura de 8,5 metros.



**FIGURA 4.1** Diâmetros médios reais e estimados pelos modelos polinomiais de Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

#### **5.4 Acurácia dos modelos para estimar volumes ao longo do fuste**

Quando foram calculadas as estimativas de volumes, os três modelos testados mantiveram as mesmas tendências de performance alcançadas nas estimativas de diâmetros ao longo do fuste. Contudo, os resultados foram ressaltados, ou seja, os piores e melhores resultados foram destacados.

As Tabelas 1.B, 2.B, 3.B e 4.B (no Anexo B) apresentam os resultados das estatísticas de acurácia para os modelos testados e as notas atribuídas para cada estatística no ranqueamento. Os mesmos critérios estabelecidos para as estimativas dos diâmetros foram mantidos para avaliar as estimativas de volume ao longo das diversas posições no fuste. Nos resultados das estatísticas de acurácia para volume de todos os modelos testados foi atribuído o valor 0,0 (zero) e a nota de ranking 1,0 para todos os casos na altura 0,00, pois não existe volume de fuste na altura 0,00 metro.

O pior desempenho do modelo Schöepfer (1966) foi para as estimativas de volumes ao longo do fuste, pois, em 67,36% das possibilidades de pontuação no ranqueamento das quatro estatísticas de acurácia avaliadas, o modelo obteve a pior nota. Somente conseguiu a melhor nota em uma estatística numa única posição. De maneira geral, o modelo obteve os piores resultados de volume estimado em qualquer porção do fuste.

O modelo Hradetzky (1976) obteve notas com valor 2,0 e 3,0 em 77,78% dos casos avaliados, o que indica uma posição de performance intermediária entre os modelos testados. Contudo, vale ressaltar o excelente desempenho das estimativas de volume para as porções na base do fuste, tendo, na posição 0,75 m de altura a estatística do desvio (D) sido zero e nas alturas 0,25, 0,50, 1,00, 1,30, 1,50 e 2,00 os valores foram próximo de zero.

O modelo Goulding & Murray (1976) com volume estimado obteve o melhor desempenho das estatísticas de acurácia para estimativas de volumes ao

longo do fuste; 90,97% das notas foram com valores 3,0 e 4,0. O modelo gerou excelentes estimativas em qualquer porção do fuste, sendo, portanto, a equação mais estável. Na maioria das posições, os valores de desvio (D) foram próximos de zero e as demais estatísticas apresentaram excelentes resultados.

As estatísticas para o caso fictício, em que para o modelo Goulding & Murray (1976), foi considerado o volume real, os resultados de desvio (D) foram zero em diversas posições e, nas demais, próximo de zero.

Na Tabela 4.9 encontra-se o ranking final para as estimativas dos volumes ao longo do fuste e os valores percentuais para todas as vezes que o modelo alcançou as melhores pontuações das estatísticas de acurácia numa determinada posição do fuste.

Observa-se que o modelo Goulding & Murray (1976) apresentou o melhor desempenho em 100% das posições avaliadas. Considerando a base de dados estudada, Goulding & Murray (1976) revelou um desempenho significativamente superior aos demais modelos testados.

Caso fossem comparados apenas os modelos Schöpfer (1966) e Hradetzky (1976), as estimativas geradas por Hradetzky (1976), seriam predominantemente melhores nas porções superiores e inferiores do fuste. Na porção mediana, entre as alturas de 4 a 6 metros, o modelo Schöpfer (1966) apresentaria melhor desempenho. Estes resultados indicam uma provável fragilidade do modelo Schöpfer (1966) em estimar os valores de volume para as porções extremas do fuste. Para o modelo Hradetzky (1976), um artifício do procedimento estatístico *Stepwise* poderia ser empregado para melhorar a performance das estimativas volumétricas na porção mediana do fuste, a qual seria a inserção de variáveis com potências representativas para determinada faixa de altura ao longo do fuste.

**TABELA 4.9** Ranking final para estimativa dos volumes ao longo do fuste, e valores percentuais para todas as vezes que o modelo alcançou maior pontuação em cada posição do fuste

$h_i$ (m)	Schöpfer (1966)	Hradetzky (1976)	Goulding & Murray (1976) (Volume estimado)	Modelo selecionado	Goulding & Murray (1976) (Volume real)
0	-	-	-	-	-
0,25	8,0	5,0	12,0	Goulding & Murray	15,0
0,5	4,0	11,0	12,0	Goulding & Murray	9,0
0,75	5,0	9,0	13,0	Goulding & Murray	12,0
1	5,0	11,0	14,0	Goulding & Murray	10,0
1,3	7,0	10,0	14,0	Goulding & Murray	9,0
1,5	5,0	10,0	13,0	Goulding & Murray	11,0
2	5,0	8,0	15,0	Goulding & Murray	10,0
2,5	5,0	7,0	15,0	Goulding & Murray	13,0
3	5,0	7,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
3,5	6,0	6,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
4	6,0	4,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
4,5	7,0	5,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
5	7,0	5,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
5,5	6,0	6,0	13,0	Goulding & Murray	13,0
6	5,0	8,0	10,0	Goulding & Murray	16,0
6,5	5,0	8,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
7	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
7,5	5,0	8,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
8	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
8,5	5,0	8,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
9	5,0	8,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
9,5	5,0	8,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
10	5,0	8,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
10,5	5,0	8,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
11	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
11,5	5,0	8,0	13,0	Goulding & Murray	15,0
12	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
12,5	5,0	8,0	14,0	Goulding & Murray	14,0
13	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
13,5	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
14	5,0	8,0	12,0	Goulding & Murray	16,0
14,5	4,0	6,0	9,0	Goulding & Murray	12,0
15	6,0	9,0	10,0	Goulding & Murray	16,0
15,5	4,0	6,0	9,0	Goulding & Murray	12,0
16	4,0	6,0	9,0	Goulding & Murray	12,0
<b>Total</b>	<b>188,0</b>	<b>271,0</b>	<b>445,0</b>		<b>489,0</b>
<b>Modelos de afilamento testados</b>				<b>Percentual com maior pontuação</b>	
Schöpfer (1966)				0,00% das posições na árvore	
Hradetzky (1976)				0,00% das posições na árvore	
Goulding & Murray (1976) (Volume estimado)				100,00% das posições na árvore	



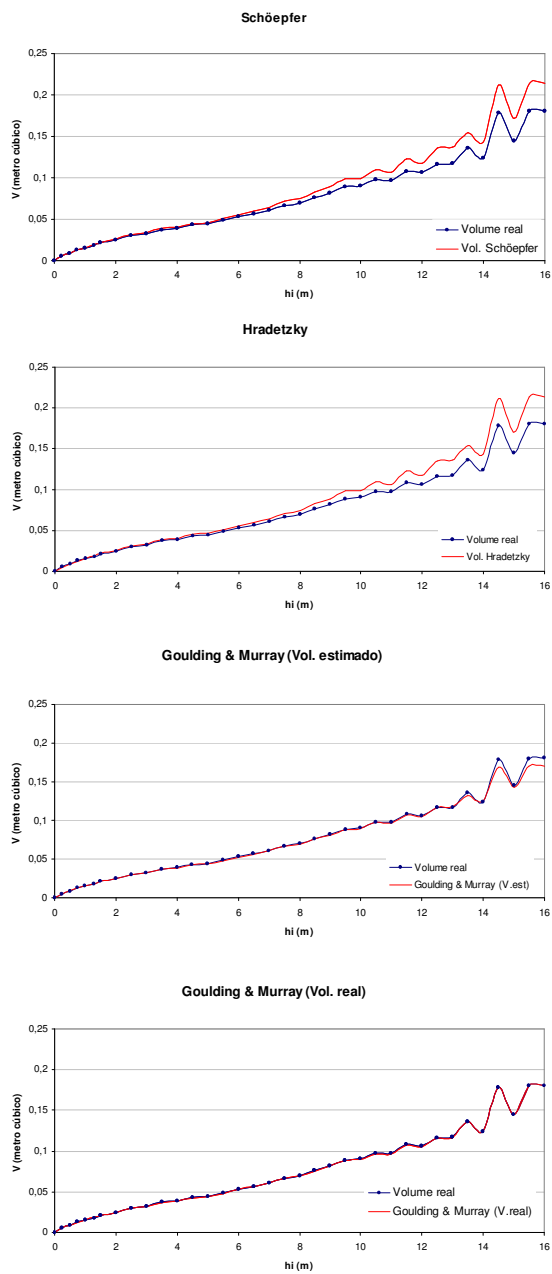
O ranqueamento para as estimativas de diâmetros e volumes nas várias porções do fuste indicou a superioridade do modelo Goulding & Murray (1976). Provavelmente, um dos motivos que levou ao bom desempenho do modelo foi o vínculo estabelecido com os volumes estimados, pois os bons resultados das estimativas de volume alcançados pelos modelos volumétricos testados certamente contribuíram para os resultados da função de afilamento de Goulding & Murray (1976).

Na Figura 4.2 estão os gráficos de perfis para as estimativas de volume ao longo do fuste, considerando os três modelos avaliados e para o modelo Goulding & Murray (1976) com volume real.

As razões para a oscilação do gráfico nos perfis de volumes nas últimas alturas avaliadas já foram comentadas na avaliação da acurácia das estimativas de diâmetro.

Os modelos Schöepfer (1976) e Hradetzky (1976) apresentaram menor aderência com as estimativas do volume real, sendo que, a partir da altura absoluta de 5 metros, as estimativas sempre foram superestimadas e, nas alturas inferiores a 5 metros, ora os valores foram subestimados, ora superestimados.

O perfil apresentado pelo modelo Goulding & Murray (1976) com volume estimado reforça os resultados das estatísticas de acurácia que aponta ser a melhor função de afilamento. Em todas as porções ao longo do fuste sempre ocorreram valores de volumes superestimados ou subestimados. No entanto, a diferença entre os valores do volume real e estimado sempre foi pequena, sendo quase imperceptível no gráfico do perfil da árvore média. Nas últimas alturas, o modelo gerou maiores subestimativas, as quais são mais evidenciadas nas alturas de 13,5, 14 e 15,5 metros.



**FIGURA 4.2** Volumes médios reais e estimados pelos modelos polinomiais de Schöpfer (1966), Hradetzky (1976) e Goulding & Murray (1976), para o conjunto de dados dos quatro povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

Já para o perfil da árvore média gerada pelo modelo Goulding & Murray (1976) com volume real, as estimativas foram também ora subestimadas, ora superestimadas. Porém, ao se observar o gráfico do perfil, percebe-se que o volume estimado pela função de afilamento praticamente recobre a linha do perfil da árvore média gerada pelos volumes reais. As diferenças na ordem de fração de milho para os volumes estimados torna imperceptível a oscilação da linha de volume estimado (vermelho) e volume real (azul).

### 5.5 Teste de identidade de modelos

Na Tabela 4.11 encontram-se os resultados do teste de identidade de modelo para os quatro povoamentos de teca estudados, considerando apenas o modelo de afilamento selecionado pelas estatísticas de acurácia. As 11 combinações apresentadas na Tabela 4.10 representam todos os possíveis agrupamentos para a formação de modelos reduzidos. Também são apresentados os valores de variância da regressão que possibilitou o ajuste dos polinômios e os respectivos valores de  $F_{\text{calculado}}$  e  $F_{\text{tabelado}}$  para uma significância de 5%. Dessa maneira, sempre que o valor de  $F_{\text{calculado}}$  for maior que o valor de  $F_{\text{tabelado}}$ , considera-se o teste significativo; portanto, a 5% de significância aceita-se a hipótese  $H_1$ , ou seja, a soma dos quadrados dos resíduos para cada um dos povoamentos estudados (modelo completo –  $\Omega$ ) difere estatisticamente da soma dos quadrados dos resíduos para o modelo reduzido ( $w$ ).

Da mesma forma, quando o valor de  $F_{\text{calculado}}$  for menor que o valor de  $F_{\text{tabelado}}$  o teste é considerado como não significativo, ou seja, aceita-se  $H_0$ , o que significa que, não existe diferença significativa entre os modelos completo ( $\Omega$ ) e reduzido ( $w$ ) na combinação avaliada.

**TABELA 4.10** Resultado do teste de identidade de modelos por meio do teste F, para as diferentes combinações das quatro áreas estudadas. O modelo de afilamento testado foi Goulding & Murray (1976)

Combinações	QM (diferença)	QM (resíduo)	F (calculado)	F 5% (tabelado)	Teste
1, 2, 3 e 4	0,6118500	0,0728492	8,399	1,6073	S
1, 2 e 3	0,7327750	0,0796150	9,204	1,7565	S
1, 2 e 4	0,5552750	0,0795567	6,980	1,7566	S
1, 3 e 4	0,7650000	0,0667089	11,468	1,7556	S
2, 3 e 4	0,2218583	0,0654157	3,392	1,7580	S
1 e 2	0,4735500	0,0934381	5,068	2,1048	S
1 e 3	1,1555000	0,0717718	16,100	2,1029	S
1 e 4	0,7133333	0,0714337	9,986	2,1030	S
2 e 3	0,1443833	0,0759753	1,900	2,1084	NS
2 e 4	0,2778833	0,0755200	3,680	2,1092	S
3 e 4	0,2326667	0,0533532	4,361	2,1045	S

Em que: S = significativo a 95% de probabilidade pela distribuição F e NS = não significativo a 95% de probabilidade pela distribuição F.

Em todas as combinações testadas, somente a combinação das áreas 2 e 3 foi possível de agrupar. Percebe-se que as combinações que envolvem as áreas {1 e 3} geraram altos valores para o  $F_{\text{calculado}}$ , demonstrando que existe uma forte diferença entre estas duas áreas no que se refere à função de afilamento gerada pelo modelo de Goulding & Murray (1976).

Os altos valores para  $F_{\text{calculado}}$  também são observados nas combinações das áreas {1 e 4}, {1 e 2}, {1, 2, 3 e 4}, {1, 2 e 3}, {1, 2 e 4} e {1, 3 e 4}.

Os modelos que possibilitam os melhores ajustes geralmente possibilitam um menor número de combinações, demonstrando que, ao se tratar os grupos de dados de maneira individualizada, melhores resultados serão gerados, pois são reduzidas as fontes de variação.

Os parâmetros estimados e as estatísticas de precisão dos modelos ajustados individualmente para as áreas 1, 2, 3 e 4 e para a combinação {2 e 3},

a qual foi indicada pelo teste de identidade de modelo, encontram-se na Tabela 4.11.

**TABELA 4.11** Parâmetros estimados/calculados, potências e medidas de precisão para os modelos polinomiais de Goulding & Murray (1976), para as áreas 1, 2, 3 e 4 individualmente e o conjunto das áreas 2 e 3, conforme indicação de agrupamento do teste de identidade de modelos

Local	Parâmetros		Potências		R <sup>2</sup> (%)	S <sub>yx</sub>	S <sub>yx</sub> (%)
Área 1	$\beta_1$	0,997878	$p_1$	1	96,25%	0,89153	9,70%
	$\beta_2$	1,182711	$p_2$	2			
	$\beta_3$	-3,30703	$p_3$	11			
	$\beta_4$	5,898165	$p_4$	14			
	$\beta_5$	-274,616	$p_5$	85			
	$\beta_6$	572,2235	$p_6$	90			
	$\beta_7$	-298,153	$p_7$	95			
Área 2	$\beta_1$	1,378141	$p_1$	1	89,46%	0,76206	11,30%
	$\beta_2$	0,63393	$p_2$	2			
	$\beta_3$	-0,949554	$p_3$	11			
	$\beta_4$	1,773435	$p_4$	14			
	$\beta_5$	866,5618	$p_5$	85			
	$\beta_6$	-1748,2283	$p_6$	90			
	$\beta_7$	882,76992	$p_7$	95			
Área 3	$\beta_1$	1,068054	$p_1$	1	97,31%	0,61063	7,16%
	$\beta_2$	1,237536	$p_2$	2			
	$\beta_3$	-3,439608	$p_3$	11			
	$\beta_4$	5,095485	$p_4$	14			
	$\beta_5$	-51,615824	$p_5$	85			
	$\beta_6$	107,96422	$p_6$	90			
	$\beta_7$	-56,24064	$p_7$	95			
Área 4	$\beta_1$	1,209732	$p_1$	1	97,64%	0,63483	7,02%
	$\beta_2$	0,900612	$p_2$	2			
	$\beta_3$	-1,748184	$p_3$	11			
	$\beta_4$	3,35343	$p_4$	14			
	$\beta_5$	-119,15902	$p_5$	85			
	$\beta_6$	272,04268	$p_6$	90			
	$\beta_7$	-152,33856	$p_7$	95			
Área 2 e 3	$\beta_1$	1,11112	$p_1$	1	96,87%	0,63946	7,73%
	$\beta_2$	1,177716	$p_2$	2			
	$\beta_3$	-3,828936	$p_3$	11			
	$\beta_4$	5,58939	$p_4$	14			
	$\beta_5$	-52,740102	$p_5$	85			
	$\beta_6$	108,91244	$p_6$	90			
	$\beta_7$	-56,185248	$p_7$	95			

Em que:  $\beta_{is}$  = parâmetros estimados,  $p_{is}$  = potências selecionadas,  $R^2$  = coeficiente de determinação,  $S_{yx}$  = erro padrão residual e  $S_{yx}\%$  = erro padrão residual percentual.

## 6 CONCLUSÕES

- O modelo polinomial Goulding & Murray (1976) foi preciso e exato na estimativa dos diâmetros e volumes ao longo do fuste
- O volume real advindo da cubagem rigorosa é impraticável de ser utilizado no inventário florestal estabelecendo uma situação fictícia de uso e, portanto, não deve ser utilizado associado ao modelo de Goulding & Murray (1976) nos testes de acurácia.
- O polinômio de potências inteiras e fracionárias (Hradetzky, 1976) também apresentou bons resultados, porém, inferior aos obtidos pelo modelo Goulding & Murray (1976).
- O modelo polinomial Schöepfer (1966) foi a função que apresentou as piores estimativas de diâmetro e volume.
- O teste de identidade de modelo indicou ser mais adequado, ajustar modelos independentes para as áreas 1 e 4 e para o subgrupo 2 e 3, quando utilizado o modelo Goulding & Murray (1976).

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, S.; HOLBERT, D. **Uma função para forma de tronco e volume de *Pinus taeda* L.** Curitiba: EMBRAPA, 1981. p.37-68. (Boletim de Pesquisa Florestal, 3).

ASSIS, A.L. de. **Acuracidade na estimativa de volumes comerciais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*.** 1998. 183p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

FERREIRA, M.Z. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda* L.** 2004. 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B.E.; HITCH, K.L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.83, n.1/2, p.36-46, June 1996.

FISCHER, F. **Eficiência dos modelos polinomiais e das razões de volume na estimativa volumétrica dos sortimentos e do perfil do fuste de *Pinus taeda*.** 1997. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GOULDING, C.J.; MURRAY, J.C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, Rotorua, v.5, n.3, p.313-322, Feb. 1976.

GRAYBILL, J. **Theory and application of the linear model.** Belmont: Duxbury, 1976.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer abhängerkeiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschungsprojekten).** Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146 p. (Abt. Biometrie und Informatik, 21).

HUSCH, B.; MILLER, C.I.; BEER, T.W. **Forest mensuration.** 3.ed. New York: J. Wiley & Sons, 1982. 402p.

PARRESOL, B.R.; HOTVEDT, J.E.; CAO, Q.V.A. Volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.17, n.3, p.250-259, Mar. 1987.

SAS INSTITUTE. **SAS User's guide: statistics.** Release 6.03. Cary, 1990. 584p.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stehender Waldbestände Schriftenreihe Bad.** [S.l.]: Württ-Forstl., 1966. Não paginado.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal 2**: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292p. (Textos Acadêmicos).

SCOLFORO, J.R.S. et al. Acuracidade de equações de afileamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliotti*. **Cerne**, Lavras, v.4, n.1, p.100-122, 1998.



## ANEXO A

	<b>Página</b>
<b>TABELA 1.A</b> Estatísticas e ranking do modelo Schöepfer (1966) para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	206
<b>TABELA 2.A</b> Estatísticas e ranking do modelo Hradetzky (1976) para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	207
<b>TABELA 3.A</b> Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume estimado para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	208
<b>TABELA 4.A</b> Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume real, para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	209

**TABELA 1.A** Estatísticas e ranking do modelo Schöpfer (1966) para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	0,7665	0,0327	1,9574	1,7986	4,0	3,0	2,0	2,0	11,0
0,25	0,6673	-0,0281	0,5759	1,2189	4,0	4,0	2,0	1,0	11,0
0,50	-1,5350	-0,3474	1,1526	1,1340	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,75	-1,3080	-0,3071	0,5332	0,9787	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
1,00	-0,7231	-0,2234	0,7439	0,7997	2,0	1,0	1,0	2,0	6,0
1,30	0,6654	-0,0929	0,5880	0,6386	1,0	2,0	1,0	1,0	5,0
1,50	-0,4521	-0,2034	0,4677	0,8116	3,0	2,0	1,0	1,0	7,0
2,00	1,9956	0,0499	1,0959	0,8462	1,0	4,0	1,0	2,0	8,0
2,50	0,2330	-0,0808	0,8014	1,0203	4,0	2,0	2,0	2,0	10,0
3,00	2,3143	0,1065	1,2617	0,8258	1,0	2,0	2,0	2,0	7,0
3,50	-0,8746	-0,1523	0,9550	0,9986	4,0	2,0	2,0	2,0	10,0
4,00	0,8760	-0,0370	1,7178	0,8809	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
4,50	-1,7850	-0,2595	1,2074	0,9799	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
5,00	1,7509	-0,0258	2,5875	0,8906	2,0	4,0	1,0	1,0	8,0
5,50	-0,0903	-0,1898	1,8699	1,0579	4,0	1,0	1,0	1,0	7,0
6,00	-0,0148	-0,1239	2,5189	0,9442	4,0	1,0	1,0	1,0	7,0
6,50	-3,0350	-0,2986	1,5571	0,9734	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
7,00	-1,3330	-0,1634	2,8875	1,0048	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
7,50	-2,3150	-0,2528	1,8131	1,0687	2,0	2,0	1,0	1,0	6,0
8,00	-0,3096	-0,1267	2,7723	0,9207	4,0	2,0	2,0	2,0	10,0
8,50	-3,4440	-0,2759	1,2539	0,8335	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
9,00	-2,8540	-0,2147	2,0908	0,8162	2,0	2,0	1,0	2,0	7,0
9,50	-5,1290	-0,2829	1,2179	0,7940	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
10,00	-7,9170	-0,4182	3,6942	0,9014	2,0	2,0	1,0	1,0	6,0
10,50	-8,6600	-0,4437	1,3180	0,7762	1,0	2,0	1,0	2,0	6,0
11,00	-8,5630	-0,3778	2,4685	0,7588	2,0	1,0	2,0	2,0	7,0
11,50	-9,7430	-0,4612	1,0409	0,7686	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
12,00	-13,0000	-0,4335	3,7907	0,8012	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
12,50	-16,5700	-0,6858	1,5277	0,7825	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
13,00	-23,8900	-0,7343	2,7423	0,6996	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
13,50	-28,8400	-1,0270	0,8754	0,7537	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
14,00	-38,7800	-0,9062	2,4277	0,7340	2,0	2,0	2,0	1,0	7,0
14,50	-4,8780	-0,2512	0,0024	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
15,00	-31,1200	-0,5852	0,2790	0,1831	2,0	2,0	2,0	4,0	10,0
15,50	-13,0000	-0,4745	0,0169	.	1,0	1,0	1,0	0,0	3,0
16,00	-7,0140	-0,2174	0,0049	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>240,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

**TABELA 2.A** Estatísticas e ranking do modelo Hradetzky (1976) para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	-1,3050	-0,2912	2,0574	1,8506	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
0,25	2,0969	0,1691	0,6267	1,2120	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
0,50	0,5096	-0,0777	1,0520	1,0723	4,0	3,0	2,0	2,0	11,0
0,75	0,2201	-0,1010	0,4503	0,9027	2,0	2,0	2,0	4,0	10,0
1,00	-0,1030	-0,1263	0,5904	0,7191	4,0	2,0	2,0	4,0	12,0
1,30	0,3148	-0,1067	0,4420	0,5598	3,0	1,0	2,0	2,0	8,0
1,50	-1,2810	-0,2726	0,4211	0,7698	1,0	1,0	2,0	2,0	6,0
2,00	0,5886	-0,0898	1,0622	0,8688	3,0	2,0	2,0	1,0	8,0
2,50	-1,0620	-0,2188	0,8892	1,0704	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
3,00	1,6694	0,0219	1,4292	0,8870	2,0	4,0	1,0	1,0	8,0
3,50	-0,9366	-0,1814	1,0557	1,0518	3,0	1,0	1,0	1,0	6,0
4,00	1,2989	-0,0162	1,8166	0,9091	1,0	4,0	1,0	1,0	7,0
4,50	-1,0790	-0,2050	1,1830	0,9861	3,0	2,0	2,0	1,0	8,0
5,00	2,3980	0,0360	2,4398	0,8639	1,0	3,0	2,0	2,0	8,0
5,50	0,5217	-0,1283	1,7012	1,0109	3,0	2,0	2,0	2,0	9,0
6,00	0,3273	-0,0753	2,2410	0,8896	3,0	3,0	2,0	2,0	10,0
6,50	-3,0600	-0,2743	1,4596	0,9212	1,0	2,0	2,0	2,0	7,0
7,00	-1,5700	-0,1570	2,7503	0,9644	1,0	2,0	2,0	2,0	7,0
7,50	-2,6530	-0,2647	1,8014	1,0412	1,0	1,0	2,0	2,0	6,0
8,00	-0,6381	-0,1510	2,8736	0,9220	3,0	1,0	1,0	1,0	6,0
8,50	-4,1580	-0,3224	1,3143	0,8417	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
9,00	-3,8080	-0,2746	2,0655	0,8307	1,0	1,0	2,0	1,0	5,0
9,50	-5,5060	-0,3272	1,2708	0,8268	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
10,00	-9,7620	-0,4844	3,3094	0,9008	1,0	1,0	2,0	2,0	6,0
10,50	-8,2120	-0,4523	1,2832	0,8151	2,0	1,0	2,0	1,0	6,0
11,00	-8,5830	-0,3737	2,6517	0,7788	1,0	2,0	1,0	1,0	5,0
11,50	-8,0430	-0,4027	0,9691	0,7925	2,0	2,0	2,0	1,0	7,0
12,00	-10,8800	-0,3455	3,1648	0,7923	2,0	2,0	3,0	2,0	9,0
12,50	-13,8600	-0,5820	1,0103	0,6692	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
13,00	-21,0600	-0,6082	2,6195	0,6860	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
13,50	-23,8000	-0,8458	0,6717	0,7305	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
14,00	-45,5200	-0,9739	2,5412	0,5150	1,0	1,0	1,0	4,0	7,0
14,50	0,2196	0,0113	0,0000	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
15,00	-44,3900	-0,6814	0,7107	0,6799	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
15,50	-9,3520	-0,3414	0,0088	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
16,00	-12,2300	-0,3792	0,0150	.	1,0	1,0	1,0	0,0	3,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>253,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

**TABELA 3.A** Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume estimado para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	-0,9058	-0,0125	1,6041	1,5514	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
0,25	-0,7932	-0,0649	0,4560	1,0620	2,0	2,0	3,0	4,0	11,0
0,50	-0,8980	-0,0625	0,7196	0,9416	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
0,75	-0,2041	0,0414	0,3717	0,9430	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
1,00	-0,6537	-0,0107	0,4058	0,7421	3,0	4,0	4,0	3,0	14,0
1,30	0,2973	0,0631	0,1584	0,4088	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
1,50	-0,4585	-0,0135	0,2227	0,5476	2,0	3,0	3,0	3,0	11,0
2,00	0,6920	0,0915	0,4435	0,5970	2,0	1,0	3,0	3,0	9,0
2,50	-0,7414	-0,0215	0,4719	0,8019	2,0	3,0	3,0	3,0	11,0
3,00	0,9309	0,1129	0,7020	0,6845	3,0	1,0	3,0	3,0	10,0
3,50	-1,2600	-0,0624	0,6370	0,7809	1,0	3,0	3,0	3,0	10,0
4,00	0,3843	0,0435	1,0181	0,6871	3,0	1,0	3,0	3,0	10,0
4,50	-1,2990	-0,0904	0,7251	0,7056	2,0	3,0	3,0	3,0	11,0
5,00	1,7457	0,1161	1,4810	0,6391	3,0	1,0	3,0	3,0	10,0
5,50	0,8972	0,0201	1,0182	0,7620	2,0	4,0	3,0	3,0	12,0
6,00	1,0372	0,0801	1,4361	0,6907	1,0	2,0	3,0	3,0	9,0
6,50	-1,9390	-0,0798	0,9862	0,6637	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
7,00	-0,3300	0,0345	2,0560	0,7576	4,0	3,0	3,0	3,0	13,0
7,50	-0,8616	-0,0321	1,2107	0,7282	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
8,00	0,8216	0,0566	2,0438	0,6822	2,0	3,0	3,0	3,0	11,0
8,50	-1,9580	-0,0697	0,9231	0,6258	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
9,00	-1,1500	-0,0348	1,5988	0,6691	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
9,50	-2,7730	-0,0706	0,9831	0,6356	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
10,00	-5,6060	-0,2591	2,9248	0,7646	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
10,50	-5,4160	-0,2396	0,8349	0,5977	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
11,00	-6,0200	-0,2267	1,9375	0,6681	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
11,50	-5,5040	-0,2256	0,6352	0,6111	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
12,00	-8,8750	-0,2399	3,0470	0,7321	4,0	4,0	4,0	3,0	15,0
12,50	-10,1900	-0,4157	0,8856	0,6417	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
13,00	-17,4300	-0,4837	1,9621	0,6437	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
13,50	-21,2400	-0,7153	0,5707	0,7271	4,0	4,0	4,0	3,0	15,0
14,00	-31,1200	-0,6775	1,8726	0,7029	3,0	3,0	3,0	2,0	11,0
14,50	5,6956	0,2933	0,0032	.	1,0	1,0	1,0	0,0	3,0
15,00	-22,4900	-0,2911	0,2145	0,4922	3,0	4,0	3,0	2,0	12,0
15,50	-0,7602	-0,0277	0,0001	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
16,00	3,9133	0,1213	0,0015	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>420,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

**TABELA 4.A** Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume real, para estimativa dos diâmetros ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	-1,4270	-0,0654	1,5099	1,5066	1,0	2,0	4,0	4,0	11,0
0,25	-0,7392	-0,0369	0,4127	1,1275	3,0	3,0	4,0	3,0	13,0
0,50	-1,4720	-0,1036	0,7832	1,0419	2,0	2,0	3,0	3,0	10,0
0,75	-0,1776	0,0653	0,3691	1,0795	4,0	3,0	4,0	1,0	12,0
1,00	-1,2550	-0,0460	0,5371	0,8790	1,0	3,0	3,0	1,0	8,0
1,30	-0,3151	0,0299	0,3342	0,5557	2,0	4,0	3,0	3,0	12,0
1,50	-0,3765	0,0074	0,1284	0,4314	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
2,00	0,1895	0,0611	0,2715	0,4550	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
2,50	-0,5845	-0,0028	0,2300	0,5365	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
3,00	0,4963	0,0858	0,3053	0,4665	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
3,50	-1,0640	-0,0446	0,3122	0,5043	2,0	4,0	4,0	4,0	14,0
4,00	-0,0183	0,0201	0,5143	0,4804	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
4,50	-1,0520	-0,0731	0,3080	0,4484	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
5,00	1,4206	0,0968	0,7849	0,4324	4,0	2,0	4,0	4,0	14,0
5,50	1,1414	0,0353	0,5375	0,5220	1,0	3,0	4,0	4,0	12,0
6,00	0,8747	0,0672	0,7563	0,4772	2,0	4,0	4,0	4,0	14,0
6,50	-1,4110	-0,0564	0,5763	0,4881	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
7,00	-0,3707	0,0265	1,3615	0,5995	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
7,50	-0,2819	-0,0100	0,8138	0,5866	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
8,00	0,8809	0,0538	1,5171	0,5608	1,0	4,0	4,0	4,0	13,0
8,50	-1,1800	-0,0422	0,6056	0,4885	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
9,00	-0,7945	-0,0286	1,2110	0,5580	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
9,50	-2,0000	-0,0464	0,7270	0,5958	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
10,00	-5,0530	-0,2538	2,1689	0,6275	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
10,50	-4,7420	-0,2253	0,5686	0,5056	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
11,00	-6,2560	-0,2420	1,7664	0,6033	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
11,50	-5,4320	-0,2267	0,6142	0,5738	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
12,00	-9,3540	-0,2562	3,2044	0,7247	3,0	3,0	2,0	4,0	12,0
12,50	-9,7240	-0,3989	0,8092	0,6024	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
13,00	-16,5100	-0,4566	1,8352	0,5959	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
13,50	-22,8600	-0,7797	0,6433	0,7262	3,0	3,0	3,0	4,0	13,0
14,00	-30,2300	-0,6605	1,7273	0,6377	4,0	4,0	4,0	3,0	15,0
14,50	3,0645	0,1578	0,0009	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
15,00	-21,8800	-0,3235	0,1792	0,3685	4,0	3,0	4,0	3,0	14,0
15,50	-3,5710	-0,1304	0,0013	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
16,00	1,2326	0,0382	0,0002	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>497,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

## ANEXO B

	<b>Página</b>
<b>TABELA 1.B</b> Estatísticas e ranking do modelo Schöpfer (1966) para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	211
<b>TABELA 2.B</b> Estatísticas e ranking do modelo Hradetzky (1976) para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	212
<b>TABELA 3.B</b> Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume estimado, para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	213
<b>TABELA 4.B</b> Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume real, para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de <i>Tectona grandis</i> L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados.....	214

**TABELA 1.B** Estatísticas e ranking do modelo Schöpfer (1966) para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,25	4,2694	0,0001	2,8344	0,0010	2,0	3,0	2,0	1,0	8,0
0,50	-0,2254	-0,0004	4,8058	0,0017	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,75	1,4391	-0,0003	2,1446	0,0023	1,0	1,0	2,0	1,0	5,0
1,00	-0,8476	-0,0008	3,8916	0,0027	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
1,30	-0,5880	-0,0010	3,4300	0,0030	4,0	1,0	1,0	1,0	7,0
1,50	0,5862	-0,0008	1,6742	0,0033	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
2,00	0,4796	-0,0012	2,8433	0,0037	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
2,50	0,8206	-0,0013	1,4362	0,0044	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
3,00	1,6966	-0,0012	2,5957	0,0046	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
3,50	0,8899	-0,0016	1,4116	0,0056	2,0	1,0	2,0	1,0	6,0
4,00	2,0553	-0,0013	2,6381	0,0056	2,0	1,0	2,0	1,0	6,0
4,50	0,5699	-0,0020	1,5182	0,0070	2,0	1,0	2,0	2,0	7,0
5,00	2,0752	-0,0016	2,8864	0,0068	2,0	1,0	2,0	2,0	7,0
5,50	0,0060	-0,0026	1,6303	0,0085	2,0	1,0	2,0	1,0	6,0
6,00	-0,0891	-0,0025	2,3508	0,0082	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
6,50	-1,9860	-0,0036	1,5172	0,0101	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
7,00	-1,5900	-0,0034	2,2445	0,0097	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
7,50	-3,9320	-0,0052	1,5053	0,0120	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
8,00	-3,0530	-0,0046	2,1901	0,0112	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
8,50	-6,3380	-0,0072	1,4118	0,0135	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
9,00	-6,0500	-0,0068	1,7238	0,0123	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
9,50	-9,3370	-0,0102	1,2418	0,0147	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
10,00	-7,8280	-0,0086	1,6382	0,0132	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
10,50	-10,8300	-0,0123	1,2470	0,0160	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
11,00	-8,0260	-0,0095	1,3130	0,0141	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
11,50	-12,0700	-0,0152	0,9618	0,0180	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
12,00	-9,7600	-0,0119	1,1850	0,0158	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
12,50	-14,7500	-0,0191	0,9266	0,0192	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
13,00	-15,4900	-0,0197	1,1384	0,0186	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
13,50	-12,1200	-0,0182	0,1600	0,0155	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
14,00	-15,2200	-0,0198	0,3325	0,0157	2,0	1,0	1,0	1,0	5,0
14,50	-18,8300	-0,0336	0,0355	.	2,0	1,0	1,0	0,0	4,0
15,00	-17,9700	-0,0264	0,0648	0,0105	2,0	1,0	1,0	2,0	6,0
15,50	-18,8300	-0,0339	0,0355	.	2,0	1,0	1,0	0,0	4,0
16,00	-18,8400	-0,0340	0,0355	.	2,0	1,0	1,0	0,0	4,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>188,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

**TABELA 2.B** Estatísticas e ranking do modelo Hradetzky (1976) para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,25	5,2944	0,0001	2,9312	0,0010	1,0	1,0	1,0	2,0	5,0
0,50	2,0658	-0,0002	4,7712	0,0016	3,0	4,0	2,0	2,0	11,0
0,75	4,0754	0,0000	2,1730	0,0022	1,0	4,0	1,0	3,0	9,0
1,00	1,7603	-0,0004	3,6443	0,0025	3,0	3,0	2,0	3,0	11,0
1,30	1,6304	-0,0005	3,1481	0,0028	3,0	2,0	2,0	3,0	10,0
1,50	2,4929	-0,0003	1,5653	0,0030	1,0	4,0	2,0	3,0	10,0
2,00	1,6088	-0,0008	2,6123	0,0034	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
2,50	1,4163	-0,0010	1,3569	0,0041	1,0	2,0	2,0	2,0	7,0
3,00	1,9854	-0,0011	2,5389	0,0044	1,0	2,0	2,0	2,0	7,0
3,50	1,0631	-0,0015	1,4143	0,0055	1,0	2,0	1,0	2,0	6,0
4,00	2,2442	-0,0013	2,6959	0,0056	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
4,50	0,8165	-0,0019	1,5488	0,0070	1,0	2,0	1,0	1,0	5,0
5,00	2,3921	-0,0015	2,9441	0,0068	1,0	2,0	1,0	1,0	5,0
5,50	0,3984	-0,0024	1,6360	0,0084	1,0	2,0	1,0	2,0	6,0
6,00	0,3504	-0,0023	2,3413	0,0082	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
6,50	-1,5140	-0,0033	1,4829	0,0100	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
7,00	-1,1140	-0,0031	2,1837	0,0095	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
7,50	-3,4530	-0,0048	1,4537	0,0118	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
8,00	-2,5960	-0,0043	2,1194	0,0110	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
8,50	-5,9050	-0,0069	1,3610	0,0133	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
9,00	-5,6360	-0,0064	1,6602	0,0121	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
9,50	-8,9560	-0,0098	1,1986	0,0145	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
10,00	-7,4860	-0,0083	1,5865	0,0131	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
10,50	-10,4900	-0,0120	1,2117	0,0159	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
11,00	-7,7210	-0,0092	1,2778	0,0140	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
11,50	-11,7600	-0,0149	0,9387	0,0179	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
12,00	-9,4310	-0,0115	1,1536	0,0158	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
12,50	-14,4000	-0,0187	0,9016	0,0191	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
13,00	-15,1100	-0,0192	1,1044	0,0185	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
13,50	-11,7800	-0,0177	0,1543	0,0154	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
14,00	-14,8100	-0,0193	0,3208	0,0156	2,0	2,0	2,0	2,0	8,0
14,50	-18,4400	-0,0329	0,0340	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
15,00	-17,5300	-0,0257	0,0616	0,0102	2,0	2,0	2,0	3,0	9,0
15,50	-18,3500	-0,0330	0,0337	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
16,00	-18,3600	-0,0331	0,0337	.	2,0	2,0	2,0	0,0	6,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>271,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.



**TABELA 3.B** Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume estimado, para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,25	-3,4120	-0,0001	2,4306	0,0008	3,0	2,0	3,0	4,0	12,0
0,50	-5,3910	-0,0003	3,9756	0,0013	2,0	3,0	3,0	4,0	12,0
0,75	-0,6227	0,0002	1,5315	0,0019	3,0	3,0	3,0	4,0	13,0
1,00	-3,3180	-0,0003	2,5579	0,0021	2,0	4,0	4,0	4,0	14,0
1,30	-2,6250	-0,0002	2,0323	0,0024	2,0	4,0	4,0	4,0	14,0
1,50	-0,1338	0,0004	1,0517	0,0029	3,0	3,0	3,0	4,0	13,0
2,00	-1,3800	-0,0001	1,2984	0,0025	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
2,50	0,0421	0,0004	0,7150	0,0031	4,0	4,0	3,0	4,0	15,0
3,00	-0,3557	0,0001	0,9647	0,0028	4,0	3,0	3,0	4,0	14,0
3,50	-0,0119	0,0005	0,6480	0,0037	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
4,00	0,0676	0,0003	0,9128	0,0034	4,0	3,0	3,0	3,0	13,0
4,50	-0,1466	0,0004	0,6554	0,0044	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
5,00	0,3445	0,0003	0,9640	0,0039	4,0	3,0	3,0	3,0	13,0
5,50	0,0300	0,0004	0,6855	0,0051	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
6,00	0,5364	0,0005	0,8500	0,0047	1,0	3,0	3,0	3,0	10,0
6,50	-0,4172	0,0003	0,6046	0,0060	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
7,00	0,5246	0,0006	0,8353	0,0055	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
7,50	-0,4530	0,0003	0,5646	0,0069	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
8,00	0,5068	0,0007	0,8098	0,0063	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
8,50	-0,9310	0,0002	0,4895	0,0078	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
9,00	-0,0515	0,0006	0,5079	0,0071	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
9,50	-0,9580	0,0002	0,3480	0,0087	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
10,00	-0,0370	0,0007	0,4537	0,0078	4,0	3,0	3,0	3,0	13,0
10,50	-0,7264	0,0003	0,3159	0,0095	3,0	4,0	3,0	3,0	13,0
11,00	0,9478	0,0014	0,3023	0,0078	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
11,50	0,1335	0,0010	0,1668	0,0100	4,0	3,0	3,0	3,0	13,0
12,00	0,9943	0,0016	0,2571	0,0090	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
12,50	-0,3252	0,0000	0,1244	0,0094	4,0	4,0	3,0	3,0	14,0
13,00	-1,3790	-0,0011	0,1641	0,0098	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
13,50	2,8861	0,0046	0,0238	0,0079	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
14,00	-0,8559	-0,0004	0,0574	0,0104	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0
14,50	5,3566	0,0096	0,0029	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
15,00	-0,1386	0,0017	0,0061	0,0112	3,0	3,0	3,0	1,0	10,0
15,50	5,3526	0,0096	0,0029	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
16,00	5,3456	0,0097	0,0029	.	3,0	3,0	3,0	0,0	9,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>445,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

**TABELA 4.B** Estatísticas e ranking do modelo Goulding & Murray (1976) aplicado com volume real, para estimativa dos volumes ao longo do fuste das árvores de *Tectona grandis* L.f., para o conjunto de dados dos quatro povoamentos estudados

$h_i$	Estatísticas de acuracidade				Ranqueamento				Nota ranking. $h_i^{-1}$
	RP	D	SSRR	DP	RP	D	SSRR	DP	
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0	1,0	1,0	1,0	4,0
0,25	-3,1650	0,0000	2,0727	0,0008	4,0	4,0	4,0	3,0	15,0
0,50	-6,4590	-0,0004	3,9069	0,0015	1,0	1,0	4,0	3,0	9,0
0,75	-0,4792	0,0002	1,3543	0,0023	4,0	2,0	4,0	2,0	12,0
1,00	-4,4320	-0,0004	2,6066	0,0025	1,0	3,0	3,0	3,0	10,0
1,30	-3,7680	-0,0003	2,1543	0,0029	1,0	3,0	3,0	2,0	9,0
1,50	-0,0527	0,0005	0,9724	0,0036	4,0	2,0	4,0	1,0	11,0
2,00	-2,4990	-0,0002	1,3339	0,0031	1,0	3,0	3,0	3,0	10,0
2,50	0,2032	0,0005	0,5143	0,0035	3,0	3,0	4,0	3,0	13,0
3,00	-1,3930	0,0000	0,7350	0,0029	3,0	4,0	4,0	3,0	14,0
3,50	0,2361	0,0006	0,3000	0,0031	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
4,00	-0,8924	0,0001	0,4309	0,0026	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
4,50	0,1715	0,0006	0,1801	0,0027	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
5,00	-0,5435	0,0002	0,2492	0,0024	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
5,50	0,2814	0,0006	0,1020	0,0024	2,0	3,0	4,0	4,0	13,0
6,00	-0,0267	0,0003	0,1355	0,0022	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
6,50	0,4862	0,0006	0,0560	0,0022	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
7,00	0,1975	0,0004	0,0721	0,0020	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
7,50	0,4612	0,0006	0,0280	0,0019	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
8,00	0,3665	0,0005	0,0375	0,0017	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
8,50	0,5002	0,0006	0,0148	0,0016	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
9,00	0,5740	0,0006	0,0217	0,0015	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
9,50	0,5565	0,0007	0,0082	0,0014	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
10,00	0,5739	0,0006	0,0121	0,0012	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
10,50	0,4673	0,0006	0,0042	0,0011	4,0	3,0	4,0	4,0	15,0
11,00	0,4284	0,0005	0,0058	0,0010	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
11,50	0,4244	0,0006	0,0021	0,0010	3,0	4,0	4,0	4,0	15,0
12,00	0,3652	0,0005	0,0024	0,0008	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
12,50	0,3902	0,0005	0,0009	0,0008	3,0	3,0	4,0	4,0	14,0
13,00	0,3345	0,0004	0,0008	0,0006	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
13,50	0,5061	0,0007	0,0003	0,0007	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
14,00	0,2221	0,0003	0,0001	0,0004	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
14,50	0,0020	0,0000	0,0000	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
15,00	0,0272	0,0000	0,0000	0,0000	4,0	4,0	4,0	4,0	16,0
15,50	-0,0022	0,0000	0,0000	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
16,00	-0,0097	0,0000	0,0000	.	4,0	4,0	4,0	0,0	12,0
<b>Total ranqueamento</b>									<b>489,0</b>

Em que:  $h_i$  = altura ao longo do fuste, RP = resíduo percentual, D = desvio, SSRR = soma de quadrado do resíduo relativo e DP = desvio padrão das diferenças.

## **CAPÍTULO 5**

**SELEÇÃO DE FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA  
PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO, POR CLASSE DIAMÉTRICA, PARA  
POVOAMENTOS DE *Tectona grandis* L.f.**

## 1 RESUMO

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Seleção de funções densidade de probabilidade para projeção da produção, por classe diamétrica, para povoamentos de *Tectona grandis* L.f.** 2005. Cap. 5, p. 215-265. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

O estudo realizado para dois povoamentos de *Tectona grandis* L.f. com densidades distintas objetivou selecionar a função densidade de probabilidade que melhor representa as distribuições diamétricas dos povoamentos e ajustar modelos que representem os seus atributos para projetar o crescimento e a produção por classe diamétrica e o rendimento de múltiplos produtos da madeira na idade de rotação silvicultural. Os trabalhos foram realizados em propriedades da Madeireira Floresta Ltda. e Madeireira Chalana Ltda, localizadas no município de Rio Branco, estado do Acre. Inicialmente, foram realizados o ajuste e seleção das distribuições diamétricas e a classificação de sítio, utilizando-se o método da diferença algébrica e avaliando-se o desempenho de modelos em suas formas anamórficas e polimórficas. Posteriormente, foram desenvolvidos e selecionados modelos dos atributos do povoamento, utilizando-se como critério de seleção da equação mais precisa o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e a distribuição gráfica dos resíduos. Em seguida, foram ajustados modelos hipsométricos genéricos e de função de afilamento Goulding & Murray (1976) para os dois povoamentos, visando a estimativa da altura e volume, respectivamente. Por último, foi estimada a rotação técnica e rendimento de múltiplos produtos da madeira na idade de rotação. A função densidade de probabilidade Weibull percentis foi a que melhor representou a distribuição diamétrica das unidades amostrais. Para o povoamento com densidade inicial de 2.085 árvores.ha<sup>-1</sup>, foi estimada a rotação técnica aos 19 anos de idade, enquanto, para o povoamento com densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>, a rotação técnica foi prevista para os 24 anos. O povoamento mais denso apresentou maior produção, porém, com menor percentual de madeira com dimensões para serraria que o povoamento menos denso. As estimativas de crescimento e produção dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. avaliados são compatíveis com as principais regiões produtoras no mundo.

Palavra-chave: Weibull, gama, lognormal,  $S_B$  de Johnson, teca, função de afilamento, múltiplos produtos da madeira e sobrevivência.

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Selection of probability density functions for projection of yield per diameter class for stands of *Tectona grandis* L.f.** 2005. Chap. 5. p. 215-265. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The study conducted for two stands of *Tectona grandis* L.f with distinct densities aimed to select the function probability density which best represents the diameter distributions of the stands and fit models which represent their attributes to project the growth and yield by diameter class and the yield of multiple products of wood at the age of silvicultural rotation age. The works were conducted on farms of Madeireira Floresta Ltda and Madeireira Chalana Ltda, situated in the city of Rio Branco, state of Acre. At first, the fit and selection of the diameter distributions and site classification were done by utilizing the algebraic difference method and evaluating the performance of models with their anamorphic and polymorphic forms. Afterwards, models of the attributes of stand were developed and selected by making use as a criterion of selection of the most precise equation analysing the determination coefficient ( $R^2$ ), the residual standard error ( $S_{y,x}$ ) and the graphical distribution of residues. Next, other generic hypsometric models and of Goulding & Murray (1976) tapering function were fitted for the two stands, aiming at the estimate of height and volume, respectively. At last, the technical rotation and yield of multiple wood products at the age of rotation were estimated. The function Weibull percentile probability density was the one which best represented the diameter distribution of sampling units. For the stand with initial density of 2.085 trees.ha<sup>-1</sup>, the technical rotation at the age of 19 years was estimated whereas for the stand with an initial density of 1.111 trees.ha<sup>-1</sup>, the technical rotation was foreseen for the 24 years. The densest stand presented highest yield, but with smaller percent of wood for sawmill than the less dense stand. The growth and yield estimates of the stand of *Tectona grandis* L.f evaluated are compatible to the world's main growing regions.

Key-words: Weibull, gamma, lognormal, Johnson's  $S_B$ , teak, tapering function, multiple wood products and survival.

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser); Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-adviser)

### 3 INTRODUÇÃO

Muitos esforços científicos têm sido empenhados com o objetivo de melhorar a modelagem do crescimento e da produção florestal. Duas tendências são predominantes: os modelos biométricos e os modelos baseados em processo.

Os modelos baseados em processo podem ser considerados um tema da ciência florestal ainda em desenvolvimento, pois usam e demandam estudos ecofisiológicos e, para Scolforo (1998), sua aplicação prática é vislumbrada para mais longo prazo.

Os modelos biométricos buscam representar indiretamente os fatores ambientais e os tratamentos silviculturais no crescimento e produção dos povoamentos florestais. Para isso, são empregados como fontes de variação o sitio florestal, a área basal e a idade.

Os modelos biométricos ainda podem ser categorizados em modelos de povoamento, por classe diamétrica e para árvores individuais.

Burkhart et al. (1981) enfatizam que os modelos de povoamento devem ser geralmente aplicados quando estimativas gerais sobre a população são desejadas, sendo estes procedimentos computacionalmente eficientes. Este modelo não fornece elementos para que se proceda a uma avaliação econômica das várias opções de utilização dos produtos florestais, além de ser inflexível para analisar desbastes a serem simulados no povoamento.

Para Scolforo (1998), os modelos de distribuição por classe diamétrica possibilitam a avaliação econômica de produtos discriminados por classe de tamanho. Computacionalmente, é mais dispendioso que o modelo para todo o povoamento, no entanto é muito mais inflexível embora não o seja para uma "ampla" faixa de desbastes a serem simulados no povoamento. Os modelos para árvore individual apresentam um máximo detalhamento e flexibilidade para avaliar opções de utilização e tratamentos no povoamento. Entretanto, sua

construção exige uma base de dados com maior controle e, portanto, são mais dispendiosos.

A teca é considerada uma das espécies de maior valor de mercado e apresenta uma longa rotação quando comparada com as duas principais espécies de folhosas plantadas nos trópicos (eucaliptos e acácias). Estas duas características da espécie justificam maiores esforços na busca de projeções de crescimento e produção mais detalhadas. Mediante projeções mais detalhadas é possível prescrever regimes de manejo mais adequados e que visem a qualidade do produto final, além de permitir a descrição de um plano de suprimento para a indústria florestal.

Os estudos realizados em dois povoamentos de teca (*Tectona grandis* L.f.) com densidades distintas, localizados na microrregião do Baixo Rio Acre, objetivaram:

- selecionar, entre as funções densidade de probabilidade (f.d.p.) lognormal, gama momentos, Weibull percentil e  $S_B$  momentos, aquela que apresentou melhor aderência entre as curvas de distribuição diamétrica observada e teórica para o conjunto das unidades amostrais permanentes avaliadas;
- selecionar os modelos que melhor representam os seguintes atributos dos povoamentos de teca: sítio, sobrevivência, relação hipsométrica genérica, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, área basal, média aritmética dos diâmetros e diâmetro percentil;
- estimar o crescimento e produção por classe diamétrica por meio da função acumulada selecionada e modelos que representam os atributos para o intervalo de idades entre 5 e 30 anos;
- estimar a rotação técnica/silvicultural para os dois povoamentos estudados; e,
- estimar o rendimento de múltiplos produtos da madeira para os povoamentos estudados, na idade prevista para a rotação técnica/silvicultural.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização das áreas de estudo e dos plantios estudados**

A prognose por classe diamétrica foi realizada nos dois povoamentos de teca com maior idade, plantados nas áreas 1 e 3, cujas características são descritas nos itens 4.1 e 4.2 do capítulo 2.

Os povoamentos estudados ainda não sofreram desbastes e portanto as estimativas corresponderam a uma projeção sem o emprego desta prática. No entanto, passaram pelos mesmos tratamentos silviculturais de roçagem, desramas, controle de formigas, entre outras. Dessa forma, a mortalidade existente nos povoamentos é correspondente à qualidade do local e da competição entre elas, situação descrita por Clutter et al. (1983) como adequada para estabelecer uma boa projeção da produção florestal.

### **4.2 Base de dados dos povoamentos de teca**

As informações advindas do inventário nas idades estudadas e dados silviculturais (densidade inicial, sobrevivência e outras) registrados para o ano 1, formam a base para projeção dos atributos do povoamento e encontram-se em Tabela 1.A (Anexo).

Os inventários foram realizados com a finalidade de conhecer as características qualitativas das árvores e, principalmente, conhecer o estoque atual, a variabilidade e a distribuição diamétrica.

Os trabalhos de campo foram realizados nos meses de julho e agosto de 2004, período em que a deciduidade da espécie facilita as atividades de campo, a exemplo da coleta das alturas das árvores.



O diagnóstico dos povoamentos de teca iniciou-se com a instalação de parcelas de 400 m<sup>2</sup>, no formato circular com raio de 11,28 metros. O procedimento de amostragem empregado para os dois povoamentos foi a amostragem casual simples.

Inicialmente foram instaladas 6 unidades amostrais em cada povoamento e, posteriormente, calculados e recalculados o número de unidades amostrais necessárias, considerando um erro máximo de 15% da área basal.

Em cada unidade amostral instalada foram coletadas informações referentes a: diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (H<sub>t</sub>), qualidade do fuste e a existência de pragas ou a manifestação de doenças. Para coleta do DAP (a 1,3 metro do colo da árvore), as árvores da unidade amostral foram marcadas com cera resistente à água, na altura correspondente ao DAP e os indivíduos mensurados com fita métrica. Na coleta da altura total foi utilizado o hipsômetro de *Blume-Leiss*. A qualidade do fuste foi avaliada como: 1. boa, 2. regular e 3. ruim. Para a avaliação de pragas e doenças foi apenas registrada a sua presença ou ausência.

#### **4.3 Classificação de sítio florestal**

Para a classificação de sítio foi considerado o conceito de Assmann para definição das árvores dominantes. A reconstituição do histórico do crescimento em altura foi feita por meio da análise de tronco completa das árvores dominantes, com a instalação de uma subparcela de 100 m<sup>2</sup> em cada unidade amostral do inventário.

A classificação de sítio foi possível após a seleção da equação que permitiu definir os limites inferior e superior de cada classe de sítio definidas para a idade de referência de 108 meses (9 anos). Esta idade é próxima da idade

do povoamento de teca mais antigo. Foram testados quatro modelos pelo método da diferença algébrica.

Para a seleção da equação mais precisa, adotou-se a análise gráfica dos resíduos percentuais, o erro padrão da estimativa ( $S_{y,x}$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ) e, principalmente, o critério de verificar a estabilidade da classificação de cada parcela sujeita a várias medições entre os limites das curvas que expressam as classes de sítio. Para este procedimento, foram utilizadas todas as parcelas envolvidas no estudo.

#### **4.4 Ajustes das distribuições contínuas para representação da estrutura diamétrica dos povoamentos de teca**

As distribuições diamétricas em povoamentos florestais têm sido modeladas por meio de funções matemáticas, como as funções de densidade de probabilidade (f.d.p.), exemplificadas pela aplicação das funções de distribuição: logarítmica normal com três parâmetros (Bliss & Reinker, 1964), a distribuição gama (Nelson, 1964), a distribuição beta (Clutter & Bennet, 1965), a distribuição Weibull (Bailey & Dell, 1973) e a distribuição  $S_B$  de Johnson (Hafley & Schreuder, 1977).

Os estudos realizados para os dois povoamentos de teca avaliaram quatro distribuições para estimar a frequência teórica semelhante ou não à frequência observada por classe diamétrica em cada unidade amostral do inventário.

As funções de densidade de probabilidade avaliadas foram: lognormal, gama, Weibull e  $S_B$ . Para estimar os parâmetros destas distribuições existe uma série de métodos, sendo que, para as avaliações realizadas foram testados os métodos percentis para distribuição Weibull e o método momentos para as distribuições gama e  $S_B$ .

Associada a f.d.p., existe a função de distribuição acumulada  $[F(x)]$ , definida pela integral da f.d.p., cuja área delimitada entre o intervalo  $[a, b]$ , encontrada sob a curva, define a probabilidade das árvores estarem contidas na distribuição.

Uma função densidade de probabilidade  $f(x)$  é de fato uma f.d.p. se  $x$  satisfaz às seguintes condições:

- $f(x) \geq 0$  para todos os valores de  $x$  dentro do intervalo considerado;
- $f(x) \delta x = 1$ ; e,
- $f(x) = 0$ , se  $x$  está contido fora do intervalo considerado.

Assim, a probabilidade de  $x$  ocorrer num intervalo depende da integral:

$$P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx.$$

A função de distribuição acumulada  $F(x)$  é o resultado da integral de  $f(x)$  e estima a probabilidade da variável  $x$  assumir um valor menor ou igual a  $x$ .

$$F(x) = \int_a^b f(x) dx, \text{ suas propriedades são:}$$

- não é decrescente;
- quando  $x$  tende a mais infinito  $f(x) = 1$ ;
- quando  $x$  tende a menos infinito  $f(x) = 0$ ; e,
- $P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a)$  para  $a < b$ .

Para as distribuições lognormal, gama e  $S_B$ , não é possível resolver a integral, a não ser com o uso de cálculo numérico ou procedimentos de aproximação numérica como o método dos trapezóides. Neste caso, fez-se a opção de estreitar ao máximo o intervalo das classes diamétricas de cada unidade amostral, para 1 cm, conforme também efetuado por Swindel et al.

(1987). Os resultados obtidos a partir da f.d.p. são bastante próximos do resultado obtido a partir da função de distribuição acumulada.

#### 4.4.1 Distribuição lognormal

A distribuição lognormal é assimétrica à direita, o que não acontece com a distribuição normal, que é simétrica em relação à média (Ribeiro Junior, 2004). Uma variável aleatória  $x$ , com valores positivos, tem distribuição lognormal se  $\ln(x)$  é normalmente distribuído, ou seja, se  $x$  está na  $e^z$ , sendo  $z$  normal.

A função densidade de probabilidade lognormal é expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\cdot\sigma^2} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Sendo:

$x \geq 0$ ;

$x$  = variável aleatória diâmetro;

$e$  = exponencial;

$\ln$  = logaritmo neperiano;

$\sigma$  = desvio-padrão da variável  $x$  na escala logarítmica;

$\sigma^2$  = variância da variável  $x$  na escala logarítmica; e,

$\mu$  = média da variável  $x$  na escala logarítmica.

A função acumulada da distribuição é representada pela expressão:

$$F(X) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\cdot\sigma^2} \int_{-\infty}^x e^{\left(\frac{1}{2\sigma^2}\right)(\ln x - \mu)^2}$$

Assim, a média para função é expressa por:

$$\mu = \bar{d} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i$$

E a variância expressa por:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n d_i\right)^2}{n}}{n}$$

em que:

$x$  = variável aleatória diâmetro;  
 $e$  = exponencial;  
 $n$  = número de diâmetros observados;  
 $\sigma^2$  = variância dos diâmetros  
 $d_i$  = diâmetro observado; e,  
 $\mu$  ou  $\bar{d}$  = média dos diâmetros.

#### 4.4.2 Distribuição gama pelo método dos momentos

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com esta distribuição, como os de Couto (1980), Finger (1982), Glade (1986) e Swindel et al. (1987), dentre outros.

Segundo Scolforo (1998), a função de distribuição gama é flexível, podendo ser empregada tanto em florestas nativas como em florestas plantadas, assumindo diferentes tipos de curva, passando por diversos graus de assimetria.

Para Ribeiro Junior (2004), a distribuição é assimétrica à direita e, no caso de uma variável  $x$ .

A função de densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

em que:

Se tem a condição  $x \geq 0$ ,  $\alpha > 0$  e  $\beta > 0$ ;  
 $x$  = variável aleatória diâmetro;  
 $\Gamma$  = função gama;  
 $\alpha$ ,  $\beta$  = parâmetros a serem estimados, tem sinais positivos e definem a forma da distribuição; e,  
 $e$  = exponencial.

Scolforo (1998) propõe uma forma alternativa de apresentar a função gama, em que  $x$  é maior ou igual ao diâmetro mínimo ( $d_{\min}$ ). Assim, a variável aleatória  $x$  assume a forma  $(\bar{d} - d_{\min})$ . Reescrevendo a função tem-se:

$$f(x) = \frac{(\bar{d} - d_{\min})^{\alpha-1} e^{-\frac{(\bar{d} - d_{\min})}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}$$

Por integração da função, obtém-se a função de distribuição gama, expressa por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x (\bar{d} - d_{\min})^{\alpha-1} e^{-\frac{(\bar{d} - d_{\min})}{\beta}} \delta(\bar{d} - d_{\min})$$

O ajustamento da função pelo método dos momentos, as estimativas dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são dados pelas seguintes expressões:

Para o parâmetro  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\sigma_x^2}{\mu_x} \quad \text{ou} \quad \beta = \frac{\sigma_x^2}{(\bar{d} - d_{\min})}$$

Para o parâmetro  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\mu_x^2}{\sigma_x^2} \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{(\bar{d} - d_{\min})^2}{s_x^2}$$

em que:

$\mu_x^2$  = média da variável aleatória (diâmetro);  
 $\sigma_x^2$  = variância da variável aleatória (diâmetro); e,  
 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\bar{d}$  e  $d_{\min}$ , definidos anteriormente.

#### 4.4.3 Distribuição Weibull pelo método dos percentis

A distribuição de Weibull é, frequentemente, utilizada para modelar o tempo até a falha de um produto ou processo (Ribeiro Junior, 2004). Segundo

Scolforo (1998) a função começou a ser utilizada no meio florestal em 1973, por Bailey e Dell.

Existem duas possibilidades de apresentar a função de Weibull, que são com 2 e 3 parâmetros.

Com dois parâmetros tem-se:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c}$$

$$x \geq 0, b > 0 \text{ e } c > 0$$

Com três parâmetros tem-se:

$$f(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

em que:

- a = parâmetro de locação;
- b = parâmetro de escala;
- c = parâmetro de forma; e,
- x = variável de interesse (diâmetro)

Os valores dos coeficientes da distribuição Weibull permitem que o modelo assumam diferentes formas, ajustando-se bem aos dados de floresta nativa ou plantada. Segundo Scolforo (1998), os valores de  $c < 1$  definem forma decrescente da distribuição;  $c = 1$  forma exponencial;  $c = 2$  forma da distribuição de Ray Leight um caso especial da distribuição qui-quadrado;  $c \approx 3,6$  forma normal;  $c > 3,6$  forma normal com assimetria negativa, mostrando um acúmulo de diâmetro para as maiores dimensões e  $1 < c < 3,6$  forma normal com assimetria positiva.

Pela integração das funções de Weibull com dois e três parâmetros obtêm-se as funções de distribuição acumulativa expressando, respectivamente, a função acumulativa de 2 e de 3 parâmetros, conforme descrito:

Com dois parâmetros.

$$F(X) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c}$$

Com três parâmetros.

$$F(X) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

A opção testada foi o ajuste da função pelo método dos percentis, em que foram considerados os diâmetros percentis 30 e 90, conforme já adotado por Scolforo (1998). Os parâmetros são dados por:

$$a = x_i - \left(\frac{b}{n^{1/c}}\right) \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)$$

$$b = \frac{Xp_1 - a}{[-\ln(1 - p_1)]^{1/c}}$$

$$c = \frac{\ln\left[\frac{-\ln(1 - p_1)}{-\ln(1 - p_2)}\right]}{\ln\left[\frac{(Xp_1 - a)}{(Xp_2 - a)}\right]}$$

em que:

$Xp_1$  = diâmetro percentil 1;

$Xp_2$  = diâmetro percentil 2;

$p_1$  = percentil 1;

$p_2$  = percentil 2;

$x_i$  = diâmetro da unidade amostral;

$n$  = número de árvores da unidade amostral;

$\Gamma$  = função gama;

$\ln$  = logaritmo neperiano; e,

a, b, c definidos anteriormente.



O parâmetro "a" consiste no parâmetro de locação, portanto, adotou-se o valor de 50% do diâmetro mínimo de cada unidade amostral estudada, visto que este percentual gerou melhores resultados de estimativa.

#### 4.4.4 Distribuição $S_B$ pelo método dos momentos

Johnson (1949) propôs uma função de distribuição que proporcionasse representar uma significativa amplitude de modelos de distribuição, a qual foi denominada de Distribuição  $S_B$ . A distribuição  $S_B$  é vinculada à distribuição normal por meio de transformações logarítmicas, com possibilidade de descrever distintos graus de assimetria da distribuição.

A função de densidade de probabilidade  $S_B$  é expressa por:

$$f(d, \varepsilon, \lambda, \delta, \gamma) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(d - \varepsilon)(\lambda + \varepsilon - d)} \exp \left\{ -1/2 \left[ \gamma + \delta \ln \left( \frac{d - \varepsilon}{\lambda + \varepsilon - d} \right) \right]^2 \right\}$$

Condições:

$$\varepsilon < d < \varepsilon + \lambda;$$

$$-\infty < \varepsilon < +\infty;$$

$$\lambda > 0;$$

$$-\infty < \gamma < \infty; e,$$

$$\delta > 0.$$

em que:

$\varepsilon$ : parâmetro locação (menor diâmetro);

$\lambda$ : parâmetro escala (maior diâmetro); e,

$\delta$  e  $\gamma$ : determinam a forma da distribuição. Quando  $\delta$  aumenta, implica em grande aumento na forma. Já aumentos no valor absoluto de  $\gamma$  implica em mais assimetria, ou seja,  $\delta$  é o parâmetro curtose e  $\gamma$  é o parâmetro que expressa a assimetria.

Para a obtenção dos valores dos parâmetros de forma  $\delta$  e  $\gamma$  pelo método dos momentos, foram empregadas as equações propostas por Johnson e Kitchen (1971).

Para o cálculo do parâmetro ( $\delta$ ) que estabelece o achatamento da curva e do parâmetro assimetria ( $\gamma$ ) utilizou-se:

$$\delta = \frac{\mu(1-\mu)}{Sd_{(x)}} + \frac{Sd_{(x)}}{4} \left[ \frac{1}{\mu(1-\mu)} - 8 \right]$$

$$\gamma = \delta \ln \left( \frac{1-\mu}{\mu} \right) + \left( \frac{0,5-\mu}{\delta} \right)$$

$$\mu = \frac{\bar{d} - \varepsilon}{\lambda}$$

Em que:  $\bar{d}$  corresponde a média aritmética dos diâmetros da parcela.

$$Sd_{(x)} = \frac{\sigma}{\lambda}$$

Em que:  $Sd_{(x)}$  corresponde ao desvio padrão modificado e  $\sigma$  desvio padrão da parcela.

Na obtenção do valor de  $\varepsilon$ , foi vinculado ao diâmetro mínimo da parcela.

#### 4.5 Seleção da distribuição de maior acuracidade

Para selecionar a distribuição que apresentou estimativas da frequência teórica semelhante ou não à frequência observada por classe diamétrica em cada unidade amostral, foi utilizado o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov.

Para isso utiliza-se a função distribuição acumulada observada e compara-se com a teórica; determina-se o ponto em que estas distribuições mais divergem e avalia-se sua significância (Ayres, 2000).

Seja  $F_0(X)$  uma distribuição teórica acumulada e  $S_n(X)$  uma distribuição observada em uma amostra de “n” observações. Encontra-se a seguir o maior valor das diferenças ( $D$ ) entre  $F_0(X)$  e  $S_n(X)$ , ou seja:

$$D = \max \left| F_0(X) - S_n(X) \right|$$

Posteriormente, compara-se o valor observado com o valor crítico tabelar.

O teste de Kolmogorov-Smirnov foi utilizado para testar as seguintes hipóteses para os níveis de significância de 0,05 do teste bilateral:

$H_0$  = os diâmetros observados seguem a distribuição teórica; e,

$H_1$  = os diâmetros observados não seguem a distribuição teórica.

Os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov, também foram interpretados por meio da elaboração de um ranqueamento, em que a função que obteve um menor valor de  $D$  para Kolmogorov-Smirnov (maior aderência) em cada unidade amostral recebeu nota 4 e, assim, de forma decrescente, até a nota 1 para a distribuição com maior valor de  $D$ . No caso de mesmo valor, estas receberam a mesma nota. A distribuição que apresentou o maior número de notas 4 e 3, com maior somatório, foi considerada a melhor distribuição para as vinte unidades amostrais avaliadas.

#### **4.6 Desenvolvimento ou seleção de modelos dos atributos do povoamento**

A estimativa dos atributos dos povoamentos, como área basal, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, sobrevivência de árvores, média aritmética dos diâmetros, variância, diâmetro percentil  $X_{p1}$  e  $X_{p2}$ , juntamente com a distribuição selecionada, permitirá realizar a projeção do número de indivíduos para diferentes idades ( $I_n$ ). Para isso foram ajustados e selecionados diversos modelos, os quais foram testados por Abreu et al. (2002), Campos (1997),

Cunha Neto (1994), Guimarães (1994), Leite (1990), Oliveira et al. (1998), Scolforo (1990), Scolforo & Machado (1996) e Thiersch (2002).

Na seleção das equações mais precisas, definiram-se os critérios pelas equações com melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e distribuição gráfica dos resíduos. Para a obtenção de ajuste satisfatório para o diâmetro mínimo, diâmetro máximo, média aritmética dos diâmetros e diâmetro percentil foi empregado o procedimento estatístico *Stepwise*.

Para se obter os volumes projetados visando estimar os múltiplos produtos da madeira, foi necessário testar e selecionar modelos de relação hipsométrica genérica, conforme proposto por Scolforo (1997).

Os múltiplos produtos foram obtidos pelo ajuste do modelo de afilamento proposto por Goulding & Murray (1976). Por meio deste modelo foi ajustada uma equação para o povoamento da área 1 e outra equação para o povoamento da área 3, conforme apontamento do teste de identidade de modelo. O modelo volumétrico que possibilitou gerar a compatibilidade com o modelo de afilamento foi o modelo Takata, expresso por:  $V = (DAP^2 H_t) (\beta_1 + \beta_2 \cdot DAP)^{-1} + \varepsilon_i$ , em que: V = volume estimado; DAP = diâmetro à altura do peito;  $H_t$  = altura total;  $\beta_{is}$  = parâmetros a serem estimados; e,  $\varepsilon_i$  = erro da estimativa.

Não foi empregado o modelo Scolforo (modelo 1), selecionado no capítulo 2, em decorrência de sua forma matemática não apresentar bons resultados numa amplitude fora da base de dados. Para isso, o modelo Takata indicado como o melhor modelo não linear (no capítulo 2) foi empregado na compatibilidade da função de afilamento.

#### **4.7 Projeção do crescimento e da produção**

Para a projeção do crescimento e da produção do volume e dos múltiplos produtos por classe diamétrica para os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, foram adotados os atributos do povoamento definidos pelos modelos

ajustados para área basal, diâmetro mínimo e máximo, média aritmética dos diâmetros, variância, diâmetro percentil  $XP_1$  e  $XP_2$  e sobrevivência, prognosticados para as idades entre 5 a 30 anos, com intervalo de 1 ano.

Com os parâmetros estimados para a distribuição selecionada, pôde-se encontrar a probabilidade das árvores ocorrerem em cada classe diamétrica. O produto desta probabilidade pelo número estimado de árvores sobreviventes permitiu estimar o número de árvores em cada classe diamétrica.

Obtido o número de árvores em cada classe diamétrica, a etapa seguinte é a obtenção da altura das árvores para cada classe de diâmetro, por meio da equação hipsométrica genérica selecionada.

A precisão da projeção foi avaliada empregando-se as distintas idades dos povoamentos e a seguir efetuou-se a prognose entre estas idades.

Para a obtenção do volume basta utilizar os diâmetros e as alturas de cada classe diamétrica projetada, na equação de volume ajustada para gerar a compatibilidade da função de afilamento e, posteriormente, obter os múltiplos produtos pela função de afilamento Goulding & Murray (1976), ajustadas separadamente para as áreas 1 e 3, de acordo com as especificações descritas na Tabela 5.1.

**TABELA 5.1** Especificações dos múltiplos produtos da madeira para a *Tectona grandis* L.f.

<b>Diâmetro da ponta fina (cm)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Mercado</b>
> 3	1,0	Aproveitamento (energia/artesanato)
10 a 14	3,0	Construção civil (escorras)
14 a 18	2,2	Agropecuária (estacas)
18 a 35	3,0	Serrarias
35 a 45	2,7	Laminadoras
> 45	2,7	Faqueadoras

#### 4.9 Definição da rotação técnica

Os resultados gerados pela projeção do volume por classe diamétrica permitiram a consolidação do volume.hectare<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> para os dois povoamentos de teca. Com o volume médio anual por hectare para o intervalo entre 5 e 30 anos, foi possível obter os valores do incremento médio anual (IMAv) e incremento corrente anual (ICAv) do volume para as duas áreas de estudo. Os valores do IMAv e do ICAv foram obtidos por meio das seguintes expressões:

Incremento médio anual – IMAv

$$IMAv_i = \frac{V_{(i)}}{I_{(i)}}$$

Incremento corrente anual – ICAv

$$ICAv_{(i)} = V_{(i)} - V_{(i-1)}$$

em que:  $V_{(i)}$  = volume acumulado na idade  $i$ ;  $V_{(i-1)}$  = volume acumulado no ano anterior a idade  $i$ ; e,  $I_{(i)}$  = idade em anos.

A rotação técnica foi definida quando ocorreu o máximo incremento médio anual permitindo definir a rotação com base na máxima produção de volume, visto que, em qualquer outra idade, proporcionará uma menor produção volumétrica se considerado uma série de diferentes rotações.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

### 5.1 Inventário florestal

Foram analisadas 10 parcelas permanentes em cada povoamento, nas quais foram calculados para as variáveis de interesse área basal e volume total, os seguintes estimadores: média, variância, desvio padrão, variância da média,

erro padrão da média, coeficiente de variação, erro do inventário e intervalo de confiança, conforme apresentado na Tabela 5.2.

**TABELA 5.2** Características e estimativas para área basal e volume dos dois povoamentos de teca inventariados, município de Rio Branco, estado do Acre, 2004

	ÁREA 1		ÁREA 3	
<b>Características dos povoamentos inventariados</b>				
Área do inventário (ha)	1,4778	1,4778	2,3913	2,3913
Tamanho da U.A. (m <sup>2</sup> )	400	400	400	400
Densidade inicial	2083	2083	1111	1111
N <sup>o</sup> . de U.A. cabíveis (N)	37	37	60	60
Percentual da area amostrada	27,07%	27,07%	16,73%	16,73%
Erro do inventário aceitável	15%	15%	15%	15%
N <sup>o</sup> de U.A. alocadas	10	10	10	10
DAP médio (cm)	9,52	9,52	7,4	7,4
Altura média (m)	12,63	12,63	11,92	11,92
Dmin (cm)	6,89	6,89	8,25	8,25
Dmax (cm)	19,68	19,68	15,59	15,59
Indivíduos/ha	2015	2015	1065	1065
Mortalidade (ind/ha)	68	68	46	46
<b>Estatísticas do inventário</b>	<b>Área basal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Área basal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>
Média (por U.A.)	1,081 m <sup>2</sup>	7,175 m <sup>3</sup>	0,485 m <sup>2</sup>	3,613 m <sup>3</sup>
Variância (por U.A.)	0,02601 m <sup>4</sup>	1,287 m <sup>6</sup>	0,00364 m <sup>4</sup>	0,18507 m <sup>6</sup>
Desvio padrão (por U.A.)	0,16129 m <sup>2</sup>	1,135 m <sup>3</sup>	0,06035 m <sup>2</sup>	0,43020 m <sup>3</sup>
Fração de amostragem	0,7293	0,7293	0,8327	0,8327
Variância da média (por U.A.)	0,00189 m <sup>4</sup>	0,094 m <sup>6</sup>	0,00030 m <sup>4</sup>	0,01541 m <sup>6</sup>
Erro padrão da média (por U.A.)	0,04356 m <sup>2</sup>	0,306 m <sup>3</sup>	0,01742 m <sup>2</sup>	0,12414 m <sup>3</sup>
Coeficiente de variação	14,92%	15,81%	12,44%	11,91%
Por hectare	27,019 m <sup>2</sup>	179,366 m <sup>3</sup>	12,129 m <sup>2</sup>	90,336 m <sup>3</sup>
Erro do inv. absoluto (por U.A.)	0,09853 m <sup>2</sup>	0,693 m <sup>3</sup>	0,03940 m <sup>2</sup>	0,40495 m <sup>3</sup>
Erro do inv. Relativo	9,12%	9,66%	8,12%	11,21%
Int. de confiança inferior (por U.A.)	0,982 m <sup>2</sup>	6,481 m <sup>3</sup>	0,445 m <sup>2</sup>	3,208 m <sup>3</sup>
Int. de confiança superior (por U.A.)	1,179 m <sup>2</sup>	7,868 m <sup>3</sup>	0,524 m <sup>2</sup>	4,018 m <sup>3</sup>
Intensidade amostral	6,51 U.A.		5,04 U.A.	
t (Student) recalculo	2,306		2,228	
Recalculo intensidade amostral	6,73 U.A.		4,90 U.A.	

Em que: U.A. = unidade amostral, DAP = diâmetro à altura do peito, D<sub>min</sub> = diâmetro mínimo e D<sub>max</sub> = diâmetro máximo.

Pode-se observar que o plantio da área 1 com maior densidade, idade e volume, apresentou maior mortalidade de árvores. O maior volume não se traduz em melhores árvores, no que diz respeito ao diâmetro, pois a média diamétrica não demonstra grande diferença da área 3.

Os volumes totais com casca estimados apontam resultados compatíveis com as estimativas obtidas por Pérez Cordero *et al.* (2000) para sítios florestais de alta a média produtividade na América Central. A caracterização da base de dados oriunda das parcelas permanentes encontra-se em anexo.

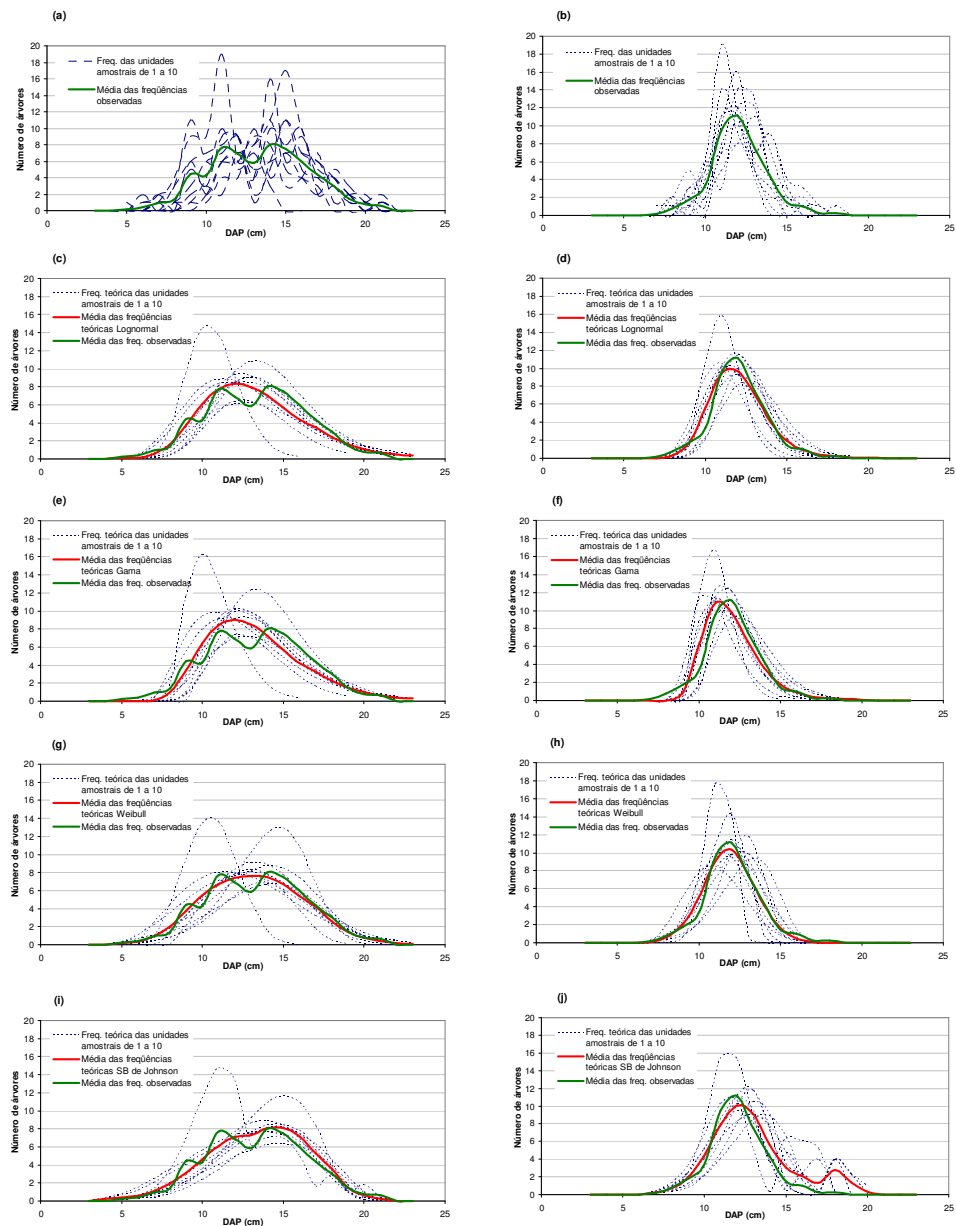
## **5.2 Ajustes das distribuições contínuas da estrutura diamétrica**

Os resultados das distribuições diamétricas observadas, lognormal, gama, Weibull e  $S_B$  para as áreas 1 e 3 encontram-se apresentadas na Figura 5.1.

Na Figura 5.1 (a) observa-se a distribuição da área 1, considerando cada unidade amostral, pelas linhas azuis tracejadas. A linha verde representa a média de frequência das classes de diâmetro.

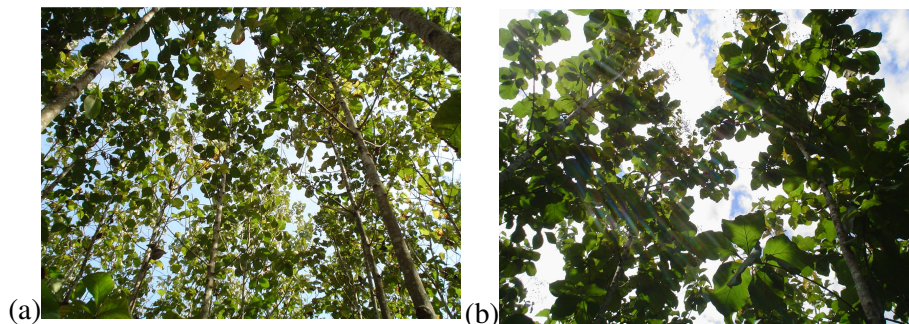
Na área 1, fica clara a forte oscilação da frequência entre as classes diamétricas vizinhas. Esta característica representa bem a competição entre os indivíduos do povoamento, ocasionando maior supressão e mortalidade de árvores e, conseqüentemente, um pequeno número de indivíduos de maior diâmetro. Essa situação influencia negativamente o desempenho do povoamento, principalmente quando se avalia o rendimento de peças de madeira para serraria.





**FIGURA 5.1** Distribuições diamétricas observadas e teóricas contínuas dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f., em que: distribuição observada da área 1 (a) e área 3 (b); distribuição lognormal área 1 (c) e área 3 (d); distribuição gama área 1 (e) e área 3 (f); distribuição Weibull área 1 (g) e área 3 (h); e, distribuição  $S_B$  área 1 (i) e área 3 (j)

Já na Figura 5.1 (b) que representa o povoamento da área 3, observam-se as linhas azuis tracejadas mais estáveis. A linha média de frequência (verde) tende a uma curva normal. Este povoamento, além de ser cerca de 2 anos mais jovem, apresenta uma densidade 46% menor que o povoamento da área 1, conferindo uma situação em que a competição não é tão forte como as 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> da área 1. Isso pode ser visto na cobertura dos dosséis dos dois povoamentos, apresentados na Figura 5.2.



**FIGURA 5.2** Cobertura dos dosséis dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. na (a) área 1 com 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> e (b) área 3 com 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>, Rio Branco, Acre, 2004

Nas Figura 5.1 (c) e 5.1 (d) encontram-se: a distribuição teórica pela função lognormal das unidades (linhas tracejadas azuis), a distribuição teórica média lognormal (linha vermelha) e a distribuição média observada (linha verde) para as áreas 1 e 3, respectivamente. Esta representação de linhas e cores é a mesma para as demais distribuições testadas. Observa-se, tanto para área 1 (Figura 5.1c) como para a área 3 (Figura 5.1d), uma suavização da distribuição teórica com tendência normal com pequeno deslocamento para esquerda. Comparando-se os gráficos, observa-se a divergência entre a linha média (verde) e a linha média teórica (vermelha), evidenciando a dificuldade da função

lognormal em se adaptar a situação imposta pelo povoamento da área 1. Na área 3, a função não apresentou maiores problemas de aderência.

A função gama representada nas Figura 5.1 (e) e (f) para as áreas 1 e 3, respectivamente, apresentou características bastante semelhante a função lognormal, no entanto com uma maior dificuldade de representar as classes diamétricas (menor aderência).

A distribuição Weibull, nas Figuras 5.1 (g) e (h), foi a função que melhor se ajustou aos dados apresentados pelas unidades amostrais das áreas 1 e 3, respectivamente. Na área 1, a curva teórica representou muito bem uma média da distribuição observada, tendo ora havido pequena superestimativa e ora pequena subestimativa. Para área 3, a curva da distribuição teórica muitas vezes se confunde com a curva da distribuição observada.

A distribuição  $S_B$  representou de maneira satisfatória a distribuição observada da área 1 (Figura 5.1i), porém a distribuição teórica da área 3 (Figura 5.1j) apresentou forte divergência entre as linhas, principalmente para as maiores classes de diâmetro, em que ocorreu uma superestimativa do número de indivíduos.

### **5.3 Seleção das distribuições testadas**

Os resultados da análise gráfica das distribuições lognormal, gama, Weibull e  $S_B$  devem ser confirmadas por meio de um teste formal não paramétrico que avalie a aderência da curva de distribuição teórica e a curva de distribuição observada. Para isso, foi empregado o teste de Kolmogorov-Smirnov, cujos resultados encontram-se na Tabela 5.3.

Em todas as unidades amostrais não ocorreram pontos de divergência significativos entre as curvas de distribuição observadas e as curvas de distribuição teórica lognormal, gama e Weibull.

**TABELA 5.3** Valores de Kolmogorov-Smirnov de máxima divergência entre as distribuições observadas e as distribuições teóricas lognormal, gama, Weibull e  $S_B$  testadas para cada unidade amostral dos dois povoamentos de *Tectona grandis* L.f.

Local	Unidade amostral	No. árvores observadas	D (Kolmogorov-Smirnov)				Resultado do teste ( $\alpha=0,05$ )				
			lognormal	Weibull	gama	$S_B$	lognormal	Weibull	gama	$S_B$	
Área 1	UA1	69	0,1248	0,0706	0,1277	0,0618	0,161	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA2	59	0,0577	0,0523	0,0553	0,0977	0,174	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA3	58	0,0834	0,0911	0,1163	0,4019	0,175	N.S.	N.S.	N.S.	S.
Área 1	UA4	65	0,0887	0,0640	0,1061	0,0458	0,166	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA5	65	0,1046	0,0941	0,1335	0,1031	0,166	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA6	75	0,1056	0,0481	0,1112	0,0452	0,154	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA7	69	0,0973	0,0809	0,1121	0,0862	0,161	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA8	70	0,0545	0,0402	0,076	0,0518	0,160	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA9	40	0,1206	0,0674	0,1240	0,1015	0,210	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 1	UA10	54	0,0971	0,0430	0,1023	0,0448	0,181	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA1	42	0,0935	0,0759	0,1066	0,4170	0,206	N.S.	N.S.	N.S.	S.
Área 3	UA2	45	0,0577	0,0541	0,0845	0,1595	0,198	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA3	38	0,1303	0,1534	0,1558	0,1638	0,215	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA4	40	0,0440	0,0510	0,0550	0,1613	0,210	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA5	46	0,0890	0,1117	0,1114	0,0903	0,196	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA6	40	0,0505	0,0584	0,0747	0,1591	0,210	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA7	39	0,0579	0,1150	0,0781	0,1613	0,213	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA8	41	0,0726	0,0725	0,1191	0,0592	0,208	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA9	38	0,0829	0,0952	0,0787	0,1679	0,215	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Área 3	UA10	43	0,0923	0,0758	0,0947	0,259	0,203	N.S.	N.S.	N.S.	S.

Em que: U.A. = unidade amostral, N.S. = não significativo e S. = significativo.

A distribuição teórica  $S_B$ , ajustada pelo método momentos, foi a que apresentou fraco desempenho para três unidades amostrais no teste

Kolmogorov-Smirnov, na unidade amostral 3 da área 1 e nas unidades amostrais 1 e 10 da área 3. O teste demonstrou que a divergência entre as curvas observadas e teóricas são significativas para  $\alpha = 0,05$ . Na análise gráfica das distribuições já havia um indicativo da ocorrência do fraco desempenho do ajuste  $S_B$ . Vale ressaltar que o emprego de distintos percentuais do diâmetro mínimo para o cálculo do parâmetro de locação ( $\epsilon$ ) pode melhorar os resultados dos ajuste, no entanto, esta não é a opção deste estudo. Este mesmo critério também foi adotado para a construção da curva teórica de Weibull, quando do cálculo do parâmetro de locação “a”.

Os valores de ranqueamento para seleção da melhor distribuição teórica para as 20 unidades amostrais dos dois povoamentos de teca encontram-se na Tabela 5.4.

Os resultados do ranqueamento apontam para uma superioridade da função Weibull, tanto no percentual de unidades amostrais com nota máxima (4) como nas unidades amostrais com nota 3 e 4. Isto revela que, em termos gerais, a função Weibull apresentou os melhores resultados, o que significa menor divergência entre as curvas da distribuição observada e a curva da distribuição teórica.

O melhor desempenho da função Weibull deve-se a facilidade de aderência entre as distribuições observadas e teóricas em situações como o ocorrido na área 1, em que as funções lognormal, gama e  $S_B$  apresentaram maior dificuldade de ajuste. Já na situação apresentada pela área 3, as funções lognormal e Weibull conseguiram melhores resultados que gama e  $S_B$ .

Os resultados alcançados pelas funções lognormal e  $S_B$  colocaram as funções em segundo e terceiro lugar, respectivamente.

Os piores resultados de ranqueamento no teste de Kolmogorov-Smirnov ficaram com a função gama; apenas 5% das unidades amostrais testadas com função conseguiram nota máxima.

**TABELA 5.4** Ranqueamento das distribuições teóricas, segundo o resultado de divergência para o teste de Kolmogorov-Smirnov

Local	Unidade amostral	D (Kolmogorov-Smirnov)				Ranking			
		lognormal	Weibull	gama	S <sub>B</sub>	lognormal	Weibull	gama	S <sub>B</sub>
Área 1	UA1	0,1248	0,0706	0,1277	0,0618	2	3	1	4
Área 1	UA2	0,0577	0,0523	0,0553	0,0977	2	4	3	1
Área 1	UA3	0,0834	0,0911	0,1163	0,4019	4	3	2	1
Área 1	UA4	0,0887	0,0640	0,1061	0,0458	2	3	1	4
Área 1	UA5	0,1046	0,0941	0,1335	0,1031	2	4	1	3
Área 1	UA6	0,1056	0,0481	0,1112	0,0452	2	3	1	4
Área 1	UA7	0,0973	0,0809	0,1121	0,0862	2	4	1	3
Área 1	UA8	0,0545	0,0402	0,0760	0,0518	2	4	1	3
Área 1	UA9	0,1206	0,0674	0,1240	0,1015	2	4	1	3
Área 1	UA10	0,0971	0,0430	0,1023	0,0448	2	4	1	3
Área 3	UA1	0,0935	0,0759	0,1066	0,4170	3	4	2	1
Área 3	UA2	0,0577	0,0541	0,0845	0,1595	3	4	2	1
Área 3	UA3	0,1303	0,1534	0,1558	0,1638	4	3	2	1
Área 3	UA4	0,0440	0,0510	0,0550	0,1613	4	3	2	1
Área 3	UA5	0,0890	0,1117	0,1114	0,0903	4	1	2	3
Área 3	UA6	0,0505	0,0584	0,0747	0,1591	4	3	2	1
Área 3	UA7	0,0579	0,1150	0,0781	0,1613	4	2	3	1
Área 3	UA8	0,0726	0,0725	0,1191	0,0592	2	3	1	4
Área 3	UA9	0,0829	0,0952	0,0787	0,1679	3	2	4	1
Área 3	UA10	0,0923	0,0758	0,0947	0,2590	3	4	2	1
Total das notas do ranking						56	65	35	44
Percentual de unidades amostrais com nota 4 (melhor resultado)						30,00%	45,00%	5,00%	20,00%
Percentual de unidades amostrais com nota 3 (segundo melhor resultado) e 4 (melhor resultado)						50,00%	85,00%	15,00%	50,00%

Em que: U.A. = unidade amostral.

#### 5.4 Modelos para prognose do crescimento e da produção

Para proceder a prognose de crescimento e da produção foi utilizada a distribuição Weibull método dos percentis selecionada dentre outras quatro f.d.p.

pelo teste de Kolmogorov-Smirnov para todas as parcelas dos povoamentos de teça.

Os modelos que expressam os atributos dos povoamentos referentes a: sobrevivência, altura dominante, área basal, diâmetro mínimo, diâmetro máximo, média dos diâmetros, diâmetro percentil 30 e diâmetro percentil 90, encontram-se na Tabela 5.5.

**TABELA 5.5** Equações expressam os atributos dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. a serem projetados

Atributos	Equações selecionadas	R <sup>2</sup>	S <sub>yx</sub>	S <sub>yx</sub> %
Sítio	$H_{dom2} = 28,4146 \cdot \left( \frac{H_{dom1}}{28,4146} \right)^{\frac{\ln[1-\exp(-0,059119 \cdot I_2)]}{\ln[1-\exp(-0,059119 \cdot I_1)]}}$	77,75%	± 1,5 m	14,04%
Sobrevivência	$N_2 = N_1 [0,988002 + (0,0000207802 N_1)]^{-(I_2 - I_1)}$	68,51%	± 188 arv.	10,58%
Área basal	$\ln(G) = 3,38258 - 3,29712 \left( \frac{1}{I_2} \right) + 0,062402 \cdot H_{dom} - 1352,28 \left( \frac{1}{N_2} \right)$	89,57%	2,76 m <sup>2</sup>	14,00%
Diâmetro mínimo	$D_{min} = 0,196546 \cdot H_{dom} + 400,575 \cdot (H_{dom} \cdot N_2^{-1})$	97,02%	± 1,4 cm	14,65%
Diâmetro máximo	$D_{max} = -1,24291 + 1,27155 \cdot D_{med} + 0,018241 \cdot (G \cdot I_2)$	87,78%	± 1,06 cm	6,01%
Média dos diâmetros	$D_{med} = 0,516267 \cdot I_2 + 0,394858 \cdot H_{dom} + 0,319403 \cdot D_{min} + 0,000116715 \cdot N_2$	99,66%	± 0,83 cm	6,55%
Diâmetro percentil 30	$D_{p30} = 0,755452 - 0,000690761 \cdot N_2 - 0,249977 \cdot D_{max} - 0,0833995 \cdot D_{min} + 1,3225 \cdot D_{med}$	91,18%	± 0,29 cm	2,48%
Diâmetro percentil 90	$D_{p90} = -1,49986 + 0,000835652 \cdot N_2 + 0,383462 \cdot D_{max} + 0,0991629 \cdot D_{min} + 0,645454 \cdot D_{med}$	93,86%	± 0,55 cm	3,53%

Em que: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, S<sub>yx</sub> = erro padrão residual corrigido, I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub> = idades, H<sub>dom2</sub> = altura dominante na idade I<sub>2</sub>, H<sub>dom1</sub> = altura dominante na idade I<sub>1</sub>, N<sub>1</sub> e N<sub>2</sub> = número de árvores sobreviventes nas respectivas idades, G = área basal, D<sub>min</sub> = diâmetro mínimo, D<sub>max</sub> = diâmetro máximo, D<sub>med</sub> = média dos diâmetros, D<sub>p30</sub> = diâmetro percentil 30, D<sub>p90</sub> = diâmetro percentil 90 e ln = logaritmo neperiano.

A equação de sítio selecionada foi ajustada do modelo Chapman & Richard, pelo método da diferença algébrica, pois este modelo apresentou

satisfatória precisão para a classificação de sítio e excelente estabilidade de classificação para as unidades amostrais. Pode-se verificar que 55,55% das unidades amostrais se mantiveram na mesma classe de sítio em todas as medições realizadas.

O modelo de sobrevivência selecionado foi proposto por Lenhart & Hackett (1988). Os resultados apontaram não haver super ou subestimativas que prejudiquem o emprego do modelo para estimativa da sobrevivência ao longo da rotação dos plantios de teca estudados.

O modelo de área basal selecionado apresentou razoável precisão, tendo havido pequena subestimativa para os indivíduos de maior diâmetro, sem, no entanto, prejudicar a adoção do modelo.

O modelo ajustado para estimar o diâmetro mínimo apresentou resíduos ora subestimados, ora superestimados. Embora esta situação não seja a desejada, as estimativas foram satisfatórias, em que o maior erro de predição foi de  $\pm 17$  milímetros para o DAP, o que não inviabiliza sua utilização.

Os modelos para estimar diâmetro mínimo e máximo, média aritmética dos diâmetros, diâmetros percentis 30 e 90, foram selecionados pelo procedimento estatístico *Stepwise*. Os modelos selecionados apresentaram boa precisão, bem como uma distribuição de resíduos sem tendenciosidade.

### **5.5 Modelo hipsométrico genérico e funções para estimativa de volume**

As variáveis do modelo hipsométrico genérico foram selecionadas por meio do procedimento estatístico *Stepwise*, cuja expressão é representada por:

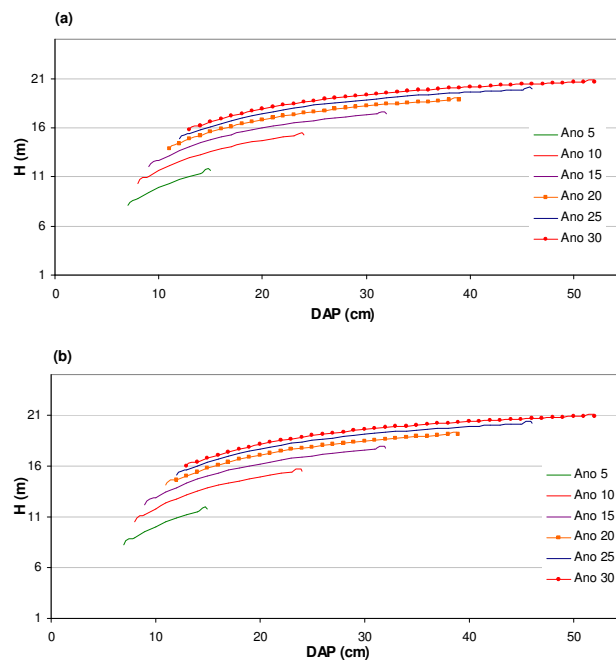
$$\ln(H_{med}) = 1,711 + 0,48203 \cdot \ln(H_{dom}) - 0,038773 \cdot \ln(G) - 4,6945 \cdot \left( \frac{1}{D_{med}} \right)$$

Em que:  $H_{med}$  = altura média (do centro de classe) das árvores dos povoamentos;  
 $H_{dom}$  = altura média das dominantes;  $G$  = área basal;  $D_{med}$  = média aritmética dos diâmetros; e,  $\ln$  = logaritmo neperiano.



Apesar do coeficiente de determinação ter sido de 72,29%, as demais estatísticas de precisão do modelo ajustado foram satisfatórias com erro padrão residual corrigido ( $S_{yx}$ ) de  $\pm 0,90$  metro e  $S_{yx\%}$  de 7,32%. A distribuição gráfica dos resíduos não apresentou tendenciosidade que comprometa a utilização do modelo.

Na Figura 5.3 apresenta-se o padrão de desenvolvimento das alturas médias, aumentando consistentemente das menores para as maiores dimensões diamétricas, e das idades mais jovens para as idades mais avançadas, tanto para área 1 como para área 3.



**FIGURA 5.3** Comportamento da altura média para *Tectona grandis* L.f. nas idades 5, 10, 15, 20, 25 e 30 anos: (a) povoamento da área 1, com densidade inicial de 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> e (b) povoamento da área 3, com densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>

O modelo empregado para estimar os múltiplos produtos da madeira foi o polinômio de Goulding & Murray (1976), cujas estimativas são compatíveis com o modelo volumétrico não linear expresso por:  $V = ((DAP^2).H_i)/(\beta_0 + \beta_1.(DAP)) + \varepsilon_i$ . Foi adotado o procedimento *Stepwise* para a seleção das potências que melhor representa o perfil da árvore.

Para as áreas 1 e 3 foram ajustados modelos independentes, conforme indicação do teste de identidade de modelos. Os parâmetros e potências das equações e as suas estatísticas encontram-se na Tabela 5.6.

**TABELA 5.6** Parâmetros estimados/calculados, potências e medidas de precisão para os modelos polinomiais Goulding & Murray (1976), para as áreas 1 e 3 ajustadas individualmente, conforme indicação do teste de identidade de modelos

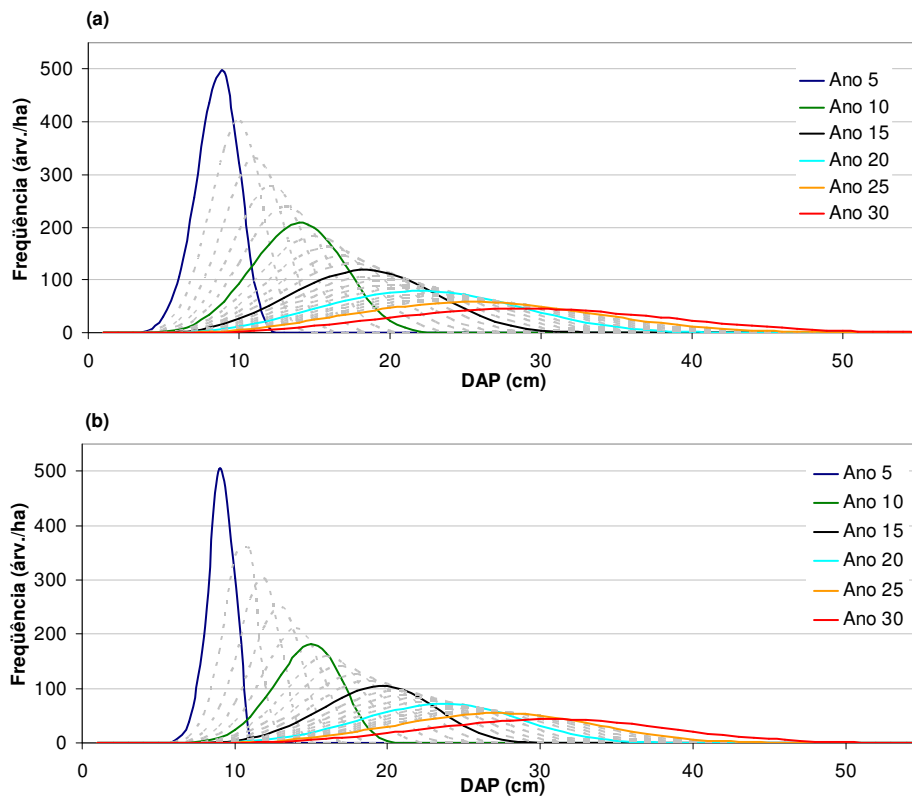
Área	$\beta_1/p_1$	$\beta_2/p_2$	$\beta_3/p_3$	$\beta_4/p_4$	$\beta_5/p_5$	$\beta_6/p_6$	$\beta_7/p_7$	$R^2(\%)$	$S_{yx}$	$S_{yx}(\%)$
1	0,997878	1,182711	-3,307032	5,898165	-274,616146	572,22347	-298,15296	96,25%	0,891	9,70%
	1	2	11	14	85	90	95			
3	1,068054	1,237536	-3,439608	5,095485	-51,615824	107,96422	-56,240640	97,31%	0,611	7,16%
	1	2	11	14	85	90	95			

### 5.6 Prognose por classe diamétrica do número de indivíduos

Com o emprego das equações referentes aos atributos dos povoamentos e a classificação de sítio foi possível projetar os atributos entre 5 e 30, e assim com a distribuição probabilística Weibull pelo método dos percentis foi projetado a estrutura diamétrica para o mesmo período. Para isso, foram calculados, para as duas áreas de estudo, os parâmetros de locação (a), escala (b)

e forma (c) da f.d.p. Weibull para as 26 idades estimadas, cujos resultados encontram-se na Tabela 2.A (em anexo).

Com os parâmetros calculados, bastou integrar a função acumulada e multiplicar pela estimativa da sobrevivência de árvores de cada povoamento de teca, num respectivo ano de interesse. A estimativa de evolução dos povoamentos encontra-se na Figura 5.4.



**FIGURA 5.4** Prognose de sobrevivência por classe diamétrica pela função Weibull para os povoamentos da área 1 (a) e área 3 (b)

As projeções realizadas apresentaram uma boa precisão quando comparadas com os anos de medição. Para área 1, o erro foi de -8,98%, o que representa 180 árvores.ha<sup>-1</sup> para uma densidade inicial de 2.085 árvores.ha<sup>-1</sup> e para a área 3, o erro foi de -2,91%, o que significa 32 árvores.ha<sup>-1</sup> para uma densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>.

Percebe-se, pela Figura 5.4(a), que representa a prognose de sobrevivência de árvores para área 1, um maior achatamento das curvas para as idades 5 e 10, isto em decorrência da maior densidade deste povoamento. Para os anos 15, 20, 25 e 30, observa-se que as curvas da área 1 apresentam proporcionalmente um maior achatamento e um descolamento da média para esquerda, o que representa relativamente menor densidade de indivíduos com maior diâmetro. Este efeito é esperado para povoamentos de maior densidade, em que a característica principal é a produção de um maior volume madeireiro, porém, com baixo percentual de produtos de maior dimensão.

Para a área 3, observa-se um menor achatamento das curvas, porém, o ponto médio para as projeções entre 15 e 30 anos encontra-se com pequeno deslocamento para a direita quando comparado com a área 1. A menor área sob as curva é decorrência da menor densidade do povoamento.

Outra característica importante para as áreas estudadas é a mortalidade de árvores. A forte competição existente na área 1 imprimiu uma taxa anual de mortalidade que oscilou entre 2,10% a 2,15% entre os anos 5 e 30, enquanto, para a área 3, a taxa anual variou entre 0,94% a 1,07%. Esta diferença na taxa anual de mortalidade ao longo do período projetado representa uma quantidade de árvores não aproveitada para fins econômicos de 728 árvores.ha<sup>-1</sup> para área 1 e 223 árvores.ha<sup>-1</sup> para área 3. Isto demonstra a necessidade do planejamento adequado dos tratamentos silviculturais.

## 5.7 Estimativa da rotação técnica

A rotação técnica foi prognosticada para o povoamento sem desbaste, visto que até o momento da realização do estudo, ainda não havia sido realizada esta prática silvicultural.

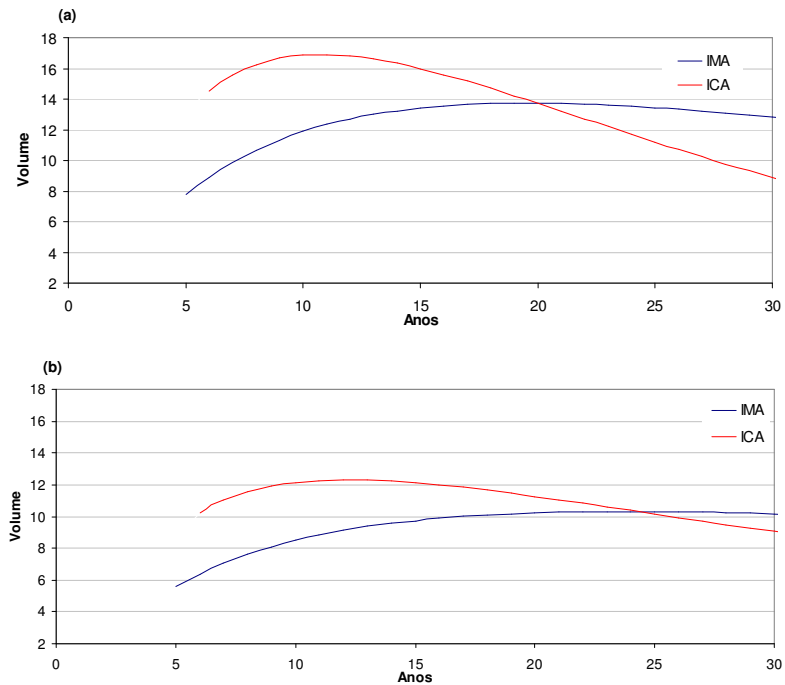
As equações que possibilitaram as estimativas de volume foram as funções de afilamento Goulding & Murray (1976) e as equações de volume que geram a compatibilidade encontram-se na Tabela 5.7, juntamente com suas estatísticas de precisão. A distribuição gráfica dos resíduos das equações ajustadas não apresentaram tendenciosidade que comprometa sua utilização.

**TABELA 5.7** Equações volumétricas selecionadas para gerar a compatibilidade do modelo de afilamento de Goulding & Murray (1976)

Área	Equações ajustadas	R <sup>2</sup>	S <sub>yx</sub>
1	$V = \frac{(DAP^2 \cdot H_t)}{24492,0 + 758,451 \cdot (DAP)}$	98,41%	±0,00532465m <sup>3</sup>
3	$V = \frac{(DAP^2 \cdot H_t)}{20756,5 + 985,065 \cdot (DAP)}$	96,52%	±0,00493612m <sup>3</sup>

Em que: R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação, S<sub>yx</sub> = erro padrão residual, DAP = diâmetro à altura do peito (cm) e H<sub>t</sub> = altura total (m).

A projeção por classe diamétrica empregando a função Weibull pelo método dos percentis e os modelos que estimam os atributos do povoamento, juntamente com a equação hipsométrica genérica e a função de afilamento, permitiram gerar a projeção dos volumes para o cálculo do IMA e ICA (Figura 5.5).



**FIGURA 5.5** Curvas projetadas para o ICA volume e IMA volume, para as áreas 1 (a) e 3 (b)

A precisão da projeção do volume quando comparado com os anos avaliados, representou um erro médio de 0,23% para área 1 e 3,57% para a área 3.

Sabe-se que a densidade do povoamento de uma espécie num determinado sítio influencia a rotação técnica (Simões, 1989; Scolforo & Maestri, 1998; Schmincke, 2000; Campos & Leite, 2002). Os resultados da prognose corroboram com a literatura florestal, pois o povoamento com 2.085 árvores.ha<sup>-1</sup> (área 1) houve uma antecipação do máximo incremento corrente anual (ICA), caracterizado por altos valores na fase inicial e um significativo decréscimo posterior ao máximo ICA.

Na área 3 com espaçamento mais amplo, o comportamento do crescimento foi bastante distinto. O máximo ICA ocorreu mais tarde que na área 1. Enquanto na área 1 o máximo ICA foi aos 11 anos, na área 3 foi aos 13 anos, porém, a principal característica foi o decréscimo do ICA de forma menos acentuada.

A rotação técnica da área 1 foi estimada para ocorrer aos 19 anos, quando ocorreu o máximo incremento médio anual (IMA) com  $13,743 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . Para a área 3, a rotação técnica ficou prevista para os 24 anos, com IMA de  $10,304 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ . A forte competição por luz, água e nutrientes no povoamento mais adensado, fez com que as árvores alcançassem o crescimento máximo suportado pelo sítio mais cedo, o que para o povoamento menos denso, ocorreu 5 anos mais tarde.

As estimativas de projeções em decorrência do longo período entre as idades dos povoamentos e a possível idade de rotação, faz com que futuramente as estimativas sejam atualizadas, a medida que novas mensurações venham ser realizadas. No entanto, a boa precisão dos modelos que representam os atributos dos povoamentos e os resultados consistentes e compatíveis com os rendimentos para principais regiões produtoras de teca no mundo (Tabela 5.8), permitem destacar que as projeções são precisas quanto aos modelos matemáticos e consistentes no aspecto biológico.

**TABELA 5.8** Incremento médio anual do volume de *Tectona grandis* L.f. nas principais regiões produtoras do mundo (...continua...)

Região	Incremento Médio Anual (IMA)	Fonte
Costa Rica	$15,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Chaves & Fonseca (1991)
Cáceres, MT	$10,000 - 15,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Veit (1996)
Ásia	$5,000 - 18,000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Wadsworth (1997)
Polinésia	$3,900 - 10,500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Wadsworth (1997)
Cáceres, MT	$11,868 - 14,723 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Passos et al. (2000)
Cáceres, MT	$8,634 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$	Passos et al. (2000)

**TABELA 5.8** Cont.

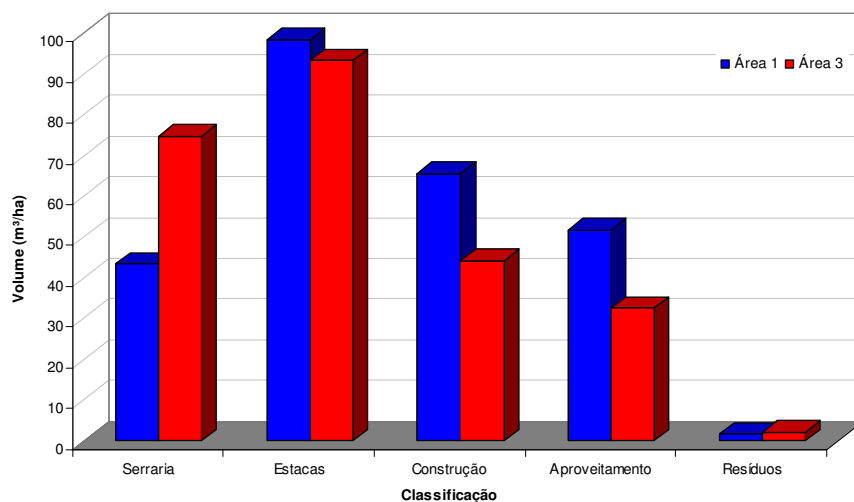
<b>Região</b>	<b>Incremento Médio Anual (IMA)</b>	<b>Fonte</b>
Cáceres, MT	4,607 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Passos et al. (2000)
Malásia	10,000 – 18,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Krishnapillay (2000)
Costa Rica	15,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Schmincke (2000)
Costa Rica	9,000 – 20,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Côte d'Ivoire	12,200 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Indonésia	14,400 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Índia	7,900 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Trinidad-Tobago	7,500 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Myanmar	12,000 – 17,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pandey & Brown (2000)
Costa Rica	10,200 – 13,300 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Pérez Cordero et al. (2000)
Côte d'Ivoire	5,000 – 16,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Maldonado & Louppe (2000)
Equador	10,000 – 15,000 m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> .ano <sup>-1</sup>	Custode (2003)

### 5.8 Estimativa de rendimento de múltiplos produtos

Os critérios para a definição dos múltiplos produtos encontram-se na Tabela 5.1. Os resultados obtidos com a prognose por classe diamétrica e com as funções de afilamento ajustadas separadamente para as áreas 1 e 3 permitiram realizar as estimativas expressas na Figura 5.6. O detalhamento do rendimento dos múltiplos produtos por classe diamétrica para cada área de estudo encontra-se nas Tabelas 4.A e 5.A (em anexo).

O povoamento da área 1 apresentou um rendimento de 261,114 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de madeira sem casca, para os 19 anos de idade, quando houve o máximo incremento médio anual (IMA). O significativo volume para uma rotação de 19 anos, quando se considera o horizonte da espécie teca, não significou bons rendimentos em madeira de uso nobre, visto que apenas 16,63% da madeira produzida pode ser destinada a serrarias. A ausência de desbastes e a alta densidade do povoamento estabeleceu uma forte competição por luz, água e nutrientes, não permitindo a obtenção de toras de madeira com maior dimensão diamétrica, apesar deste povoamento apresentar volume total superior ao povoamento da área 3.





**FIGURA 5.6** Rendimento volumétrico por categoria comercial para os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. nas áreas 1 e 3, em suas respectivas idades de rotação técnica estimadas

O maior percentual do volume produzido na área 1 foi destinado à produção de estacas para atividades agropecuárias, com 37,72% da produção total. As demais categorias comerciais, como o emprego da madeira em obras da construção civil, artesanato e energia, apresentam dificuldades de colocação no mercado e, portanto, não podem ser consideradas as principais fontes de renda para o povoamento, apesar de o volume estimado para estas categorias comerciais chegar a 44,97% da produção esperada para o povoamento da área 1. O volume inaproveitável foi de apenas 0,68% do volume total sem casca.

Para o povoamento da área 3, o rendimento volumétrico sem casca foi de 247,290 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, considerando a rotação técnica aos 24 anos de idade. Embora o volume total sem casca seja menor que o obtido na área 1, a produção do povoamento menos adensado ganha em qualidade no que diz respeito ao rendimento de toras de maior dimensão diamétrica, com destino para serrarias,

cujo valor foi estimado em  $74,801 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , ou seja, 30,25% da produção total. Este volume madeireiro para serraria é 72% superior ao produzido na área 1. Certamente, a menor densidade de árvores por hectare contribuiu para a obtenção de um maior volume destinado ao comércio mais nobre, visto que as práticas silviculturais para ambos os povoamentos foram considerados as mesmas e as características de sítios semelhantes, ou seja, ambos possuem sítios de índice 13,5 e 16,5.

O rendimento volumétrico para estaca (área 3) foi semelhante aos obtidos para área 1, cujo valor foi estimado em 37,72% do volume total. O diferencial entre as duas áreas, além do volume para serraria, também pode ser considerado o volume produzido para fins menos nobres, visto que na área 3 apenas 31,09% foram estimados para uso nas categorias de obras na construção civil e aproveitamento, enquanto na área 1 este percentual chegou a 44,97%.

Em ambos povoamentos os resultados demonstram que a condução silvicultural sem desbaste, gera pouco volume em peças de madeira de maior dimensão e a adoção de desbastes torna-se uma prática indispensável.

## 6 CONCLUSÕES

- As funções densidade de probabilidade lognormal, gama momentos e  $S_B$  momentos apresentaram maior dificuldade de representar a distribuição diamétrica das unidades amostrais, cujos valores de divergência foram maiores.
- A função densidade de probabilidade Weibull percentis foi a que melhor representou a distribuição diamétrica das unidades amostrais, em que os pontos de máxima divergência entre as curvas observada e teórica não foram significativos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov para  $\alpha = 0,05$ .
- Os modelos ajustados que possibilitaram representar os atributos dos povoamentos estudados apresentaram estimativas precisas das variáveis avaliadas.
- A idade de rotação técnica foi 19 anos para o povoamento, com densidade inicial de 2.085 árvores.ha<sup>-1</sup> e de 24 anos para o povoamento com densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>.
- O povoamento mais denso apresentou maior produção na idade de rotação com 261,114 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de madeira sem casca, porém, somente 16,63% do volume total apresentam dimensões para serraria.
- O povoamento menos denso apresentou menor produção na idade de rotação com 247,290 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de madeira sem casca. Entretanto, o percentual de madeira para serraria foi de 30,25% do volume total.
- As estimativas de crescimento e produção dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. avaliados são compatíveis com as principais regiões produtoras no mundo.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, E.C.R. et al. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.61, p.86-102, 2002.
- AYRES, M. **BioEstat 2.0**: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá, Brasília: CNPq, 2000, 272p.
- BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameters distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v.19, n.2, p.27-104, June 1973.
- BLISS, D.M.; REINKER, K.A. A lognormal approach to diameter distribution in even aged stands. **Forest Science**, Washington, v.10, n.3, p.350-360, Sept. 1964.
- BURKHART, H.E.; CAO, Q.V.; WARE, K.D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Virginia: School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59p. (Publ. FWS, 2).
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 407 p.
- CAMPOS, L.J.D. **Prognose por classe de diâmetro a partir de modelos do tipo povoamento total**. Viçosa, MG: 1997. 57p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, MG.
- CHAVES, E.; FONSECA, W. **Teca (*Tectona grandis* L.f.) especie de árbol de uso múltiple en América Central**. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 1991. 47 p. (Informe Técnico 179).
- CLUTTER, J.L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York, J. Wiley, 1983. 333p.
- CLUTTER, J.L.; BENNETT, F.A. Diameter distributions in old-field slash pine plantations. **General Forestry Resource Council**, n.13, p.9, 1965.
- COUTO, H.T.Z. **Distribuição de diâmetros em plantações de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea***. 1980. 79p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- CUNHA NETO, F.R. **Sistema de predição presente e futura da produção por classe de diâmetro utilizando a função Weibull para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla***. Lavras: 1994. 157p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

- CUSTODE, J. **Mercados de madeira**. 2003. 2p. Disponível em:  
<<http://www.bosquetropicales.com/html/Espanol/mercados.html>>. Acesso em:  
10 maio 2004.
- FINGER, C.A.G. **Distribuição de diâmetros em *Acacia mearnsii* de Wild, em diferentes povoamentos e idades**. 1982. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade do Paraná, Curitiba.
- GLADE, J.E. **Prognose de volume por classes diamétricas para *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden**. 1986. 94p. Dissertação (Mestrado em Manejo Florestal)-Universidade do Paraná, Curitiba.
- GOULDING, C.J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, Rotorua, v.5, n.3, p.313-322, Feb. 1976.
- GUIMARÃES, D.P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**. 1994. 160p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, MG, Viçosa, MG.
- HAFLEY, W.L.; SCHREUDER, H.T. Statistical distribution for fitting diameters and data in even-aged stands. **Canadian Journal Research**, Ottawa, v.7, p.481-487. 1977.
- JOHNSON, N.L. Systems of frequency curves generated by methods of translation. **Biometrika**, Great Britain, v.36, p.149-176. 1949.
- JOHNSON, N.L.; KITCHEN, J.O. Some notes on tables to facilitate fitting SB curves. **Biometrika**, Great Britain, v.58, n.1, p.223-226, jan. 1971.
- KRISHNAPILLAY, B. Silvicultura y ordenación de plantaciones de teca. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.14-21, 2000.
- LEITE, H.G. **Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro para povoamentos de *E. saligna* Smith**. 1990. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- LENHART, J.D.; HACKETT, L.T. **Estimating survival for east texas pine plantations**. Nacogdoches, SFASU: School of Forestry Stephen F. Austin State University, 1988, 10p. (ETPPRP Report, 19).
- MALDONADO, G.; LOUPPE D. Desafios para la teca em Cote d'Ivoire. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.36-44, 2000.
- NELSON, T.C. Diameter distribution and growth of loblolly pine. **Forest Science**, v.10, n.1, p.105-114, Mar. 1964.

- OLIVEIRA, E.B.; MACHADO, S.A.M.; FIGUEIREDO FILHO, A. Sistema para simulação do crescimento da produção de *Pinus taeda* L. e avaliação econômica de regimes de manejo. **Revista Árvore**, v.22, n.1, p.99-111, 1998.
- PANDEY, D.; BROWN, C. La teca: una visión global. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.3-13, 2000.
- PASSOS, C.A.M. et al. Crescimento inicial de Teca *Tectona grandis*, em diferentes espaçamentos no município de Cáceres, estado do Mato Grosso. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE FLORESTAL, 6., 2000, Porto Seguro, BA. 2000. p.84-87.
- PÉREZ CORDERO, L.D.; UGALDE ARIAS, L.; KANNINEN, M. Desarrollo de escenarios de crecimiento para plantaciones de teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica. **Revista Forestal Centro Americana**, Turrialba, n.31, jul./set. 2000. (Comunicación Técnica). Disponível em: <<http://catie.ac.cr/informacion/rfca/rev31/pag16.htm>>. Acesso em: 10 maio 2001.
- RIBEIRO JUNIOR, J.I. **Análise estatística no Excel: guia prático**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 251p.
- SCHMINCKE, K.H. Plantaciones de teca en Costa Rica: la experiencia de la empresa Precious Woods. **UnasyIva**, Roma, v.51, n.201, p.29-37, 2000.
- SCOLFORO, J.R.S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura de crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis***. 1990. 290p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SCOLFORO, J.R.S. **Biometria florestal 2: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos de madeira**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 292p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 463p. (Textos Acadêmicos).
- SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Um sistema de crescimento e produção com simulador de desbaste. **Scientia Forestalis**, n.50, p.51-64, 1996.
- SCOLFORO, J.R.S.; MAESTRI, R. O manejo de florestas plantadas. In: SCOLFORO, J.R.S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 443p. (Textos Acadêmicos).
- SIMÕES, J.W. **Reflorestamento e manejo de florestas implantadas**. Piracicaba, SP: USP/ESALQ 1989. 29p. (Documentos Florestais, 4).

SWINDEL, B.F., SMITH, H.D.; GROSENBAUCH, L.R. Fitting diameter distributions with a Hand-held, programuable calculator. **Canadian Journal Forest Research**, Gainesville, v.3, n.3, p.325-334, 1987.

THIERSCH, C.R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para o plantio de clones de *Eucalyptus sp.*** 2002. 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras. Lavras,

VEIT, L.f. Plante seu Fundo de Aposentadoria. **Silvicultura**, São Paulo, v.17, n.68, p.20-22, 1996.

WADSWORTH, F.H. **Forest production for tropical America.** Washington: USDA. Forest Service, 1997. 561p. (Agricultura Handbook, 710)

## ANEXOS

### ANEXO A

	<b>Página</b>
<b>TABELA 1.A</b>	Atributos dos povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. estudados, Rio Branco, Acre, 2004.....261
<b>TABELA 2.A</b>	Estimativa dos parâmetros (a), (b) e (c) da distribuição Weibull método percentis, para as idades de 5 a 30 anos para os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. da áreas 1 e 3, município de Rio Branco, Acre, 2004.....262
<b>TABELA 3.A</b>	Estimativa de produção em volume, incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA), para os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, Acre, 2004.....263
<b>TABELA 4.A</b>	Estimativa volumétrica sem casca, número de peças de madeira.ha <sup>-1</sup> e volume médio das peças de madeira para o povoamento de <i>Tectona grandis</i> L.f. da área 1, considerando a rotação técnica para os 19 anos de idade, Rio Branco, Acre, 2004.....264
<b>TABELA 5.A</b>	Estimativa volumétrica sem casca, número de peças de madeira.ha <sup>-1</sup> e volume médio das peças de madeira para o povoamento de <i>Tectona grandis</i> L.f. da Área 3, considerando a rotação técnica para os 24 anos de idade, Rio Branco, Acre, 2004.....265



**TABELA 1.A** Atributos dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. estudados, Rio Branco, Acre, 2004

AR	UA	I (anos)	N <sub>1</sub> arv.ha <sup>-1</sup>	N <sub>2</sub> arv.ha <sup>-1</sup>	H <sub>dom</sub> (m)	H <sub>média</sub> (m)	S (m)	G (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Dg (cm)	D <sub>min</sub> (cm)	D <sub>max</sub> (cm)	D <sub>med</sub> (cm)	S <sup>2</sup> <sub>dia</sub> (cm <sup>2</sup> )	D <sub>XP30</sub> (cm)	D <sub>XP90</sub> (cm)
1	1	9,52	2083	1725	15,60	12,29	16,50	27,01	14,1	5,63	21,4	13,7	9,96	12,3	17,4
1	2	9,52	2083	1475	15,26	12,20	13,50	22,93	14,0	8,85	20,2	13,8	7,52	11,9	18,2
1	3	9,52	2083	1450	12,75	10,46	13,50	13,31	10,8	7,32	13,8	10,7	2,43	9,81	12,8
1	4	9,52	2083	1650	17,50	12,69	16,50	23,88	13,5	7,00	20,8	13,3	7,44	11,6	16,2
1	5	9,52	2083	1625	14,75	13,24	13,50	29,08	15,1	9,23	22,1	14,8	8,38	13,0	18,5
1	6	9,52	2083	1875	16,30	15,36	16,50	30,19	14,3	6,05	19,5	14,1	6,35	12,9	16,6
1	7	9,52	2083	1725	17,70	15,12	16,50	24,33	13,4	5,92	20,3	12,9	10,8	10,7	17,2
1	8	9,52	2083	1750	14,30	11,51	13,50	23,35	13,0	6,68	19,9	12,6	10,9	10,1	17,1
1	9	9,52	2083	1000	15,27	11,81	13,50	14,13	13,4	7,16	17,1	13,2	5,35	12,5	15,9
1	10	9,52	2083	1350	14,15	11,77	13,50	21,55	14,2	5,09	21,1	13,9	10,1	12,4	17,3
3	11	7,40	1111	1050	13,70	11,77	16,50	11,34	11,7	6,68	14,8	11,6	2,38	11,3	12,8
3	12	7,40	1111	1125	14,60	12,71	16,50	13,98	12,5	7,89	17,8	12,4	3,74	11,4	14,6
3	13	7,40	1111	950	13,00	11,39	13,50	9,28	11,1	8,02	14,0	11,0	1,93	10,7	12,6
3	14	7,40	1111	1000	12,90	11,85	13,50	11,01	11,8	8,72	16,6	11,7	2,74	10,8	13,6
3	15	7,40	1111	1150	12,85	12,39	13,50	13,44	12,2	8,59	15,6	12,1	2,35	11,7	13,7
3	16	7,40	1111	1000	14,80	12,61	16,50	13,59	13,1	8,28	16,9	13,0	3,25	11,9	15,1
3	17	7,40	1111	975	13,70	13,08	16,50	12,47	12,7	8,91	15,9	12,6	2,25	11,9	14,2
3	18	7,40	1111	1025	13,00	12,32	13,50	12,31	12,3	9,49	15,2	12,2	2,05	11,6	14,4
3	19	7,40	1111	950	14,85	12,40	16,50	10,54	11,8	8,28	15,9	11,8	2,10	11,1	13,7
3	20	7,40	1111	1075	12,00	11,09	13,50	10,47	11,1	7,64	12,9	11,0	1,08	10,6	12,2

Em que: AR = área de estudo, UA = unidade amostral permanente, I = idade em ano, N<sub>1</sub> = número de árvores no primeiro ano do povoamento, N<sub>2</sub> = número de árvores sobreviventes na segunda idade, H<sub>dom</sub> = altura média das árvores dominantes, H<sub>média</sub> = altura total média das árvores pertencentes a unidade amostral permanente, S = índice de sítio, G = área basal, Dg = diâmetro médio quadrático, D<sub>min</sub> = diâmetro mínimo, D<sub>max</sub> = diâmetro máximo, D<sub>med</sub> = média aritmética dos DAPs, S<sup>2</sup><sub>dia</sub> = variância dos diâmetros, D<sub>XP30</sub> = diâmetro percentil 30 e D<sub>XP90</sub> = diâmetro percentil 90.

**TABELA 2.A** Estimativa dos parâmetros (a), (b) e (c) da distribuição Weibull método percentis, para as idades de 5 a 30 anos para os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. da áreas 1 e 3, município de Rio Branco, Acre, 2004

Idades (anos)	Diâmetro mínimo (cm)		Diâmetro percentil XP30 (cm)		Diâmetro percentil XP90 (cm)		% do diâmetro mínimo para o cálculo de "a"	Parâmetro a		Parâmetro c		Parâmetro b	
	Área 1	Área 3	Área 1	Área 3	Área 1	Área 3		Área 1	Área 3	Área 1	Área 3	Área 1	Área 3
5	4,73	6,27	7,82	8,65	10,24	10,00	0,50	2,368	3,139	5,082	8,552	6,684	6,227
6	5,30	7,01	8,84	9,75	11,79	11,58	0,50	2,655	3,508	4,776	7,272	7,676	7,198
7	5,84	7,69	9,78	10,72	13,30	13,09	0,50	2,923	3,848	4,512	6,479	8,626	8,130
8	6,35	8,32	10,67	11,75	14,76	14,55	0,50	3,176	4,163	4,283	5,929	9,541	9,028
9	6,83	8,91	11,51	12,66	16,20	15,97	0,50	3,416	4,458	4,084	5,517	10,425	9,898
10	7,29	9,47	12,31	13,54	17,61	17,34	0,50	3,645	4,735	3,911	5,195	11,283	10,743
11	7,72	9,99	13,07	14,38	18,99	18,69	0,50	3,865	4,997	3,758	4,934	12,116	11,565
12	8,15	10,48	13,80	15,18	20,34	20,00	0,50	4,076	5,244	3,624	4,716	12,927	12,368
13	8,56	10,95	14,50	15,95	21,68	21,29	0,50	4,281	5,480	3,507	4,532	13,718	13,154
14	8,95	11,40	15,18	16,70	22,99	22,55	0,50	4,480	5,703	3,403	4,374	14,491	13,922
15	9,34	11,83	15,84	17,42	24,28	23,78	0,50	4,673	5,917	3,311	4,237	15,247	14,676
16	9,72	12,24	16,48	18,12	25,55	25,00	0,50	4,861	6,121	3,230	4,117	15,987	15,416
17	10,09	12,63	17,10	18,80	26,80	26,19	0,50	5,045	6,317	3,160	4,011	16,714	16,144
18	10,45	13,01	17,71	19,46	28,03	27,36	0,50	5,225	6,506	3,097	3,918	17,426	16,860
19	10,80	13,37	18,32	20,11	29,24	28,51	0,50	5,402	6,687	3,043	3,835	18,127	17,565
20	11,15	13,72	18,91	20,74	30,43	29,65	0,50	5,577	6,861	2,996	3,761	18,816	18,260
21	11,49	14,06	19,50	21,36	31,59	30,77	0,50	5,748	7,030	2,956	3,695	19,495	18,945
22	11,83	14,38	20,08	21,97	32,74	31,87	0,50	5,918	7,193	2,921	3,636	20,164	19,622
23	12,17	14,70	20,66	22,57	33,86	32,95	0,50	6,086	7,350	2,892	3,584	20,823	20,291
24	12,50	15,00	21,24	23,15	34,97	34,02	0,50	6,252	7,503	2,869	3,538	21,474	20,952
25	12,83	15,30	21,82	23,74	36,05	35,07	0,50	6,418	7,652	2,850	3,497	22,118	21,606
26	13,16	15,59	22,40	24,31	37,11	36,11	0,50	6,582	7,796	2,835	3,460	22,753	22,254
27	13,49	15,87	22,97	24,88	38,15	37,13	0,50	6,745	7,937	2,825	3,428	23,382	22,895
28	13,81	16,14	23,56	25,45	39,17	38,14	0,50	6,908	8,073	2,820	3,400	24,005	23,530
29	14,14	16,41	24,14	26,00	40,17	39,13	0,50	7,071	8,207	2,817	3,376	24,621	24,160
30	14,46	16,67	24,73	26,56	41,15	40,11	0,50	7,234	8,338	2,819	3,355	25,231	24,785

**TABELA 3.A** Estimativa de produção em volume sem casca, incremento médio anual (IMA) e incremento corrente anual (ICA), para os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, Acre, 2004

Ano	Área 1			Área 3		
	Volume (m <sup>3</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> )	ICA (m <sup>3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	IMA (m <sup>3</sup> )	ICA (m <sup>3</sup> )
5	38,808	7,762	13,121	27,956	5,591	8,384
6	53,364	8,894	14,556	38,205	6,368	10,249
7	68,932	9,847	15,568	49,252	7,036	11,047
8	85,180	10,648	16,248	60,818	7,602	11,566
9	101,846	11,316	16,665	72,739	8,082	11,921
10	118,719	11,872	16,873	84,888	8,489	12,149
11	135,633	12,330	16,914	97,164	8,833	12,276
12	152,455	12,705	16,822	109,488	9,124	12,324
13	169,080	13,006	16,625	121,797	9,369	12,309
14	185,424	13,245	16,344	134,040	9,574	12,243
15	201,423	13,428	15,998	146,179	9,745	12,138
16	217,025	13,564	15,602	158,181	9,886	12,002
17	232,192	13,658	15,167	170,023	10,001	11,842
18	246,895	13,716	14,703	181,685	10,094	11,662
19	261,114	13,743	14,219	193,153	10,166	11,468
20	274,834	13,742	13,720	204,415	10,221	11,263
21	288,051	13,717	13,217	215,465	10,260	11,050
22	300,760	13,671	12,709	226,296	10,286	10,831
23	312,961	13,607	12,201	236,905	10,300	10,609
24	324,658	13,527	11,697	247,290	10,304	10,385
25	335,858	13,434	11,200	257,450	10,298	10,160
26	346,568	13,330	10,710	267,387	10,284	9,937
27	356,802	13,215	10,234	277,101	10,263	9,714
28	366,569	13,092	9,767	286,595	10,236	9,494
29	375,881	12,961	9,312	295,872	10,202	9,277
30	384,752	12,825	8,870	304,934	10,164	9,063

**TABELA 4.A** Estimativa de produção em volume sem casca, número de peças de madeira.ha<sup>-1</sup> e volume médio das peças de madeira para o povoamento de *Tectona grandis* L.f. da área 1, considerando a rotação técnica para os 19 anos de idade, Rio Branco, Acre, 2004

DAP	Volume.ha <sup>-1</sup> (m <sup>3</sup> )					Número* de peças de madeira.ha <sup>-1</sup>					Volume médio das peças de madeira (m <sup>3</sup> )			
	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	Resíduo	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	
6	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0	0	0	0	0,000	0,000	0,000	0,004	
7	0,000	0,000	0,000	0,023	0,004	0	0	0	5	0,000	0,000	0,000	0,005	
8	0,000	0,000	0,000	0,095	0,006	0	0	0	16	0,000	0,000	0,000	0,006	
9	0,000	0,000	0,000	0,236	0,021	0	0	0	32	0,000	0,000	0,000	0,007	
10	0,000	0,000	0,000	0,517	0,019	0	0	0	65	0,000	0,000	0,000	0,008	
11	0,000	0,000	0,000	0,931	0,044	0	0	0	96	0,000	0,000	0,000	0,010	
12	0,000	0,000	0,000	1,592	0,023	0	0	0	159	0,000	0,000	0,000	0,010	
13	0,000	0,000	0,000	2,438	0,048	0	0	0	206	0,000	0,000	0,000	0,012	
14	0,000	0,000	1,740	1,829	0,038	0	0	43	214	0,000	0,000	0,041	0,009	
15	0,000	0,000	2,369	2,543	0,069	0	0	51	257	0,000	0,000	0,046	0,010	
16	0,000	0,000	3,093	3,381	0,112	0	0	60	300	0,000	0,000	0,052	0,011	
17	0,000	0,000	5,944	2,362	0,072	0	0	135	271	0,000	0,000	0,044	0,009	
18	0,000	3,867	2,786	3,424	0,207	0	75	75	298	0,000	0,052	0,037	0,011	
19	0,000	4,550	3,286	4,338	0,038	0	80	80	400	0,000	0,057	0,041	0,011	
20	0,000	5,191	6,321	2,364	0,172	0	84	167	251	0,000	0,062	0,038	0,009	
21	0,000	5,749	7,026	2,681	0,219	0	85	170	256	0,000	0,067	0,041	0,010	
22	0,000	9,641	3,420	3,833	0,084	0	170	85	339	0,000	0,057	0,040	0,011	
23	0,000	10,082	3,587	4,082	0,105	0	165	82	329	0,000	0,061	0,044	0,012	
24	0,000	10,245	6,077	1,891	0,028	0	156	156	234	0,000	0,066	0,039	0,008	
25	0,000	10,115	6,028	1,918	0,036	0	144	144	216	0,000	0,070	0,042	0,009	
26	0,000	12,368	2,622	2,321	0,123	0	194	65	194	0,000	0,064	0,040	0,012	
27	7,095	5,186	2,183	1,794	0,048	57	114	57	170	0,125	0,046	0,038	0,011	
28	6,413	4,695	1,985	1,654	0,051	48	97	48	145	0,132	0,048	0,041	0,011	
29	5,625	4,123	1,751	1,477	0,051	40	80	40	120	0,140	0,051	0,044	0,012	
30	4,783	3,511	1,497	1,277	0,049	32	65	32	97	0,148	0,054	0,046	0,013	
31	3,942	2,896	1,239	1,068	0,045	25	51	25	76	0,156	0,057	0,049	0,014	
32	3,145	3,084	0,694	0,402	0,031	19	58	19	38	0,163	0,053	0,036	0,010	
33	3,739	0,716	0,683	0,547	0,011	28	14	14	42	0,132	0,051	0,048	0,013	
34	2,792	0,536	0,512	0,415	0,009	20	10	10	30	0,138	0,053	0,051	0,014	
35	2,014	0,676	0,253	0,135	0,005	14	14	7	14	0,145	0,049	0,036	0,010	
36	1,402	0,472	0,178	0,096	0,004	9	9	5	9	0,151	0,051	0,038	0,010	
37	0,941	0,317	0,120	0,065	0,003	6	6	3	6	0,157	0,053	0,040	0,011	
38	0,609	0,206	0,078	0,043	0,002	4	4	2	4	0,164	0,055	0,042	0,012	
39	0,379	0,128	0,049	0,027	0,001	2	2	1	2	0,170	0,058	0,044	0,012	
40	0,227	0,077	0,029	0,017	0,001	1	1	1	1	0,177	0,060	0,046	0,013	
41	0,131	0,044	0,017	0,010	0,001	1	1	0	1	0,184	0,062	0,048	0,014	
42	0,090	0,009	0,008	0,004	0,000	1	0	0	0	0,159	0,050	0,043	0,011	
Total	43,42	98,496	65,585	51,835	1,778	309	1677	1579	4896					

Em que: serraria = toras de madeira de 3 metros de comprimento e 18 cm na ponta fina; estacas = peças de madeira de 2,2 metros de comprimento e 14 cm na ponta fina; construção = peças de madeira de 3,0 metros de comprimento e 10 cm na ponta fina; aproveitamento = resíduos de madeira para artesanato e energia com peças de 1 metro de comprimento e 3 cm na ponta fina e resíduos = sobras de todos os comprimentos e menor que 3 cm na ponta grossa.

\* Números arredondados.

**TABELA 5.A** Estimativa de produção em volume sem casca, número de peças de madeira.ha<sup>-1</sup> e volume médio das peças de madeira para o povoamento de *Tectona grandis* L.f. da Área 3, considerando a rotação técnica para os 24 anos de idade, Rio Branco, Acre, 2004

DAP	Volume.ha <sup>-1</sup> (m <sup>3</sup> )					Número* de peças de madeira.ha <sup>-1</sup>					Volume médio das peças de madeira (m <sup>3</sup> )			
	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	Resíduo	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	Serraria	Estacas	Construção	Aproveitamento	
9	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0	0	0	1	0,000	0,000	0,000	0,007	
10	0,000	0,000	0,000	0,029	0,002	0	0	0	3	0,000	0,000	0,000	0,009	
11	0,000	0,000	0,000	0,086	0,002	0	0	0	9	0,000	0,000	0,000	0,009	
12	0,000	0,000	0,000	0,193	0,005	0	0	0	18	0,000	0,000	0,000	0,011	
13	0,000	0,000	0,171	0,208	0,006	0	0	5	25	0,000	0,000	0,000	0,035	
14	0,000	0,000	0,295	0,367	0,014	0	0	7	37	0,000	0,000	0,039	0,010	
15	0,000	0,000	0,472	0,598	0,027	0	0	11	53	0,000	0,000	0,044	0,011	
16	0,000	0,000	1,135	0,518	0,024	0	0	29	58	0,000	0,000	0,039	0,009	
17	0,000	0,000	1,633	0,764	0,042	0	0	38	75	0,000	0,000	0,043	0,010	
18	0,000	1,133	0,921	1,321	0,025	0	24	24	118	0,000	0,048	0,039	0,011	
19	0,000	1,506	2,104	0,862	0,092	0	29	58	86	0,000	0,052	0,037	0,010	
20	0,000	1,938	2,717	1,249	0,020	0	34	68	136	0,000	0,057	0,040	0,009	
21	0,000	3,928	1,565	1,886	0,078	0	79	39	158	0,000	0,050	0,040	0,012	
22	0,000	4,766	1,905	2,330	0,109	0	89	45	178	0,000	0,054	0,043	0,013	
23	0,000	5,626	3,804	1,337	0,055	0	98	98	147	0,000	0,057	0,039	0,009	
24	0,000	6,464	4,392	1,575	0,075	0	106	106	158	0,000	0,061	0,042	0,010	
25	0,000	9,457	2,254	2,160	0,196	0	166	55	166	0,000	0,057	0,041	0,013	
26	0,000	10,305	2,468	2,602	0,022	0	171	57	228	0,000	0,060	0,043	0,011	
27	6,403	5,327	2,365	2,164	0,141	57	114	57	171	0,112	0,047	0,041	0,013	
28	6,604	5,501	2,453	2,270	0,160	56	112	56	167	0,118	0,049	0,044	0,014	
29	6,622	5,523	2,473	2,311	0,175	53	106	53	159	0,125	0,052	0,047	0,015	
30	6,452	5,387	2,421	2,284	0,184	49	98	49	148	0,131	0,055	0,049	0,015	
31	6,101	6,875	1,662	1,079	0,159	44	133	44	89	0,137	0,052	0,037	0,012	
32	5,595	6,315	1,535	1,006	0,156	39	117	39	78	0,144	0,054	0,039	0,013	
33	7,991	3,027	1,199	0,726	0,070	66	66	33	66	0,121	0,046	0,036	0,011	
34	6,867	2,608	1,038	0,635	0,065	54	54	27	54	0,126	0,048	0,038	0,012	
35	5,702	2,171	0,867	0,536	0,058	43	43	22	43	0,132	0,050	0,040	0,012	
36	4,568	1,743	0,699	0,436	0,050	33	33	17	33	0,137	0,052	0,042	0,013	
37	3,525	1,348	0,543	0,341	0,041	25	25	12	25	0,142	0,054	0,044	0,014	
38	2,617	1,003	0,405	0,257	0,032	18	18	9	18	0,148	0,057	0,046	0,014	
39	1,866	0,717	0,291	0,185	0,024	12	12	6	12	0,153	0,059	0,048	0,015	
40	1,276	0,491	0,200	0,128	0,017	8	8	4	8	0,159	0,061	0,050	0,016	
41	1,072	0,126	0,114	0,067	0,005	8	3	3	5	0,141	0,050	0,045	0,013	
42	0,671	0,079	0,072	0,043	0,003	5	2	2	3	0,145	0,051	0,047	0,014	
43	0,401	0,047	0,043	0,026	0,002	3	1	1	2	0,150	0,053	0,048	0,014	
44	0,228	0,027	0,025	0,015	0,001	1	0	0	1	0,155	0,000	0,000	0,015	
45	0,123	0,015	0,013	0,008	0,001	1	0	0	1	0,160	0,000	0,000	0,016	
Total	74,801	93,478	44,257	32,613	2,141	576	1741	1073	2740					

Em que: serraria = toras de madeira de 3 metros de comprimento e 18 cm na ponta fina; estacas = peças de madeira de 2,2 metros de comprimento e 14 cm na ponta fina; construção = peças de madeira de 3,0 metros de comprimento e 10 cm na ponta fina; aproveitamento = resíduos de madeira para artesanato e energia com peças de 1 metro de comprimento e 3 cm na ponta fina e resíduos = sobras de todos os comprimentos e menor que 3 cm na ponta grossa.

\* Números arredondados

## **CAPÍTULO 6**

### **ANÁLISE ECONÔMICA DE POVOAMENTOS NÃO DESBASTADOS DE *Tectona grandis* L.f., NA MICRORREGIÃO DO BAIXO RIO ACRE**

## 1 RESUMO

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* L.f. na microrregião do Baixo Rio Acre.** 2005. Cap. 6, p. 266-301. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Este trabalho foi realizado em dois povoamentos de *Tectona grandis* L.f. localizados na microrregião do Baixo Rio Acre, município de Rio Branco, estado do Acre: o primeiro povoamento com densidade inicial de 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> e o segundo com 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>. O sistema de manejo praticado não adotou o desbaste. Os objetivos do trabalho foram: determinar a rotação econômica ótima (REO) para os dois povoamentos estudados avaliar a viabilidade econômica de dois povoamentos de teca não desbastados e analisar a sensibilidade dos indicadores econômicos quanto a oscilação da taxa mínima de atratividade (TMA) e da redução da receita. Os critérios econômicos foram o valor presente líquido (VPL) e o benefício periódico equivalente (B(C)PE). Para avaliar a taxa de crescimento do investimento foi adotada a taxa interna de retorno (TIR) e para mensurar o custo de oportunidade do patrimônio terra foi utilizado o valor esperado da terra (VET). Na análise de sensibilidade, avaliou-se o comportamento do VPL e do B(C)PE, mediante a oscilação da TMA e da redução das receitas. Os resultados da análise econômica demonstram que a REO baseada na maximização dos valores do VPL e B(C)PE, considerando uma taxa mínima de atratividade de 10% a.a., ficou prevista para os 25 anos de idade na área 1 e aos 27 anos de idade na área 3. Os povoamentos de teca avaliados são viáveis economicamente para uma TMA de 10% a.a.; o povoamento da área 1 apresentou melhores resultados para VPL e B(C)PE que o da área 3; as reduções nas receitas, com queda dos preços da madeira não podem ser maiores ou iguais a 37,67%, se mantidos os mesmos níveis de investimento e a TMA superior a 12,67% demonstra que o investimento em povoamentos não desbastados não seria um investimento atrativo.

Palavra-chave: Rotação econômica, análise de sensibilidade, valor presente líquido, valor esperado da terra e taxa interna de retorno.

---

Comitê de orientação: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (Orientador);  
Antônio Donizette de Oliveira – UFLA (Co-orientador).

## 2 ABSTRACT

FIGUEIREDO, Evandro Orfanó. **Economic analysis of unthinned stands of *Tectona grandis* L.f in the Baixo Rio Acre micro region, Acre.** 2005. Chap. 6. p. 266-301. Dissertation (Master in Forestry) – Federal University of Lavras, Lavras, MG.

The study conducted in two stands of *Tectona grandis* L.f situated in the Baixo Rio Acre micro region, town of Rio Branco, state of Acre: the first stand with an initial density of 2.083 trees.ha<sup>-1</sup> and the second with 1.111 trees.ha<sup>-1</sup>. The practiced management system didn't adopt thinning. The objectives of the work were: to determine the optimum economic rotation (OER) for the two studied stands and evaluate the economic viability of two unthinned teak stands and analyze the sensitivity of the economic indicators as regards the oscillation of the minimum attractiveness rate (MAR) and cut reduction. The economic criteria were the net present value (NPV) and equivalent periodic benefit (EPB). To evaluate the investment growth rate, the internal return rate (MAR) was adopted and to measure the land heritage shadow cost was employed the land expected value. In the analysis of sensitivity, the behavior of NPV and of (EPB) was evaluated by means of the oscillation of MAR and cut reduction. The results of the economic analysis show that the OER based on the maximization of the values of NPV and EPB, considering a minimum attractiveness rate of 10 per year, became foreseen for the 25 years of age in area 1 and at the 27 years of age in area 2. The teak stands evaluated are economically viable for a MAR of 10% per year; the stand of area 1 presented better results for NPV and EPB, than that of area 2, the reductions in the cuts with fall of the wood prices cannot be greater or equal to 37,67%, if maintained the same levels of investment and MAR superior to 12,67% shows that the investment in unthinned stands would not be a attractive investment.

Key-words: economic rotation, sensitivity analysis, net present value, land expected value and internal return rate.

---

Guidance Committee: José Roberto Soares Scolforo – UFLA (adviser); Antonio Donizette de Oliveira - UFLA (Co-adviser)



### 3 INTRODUÇÃO

A teca (*Tectona grandis* L.f.), originária da Ásia, encontra-se em expansão nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil. O principal produto desta espécie é a madeira de alta qualidade, muito utilizada em móveis finos e na construção naval. O valor de mercado para a madeira de teca madura, livre de nós e com diâmetro adequado para serraria, chega a superar os valores comercializados com a espécie mogno (*Swietenia macrophylla* King).

A expectativa é de que investimentos em povoamentos de teca no Brasil constituam uma ótima opção econômica para as regiões que atendam às demandas edafoclimáticas da espécie. Estudos realizados por Paim (2003), Leite (2003) e Tuoto (2003) apontam um déficit mundial de madeira de aproximadamente 500 milhões de metros cúbicos por ano, já no ano de 2010. Veit (1996) afirma que a diferença entre a demanda e a oferta de madeira de teca de boa qualidade imprime uma continuada valorização do produto no mercado. Custode (2003) menciona que a expectativa é de que ocorra uma elevação do preço da madeira de teca em 6% a.a. para os próximos trinta anos.

Apesar da potencialidade de mercado para a teca, no Brasil ainda são escassos os trabalhos que avaliam o potencial econômico desta espécie considerando as várias formas de manejo. Dessa maneira, estudos desta natureza contribuirão significativamente para o planejamento e administração dos atuais e futuros plantios de teca.

Os objetivos deste trabalho foram: determinar a rotação econômica ótima (REO) por meio da maximização do VPL e do B(C)PE para os povoamentos de teca; avaliar a viabilidade econômica dos povoamentos de teca na idade da REO; avaliar a taxa de crescimento do investimento; mensurar o custo de oportunidade do patrimônio terra; e, analisar a sensibilidade dos indicadores econômicos quanto a oscilação na taxa mínima de atratividade (TMA) e nos preços da madeira.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Base de dados**

Foram utilizadas informações obtidas em dezembro de 2003 das seguintes fontes: três empresas florestais envolvidas com os plantios de teca instalados no estado do Acre; três prestadores de serviços de máquinas agrícolas; nove estabelecimentos comerciais envolvidos com as atividades agropecuárias da região; e, do Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre (Embrapa Acre).

As informações sobre colheita florestal foram estimadas e obtidas de bibliografia, considerando valores médios calculados para plantios de eucalipto, respeitadas as diferenças entre esta espécie e a teca quanto às práticas silviculturais e ao manejo.

### **4.2 Denominação, localização e características dos povoamentos avaliados**

Os estudos foram realizados em dois povoamentos de teca plantados em duas propriedades rurais denominadas Sempre Verde e São Francisco I, ambas no município de Rio Branco, microrregião do Baixo Rio Acre, no estado do Acre.

O imóvel Sempre Verde é de propriedade da Madeireira Floresta Ltda., e está localizado à margem esquerda da rodovia federal BR-364, km 8, sentido Rio Branco–Sena Madureira. Nesta propriedade encontra-se a área de estudo (Área 1), a qual constitui-se num povoamento de teca instalado em janeiro de 1995, com densidade inicial de 2.083 árvores.ha<sup>-1</sup> (espaçamento de 2 x 2,4 metros).

A colônia São Francisco I pertence à empresa Madeireira Chalana Ltda., localizada à margem direita da rodovia estadual AC-40 (também conhecida por

Transaccreana), km 18, sentido Rio Branco – rio Iaco. Neste imóvel encontra-se a segunda área de estudo (Área 3), com densidade inicial de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup> da espécie teca, plantadas em filas duplas de 3 x 2 metros e com 4 metros entre fileiras duplas.

O material genético dos dois povoamentos é da variedade *Tennasserim* procedente da Birmânia (Myanmar) para Trinidad, e foi adquirido da Serraria Cáceres S.A., no estado de Mato Grosso.

### **4.3 Estrutura de custos**

Os custos de mudas, preparo do solo, plantio, controle de plantas invasoras e demais despesas até a colheita foram calculados em valores para 1 hectare, considerando os dois povoamentos de teca, conforme Tabela 6.1.

Com a finalidade de simplificar a composição dos custos de mão-de-obra, foi considerada, em cada operação florestal, a demanda de trabalhadores necessária para sua realização, incluídos todos os direitos e encargos trabalhistas, tais como: décimo terceiro salário, abono de férias, horas extras, auxílio-doença, fundo de garantia por tempo de serviço (FGTS), previdência social, salário-educação e mais oito tributos (Tabela 1.A).

O valor médio da terra para a região, sem a cobertura florestal nativa, num raio de 80 km da capital Rio Branco, com bom acesso rodoviário, foi estimado pelas imobiliárias de Rio Branco em R\$ 1.000,00/hectare. Portanto, o cálculo do custo anual da terra considerou os juros sobre o valor da terra estimado pelas imobiliárias, com as seguintes taxas mínimas de atratividade 6%, 8%, 10%, 12% e 14%.

O custo das mudas de teca considerou a aquisição das mesmas em empresas especializadas na produção de mudas para reflorestamento existentes na região. O valor cotado das mudas foi baseado no sistema denominado de

“toco de raiz nua”. A experiência local tem demonstrado que os plantios realizados entre os meses de dezembro a fevereiro, obtêm taxas de mortalidade inferior a 2% das mudas, portanto, a prática do replantio somente é realizada em situações excepcionais.

**TABELA 6.1** Custos, em reais por hectare, de todas operações florestais nos dois povoamentos de teca estudados na microrregião do Baixo Rio Acre

Especificação	Ano de ocorrência	Custo (R\$/hectare)	
		Área 1 (2083 árv.ha <sup>-1</sup> )	Área 3 (1111 árv.ha <sup>-1</sup> )
<b>Implantação</b>			
Alimentação de trabalhadores	0	R\$ 6,00	R\$ 6,00
Aquisição de mudas	0	R\$ 1000,00	R\$ 555,50
Cobertura morta	0	R\$ 60,00	R\$ 33,33
Combustível/lubrificantes	0	R\$ 52,43	R\$ 52,43
Máquinas para o preparo do solo	0	R\$ 120,00	R\$ 120,00
Mão-de-obra e encargos	0	R\$ 516,00	R\$ 279,50
Transporte de mudas	0	R\$ 20,00	R\$ 11,11
<b>Total</b>		<b>R\$ 1774,43</b>	<b>R\$ 1057,87</b>
<b>Manutenção</b>			
Controle de formigas	1 a 3	R\$ 7,19	R\$ 7,19
Coroamento	1 a 2	R\$ 145,21	R\$ 84,50
Administração	Anual	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Fertilização	10	R\$ 841,83	R\$ 460,01
Roçagem entre linhas	1 a 3	R\$ 89,30	R\$ 89,30
Desrama	2 a 9	R\$ 185,36	R\$ 101,45
Colheita (R\$/m <sup>3</sup> )		R\$ 23,00	R\$ 23,00
Transporte (R\$/m <sup>3</sup> )		R\$ 5,71	R\$ 5,71
Aceiros/proteção florestal	Anual	R\$ 47,15	R\$ 37,15
<b>Depreciação</b>			
Depreciação patrimonial	Anual	R\$ 17,63	R\$ 17,63
<b>Custo da terra</b>			
Valor médio da terra		R\$ 1.000,00	R\$ 1.000,00
Custo da terra (6% a.a.)	Anual	R\$ 60,00	R\$ 60,00
Custo da terra (8% a.a.)	Anual	R\$ 80,00	R\$ 80,00
Custo da terra (10% a.a.)	Anual	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Custo da terra (12% a.a.)	Anual	R\$ 120,00	R\$ 120,00
Custo da terra (14% a.a.)	Anual	R\$ 140,00	R\$ 140,00

A operação de preparo do solo considerou a locação de máquinas agrícolas para a implantação do povoamento de teca numa área de pastagens com idade mínima de 10 anos. Os custos considerados foram a realização da gradagem, em duas operações com intervalo de 30 dias. Para o plantio, foram considerados os custos com marcação das linhas nos referidos espaçamentos, transporte das mudas, distribuição da cobertura morta, além dos custos com o próprio plantio das mudas. A fertilização na cova de plantio apesar de necessária, não foi uma prática adotada para os povoamentos avaliados. O detalhamento dos custos de implantação dos povoamentos de teca encontram-se na Tabela 2.A.

Com relação à manutenção do plantio, do primeiro ao terceiro ano, foram considerados: o combate à formiga, o que até o momento não tem se mostrado preocupante; o controle de plantas invasoras, com a realização de capinas mecanizadas entre linhas e o coroamento das mudas. Apesar das mudas do tipo “toco de raiz nua” emitirem normalmente intensa brotação inicial, a experiência local tem demonstrado não haver necessidade de realizar a operação da desbrota.

Apesar de serem extremamente necessárias, as operações de fertilização não foram realizadas até a data de realização destes estudos. Portanto, a composição de custos considerou pelo menos uma operação de fertilização realizada no décimo ano. O valor médio estimado com a futura aplicação de fertilizante foi baseada nas descrições de demanda nutricional da teca descritas por Weaver (1993).

A operação de desrama foi considerada a partir do segundo ano, até as árvores atingirem altura comercial de oito metros. Esta operação pode se estender até o nono ano após a instalação do povoamento. A operação de desrama é feita até a proporção de  $2/3$  da copa (sem prejuízos para o

desempenho da árvore) e realizadas em anos intercalados. Posteriormente, desramas extras poderão ser necessárias, visto que a abertura do dossel pela mortalidade e as condições climáticas podem favorecer o aparecimento de novas brotações. A necessidade de desramas extras é justificada pela persistência da brotação em regiões com intensa precipitação.

Nos custos de manutenção também foram consideradas as despesas de conservação de estradas internas, abertura anual de aceiros, conservação de cercas e atividades administrativas (acompanhamento, imposto territorial rural – ITR e imposto sindical).

Os custos de desbaste não foram considerados, pois até a data de realização dos estudos, esta prática não havia ocorrido, além de não ser objetivo deste trabalho.

Para a colheita, foram considerados custos de acordo com a estimativa de rendimento de cada povoamento, considerando as operações com marcação, abate, desgalhamento, traçamento, extração e carregamento. Os índices técnicos e valores das operações realizadas com a colheita consideraram outros sistemas florestais, respeitando as características da espécie florestal e as peculiaridades regionais.

No custo de transporte consideraram-se os preços praticados por caminhões toiros da região para uma distância média percorrida de 40 km até a indústria. O descarregamento no pátio de estocagem não foi considerado, uma vez que geralmente, esta atividade é assumida pelo comprador.

Todas as operações que envolvem máquinas agrícolas e veículos consideraram a locação dos equipamentos para realizar determinada atividade. O detalhamento dos custos de manutenção e colheita encontram-se na Tabela 3.A.

Para o custo de reforma foram levantadas informações de empresas locais (Tabela 4.A), apesar deste custo não ter sido considerado na análise econômica.

Como custo de depreciação do patrimônio imobilizado no empreendimento florestal, foi considerado o montante médio para os dois povoamentos de teca, tendo sido incluídos na base de cálculo, benfeitorias, como a casa da administração na propriedade rural, estradas internas, garagem de máquinas agrícolas, cercas e outras benfeitorias de menor valor. Também foram incluídos no cálculo de depreciação itens como ferramentas, equipamentos de segurança, máquinas e implementos e utensílios em geral utilizados no imóvel rural. A taxa de depreciação empregada foi a mesma estabelecida na Instrução Normativa (IN) da Secretaria da Receita Federal (SRF) Nº 162 (de 31 de dezembro de 1998) e na IN SRF Nº 130 (1999) (Tabela 5.A).

#### **4.4 Estrutura de receitas**

##### **4.4.1 Preço da madeira**

Na região norte do Brasil ainda não há comércio de madeira de teca, visto que os plantios com maior idade são de experimentos isolados em alguns estados da Amazônia. No entanto, muito tem se falado sobre o alto valor da madeira, mas poucas informações são esclarecedoras, sobre como alcançar os referidos mercados.

Custode (2003) aponta que a maioria dos negócios com madeira de teca originárias das Américas, geralmente, é praticada com valores 30% menores que aqueles negociados com madeira asiática e cerca de 10% menores que aqueles praticados com a teca da África. Praticamente não existe comércio internacional para madeira de teca com menos de 12 anos.

Considerando os aspectos anteriormente mencionados, a análise econômica deste estudo considerou que as futuras comercializações de teca para os dois povoamentos serão realizadas em toras, cujos valores alcançarão apenas

¼ dos preços praticados em 2002 com madeiras serradas de teca de origem americana (Tabela 6.2), conforme dados de Custode (2003).

**TABELA 6.2** Preços estimados para a madeira da teca em tora originária dos dois povoamentos na microrregião do Baixo Rio Acre

Diâmetro ponta fina (cm)	Idade (anos)	Comp. (m)	Mercado	Preço considerado para madeira em toras (m <sup>3</sup> )	Preço estimado madeira serrada (m <sup>3</sup> ) *
> 3	-	1,0	Aproveitamento (energia/artesanato)	R\$ 20,00	-
10  —14	-	3,0	Construção civil (escoras)	R\$ 30,00	-
14  —18	-	2,2	Agropecuária (estacas)	R\$ 54,00	-
18  —35	12  —16	3,0	Serrarias	R\$ 411,75	R\$ 1.647,00
	16  —20			R\$ 470,25	R\$ 1.881,00
	> 20			R\$ 656,50	R\$ 2.626,00
35  —45	16  —20	2,7	Laminadoras	R\$ 470,25	R\$ 1.881,00
	> 20			R\$ 656,50	R\$ 2.626,00
> 45	> 20	2,7	Faqueadoras	R\$ 656,50	R\$ 2.626,00

Obs.: \* Preço estimado da madeira serrada para a espécie teca originária das Américas, segundo Custode (2003).

Os valores estimados por Custode (2003) são compatíveis com os registrados por Maldonado & Louppe (2000), os quais giram em torno de 250 dólares por metro cúbico de tora de teca originária da América Latina. Para madeira de pequena dimensão diamétrica, foi considerado o mercado local para estacas utilizadas na agropecuária, peças de madeira utilizadas como andaimes e escoras na construção civil e aproveitamento para artesanato e energia.

#### 4.4.2 Previsão de rendimento volumétrico

O rendimento volumétrico foi baseado em estimativas realizadas para os dois povoamentos de *Tectona grandis* L.f. com densidades distintas, por meio de projeções do crescimento e produção por classe diamétrica e o rendimento de múltiplos produtos da madeira nas idades entre 5 a 30 anos.



Para isto, foi selecionada a função densidade probabilidade que melhor representa as distribuições diamétricas dos povoamentos e ajustaram-se modelos que representam os atributos dos povoamentos. Os critérios de seleção das equações mais precisas foram estabelecidos por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão residual ( $S_{yx}$ ) e distribuição gráfica dos resíduos.

Em seguida, foram ajustados modelos hipsométricos genéricos e o modelo de função de afilamento Goulding & Murray (1976) para os dois povoamentos, visando a estimativa da altura e volume, respectivamente. Por último, foi estimado o rendimento de múltiplos produtos da madeira nas idades de interesse.

#### **4.5 Critérios utilizados na análise econômica**

Para a análise econômica dos povoamentos de teca, foram usados os seguintes critérios: valor presente líquido (VPL), benefício (custo) periódico equivalente (B(C)PE), taxa interna de retorno (TIR) e valor esperado da terra (VET).

A taxa interna de retorno (TIR) foi considerada para avaliar a taxa média de crescimento do empreendimento florestal considerando-se os dois povoamentos, e o VET para avaliar o custo de oportunidade presente no patrimônio terra.

##### **4.5.1 Valor presente líquido (VPL)**

Para Souza (1999), o critério do valor presente líquido (VPL) é o mais adotado na avaliação de projetos florestais. Segundo Contador (1996), este critério é rigoroso e isento de falhas, o que lhe confere credibilidade.

O VPL consiste em trazer para o ano zero do projeto todos os valores constantes no seu fluxo de caixa e subtrair as receitas dos custos. A equação é expressa por:

$$VPL = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j}$$

em que:

i = taxa de juros;  
 $C_j$  = custo no final do ano j;  
 $R_j$  = receita no final do ano j; e,  
n = duração do projeto em anos.

#### 4.5.2 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno (TIR) de um projeto é a taxa anual de retorno do capital investido, tendo como propriedade ser a taxa de desconto que iguala o valor atual das receitas futuras ao valor atual dos custos do projeto (Rezende & Oliveira, 2001).

Este critério também é empregado para avaliar a robustez do investimento quanto à sua taxa média de crescimento. A expressão pode ser definida por:

$$TIR = \sum_{j=0}^n R_j (1+i)^{-j} - \sum_{j=0}^n C_j (1+i)^{-j} = 0$$

em que: i,  $C_j$ ,  $R_j$  e n definidos anteriormente.

#### 4.5.3 Benefício (custo) periódico equivalente (B(C)PE)

Rezende & Oliveira (2001) definiram o benefício periódico equivalente com sendo a parcela periódica e constante necessária ao pagamento de uma quantia igual ao valor presente líquido da opção de investimento em análise, ao longo de sua vida útil.

A maior importância da aplicação do B(C)PE está na seleção de projetos que apresentam horizontes de planejamento distintos, pois os valores equivalentes obtidos por período corrigem, implicitamente, as diferenças de horizonte. O B(C)PE pode ser obtido por meio da seguinte expressão:

$$B(C)PE = \frac{VPL \left[ (1+i)^t - 1 \right] \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Em que: VPL = valor presente líquido; t = número de períodos de capitalização; i e n definidos anteriormente.

#### 4.5.4 Valor esperado da terra (VET)

O VET indica quanto se pode gastar em um item de custo qualquer deixado fora dos cálculos, normalmente a terra, para dada taxa de juros. Assim, pode-se dizer que a técnica do VET não se presta apenas para determinar quanto se pode pagar pela terra, mas também qualquer outro item de custo (Leuschner, 1984). O VET pode ser calculado por meio da seguinte expressão:

$$VET = \frac{VPL (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

em que: i, VPL e n já foram definidos anteriormente.

#### 4.6 Determinação da rotação econômica

Para determinar a rotação econômica ótima (REO), utilizou-se os critérios de maximização do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico equivalente. Considerou-se como base a prognose entre as idades de 5 a 30 anos.

O rendimento volumétrico de cada povoamento foi estimado por classe diamétrica e os múltiplos produtos da madeira, foram obtidos segundo critério definido no capítulo 5.

#### **4.7 Análise de sensibilidade**

Após determinar a REO para cada povoamento avaliou-se a sensibilidade do VPL e B(C)PE em relação a oscilações na taxa de juros e no preço da madeira. No primeiro caso, simularam-se taxas de juros variando de 6% a 14% a.a.. No segundo caso, pressupôs-se quedas de até 40% no preço da madeira.

## **5 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Rendimento volumétrico para múltiplos produtos da madeira**

A produção volumétrica dos diversos tipos de madeira nos povoamentos das áreas 1 e 3 é mostrada nas Tabelas 6.3 e 6.4, respectivamente. A idade de máximo incremento médio anual (idade de rotação técnica ou silvicultural) é de 19 anos na área 1 e de 24 anos na área 3.

Na idade de rotação técnica o povoamento da área 1 apresenta pequeno volume de madeira comercial para serraria (16,63% do volume total). Nesta idade a madeira ainda não tem a maturidade demandada pelo mercado. No caso do povoamento da área 3 na idade de 24 anos a madeira já está mais madura e o volume para serraria atinge 30,25% do volume total produzido.

**TABELA 6.3** Rendimento volumétrico total e por múltiplos produtos da madeira para o povoamento de *Tectona grandis* L.f. da área de estudo 1, considerando as idades de 5 a 30 anos, município de Rio Branco, estado do Acre

Ano	Volume total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Laminados (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Serraria (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Estacas (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Construção (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Aproveitamento (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Resíduos (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )
5	38,808	0,000	0,000	0,000	0,000	36,106	2,701
6	53,364	0,000	0,000	0,000	0,017	50,316	3,031
7	68,932	0,000	0,000	0,000	1,565	64,111	3,257
8	85,180	0,000	0,000	0,037	17,019	65,904	2,220
9	101,846	0,000	0,000	0,924	31,178	67,113	2,630
10	118,719	0,000	0,000	4,794	43,569	67,587	2,768
11	135,633	0,000	0,005	12,479	52,540	67,856	2,753
12	152,455	0,000	0,112	23,156	60,350	66,262	2,574
13	169,080	0,000	0,801	35,702	64,699	65,016	2,863
14	185,424	0,000	2,899	51,472	67,154	61,482	2,417
15	201,423	0,000	7,028	63,440	68,616	60,199	2,140
16	217,025	0,000	13,484	78,779	63,276	59,244	2,242
17	232,192	0,000	21,931	87,706	64,755	55,847	1,952
18	246,895	0,000	32,048	93,545	64,193	55,182	1,926
19	261,114	0,000	43,420	98,496	65,585	51,835	1,778
20	274,834	0,000	55,749	104,370	61,282	51,370	2,063
21	288,051	0,000	68,634	107,197	59,941	50,174	2,105
22	300,760	0,000	89,601	99,167	61,512	48,520	1,961
23	312,961	0,000	102,769	100,129	60,328	47,543	2,193
24	324,658	0,000	116,755	101,683	60,259	43,680	2,281
25	335,858	0,001	133,804	100,630	55,965	43,142	2,316
26	346,568	0,008	146,965	100,093	55,836	41,129	2,537
27	356,802	0,020	159,797	99,656	54,301	40,450	2,578
28	366,569	0,046	172,282	98,810	53,275	39,802	2,353
29	375,881	0,094	184,590	97,661	53,524	37,802	2,211
30	384,752	0,171	198,717	95,196	51,799	36,571	2,297

Em que: laminados = toras para indústria de laminados com comprimento de 2,7 metros e diâmetro da ponta fina de 35 a 45 cm; serraria = toras para indústria de serrados com comprimento de 3 metros e diâmetro da ponta fina de 18 a 35 cm; estacas = peças de madeira para atividades agropecuárias regionais com comprimento de 2,2 metros e diâmetro da ponta fina de 14 a 18 cm; construção = peças de madeira empregadas durante as obras para escoras e andaimes com comprimento de 3 metros e diâmetro da ponta fina de 10 a 14 cm; aproveitamento = peças de madeira com possibilidade de emprego em artesanato e energia para fornos com comprimento de 1 metro e diâmetro da ponta fina maior ou igual a 3 cm e resíduos = sobras de madeira de todos os comprimentos, com diâmetro inferior a 3 cm.

**TABELA 6.4** Rendimento volumétrico total e por múltiplos produtos da madeira para o povoamento de *Tectona grandis* L.f. da área de estudo 3, considerando as idades de 5 a 30 anos, município de Rio Branco, estado do Acre

Ano	Volume total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Laminados (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Serraria (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Estacas (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Construção (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Aproveitamento (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Resíduos (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )
5	27,956	0,000	0,000	0,000	0,000	26,034	1,922
6	38,205	0,000	0,000	0,000	0,000	36,539	1,666
7	49,252	0,000	0,000	0,000	1,619	46,517	1,116
8	60,818	0,000	0,000	0,000	11,633	47,946	1,239
9	72,739	0,000	0,000	0,039	23,495	47,455	1,751
10	84,888	0,000	0,000	1,281	37,366	44,137	2,105
11	97,164	0,000	0,000	6,127	45,777	43,333	1,928
12	109,488	0,000	0,000	14,462	49,984	43,657	1,385
13	121,797	0,000	0,003	25,026	54,627	40,638	1,503
14	134,040	0,000	0,086	36,648	55,534	40,547	1,225
15	146,179	0,000	1,598	47,513	55,366	40,416	1,286
16	158,181	0,000	4,611	59,052	54,479	38,516	1,524
17	170,023	0,000	9,578	67,393	53,780	37,998	1,274
18	181,685	0,000	16,248	73,874	53,376	36,805	1,382
19	193,153	0,000	24,276	80,855	50,869	35,551	1,602
20	204,415	0,000	33,330	84,085	49,581	35,807	1,612
21	215,465	0,000	43,130	86,215	50,460	33,914	1,746
22	226,296	0,000	53,424	87,616	49,273	34,130	1,853
23	236,905	0,000	64,026	90,105	47,600	33,306	1,868
24	247,290	0,000	74,801	93,478	44,257	32,613	2,141
25	257,450	0,000	85,654	93,656	43,473	32,899	1,767
26	267,387	0,000	97,356	92,807	42,749	32,754	1,721
27	277,101	0,000	112,356	87,117	44,163	31,640	1,825
28	286,595	0,000	123,405	87,846	42,533	31,242	1,569
29	295,872	0,000	134,284	86,859	42,210	30,910	1,609
30	304,934	0,000	145,020	87,516	39,722	31,332	1,346

Em que: laminados = toras para indústria de laminados com comprimento de 2,7 metros e diâmetro da ponta fina de 35 a 45 cm; serraria = toras para indústria de serrados com comprimento de 3 metros e diâmetro da ponta fina de 18 a 35 cm; estacas = peças de madeira para atividades agropecuárias regionais com comprimento de 2,2 metros e diâmetro da ponta fina de 14 a 18 cm; construção = peças de madeira empregadas durante as obras para escoras e andaimes com comprimento de 3 metros e diâmetro da ponta fina de 10 a 14 cm; aproveitamento = peças de madeira com possibilidade de emprego em artesanato e energia para fornos com comprimento de 1 metro e diâmetro da ponta fina maior ou igual a 3 cm e resíduos = sobras de madeira de todos os comprimentos, com diâmetro inferior a 3 cm.

## 5.2 Rotação econômica ótima dos povoamentos de teca

As análises foram realizadas considerando-se a possibilidade de a rotação econômica ocorrer entre o quinto e o trigésimo ano após a implantação. A Tabela 6.5 mostra os critérios de avaliação econômica para os povoamentos estudados considerando uma taxa de juros de 10%.

**TABELA 6.5** Critérios de avaliação econômica para determinação da REO para os povoamentos estudados

Idade (anos)	VPL (R\$/ha)		B(C)PE (R\$/ha/ano)	
	Área 1	Área 3	Área 1	Área 3
5	-R\$ 3.735,78	-R\$ 2.384,50	-R\$ 985,49	-R\$ 629,02
6	-R\$ 3.772,40	-R\$ 2.434,82	-R\$ 866,17	-R\$ 559,05
7	-R\$ 3.899,10	-R\$ 2.583,02	-R\$ 800,90	-R\$ 530,57
8	-R\$ 3.933,98	-R\$ 2.631,69	-R\$ 737,40	-R\$ 493,29
9	-R\$ 4.060,70	-R\$ 2.719,34	-R\$ 705,10	-R\$ 472,19
10	-R\$ 4.388,87	-R\$ 2.909,61	-R\$ 714,27	-R\$ 473,53
11	-R\$ 4.361,38	-R\$ 2.896,60	-R\$ 671,49	-R\$ 445,97
12	-R\$ 4.298,95	-R\$ 2.862,79	-R\$ 630,93	-R\$ 420,15
13	-R\$ 4.180,51	-R\$ 2.818,93	-R\$ 588,53	-R\$ 396,84
14	-R\$ 3.914,55	-R\$ 2.776,77	-R\$ 531,38	-R\$ 376,94
15	-R\$ 3.545,64	-R\$ 2.622,64	-R\$ 466,16	-R\$ 344,81
16	-R\$ 2.872,43	-R\$ 2.311,44	-R\$ 367,14	-R\$ 295,44
17	-R\$ 2.263,91	-R\$ 1.926,02	-R\$ 282,23	-R\$ 240,11
18	-R\$ 1.670,11	-R\$ 1.493,00	-R\$ 203,64	-R\$ 182,04
19	-R\$ 1.114,08	-R\$ 1.051,10	-R\$ 133,18	-R\$ 125,66
20	R\$ 917,34	R\$ 270,49	R\$ 107,75	R\$ 31,77
21	R\$ 1.494,66	R\$ 783,89	R\$ 172,82	R\$ 90,64
22	R\$ 2.510,31	R\$ 1.207,60	R\$ 286,19	R\$ 137,67
23	R\$ 2.765,08	R\$ 1.546,19	R\$ 311,27	R\$ 174,06
24	R\$ 2.969,19	R\$ 1.797,91	R\$ 330,47	R\$ 200,11
<b>25</b>	<b>R\$ 3.241,50</b>	R\$ 1.961,95	<b>R\$ 357,11</b>	R\$ 216,14
26	R\$ 3.197,16	R\$ 2.095,80	R\$ 349,00	R\$ 228,78
<b>27</b>	R\$ 3.077,92	<b>R\$ 2.310,79</b>	R\$ 333,21	<b>R\$ 250,16</b>
28	R\$ 2.898,97	R\$ 2.281,10	R\$ 311,50	R\$ 245,11
29	R\$ 2.680,88	R\$ 2.200,28	R\$ 286,12	R\$ 234,83
30	R\$ 2.501,94	R\$ 2.085,01	R\$ 265,40	R\$ 221,18

A rotação econômica ótima definida pela maximização do VPL e B(C)PE se deu aos 25 anos para a área 1, com valores de R\$ 3.241,50 .ha<sup>-1</sup> e R\$ R\$ 357,11.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Para a área 3 a rotação econômica foi dois anos mais longa, ou seja, a maximização do VPL e B(C)PE ocorrem aos 27 anos, quando os valores dos critérios econômicos foram de R\$ 2.310,79.ha<sup>-1</sup> e R\$ 250,16.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup>, respectivamente.

Observa-se que, para ambos os povoamentos de teca, os indicadores econômicos VPL e B(C)PE somente foram positivos a partir do vigésimo ano, idade em que se obtêm os melhores preços da madeira com destino para serraria. Isso demonstra que, para uma taxa de juros de 10%, a condução dos povoamentos de teca sem desbaste, somente é economicamente viável, quando for alcançada uma combinação de rendimento volumétrico para serraria com maximização dos preços para madeiras maduras (com idade  $\geq$  20 anos), de maneira a superar os investimentos ocorridos.

Galdino (2001) esclarece que a demanda mundial pela madeira da teca gira em torno do comércio de madeiras ou toras de excepcional qualidade e as madeiras de qualidade inferior apresentam nítidas dificuldades de comercialização, pois, a maioria absoluta dos importadores exige madeira sem nenhum alburno. Isso somente é possível em povoamentos mais maduros, portanto, os preços mais altos praticados a partir dos 20 anos de idade, não estão somente vinculados ao diâmetro das toras comercializadas, mas também ao menor percentual de madeira juvenil e peças livre de nós.

Este fato deixa esclarecida a dificuldade de colocação no mercado para a madeira com idade inferior a 12 anos. Dessa forma, a comercialização do volume madeireiro produzido há menos de 12 anos terá comércio restrito e uma rotação econômica inferior há 20 anos para os dois povoamentos avaliados significa prejuízos econômicos. Nair & Souvannavong (2000) já apontavam a



necessidade de realização de estudos para o emprego mais nobre da madeira de teca de pequena dimensão, originária de novos plantios.

Considerando estes aspectos de mercado, pode-se dizer que os preços da madeira da teca são altos para material de excelente qualidade e muito menor para madeiras de baixa qualidade. Galdino (2001) cita o exemplo da experiência de Côte d'Ivoire. Neste país a exploração de teca foi estimulada para rotações extremamente curtas (10 – 15 anos) e, atualmente, o material explorado somente encontra mercado entre os compradores asiáticos que ofertam preços irrisórios para a madeira.

Galdino (2001) sugere que para alcançar os melhores preços, os plantios devem ser planejados para rotações mais longas, conforme indicam os resultados deste estudo para ambos os povoamentos analisados.

Portanto, a retirada de parte do estoque madeireiro do povoamento antecipadamente deve ser considerada como um benefício ao estoque remanescente, no intuito de colher melhores resultados no futuro.

Outro aspecto que interfere no desempenho econômico dos plantios é a ausência de desbastes. Tsukamoto Filho et al. (2003), avaliando povoamentos de teca desbastados com uma rotação econômica de 25 anos, obtiveram benefício periódico equivalente de R\$ 690,79/ha/ano. Comparando com os resultados deste estudo este valor é 93,44% superior ao obtido com o povoamento da área 1 e 176,14% superior ao obtido na área 3. Isso indica que a estratégia de condução do povoamento sem desbaste não possibilita a maximização do aproveitamento da madeira e, conseqüentemente, dos lucros advindos dos investimentos.

### **5.3 Taxa interna de retorno (TIR) e valor esperado da terra (VET)**

A taxa interna de retorno (TIR) foi utilizada para verificar a taxa média de crescimento do investimento de cada povoamento, visto que este indicador econômico não considera o volume de investimentos realizados em cada projeto.

O valor esperado da terra (VET) foi empregado para avaliar o custo de oportunidade do patrimônio terra. Segundo Rezende & Oliveira (2001), o VET nada informa, por exemplo, sobre a viabilidade do empreendimento ou dos retornos econômicos do capital investido na atividade e, sim, o quanto de recursos se pode empregar em determinado custo, no caso a terra.

Os valores para a TIR e o VET dos investimentos dos povoamentos das áreas 1 e 3 encontram-se na Tabela 6.6.

Os valores do VET para as áreas 1 e 3, apresentaram as mesmas características dos critérios para a definição da rotação econômica ótima (REO).

O VET demonstrou que na idade de rotação econômica das áreas 1 e 3, os valores estimados foram de R\$ 4.571,09 e R\$ 3.301,61, respectivamente. Estes valores são bem superiores ao preço médio das terras no estado do Acre.

A taxa interna de retorno (TIR) somente foi positiva a partir dos 16 anos para o povoamento da área 1 e a partir dos 17 anos para o povoamento da área 3. Na idade de rotação econômica ótima, a área 1 apresentou TIR de 12,74% e a área 3 de 12,66%. Ambas as TIR foram superiores à TMA de 10% a.a. considerada neste estudo. Nessa forma de análise, a TIR é empregada como medida de risco, ou seja, define um limite para a variação da TMA. Enquanto a taxa média de atratividade for estimada em 10% a.a. e este valor for inferior a TIR, espera-se que haja lucro ao se investir em povoamentos de teca na microrregião do Baixo Rio Acre.

No entanto, a condução dos povoamentos de teca sem desbastes para as duas áreas estudadas apresentou TIR inferiores aos valores obtidos por Tsukamoto Filho et al. (2003) em povoamento de teca desbastado, cujo valor foi de 15,1% (Cáceres/estado do Mato Grosso). Porém, os valores obtidos para TIR de ambas as áreas são compatíveis com a expectativa de retorno dos empreendimentos florestais, conforme resultados obtidos por Silva (1997), Rodigheri (1997) e Kreuz & Baú (2001).

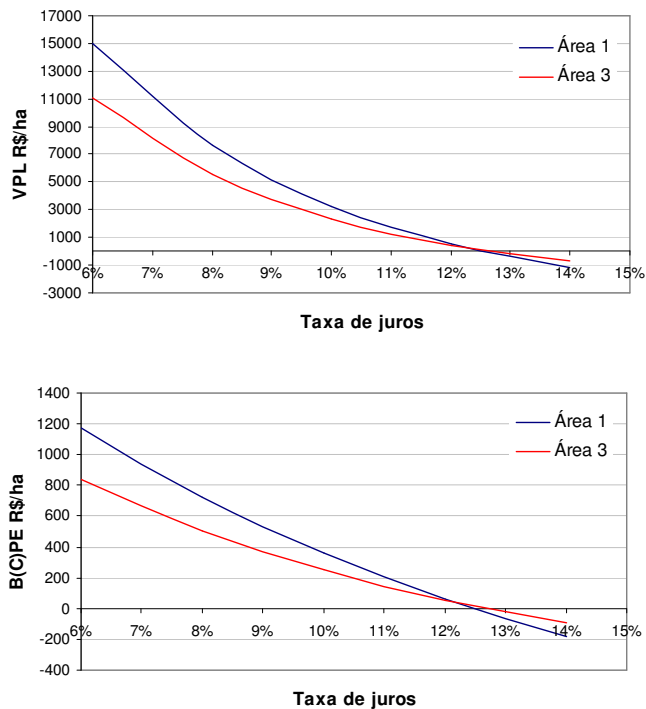
**TABELA 6.6** Estimativas para a TIR e para o VET, considerando-se os investimentos dos povoamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, nas idades entre 5 a 30 anos, Rio Branco, Acre

Idade (anos)	VET (R\$/ha)		TIR (% a.a.)	
	Área 1	Área 3	Área 1	Área 3
5	-R\$ 8.854,90	-R\$ 5.490,24	-	-
6	-R\$ 7.661,71	-R\$ 4.790,52	-	-
7	-R\$ 7.008,97	-R\$ 4.505,66	-	-
8	-R\$ 6.374,01	-R\$ 4.132,94	-	-
9	-R\$ 6.051,01	-R\$ 3.921,87	-	-
10	-R\$ 6.142,69	-R\$ 3.935,25	-	-
11	-R\$ 5.714,92	-R\$ 3.659,70	-	-
12	-R\$ 5.309,29	-R\$ 3.401,53	-	-
13	-R\$ 4.885,26	-R\$ 3.168,44	-	-
14	-R\$ 4.313,85	-R\$ 2.969,36	-	-
15	-R\$ 3.661,59	-R\$ 2.648,08	-	-
16	-R\$ 2.671,45	-R\$ 2.154,40	0,94%	-
17	-R\$ 1.822,29	-R\$ 1.601,05	4,32%	1,38%
18	-R\$ 1.036,37	-R\$ 1.020,42	6,52%	4,70%
19	-R\$ 331,84	-R\$ 456,55	8,01%	6,92%
20	R\$ 2.077,51	R\$ 1.117,72	11,22%	10,58%
21	R\$ 2.728,19	R\$ 1.706,37	11,78%	11,46%
22	R\$ 3.861,88	R\$ 2.176,72	12,60%	12,01%
23	R\$ 4.112,70	R\$ 2.540,57	12,67%	12,34%
24	R\$ 4.304,70	R\$ 2.801,06	12,68%	12,52%
<b>25</b>	<b>R\$ 4.571,09</b>	R\$ 2.961,45	<b>12,74%</b>	12,57%
26	R\$ 4.489,99	R\$ 3.087,76	12,59%	12,58%
27	R\$ 4.332,08	<b>R\$ 3.301,61</b>	12,41%	<b>12,66%</b>
28	R\$ 4.114,97	R\$ 3.251,06	12,20%	12,53%
29	R\$ 3.861,25	R\$ 3.148,32	11,98%	12,36%
30	R\$ 3.654,04	R\$ 3.011,76	11,80%	12,17%

#### 5.4 Análise de sensibilidade quanto aos juros e ao preço da madeira

Ao fixar todas as variáveis que compõem os investimentos dos projetos dos povoamentos de teca das áreas 1 e 3, e variar a taxa mínima de atratividade (TMA) para os valores de 6%, 8%, 10%, 12% e 14%, pode-se observar o comportamento do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico

equivalente (B(C)PE) na idade de rotação econômica ótima, conforme demonstrado na Figura 6.1.



**FIGURA 6.1** Sensibilidade do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico equivalente (B(C)PE) mediante a oscilação da taxa mínima de atratividade (TMA), considerando-se os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, Rio Branco, Acre

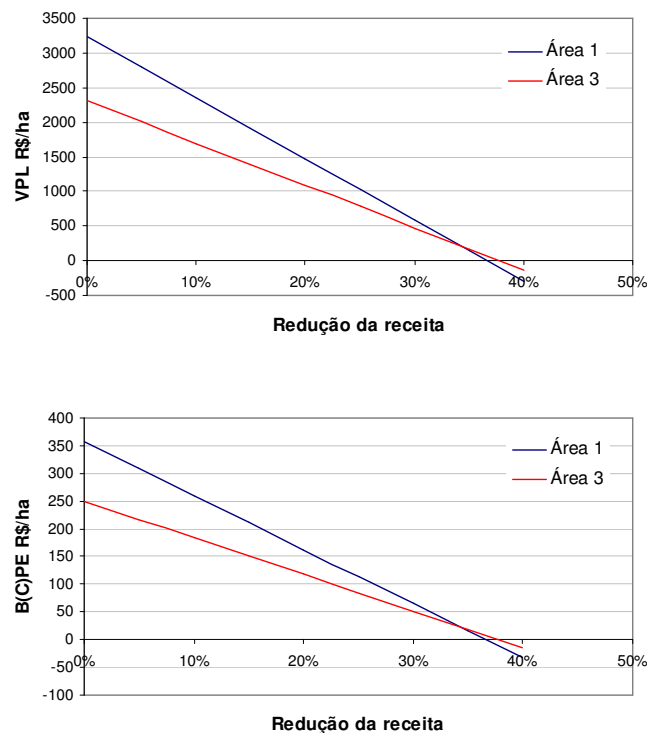
O VPL e o B(C)PE apresentam as mesmas tendências, porém, o VPL demonstra uma redução mais acentuada entre as taxas de 7% a 11%, enquanto o B(C)PE apresenta uma característica mais linear.

Para taxas de juros menores que 12% a.a. o VPL e a B(C)PE da área 1 são maiores que os da área 3. Taxas de juros equivalentes a 12,2442% igualam o VPL e o B(C)PE das duas áreas e taxas de juros superiores a 12,2443% fazem com que os valores destes indicadores econômicos sejam maiores para área 3. Taxas de juros mais altas tendem a prejudicar mais os resultados econômicos da

área 1 que os da área 3 em decorrência do maior montante de recursos empregados no povoamento daquela área.

A partir da taxa de 12,52% para a área 1 e de 12,67% para a área 3, os valores do VPL e do B(C)PE tornam-se negativos, sugerindo que estas opções de investimento não são viáveis economicamente a estes níveis de taxas de juros.

Fixando todos os fatores que compõem os investimentos para uma TMA de 10% e variando o preço da madeira por meio da redução até 40%, pode-se observar a sensibilidade dos projetos quanto a oscilação deste parâmetro no mercado (Figura 6.2).



**FIGURA 6.2** Sensibilidade do valor presente líquido (VPL) e do benefício periódico equivalente (B(C)PE) mediante a oscilação do preço da madeira, considerando-se os povoamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, Rio Branco, Acre

Como esperado, os valores de VPL e B(C)PE para os dois povoamentos decrescem à medida que ocorre a redução do preço da madeira, com resultados positivos para os dois povoamentos até uma queda de 36,6529% na área 1 e de 37,6705% a área 3. A queda no valor dos indicadores econômicos é mais acentuada na área 1 que na área 3, como mostra a inclinação das curvas da Figura 6.2. Quando a redução da receita/preço da madeira foi de 40%, as duas situações avaliadas apresentaram-se inviáveis economicamente.

No entanto, conjunturas de mercado com forte redução dos preços da madeira são pouco prováveis, tendo em vista que estudos realizados por Paim (2003), Leite (2003) e Tuoto (2003) apontam um déficit mundial de madeira. Finger et al. (2001), descreve que a produção mundial de teca atende apenas a uma fração de sua demanda. Entretanto, o desconhecimento sobre o mercado da teca de origem de plantios da América do Sul é comum em praticamente todos os estudos mercadológicos da teca. Este mercado é mais conhecido pelas grandes empresas e pelos negociadores que praticam intermediação entre pequenos e médios produtores da América Central e os importadores norte-americanos.

Uma das prováveis causas desta estrutura de comercialização é que a maioria das cotações de preços é realizada com madeira beneficiada de boa qualidade, em bitolas preestabelecidas e na condição FOB (*Free on Board*). Ou seja, o vendedor encerra suas obrigações quando a mercadoria encontra-se no interior do navio no porto de embarque indicado e, a partir daquele momento, o comprador assume todas as responsabilidades quanto a perdas e danos. Esta condição praticamente inviabiliza o acesso isolado de pequenos e médios produtores florestais aos melhores mercados, visto que todo o desembaraço fiscal e alfandegário é realizado pelo vendedor da madeira. Daí a importância da organização de pequenos produtores madeireiros para alcançar melhores resultados na negociação da produção.

## 6 CONCLUSÕES

- A rotação econômica ótima (REO) foi de 25 anos para a área 1, que tem densidade de 2083 plantas.ha<sup>-1</sup> e de 27 anos para área 3 cuja densidade é de 1.111 árvores.ha<sup>-1</sup>.
- Considerando uma taxa de juros mínima de atratividade de 10% a.a. os povoamentos de teca para as duas áreas estudadas foram considerados viáveis pelos critérios utilizados nesta análise econômica. O povoamento da área 1 apresentou melhores resultados para VPL e B(C)PE que o da área 3.
- O B(C)PE indicou que os povoamentos de teca estudados, conduzidos sem desbaste foram menos rentáveis que os povoamentos desbastados citados em literatura.
- As reduções nas receitas, com queda dos preços da madeira, não podem ser maiores que 36,6529% e 37,6705% nas áreas 1 e 3, respectivamente, se mantidos os mesmos níveis de investimento, sob pena de inviabilizar economicamente os povoamentos.
- O VET na idade da REO para a área 1 foi de R\$ 4.571,09 e para a área 3 de R\$ 3.301,61, respectivamente. Estes valores são bem superiores ao preço médio das terras no estado do Acre.
- Taxas mínimas de atratividade superiores a 12,52% a.a. para a área 1 e 12,67% para a área 3, demonstram ser mais vantajoso investir em outra atividade produtiva potencialmente mais rentável.
- O maior volume de recursos investidos no povoamento da área 1, torna este empreendimento mais sensível às oscilações da taxa de juros e da redução das receitas, quanto comparado com os investimentos da área.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACERBI JÚNIOR, F.W. **Definição de regimes de desbastes e poda economicamente ótimos para *Pinus taeda***. 1998. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- CONTADOR, C.R. **Projetos sociais: avaliação e prática**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1996. 375p.
- CUSTODE, J. **Mercados de madeira**. 2003. 2p. Disponível em: <<http://www.bosquetropicales.com/html/Espanol/mercados.html>>. Acesso em: 10 maio 2004.
- FINGER, Z; FINGER, F. A.; DRESCHER, R. Teca (*Tectona grandis* L.f.): plante esta idéia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2001. CD-ROM.
- GALDINO, P. **Mercado de productos forestales: posibilidades de exportación de melina y teca de Costa Rica**. Genova: FAO, 2001. 50p.
- GOULDING, C.J.; MURRAY, J.C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forest Science**, Rotorua, v.5, n.3, p.313-322, Feb. 1976.
- HISTÓRICO do dólar. **Estadão**, 2003. 1p. Disponível em: <[http://www.estadao.com.br/ext/economia/financas/historico/dolar\\_2003.htm](http://www.estadao.com.br/ext/economia/financas/historico/dolar_2003.htm)>. Acesso em: 30 mar. 2004.
- KREUZ, C.L.; BAÚ, N. Análise da rentabilidade do cultivo de *Pinus taeda* na região de Caçador, SC. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.15, n.2, p.8-10, 2001.
- LEITE, N.B. **A silvicultura brasileira como vetor de desenvolvimento social, ambiental e econômico**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acesso em: 17 maio 2003.
- LEUSCHNER, W.A. **Introduction to forest management**. New York: J. Wiley and Sons, 1984. 298p.
- MALDONADO, G.; LOUPPE D. Desafios para la teca em Cote d'Ivoire. **Unasyuva**, Roma, v.51, n.201, p.36-44, 2000.
- NAIR, C.T.S.; SOUVANNAVONG, O. Nuevos temas de investigación em la ordenación de la teca. **Unasyuva**, Roma, v.51, n.201, p.45-54, 2000.
- PAIM, A. **A potencialidade inexplorada do setor florestal brasileiro**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acesso em: 17 maio 2003.



REZENDE, J.L.P.; OLIVEIRA, A.D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 389p.

RODIGHERI, H.R. **Rentabilidade econômica comparativa entre plantios florestais e sistemas agroflorestais com erva-mate, eucalipto e pinus e as culturas do feijão, milho, soja e trigo**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 36 p. (Circular Técnica, 260).

SILVA, M.L. et al. Viabilidade econômica do reflorestamento do eucalipto consorciado com a cultura do feijão: um estudo de caso. **Revista Árvore**, v.21, n.4, p.527-535, 1997.

SOUZA, A.N. **Estudos econômico da reforma de povoamentos de *Eucalyptus* spp. – O caso do processo tecnológico**. 1999. 140p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TSUKAMOTO FILHO, A.A.; SILVA, M.L.; COUTO, L.; MULLER, M.D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.27, n.4, p.487-494, 2003.

TUOTO, M. **Apagão florestal e suas implicações**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br>>. Acesso em: 05 jul. 2003.

VEIT, L.F. Plante seu fundo de aposentadoria. **Revista Silvicultura**, São Paulo, v.17, n. 68, p. 20-22, 1996.

WEAVER, P. L. ***Tectona grandis* L.f. Teak**. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1993. 18 p.

## ANEXOS

### ANEXO A

	<b>Página</b>
<b>TABELA 1.A</b> Composição dos custos de mão-de-obra para implantação, manutenção e reforma de povoamentos de teca, Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00.....	295
<b>TABELA 2.A</b> Coeficientes técnicos e custos para implantação de 1 hectare de teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00 .....	296
<b>TABELA 3.A</b> Coeficientes técnicos e custos de manutenção de 1 hectare de teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00 .....	297
<b>TABELA 4.A</b> Coeficientes técnicos e custos para reforma do povoamento para 1 hectare de teca ( <i>Tectona grandis</i> L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00.....	299
<b>TABELA 5.A</b> Estimativa de depreciação patrimonial, conforme taxa de depreciação estabelecida na Instrução Normativa (IN) da Secretaria da Receita Federal (SRF) N° 162 (de 31 de dezembro de 1998) e na IN SRF N° 130 (1999). Valores em R\$1,00 .....	300
<b>TABELA 6.A</b> Fluxo de caixa considerando a rotação econômica ótima para os povoamentos de <i>Tectona grandis</i> L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, estado do Acre .....	301

**TABELA 1.A** Composição dos custos de mão-de-obra para implantação, manutenção e reforma de povoamentos de teca, Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00

Especificação	Legislação	%	Operário rural I	Operário rural II
Salário mensal			R\$ 240,00	R\$ 360,00
13º Salário	Lei 4090/62; e, lei 4749/65	12,00	R\$ 28,80	R\$ 43,20
Férias e abono constitucional	Art. 129 da Consolidação das leis do trabalho; Lei 9.525 de 03-12-97; art. 7º da constituição federal de 1988; e, arts. 130, 146 e 147 da consolidação das leis do trabalho.	13,30	R\$ 31,92	R\$ 47,88
PIS	Art. 239 da constituição federal de 1988; lei complementar No. 7, de 07-07-70; lei complementar Nº 8, de 03-12-70; lei complementar 26/75; lei 7859/89; lei complementar n.º 26/75; e, orientação normativa n.º 103 – D.O.U. de 06/05/91.	1,00	R\$ 2,40	R\$ 3,60
Hora extra (valor médio)		2,00	R\$ 4,80	R\$ 7,20
Adicional de remuneração (valor médio)	Art. 7º da constituição federal de 1988; arts. 192 e 193 da consolidação das leis do trabalho; lei 7.843/89; e, lei 8.177/91.	5,00	R\$ 12,00	R\$ 18,00
Licenças (valor médio)		2,00	R\$ 4,80	R\$ 7,20
Ausência remunerada (valor médio)	Art. 473 da consolidação das leis do trabalho	2,00	R\$ 4,80	R\$ 7,20
Salário-família (valor médio)	Lei 8213/91; decreto 3.048/99; e, instrução normativa INSS 57/01		R\$ 11,26	R\$ 11,26
Vale-transporte custo da empresa	Lei 7418/85; lei 7619/87; decreto no. 95.247; decreto nº 2.880; e, medida provisória nº 2.077-30, de 22/03/2001.	1,50	R\$ 3,60	R\$ 5,40
FGTS	Lei 5170/66; lei 7839/89; lei 8.036/90; lei 8678/93; lei 8922/94; lei 9491/97; lei complementar 110/2001; e, decreto 99684/90	8,50	R\$ 20,40	R\$ 30,60
FGTS sobre 13º salário		0,96	R\$ 2,30	R\$ 3,46
INSS	Artigos 194 a 202 da constituição federal de 1988	11,00	R\$ 26,40	R\$ 39,60
Aviso prévio		2,50	R\$ 6,00	R\$ 9,00
Indenização 50% FGTS (rescisão)	Art. 7º da constituição federal de 1988; e, arts. 487 a 491 da consolidação das leis do trabalho	6,14	R\$ 14,74	R\$ 22,10
INCRA		0,20	R\$ 0,48	R\$ 0,72
Salário educação	Lei 4404/64; lei 9424/96; e, lei 9766/98	2,50	R\$ 6,00	R\$ 9,00
SEBRAE		0,60	R\$ 1,44	R\$ 2,16
SENAI/SENAC		1,00	R\$ 2,40	R\$ 3,60
SESI/SESC		1,50	R\$ 3,60	R\$ 5,40
Seguro de vida em grupo		0,74	R\$ 1,78	R\$ 2,66
Custo da mão-de-obra/mês		74,44	R\$ 429,92	R\$ 639,24
Custo da mão-de-obra/dia			R\$ 21,50	R\$ 31,96
Custo da mão-de-obra/hora			R\$ 2,69	R\$ 4,00

Obs.: Cotação média do dólar comercial oficial para o mês de dezembro de 2003: R\$ 2,924 Fonte: Histórico do dólar (2004)

Em que: Operário rural I = trabalhador braçal com menor nível de instrução e operário rural II = trabalho braçal qualificado para a atividade florestal.

**TABELA 2.A** Coeficientes técnicos e custos para implantação de 1 hectare de teca (*Tectona grandis* L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00

Especificação	Detalhamento	Ano de ocorrência	Unid.	Quant.	Valor unitário	Densidade 1.111 árv/ha	Densidade 2.083 árv/ha
Alimentação	No aluguel de máquinas na região, usualmente, a alimentação do tratorista e ajudante é custeadas, pelo locatário.	0	Und.	2	3,00	6,00	6,00
Aquisição de mudas	As mudas são adquiridas por empresas especializadas na produção de mudas. O quilo de sementes de teca custa R\$ 40,00 (fornecidas sacas de 25 kg). Em média, 1 kg de sementes produz 400 mudas viáveis.	0	Und.	A - 1111 B - 2083	0,50	555,50	1000,00
Transporte da cobertura morta Gradagem/ combustível / lubrificantes / acessórios	A cobertura morta é disponibilizada nas indústrias de laminação de madeira existentes na região.	0	Und.	A-3333 B- 6000	0,01	33,33	60,00
Óleo diesel para trator de pneus	O trator de pneus chega a consumir 60 litros/dia no serviço de gradagem (com oito horas de trabalho). Para preparar cada hectare são empregadas, em média, quatro horas de trator.	0	litro	30	1,62	48,60	48,60
Óleo desingripante	Óleo desingripante é empregado para a manutenção diária das máquinas (trator, grade, carreta, etc.)	0	Frasco	0,2	4,67	0,93	0,93
Bico graxeiro	Eventualmente, ocorre a substituição dos bicos graxeiros durante a manutenção diária, no final do dia de trabalho.	0	Und.	0,2	2,50	0,50	0,50
Graxa	<b>Manutenção A</b> – 20 litros de graxa possibilitam a manutenção de 01 trator e seus implementos durante 01 mês ou 24 dias de operação.	0	Galão	0,02	120,00	2,40	2,40
Locação de trator e implementos	O locador é responsável pela manutenção do trator como: troca de pneus, mecânicos, filtros, etc., exceto óleo diesel e lubrificantes que ficam sob a responsabilidade do proprietário do empreendimento.	0	h/trator	4	30,00	120,00	120,00
Mão-de-obra e encargos	O rendimento médio para plantio, considerando transporte interno das mudas, alinhamento, coveamento e plantio, é de 83 mudas/dia/homem (operário rural I).	0	homem/dia	A-13 B-24	21,50	279,50	516,00
Transporte de mudas	Adotou-se uma distância média percorrida de 40 km, com caminhão de carroceria de 2,2 x 7 metros, sendo que o mesmo transporta cerca 8000 mudas/toco de maneira segura (no valor de R\$2,00/km).	0	Muda transp.	A-1111 B-2000	0,01	11,11	20,00
<b>Total</b>						<b>1057,87</b>	<b>1774,43</b>

Obs.: Cotação média do dólar comercial oficial para o mês de dezembro de 2003: R\$ 2,924 Fonte: Histórico do dólar (2004)

**TABELA 3.A** Coeficientes técnicos e custos de manutenção de 1 hectare de teca (*Tectona grandis* L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00 (...continua...)

Especificação	Detalhamento	Ano de ocorrência	Unid.	Quant.	Valor unitário	Dens. 1.111 árv./ha	Dens. 2.083 árv./ha
Controle de formiga	Valor considerando para isca formicida e custo de 1 hora para distribuição. Pacote de 500 g de formicida granulado.	1 a 3	Pct	1	7,19	7,19	7,19
Coroamento	Operação realizada com roçadeira costal motorizada	1 e 2					
Gasolina	Consumo/dia de 2,5 l		Litro	A-7,00 B-12,50	2,26	15,82	28,25
Óleo dois tempos	Consumo: 1 frasco a cada 10 litros de gasolina		Frasco	A-0,7 B-1,25	3,00	2,10	3,75
Graxa	Consumo médio de 63 ml por hectare ou 300 ml de graxa/mês/roçadeira		Galão	0,00315	120,00	0,38	0,38
Lâmina	Consumo médio: 1 lâmina a cada 2400 plantas		Und.	A-0,46 B-0,83	10,00	4,60	0,83
Manutenção da roçadeira	01 roçadeira opera 1440 horas/ano com manutenção média de R\$162,60/ano ou R\$0,11/hora.		h	A-22 B-40	0,11	2,42	4,40
Mão-de-obra e encargos	Empregando uma roçadeira Stihl 160 na atividade de coroamento, um homem apresenta um desempenho médio de 400 árvores/dia (operário rural I)		hora /homem	A-22 B-40	2,69	59,18	107,60
Fertilização	Fertilização conforme demanda nutricional descrita por Weaver (1993)	10					
Fertilizantes Distribuição mecanizada	São gastos 2,2 horas/ha para transportar os fertilizantes, abastecer os implementos e distribuir os fertilizantes no plantio.		h/trator	2,2	30	370,71 66,00	752,53 66,00
Óleo diesel	6 litros/hora para as operações de adubação		Litro	13,2	1,62	21,38	21,38
Óleo hidráulico	<b>Manutenção B</b> - A cada 1500 horas trabalhadas devem ser trocados os lubrificantes das caixas. Em média, são 100 litros para um trator com tomada de força e lâmina. Portanto, cada hora de trabalho consome 0,0667 litro de óleo hidráulico.		Litro	0,15	3,62	0,54	0,54
Graxa	<b>Manutenção A</b>		Galão	0,0115	120,00	1,38	1,38
Roçagem entre linhas	A roçagem ocorre entre os anos 1 a 3 para todos os espaçamentos e, eventualmente, para aos anos 4 e 5 para os espaçamentos mais amplos.	1 a 3					
Roçagem mecanizada	São gastos 2,2 horas/ha para roçagem mecanizada.		h/trator	2,2	30	66,00	66,00
Óleo diesel	Consumo de 6 litros/hora.		Litro	13,2	1,62	21,38	21,38
Óleo hidráulico	<b>Manutenção B</b>		Litro	0,15	3,62	0,54	0,54
Graxa	<b>Manutenção A</b>		Galão	0,0115	120,00	1,38	1,38

Obs.: Cotação média do dólar comercial oficial para o mês de dezembro de 2003: R\$ 2,924 Fonte: Histórico do dólar (2004).

**TABELA 3.A Cont.**

Especificação	Detalhamento	Ano de ocorrência	Unid.	Quant.	Valor unitário	Dens. 1.111 árv./ha	Dens. 2.083 árv./ha
Desrama		2 a 9					
Mão-de-obra e encargos	A desrama é realizada em 2/3 do povoamento, com rendimento de 350 árvores a cada 8 horas de trabalho. (operário rural II). Nesta operação ocorre em anos intercalados.		homem/dia	A-3,17 B-5,80	31,96	101,45	185,36
Colheita final	Colheita final (abate, arraste e carregamento) (Acerbi Júnior, 1998). Valor atualizado pelo dólar oficial.	Corte final	(R\$/m <sup>3</sup> )	Variável	23,00		
Transporte das toras (valor/m <sup>3</sup> transp.)	14 m <sup>3</sup> de toras por caminhão. O percurso médio considerado foi de 40 km, com um custo de R\$2,00/km.	Desbastes comerciais e corte final	m <sup>3</sup> transp.	Variável	5,71		
Proteção florestal/aceiros			R\$/ha			37,15	47,15

Obs.: Cotação média do dólar comercial oficial para o mês de dezembro de 2003: R\$ 2,924 Fonte: Histórico do dólar (2004)

**TABELA 4.A** Coeficientes técnicos e custos para reforma do povoamento para 1 hectare de teca (*Tectona grandis* L.f.), Rio Branco, Acre (dezembro de 2003). Valores em R\$1,00

Especificação	Detalhamento	Ano ocorrência	Unid.	Quant.	Valor unitário	Dens. 1.111 árv./ha	Dens. 2.083 árv./ha
Alimentação	No aluguel de máquinas na região, usualmente, a alimentação do tratorista e a do ajudante são custeadas pelo locatário. As mudas são adquiridas empresas especializadas na produção de mudas. O quilo de sementes de teca custa R\$ 40,00 (fornecidas sacas de 25 kg). Em média, 1 kg de sementes produz 400 mudas viáveis. A cobertura morta é disponibilizada nas indústrias de laminação de madeira existentes na região.	0 da rotação	Und.	A-2,0 B-3,6	3,00	6,00	10,80
Aquisição de mudas		0 da rotação	Und.	A - 1111 B - 2083	0,50	555,50	1000,00
Transporte da cobertura morta		0 da rotação	Und.	A-3333 B-6000	0,01	33,33	60,00
Coveamento/combustível / lubrificantes / acessórios							
Óleo diesel para trator de pneus	O trator de pneus chega a consumir 60 litros por dia no serviço de sulcamento/abertura de covas entre linhas (com oito horas de trabalho). Para preparar cada hectare são empregadas, em média, 5 horas de trator para densidade de 1.111 árvores/ha.	0 da rotação	litro	A-30 B-54	1,62	48,60	87,48
Óleo desingripante	Óleo desingripante é empregado para manutenção diária das máquinas (trator, grade, carreta, etc.)	0 da rotação	Frasco	A-0,20 B-0,36	4,67	0,93	1,68
Bico graxeiro	Eventualmente, ocorre a substituição dos bicos graxeiro durante a manutenção diária, no final do dia de trabalho.	0 da rotação	Und.	0,2	2,50	0,50	0,50
Graxa	<b>Manutenção A</b> - 20 litros de graxa possibilitam a manutenção de 01 trator e seus implementos durante 01 mês ou 24 dias de operação.	0 da rotação	Galão	A-0,02 B-0,04	120,00	2,40	4,80
Fertilizantes							
Superfosfato simples	O adubo super-simples é adquirido em Rio Branco R\$1.300 a tonelada (valor médio de 19% de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ; 20% de Ca; e, 12% de S)	0	kg	A - 111 B - 300	1,30	144,30	390,00
Cloreto de potássio	O cloreto de potássio (KCl) é adquirido em Rio Branco por R\$1.300 a tonelada (valor médio de 60% K <sub>2</sub> O).	0	kg	A - 27 B - 48	1,30	35,10	62,40
Micronutrientes	Sulfato de cobre	0	kg	A - 0,60 B - 1,08	2,40	1,44	2,59
	Sulfato de zinco	0	kg	A - 0,60 B - 1,08	1,32	0,79	1,42
Locação de trator e implementos	O locador é responsável pela manutenção do trator como: troca de pneus, mecânicos, filtros, etc., exceto óleo diesel e lubrificantes que ficam sob responsabilidade do proprietário do empreendimento.	0	h/trator	A-4,0 B-7,2	30,00	120,00	216,00
Mão-de-obra e encargos	O rendimento médio para plantio considerando: transporte interno das mudas, alinhamento, coveamento e plantio, é de 83 mudas/dia/homem (operário rural I).	0	homen/dia	A-13 B-24	21,50	279,50	516,00
Transporte de mudas	Adotou-se uma distância média percorrida de 40 km, com caminhão de carroceria de 2,2 x 7 metros, sendo que o mesmo transporta cerca 8000 mudas/toco de maneira segura (no valor de R\$2,00/km).	0	Muda transp.	A-1111 B-2000	0,01	11,11	20,00
<b>Total</b>						<b>1239,5</b>	<b>2373,67</b>

Obs.: Cotação média do dólar comercial oficial para o mês de dezembro de 2003: R\$ 2,924 Fonte: Histórico do dólar (2004).

**TABELA 5.A** Estimativa de depreciação patrimonial, conforme taxa de depreciação estabelecida na Instrução Normativa (IN) da Secretaria da Receita Federal (SRF) N° 162 (de 31 de dezembro de 1998) e na IN SRF N° 130 (1999). Valores em R\$1,00

Especificação	Und	Quant.	Valor unitário	Total	Taxa máxima de depreciação (%)	Vida útil	Tempo de uso	Valor atual calculado	Depreciação periódica do ano
<b>Benefícios</b>									
Ramal	km	5	600,00	3.000,00	4	25	1	2.880,00	120,00
Casa/Administração	m²	54	200,00	10.800,00	4	25	1	10.368,00	432,00
Oficina Mecânica	m²	30	250,00	7.500,00	4	25	1	7.200,00	300,00
Garagem	m²	30	150,00	4.500,00	4	25	1	4.320,00	180,00
Cercas	km	1,5	2.554,00	3.831,00	10	10	1	3.447,90	383,10
<b>Ferramentas</b>									
Limas	und	9	4,50	40,50	20	5	1	32,40	8,10
Pá reta	und	2	15,00	30,00	20	5	1	24,00	6,00
Enxadas	und	6	9,00	54,00	20	5	1	43,20	10,80
Podão	und	6	150,00	900,00	20	5	1	720,00	180,00
Enxadeco	und	2	11,00	22,00	20	5	1	17,60	4,40
Marretas	und	2	20,00	40,00	20	5	1	32,00	8,00
Facão	und	6	12,00	72,00	20	5	1	57,60	14,40
<b>Máquinas e implementos</b>									
Graxeiro	und	1	120,00	120,00	10	10	1	10,91	12,00
Motoserra Sthil 0.51	und	2	1.978,00	3.956,00	10	10	1	359,64	395,60
Roçadeira Sthil 161	und	2	1.626,00	3.252,00	10	10	1	295,64	325,20
<b>Equipamentos de segurança</b>									
Capacete	und	6	12,00	72,00	25	4	1	2,77	18,00
Luvas	und	6	5,80	34,80	25	4	1	1,34	8,70
Óculos	und	6	15,00	90,00	25	4	1	3,46	22,50
Protetor auricular	und	6	3,00	18,00	25	4	1	0,69	4,50
Botas	und	6	24,50	147,00	25	4	1	5,65	36,75
<b>Utensílios gerais</b>									
Cozinha	Kit	2	250,00	500,00	10	10	1	45,45	50,00
Oficina	Kit	1	1.250,00	1.250,00	10	10	1	113,64	125,00
<b>Total geral</b>								<b>2.645,05</b>	
<b>Média/ha considerando uma média de 150 ha</b>									<b>17,63</b>



**TABELA 6.A** Fluxo de caixa considerando a rotação econômica ótima para os povoadamentos de *Tectona grandis* L.f. das áreas 1 e 3, município de Rio Branco, estado do Acre

Ano	Área 1		Área 3	
	Ano de rotação 25		Ano de rotação 27	
	Despesas	Receitas	Despesas	Receitas
0	-R\$ 1.774,43	-	-R\$ 1.057,87	-
1	-R\$ 601,84	-	-R\$ 325,77	-
2	-R\$ 601,84	-	-R\$ 427,22	-
3	-R\$ 271,27	-	-R\$ 241,27	-
4	-R\$ 360,14	-	-R\$ 246,23	-
5	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
6	-R\$ 174,78	-	-R\$ 246,23	-
7	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
8	-R\$ 360,14	-	-R\$ 246,23	-
9	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
10	-R\$ 1.016,61	-	-R\$ 604,79	-
11	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
12	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
13	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
14	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
15	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
16	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
17	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
18	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
19	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
20	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
21	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
22	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
23	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
24	-R\$ 174,78	-	-R\$ 144,78	-
25	-R\$ 9.817,27	R\$ 95.818,73	-R\$ 144,78	-
26			-R\$ 144,78	-
27			-R\$ 8.100,34	R\$ 80.423,90