

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE CLONES DE  
*Eucalyptus spp.* A IDADES PASSADAS COM USO DA TÉCNICA DE  
ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA**

**FAWAZ ALI JAMMAL FILHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP  
Agosto - 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE CLONES DE  
*Eucalyptus spp.* A IDADES PASSADAS COM USO DA TÉCNICA DE  
ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA**

**FAWAZ ALI JAMMAL FILHO**

Orientador: Prof. Dr. Adriano Wagner Ballarin

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Rezende

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia – Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP  
Agosto - 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F27d Jammal Filho, Fawaz Ali, 1978-  
Determinação da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. a idades passadas com uso da técnica de atenuação de radiação gama / Fawaz Ali Jammal Filho. - Botucatu : [s.n.], 2011

x, 81 f. : gráfs., tabs., ils. color., fots. color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011  
Orientador: Adriano Wagner Ballarin  
Co-orientador: Marcos Antonio de Rezende  
Inclui bibliografia

1. *Eucalyptus* spp. 2. Densidade. 3. Funções taper. 4. Qualidade da madeira. 5. Seleção precoce. I. Ballarin, Adriano Wagner. II. Rezende, Marcos Antonio de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE CLONES DE  
Eucalyptus spp A IDADES PASSADAS COM USO DA TÉCNICA  
DE ATENUAÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA"

ALUNO: FAWAZ ALI JAMMAL FILHO

ORIENTADOR: PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN

PROF. DR. VLADIMIR ELIODORO COSTA

PROF. DR. ELIAS TAYLOR DURGANTE SEVERO

Data da Realização: 26 de agosto de 2011

“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de você, menos o seu conhecimento. É o seu bem mais precioso. Explore; viaje; descubra. Conheça.”

*(Albert Einstein)*

## DEDICATÓRIA

*Tenho o enorme orgulho de dedicar este trabalho, aos meus pais, Fawaz e Vani, e as minhas irmãs, Verena e Ehlaz, que desde a minha existência sempre demonstraram confiança em mim.*

*Amo vocês!!!!*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer em especial a Deus, pela minha existência e por colocar em meu caminho sempre as pessoas certas e que sempre me apoiaram ao longo de minha “jornada”.

A meu orientador de mestrado, Prof<sup>o</sup>. Adriano Wagner Ballarin, que simplesmente foi mais de que um orientador acabou sendo uma pessoa muito especial tanto para a minha formação profissional como para a minha vida pessoal. Agradeço pela sua paciência, atenção e muito mais que isso, sua preocupação para o bem de seu orientado.

Ao meu co-orientador de mestrado Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcos A. de Rezende que me auxiliou juntamente com Prof<sup>o</sup>. Dr. Vladimir E. Costa e com o técnico Edson M. Bruder nos ensaios experimentais do meu trabalho no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado concedida.

Ao Curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP – Campus de Botucatu, pela oportunidade de realizar o curso.

Aos docentes da pós-graduação, em especial: Edson Seizo Mori, Elias Taylor Durgante Severo e Sérgio Hugo Benez, pois todos foram de extrema valia para minha boa formação profissional.

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. José Raimundo de Souza Passos que me forneceu uma ajuda muito importante na parte estatística deste trabalho, auxiliando-me sempre com prontidão e disposição ao esclarecimento de minhas dúvidas.

A empresa Duratex S/A do município de Agudos/SP, em especial aos Engenheiros Raul Chaves, Henrique Zanoti Gomes e João Airton Gotardi que além de fornecerem a matéria-prima para o desenvolvimento do meu trabalho, também deram importantes sugestões para sua execução.

A minha família, Fawaz, Vani, Verena e Ehlaz, pelo apoio, carinho e dedicação, enfim, por toda a nossa união e amor que nos deixa cada dia uma família mais

sólida. E também, a minha tia Vagna e minha avó Tarcísia (*in memória*) que são pessoas que tenho grande admiração e respeito por tudo que já fizeram por mim.

Enfim a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso desse trabalho.

Muito obrigado a todos!!!



## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
RESUMO.....	1
SUMMARY.....	3
1 INTRODUÇÃO.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Caracterização do eucalipto.....	7
2.2 Propriedades físicas e anatômicas da madeira de eucalipto.....	8
2.2.1 Anéis de crescimento.....	9
2.2.2 Madeira juvenil .....	11
2.2.3 Cerne e Alburno .....	15
2.2.4 Densidade da madeira .....	17
2.3 Métodos de determinação da densidade.....	19
2.4 Modelos representativos da forma e volume das árvores.....	21
2.5 Modelos estimadores da densidade da madeira de eucalipto.....	29
2.6 O melhoramento genético florestal.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1 Descrição do local de amostragem.....	33
3.2 Ensaio piloto.....	34
3.3 Amostragem das árvores.....	35
3.4 Densidades da madeira à idade de 6 anos .....	36
3.4.1 Densidade aparente pontual nos discos.....	37
3.4.2 Densidades aparente e básica médias dos discos.....	41
3.4.3 Densidade básica ponderada das árvores.....	42
3.5 Funções <i>taper</i> para as árvores às idades de 2 e 4 anos .....	43
3.6 Densidades da madeira às idades de 2 e 4 anos .....	44
3.7 Análise dos resultados.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Ensaio piloto.....	45

4.2	Densidades da madeira à idade de 6 anos .....	46
4.2.1	Densidades pontuais nos discos e densidades médias dos discos .....	46
4.2.2	Densidade básica ponderada das árvores.....	51
4.3	Funções <i>taper</i> para as árvores às idades de 2 e 4 anos .....	51
4.4	Densidades da madeira às idades de 2 e 4 anos .....	59
4.5	Associações entre as densidades básicas e as idades .....	61
5	CONCLUSÕES.....	68
6	REFERÊNCIAS.....	70
7	APÊNDICE.....	80

**LISTA DE TABELAS**

Tabela		Página
1	Área plantada com eucaliptos no Brasil, em 2009, pelos principais Estados produtores.	8
2	Variações dos diâmetros por classe diamétrica das árvores da área experimental do ensaio piloto.	45
3	Densidade básica ponderada das árvores de 6 anos.	51
4	Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade.	56
5	Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade (2 anos).	57
6	Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade (4 anos).	58
7	Comparação entre modelos polinomiais inteiros e fracionários pelo critério de Akaike corrigido (AICc).	59
8	Densidade básica ponderada das árvores de 2 e 4 anos.	61
9	Densidade básica ponderada das árvores de 2, 4 e 6 anos.	61
10	Aumentos percentuais de densidade básica ponderada das árvores de 2, 4 e 6 anos.	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Características da madeira juvenil e adulta em relação à idade do câmbio das árvores.	13
2	Perfil da densidade aparente radial do lenho de árvore de <i>Eucalyptus spp.</i> , por densitometria de raios X, evidenciando a região da madeira juvenil, transição e adulta.	14
3	Demarcação das regiões de madeira adulta e juvenil de madeira de <i>Eucalyptus grandis</i>	14
4	Corte de tronco de <i>Eucalyptus</i> , evidenciando o cerne e o alborno.	16
5	Efeito da precipitação (linha basal delgada) no incremento em diâmetro do tronco (linha espessa) de árvores de <i>Eucalyptus globulus</i> .	25
6	Ciclo diário de mudanças no diâmetro do tronco.	26
7	Precipitação mensal (A) e incremento mensal do tronco de 30 árvores de eucalipto de abril de 1998 a dezembro de 2000 (B).	26
8	Incremento médio anual de massa com casca ( <i>IMAMcc</i> ) em função do incremento médio anual de volume com casca ( <i>IMAVcc</i> ) dos tratamentos: <i>S1</i> , seminal de <i>Eucalyptus grandis</i> ; <i>C1</i> e <i>C2</i> , clones 1 e 2 de <i>E. grandis</i> ; <i>H1</i> , <i>H2</i> e <i>H3</i> clones 1, 2 e 3 de híbrido de <i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i> .	32
9	Aspecto das parcelas das árvores de <i>Eucalyptus spp.</i> : A) Região de Lençóis Paulista – SP (LP) e B) Região de Itapetininga – SP (I).	34
10	Ensaio piloto: esquema de coleta de discos ao longo do fuste das árvores selecionadas.	35
11	Sistema de Atenuação da Radiação do <sup>241</sup> Am. A) vista geral do sistema. B) detalhe lateral da movimentação da amostra entre a fonte de emissão de radiação e o sistema de detecção.	38
12	Idealização da composição de um disco de madeira de conífera: anéis delgados e concêntricos, dos quais são conhecidos a densidade (no ponto central do anel) e seu volume.	42
13	Perfis densitométricos obtidos a partir de discos a diferentes alturas (0 m até 20 m, de 2,5 m em 2,5 m) do fuste da árvore 5 (A5) da situação LPC1.	48
14	Perfis densitométricos obtidos a partir de discos retirados à altura do peito do fuste das 6 árvores nas regiões de Lençóis Paulista (LP) – gráficos a esquerda – e Itapetininga (I) – gráficos a direita – do <u>clone 1</u> .	49
15	Perfis densitométricos obtidos a partir de discos retirados à altura do peito do fuste das 6 árvores nas regiões de Lençóis Paulista (LP) – gráficos a esquerda – e Itapetininga (I) – gráficos a direita – do <u>clone 2</u> .	50
16	Dispersão dos dados para as situações estudadas (regiões LP e I, clones C1 e C2) nas idades de 2 e 4 anos) sendo $w=d_i/DAP$ a razão entre o diâmetro do fuste medido a uma altura $h_i$ e a 1,30 m de altura e $x_1=h_i/H$ a razão entre a altura da medição e a altura total da árvore.	54

17	Distribuição dos resíduos dos valores ajustados para as situações estudadas: clones (C1 e C2), regiões (LP e I) e idades (2 e 4 anos).	55
18	Efeito da idade da madeira na sua densidade básica ponderada para cada grupo: clone (C1 e C2), região Lençóis Paulista (LP) e idade (2, 4 e 6 anos).	65
19	Efeito da idade da madeira na sua densidade básica ponderada para cada grupo: clone (C1 e C2), região Itapetininga (I) e idade (2, 4 e 6 anos).	66

## RESUMO

O desenvolvimento de florestas clonais de eucalipto tem como metas principais a obtenção de florestas altamente produtivas e de rápido crescimento. Em função, sobretudo da grande diversidade de espécies, o gênero *Eucalyptus* tem o potencial de atender diversos segmentos da produção industrial madeireira. Um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade da madeira é a densidade básica, principalmente quando se visa sua utilização como matéria prima industrial ou energética. Além de ser de determinação relativamente simples, essa propriedade apresenta boa correlação com outras propriedades da madeira. O objetivo deste trabalho foi determinar a densidade básica da madeira relativa às idades de 2, 4 e 6 anos do desenvolvimento fisiológico de *Eucalyptus spp.* a partir de árvores com seis anos de idade, fazendo uso de perfis densitométricos radiais obtidos pelo método da atenuação de radiação gama e de equações *taper* e de medições do DAP às idades passadas, para definir as regiões dos perfis correspondentes a cada uma das idades estudadas. Para cada uma das idades estudadas foram amostradas árvores disponibilizadas pela empresa Duraflora S.A., abrangendo dois clones (C1 - maior produtividade e C2 - menor produtividade) e duas regiões distintas (LP - Lençóis Paulista e I – Itapetininga), classificadas e ranqueadas pela empresa como de desempenho superior e inferior, respectivamente. Os perfis densitométricos (densidade aparente e, indiretamente, densidade básica) de discos ao longo da altura das árvores de 6 anos foram obtidos pelo método da atenuação de radiação gama. Posteriormente, a partir de medições diamétricas do fuste das árvores de 2 e 4 foram ajustadas funções *taper* para elas, permitindo estabelecer as regiões dos perfis densitométricos originais

correspondentes a cada uma dessas idades passadas. As densidades básicas médias ponderadas das árvores em cada uma das situações e idades contempladas foram calculadas, por fim, com uso da formulação de Pronin. Os resultados mostraram que as árvores de 6 anos dos clones 1 e 2 da região de Lençóis Paulista apresentaram densidade básica média ponderada de 465 kg/m<sup>3</sup> e de 425 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que na região de Itapetininga os mesmos clones apresentaram densidade básica média de 417 kg/m<sup>3</sup> e de 397 kg/m<sup>3</sup>. Para as idades passadas de 2 e 4 anos os clones 1 e 2 da região de Lençóis Paulista também apresentaram valor superior de densidade básica média ponderadas em relação a região de Itapetininga. Os resultados permitem concluir que o método de radiação gama mostrou-se uma ferramenta eficiente para a determinação da densidade pontual, dos discos e de suas frações, permitindo estimar as densidades a idades passadas. Pode-se detectar o aumento da densidade básica média ponderada em função das idades de 2, 4 e 6 anos, observando-se maiores aumentos percentuais da densidade no período de 2 para 4 anos, em relação ao período de 4 para 6 anos. Os valores médios de densidade básica ponderada das árvores foram maiores para o clone 1 da região de Lençóis Paulista (LP) e Itapetininga (I) em relação ao clone 2 das mesmas regiões, porém a variação da densidade básica se mostrou mais regular para os clones de Itapetininga.

---

Palavras-chave: densidade, *Eucalyptus spp.*, funções *taper*, qualidade da madeira, seleção precoce.

PRECOCIOUS SELECTION OF CLONES OF *Eucalyptus spp.* BASED ON ESTIMATES OF BASIC DENSITY OF WOOD AS A FUNCTION OF AGE AND SITE. Botucatu, 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia (Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: FAWAZ ALI JAMMAL FILHO

Adviser: PROF. DR. ADRIANO WAGNER BALLARIN

Co-adviser: PROF. DR. MARCOS ANTONIO DE REZENDE

## SUMMARY

The main objectives of the development of clonal eucalyptus forests are rapid growth and productivity. Considering the great diversity of species, the genus *Eucalyptus* has the potential to attend different segments of wood industry. One of the principal parameters for wood quality evaluation is the basic density, especially when considering industrial and energy purposes. This property has relatively simple determination and is well correlate to several other wood properties. The objective of this study was to determine basic density of wood on the ages of 2, 4 and 6 years of the physiological development of *Eucalyptus spp.* 6 years old trees using densitometric radial profiles obtained using the method of gamma ray attenuation and, additionally, *taper* functions and DAP measurements to define the regions of the profiles corresponding to each one of the past ages (2 and 4 years). Trees provided by Duraflora S.A. were sampled for each of the ages studied covering two clones (C1 - higher productivity and C2 - lower productivity) and two distinct regions (I – Itapetininga and LP – Lençóis Paulista – both at Sao Paulo State, Brazil), ranked by the company as higher performance and lower one, respectively. Densitometric profiles (apparent density – 12% MC – and, indirectly, basic density) from discs along the 6 years old trees height were obtained by the gamma ray attenuation method. Subsequently, based on measurements of stem diameter along the height for 2 and 4 years old trees, *taper* functions were adjusted, allowing establishing the regions of the original densitometric profiles corresponding to each of the past ages. The weighted



average basic density of trees in each of the situations and ages studied were calculated, finally, using the formulation of Pronin. The results indicated that 6 years old trees of clones C1 and C2 of the region of Lençóis Paulista (LP) had weighted average basic density of 465 kg/m<sup>3</sup> and 425 kg/m<sup>3</sup>, while the same clones in Itapetininga (I) region had 417 kg/m<sup>3</sup> and 397 kg/m<sup>3</sup>. For the ages of 2 and 4 years clones C1 and C2 from the region of Lençóis Paulista (LP) also had higher weighted average basic density related to Itapetininga (I) region clones densities. The results indicated that the gamma ray method was an effective tool for determining the local density as well as complete and partial disc densities, allowing estimation of density at past ages. It was detected the increase of the weighted average basic density from 2 to 6 years, with higher percentage increases in the period from 2 to 4 years when related to the period from 4 to 6 years. The weighted basic density of the trees were higher for the clone C1 related to clone C2 in both regions studied (LP and I), but the variation of the basic density was more regular for the clones of Itapetininga (I) region.

---

Keywords: density, *Eucalyptus spp.*, taper functions, wood quality, precocious selection.

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de florestas clonais de eucalipto teve como objetivo principal a obtenção de florestas altamente produtivas e de rápido crescimento. Em função da grande diversidade de espécies, o gênero *Eucalyptus* tem o potencial de atender aos diversos segmentos da produção industrial madeireira. Segundo Silva Júnior (1997), citado por Alencar et al. (2002), os programas de melhoramento genético florestal necessitam de tempo para incorporação das características tecnológicas da madeira em plantios comerciais, e a redução da idade da madeira destinada à avaliação destas características representa uma economia de tempo em programas de melhoramento.

Shimoyama & Barrichelo (1989) escrevem que os programas de melhoramento florestal enfatizam, em primeiro plano, as características de crescimento, forma, adaptabilidade e resistência a pragas e doenças, devido à facilidade de seleção precoce para tais características. Moraes (1987) afirma que embora a densidade seja uma característica de alta herdabilidade, vários fatores ambientais ligados ao manejo, às condições edafo-climáticas e também a problemas de amostragem têm tido uma participação importante na sua determinação. O autor comenta ainda que a interação genótipo x ambiente observada na densidade básica da madeira nada mais é, então, que o conjunto desses fatores ambientais (latitude, altitude, sítio, precipitação, temperatura, ritmo de crescimento, idade, etc.) e genéticos interagindo.

O desenvolvimento de modelos de predição e prognose da qualidade da madeira de *Eucalyptus spp.*, tanto para uso na formulação de planos de suprimento quanto

na pesquisa, tem se tornado de fundamental importância dentro da biometria florestal. Os modelos geralmente têm por base variáveis como a densidade básica e o peso da matéria seca, entre outras. Porém, a densidade básica da madeira varia entre gêneros, espécies, dentro de um mesmo gênero e entre árvores de mesma espécie (THIERSCH et al., 2006).

O objetivo do presente trabalho foi determinar a densidade básica da madeira relativa a cada idade (2, 4 e 6 anos) do desenvolvimento fisiológico de *Eucalyptus spp.* de seis anos de idade a partir do método de atenuação gama.

O trabalho teve, ainda, os seguintes objetivos específicos:

- Definir e selecionar funções *taper* que permitam a determinação da densidade básica da madeira em idades passadas;
- Analisar as variações de densidades básicas médias das árvores às diferentes idades.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Caracterização do Eucalipto

Segundo Alzate (2004), o gênero *Eucalyptus* pertence à família Mirtaceae com cerca de 600 espécies e grande número de variedades e híbridos adaptados a diversos climas e tipos de solo. Com exceção do *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta* que ocorrem em ilhas na Oceania, os demais são originários da Austrália. A área de plantio de *Eucalyptus* no mundo tem aumentado rapidamente nas últimas décadas, ultrapassando 20 milhões de hectares (IGLESIAS TRABADO; WILSTERMANN, 2009).

O *Eucalyptus* é um gênero de porte arbóreo, que forma densos maciços florestais. A espécie foi introduzida no Brasil no início do século XX, por volta de 1905, pelo engenheiro agrônomo Edmundo Navarro de Andrade, com a finalidade de produção de dormentes de madeiras para estradas de ferro no Estado de São Paulo, pela Companhia Paulista Estradas de Ferro (ANDRADE, 1928).

O *Eucalyptus grandis* é a espécie florestal mais plantada no Brasil, devido ao seu potencial produtivo e às características da madeira (SOUZA et al., 2004). A espécie é utilizada para produção de celulose e papel, painéis de fibra e aglomerado, combustível industrial e doméstico e produtos de serraria (SOARES et al., 2003).

No Brasil, cuja área territorial é de 851 milhões de hectares, há 477 milhões de hectares de cobertura florestal, sendo 4,26 milhões de eucalipto; os plantios

concentram-se principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Bahia, estando o restante distribuído entre outros estados (Tabela 1).

**Tabela 1** – Área plantada com eucaliptos no Brasil, em 2009, pelos principais Estados produtores.

<b>ESTADO</b>	<b>ÁREA (1.000 HECTARES)</b>	<b>PARTICIPAÇÃO (%)</b>
Minas Gerais	1.300,0	28,80
São Paulo	1.029,7	22,80
Bahia	628,4	13,92
Mato do Grosso do Sul	290,9	6,44
Rio Grande do Sul	272,0	6,02
Espírito Santo	204,6	4,53
Paraná	157,9	3,50
Pará	139,7	3,09
Maranhão	137,4	3,04
Santa Catarina	100,1	2,22
Amapá	62,9	1,39
Mato Grosso	61,5	1,36
Goiás	57,9	1,28
Tocantins	44,3	0,98
Outros estados	28,4	0,63
<b>Total</b>	<b>4.515,7</b>	<b>100</b>

Fonte: ABRAF (2010).

Atualmente o Brasil possui uma das melhores tecnologias mundiais de implantação, condução e exploração de florestas de *Eucalyptus*. Pode-se esperar também que o setor contribua para potencializar a balança comercial brasileira, com o aumento das exportações de produtos de base florestal, ou que deles se utilizam como o ferro-gusa, bem como diminuir as importações de produtos que podem ser substituídos pela madeira, principalmente os energéticos (JAMMAL FILHO, 2008).

## 2.2 Propriedades físicas e anatômicas da madeira de eucalipto

As propriedades físicas da madeira são também referidas por alguns autores como propriedades não-mecânicas – “*non mechanical properties*” (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

No geral, elas avaliam características intrínsecas da madeira (como aparência, cor, densidade aparente e básica, teor de umidade) ou suas reações a estímulos não mecânicos, como as alterações dimensionais por perda ou ganho de água, a reação ao calor e a reação a estímulos elétricos, por exemplo. O largo espectro de variação das propriedades físicas entre espécies e mesmo intra-espécie é uma das causas da grande versatilidade e variedades de uso da madeira (BENJAMIN, 2006).

As propriedades físicas mais empregadas na caracterização da madeira são a densidade, o teor de umidade e as alterações dimensionais promovidas pela perda ou ganho de água, notadamente a retratibilidade (BENJAMIN, 2006).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), basicamente todas as propriedades físicas da madeira são determinadas por fatores inerentes à sua organização estrutural tais como: a quantidade de matéria da parede celular por unidade de volume; a quantidade de água presente na parede celular; a composição relativa dos componentes químicos principais na parede celular, bem como a quantidade e natureza de outros componentes presentes; o arranjo e orientação dos materiais componentes da parede na célula e nos tecidos; e o tipo, tamanho, proporção e arranjo das células constituintes dos tecidos.

De acordo com Malan (1995), a qualidade do lenho varia no tronco de uma mesma árvore e entre árvores, sendo mais importante a variação radial, determinada pelas características anatômicas, físicas e químicas da madeira juvenil.

### **2.2.1 Anéis de crescimento**

Os anéis de crescimento são camadas de células de madeira que se formam no xilema do tronco e das raízes, pela diferenciação das células do câmbio (TROVATI, 1982).

Bendtsen e Senft (1986) atestam que a largura do anel de crescimento, por si só, não indica a real evidência da qualidade da madeira. Quando uma amostra é retirada ao nível do DAP, a largura do anel geralmente aumenta radialmente por um número de anos, para depois decrescer a cada ano subsequente. Em árvores livres de competição, ou submetidas a tratos culturais como desbaste ou fertilização, os anéis de crescimento são mais largos, quando comparados a árvores que não sofreram competição. No entanto,

independentemente de como as árvores estão crescendo, a largura dos anéis de crescimento poderá declinar radialmente.

As condições de crescimento influenciam muito na largura dos anéis e mudanças muito abruptas poderão contribuir para uma não uniformidade radial da taxa de crescimento. Conforme Larson et al. (2001), a não uniformidade da taxa de crescimento durante o período juvenil, mesmo que não influencie diretamente na qualidade da madeira, está associada com as demais características que contribuem para a qualidade de produtos sólidos de madeira.

Em regiões de clima temperado, os anéis de crescimento representam habitualmente o incremento anual da árvore. Em um anel de crescimento típico distinguem-se normalmente duas partes: o lenho primaveril (inicial) e lenho outonal (tardio). O lenho primaveril corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, que nesta ocasião formam as células da madeira com paredes finas e lumes grandes, conferindo uma coloração clara. O lenho outonal é formado a partir da pausada diminuição da atividade fisiológica da árvore, normalmente no outono, as paredes das células vão tornando-se gradualmente mais espessas e seus lumes menores, distinguindo-se do lenho anterior por apresentarem uma tonalidade mais escura (BURGER; RICHTER, 1991).

Em locais de condições climáticas constantes, habitualmente os anéis de crescimento são indistintos ou pouco evidentes. Para muitas árvores tropicais os anéis correspondem a períodos de chuva e períodos de seca, podendo ocorrer dois ou mais ciclos em um ano (BURGER; RICHTER, 1991). Especificamente para a madeira de *Eucalyptus*, em algumas espécies e sob determinadas condições de crescimento – com déficit de água, por exemplo – é possível a visualização dos anéis de crescimento depois que a madeira recebe um tratamento especial, como lixamento (BENJAMIN, 2006).

Trovati (1982) afirma que as funções de resposta dos fatores ambientais, não são contraditórias umas com as outras, elas revelam que durante certos períodos da estação de crescimento, as variáveis climáticas têm uma maior influência na densidade. No trabalho desenvolvido por Zanher (1968) apud Trovati, 1982, o déficit hídrico pode causar uma redução no tamanho das células ou uma mudança na espessura da parede celular. Porém, se a estiagem persistir por períodos longos, a densidade do lenho tardio poderá ser marcadamente mais baixa que a do lenho formado em condições normais.

As variações nas camadas anuais de crescimento podem ser análogas em muitas árvores de uma dada região, indicando que o mesmo conjunto comum de fatores externos influencia no crescimento. Assim, as similaridades nas variações do crescimento podem ser fortes e especialmente extensivas. Onde isto é verdade, é razoável assumir que os agentes externos que forçam o padrão de variabilidade comum nas árvores de uma região relacionam-se com o clima (TROVATI; FERRAZ, 1984).

Os anéis de crescimento são bancos de dados naturais que contém informações ecológicas e históricas de longo prazo, que possibilitam quantificar e reconstruir as variações climáticas ocorridas em um intervalo de tempo anterior às medições instrumentais diretas (KITSBERGER; VEBLEN; VILLALBA, 2000).

Trovati (1982) afirma que na área florestal, os anéis de crescimento permitem analisar e explicar o comportamento sazonal do crescimento em diâmetro e altura das árvores, bem como quantificar a influência do meio ambiente, do fogo e de outras técnicas de manejo. Entretanto, apesar de diversos estudos sobre os anéis de crescimento de coníferas e folhosas na área de tecnologia e anatomia da madeira (BALLARIN; PALMA, 2003; FERREIRA, 2009; ROLIM; FERREIRA, 1974; TOMAZELLO FILHO et al., 2004), há a necessidade de maior integração destas técnicas do manejo florestas no Brasil.

### **2.2.2 Madeira juvenil**

O caule de uma árvore adulta pode ser dividido em duas regiões distintas, devido às diferenças na sua estrutura e propriedade: a madeira juvenil, próxima à medula, proveniente do crescimento inicial e a madeira adulta, na camada mais externa do tronco, formada pela atividade do câmbio fisiologicamente maduro. A madeira juvenil corresponde ao xilema secundário, produzido durante a fase inicial da vida da árvore, caracterizando-se a madeira adulta, na sequência, pelo progressivo aumento nas dimensões e mudanças correspondentes na forma, estrutura e disposição das células nas sucessivas camadas de crescimento (JANKOWSKY, 1979).

Segundo Malan (1995) a proporção de madeira juvenil depende da idade das árvores, do ambiente e do manejo florestal. Entretanto, a uma mesma idade e em



condições semelhantes de ambiente e de manejo, pode-se verificar que existe expressiva variabilidade neste aspecto.

Em algumas espécies e indivíduos, a formação de madeira juvenil estende-se por vários anos, enquanto que em outras a formação de madeira adulta inicia-se mais cedo. O que caracteriza estas variações são as diferenças que se estabelecem nas proporções de madeira juvenil em relação à madeira adulta acumuladas no tronco (ASSIS, 2007).

Segundo Jankowsky (1979), a proporção de madeira juvenil, tanto em peso como em volume, diminui com o aumento em idade do povoamento. É difícil determinar o período de juvenilidade da árvore, mas, de acordo com o autor, para a madeira *Eucalyptus* pode ser superior a 20 anos. Panshin e De Zeeuw (1980) reportam que o período de juvenilidade usualmente se estende pelos primeiros 10 a 20 anos de vida da árvore.

Inúmeras são as diferenças existentes entre madeira juvenil e adulta no que se refere às características anatômicas e propriedades físico-mecânicas. Zobel e Buijtenen; Lara Palma et al. (1989; 2001 apud BENJAMIN, 2002) destacam que a madeira juvenil, em relação à madeira adulta é formada por: células mais curtas com lume celular de diâmetro grande; parede celular mais estreita; maiores ângulos microfibrilares na camada S2; maior contração longitudinal e menor contração transversal; maior teor de lignina e hemicelulose e menor teor de celulose; maior proporção de lenho de reação e menor proporção de lenho tardio; menor densidade básica; menor resistência.

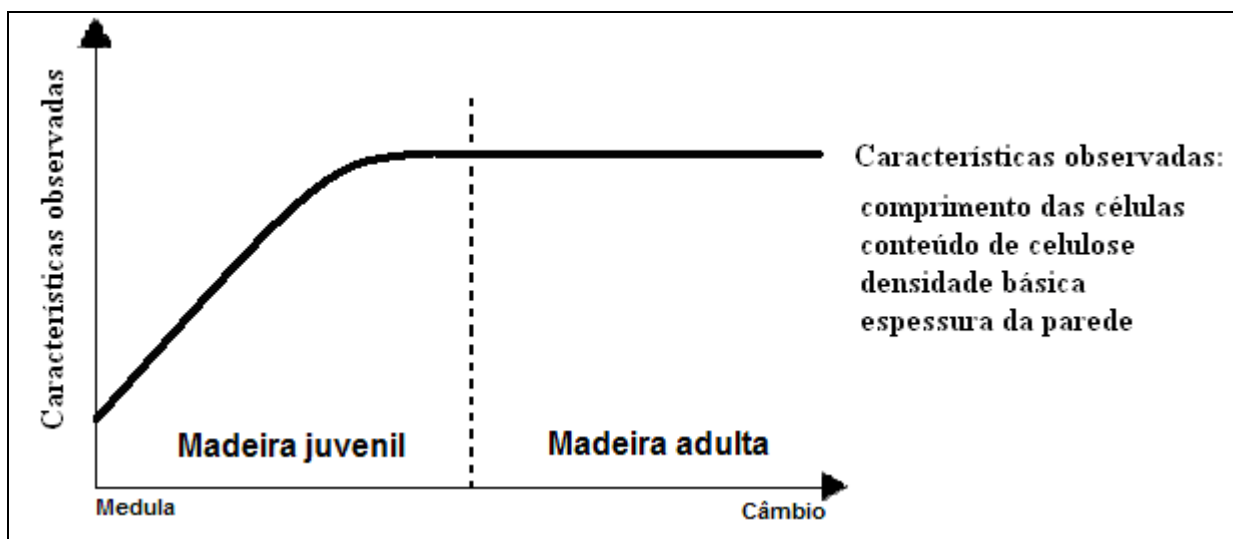
Zobel (1980) afirma não existir um ponto específico de transição entre madeira juvenil e adulta, devido ao fato de que tal transição ocorre ao longo de vários anos e de forma lenta (Figura 3). “A demarcação entre a madeira juvenil e adulta não é clara, devido às mudanças graduais nas dimensões das células” (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005).

A delimitação entre as regiões de madeira juvenil e madeira adulta é encaminhada, normalmente, com a análise do comprimento das fibras (ou das traqueídes), no sentido medula-casca. Alternativamente, pode-se fazer a avaliação a partir da variação da densidade aparente da madeira.

No lenho das árvores de eucalipto, Hillis e Brown (1984) relataram que, até referida data, os limites da formação da madeira juvenil não eram claramente definidos, com escassos resultados de análises comparativas da densidade da madeira próxima

da medula – de menor densidade – em relação à da próxima da casca – de maior densidade. Wilkes (1984) afirmou que a taxa de crescimento das árvores de eucalipto tem pouca influência na formação de madeira juvenil no seu lenho, que se apresenta em proporção semelhante indicando um grau de maturidade similar nas árvores de rápido e lento crescimento.

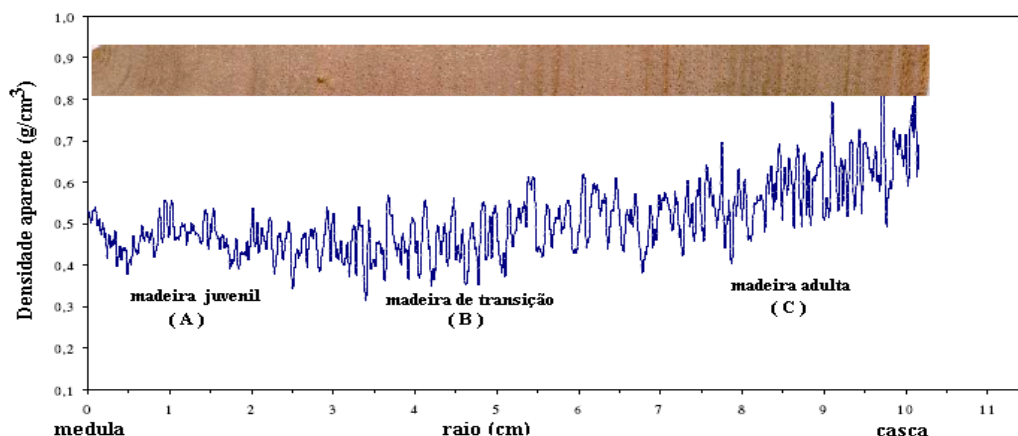
Conforme já comentado, a qualidade do lenho varia no tronco de uma mesma árvore e entre árvores. No entanto, árvores de mesma idade e em ambiente e manejo similar mostram grande variabilidade na relação madeira juvenil - adulta. A porcentagem de madeira juvenil/adulta reflete as diferenças das características anatômicas dos componentes celulares constituintes do lenho das árvores (Figura 1).



**Figura 1** – Características da madeira juvenil e adulta em relação à idade do câmbio das árvores.

Fonte: Krzysik et al. (2001) - modificado pelo autor.

As diferenças entre a madeira juvenil, transição e adulta relacionam-se às alterações anatômico-físicas no sentido medula-casca do tronco das árvores, sendo descrita a sua estrutura anatômica (dimensões e porcentagens de elementos celulares) e perfil radial de densidade aparente do lenho (TOMAZELLO FILHO, 2002) conforme se observa na Figura 2.



**Figura 2** – Perfil da densidade aparente radial do lenho de árvore de *Eucalyptus spp.*, por densitometria de raios X, evidenciando a região da madeira juvenil, transição e adulta.

Fonte: Tomazello Filho (2002).

A madeira juvenil em folhosas é menos evidente, mas não menos importante. Visualmente, a região de madeira juvenil é identificável pela presença de anéis de crescimento mais largos, em contraposição aos observáveis na região de madeira adulta, mais estreitos e com largura relativamente mais uniforme (Figura 3).



**Figura 3** – Demarcação das regiões de madeira adulta e juvenil de madeira de *E. grandis*.

Fonte: Benjamin (2002).

Entretanto, a madeira da grande maioria das espécies de *Eucalyptus* de rápido crescimento, obtida de plantios jovens e amplamente utilizada pela indústria madeireira como substituto imediato de madeiras nativas, apresenta uma grande proporção de madeira juvenil, situação que dificulta os processos de transformação da madeira e, muitas vezes, constitui um obstáculo na viabilização do seu uso industrial.

Os estudos sobre a madeira de folhosas de rápido crescimento no Brasil e os limites de formação da madeira juvenil ainda estão em estágio inicial. O conhecimento das propriedades básicas (físicas, mecânicas, anatômicas, etc.) da madeira juvenil das espécies de *Eucalyptus* spp., faz-se indispensável, com o intuito de caracterizá-la, visando principalmente um subsídio aos diferentes usuários desta matéria-prima, para seu emprego correto em diferentes soluções, desde o desdobro até utilizações industriais e estruturais.

### **2.2.3 Cerne e alburno**

Uma das principais funções do lenho é conduzir a seiva mineral da raiz para as folhas da árvore. Bamber (1978) indica o alburno como a região de condução da seiva e armazenamento de carboidratos de reserva e quando as suas células vivas (parênquima longitudinal e radial) morrem, as significativas alterações resultam na formação do cerne. A porção do lenho com células mortas recebe o nome de cerne e a porção fisiologicamente ativa denomina-se alburno.

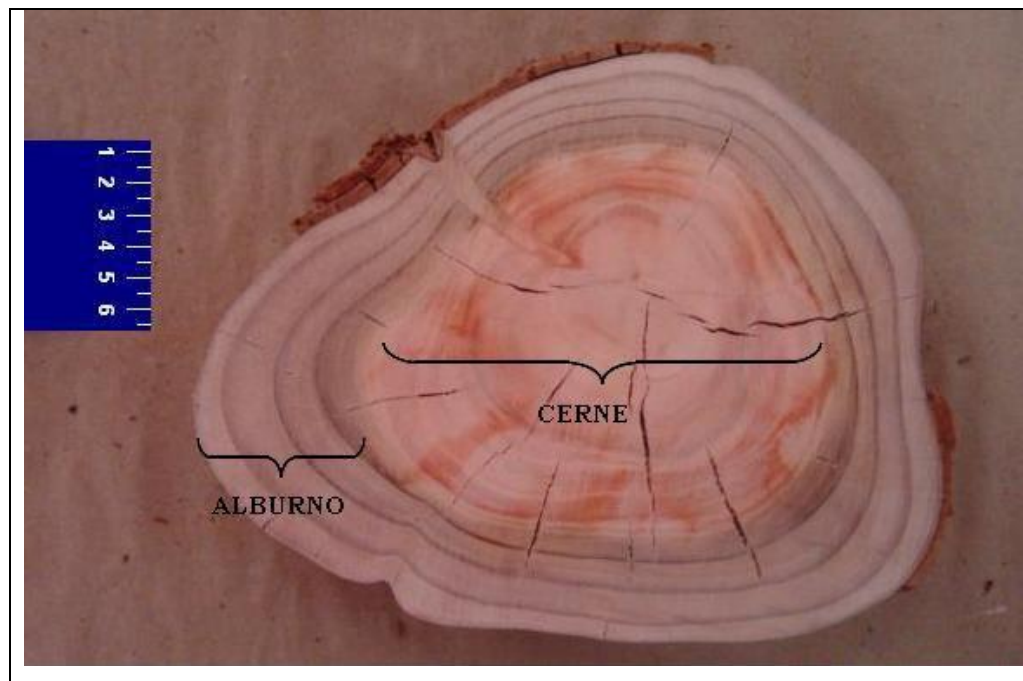
A transformação de alburno para cerne, conhecida como processo de cernificação, ocorre de forma contínua ao longo da vida da árvore. A cada ano, novas camadas de alburno transformam-se gradativamente em cerne, na medida em que novo alburno se forma nas camadas mais externas (próximas do câmbio) do tronco.

De acordo com Silva e Trugilho (2003), o processo de cernificação é caracterizado não só pela morte das células do parênquima radial, mas também pelo consumo de amido, aumento no conteúdo de extrativos e tiloses (em alguns gêneros), consumo de oxigênio e liberação de CO.

Relativamente à madeira de alburno, a madeira de cerne é menos permeável, tem mais estabilidade dimensional e é ligeiramente mais densa. Alguns autores afirmam que as propriedades básicas de resistência da madeira não são afetadas pela transição de alburno para cerne (USDA, 1999).

Em algumas espécies pode-se verificar visualmente a transição de alburno para cerne, por meio de um escurecimento do lenho (Figura 4), devido à deposição

dos extrativos, os quais lhe conferem, em algumas situações, uma maior durabilidade contra deterioração (por fungos ou insetos).



**Figura 4** – Corte de tronco de *Eucalyptus*, evidenciando o cerne e o alburno.

Fonte: Laboratório de Ensaaios de Materiais - UNESP – Botucatu.

O cerne apresenta diferenças marcantes em relação ao alburno, as quais podem ser interessantes ou não, de acordo com a utilização da madeira. Algumas das diferenças mais marcantes (BURGER & RICHTER, 1991) são:

- a) o cerne contém mais compostos fenólicos e ácidos e menos amido que o alburno;
- b) a lignina do cerne apresenta um peso molecular mais elevado e é mais condensada;
- c) o cerne de folhosas as diferenças dos extrativos, da lignina e celulose não são consistente (BROWNING, 1963);
- d) o cerne apresenta menor teor de umidade devido à redução da atividade fisiológica;
- e) o cerne é menos permeável, possui tecido mais compacto e, geralmente, menos denso que o alburno.

#### 2.2.4 Densidade da madeira

Um dos principais parâmetros de qualidade da madeira é a densidade básica, principalmente quando se visa sua utilização como matéria prima industrial ou energética, de onde se obtém uma simples determinação além da sua correlação com outras propriedades da madeira.

De fato, dentre os parâmetros empregados na avaliação da qualidade da madeira, a densidade (massa de madeira seca por volume total) tem merecido atenção especial, como decorrência de sua íntima relação com algumas importantes características tecnológicas e econômicas (PEREIRA, 1982 apud VAZ et al., 1996).

A densidade da madeira varia entre espécies, indivíduos e procedências da mesma espécie e dentro da árvore, tanto na direção longitudinal, ou seja, da base para o topo (BARRICHELO et al., 1983), quanto na direção radial, da medula para a casca (BRASIL et al., 1977).

Sob espaçamentos amplos, há a tendência das coníferas em apresentar anéis de crescimento mais largos, originando madeira de baixa densidade, principalmente nos primeiros anéis de crescimento, próximo à medula da árvore (ROLIM; FERREIRA, 1974). Schonau (1974) apud Tomazello Filho (2006) relacionou o espaçamento de plantio e a poda com o crescimento de árvores de *Eucalyptus grandis*, de 10,4 anos, na África do Sul. Neste estudo, o autor constatou que entre os tratamentos, o diâmetro a altura do peito – DAP variou de 5 – 17,5 cm e a densidade básica do lenho de 0,61 – 0,47 g/cm<sup>3</sup>, indicando uma forte correlação negativa entre o crescimento e a densidade básica do lenho das árvores. Segundo Brasil (1972) apud Tomazello Filho (2006), a densidade básica do lenho de *E. propinqua*, em função do local e do espaçamento mostrou diferenças significativas somente para locais, sendo que no sítio de crescimento inferior, as árvores formaram lenho de densidade básica mais alta.

O diâmetro do lume indica o tamanho das cavidades das fibras. Para uma mesma espessura de parede, quanto maior o diâmetro do lume, menor será a densidade da madeira. A espessura da parede e o diâmetro da fibra são as características que freqüentemente têm mais relação com a densidade e com as propriedades mecânicas da madeira (LIMA, 1999).

Foelkel et al. (1971) relatam que dentre as várias maneiras de expressar a densidade da madeira, uma das mais práticas é por meio da densidade básica, que é a relação entre a massa absolutamente seca da madeira, e o seu volume, quando completamente saturado de água. Segundo Vital (1984) apud Costa (2006), a utilização da densidade básica, dentre outros fatores, é muito difundida por todo o mundo, visto que a madeira é uma substância higroscópica que, sob diferentes condições de umidade relativa e temperatura, adquire diferentes teores de água, levando a mesma amostra a diferentes massas e volumes. A densidade básica é um dos índices de qualidade mais estudados, sendo determinada pela relação entre o peso de matéria seca e o volume verde ou saturado de madeira (BRASIL et al, 1994).

Uma relação experimental importante e utilizada nas transformações foi proposta por Newlin (1919) citado por Kollmann & Cotê (1968). Esta relação mostra que a retratibilidade volumétrica total é diretamente proporcional à densidade básica e pode ser dada pela relação  $R_v = 28\rho_b$ .

Rezende (1997) e Rezende et al. (1998) propuseram equações de conversão da densidade (pelo método de atenuação da radiação gama) com a densidade a U% de umidade com a densidade a 0 % de umidade, a densidade a 0% de umidade com a densidade básica e a densidade 12%. As relações são válidas para árvores dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. As equações de conversão (equações 1, 2 e 3) são úteis na caracterização física da madeira, tais equações possibilitam a precisão nos resultados e a determinação de uma densidade a partir de outra.

$$\rho_0 = \frac{\rho_U}{(1 + 0,01U\%) [(1 - 0,0013U\%) - 0,0050U\% \rho_0]} \quad (1)$$

$$\rho_b = \frac{0,98\rho_0}{1 + 0,24\rho_0} \quad (2)$$

$$\rho_{12} = 1,104\rho_0 - 0,067\rho_0^2 \quad (3)$$

onde:

$\rho_u$ : densidade aparente a U% de umidade;

$\rho_o$ : densidade aparente a 0% de umidade;

$\rho_b$ : densidade básica;

$\rho_{12}$ : densidade aparente a 12% de umidade.

### 2.3 Métodos de determinação da densidade

A determinação da densidade básica da madeira é um dos principais ensaios tecnológicos realizados nas plantações comerciais do gênero *Eucalyptus*, sendo reconhecida como um dos mais importantes índices para análises econômicas da floresta, podendo, para fins práticos, determinar o uso final da madeira (COSTA, 2006).

Os métodos utilizados na obtenção de amostras para a determinação da densidade da madeira podem ser divididos em dois: os destrutivos e não-destrutivos.

No método destrutivo, para a obtenção da amostra é necessária a derrubada das árvores, seja para retirada de discos ou para retirada de cavacos. Por sua vez, no método não-destrutivo, apenas pequenas quantidades de amostras são retiradas da árvore sem a necessidade de abate das mesmas.

O método estereométrico de imersão é um dos métodos mais utilizados em pesquisas desenvolvidas na área florestal. Nele, a massa é determinada com o auxílio de uma balança, com precisão de 0,1g e o volume é determinado pela variação de peso ocasionada quando a madeira é submersa em um líquido. A determinação do volume baseia-se no alívio de peso de uma amostra imersa, consagrada no Princípio de Arquimedes: “a perda aparente de massa de um corpo imerso ou flutuante é igual ao peso do líquido que ele desloca”. Esta é uma das maneiras mais precisas para determinação do volume e pode ser usada para amostra com formato irregular. A água e o mercúrio são os líquidos mais frequentemente utilizados (VITAL, 1984).

Para a determinação do volume pode-se, também, utilizar o método da medição direta. Nesse método, detalhado por Gomes Filho (1964), o contorno de uma amostra irregular é grafado numa folha de papel e recortado. Por pesagem do recorte, conhecendo-se o



peso do papel por unidade de área, estima-se a área do recorte (equivalente à área da amostra do material) que, multiplicada pela espessura da amostra fornece o seu volume.

Thiersch (2002) cita como exemplo de método não-destrutivo para a determinação da densidade da madeira o método de impacto utilizando o Pilodyn. Amaral et al. (1977) utilizaram um método não-destrutivo com auxílio da sonda Pressler em amostras ao DAP e constataram diferenças significantes no valor da densidade média, quando comparada com a amostragem destrutiva utilizando um disco na mesma posição.

Alguns métodos radiológicos são utilizados para determinação das propriedades físicas de materiais diversos, como solo, madeiras, ligas metálicas, etc. Dentre eles destacam-se os métodos que utilizam um feixe de radiação gama, partícula  $\beta$  ou raios X. No caso da madeira, métodos tradicionais mais simples são utilizados quando se deseja obter valores médios por amostra. Entretanto quando se buscam informações pontuais da densidade, faz-se necessário o uso de métodos radiológicos.

Vital (1984) descreve, em detalhes, os métodos tradicionais de determinação da densidade de madeira.

Palermo et al. (2002) analisaram vários métodos e técnicas de diagnose de identificação de anéis de crescimento de árvores tropicais. Concluíram que para a obtenção de informações detalhadas sobre a qualidade da madeira ao longo da amostra, ou seja, obtenções de medições pontuais ou milimétricas, os métodos nucleares de densitometria de raios X e raios gama são mais indicados.

Os métodos de determinação da densidade de madeira, pelo uso dos raios X ou partículas  $\beta$ , apesar de apresentarem boa precisão, tem sua aplicação limitada pela espessura da amostra. Para que haja sensibilidade nas determinações, a espessura média das amostras não deve exceder a 1,0 cm para raios-x e 2,0 cm para  $\beta$  do  $^{90}\text{Sr}$ . Em várias situações, no entanto, é necessário trabalhar com amostras mais espessas. Nesses casos, o uso da radiação gama tem se mostrado adequado permitindo trabalhar com amostras variando de 1,0 até 40 cm de espessura (REZENDE, 1997).

De acordo com Ferraz e Aguiar (1985), os princípios que regem a técnica de radiação gama foram recomendados por muitos investigadores nos anos 1950 e depois expostos por Loss (1961 apud Ferraz, 1976). Posteriormente, Parrish (1961 apud Ferraz, 1976) aperfeiçoou o método com o uso de energia da radiação gama.

Segundo Ferraz (1976) a maioria dos autores citados anteriormente usou como fonte de radiação gama o  $^{137}\text{Cs}$ , com um fotopico de 662KeV e que devido à baixa densidade do material (madeira) e os baixos valores de seus coeficientes de atenuação de massa, a interação de fótons desta faixa de energia não proporcionaram boa sensibilidade, até mesmo em grandes amostras. Em muitos casos, foram exigidas amostras ao redor de 50 cm de espessura para se obter boa interação entre a radiação e a madeira.

Parrish (1961) apud Ferraz, 1976, estudando tal limitação, testou vários radioisótopos com radiação gama de energias diferentes e recomendou aqueles cujas energias variem de 23 a 135 KeV.

Ferraz (1976), ao estudar a determinação simultânea de densidade e umidade do solo, trabalhou com fontes de  $^{241}\text{Am}$ , cuja energia é de 60 KeV e percebeu as vantagens de sua utilização na determinação da densidade de madeira. Em 1976 introduziu a técnica de atenuação da radiação gama por  $^{241}\text{Am}$  para mensurar o fluxo de água na madeira devido à sua boa sensibilidade, simplicidade e indestrutibilidade. Rezende (1984), no estudo da biomassa de *Eucalyptus grandis*, faz uma descrição da técnica.

São vários os trabalhos que empregam a técnica da atenuação da radiação gama nos estudos dos perfis radiais de densidade, na identificação dos anéis de crescimento, na determinação de incrementos anuais de massa e volume, dentre outros, podendo ser citados os realizados por Rezende (1997), Aroni (2005) e Costa (2006).

## **2.4 Modelos representativos da forma e volume das árvores**

Segundo Larson (1963), a forma do tronco das árvores pode ser considerada sob a ótica de conceitos dendrométricos e biológicos.

Borges, citado por Friedl (1989), do ponto de vista dendrométrico a forma do fuste de árvores genericamente é sua configuração externa que, a rigor, não se identifica com a forma de um sólido geométrico específico, mas sim com vários, segundo a porção do tronco considerada. De uma maneira mais restrita, a forma do fuste pode ser associada ao termo afilamento que representa a diminuição do diâmetro com o aumento da altura, tendência natural que ocorre na maioria das espécies e, como tal, pode ser expressa por

uma função matemática que descreve a tendência dessa variação. Afilamento do tronco (“*taper*”) tem sido definido como o decréscimo em diâmetro da base para a extremidade superior do tronco.

No Brasil, tradicionalmente, estudos de perfil do tronco de árvores baseiam-se em equações que permitem estimar o diâmetro (ou o raio) em qualquer altura ao longo do tronco como os estudos de Guimarães e Leite (1992), Figueiredo Filho et al. (1996), Schneider et al. (1996), Silva et al. (1997), Assis et al. (2001), Fischer et al. (2001), Chichorro et al. (2003) e Mendonça et al. (2007). Atualmente, tendo em vista a obtenção de múltiplos produtos de uma floresta, estudos têm sido realizados visando à estimativa da altura em qualquer parte do tronco em função do diâmetro ou raio, sendo que normalmente são valores de diâmetros mínimos que restringem o uso comercial de um produto ou tora. Trabalhos com tal modelagem são citados por Calegario (2002) e Pires (2004).

Alguns modelos de “*taper*” – que descrevem o afilamento natural do fuste das árvores - são citados na bibliografia e de uso corrente são apresentados nas equações 4 e 5.

- Polinômio de 5º grau de Prodan (1965):

$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i}{H} \right) + \beta_2 \left( \frac{h_i}{H} \right)^2 + \beta_3 \left( \frac{h_i}{H} \right)^3 + \beta_4 \left( \frac{h_i}{H} \right)^4 + \beta_5 \left( \frac{h_i}{H} \right)^5 + \varepsilon_i \quad (4)$$

- Polinômio de potências fracionárias e inteiras ou modelo de Hradetzky (1976):

$$\frac{d_i}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_i^{p1}}{H^{p1}} \right) + \beta_2 \left( \frac{h_i^{p2}}{H^{p2}} \right) + \dots + \beta_n \left( \frac{h_i^{pn}}{H^{pn}} \right) + \varepsilon_i \quad (5)$$

onde:

DAP: diâmetro a 1,30 m de altura;

d<sub>i</sub>: diâmetro do fuste medido a uma altura h<sub>i</sub>;

h<sub>i</sub>: altura medida ao longo do fuste;

- H: altura total;  
 $\beta_i$ : parâmetros dos modelos a serem estimados;  
 $p_i$ : potências dos polinômios de Hradetzki a serem selecionados;  
 $\varepsilon_i$ : erro de estimativa.

De acordo com Rios (1997), com o avanço das técnicas de informática, é possível trabalhar com modelos mais complexos para estimar perfil de fuste como, por exemplo, modelos polinomiais, modelos polinomiais segmentados, modelos sigmoidais. Mais ainda, é possível fazer análises cada vez mais complexas como, por exemplo, modelos não lineares sigmoidais de efeito misto, no ajuste do perfil de árvores. Com este tipo de modelagem é possível inserir nos modelos os mais diversos fatores que possam afetar a estimativa do perfil, tais como: idade, espécie / clone, densidade, sítio, dentre outras.

Independente das irregularidades das seções transversais dos troncos, as árvores possuem determinado tipo de forma de tronco que varia com a espécie e em função de vários fatores como o sítio, a densidade do povoamento, a intensidade do vento que age sobre a copa das árvores e as intervenções silviculturais aplicadas aos povoamentos, como os desbastes e a desrama (SCHNEIDER, 1993). Segundo o autor, um grande número de estudos sobre a forma de troncos foram desenvolvidos para demonstrar como obter diâmetros e respectivos volumes a partir de alturas relativas, tomadas ao longo do fuste.

Prodan (1965) desenvolveu pesquisas neste sentido e concluiu que o tronco das árvores deveria ser dividido em pelo menos três seções distintas, para efetuar o estudo de forma. Posteriormente, Jokela (1974) demonstrou que a forma de tronco de *Picea excelsa* é constituída de três partes distintas, sendo a parte côncava inferior descrita por uma hipérbole, a parte central do fuste por uma função logarítmica e a parte superior por um cone.

Segundo Spurr (1952), foi Schuberg que em 1881 introduziu o conceito de quociente de forma como a relação entre dois diâmetros tomados, respectivamente, a metade da altura da árvore e a 1,30 metros do solo, desenvolvendo-se, a partir daí, uma série de pesquisas sobre forma de tronco para definição de sortimentos de madeira.

Diversos trabalhos têm utilizado, desde a década de 1960, dendrômetros para a avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores

tropicais e temperadas, podendo ser citados os realizados por Mariaux (1969 e 1970), Détienne et al. (1988), Détienne (1989), Worbes (1999), Botosso e Tomazello Filho (2001), Sheil (2003), Deslauriers et al. (2003), Biondi, Hartsough e Galindo, 2005, Felker e Leon (2005), Schöngart et al. (2006), dentre outros.

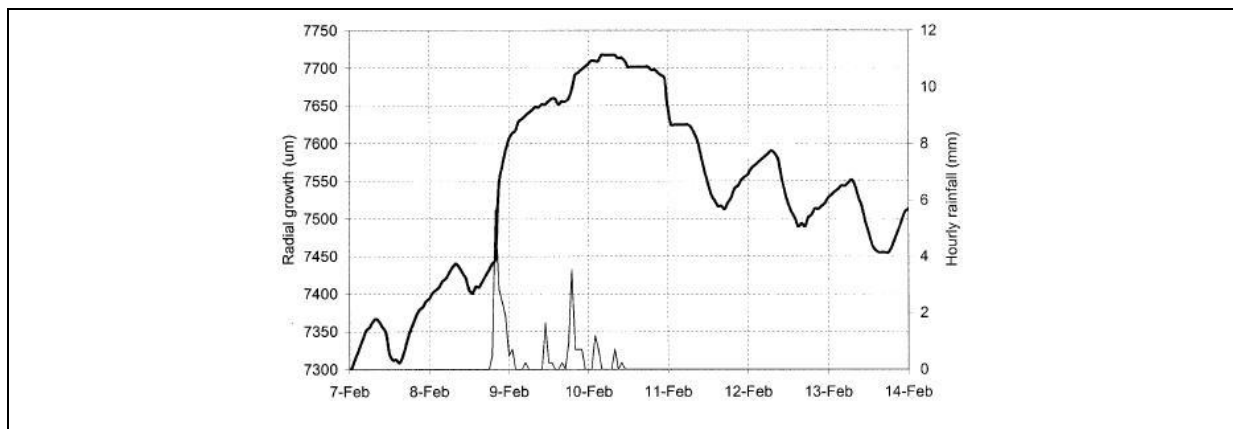
Contudo, em plantações de eucalipto, os trabalhos que aplicam as faixas dendrométricas são escassos, destacando-se o desenvolvido na Itália por Valenziano e Scaramuzzi (1967) durante 1,7 anos mensurando o crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus viminalis* de 9 anos de idade. As espécies apresentaram o mesmo padrão de crescimento em diâmetro do tronco, com dois períodos distintos de crescimento: (i) baixo ou nulo no outono/inverno, devido à limitação de temperatura que provocou a interrupção ou parada da atividade cambial e (ii) alto na primavera/verão, devido à retomada da atividade cambial, proporcionado pela temperatura favorável. Não houve relação aparente da distribuição das chuvas com a periodicidade do crescimento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto (SETTE JUNIOR, 2010).

Segundo Piennar citado por Figueiredo Filho (1991), a relação do fator de forma natural com a idade mostra que a melhora da forma nas idades jovens é bastante rápida, estabilizando-se com o passar do tempo. Normalmente, o que ocorre é que as árvores jovens têm uma copa comprida e uma forte conicidade.

Green (1969) mensurou com dendrômetros por 6 meses, as variações em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus pauciflora*, em duas altitudes na Austrália, correlacionando com as variáveis climáticas. Concluiu que, no verão, houve queda na curva de crescimento sazonal das árvores devido ao estresse hídrico, o que aumentou a taxa de perda de água e reduziu a absorção das raízes das árvores, limitando sua atividade cambial.

O padrão de crescimento do tronco, avaliado a cada dia, através de dendrômetros pontuais, foi obtido por Downes, Beadle e Worledge (1999) para árvores de *Eucalyptus globulus* e *Eucalyptus nitens* irrigadas e controle. A interação entre as variáveis climáticas e o crescimento cambial das árvores das 2 espécies de eucalipto é complexa e atua durante todo o ano. A precipitação explica entre 22 e 36 % da variação do incremento em diâmetro do tronco diário das árvores, sendo este resultado atribuído ao aumento do incremento imediatamente após as chuvas (Figura 5). Os resultados indicam a necessidade do melhor entendimento da interação entre variáveis climáticas e o crescimento cambial ao nível

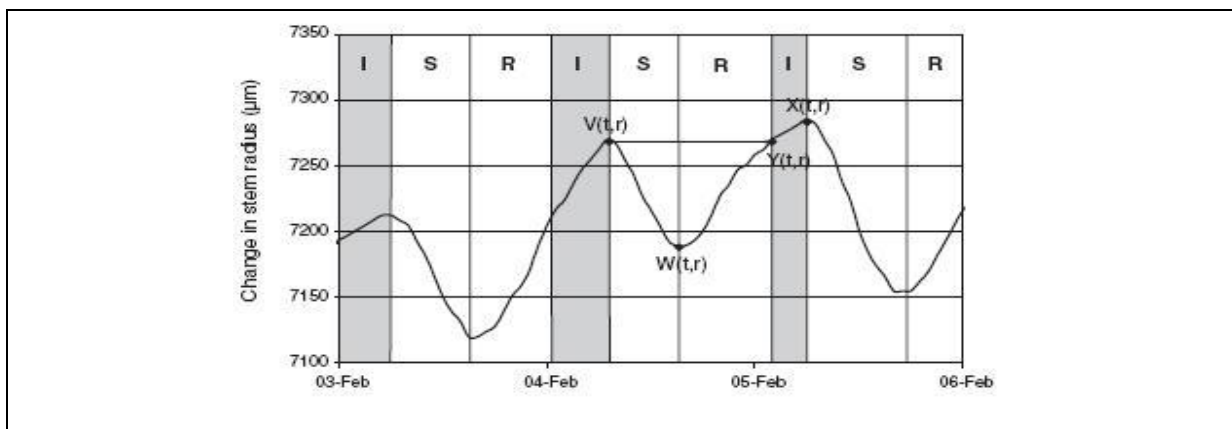
da fisiologia de toda a árvore, com o objetivo de compreender o efeito sobre a atividade cambial e, desta forma, no crescimento do tronco.



**Figura 5** – Efeito da precipitação (linha basal delgada) no incremento em diâmetro do tronco (linha espessa) de árvores de *Eucalyptus globulus*.

Fonte: Downes, Beadle e Worledge (1999).

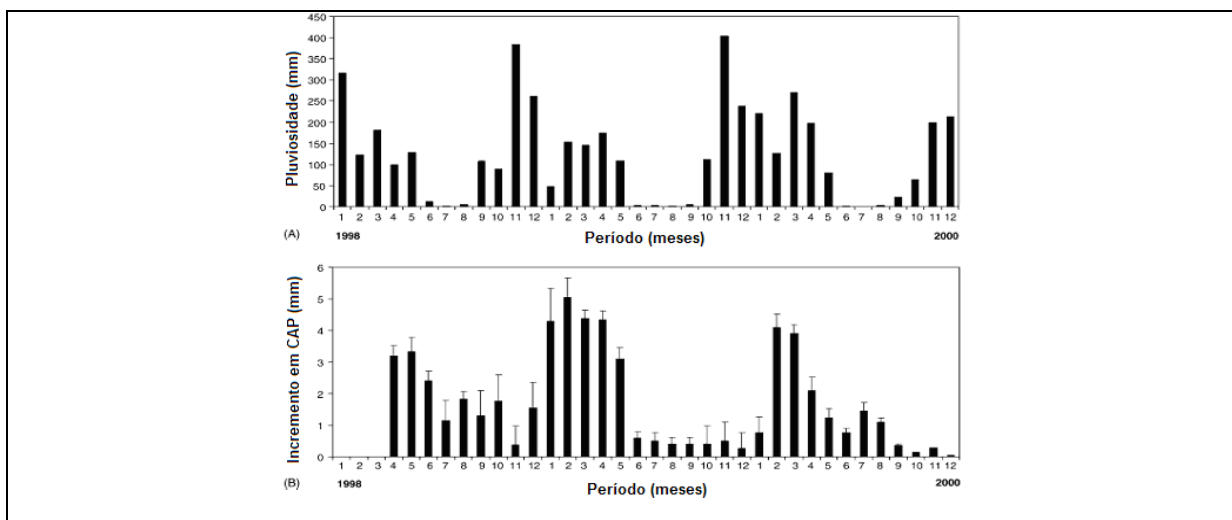
O crescimento radial do tronco de árvores de *Eucalyptus nitens*, de 6 anos, em diferentes regimes de irrigação, foram mensurados por Wimmer, Downes e Evans (2002), por 2 estações de crescimento, na Tasmânia, com o uso de dendrômetros (variação diária). As árvores submetidas à seca severa tiveram baixos incrementos do tronco e as irrigadas foram suscetíveis às mudanças do clima. A Figura 6 mostra o ciclo diário de incremento em diâmetro do tronco das árvores de eucalipto no verão, durante 3 dias: (i) retração ou redução do crescimento (S), geralmente ocorrendo no início da manhã, (ii) recuperação ou aumento no crescimento há, definido como a fase do ciclo durante o qual ocorre o aumento do incremento e (iii) incremento (I) fase do crescimento do tronco até a retração ocorrida no dia seguinte (SETTE JUNIOR, 2010).



**Figura 6** – Ciclo diário de mudanças no diâmetro do tronco.

Fonte: Wimmer, Downes e Evans (2002).

Laclau et al. (2005) utilizaram faixas dendrométricas para estudar o incremento do tronco de árvores de eucalipto em plantações clonais do 6º - 9º ano, estabelecidas em solos de savana no litoral do Congo. Concluíram que há um forte efeito da sazonalidade climática sobre o crescimento das árvores de eucalipto, com o máximo ocorrendo no final da estação chuvosa (janeiro-maio) e o mínimo durante a estação seca (junho-setembro) (Figura 7). É relevante observar que o mínimo absoluto de cada ano ocorreu sempre dois meses após as primeiras precipitações da estação chuvosa.



**Figura 7** - Precipitação mensal (A) e incremento mensal do tronco de 30 árvores de eucalipto de abril de 1998 a dezembro de 2000 (B).

Fonte: Laclau et al. (2005).

O crescimento em diâmetro do tronco de árvores jovens de *Eucalyptus grandis* foi monitorado por Sette Jr et al. (2008), durante 2 anos, através de dendrômetros de aço, submetidas a diferentes tratamentos de fertilização. Segundo os autores, o crescimento em diâmetro do tronco das árvores foi afetado pelos tratamentos de fertilização mineral e pelas variáveis climáticas.

Já o volume de madeira de uma floresta é de extrema relevância, pois a valorização da madeira e dos produtos florestais e a necessidade do uso social, ecológico e economicamente correto dos recursos florestais nativos e plantados aumentam cada vez mais. A preocupação com o planejamento, ordenamento e o uso da madeira, cada vez exigem uma maior precisão na quantificação do volume dos povoamentos florestais.

As equações de volume são fundamentais na tomada de decisões de povoamentos florestais. Por isso, várias equações matemáticas foram desenvolvidas para se estimar o volume de povoamentos florestais, porém, apesar da eficiência de alguns modelos, que nem sempre se ajustam às espécies e condições de interesse são recomendadas testar vários modelos volumétricos, por meio de análises estatísticas, escolher o que melhor se identifica para cada caso (SILVA, 2008).

Esses modelos volumétricos utilizam uma variável dependente que é o volume, associado a variáveis independentes de fácil mensuração na floresta, como o diâmetro à altura do peito e a altura (MACHADO et al., 2002 citado por MIGUEL 2009). Através dessas equações matemáticas pode-se estimar volumes individuais de árvores e, com base num procedimento de amostragem realizado em campo, utilizando unidades amostrais (parcelas), chega-se a estimativas de volume por parcelas, podendo em seguida ser extrapolado para o hectare e, por fim, para toda a população em estudo. Para determinação de volumes individuais de árvores, vários métodos foram e ainda estão sendo desenvolvidos.

Reinecke, citado por Loestch et al. (1973), foi o primeiro a propor a determinação do volume através do método gráfico. Entretanto, com o uso da computação eletrônica os métodos analíticos tornaram-se mais usados.

Conforme Husch et al. (1982), o volume de um sólido com seções transversais conhecidas pode ser obtido pelo somatório do volume de cada uma das seções que o compõem.



De acordo com Loetsch et al. (1973) as três maneiras mais comuns para a determinação de volumes individuais são através das fórmulas de Huber (equação 7), Newton (equação 8) e Smalian (equação 9):

- Fórmula de Huber:

$$V = g_{\frac{1}{2}}L \quad (7)$$

- Fórmula de Newton:

$$V = \frac{1}{6}L \left( g_1 + 4g_{\frac{1}{2}} + g_2 \right) \quad (8)$$

- Fórmula de Smalian:

$$V = \left( \frac{g_1 + g_2}{2} \right) L \quad (9)$$

onde:

V: volume da seção;

$g_1$ : área transversal no extremo inferior;

$g_2$ : área transversal no extremo superior;

$g_{\frac{1}{2}}$ : área transversal na metade do tronco;

L: comprimento do tronco.

Atualmente constata-se, entretanto, a aplicação da prática de modelos para forma de troncos em inventários florestais. Adicionalmente, a julgar pelas necessidades enfrentadas no manejo de recursos florestais no Brasil, acredita-se em um fortalecimento dos esforços direcionados na aplicação desta técnica em investigações da forma e do volume de troncos.

## 2.5 Modelos estimadores da densidade da madeira de eucalipto

O desenvolvimento de metodologias que propiciem inferir sobre a densidade da madeira possibilitará aos profissionais ligados ao inventário florestal fazer, não apenas estimativas volumétricas, mas também estimativas em massa e rendimento industrial (SCOLFORO, 2005). Esta visão tende a impactar toda uma cadeia produtiva, visto que a fonte de matéria prima para estes setores é a floresta.

Os métodos de determinação da densidade básica da madeira podem ser didaticamente classificados em destrutivos e os não destrutivos. Um método não destrutivo clássico é o uso do instrumento “pilodyn” que avalia a resistência à penetração do aparelho no lenho da árvore e a associa à sua densidade, ou seja, relaciona a profundidade de penetração de uma agulha de aço cravada com uma força constante na árvore, com a densidade da madeira (COWN, 1978, 1979).

Mais recentemente, aparelhos têm sido desenvolvidos com tecnologias de ponta para determinação da densidade da madeira, um exemplo é o NIRS, que obtém os valores da densidade da madeira em corpos de prova, a partir da mensuração de valores de emissão de ondas próximas do infravermelho. Ao avaliarem a precisão do método NIR (Near Infrared Red Spectrometer) aplicada na estimativa da densidade básica de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, Hein et al. (2009) concluíram que o método é totalmente aplicável, devido a sua alta precisão e o pouco tempo demandado para análises quando comparado ao método tradicional de obtenção da densidade básica da madeira.

Depois de avaliada a densidade da madeira, com uso dos mais diferentes métodos, torna-se necessária a sua modelagem, para que se possam fazer extrapolações para todo um empreendimento. Segundo Franco (1996), a biomassa total e comercial para *Eucalyptus camaldulensis* é estimada com precisão por uma equação de dupla entrada e ainda que haja uma tendência de aumento da densidade no sentido base-topo e com a idade.

## 2.6 O melhoramento genético florestal

Em sua forma mais comum, o melhoramento genético florestal se dá através da seleção de indivíduos superiores, identificados em plantações comerciais, os quais podem ser vegetativamente multiplicados, ou restabelecidos em um delineamento adequado para a comprovação de sua superioridade genética, para a produção de sementes ou para a propagação comercial. Quando se faz melhoramento de uma espécie mesmo que a finalidade seja a de produção, de híbridos finalmente, é importante manter as espécies puras que deram origem ao novo indivíduo, escolhendo os melhores genótipos para reprodução de melhoramento (BRUNE, 1979).

Em espécies florestais, de modo geral, as estratégias básicas de melhoramento podem ser resumidas em seleção de procedências e seleção individual dentro das populações-base, utilizando-se a variabilidade existente naturalmente dentro das populações e entre os indivíduos. Para recombinação do material genético selecionado, bem como para dar continuidade à seleção recorrente, utilizam-se povoamentos conhecidos como áreas de coleta e produção de sementes ou pomares de sementes por mudas clonais. Testes de progênie convencionais são utilizados para a seleção dos indivíduos superiores. Já por via assexuada, o melhoramento é efetuado por meio do enraizamento de propágulos de árvores selecionadas, muitas vezes híbridas, para a implantação de testes clonais e áreas de multiplicação clonal, fundamentais para a silvicultura intensiva clonal (FERREIRA, 1992).

O maior interesse pelo melhoramento florestal é devido ao valor que a madeira melhorada representa para a economia nacional e também pela pequena área ocupada para produzir maior quantidade de madeira, de melhor qualidade em menor tempo. O uso de técnicas de melhoramento busca um aumento na produção com uma qualidade maior de plantas geneticamente modificadas em relação às árvores não melhoradas (BOREM, 1999).

As principais características que o melhoramento florestal tem objetivado são referentes ao incremento do crescimento; da produtividade (madeira, fibras, energia renovável); alterações das propriedades químicas da madeira (teor e tipo de lignina e celulose); modificações das propriedades físicas da madeira (ângulo de fibras, espessura de parede); melhoramento visando à resistência às doenças; a tolerância a estresses abióticos

(geadas, seca, salinidade); melhoria da capacidade fotossintética; dos caracteres fisiológicos; uso em biorremediação; a produção de compostos farmacêuticos; alterações na arquitetura da árvore (ramos, nós, interceptação de luz), dentre outros (GRATTAPAGLIA, 2008).

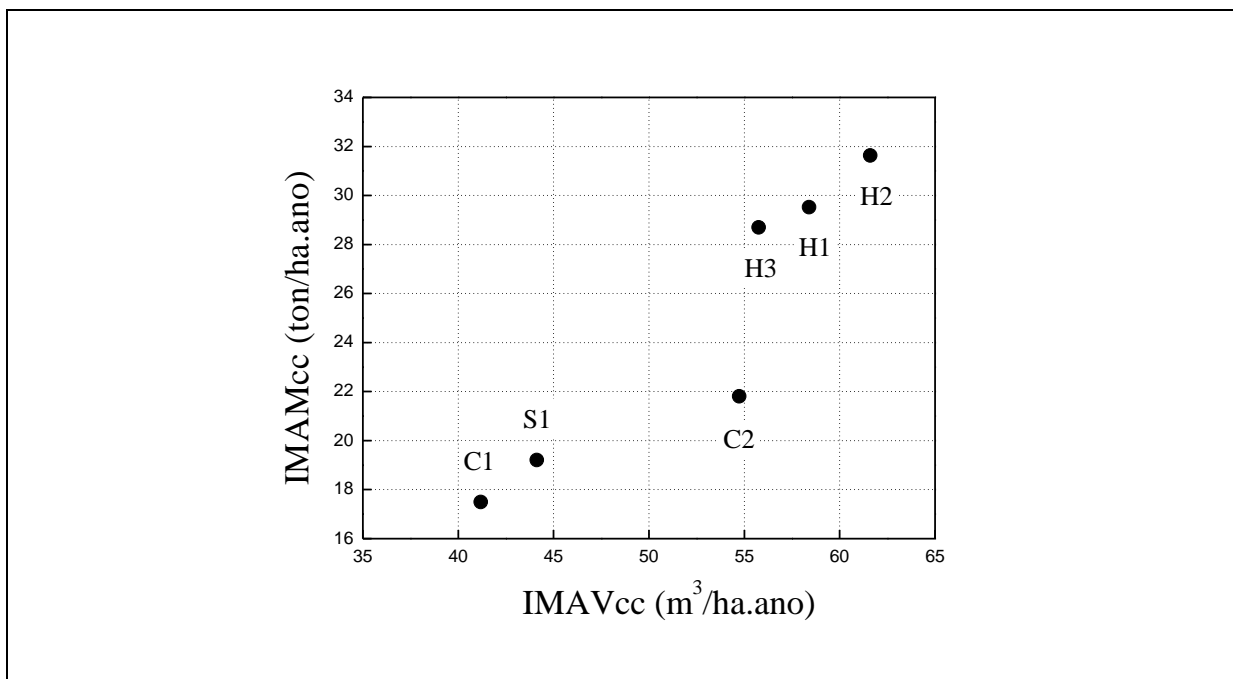
Os ganhos genéticos associados aos retornos financeiros oriundos do Melhoramento dependem das características genéticas oriundas das populações que estão sendo utilizadas no programa de melhoramento; os níveis de conhecimento de tais características, a escolha das estratégias, dos objetivos e das tecnologias que serão utilizadas durante o melhoramento, bem como os custos e retornos associados a este; e o valor dos produtos e serviços oferecidos pelas populações melhoradas (BURLEY & KANOWSKI, 2005).

Basicamente, o resultado do melhoramento genético ocorre em função: da variabilidade genética existente, da intensidade de seleção a ser praticada (manuseada pelo homem) e da herdabilidade do caráter de interesse na espécie e condições disponíveis.

As tendências de melhoramento genético florestal são várias, entre elas: a continuidade dos programas de melhoramento visando explorar a variabilidade existente através da recombinação dentro da espécie; a produção de árvores híbridas visando atender exigências industriais; a identificação ou caracterização de árvores selecionadas através de técnicas de marcadores moleculares; na utilização da clonagem como alternativa para plantações altamente produtivas, combinada a cuidados ambientais necessários a tal prática; a utilização intensa da seleção precoce visando minimizar o fator tempo e as pesquisas na área de transgênicos x impactos ambientais (ARONI, 2005).

Portanto, para implantação de programas de melhoramento genético a partir dessas populações de *Eucalyptus* spp., torna-se imprescindível conhecer a divergência genética, com os objetivos de identificar clones ou genótipos para instalação de pomares de sementes clonais, maximizar a distância genética pela recombinação de genes ou complexos gênicos em novas combinações favoráveis e fazer uma seleção indireta e precoce para características da madeira (propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas).

A figura 8 ilustra uma situação-exemplo, na qual foi evidente os ganhos em densidade e volume que os plantios clonais aliados a hibridização promoveram. Os híbridos apresentaram aumento da densidade durante o crescimento, e conseqüentemente, maior variação da densidade na direção radial comparado aos outros tratamentos



**Figura 8** - Incremento médio anual de massa com casca (*IMAMcc*) em função do incremento médio anual de volume com casca (*IMAVcc*) dos tratamentos: *S1*, seminal de *Eucalyptus grandis*; *C1* e *C2*, clones 1 e 2 de *E. grandis*; *H1*, *H2* e *H3* clones 1, 2 e 3 de híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*.

Fonte: Costa (2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição do local de amostragem e dos clones

As árvores utilizadas no estudo foram disponibilizadas pela empresa Duraflora S.A., localizada no município de Agudos – SP. São provenientes de dois povoamentos florestais de *Eucalyptus spp.* de testes clonais exploratórios, produzidos a partir de estaquia (clonagem), cujas medições de diâmetro e altura foram realizadas aos 2, 4 e 6 anos de idade.

As árvores foram obtidas de plantações da empresa em duas regiões distintas:

- Região de Lençóis Paulista – SP codificada como (LP). O local é classificado por desempenho e ranqueado pela empresa Duraflora S.A. como inferior. Possui solo tipo latossolo vermelho distrófico típico, A moderado, álico, textura média e relevo suave ondulado, altitude local de 675 m, longitude 48° 50' 36,4" e latitude 22° 51' 48,2" e com precipitação média de 1350 mm/ano (Figura 9A). A área do experimento é de 0,54 ha.
- Região de Itapetininga – SP codificada como (I). O local é classificado por desempenho e ranqueado pela empresa Duraflora S.A. como superior. Possui solo tipo latossolo vermelho-escuro epiálico distrófico, A moderado, textura arenosa e relevo suave ondulado, altitude local de 656 m, longitude 48° 03' 37,7" e latitude 23° 59'

59,1” e com precipitação média de 1250 mm/ano (Figura 9B). A área do experimento é de 1,71 ha.

Nas duas áreas o delineamento experimental no plantio foi o de blocos casualizados com seis repetições com espaçamento 3 m x 2 m entre plantas.



**Figura 9** – Aspecto das parcelas das árvores de *Eucalyptus spp.*: A) Região de Lençóis Paulista – SP (LP) e B) Região de Itapetininga – SP (I).

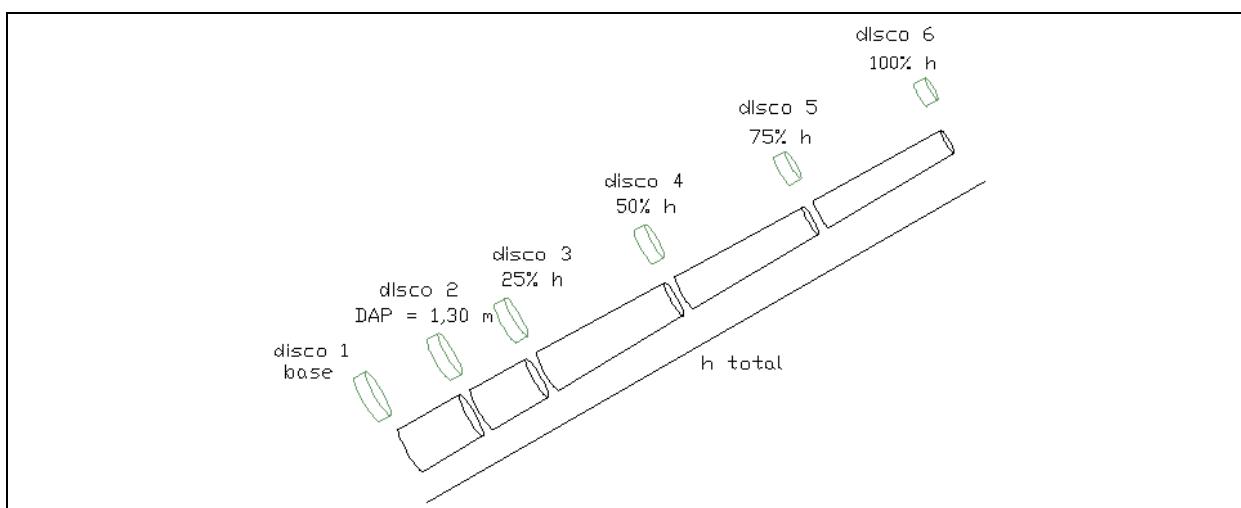
Em cada uma dessas regiões, as amostras de madeira foram retiradas de árvores de dois clones de *Eucalyptus spp.* de uso operacional da empresa, sendo estes classificados por seu desempenho e ranqueados como: clone 1 – superior (considerado de maior produtividade pela empresa) e clone 2 – (considerado de menor produtividade pela empresa). Assim, estabeleceram-se quatro situações distintas:

- LP – C1: clone 1 – região de Lençóis Paulista;
- I – C1: clone 1 – região de Itapetininga;
- LP – C2: clone 2 – região de Lençóis Paulista;
- I – C2: clone 2 – região de Itapetininga.

### 3.2 Ensaio piloto

A seleção final das árvores foi precedida por um ensaio piloto, para analisar eventual diferenciação em relação à densidade básica da madeira em função das

classes diametrais das árvores: dominantes, co-dominantes e dominadas. Foram selecionadas e abatidas três árvores por classe de diâmetro, totalizando nove. De cada árvore foram coletados o diâmetro com casca e a altura comercial (corresponde ao ponto de corte na base da árvore até a primeira bifurcação dos seus galhos) e total. De cada árvore foram ainda retirados discos de madeira, com aproximadamente 5,0 cm de espessura, na base, DAP (1,30 m do solo), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (Figura 10).



**Figura 10** – Ensaio piloto - esquema de coleta de discos ao longo do fuste das árvores selecionadas.

Os discos de madeira foram colocados em sacos plásticos, acrescidos com um volume de água (para mantê-los saturados), depois lacrados e levados para análises realizadas no Laboratório de Física do Departamento de Física e Biofísica – IBB/UNESP – Botucatu/SP.

Para determinação da densidade básica foram utilizados os discos com e sem casca, coletados nas seis posições descritas. Foi utilizado o método de estereometria por imersão método eficaz e rápido e tendo em vista a condição saturação das amostras.

### 3.3 Amostragem das árvores

Considerando-se os resultados obtidos no ensaio piloto, as amostras de madeira foram retiradas para as quatro situações já descritas, sem estratificação das árvores



por classe diametral. Foram amostradas seis árvores de cada clone na idade de 6 anos, dentro das parcelas dos testes clonais nos dois sítios operacionais distintos da empresa, já descritos.

Em cada sítio foram amostradas, portanto, 12 árvores (6 por clone) e de cada árvore foram retirados discos (seções) de aproximadamente 5,0 cm de espessura, a cada 2,5 m do tronco, ao longo do comprimento do fuste até a altura comercial da árvore e no diâmetro à altura do peito (DAP - 1,30 m) que corresponde à região onde foram registradas as medições bianuais realizadas pela empresa. Os discos das árvores de 6 anos foram identificados com algarismos alfanuméricos, sendo os dois primeiros LP (Lençóis Paulista) e I (Itapetininga), correspondentes à região, C1 (clone 1) e C2 (clone 2), correspondentes aos tratamentos, o número seguinte de 1, 2, 3, 4, 5 e 6 correspondente as seis repetições de árvore do tratamento e o último número que variava de 0, 1,30 m (DAP), 2,5 m, 5,0 m, 7,5 m, 10,0 m, 12,5 m, 15,0 m, 17,5 m, 20,0 m, 22,5 m, 25,0 m e 27,5 m de acordo com a altura de amostragem de discos ao longo das árvores até a sua altura comercial.

Adicionalmente, para o estabelecimento das funções taper das situações estudadas, foram amostrados os mesmos dois clones, nas mesmas condições de sítio, nas idades de 2 e 4 anos. Foram selecionadas 12 árvores em cada idade (2 e 4 anos) que apresentassem alturas as mais semelhantes possíveis àquelas identificadas no inventário florestal nas idades passadas respectivas de 2 e 4 anos para os indivíduos que na data do estudo tinham 6 anos. Assim, foram amostradas, ainda, 24 árvores na idade de 2 anos e 24 árvores na idade de 4 anos. De cada árvore foram retirados discos de aproximadamente 5,0 cm de espessura, a cada 1 metro de altura da árvore.

### **3.4 Densidades da madeira à idade de 6 anos**

As densidades (aparente e básica) da madeira à idade de 6 anos foram determinadas usando-se o método da atenuação de radiação gama. Complementarmente, os resultados obtidos por esse método indireto de avaliação foram calibrados com os obtidos na metodologia convencional de determinação de densidade básica da madeira, baseada na estereometria por imersão.

### 3.4.1 Densidade aparente pontual dos discos

A densidade aparente pontual dos discos das árvores amostradas foi avaliada pelo método da atenuação de radiação gama. As análises de detecção da radiação gama foram realizadas no Laboratório de Física do Departamento de Física e Biofísica – IBB/UNESP – Botucatu/SP, a fim de se obter a densidade aparente pontual ao longo de um raio médio dos discos evitando-se nós e rachaduras.

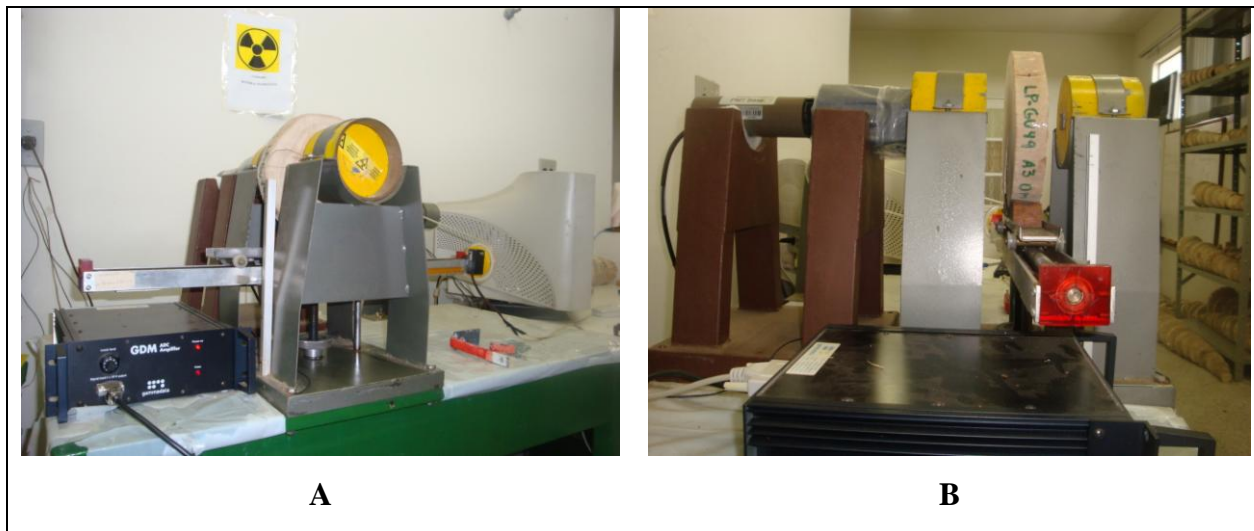
O equipamento utilizado foi desenvolvido e confeccionado no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências – IBB/UNESP – Botucatu/SP, conforme descrito por Costa (2006). Esse equipamento possui basicamente os seguintes componentes:

- Uma fonte de radiação gama selada e blindada com o radioisótopo  $^{241}\text{Am}$  com meia vida de 458 anos, atividade de 200 mCi e fotopico de 59,6 KeV com intensidade de emissão de 35,9% (REZENDE et al., 1999; Palermo et al., 2004);
- Um sistema de detecção por cintilação sólida com um cristal de iodeto de sódio com traços de tálio NaI (T1) inserido em uma válvula fotomultiplicadora acoplada a uma fonte de alta tensão da marca GDM e ligada a um amplificador de sinal da marca GDM;
- Uma placa de conversão de sinal A/D (Analógico/Digital), instalada em um micro computador para o fornecimento dos valores de  $I$  e  $I_0$  por meio de um programa específico do sistema de detecção da marca GDM, que funciona na plataforma Windows<sup>®</sup>;
- Um aparato eletromecânico para a movimentação automática da amostra - discos.

No equipamento a fonte é fixada de forma que o feixe seja emitido horizontalmente, a aproximadamente 30,3 cm de altura da plataforma da mesa onde foi montado. O sistema de detecção é fixado frontalmente ao feixe, a 10 cm da saída da fonte, e o aparato eletromecânico, projetado para promover a movimentação do disco, está montado entre a fonte e o sistema de detecção.

O aparato eletromecânico funciona por meio de um parafuso com rosca sem fim, que gira por meio de uma transmissão de polia-correia ligada a um motor

elétrico de potencia variável. Ele permite o deslocamento da base com o disco, através do feixe de radiação, em várias velocidades. A figura 11 apresenta ilustrações do equipamento.



**Figura 11** – Sistema de Atenuação da Radiação do  $^{241}\text{Am}$ . A) vista geral do sistema. B) detalhe lateral da movimentação da amostra entre a fonte de emissão de radiação e o sistema de detecção.

A colimação do feixe de radiação emitida pela fonte é feita por uma fenda de  $\pm 0,5$  mm de largura por 6,0 mm de altura em um anteparo de chumbo fixado na saída da fonte. Após atravessar um disco, o feixe colimado e contínuo é novamente colimado na entrada do detector, que possui um anteparo de chumbo com uma fenda de mesmas dimensões.

O equipamento de detecção fornece um espectro da contagem de radiação versus os canais. Cada um dos 1024 canais do espectro detectam pulsos em diferentes intervalos de intensidades subsequentes, a largura dos canais é igual à janela do discriminador que detecta apenas os pulsos neste intervalo (MONTANHEIRO et al., 1977).

Com o equipamento em funcionamento foi obtido um espectro de energia da fonte. Diminuindo a tensão na válvula fotomultiplicadora o fotopico característico do  $^{241}\text{Am}$  é deslocado para os canais mais baixos do espectro, livres de interferências detectadas com a tensão mais alta. No amplificador foram cortados os ruídos de baixa intensidade, limitando a amplificação para canais mais altos que os ruídos e mais baixos que o fotopico, ficando nítido apenas o fotopico de 59,6 keV do  $^{241}\text{Am}$ .

A partir do espectro foi definida uma janela de aproximadamente 10 canais que compreendia apenas o fotopico principal. Neste radioisótopo existem outros dois fotopicos de menor energia que podiam ser visualizados no espectro, mas não foram considerados na largura da janela. Depois de delimitada as janelas foram obtidas as  $I_0$  praticamente estáveis de aproximadamente 25000 com (contagens por minuto), então o sistema foi programado para realizar medições a cada 7,0 s.

Em seguida, foram descascados, aplainados e lixados até adquirirem espessura uniforme em torno de  $3,0 \pm 0,5$  cm (essa uniformização buscou a constância de espessura  $x$  em (cm) na direção radial), que foi medida utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e precisão de  $\pm 0,005$  mm, a fim de adequá-los aos procedimentos necessários para a utilização do método de atenuação de radiação gama que foi empregada na determinação dos perfis de densidade dos discos; posteriormente os discos foram colocados em ambiente aberto, até obter-se um teor de umidade de aproximadamente 12%, em seguida, as massas dos discos foram medidas utilizando uma balança eletrônica de precisão da marca Gehara, modelo “BG 4000”, com resolução de 0,01 g e precisão de  $\pm 0,1$  g.

Para verificação da umidade determinou-se através da equação 10, o teor de umidade através dos discos de madeira com base na massa seca, quando foram analisadas pelo método da atenuação de radiação gama a  $U$  e pela massa seca obtidas pelo método da estufa a uma temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ .

$$U = \left[ \frac{M_U - M_S}{M_S} \right] \times 100 \quad (10)$$

em que:

$U$ : teor de umidade dos discos, %;

$M_U$ : massa úmida dos discos, em g;

$M_S$ : massa seca em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante, em g.

Após alcançar a umidade de equilíbrio (12%), o raio médio dos discos foi obtido a partir da circunferência do disco, medida com uma fita métrica flexível com resolução de 0,1 cm e precisão de 0,05 cm.

A linha radial dos discos foi determinada a partir do raio médio evitando a presença de nós e rachaduras. Nas amostras que apresentaram rachaduras não foram medidos os espaços gerados na circunferência. Com a medida do raio médio, foi localizada e depois riscada na amostra, uma linha radial com essa distância que não possuía imperfeições, isto é, rachaduras e nós.

Posteriormente foram colocadas duas hastes metálicas de 1,0 mm de diâmetro, uma em cada limite da linha radial, uma na medula e outra na casca, sendo ambas perpendiculares à linha radial.

A amostra de madeira foi encaixada com massa mole (massa para calafetar) na base móvel, certificando-se que a linha de mensuração ficou exatamente na posição horizontal e perpendicular à propagação do feixe.

O motor elétrico foi ajustado pelo potenciômetro para movimentar 1,0 mm a cada 14,4 segundos, a fim de se obter uma média de  $2 \pm 0,05$  pontos por milímetro ao longo do raio médio da amostra. É essencial a centralização da amostra no feixe.

Enquanto eram realizados os ajustes, a amostra era colocada na frente do feixe com o raio médio exatamente na altura do feixe. Cuida-se para que a amostra seja fixada à aproximadamente 5,0 mm antes do seu início, com o objetivo de obter ponto antes da linha radial passando pelas hastes limitadoras para que posteriormente fosse confirmado o início da linha, também foram obtidos pontos após a passagem da amostra para a determinação de  $I_0$  – radiação sem a amostra. Este procedimento foi adotado para todos os discos.

A partir dos dados da radiação gama de cada amostra foram separados os valores de  $I_0$  e  $I$  – taxas de contagens sem e com material absorvedor – madeira -, respectivamente - para cada disco. As hastes densas proporcionavam contagens baixas, fáceis de serem observadas e imprescindíveis na separação de  $I$  das amostras de madeira.

Conforme Parrish (1961) e Ferraz e Mansel (1979), a densidade foi determinada pela absorção diferenciada da radiação, ou seja, quanto maior a densidade, maior é a absorção e tanto menor a quantidade de radiação que atravessará o meio absorvedor.

Para o cálculo da densidade pontual foi utilizada a equação 11, numa adaptação à lei de Beer-Lambert, com correções previstas devido ao tempo morto do sistema eletrônico com uso das equações 12 e 13.

$$\rho_U = \frac{\ln(I_{oc} - BG) - \ln(I_c - BG)}{\mu_m \cdot \chi_m} \quad (11)$$

$$I_{oc} = \frac{I_o}{1 - \tau I_o} \quad (12)$$

$$I_c = \frac{I}{1 - \tau I} \quad (13)$$

onde:

- $\rho_U$ : Densidade da madeira na umidade de equilíbrio (U);
- $\mu_m$ : Coeficiente de atenuação de massa da madeira, em  $\text{cm}^2/\text{g}$ ;
- $\chi_m$ : Espessura da madeira em cm;
- BG: Radiação de fundo em contagens por minuto;
- $I_o$ : Taxa de contagem (contagens/minuto), obtida experimentalmente sem material absorvedor;
- I: Taxa de contagem (contagens por minuto), obtida experimentalmente após passagem através do absorvedor ou da madeira;
- $I_{oc}$ : Valor de  $I_o$  corrigido devido ao tempo morto do sistema eletrônico através da Equação 11;
- $I_c$ : Valor de I corrigido devido ao tempo morto do sistema eletrônico através da Equação 12;
- $\tau$ : Tempo morto do sistema eletrônico ( $1,0 \times 10^{-7}$  minutos).

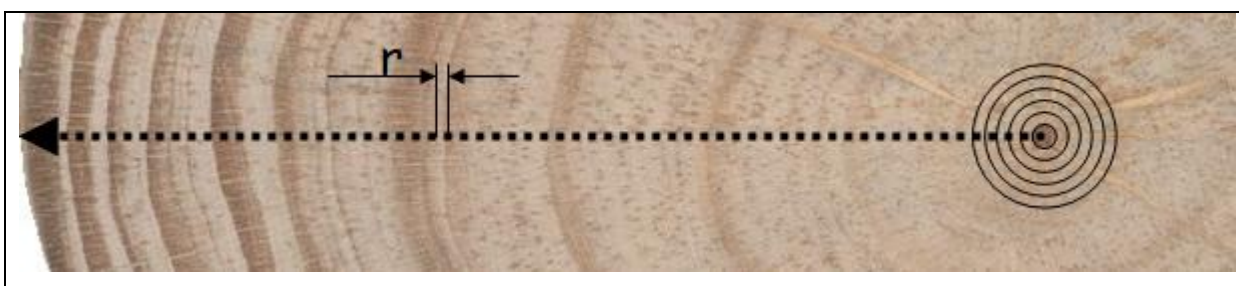
Para cada disco amostrado foram obtidos os valores da densidade pontual em função da distância radial a partir do centro da amostra.

### 3.4.2 Densidades aparente e básica médias dos discos

A densidade média dos discos foi calculada utilizando-se metodologia apresentada por Costa (2006). Essa metodologia baseia-se na suposição de que o disco é

formado por vários anéis delgados e concêntricos, com espessura constante. A justaposição dos anéis, um dentro do outro, reconstituiria o disco.

Conhecendo a densidade em um ponto qualquer de cada anel (Figura 12), considerou-se que essa densidade representa a densidade média do anel, levando em conta que o crescimento do lenho da árvore é distribuído circunferencialmente com mesma densidade. A densidade média do disco foi obtida pela ponderação das densidades pontuais nos anéis, sendo que o fator de ponderação foi o volume do anel, isto é, a densidade do anel com maior volume tem maior representatividade no valor médio da densidade.



**Figura 12** – Idealização da composição de um disco de madeira de conífera: anéis delgados e concêntricos, dos quais são conhecidos a densidade (no ponto central do anel) e seu volume.

**Fonte:** Costa (2006)

A densidade média ponderada do disco foi calculada na umidade da amostra (U) e, posteriormente, foi transformada em densidade básica e em densidade a 12 % pelas equações 1, 2 e 3.

### 3.4.3 Densidade básica ponderada das árvores

A densidade básica média ponderada da madeira de cada árvore ( $\rho_{bmp}$ ) foi avaliada considerando o volume representativo de cada disco como fator de ponderação. Os discos foram amostrados a cada 2,5 m da árvore, a partir da base até a altura comercial, além de um disco adicional, à altura do peito. Assim, a expressão 14 utilizada incorpora o disco amostrado à altura do peito na ponderação original de Pronin (1966).

$$\rho_{bmp} = \left[ \frac{\left( \frac{\rho_0 + \rho_{AP}}{2} \right) (D_0^2 + D_{AP}^2) 1,3 + \left( \frac{\rho_{AP} + \rho_{2,5}}{2} \right) (D_{AP}^2 + D_{2,5}^2) 1,2 + \sum_{i=1}^{z-1} \left( \frac{\rho_{i \times 2,5} + \rho_{(i+1)2,5}}{2} \right) (D_{i \times 2,5}^2 + D_{(i+1)2,5}^2) 2,5}{(D_0^2 + D_{AP}^2) 1,3 + (D_{AP}^2 + D_{2,5}^2) 1,2 + \sum_{i=1}^{z-1} (D_{i \times 2,5}^2 + D_{(i+1)2,5}^2) 2,5} \right] \quad (14)$$

onde:

$\rho_{bmp}$ : densidade básica média ponderada da árvore;

$\rho$ : densidade básica da madeira dos discos para cada uma das alturas amostradas;

D: diâmetro dos discos sem casca a cada uma das alturas amostradas;

AP: refere-se ao disco amostrado à altura do peito;

n: número de segmentos do fuste com comprimento de 2,5 m;

H: altura total da árvore;

z:  $z = \text{int} \left( \frac{H}{2,5} \right)$ , int é igual à parte inteira da divisão da altura dividido por 2,5 m.

### 3.5 Funções *taper* para as árvores às idades de 2 e 4 anos

As funções *taper* foram estabelecidas para cada um dos dois clones e para cada uma das duas regiões abordadas no estudo, considerando-se as idades de 2 e 4 anos. Assim, foram estabelecidas 8 equações (2 clones x 2 regiões x 2 idades).

Os modelos utilizados foram baseados no polinômio de 5º grau de Prodan e no polinômio de potências fracionárias e inteiras de Hradetzky, expressos nas equações (4) e (5), já apresentadas.

Com uso das equações *taper* foram estimados os diâmetros das árvores nas diferentes situações, às idades de 2 e 4 anos. Os diâmetros foram, por fim, utilizados na demarcação das regiões de 2 e 4 anos em cada um dos perfis de densidade obtidos pelo método da atenuação de radiação gama descrita no item 3.4.1.



### **3.6 Densidades da madeira às idades de 2 e 4 anos**

Com os diâmetros às idades de 2 e 4 anos demarcados em todos os discos das árvores de 6 anos, foi possível, com o emprego dos resultados da técnica de atenuação de radiação gama, avaliar a densidade média das regiões correspondentes a essas idades, para cada um dos discos.

Utilizando-se de procedimentos semelhantes aos estabelecidos no item 3.4.3, foram, por fim, estimadas as densidades das árvores às idades passadas de 2 e 4 anos, a partir dos discos das árvores de 6 anos.

### **3.7 Análise dos resultados**

Todas as análises estatísticas relativas ao estabelecimento das regressões para as funções *taper* e aos critérios de validação dos modelos obtidos foram conduzidas com o apoio do Prof. José Raimundo de Souza Passos, do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências – IBB-UNESP, Botucatu.

Para os dados de cada um dos clones e em cada um dos sítios foram analisadas qualitativamente as associações entre a densidade básica ponderada das árvores (variável independente) e a idade do lenho (variável dependente).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Ensaio Piloto

A Tabela 2 apresenta os intervalos de diâmetro das classes diamétricas estabelecidas para a área experimental utilizada no ensaio piloto.

Os resultados de densidade básica média ponderada obtidos com as nove árvores do ensaio piloto (foram amostradas três árvores para cada classe diametral) estão apresentados no Apêndice 1.

**Tabela 2** – Variações dos diâmetros por classe diamétrica das árvores da área experimental do ensaio piloto.

Blocos	Classes	Diâmetro no DAP (cm)	Densidade básica ponderada da árvore (kg/m <sup>3</sup> )
1	Dominada	10,8 – 15,3	452 A
2	Co-dominante	15,4 – 16,7	451 A
3	Dominante	16,8 – 17,7	478 A

Nota:

- médias seguidas de pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ( $p > 0,05$ ).

Da análise de variância desses resultados (software estatístico R versão 2.9) concluiu-se que não houve efeito da classe diamétrica nas densidades básicas ponderadas das árvores das diversas classes estudadas. Esses resultados são concordantes com os obtidos

por Brito (1985) e Migliorini (1986) que afirmaram que não há diferença significativa da densidade básica com as diferentes classes de diâmetro das árvores dentro de um mesmo sítio, pois estão submetidas às mesmas condições edáficas e climáticas.

Assim, a partir dos resultados obtidos, pode-se definir que a amostragem do programa experimental seria não-estratificada (sem estratificação das árvores por classe diametral), conforme já descrito no capítulo 3.

## **4.2 Densidades da madeira à idade de 6 anos**

Com o plano de amostragem adotado para as árvores de 6 anos foram analisados 258 discos pelo método da atenuação de radiação gama.

### **4.2.1 Densidades pontuais nos discos e densidades médias dos discos**

A partir da metodologia proposta foram obtidos os perfis radiais das densidades aparente pontual bem como a densidade aparente e a densidade básica média ponderada para cada distância radial do disco, a partir da metodologia descrita no item 3.4.2. Sendo impraticável a apresentação de todos os perfis densitométricos, somente a título ilustrativo, para a visualização da tipologia dos perfis e da variação das densidades, optou-se pela representação de todos os perfis de uma única árvore (Figura 13), bem como pela representação de todos os discos localizados no DAP da altura comercial das árvores (1 a 6) dos clones 1 e 2 nas regiões de Lençóis Paulista e Itapetininga (Figura 14 – clone 1 e Figura 15 – clone 2).

O comportamento das densidades mencionadas ao longo do fuste da árvore pode ser observado na Figura 13, que sinteticamente apresenta o resultado de 10 discos de uma mesma árvore. A variação da densidade pontual aparente a 12% foi de 350 a 800 kg/m<sup>3</sup>. As densidades aparente e básica ponderadas mantiveram-se praticamente estáveis, variando, respectivamente, de 500 a 700 kg/m<sup>3</sup> e de 400 a 500 kg/m<sup>3</sup>.

A estabilidade verificada nos dados – pequenas variações nas densidades ponderadas na direção radial – é importante característica buscada nos sistemas de reflorestamentos comerciais (DECOUX et al., 2004) pois, além de simplificar o

processamento industrial dessa matéria-prima, permite que o crescimento dos plantios seja, nesses casos, quantificado apenas com o incremento de volume.

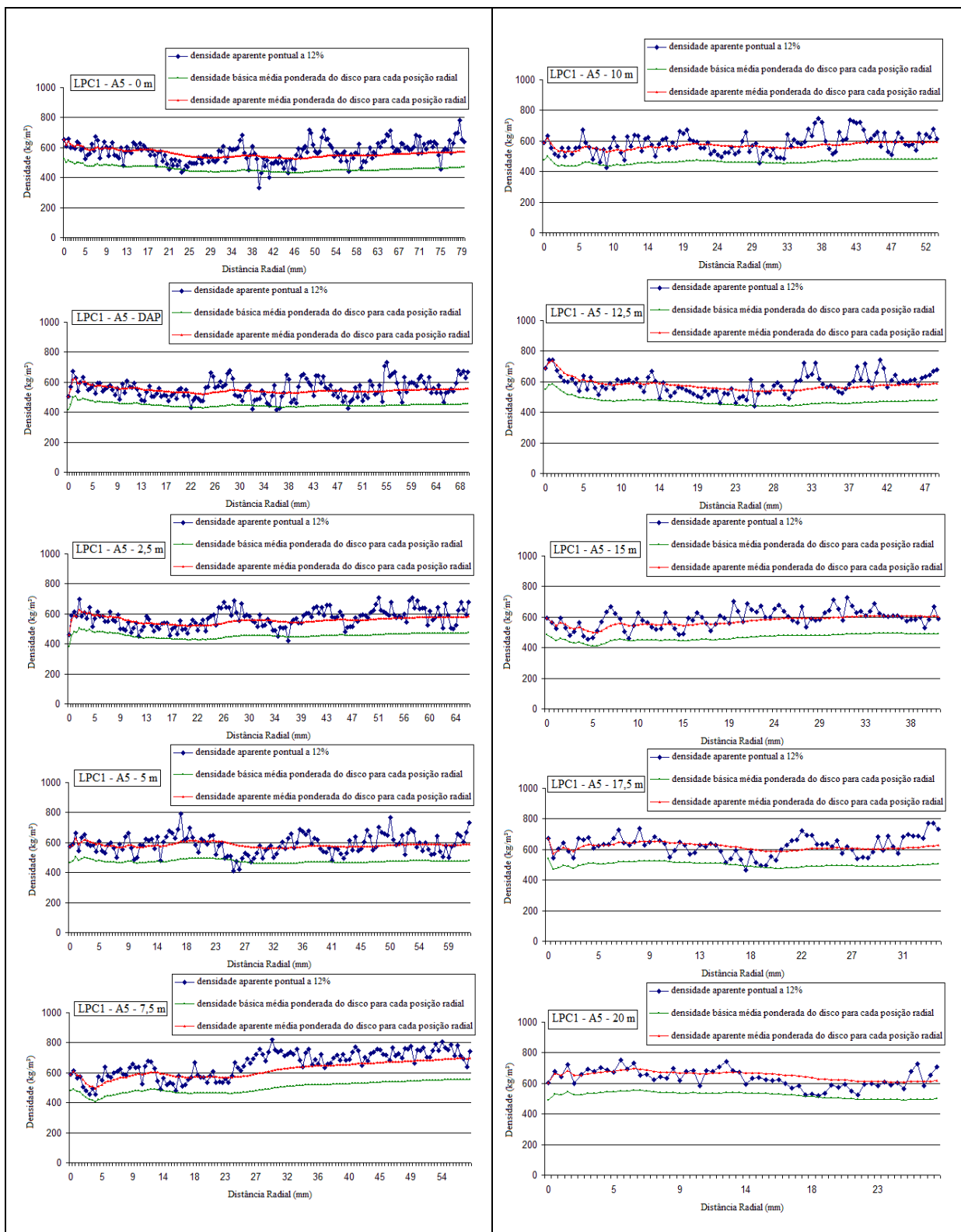
Na Figura 14 os discos amostrados no DAP (1,30 m) das árvores de 1 a 6 do clone 1 (maior produtividade) nas regiões de Lençóis Paulista (LPC1) e de Itapetininga (IC1) apresentaram comportamentos diferentes em relação as densidades pontuais aparente a 12%, ficando evidente amplitudes maiores na região de Lençóis Paulista (sítio inferior) do que na região de Itapetininga (sítio superior).

Os resultados corroboram aos obtidos por Tomazello Filho (2006), que estudando o efeito da irrigação e da fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis x urophylla* detectou a redução da densidade média do lenho através do método de densitometria de raios X. Verificando que a irrigação e outras práticas de manejo florestais há um ganho no crescimento volumétrico, porém não há influência na densidade básica do lenho, enquanto que árvores submetidas a condições climáticas adversas e de estresse hídrico tendem a apresentar ganhos de densidade, como pode ser observada nas Figuras 14 e 15.

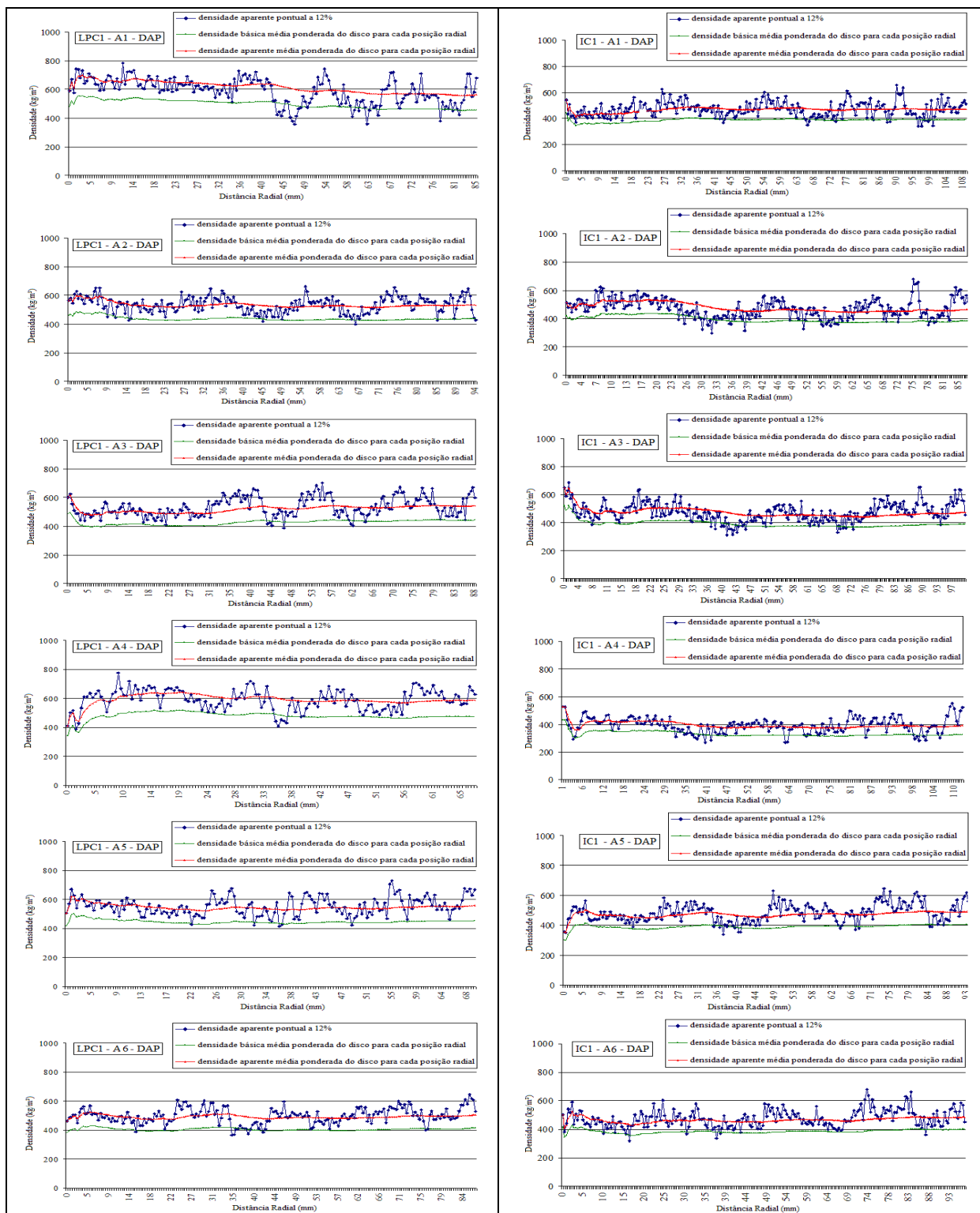
Pelas análises dos perfis densitométricos pelo método da atenuação de radiação gama observou-se que para as árvores do clone 2 nas regiões Lençóis Paulista (LP) e Itapetininga (I), à densidade básica média ponderada para cada distância radial do disco sentido base-topo obteve-se um comportamento decrescente até metade da altura da árvore e crescente deste ponto até o final do fuste da árvores ou diminuindo próximo ao topo. Para as árvores do clone 1, nas mesmas regiões já mencionadas, a densidade básica média ponderada para cada distância radial do disco das árvores estudadas foram crescente da base para o topo, mas não obedeceram um padrão de uniformidade.

Na Figura 15 os discos amostrados, das árvores de 1 a 6 do clone 2 (menor produtividade) nas regiões de Lençóis Paulista (LPC2) e de Itapetininga (IC2) apresentaram o mesmo padrão, já mencionado anteriormente.

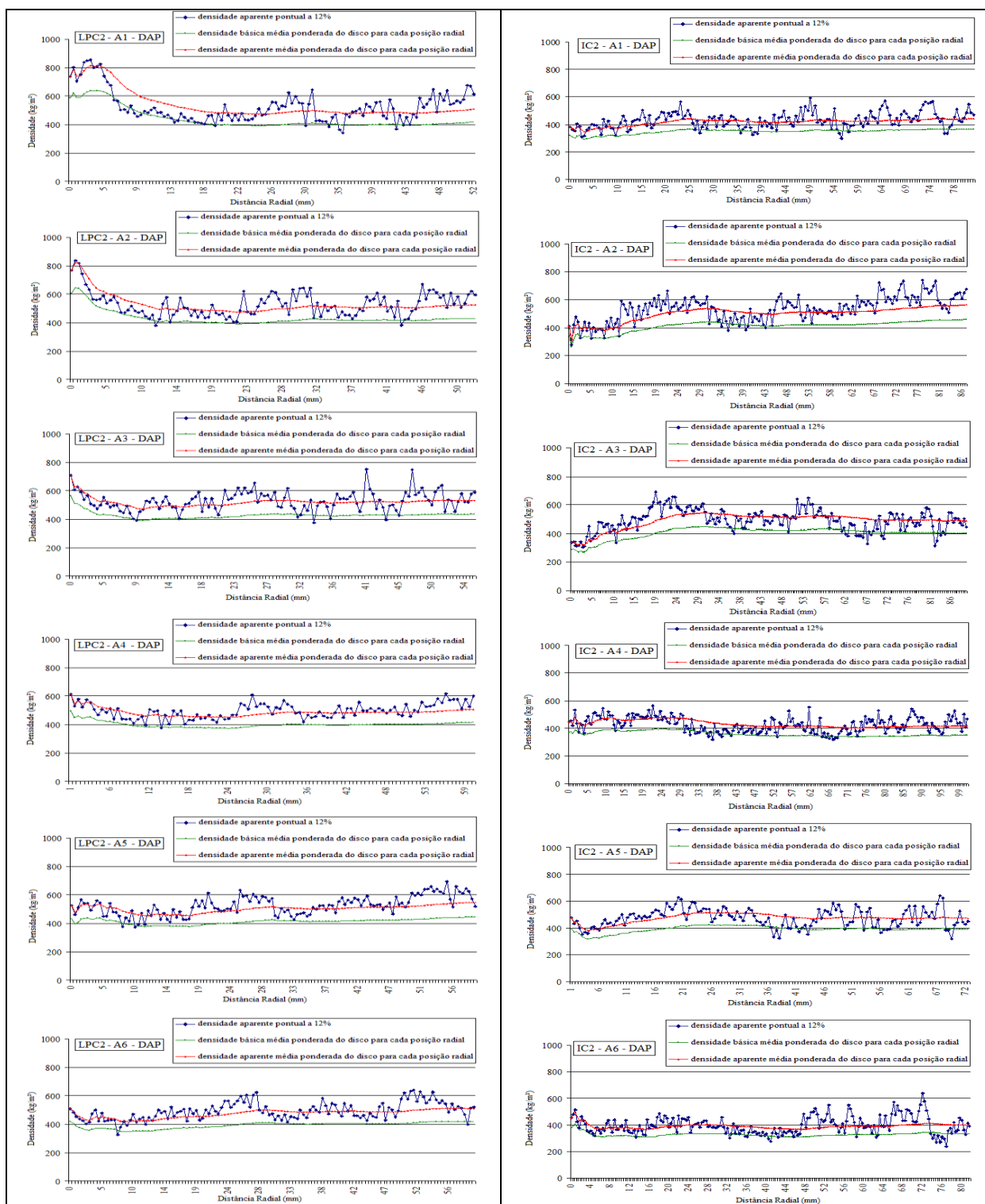
As Figuras 14 e 15 mostram que, a despeito da variação pontual significativa da densidade aparente ao longo do raio, existe pouco reflexo dessa variação nas densidades aparente e básica ponderadas, que revelam padrões de variação bem mais estáveis ao longo da distância radial.



**Figura 13** – Perfis densitométricas obtidos a partir de discos a diferentes alturas (0 m até 20 m, de 2,5 m em 2,5 m) do fuste da árvore 5 (A5) da situação LPC1.



**Figura 14** – Perfis densitométricos obtidos a partir de discos retirados à altura do peito do fuste das 6 árvores nas regiões de Lençóis Paulista (LP) – gráficos a esquerda – e Itapetininga (I) – gráficos a direita – do clone 1.



**Figura 15** – Perfis densitométricos obtidos a partir de discos retirados à altura do peito do fuste das 6 árvores nas regiões de Lençóis Paulista (LP) – gráficos a esquerda – e Itapetininga (I) – gráficos a direita – do clone 2.

#### 4.2.2 Densidade básica ponderada das árvores

Após a obtenção da densidade em cada posição relativa do tronco, foi realizada a determinação da densidade básica média das árvores por meio da ponderação dos valores de densidade obtidos em cada disco ao longo da altura das árvores, utilizando a equação 14 do item 3.4.3. Na Tabela 3 são apresentados os valores obtidos das densidades básicas ponderadas das árvores amostradas, com base na metodologia proposta no item 3.4.

**Tabela 3** – Densidade básica ponderada das árvores de 6 anos – clone, região e idade.

Região	Clone	Idade	Densidade básica ponderada da árvore (kg/m <sup>3</sup> )								
			1	2	3	4	5	6	Médias	Desvpad	CV (%)
LP	C1	6	454	462	463	483	489	440	465	18	4
I			428	423	422	418	427	431	425	5	1
LP	C2		405	432	424	413	419	406	417	11	3
I			391	410	395	406	389	388	397	9	2

Na região de Lençóis Paulista o clone 1 apresentou maior densidade básica ponderada em relação ao clone 2 – LPC1: mínima de 440 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 489 kg/m<sup>3</sup> e LPC2: mínima de 405 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 432 kg/m<sup>3</sup>. O mesmo repetiu-se na região de Itapetininga, onde o clone 1 foi superior ao clone 2 – IC1: mínima de 418 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 431 kg/m<sup>3</sup> e IC2: mínima de 388 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 410 kg/m<sup>3</sup>.

As árvores do clone 1 e do clone 2 da região de Lençóis Paulista apresentaram valor da densidade básica média ponderada de 465 kg/m<sup>3</sup> e de 425 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Na região de Itapetininga os mesmos clones apresentaram valor da densidade básica média ponderada de 417 kg/m<sup>3</sup> e de 397 kg/m<sup>3</sup>.

Observa-se na Tabela 3 que a densidade básica média ponderada das árvores para o clone 1 (C1) foram maiores do que o clone 2 (C2) confirmando sua maior produtividade, já evidenciada pela empresa.

#### 4.3 Funções *taper* para as árvores às idades de 2 e 4 anos

As funções *taper* testadas foram o modelo do polinômio de 5º grau de Prodan (1965) – Equação 4 – e o modelo do polinômio de potências fracionárias e inteiras de



Hradetzky (1976) – Equação 5. Essa segunda opção foi utilizada na tentativa de melhor representar o perfil da árvore na porção inferior - onde há mais irregularidade da forma e sinuosidade - sugerindo a utilização de potências de grau mais elevado para representar a base da árvore, em conjunto com as potências fracionárias de grau baixo para representar a porção superior do tronco.

Foram utilizados modelos ajustados de regressão linear com medidas repetidas (dentro de cada árvore) para cada grupo (clone, sítio e idade). Por essa razão foi utilizado o procedimento “proc mixed” do programa SAS (SAS, 2011), com o comando “repeated”.

No caso do polinômio do 5º grau de Prodan (1965), ele foi utilizado com todos os termos até 5ª potência. Já no modelo de potências fracionárias e inteiras de Hradetzky (1976), o método “stepwise”, sendo consideradas as seguintes potências: 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 33; 34; 35; 36; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 47; 48; 49 e 50. A expectativa era a de que as potências inteiras unitárias representassem melhor a seção intermediária da árvore, as potências com grandezas de dezenas a base da árvore, e as potências fracionárias o topo da árvore.

A seleção do melhor modelo de função *taper* foi baseada nos seguintes critérios estatísticos de escolha:

- significância das estimativas dos parâmetros (retira-se a covariável cujo valor-p é maior que 0,05);
- normalidade dos resíduos;
- estabilidade de variância.

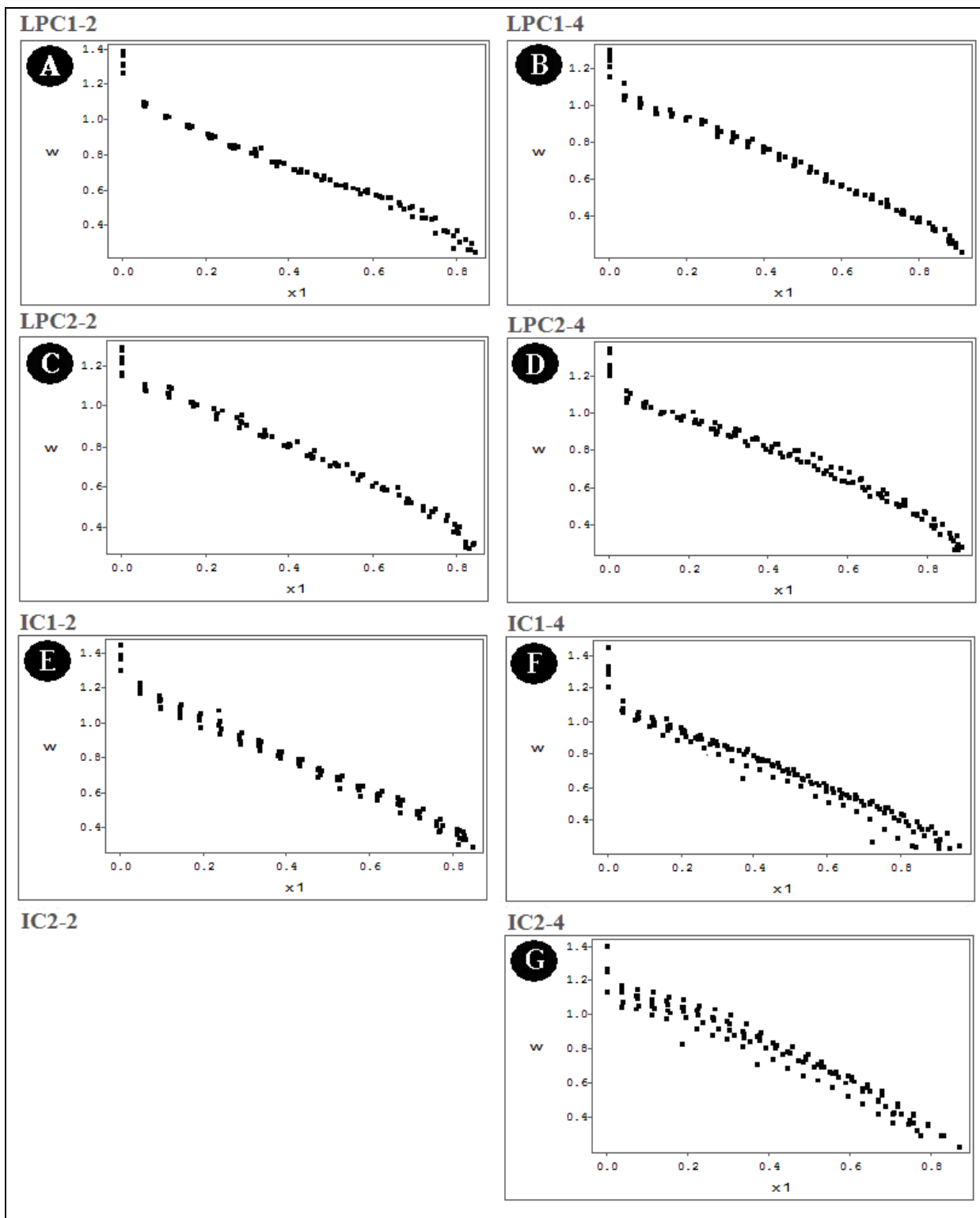
Na Figura 16 estão apresentados os gráficos de dispersão para cada região (LP e I), clone (C1 e C2) e idade (2 e 4 anos), mostrando o comportamento da distribuição dos dados para a seleção das funções *taper*.

Na Figura 16 os gráficos de dispersão que tiveram distribuição mais uniforme ao longo da linha, as situações foram: LPC1 – 2 (A), LPC1 – 4 (B), IC1 – 2 (E), LPC2 – 2 (C) e LPC2 – 4 (D). Já para as situações IC1 – 4 (F) e IC2 – 4 (G) não houve

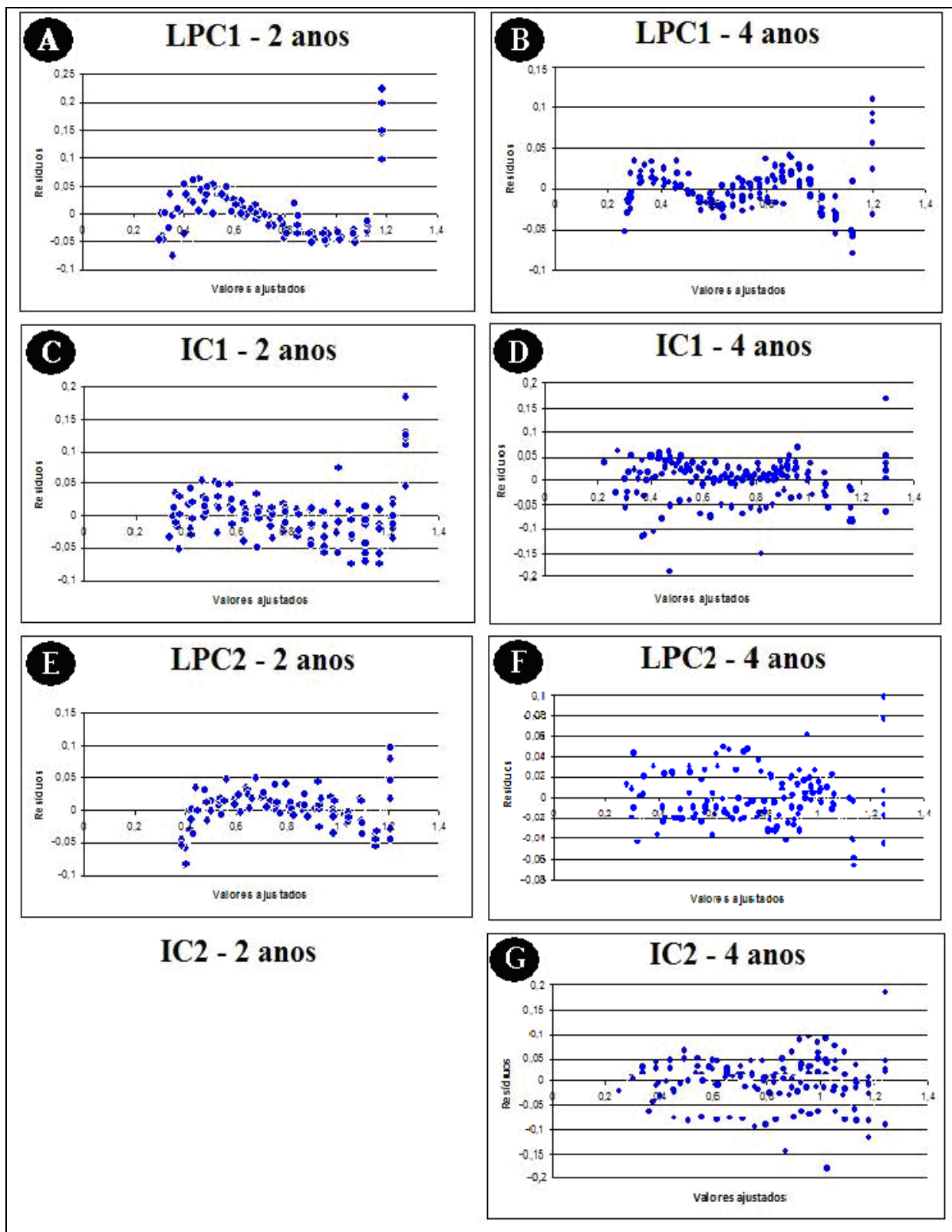
uniformidade ao longo da linha, indicando certamente imprecisão dos dados. Pode-se notar a ausência do gráfico de dispersão para o IC2 – 2, impossibilidade da empresa Duraflora fornecer o material com essas características.

Analisando os gráficos de resíduos (Figura 17), é possível notar que as situações LPC1 – 2 (A), LPC1 – 4 (B), IC1 – 2 (C), LPC2 – 2 (E) e LPC2 – 4 (F) apresentaram melhor distribuição de resíduos para os valores ajustados, não apresentando tendenciosidade. Por outro lado, as situações IC1 – 4 (D) e IC2 – 4 (G) não apresentaram distribuição adequada dos resíduos para os valores ajustados, apresentando possível tendenciosidade. A ausência do gráfico de resíduos para o IC2 – 2 já foi justificada anteriormente.

Pela Tabela 4 pode-se verificar que os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dos modelos para as situações LPC1 – 2, LPC1 – 4, IC1 – 2, LPC2 – 2 e LPC2 – 4 são consideravelmente superiores, valores próximos de 0,99 em relação aos das situações IC1 – 4 e IC2 – 4, que apresentaram valores inferiores a 0,99.



**Figura 16** – Dispersão dos dados para as situações estudadas (regiões LP e I, clones C1 e C2) nas idades de 2 e 4 anos) sendo  $w=d_i/DAP$  a razão entre o diâmetro do fuste medido a uma altura  $h_i$  e a 1,30 m de altura e  $x_1=h_i/H$  a razão entre a altura da medição e a altura total da árvore.



**Figura 17** – Distribuição dos resíduos dos valores ajustados para as situações estudadas: clones (C1 e C2), regiões (LP e I) e idades (2 e 4 anos).

**Tabela 4** – Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade.

Região	Clone	Idade	Modelos	R <sup>2</sup>	Resíduos		Figuras
					Normalidade	Variância	
LP	C1	2	Prodan	0,9924	normal	constante	16 - A
			Hradetzky	0,9948	normal	constante	16 - A
		4	Prodan	0,9941	normal	constante	16 - B
			Hradetzky	0,9958	normal	constante	16 - B
I	C1	2	Prodan	0,9902	normal	constante	16 - C
			Hradetzky	0,9910	normal	constante	16 - C
		4	Prodan	0,9717	não normal	constante	16 - D
			Hradetzky	0,9760	não normal	constante	16 - D
LP	C2	2	Prodan	0,9920	normal	constante	16 - E
			Hradetzky	0,9931	normal	constante	16 - E
		4	Prodan	0,9890	normal	constante	16 - F
			Hradetzky	0,9911	normal	constante	16 - F
I	C2	2	Prodan	-	-	-	-
			Hradetzky	-	-	-	-
		4	Prodan	0,9626	não normal	constante	16 - G
			Hradetzky	0,9663	não normal	constante	16 - G

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentadas as equações selecionadas às situações de estudo. Estas equações apresentaram as estimativas dos parâmetros dos modelos construídos para os dois clones, para estimar o diâmetro das árvores. Verifica-se que para todas as situações, foram desenvolvidas equações para os dois modelos propostos, porém as situações LPC1 – 2, LPC1 – 4, IC1 – 2, LPC2 – 2 e LPC2 – 4 houve maior uniformidade dos dados em relação às situações IC1 – 4 e IC2 – 4, que não apresentaram o mesmo comportamento. Mesmo assim, os modelos foram considerados satisfatórios e foram empregados na estimativa dos diâmetros às diferentes alturas das árvores.

**Tabela 5** – Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade (2 anos).

Região	Clone	Idade	Modelos	Equações
LP	C1	2	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,3259 - 4,3329\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 18,8907\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 47,0187\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 54,6953\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 24,2039\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,3426 - 0,1210\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 0,8978\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,7} - 1,9864\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{11} + 4,6268\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{20} + \varepsilon_i$
I	C1	2	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,3783 - 3,6539\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 15,3409\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 39,6097\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 46,7511\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 20,59\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,3898 - 0,0936\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 1,0006\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,8} - 0,2635\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^6 + \varepsilon_i$
LP	C2	2	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2268 - 2,1272\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 9,1306\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 27,2467\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 35,5153\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 16,9860\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2355 - 31,9681\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} + 31,9913\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,002} - 1,0086\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^1 - 1,2764\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{15} + \varepsilon_i$
I	C2	2	Prodan	(essas equações não foram estimadas por indisponibilidade de dados experimentais)
			Hradetzky	

**Tabela 6** – Parâmetros estimados das equações ajustadas para os clones 1 e 2, para estimar o diâmetro das árvores em função da região e idade (4 anos).

Região	Clone	Idade	Modelos	Equações
LP	C1	4	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2320 - 3,5792\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 17,5358\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 45,9388\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 52,4118\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 21,8107\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,25697 - 0,16529\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 0,73532\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^1 - 0,53774\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 0,37030\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 8,74382\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
I	C1	4	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2956 - 3,9462\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 16,6943\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 37,8168\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 37,8811\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 13,9562\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,33300 - 0,18693\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 0,67107\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,8} - 0,28095\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 + \varepsilon_i$
LP	C2	4	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2570 - 3,4048\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 16,2542\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 41,3911\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 46,7472\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 - 19,6754\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,27590 - 0,15935\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 0,68051\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^1 - 0,20901\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 - 0,27017\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{10} + \varepsilon_i$
I	C2	4	Prodan	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,2443 - 1,7546\left(\frac{h_i}{H_t}\right) + 4,3698\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^2 - 7,9249\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^3 + 4,2703\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 + \varepsilon_i$
			Hradetzky	$\left(\frac{\hat{d}_i}{DAP}\right) = 1,28064 - 0,10667\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^{0,001} - 0,75847\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^1 - 1,74278\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^4 + 1,44920\left(\frac{h_i}{H_t}\right)^5 + \varepsilon_i$

Através do critério de Akaike corrigido – AICc – (AKAIKE, 1974; BOZDOGAN, 1987) pode-se selecionar o modelo mais adequado às situações estudadas. Na Tabela 7, que sumariza os resultados da aplicação do critério, quanto menores os valores de AICc melhor o modelo ajustado, pois as estatísticas AICc são de grande importância na análise de regressão: penalizam modelos com número excessivos de parâmetros, selecionando modelos mais parcimoniosos.

**Tabela 7** – Comparação entre modelos polinomiais inteiros e fracionários pelo critério de Akaike corrigido (AICc).

Grupo (região, clone e idade)	Coefficientes	Modelos polinomiais	AICc
LPC1 - 2	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 454,2
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^{0,7} x^{11} x^{20}$	- 483,0 ***
IC1 - 2	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 467,0 ***
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^{0,8} x^6$	- 461,7
LPC2 - 2	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 433,6
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^{0,002} x^1 x^{15}$	- 443,5 ***
LPC1 - 4	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 603,5
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^1 x^3 x^4 x^{50}$	- 720,8 ***
IC1 - 4	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 464,0
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^{0,8} x^2$	- 471,1 ***
LPC2 - 4	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4 x^5$	- 527,6
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^1 x^3 x^{10}$	- 533,1 ***
IC2 - 4	inteiros	$x^1 x^2 x^3 x^4$	- 391,8
	inteiros e fracionários	$x^{0,001} x^1 x^4 x^5$	- 393,7 ***

\*\*\*modelos de melhor ajuste.

Assim, para as situações em que dois modelos de regressão eram possíveis (Prodan e Hradetzky) o critério permitiu a seleção final, conforme apresentado na Tabela 7.

#### 4.4 Densidades da madeira às idades de 2 e 4 anos

Com o uso dos modelos foi possível demarcar nos perfis densitométricos dos discos das árvores com 6 anos de idade as regiões correspondentes às idades passadas de 2 e 4 anos. Com essas demarcações feitas, determinaram-se as densidades dessas idades passadas nas regiões correspondentes. Por fim, com uso da equação (14) foram



obtidas as densidades ponderadas que cada árvore teria nas idades passadas consideradas (2 e 4 anos).

Na tabela 8 são apresentados os valores da densidade ponderada das árvores de 2 e 4 anos. Conforme se observa, apenas uma situação ficou prejudicada, devido à ausência do clone 2 da região de Itapetininga.

Na região de Lençóis Paulista, o clone 1 na idade de 2 anos apresentou maior densidade ponderada em relação ao clone 2 – LPC1: mínima de 424 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 453 kg/m<sup>3</sup> e LPC2: mínima de 405 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 426 kg/m<sup>3</sup>. O mesmo repetiu-se para a idade de 4 anos na mesma região, onde o clone 1 foi superior ao clone 2 – LPC1: mínima de 433 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 483 kg/m<sup>3</sup> e LPC2: mínima de 401 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 434 kg/m<sup>3</sup>.

Na região de Itapetininga, o clone 1 na idade de 4 anos também apresentou maior densidade ponderada quando comparado ao clone 2 - IC1: mínima de 407 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 426 kg/m<sup>3</sup> e IC2: mínima de 387 kg/m<sup>3</sup> e máxima de 411 kg/m<sup>3</sup>.

As árvores do clone 1 e do clone 2 para a idade de 2 anos da região de Lençóis Paulista apresentaram valor da densidade básica média ponderada de 442 kg/m<sup>3</sup> e de 413 kg/m<sup>3</sup>; já para as árvores dos mesmos clones e mesma região com idade de 4 anos o valor da densidade básica média ponderada foi de 460 kg/m<sup>3</sup> e de 416 kg/m<sup>3</sup>. Na região de Itapetininga as árvores do clone 1 e do clone 2 para a idade de 4 anos apresentaram o valor da densidade básica média ponderada de 419 kg/m<sup>3</sup> e de 397 kg/m<sup>3</sup>.

Esta diferença na densidade pode estar relacionada com fatores edáficos ou climáticos, pois, sabe-se pela literatura que solos ou climas favoráveis ao bom desenvolvimento das árvores aumentam a produtividade e conseqüentemente reduzem a densidade da madeira produzida (REZENDE, 1997; BRITO, 1985).

Conclui-se que a região de Lençóis Paulista (LP) apresentou maiores valores da densidade básica média ponderada em relação à região de Itapetininga (I)

**Tabela 8** – Densidade básica ponderada das árvores aos 2 e 4 anos.

Região	Clone	Idade	Densidade básica ponderada da árvore (kg/m <sup>3</sup> )						Médias
			1	2	3	4	5	6	
LP	C1	2	444	439	441	451	453	424	442
		4	451	454	460	477	483	433	460
I	C1	2	406	384	395	380	384	395	391
		4	420	418	419	407	423	426	419
LP	C2	2	399	426	416	414	418	405	413
		4	406	434	426	411	419	401	416
I	C2	2	-	-	-	-	-	-	-
		4	387	411	395	402	395	389	397

#### 4.5 Associações entre as densidades básicas e as idades

A Tabela 9 apresenta os resultados finais de densidade básica para todas as situações estudadas.

**Tabela 9** – Densidade básica ponderada das árvores aos 2, 4 e 6 anos.

Região	Clone	Idade	Densidade básica ponderada da árvore (kg/m <sup>3</sup> )						Médias	Desvpad	CV (%)
			1	2	3	4	5	6			
LP	C1	2	444	439	441	451	453	424	442	10	2
		4	451	454	460	477	483	433	460	18	4
		6	454	462	463	483	489	440	465	18	4
I	C1	2	406	384	395	380	384	395	391	10	2
		4	420	418	419	407	423	426	419	6	2
		6	428	423	422	418	427	431	425	5	1
LP	C2	2	399	426	416	414	418	405	413	10	2
		4	406	434	426	411	419	401	416	13	3
		6	405	432	424	413	419	406	417	11	3
I	C2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4	387	411	395	402	395	389	397	9	2
		6	391	410	395	406	389	388	397	9	2

Com os resultados finais de densidade básica para todas as situações estudadas, obteve-se os percentuais da variação da densidade correlacionando-a com a idade, observados na Tabela 10.

**Tabela 10** – Aumentos percentuais da densidade básica ponderada das árvores de 2, 4 e 6 anos.

Região	Clone	Árvores	Aumentos percentuais de densidade básica ponderada da árvore ao longo dos anos (2, 4 e 6)		
			2 - 4	4 - 6	2 - 6
LP	C1	1	1,58	0,67	2,25
		2	3,42	1,76	5,24
		3	4,31	0,65	4,99
		4	5,76	1,26	7,10
		5	6,62	1,24	7,95
		6	2,12	1,62	3,77
I	C1	1	3,45	1,90	5,42
		2	8,85	1,20	10,16
		3	6,08	0,72	6,84
		4	7,11	2,70	10
		5	10,16	0,95	11,20
		6	7,85	1,17	9,11
LP	C2	1	1,75	-0,25	1,50
		2	1,88	-0,46	1,41
		3	2,40	-0,47	1,92
		4	-0,72	0,49	-0,24
		5	0,24	0	0,24
		6	-0,99	1,25	0,25
I	C2	1	-	1,03	-
		2	-	-0,24	-
		3	-	0	-
		4	-	1,00	-
		5	-	-1,52	-
		6	-	-0,26	-

Da análise das médias da densidade básica ponderada das árvores da região de Lençóis Paulista do clone 1 (LPC1) constatou-se que houve aumentos de densidade significativos nos períodos de 2 para 4 anos o aumento foi de 3,97 %; 4 para 6 anos foi de 1,20 % e de 2 para 6 anos foi 5,22 %, que corresponde ao período total de crescimento analisada da árvore; para a região de Itapetininga o clone 1 (IC1) constatou-se que houve aumentos de densidade significativos nos períodos de 2 para 4 anos o aumento foi de 7,25 %; 4 para 6 anos foi de 1,44 % e 2 para 6 anos 8,79 %.

Para a região de Lençóis Paulista o clone 2 (LPC2) constatou-se que houve variação de densidade significativos nos períodos de 2 para 4 anos o aumento foi de 0,76 %; 4 para 6 anos o aumento foi de 0,09 % e de 2 para 6 anos foi de 0,85 %. Já, na região

de Itapetininga o clone 2 (IC2) constatou-se que não houve variação significativa no período de 4 para 6 anos. Observa-se na Tabela 9 que o coeficiente de variação variou de 1 a 4 % para as situações estudadas, indicando que os valores da densidade básica ponderada foram homogêneos.

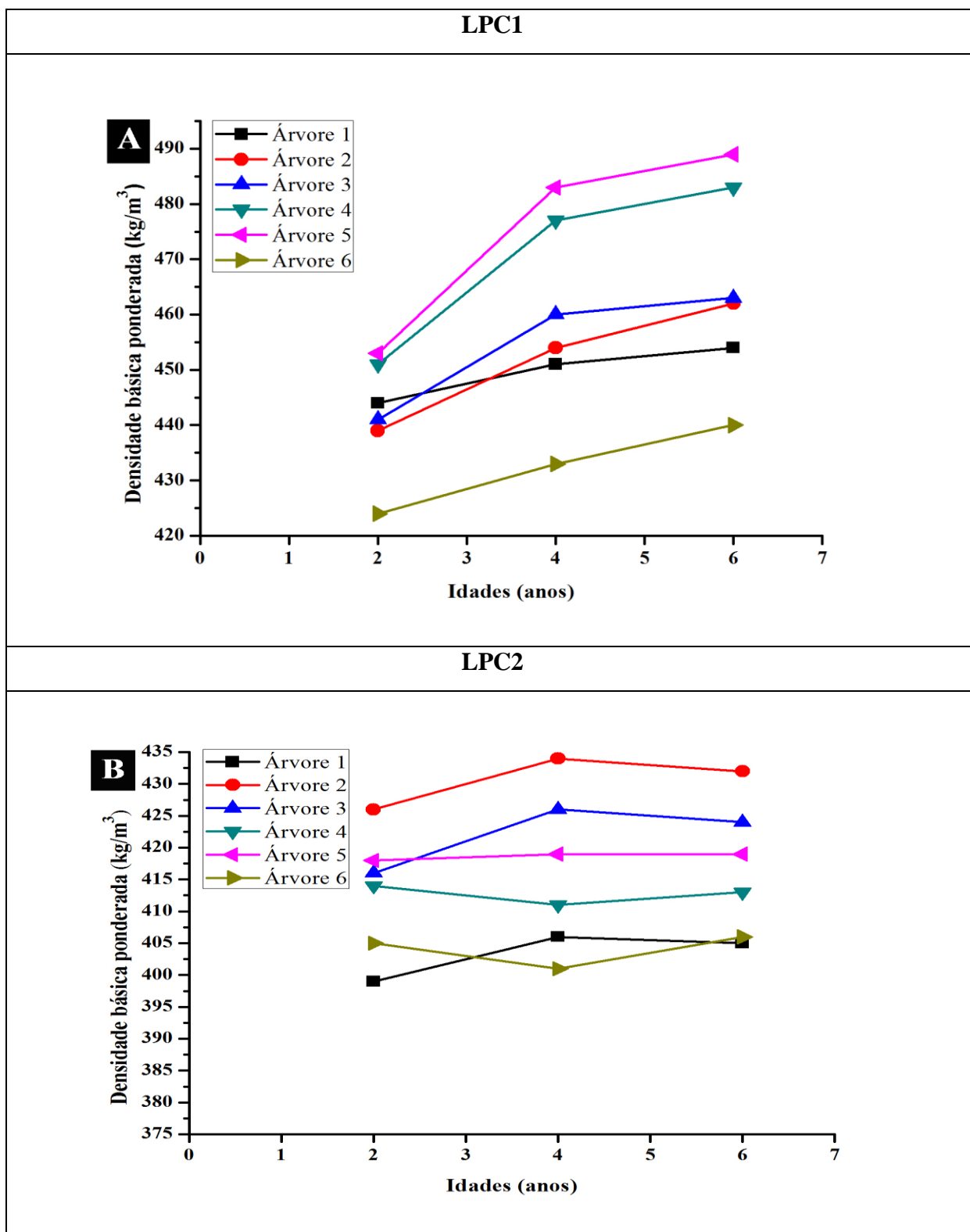
Com os resultados da Tabela 10 pode se obter os ganhos percentuais médios, máximos e mínimos da densidade básica ponderada de cada clone (C1 e C2) para cada região (LP e I) ao longo dos anos (2, 4 e 6 anos):

- LPC1:
  - 2 - 4 anos - ganho percentual médio de 3,97 % (máx. 6,62 % e mín. 1,58 %);
  - 4 - 6 anos - ganho percentual médio de 1,20 % (máx. 1,76 % e mín. 0,65 %);
  - 2 - 6 anos - ganho percentual médio de 5,22 % (máx. 7,95 % e mín. 2,25 %).
  
- IC1:
  - 2 - 4 anos - ganho percentual médio de 7,25 % (máx. 10,16 % e mín. 3,45 %);
  - 4 - 6 anos - ganho percentual médio de 1,44 % (máx. 2,70 % e mín. 0,72 %);
  - 2 - 6 anos - ganho percentual médio de 8,79 % (máx. 10,16 % e mín. 5,42 %).
  
- LPC2:
  - 2 - 4 anos - ganho percentual médio de 0,76 % (máx. 2,40 % e mín. -0,99 %);
  - 4 - 6 anos - ganho percentual médio de 0,09 % (máx. 1,25 % e mín. -0,47 %);
  - 2 - 6 anos - ganho percentual médio de 0,85 % (máx. 1,92 % e mín. -0,24 %).
  
- IC2:
  - 4 - 6 anos - ganho percentual médio de 0 % (máx. 1 % e mín. -1,52 %).

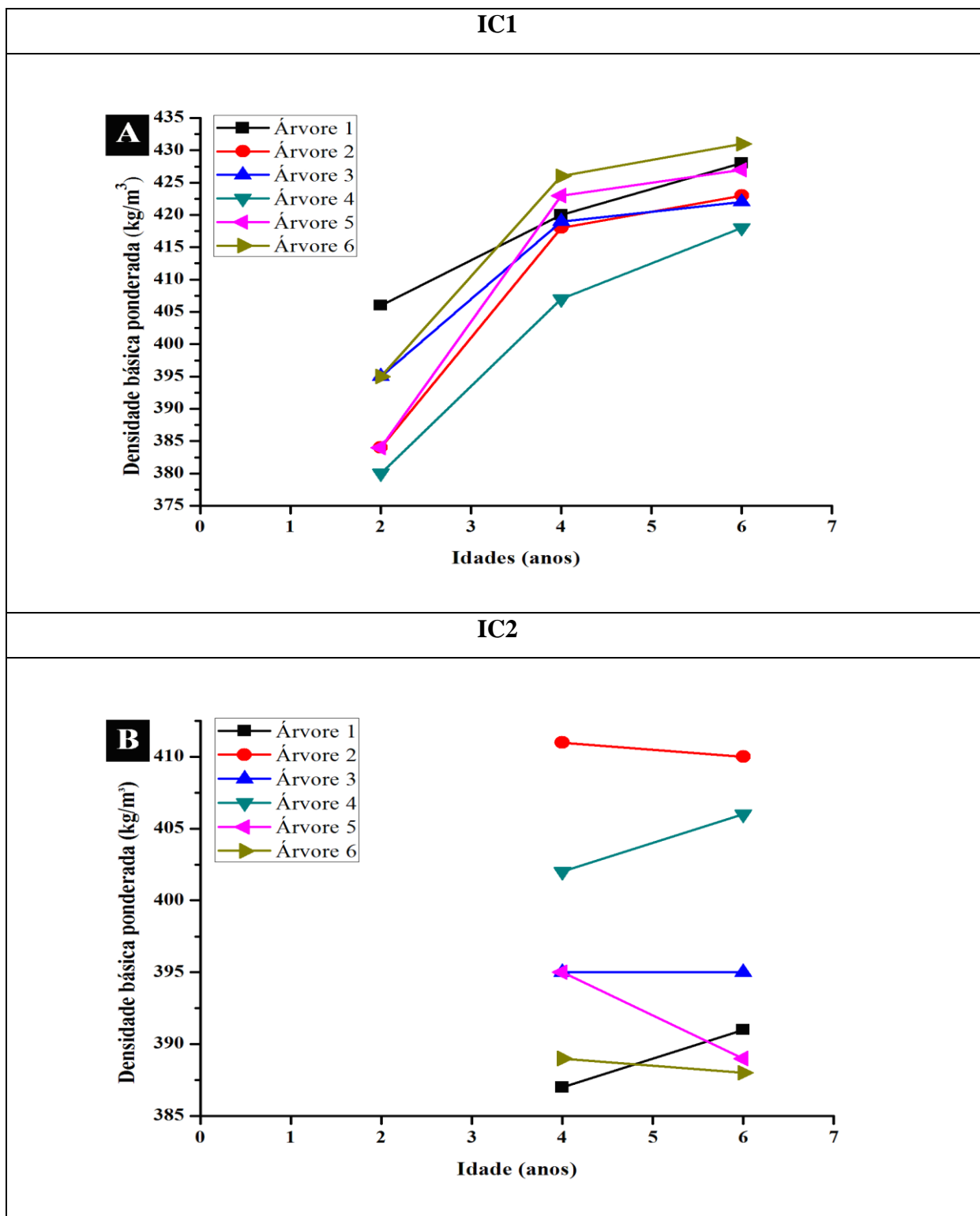
Os clones 1 e 2 analisados apresentaram considerável variação da densidade entre as regiões estudadas (LP e I), porém, maiores ganhos percentuais de densidade básica ponderada das árvores ao longo dos anos (2, 4 e 6 anos) foram observados para o clone 1.

A análise dos resultados apresentados nas Figuras 18 e 19 mostram que, no geral, a densidade básica ponderada da madeira de *Eucalyptus* spp. tende a aumentar com a idade havendo a existência de estabilidade por volta dos 6 anos.

O aumento da densidade da madeira, de forma geral, apresenta correlação com parâmetros anatômicos como espessura da parede e o percentual de vasos (TOMAZELLO FILHO, 2006), ou seja, madeiras de alta densidade básica tendem a apresentar fibras com paredes mais espessas (SILVA JÚNIOR et al., 1996). Esta correlação entre densidade básica e idade da árvore é importante para a seleção precoce de indivíduos, pois permite que este parâmetro seja estimado para a idade de corte (6 anos) a partir da densidade básica ponderada das árvores mais jovens. Assim, no que diz respeito à densidade básica, a possibilidade de sua utilização em seleção precoce apresenta um fator de grande importância associada a outras características da madeira.



**Figura 18** – Efeito da idade da madeira na sua densidade básica ponderada para cada grupo: clone (C1 e C2), região Lençóis Paulista (LP) e idade (2, 4 e 6 anos).



**Figura 19** – Efeito da idade da madeira na sua densidade básica ponderada para cada grupo: clone (C1 e C2), região Itapetininga (I) e idade (2, 4 e 6 anos).

Da análise conjunta de todos os diagramas das Figuras 18 e 19 nota-se que é muito difícil o estabelecimento de um modelo geral de previsão da densidade básica ponderada das árvores, mesmo quando definido o clone e o sítio. Os valores de densidade básica da madeira estão fortemente associados a cada uma das árvores amostradas. Assim, por exemplo, na Figura 18 – A, a árvore 6 partiu de uma densidade básica de  $424 \text{ kg/m}^3$  aos dois anos de idade enquanto as árvores 4 e 5 registraram densidades próximas de  $450 \text{ kg/m}^3$  nessa mesma idade, valor que jamais foi atingido pela árvores, mesmo aos 6 anos de idade.

Entretanto, o comportamento geral da densidade básica da madeira ao longo da idade foi de crescimento, com pequenas exceções (árvores 1, 2 e 3 – LPC2).

Assim, a seleção precoce pode ser conduzida em termos dos ganhos percentuais observados ao longo do tempo.



## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, nas discussões apresentadas e nas condições em que foi realizado o trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões:

- o método de atenuação de radiação gama demonstrou-se uma ferramenta útil para a determinação da densidade pontual e densidade dos discos e de suas frações, pois apresenta a vantagem de ser mais informativo nos valores pontuais para a densidade ao longo da amostra. Com seu uso pode-se estimar densidades a idades passadas. Outra vantagem do método de Atenuação da Radiação Gama é sua rapidez na obtenção dos resultados e sua aplicabilidade sem destruir as amostras, o que facilita a realização das repetições;
- o modelo de potência fracionária de Hradetzky foi o escolhido para estimativa de diâmetro ao longo da altura das árvores de 2 e 4 anos, com valores de coeficiente de determinação das regressões ( $R^2$ ) superiores ao modelo polinomial do 5º grau de Prodan;
- através das análises realizadas pode-se detectar o aumento da densidade básica média ponderada em função das idades de 2, 4 e 6 anos nas situações estudadas, observando maiores aumentos percentuais da densidade no período de 2 para 4 anos, em relação ao período de 4 para 6 anos, que teve aumento da densidade, porém em um ritmo menos acentuado;

- os valores médios de densidade básica ponderada das árvores foram maiores para o clone 1 da região de Lençóis Paulista (LP) e Itapetininga (I) em relação ao clone 2 das mesmas regiões, porém a variação da densidade básica se mostrou mais regular para os clones de Itapetininga;
- a seleção precoce pode ser conduzida a partir dos ganhos percentuais de densidade básica ao longo da idade, considerando-se particularmente, cada uma das situações estudadas.

Considerando o que já foi realizado neste trabalho, na continuidade dessa linha de pesquisa pode-se avançar:

- na análise qualitativa dos padrões de densidade às idades passadas;
- na análise da qualidade dos sítios de crescimento, para que esta análise forneça melhores subsídios e no planejamento de ciclos de plantio.

## 6 REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Boston, v. 19, n. 6, p. 716-723, Dec. 1974.

ALENCAR, G. S. B. de; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. da. Qualidade da madeira de híbrido de *E.grandis* x *E.urophylla* e seleção precoce. In: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla*.** 2004. 151 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais/Tecnologia de Produtos Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

AMARAL, A. C.; FERREIRA, M.; COUTO, H. T. Z. Métodos de avaliação da densidade básica da madeira de populações de pinheiros tropicais. **IPEF**, Piracicaba, n. 15, p. 47-67, 1977.

ANDRADE, E. N. **O eucalipto e suas aplicações.** São Paulo: Brasil de Rothschild & Cia, 1928. 143 p.

ASSIS, T. F. Aspectos do melhoramento de *Eucalyptus* para obtenção de produtos sólidos da madeira. In: WORKSHOP TÉCNICAS DE ABATE, PROCESSAMENTO E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1999, Viçosa. **Trabalhos...** Viçosa: DEF/SIF/UFV/IEF, 1999. p. 61-72.

ASSIS, A. L. 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. 20-4, jan./jun. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico ano base 2009**. Brasília, DF: ABRAF, 2010. 140 p.

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunumannii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama do <sup>241</sup>Am**. Botucatu. 2005. 137 f. Tese (Doutorado em)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-378, 2003.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BAMBER, R. K. The structure of wood and its relationship to the chemical corrosion of wood. In: FORUM OF AUSTRALIAN CORROSION ASSOCIATION, 1978, Sydney. **Proceedings...** Sydney: CSIRO, 1978. p. 58-64.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O.; MIGLIORINI, A. J. Estudo da variação da densidade básica em *Eucalyptus* spp. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., Belo Horizonte, 1982. **Anais...** São Paulo: SBS, 1983. p. 726-731.

BENDTSEN, B.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and Loblolly Pine. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 18, n. 1, p. 21-38, 1986.

BENJAMIN, C. A. **Comparação entre três critérios de amostragem para a avaliação da densidade básica da madeira de florestas implantadas de eucaliptos**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

BENJAMIN, C. A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 158 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

BIONDI, F.; HARTSOUGH, P. C.; GALINDO, E. I. Daily weather and tree growth at the tropical treeline of North America. **Arctic, Antarctic and Alpine Research**, Boulder, v. 37 p. 16-24, 2005.

BOREM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 1999. 546 p.

BOTOSSO, P. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Aplicação de faixas dendrométricas na dendrocronologia: avaliação da taxa e do ritmo de crescimento do tronco de árvores tropicais e

subtropicais. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC, 2001. cap.7, p. 145-171.

BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): the general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, Williamsburg, n. 52, p. 345-370, 1987.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica nas seções transversais do caule, da base do tronco para a copa em *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 15, p. 73-82, 1977.

BRASIL, M. A. M.; VEIGA, R. A. A.; TIMONI, J. L. Erros na determinação da densidade básica da madeira. **Cerne**, Lavras, v. 1, n. 1, p. 55-57, 1994.

BRITO, J. O. **Influência da adubação mineral nas características dos anéis de crescimento da madeira de *P. caribaea* var. *bahamensis***. 1983. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1983.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: John Wiley, 1963. 689 p.

BRUNE, A. Populações genéticas base: conceitos e considerações. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, MG, v. 2, p. 147-151, 1979.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

BURLEY, J.; KANOWSKI, P. Breeding strategies for temperate hardwoods. **Forestry**, Oxford, v. 78, n. 2, p. 199-208, 2005.

CALEGARIO, N. **Modeling eucalyptus stand growth base on linear and nonlinear mixed-effects models**. 2002. 123 p. Thesis (Doctor of Philosophy in Forest Science)-University of Georgia, Georgia, 2002.

CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 799-809, nov./dez. 2003.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E.urophylla***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COWN, D. J. Comparasion of the pilodyn and torsionmeter methods for the rapid assessment of wood density in living trees. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Wellington, v. 8, n. 3, p. 384-391, 1978.

COWN, D. J. Evaluation of the pilodyn wood tester for the assessment of wood density in standing trees. Tralagon: CSIRO, 1979. 4 p.

DECOUX, V.; VARCIN, E.; LEBAN, J. M. Relations between the intra-ring wood density assessed by x-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell apparent density determination. **Annals of Forestry Science**, Paris, v. 61, p. 251-262, 2004.

DESLAURIERS, A. et al. Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada), **Trees**, Santa Monica, v. 17, p. 477-484. 2003.

DÉTIENNE, P. et al. Rythmes de croissance de quelques essences de Guyane Français. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 217, p. 63-76, jul./set.1988.

DÉTIENNE, P. Appearance and periodicity of growth rings in some tropical woods. **IAWA Bulletin New Series**, Leiden, v. 1, n. 2, p. 123-132, 1989.

DOWNES, G.; BEADLE C. H.; WORLEDGE, D. Daily stem growth patterns in irrigated *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in relation to climate. **Trees**, Santa Monica, v. 14, p. 102-111. 1999.

FELKER, P.; LEON, V. D. An improved tool for the fabrication of dendrometer bands to estimate growth as function of treatments in slow growing native *Prosopis* stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, n. 3, p. 353-356, May 2005.

FERRAZ, E. S. B. **Determinação de densidade de madeiras por atenuação de radiação gama de baixa energia**. IPEF, Piracicaba, n. 12, p. 61-68, 1976.

FERRAZ, E. S. B.; MANSEL, R. S. Determining water content and bulk density of soil gamma Ray attenuations method. **IFAS Technical Bulletin**, Florida, n. 807, p. 51, 1979.

FERRAZ, E. S. B.; AGUIAR, O. Gamma-ray attenuation technique for determining density and water content of wood samples. **IPEF**, Piracicaba, n. 3, p. 9-12, 1985.

FERREIRA, A. T. B. **Caracterização da estrutura anatômica do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribae* var. *hondurensis* Barr. Et Golf**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FERREIRA, M. Melhoramento e a silvicultura intensiva clonal. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 45, p. 22-23, 1992.

FIGUEIREDO FILHO, A. **A influência da resinagem no crescimento de *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* e sua avaliação econômica**. 1991. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

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. 39-46, June 1996.

FISCHER, F. et al. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 167-188, jan./fev. 2001.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELLO, L. E. G. Métodos de determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2-3, p. 65-74, 1971.

FRANCO, E. J. **Estudos dos métodos estimativos de volume, biomassa e nível de produtividade para *Eucalyptus camaudulensis***. 1996. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1996.

FRIEDL, R. A. **Dinâmica de forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucária angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 1989. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

GOMES FILHO, F. A. **Física para o primeiro ano do curso colegial**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1964. 348 p.

GRATTAPAGLIA, D. **Melhoramento de *Eucalyptus*: híbridos, clonagem e marcadores moleculares**. 2008. Disponível em: <[http://www.cenargen.embrapa.br/palestras/21102006/21102006\\_001.pdf](http://www.cenargen.embrapa.br/palestras/21102006/21102006_001.pdf)>. Acesso em: 20 jun 2008.

GREEN, J. W. Continuous measurements of radial variation in *Eucalyptus paniciflora* Sieb. Ex. Spreng. **Australian Journal of Botany**, Australia, v. 17, p. 191-198, fev. 1969.

GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 170-180, jul./dez. 1992.

HEIN, P. R. G. et al. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, abr./jun. 2009.

HILLIS W. E.; BROWN A. G. **Eucalyptus for wood production**. Sydney: Academic Press, 1984. 434 p.

HUSCH, B.; MILLER, I. C.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. New York: John Wiley, 1982. 402 p.

IGLESIAS-TRABADO, G.; WILSTERMANN, D. *Eucalyptus universalis*. Global cultivated eucalypt forests map 2009 Version 1.0.1. GIT Forestry Consulting's Eucalyptologies. Disponível em: <<http://www.gifforestry.com>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

JAMMAL FILHO, F. A. **Produtividade energética da biomassa de eucalipto**. 2008. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física)-Faculdades Integradas Regionais de Avaré, Avaré, 2008.

JANKOWSKY, I. P. **Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial**. IPEF, Piracicaba, v. 81, p. 1-18, 1979.

KITZBERGER, T.; VEBLEN, T. T.; VILLALBA, R. Métodos dendroecológicos y sus aplicaciones en studios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. In: ROIG, F. A. **Dendrocronología en América Latina**. Mendoza: EIUNC, 2000. p. 17-78.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÉ, W. A. **Principles of wood and technology**. New York: Springer Verlag, 1975. v. 1.

KRZYSIK, A. M. et al. Medium density fiberboards from plantation grown *Eucalyptus saligna*. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 47-55, Oct. 2001.

LACLAU, J. P. et al. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo: 3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 21, n. 1/3, p. 375-391, 2005.

LARSON, P. R. **Stem form development of forest tree**. Washington, DC: Forest Science Monographs, 1963. p. 1-41.

LARSON, P. R. et al. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis**. General Technical Report. FPL-GTR-129. Madison: USDA Forest Products Laboratory, 2001. 42 p.

LOETSCH, F.; ZOEHRER, F.; HALLER, K. E. **Forest inventory**. München: BLV, 1973. v. 2. 469 p.

MALAN, F. S. Eucalipts improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba: IPEF; IPT; IUFRO; ESALQ, 1995. p. 1-19.

MARIAUX, A. La périodicité des cernes dans les bois de limba. **Bois et Forêts dès Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 128, p. 39-53, 1969.

MARIAUX, A. La périodicité de formation des cernes dans le bois de I'Oukoume. **Bois et Forêts dès Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 131, p. 375, 1970.

MENDONÇA, A. R. et al. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus sp.* para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 1, p. 71-82, jan./mar. 2007.

MIGLIORINI, A. J. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden em função de diferentes níveis de produtividade da floresta**. 1986. 100 f.



Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

MIGUEL, E. P. **Desenvolvimento de equações hipsométricas e volumétrica para estimar o volume total e comercial de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás.** 2009. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MONTANHEIRO, M. N. S.; NASCIMENTO FILHO, V. F.; PINTO, F. A. Introdução à espectrometria gama. **Boletim Didático do CENA**, Piracicaba, n. 21, p. 1-17, 1977.

MORAES, M. L. T. **Variação genética da densidade básica da madeira em progênies de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e suas relações com as características de crescimento.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). 1987. 115 f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. C. F.; ABREU, H. S. Métodos e técnicas de diagnose de identificação dos anéis de crescimento de árvores tropicais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 165-75, 2002.

PALERMO, G. P. M. et al. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 1-6, ago./dez. 2004.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology.** 4. ed. New York: McGraw Hill, 1980. 722 p.

PARRISH, W. B. Detecting defects in wood by the attenuation of gamma rays. **Forestry Science**, Washington, DC, v. 2, p. 136-143, 1961.

PIRES, L. M. **Ajuste e diagnóstico de modelos estocásticos lineares e não lineares para a descrição do perfil longitudinal das árvores.** 2004. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

POOLE, D. J. Diameter growth of 4 - 7 year old *Eucalyptus regnans*. **New Zealand Forestry**, Wellington, v. 31, n. 1, p. 23, 1986.

PRODAN, M. **Holzmesslehre.** Frankfurt: J. D. Suaerlander's Verlag, 1965. 643 p.

REZENDE, M. A. **Uso da técnica de atenuação da radiação gama no estudo da biomassa de *Eucalyptus grandis*.** 1984. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

REZENDE, M. A. **Uma abordagem convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de**

**atenuação de radiação gama.** 1997. 138 f. Tese (Livre Docência)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

REZENDE, M. A.; SAGLIETTI, J. R. C.; CHAVES, R. Specific gravity variation of *Eucalyptus grandis* wood at 8 years old in function of a different productivity indexes. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 53, p. 71-78, 1998.

REZENDE, M. A.; SEVERO, E. T. D.; QUINTANA, I. R. Estudo das variações da massa específica em *Pinus oocarpa* através da técnica de atenuação da radiação gama. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 29, n. 1/2, p. 67-84, 1999.

RIOS, M. S. **A eficiência das funções polinomiais, da função spline cúbica, e razões de volume para representar o perfil de árvores e estimar os sortimentos de *Pinus elliotti*.** 1997. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

ROLIM, M. B.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira produzida pela *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze em função dos anéis de crescimento. **IPEF**, Piracicaba, n. 9, p. 47-55, 1974.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User's Guide:** version 9.3. Cary: SAS Institute, 2011.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao manejo florestal.** Santa Maria: UFSM/CEPEF/ FATEC, 1993. 348 p.

SCHNEIDER, P. R. et al. Forma do tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 79-88, jan./jun. 1996.

SCHÖNGART, J. et al. Climate-growth relationships of tropical tree species in West Africa and their potential for climate reconstruction. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, p. 1139-1150, 2006.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal:** parte I: modelos de regressão linear e não-linear; parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso de matéria seca. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p. (Textos Acadêmicos).

SEARS, F.; YOUNG, H. D.; ZEMANSKY, M. W. **Física.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984. 2 v.

SETTE JUNIOR, C. R. **Aplicação do lodo de esgoto e de fertilização mineral no crescimento, biomassa e propriedades da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden, em plantações florestais, visando usos múltiplos** São Paulo: FAPESP, 2008. 126 f.

SETTE JUNIOR, C. R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* w. hill ex maiden.** 2010. 151 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SHEIL, D. Growth assessment in tropical trees: large daily diameter fluctuations and their concealment by dendrometer bands. **Canadian Journal Forest Research**, Canadá, v. 33, n. 1, p. 2027-2035, Oct. 2003.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. **IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p. 1-22, 1989. (Série Técnica).  
SILVA, G. F. et al. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 1997.

SILVA, D. A. da; TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se metodologia de análises de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Revista Cerne**, Lavras, v. 9, n. 1, p. 56-65, 2003.

SILVA, W. F. **Ajuste de modelos volumétricos e de afilamento para plantios de (*Eucalyptus urophylla*) no município de Niquelândia - GO.** 2008. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Florestal)- Faculdades Integradas de Mineiros, Mineiros, 2008.

SILVA JÚNIOR, F. G.; VALLE, C. F.; MUNER, J. C. G. Programa de qualidade da madeira da Votorantim Celulose e Papel - VCP. **O Papel**, São Paulo, v.1, p. 35-43, 1996.

SOARES, T. S.; CARVALHO, R. M. M. A.; VALE, A. B. Avaliação econômica de um povoamento de *Eucalyptus grandis* destinado a multiprodutos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 689-694, 2003.

SOUZA, C. R. et al. Comportamento da *Acácia mangium* e de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em plantios experimentais na Amazônia Central. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 95-101, 2004.

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

THIERSCH, C. R. **Modelagem da densidade básica, do volume e do peso seco para plantios de clones de *Eucalyptus* sp.** 2002. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal/ Florestas de Produção)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.

THIERSCH, C. R. et al. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clone de *Eucalyptus* sp. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 264-278, jul./set. 2006.

TOMAZELLO FILHO, M. **Formação e anatomia da madeira: exercícios práticos.** Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 76 p.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Características anatômicas das zonas de incremento do lenho de diferentes espécies arbóreas do Estado de São Paulo, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 46-55, dez. 2004.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. Tese (Livre Docência)-Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

TROVATI, L. R. **Resposta de densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa* Schiede aos fatores climáticos**. 1982. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

TROVATI, L. R., FERRAZ, E. S. B. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. **IPEF**, Piracicaba, n. 26, p. 31-36, abr. 1984.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood handbook**: wood as an engineering material. Madison: FPL, 1999. 474 p.

VALENZIANO, S.; SCARAMUZZI, G. Preliminary observations on the seasonal diameter growth of *Eucalyptus camaldulensis* and *E. viminalis*. In: **WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FORESTS AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE**, 1967, Canberra. **Proceedings...** Canberra: Wood and Agriculture Organization of the United Nations, 1967. p. 1923-1933.

VAZ, C. M. P. et al. Análise da densidade da madeira por tomografia. **Pesquisa em Andamento Embrapa**, São Carlos, n. 4, p. 1-4, 1996.

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. **Boletim Técnico SIF**, Viçosa, MG, n. 1, p. 1-21, 1984.

WILKES, J. The influence of rate of growth on the density and heartwood extractives content in eucalypt species. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 18, n. 2, p. 113-12 jun. 1984.

WIMMER, R.; DOWNES G. M.; EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. **Tree Physiology**, Canada, v. 22, n. 7, p. 449-457, 2002.

WORBES, M. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and longterm growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 87, p. 391-403, 1999.

ZOBEL, B. J. Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. Oxford: IUFRO Conference Division, 1980. p. 169-188.

## APÊNDICE

Apêndice 1 – Resultados de densidade básica dos discos e básica média ponderada das árvores do ensaio piloto.

ÁRVORE	COM CASCA		SEM CASCA		SEM CASCA	DENSIDADE SEM CASCA	DENSIDADE PONDERADA	ALTURAS	DIÂMETRO	Dif. Prop h	ALTURA REL. DE CADA DISCO	Hi
	MASSA_VERDE	VOLUME	MASSA_VERDE	VOLUME	MASSA_SECA	BÁSICA	BÁSICA MÉDIA	ÁRVORES	DISCOS			
A1B1 - 0%	591,37	53,5	477,25	422,1	199,4	472	483	0	14,182			
A1B1 - DAP	466,87	425	406,96	371,1	171,93	463		1,3	11,298	1,3	H1	060465
A1B1 - 25%	342	316,8	303,79	283,3	137,93	487		5,375	1,329	4,075	H2	189535
A1B1 - 50%	213,89	19,3	188,6	168	83,08	495		1,75	8,671	5,375	H3	25
A1B1 - 75%	143,26	126,1	125,49	109,6	54,53	498		16,125	6,159	5,375	H4	25
A1B1 - 100%	4,16	36,2	32,73	28,8	13,85	481		21,5	3,836	5,375	H5	25
A2B1 - 0%	897,45	872,1	718,89	698,4	314,41	450	409	0	15,9			
A2B1 - DAP	747,91	786,9	624,88	672,6	269,89	401		1,3	14,156	1,3	H1	050881
A2B1 - 25%	495,99	572,7	439,43	52,6	192,63	370		6,3875	13,815	5,0875	H2	199119
A2B1 - 50%	388,68	433	333,03	381,2	153,48	403		1,985	12,775	6,3875	H3	25
A2B1 - 75%	139,25	14,5	114,42	117,6	48,7	414		19,1625	7,5	6,3875	H4	25
A2B1 - 100%	111,67	115,4	89,58	95,2	39,54	415		25,55	5,619	6,3875	H5	25
A3B1 - 0%	2234,34	207,2	1862,89	1689,1	761,87	451	484	0	2,6			
A3B1 - DAP	1334,54	1256	115,27	1079	485,8	450		1,3	17,7	1,3	H1	049808
A3B1 - 25%	737,28	691,3	657,1	62,7	295,97	477		6,525	14,683	5,225	H2	200192
A3B1 - 50%	338,89	315,9	297,04	277,8	138,2	497		13,05	11,341	6,525	H3	25
A3B1 - 75%	208,01	193,4	172,94	160	83,61	523		19,575	7,127	6,525	H4	25
A3B1 - 100%	78,41	72,8	62,25	58,1	29,32	505		26,1	4,355	6,525	H5	25
A1B2 - 0%	1066,96	1069,1	861,57	871,1	392,06	450	404	0	16,9			
A1B2 - DAP	747,45	834,5	619,38	713,7	274,06	384		1,3	15,3	1,3	H1	053498
A1B2 - 25%	47,42	56,9	412,22	506	181,83	359		6,075	14,265	4,775	H2	196502
A1B2 - 50%	376,25	426,9	324,26	376,7	145,69	387		12,15	11,654	6,075	H3	25
A1B2 - 75%	19,65	196	156,65	163,1	66,23	406		18,225	8,309	6,075	H4	25
A1B2 - 100%	136,57	138,9	106,45	11,7	48,68	440		24,3	4,265	6,075	H5	25
A2B2 - 0%	1479,47	1397,7	1221,26	1124,2	479,99	427	458	0	2,75			
A2B2 - DAP	862,58	84,5	749,67	735	304,57	414		1,3	16,75	1,3	H1	051081
A2B2 - 25%	65,2	626,1	578,55	56,4	261,37	466		6,3625	13,966	5,0625	H2	198919
A2B2 - 50%	423,29	391,6	374,78	348	164,95	474		12,725	11,322	6,3625	H3	25
A2B2 - 75%	205,43	186,1	19,83	172,9	84,84	491		19,0875	7,629	6,3625	H4	25
A2B2 - 100%	91,05	84	74,74	69,4	32,88	474		25,45	3,531	6,3625	H5	25
A3B2 - 0%	1785,4	1685	1514,3	1404,2	629,61	448	477	0	19,8			
A3B2 - DAP	1196,2	1151,5	1032,32	995,2	43,47	433		1,3	17,75	1,3	H1	050388
A3B2 - 25%	737,32	721,4	656,35	643,7	296,09	460		6,45	15,187	5,15	H2	199612
A3B2 - 50%	547,5	506,6	483,05	445,7	218,6	490		12,9	12,313	6,45	H3	25
A3B2 - 75%	38,26	344,5	33,21	297,7	15,83	507		19,35	8,579	6,45	H4	25
A3B2 - 100%	10,53	93,2	81,49	74,8	39,17	524		25,8	3,847	6,45	H5	25
A1B3 - 0%	565,55	516,8	456,82	412,9	211,39	512	493	0	12,3			
A1B3 - DAP	448,1	416,1	393,75	366,8	174,79	477		1,3	18,27	1,3	H1	065823
A1B3 - 25%	354,73	335,7	318,47	302,7	145,26	480		4,9375	9,619	3,6375	H2	184177
A1B3 - 50%	311,34	283,3	277,63	252,7	123,8	490		9,875	8,196	4,9375	H3	25
A1B3 - 75%	196,31	175,5	17,34	151,9	75,52	497		14,8125	6,12	4,9375	H4	25
A1B3 - 100%	104,89	94,7	87,03	78,4	39,4	503		19,75	3,702	4,9375	H5	25
A2B3 - 0%	1025,88	1043,7	852,86	797,2	405,48	509	506	0	16			
A2B3 - DAP	805,2	697,8	692,53	57,5	278,58	488		1,3	13,5	1,3	H1	058166
A2B3 - 25%	60,54	494,6	534,66	444	219,05	493		5,5875	12,031	4,2875	H2	217089
A2B3 - 50%	336,3	311,4	297,64	277,1	139,92	505		11,175	9,9	5,5875	H3	282911
A2B3 - 75%	188,56	181,4	162,4	156	82,02	526		16,7625	7,398	5,5875	H4	282911
A2B3 - 100%	108,18	196,4	87,09	163,7	83,87	512		22,35	4,101	5,5875	H5	282911
A3B3 - 0%	113,73	956,2	887,5	777	355,82	458	488	0	15,811			
A3B3 - DAP	757,78	753,7	619,17	646,4	297,96	461		1,3	13,773	1,3	H1	056156
A3B3 - 25%	539,1	57,6	483,33	506,8	244,95	483		5,7875	11,597	4,4875	H2	193844
A3B3 - 50%	331,82	307,9	294,11	269,7	135,53	503		11,575	9,625	5,7875	H3	25
A3B3 - 75%	205,49	181,2	177,63	154,5	79,9	517		17,3625	6,98	5,7875	H4	25
A3B3 - 100%	205,95	99,2	171,16	79,3	4,08	505		23,15	3,682	5,7875	H5	25