



GEISI AZEVEDO SILVA

**RECONSTRUÇÃO DO HISTÓRICO DE
CRESCIMENTO E PROPRIEDADE
TECNOLÓGICA DE *Anadenanthera* spp.**

LAVRAS - MG

2014

GEISI AZEVEDO SILVA

**RECONSTRUÇÃO DO HISTÓRICO DE CRESCIMENTO E
PROPRIEDADE TECNOLÓGICA DE *Anadenanthera* spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em A Madeira como Matéria-Prima, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Ph. D Natalino Calegario

LAVRAS - MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Silva, Geisi Azevedo.

Reconstrução do histórico de crescimento e propriedade
tecnológica de *Anadenanthera* spp. / Geisi Azevedo Silva. – Lavras :
UFLA, 2014.

144 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Natalino Calegario.

Bibliografia.

1. *Anadenanthera* spp. - Anéis de crescimento. 2.
Anadenanthera spp. - Densidade aparente. 3. Manejo florestal. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.97

GEISI AZEVEDO SILVA

**RECONSTRUÇÃO DO HISTÓRICO DE CRESCIMENTO E
PROPRIEDADE TECNOLÓGICA DE *Anadenanthera* spp.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em A Madeira como Matéria-Prima, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2014.

Dra. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa UFLA

Dr. Paulo Fernando Trugilho UFLA

Ph. D Natalino Calegario

Orientador

LAVRAS-MG

2014

À minha família, amor incondicional.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus caminhos e por colocar pessoas tão especiais ao meu lado (anjos), sem as quais certamente não teria chegado ao fim!

Aos meus pais, meu infinito agradecimento. Aos meus irmãos, pelo incentivo direto e/ou indireto. Agradeço pelo amor incondicional. Família, você é minha inspiração e motivação! Ao meu bem, por estar ao meu lado sempre, pelo companheirismo, pela amizade, pela paciência e pela compreensão durante a execução deste trabalho. Amo vocês!

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade concedida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Natalino Calegario, por compartilhar o seu grande conhecimento, durante a execução deste trabalho e pela grande contribuição em minha formação. À professora Ana Carolina Maioli Campos Barbosa, pela contribuição e ajuda com os anéis de crescimento e pelo grande apoio ao ceder o Laboratório de Dendroecologia para as análises, durante sábados, domingos e feriados. Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pelos ensinamentos, contribuições e ideias para a execução deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela grande contribuição em minha formação.

Aos funcionários do DCF/UFLA, em especial à Chica, sempre disponível e disposta a ajudar a qualquer hora.

Aos companheiros de campo, professor Calegario, Vinícius, Ernani, Elliezer, Isaac, Mirian, Joyce, Marya, Vivian, Thaísa, Jéssica e Pâmela. Agradeço pela grande ajuda nas intermináveis coletas.

Ao professor José Reinaldo e ao técnico Hernani, do Laboratório de Usinagem da Madeira, pela grande ajuda na preparação das baguetas diametraais.

Ao professor Mario Tomazello, aos funcionários Aparecido e Maria, e a todos do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira, pelo grande apoio e ensinamentos durante a minha estadia na ESALQ/USP. Agradeço imensamente pelo apoio e por serem tão prestativos.

Aos companheiros do grupo Manejo Florestal Intensivo e Integrado, pelo apoio técnico e pela companhia durante almoços/jantares especiais. Aracaju está de portas abertas para vocês!

Aos amigos da Pós-Graduação, em especial às companheiras de sala, Joyce e Mirian, pelas conversas, pelos momentos de diversão e pela amizade. Agradeço por tudo, amigas mineiras!

Aos amigos de Lavras, em especial à Dona Salete, por me receber tão bem e por alegrar as tardes de café com prosa com as companheiras Vivian e Flávia. Agradeço pela companhia, meninas!

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho. *Thank you all!*

RESUMO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo geral a reconstrução do histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp. e a determinação de sua propriedade tecnológica, por meio do estudo dos anéis de crescimento e sua aplicação no manejo florestal, ao utilizar técnicas da análise de tronco e da densitometria de raios X. Os dados e as amostras de madeira foram provenientes de um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, localizado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sul de Minas Gerais. O capítulo I apresenta uma breve discussão teórica sobre os temas envolvidos neste trabalho. O capítulo II é constituído da reconstrução do histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp., baseada no estudo dos anéis de crescimento, compreensão da dinâmica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* e reconstrução do perfil longitudinal da árvore por meio de equações não lineares. O capítulo III trata da determinação da densidade aparente da madeira de *Anadenanthera* spp. por meio da técnica de densitometria de raios X.

Palavras-chave: Anéis de crescimento. Densidade aparente. Manejo Florestal.

GENERAL ABSTRACT

The present work aims to reconstruct tree growth of *Anadenanthera* spp. and determinate its technological property using tree-ring analysis and its application in forest management, using stem analysis techniques and X-ray densitometry. All the data were originating from a forest fragment with predominance of *Anadenanthera*, located the Federal University of Lavras (UFLA), south of Minas Gerais. The first chapter introduces a brief theoretical discussion about the topics involved. The second chapter shows the growth history of the *Anadenanthera* spp. trees based in the study of the growth rings, in the comprehension of the dynamics of the forest fragment and the reconstruction of the tree taper through non-linear equations. The third chapter deals with the determination of the apparent density of *Anadenanthera*'s wood using techniques of X-ray densitometry.

Keywords: Growth rings. Apparent density. Forest management.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1 Representação do padrão característico da curva de crescimento cumulativo de um indivíduo.....29

CAPÍTULO 2

- Figura 1 Ilustração da área de estudo: fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*. A e B, correspondentes ao Departamento de Ciências Florestais e Laboratório de Tecnologia da Madeira, respectivamente.....46
- Figura 2 Comportamento da altura total em função do diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*.....50
- Figura 3 Representação dos perfis longitudinais por classe de diâmetro. Em que: h_i = posição da cubagem rigorosa não destrutiva, em metros; r_i = raio, em centímetros54
- Figura 4 Obtenção dos discos para análise completa de tronco. A - Seleção e marcação das árvores-amostra; B - Coleta dos discos; C - Secagem ao ar livre; D - Polimento com lixadeira de cinta manual; E - Polimento com lixadeira orbital manual; F - Disco de árvore-amostra pronto para observação, contagem e medição dos anéis de crescimento57
- Figura 5 Representação da estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em cada ano.....66
- Figura 6 Altura total estimada versus altura total observada para as equações da relação altura-diâmetro: (1) polinomial de 2º grau; (2) potencial; (3) exponencial; (4) assintótica 1; (5) assintótica 2; (6) assintótica 3.....70

Figura 7	Curvas ajustadas para representar a relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i>	71
Figura 8	Volume estimado <i>versus</i> volume observado por meio da função logística de 3 parâmetros com inclusão de covariantes	75
Figura 9	Discos de <i>Anadenanthera</i> spp. (A): árvore A1, presente no fragmento florestal; (B): árvore A5, exterior ao fragmento florestal.....	76
Figura 10	Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A1. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura	78
Figura 11	Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A2. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura	80
Figura 12	Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A3. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura	82

Figura 13	Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A5. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura	84
Figura 14	Representação do perfil longitudinal das árvores de <i>Anadenanthera</i> spp. por meio da análise de tronco. Em que: h_{ij} = altura da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (m); r_{ij} = raio da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (cm)	88
Figura 15	Curvas do ajuste com a função de taper Gompertz para representar o perfil longitudinal das árvores de <i>Anadenanthera</i> spp. Em que: h_{ij} = altura da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (m); r_{ij} = raio da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (cm).....	90
Figura 16	Raio estimado (cm) versus raio observado (cm) por meio da função de <i>taper</i> Gompertz	92

CAPÍTULO 3

Figura 1	Obtenção dos perfis radiais de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho de <i>Anadenanthera</i> spp. A - Baguetas diametraais do lenho (Árvore A5); B - Colagem da amostra do lenho em suporte de madeira; C - Corte das amostras do lenho em equipamento de dupla-serra circular paralela; D - Equipamento de raios X QTRS-01X; E - Perfil da densidade aparente observado em tela de monitor; F - Amostra do lenho A12R1 e perfil radial de densidade aparente.....	104
----------	---	-----

Figura 2	Variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de <i>Anadenanthera</i> spp. Densidade aparente média, em g cm ⁻³ ; posição base-topo, em metros. 1= Árvore A1; 2= Árvore A2; 3= Árvore A3; 4= Árvore A4; 5=Árvore A5.....	106
Figura 3	Perfil radial de densidade aparente do lenho (g cm ⁻³) da amostra A11R1 (disco da base) de <i>Anadenanthera</i> spp., no sentido medula-casca	108
Figura 4	Perfil radial de densidade aparente do lenho (g cm ⁻³) de <i>Anadenanthera</i> spp., no sentido medula-casca. (a) - Amostra A41R2 (disco da base); (b) - Amostra A51R2 (disco da base).....	111
Figura 5	Densidade aparente média (g cm ⁻³) observada e ajustada do lenho de <i>Anadenanthera</i> spp. em função da posição longitudinal (m) para efeitos fixos e aleatórios (arv= árvore). 1= Árvore A1; 2= Árvore A2; 3= Árvore A3; 4= Árvore A4; 5=Árvore A5.....	114

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1	Síntese dos dados de diâmetro à altura do peito (DAP) do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i> , em cada ano de coleta	48
Tabela 2	Distribuição diamétrica e de altura total das árvores-amostra para estimativa da relação altura-diâmetro	49
Tabela 3	Estatísticas descritivas das variáveis do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i> , em 2012.....	50
Tabela 4	Distribuição diamétrica e de altura total das árvores-amostra para estimativa da cubagem rigorosa não destrutiva.....	53
Tabela 5	Diâmetro à altura do peito e altura total das árvores-amostra para a análise completa de tronco	55
Tabela 6	Estatísticas de ajuste da equação não linear da estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i>	67
Tabela 7	Estatísticas de ajuste das equações da relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i>	68
Tabela 8	Estatísticas de ajuste da função logística de 3 parâmetros com inclusão de covariantes, por classe de DAP, para representar o afilamento de <i>Anadenanthera</i>	72
Tabela 9	Índice de competição das árvores-amostra para a análise completa de tronco	87
Tabela 10	Estatísticas de ajuste da função de Gompertz, para cada árvore, para representar o perfil longitudinal de <i>Anadenanthera</i> spp.	89
Tabela 11	Volume real e volume estimado, para cada árvore	91

CAPÍTULO 3

Tabela 1	Diâmetro à altura do peito, altura total e quantidade de baguetas coletadas das árvores-amostra para avaliação da densidade aparente do lenho.....	101
Tabela 2	Resultados de densidade aparente média, mínima e máxima (g cm^{-3}) do lenho de <i>Anadenanthera</i> spp. por meio da densitometria de raios X.....	109
Tabela 3	Estatísticas de ajuste da equação não linear proposta de efeitos fixos e aleatórios da variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de <i>Anadenanthera</i> spp.	113
Tabela 4	Estimativas do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i>	115

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	Introdução geral	17
1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Caracterização da madeira de <i>Anadenanthera</i> spp.....	21
2.2	Relação altura-diâmetro	22
2.3	Volume de árvore individual	23
2.4	Perfil longitudinal da árvore	26
2.5	Crescimento da árvore.....	28
2.6	Análise de tronco	30
2.7	Densitometria de raios X	34
	REFERÊNCIAS	37
CAPÍTULO 2	Reconstrução do histórico de crescimento e dinâmica do fragmento florestal com predominância de <i>Anadenanthera</i>	42
1	INTRODUÇÃO	44
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	46
2.1	Coleta de dados.....	47
2.2	Relação altura-diâmetro	50
2.3	Cubagem rigorosa não destrutiva	52
2.4	Análise completa de tronco.....	54
2.5	Determinação do índice de competição	58
2.6	Reconstituição do perfil longitudinal das árvores.....	59
2.7	Análises estatísticas das equações ajustadas	63
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	65
3.1	Estrutura diamétrica	65
3.2	Relação altura-diâmetro	67
3.3	Ajuste das funções de <i>taper</i> com dados de cubagem rigorosa não destrutiva	71
3.4	Análise completa de tronco.....	75
3.5	Determinação do índice de competição	86
3.6	Reconstituição do perfil longitudinal das árvores.....	87
4	CONCLUSÕES.....	93
	REFERÊNCIAS	94
CAPÍTULO 3	Variação da densidade aparente do fuste de <i>Anadenanthera</i> spp.....	97
1	INTRODUÇÃO	99
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	101
2.1	Coleta de dados.....	101
2.2	Avaliação da densidade aparente do lenho	102

2.3	Análises estatísticas.....	105
2.4	Variação longitudinal da densidade aparente do lenho.....	105
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	108
3.1	Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	108
3.2	Variação longitudinal da densidade aparente do lenho.....	112
3.3	Aplicabilidade da equação proposta ajustada da densidade aparente do lenho.....	114
4	CONCLUSÕES.....	117
	REFERÊNCIAS	118
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
	APÊNDICE	122

CAPÍTULO 1 Introdução geral

1 INTRODUÇÃO

O consumo brasileiro de madeira em tora, proveniente de plantios florestais, em 2012, foi de 182,4 milhões de metros cúbicos, superior ao ano de 2011 em 7,2% (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

Em razão da importância econômica das espécies exóticas de rápido crescimento, tem-se dado mais ênfase às mesmas nos estudos que envolvem o crescimento da floresta e às propriedades tecnológicas da madeira.

Entretanto, apesar das florestas tropicais naturais apresentarem muitas espécies com alto valor comercial, pesquisas, ainda, são incipientes. O ritmo de crescimento dessas espécies é pouco conhecido e, por isso, há grande necessidade de obter informações sobre o seu crescimento e sobre as propriedades tecnológicas da madeira, com finalidade de conservação e manejo florestal sustentável que auxiliem na definição do seu uso.

A biometria florestal é extremamente importante pelo fato de contribuir para o conhecimento e avaliação do desenvolvimento da floresta, fornecendo princípios para o ordenamento florestal racional. As informações sobre a dinâmica de crescimento das espécies, o ciclo e intensidade de corte, ainda, são escassos em florestas tropicais, porque dependem de séries históricas de crescimento das espécies, tradicionalmente, obtidas pelo monitoramento do crescimento em unidades amostrais permanentes.

A análise dos anéis de crescimento é uma alternativa para a recuperação das informações relacionadas ao crescimento e da madeira. Sua aplicação em espécies comerciais de florestas tropicais naturais pode auxiliar a estabelecer o manejo florestal sustentável, onde a demanda por madeira é grande e dados

sobre o crescimento das espécies são indisponíveis. O manejo sustentável em florestas tropicais naturais é extremamente complexo em consequência da ocorrência de árvores de diferentes espécies, idades e tamanhos.

Mattos e Seitz (2008) relataram a formação de anéis de crescimento anuais em *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* pela sazonalidade da precipitação pluviométrica no Pantanal Mato-Grossense. A madeira de angico, da área de estudo, apresenta camadas de crescimento delimitadas por faixa de parênquima axial visível a olho nu, portanto, com potencial para estudos com anéis de crescimento. A visibilidade dos anéis de crescimento pode ser em virtude das condições climáticas da área (temperatura e precipitação), com predominância de verão chuvoso e inverno seco, das condições de sítio (competição, luz) e da característica de caducifólia da espécie.

Entretanto, algumas amostras de angico apresentaram problemas de visualização dos anéis de crescimento, o que dificultou a determinação da idade pela contagem do número dos anéis de crescimento. Elas não apresentaram nitidamente os elementos anatômicos de delimitação do lenho inicial e tardio.

O angico é comumente empregado na produção de energia em forma de lenha, como moirões em pequenas propriedades rurais, na confecção de móveis e na construção civil. Em decorrência da grande empregabilidade e sua ocorrência geográfica abundante, há necessidade de conhecer o seu ritmo de crescimento em diferentes condições climáticas e de sítio. Além disso, determinar as propriedades tecnológicas da madeira.

Desse modo, este trabalho foi realizado para contribuir para a ampliação dos estudos com anéis de crescimento de espécies tropicais e poderá colaborar para o manejo sustentável de um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*. Portanto, o presente trabalho estrutura-se em três capítulos e tem como objetivo geral a reconstrução do histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp. e a determinação de sua propriedade tecnológica, por meio

do estudo dos anéis de crescimento e sua aplicação no manejo florestal, ao utilizar técnicas da dendrocronologia, da análise de tronco e da densitometria de raios X.

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos: estimar a idade das árvores e ajustar equações biométricas florestais para um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*; compreender as estratégias de crescimento e estabelecimento de *Anadenanthera* spp.; reconstruir as curvas de crescimento de *Anadenanthera* spp., em diâmetro, altura e volume; e determinar a variação radial e longitudinal da densidade aparente de *Anadenanthera* spp.

Os trabalhos desenvolvidos são apresentados com a seguinte estrutura: o capítulo I apresenta uma breve discussão teórica sobre os temas envolvidos neste trabalho; o capítulo II é constituído da reconstrução do histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp., baseada no estudo dos anéis de crescimento, compreensão da dinâmica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* e reconstrução do perfil longitudinal da árvore, por meio de equações não lineares; e o capítulo III trata da determinação da densidade aparente da madeira de *Anadenanthera* spp., por meio da técnica de densitometria de raios X.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O gênero *Anadenanthera* pertence à família Fabaceae e à subfamília Mimosoideae, essa dentro das Leguminosae, é constituído de espécies decíduas, heliófitas até ciófitas, seletivas xerófitas e pioneiras.

O gênero *Anadenanthera*, com sua diversidade de espécies, é considerado um gênero bem homogêneo (RIZZINI, 1981). Por ser considerado homogêneo, é formado por espécies com estreita afinidade morfológica, são elas: *A. cobi*, *A. rigida*, *A. gonoacantha*, *A. colubrina*, *A. peregrina*, *A. macrocarpa* e *A. falcata*. Além das variedades: *A. colubrina* var. *cebil*, *A. colubrina* var. *colubrina*, *A. peregrina* var. *falcata* e *A. peregrina* var. *peregrina*.

A distribuição geográfica dessas espécies ocorre desde as Antilhas e região amazônica até as regiões central e sudeste do Brasil (RIZZINI, 1981). São comuns em matas e campos altos, com ocorrência, também, no cerrado, na Floresta Estacional Semidecidual e na Floresta Ombrófila Densa.

Uma das espécies pertencentes a este gênero é a *Anadenanthera peregrina*, conhecida popularmente como angico-vermelho. A madeira dessa espécie é considerada muito pesada, com densidade básica de $1,080 \text{ g cm}^{-3}$, dura, de textura média, grã reversa, de boa resistência mecânica e muito durável (LORENZI, 2002). Segundo Rizzini (1981), a madeira apresenta cerne pardo-avermelhado, pouco diferenciado do alburno, com anéis de crescimento indistintos. A árvore apresenta casca grossa, rugosa, verrucosa e com acúleos em indivíduos jovens.

Outra espécie desse gênero é a *Anadenanthera colubrina*, conhecida popularmente como angico-branco. A madeira dessa espécie é considerada pesada, com densidade de $0,930 \text{ g cm}^{-3}$, compacta, bastante dura, composta de fibras grossas e reversas e de grande durabilidade (LORENZI, 2000). O cerne é

pardo-amarelado, indistinto do alburno, com anéis de crescimento indistintos (RIZZINI, 1981).

A característica caducifolia desse gênero, em condições de crescimento desfavorável, é um fator que pode propiciar a formação de anéis de crescimento em espécies arbóreas. Em decorrência dessa característica, as espécies de angico, da área de estudo, apresentam parênquima axial visível a olho nu, paratraqueal vasicêntrico, com camadas de crescimento delimitadas e visíveis.

2.1 Caracterização da madeira de *Anadenanthera* spp.

A madeira de angico é empregada para construção civil, como caibros, vigas, ripas, esteios, batentes de portas, obras externas, como moirões e estruturas de pontes, confecção de móveis e esquadrias, além de fornecer lenha e carvão de qualidade (LORENZI, 2000, 2002; RIZZINI, 1981). Sua casca é rica em tanino e, por isso, é útil em curtumes. Além disso, pode ser aproveitada para a arborização de parques e praças e para o plantio em florestas mistas destinadas à recomposição de áreas degradadas de preservação permanente (LORENZI, 2000, 2002).

Em decorrência da grande utilização da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina*) e a sua distribuição geográfica, Mori et al. (2003) realizaram um estudo, na mesma área experimental do presente trabalho, com a finalidade de caracterizar essa madeira anatomicamente e estudar as propriedades físicas e químicas. Estes autores concluíram que essa espécie pode produzir lenha e carvão de qualidade, em razão do elevado teor de lignina. Por causa do alto teor de extrativos, pode ser utilizado na extração de taninos para curtimento e adesivos. A madeira apresentou grande potencial para a confecção de móveis, sendo considerada pesada, dura ao corte e moderadamente densa, apresentando relativa trabalhabilidade e boa aceitação ao verniz e acabamentos.

O angico-vermelho é uma espécie considerada promissora para plantios comerciais e manejo sustentável, em virtude de seu valor econômico, com produção de madeira valiosa, seu desempenho silvicultural aceitável e sua aptidão para programas de regeneração artificial (ESPÉCIES..., 2007). Portanto, uma espécie com grande necessidade para obter informações sobre o seu crescimento.

2.2 Relação altura-diâmetro

A altura total é uma variável de difícil obtenção e, em florestas tropicais naturais, de dossel superior elevado, com árvores de maior idade, a coleta é, ainda, mais complexa, principalmente pela dificuldade de visualização do topo das árvores. Uma alternativa para solucionar esse problema é a escolha correta da relação entre a altura e outra variável explicativa de uma árvore, como o diâmetro medido à altura do peito (DAP), a qual fornece a estimativa das alturas das demais árvores, das quais apenas o diâmetro foi mensurado.

Definida como a relação existente entre a altura total e outra(s) variável(eis) explicativa(s) de uma árvore, como o DAP, idade, área basal, a relação hipsométrica é de fundamental importância por proporcionar uma amostragem mais prática e econômica, visto que a altura representa uma variável de obtenção mais lenta, o que ocasiona elevado custo de mensuração quando comparada ao diâmetro.

Uma das dificuldades do ajuste da relação altura-diâmetro é o grande número de variáveis que a influenciam, dificultando a construção de equações genéricas com base em métodos empíricos como a regressão linear e não linear (BATISTA; COUTO; MARQUESINI, 2001). Dentre as diversas variáveis que influenciam a relação altura-diâmetro, destacam-se: espécie, idade, qualidade do sítio, densidade, posição da copa, comprimento da copa, tratamentos silviculturais.

Por ser considerada como uma estimativa, há necessidade de escolher a melhor equação hipsométrica que represente e explique a realidade dos dados. A escolha correta dessa relação permite caracterizar o comportamento da altura das árvores nas quais essas não foram medidas ao longo do tempo. Além disso, permite inferir sobre a estrutura vertical de uma floresta inequiana (SOARES et al., 2011).

Ao ajustar equações hipsométricas, para onze espécies florestais nativas plantadas em unidades amostrais experimentais, Soares et al. (2011) encontraram coeficientes de determinação (R^2) maiores que 60% em equações hipsométricas com apenas o diâmetro à altura do peito como variável independente. Uma melhoria significativa é observada no ajuste dessas equações, ao acrescentar os efeitos de mais variáveis independentes na relação hipsométrica, como a idade, área basal e índice de sítio.

2.3 Volume de árvore individual

A quantificação do volume de uma floresta é uma atividade habitual em inventários florestais pré-corte e na obtenção do estoque de volume de madeira. Por ser uma variável importante e por saber que as estimativas volumétricas das árvores individuais são aplicadas para o resto da floresta, há necessidade de buscar métodos e equações estatísticas mais precisas na sua quantificação, o que torna os planejamentos das florestas mais eficazes e rentáveis.

O método direto de estimativa do volume de árvore individual mais utilizado nos inventários florestais é a cubagem rigorosa. Consiste na divisão da árvore, em seções de comprimentos iguais ou não e, por meio de fórmulas matemáticas desenvolvidas, considerando o estudo da forma das árvores, é determinado o volume de árvore individual com ou sem casca.

A determinação da espessura da casca e sua variação ao longo do fuste são de grande importância para objetivos da produção e comercialização da madeira. Em espécies que a madeira é comercializada sem a casca, é necessário descontar o volume da casca dos fustes. Entretanto, há espécies em que o valor comercial reside, também, na casca do fuste. A quantificação do volume da casca para essas espécies tem uma importância ainda maior, por afetar a produtividade.

Husch, Miller e Beers (1982) afirmaram que o volume da casca, em média, representa 10% a 20% do volume com casca para a maioria das espécies. O volume da casca, em geral, é obtido pela diferença entre o volume com casca e o volume sem casca do fuste.

Meyer (1946 apud HUSCH; MILLER; BEERS, 1982), desenvolveu um método para determinar o volume da casca, ao utilizar medições apenas no DAP. Esse autor afirmou que o fator de casca (K) é constante ao longo do fuste e consiste na relação existente entre o diâmetro sem casca e o diâmetro com casca. A verificação do fator de casca ao longo do fuste é importante para a amostragem da quantificação do volume da casca. Se o fator de casca for constante ao longo do fuste é necessária apenas a sua coleta na altura do DAP, ocasionando uma amostragem mais prática e econômica.

Ao avaliar o uso de equações tradicionais, de funções de *taper* e do método da altura relativa na estimativa do volume comercial de *Anadenanthera colubrina*, na mesma área de estudo, Carvalho et al. (2010) concluíram que a equação tradicional de Stoate foi a mais precisa, com erro padrão residual de 10,80%, seguida da equação de Schumacher e Hall, com erro padrão residual de 11,22%. Os volumes comerciais, encontrados por estes autores, provenientes da cubagem rigorosa destrutiva, variaram entre valores menores que 0,2 m³ a 1,0 m³.

Ao avaliar duas equações volumétricas, a de Schumacher e Hall (1933) e a de Spurr (1952), para ajustar o volume com casca para onze espécies florestais nativas plantadas em unidades amostrais experimentais, Soares et al. (2011) encontraram coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) maiores que 76%. A equação volumétrica de Spurr foi a que melhor ajustou-se aos dados de volume do fuste com casca para seis espécies (peroba do campo, ipê-preto, jatobá, sapucaia, aroeira do sertão e bilro). Enquanto a equação volumétrica de Schumacher e Hall foi a melhor para as demais espécies (guatambu, ipê-amarelo, peroba-rosa, pau-prata e pau-marfim).

Chichorro, Resende e Leite (2003), ao ajustar uma equação de volume, a equação linearizada de Schumacher e Hall, para estimar o volume comercial individual com casca de espécies da Floresta Atlântica, observaram que essa equação ajustou-se bem aos dados, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 98,15% e com distribuição normal dos resíduos.

Com o avanço da tecnologia a laser, equipamentos foram desenvolvidos a fim de facilitar a execução dos trabalhos no campo. Um desses equipamentos é o dendrômetro óptico Criterion RD1000, que permite obter medidas de diâmetro a qualquer altura ao longo do tronco e, também, possibilita a determinação da altura em que um diâmetro especificado é alcançado, sem a necessidade de derrubar a árvore. Além disso, indica a porcentagem de inclinação do terreno e as árvores que estão incluídas ou não, quando relacionadas ao fator de área basal especificado.

A quantificação do volume com o uso desse tipo de equipamento é considerada uma cubagem rigorosa não destrutiva e, portanto, é de grande importância para o planejamento e para a estimativa do incremento das florestas, principalmente, em florestas tropicais naturais.

Ao avaliar a exatidão dos dendrômetros ópticos, Criterion 400 e RC3H na qualidade das medidas da cubagem rigorosa não destrutiva, na possibilidade

da utilização desses em substituição ao método destrutivo, Nicoletti et al. (2012) observaram que os dois dendrômetros forneceram medidas subestimadas de modo geral, porém, o Criterion 400 resultou em melhores estimativas de diâmetro do fuste e volume da árvore, uma maior confiabilidade e exatidão dessas variáveis.

2.4 Perfil longitudinal da árvore

Taper ou afilamento é o decréscimo do diâmetro no sentido base-topo ao longo do fuste. Com base nesse afilamento, é possível reconstituir o perfil longitudinal da árvore por meio de funções de *taper*.

As funções de *taper* apresentam maiores benefícios em relação às equações volumétricas, por fornecerem estimativas do diâmetro com ou sem casca a uma altura qualquer ao longo do fuste, o volume total, o volume comercial e a altura comercial correspondente a um diâmetro mínimo de uso, e os volumes individuais das seções em qualquer comprimento e a uma altura qualquer (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982; KOZAK, 2004).

Considerando as funções de *taper*, é possível quantificar os sortimentos da madeira e, dessa forma, aumentar o seu aproveitamento, ao contrário das equações volumétricas que estimam apenas o volume total e o volume comercial do fuste, o que torna as funções de *taper* flexíveis quando comparadas às equações volumétricas.

Os estudos, utilizando funções de *taper*, para descrever o perfil longitudinal de espécies de rápido crescimento, são bem mais frequentes em relação aos estudos com espécies tropicais de ocorrência ambiental natural ou essas espécies em plantios homogêneos.

Diferentes funções de *taper* foram desenvolvidas, desde funções mais simples e com maior facilidade de ajuste, como as funções polinomiais, as

funções apresentadas por Demaerschalk (1972) e Kozak, Munro e Smith (1969), até funções mais complexas e com maior dificuldade de ajuste, como as funções apresentadas por Kozak (1988, 2004) e as funções não lineares sigmoidais, como a logística, de Gompertz e de Weibull (CALEGARIO, 2002; PIRES; CALEGARIO, 2007).

Apesar das funções de *taper* lineares serem mais utilizadas para representar o perfil longitudinal das árvores em virtude da sua facilidade de ajuste e precisão, Pires e Calegario (2007) afirmaram que as funções não lineares apresentam como vantagens e características desejáveis, em relação às funções lineares: parcimônia, interpretação dos parâmetros e extrapolação, consistindo em uma maior segurança ao utilizar a função em outro conjunto de dados.

Carvalho et al. (2010), ao avaliar o uso de equações tradicionais, de funções de *taper* e do método da altura relativa na estimativa do volume comercial de *Anadenanthera colubrina*, na mesma área de estudo, concluíram que todos os métodos são aplicáveis para a estimativa do volume comercial e que mais ênfase deve ser dada para as funções de *taper*, por ser uma ferramenta fundamental para quantificar os sortimentos da madeira.

Ao verificar qual a função de *taper* que melhor represente o perfil do tronco de onze espécies florestais nativas, plantadas em unidades amostrais experimentais, Soares et al. (2011) concluíram que a função proposta por Biging (1984) foi superior às demais em dez das onze espécies estudadas e, para a espécie jatobá, a melhor função de *taper* foi a proposta por Demaerschalk (1972).

Ao ajustar as equações de *taper*, de Demaerschalk (1972) e Kozak (1969), para quantificar os sortimentos da madeira de espécies da Floresta Atlântica, Chichorro, Resende e Leite (2003) observaram que a função de Demaerschalk (1972) ajustou-se bem aos dados, forneceu estimativas mais

precisas e resultados consistentes e aceitáveis, estatisticamente, na estimativa de diâmetros ao longo do fuste, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,93 e com distribuição normal dos resíduos.

2.5 Crescimento da árvore

O crescimento da árvore é influenciado pela interação da espécie com as condições ambientais, tais como: fatores climáticos (temperatura, precipitação, vento), fatores edáficos (características físicas e químicas, umidade, microrganismos), características topográficas (declividade, elevação), e competição (influências de outras árvores, regeneração natural).

Quando a variável de uma árvore (altura, diâmetro, volume ou área basal) é representada graficamente em função da idade, é definida a curva de crescimento cumulativo (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982). Essa curva de produtividade ou incremento em cada idade apresenta um padrão característico para qualquer indivíduo: o formato sigmoide (Figura 1).

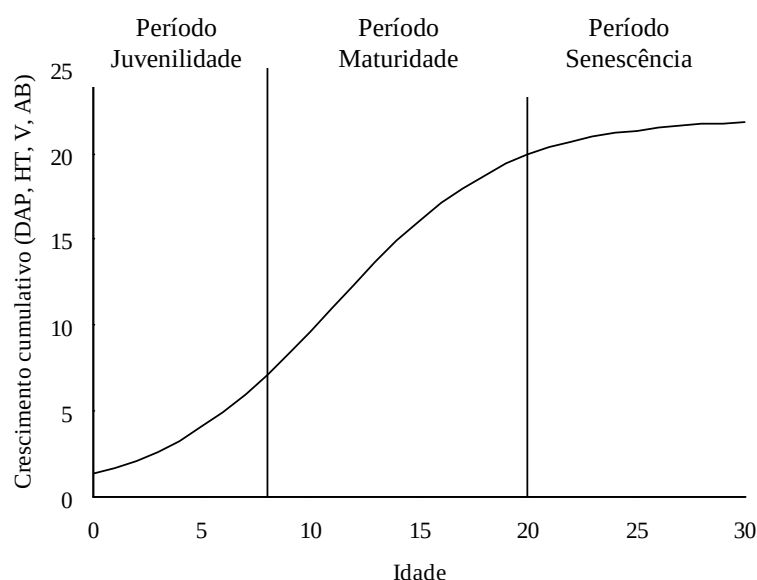


Figura 1 Representação do padrão característico da curva de crescimento cumulativo de um indivíduo

Fonte: Adaptado de Husch, Miller e Beers (1982).

As curvas de incremento médio anual (IMA), de incremento corrente anual (ICA), de incremento periódico (IP) e de incremento periódico médio (IPM), em diâmetro, área basal, altura ou volume, são todas derivadas das curvas de crescimento cumulativo, conforme Husch, Miller e Beers (1982).

As equações não lineares sigmoidais são aplicadas em estudos de crescimento, como a equação logística, de Richards, de Chapman-Richards, de Weibull e de Gompertz. Essas equações apresentam como característica comum um crescimento monotônico até atingir um ponto de inflexão, onde a taxa máxima de crescimento é alcançada e, posterior a este ponto, a mesma declina e tende a zero na assíntota horizontal superior (CALEGARIO et al., 2005b).

O emprego de técnicas mais complexas, para a estimativa do crescimento de povoamentos, permite a melhoria dos ajustes e uma maior precisão, como os trabalhos desenvolvidos utilizando a teoria do modelo linear de efeito misto (CALEGARIO et al., 2004) e a teoria dos modelos não lineares em multinível de efeito misto (CALEGARIO et al., 2005a), com a modelagem da heterogeneidade da variância e autocorrelação. A heteroscedasticidade e a autocorrelação são problemas que podem estar presentes em certas bases de dados e que violam as pressuposições básicas da teoria dos modelos lineares e não lineares ordinários (CALEGARIO et al., 2005b).

Calegario et al. (2005b), ao estimar o crescimento em altura, com a presença de heterogeneidade de variância e da autocorrelação, verificaram uma melhoria significativa na precisão da equação logística ao incluir covariantes na equação, como variáveis relativas à árvore individual (DAP) e ao povoamento (clone, área basal e altura média das árvores dominantes e codominantes). Com a modelagem da heterogeneidade de variância e da autocorrelação, com base no uso da metodologia dos modelos lineares e não lineares generalizados, a distribuição dos resíduos foi melhorada e o valor do logaritmo da máxima verossimilhança foi elevado, este foi ainda mais significativo com a modelagem da autocorrelação, ocasionando melhorias estatisticamente significativas.

2.6 Análise de tronco

As unidades amostrais permanentes ou temporárias são as principais fontes de dados para estudos de crescimento e produção florestal. Como alternativa, em substituição às unidades amostrais ou ausência de dados, tem-se a técnica de análise de tronco, que permite conhecer o crescimento, em altura, diâmetro e volume, ocorrido em cada idade por meio da visualização dos anéis anuais de crescimento. Além disso, pode-se determinar a idade atual das árvores.

Uma restrição ao uso dessa técnica é o emprego somente em espécies com anéis de crescimento anuais distintos e visíveis.

A análise de tronco pode ser realizada de duas formas: quando a amostragem e a medição dos anéis de crescimento são feitas no diâmetro à altura do peito, com a retirada de uma bagueta com o auxílio do trado de incremento ou com a retirada de um disco, tem-se a análise parcial de tronco; e quando a amostragem for feita pela retirada de discos em diferentes alturas ao longo do fuste, tem-se a análise completa de tronco (CARRON, 1968 apud CAMPOS; RIBEIRO, 1987).

A análise parcial de tronco é utilizada no estudo de crescimento em diâmetro, área basal e volume. Enquanto a análise completa de tronco é empregada em estudos de crescimento em altura e na classificação do potencial produtivo do local.

O método de análise parcial de tronco, apesar de permitir o estudo do crescimento da árvore sem precisar abatê-la, apresenta restrições quanto a sua acurácia, como a excentricidade das seções, a formação irregular e o tamanho dos anéis de crescimento, podendo acarretar incertezas nas estimativas dos incrementos em anel, tornando-as mais pronunciadas com o aumento da idade (FINGER, 1992).

Campos e Ribeiro (1987), com a finalidade de aumentar a eficiência do procedimento de análise parcial de tronco como fonte de dados para estudos de crescimento e produção florestal, utilizaram o programa STEMAN com o objetivo de vincular a distribuição dos diâmetros das árvores do povoamento à amostragem das árvores tratadas. Estes autores observaram que os dados de diâmetro, área basal e volume, com base nessa técnica, foram bem precisos quando comparados com os valores observados em diferentes idades e sítios. O que torna a análise parcial de tronco uma alternativa em caso de inexistência de dados de unidades amostrais permanentes.

O crescimento em diâmetro anual na análise de tronco é facilmente obtido por meio da medição do incremento anual dos raios dos anéis de crescimento na superfície da amostra tratada ou nos discos retirados ao longo do fuste. Enquanto que o crescimento em altura é estimado por métodos baseados na quantidade dos anéis de crescimento de cada disco, como o método gráfico (MLODZIANSKY, 1898), de Carmean (1972), Graves (1906) e Lenhart (1972), método de Carmean modificado por Newberry (1991) e método ISSA (FABBIO; FRATTEGANI; MANETTI, 1994), e métodos baseados na medição do incremento dos raios de cada anel de crescimento em cada disco, além da quantidade dos anéis de crescimento nas seções, como o método de Newberry (1978 apud DYER; BAILEY, 1987), e o método de Kariuki (2002).

O primeiro método, para estimar a altura por meio da análise de tronco, foi desenvolvido por Mlodziansky (1898). Este método consiste na determinação da altura por meio da interpolação gráfica, com base na altura da seção transversal e o número de anéis de crescimento presentes na seção. A altura da árvore correspondente para cada idade é determinada diretamente na curva pela ligação desses pontos.

Graves (1906), ao considerar que o crescimento em altura em cada ano é constante, propôs um método para estimar a altura associada a qualquer idade, diferentemente do método anterior que só é possível estimar a altura da idade associada a um anel interno. A denominação de anel interno refere-se ao número de anéis de crescimento presente no disco analisado que não está presente no superior.

Carmean (1972), ao desenvolver curvas de índice de sítio por meio da análise de tronco, verificou que o crescimento anual em altura era constante entre consecutivos pontos de seção transversal, e que, em média, a seção era retirada no meio da altura de crescimento anual. Lenhart (1972), ao analisar o método de Carmean (1972), propôs um método alternativo a fim de melhorar os

dados de altura/idade, considerando a análise de tronco. Segundo Lenhart (1972), os pontos onde o crescimento em altura termina, em média, eram igualmente distribuídos ao longo da seção que o contém.

Dyer e Bailey (1987), ao comparar seis métodos para estimar altura por meio da análise de tronco, observaram que o método de Carmean foi o mais preciso em relação aos outros, e que os métodos propostos por Lenhart (1972) e Newberry (1978) foram considerados aceitáveis.

Newberry (1991), ao analisar o método de Carmean, constatou que o mesmo não se aplicava para o ápice da árvore, acima do último ponto da seção transversal. Uma vez que o nó anual do último ano de crescimento encontrava-se no final da seção e não no meio dessa seção, conforme Carmean (1972). Então, a média anual do crescimento em altura era subestimada em relação à altura verdadeira da árvore na última seção. Assim, Newberry (1991) modificou o método de Carmean, subtraindo 0,5 anos, para a última seção, no intervalo da diferença do número de anéis de crescimento.

Fabbio, Frattegiani e Manetti (1994), ao comparar os valores reais das alturas anuais com os métodos de Carmean, Lenhart e ISSA, com comprimentos de seção de 50 cm, 100 cm e 200 cm, observaram que o método ISSA foi o mais preciso em seção de 50 cm, e o método de Carmean em seção de 200 cm. Enquanto o método de Lenhart apresentou menor acurácia nos três comprimentos.

Kariuki (2002) elaborou o método *Tree Annual Radial Growth* (TARG), que é baseado na quantidade de anéis de crescimento e medição dos incrementos acumulados dos raios desses anéis anuais. Este método considera que o crescimento anual em altura, completamente ou parcialmente, contido dentro de uma seção, pode ser estimado, com base no crescimento anual radial da base da seção.

Kariuki (2002), ao comparar o seu método TARG com o método de Carmean (1972), Lenhart (1972) e Newberry (1978) e o método ISSA (FABBIO; FRATTEGANI; MANETTI, 1994), observou que o seu método foi o mais preciso com seção de comprimento 1,5 metros a 3 metros, embora os métodos de Carmean e Lenhart não apresentassem diferenças significativas a 95% de significância.

Machado et al. (2010), a fim de comparar os valores reais das alturas dos anéis de crescimento anuais com os valores estimados por meio da técnica de análise completa de tronco, utilizaram seis árvores de *Pinus taeda* com discos de 5 centímetros de espessura nas alturas de 0,1 m; 0,7 m; 1,30 m e a cada 1 metro ao longo do tronco. Estes autores observaram que os métodos de Carmean (1972) e Lenhart (1972) foram os melhores métodos para estimar a altura do anel de crescimento das árvores com 1 metro de comprimento da seção.

2.7 Densitometria de raios X

A densidade básica é conceituada como a relação entre a massa de madeira seca e o seu volume totalmente saturado. É considerada um dos principais parâmetros da avaliação da qualidade da madeira (FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1992).

Para a determinação da densidade da madeira são comumente empregados os métodos gravimétricos. Outro método para determinar a densidade da madeira é a densitometria de raios X. O uso dessa técnica permite examinar as variações da densidade da madeira a distâncias micrométricas, o que é praticamente impossível pelo método gravimétrico convencional. Proporciona, também, a seleção das árvores que produzem madeira com densidade mais uniforme e mais elevada por meio da interpretação dos perfis radiais de densidade da madeira. Os primeiros estudos, no Brasil, ao utilizar a

técnica de densitometria de raios X por meio de filmes radiográficos foram Amaral (1994) e Amaral e Tomazello Filho (1998). Com o avanço da tecnologia, surgiram novos equipamentos de densitometria de raios X, como o QTRS-01X, que determina a densidade aparente do lenho, sem o uso dos filmes radiográficos, com maior velocidade de processamento dos dados e permite arquivar os dados de densidade das amostras do lenho analisadas.

Castro (2011), ao utilizar o QTRS-01X, na análise do lenho do tronco de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Tectona grandis*, concluiu que os perfis radiais de densidade aparente permitem a precisa demarcação dos anéis de crescimento anuais.

Alvarado et al. (2010), por meio da técnica de densitometria de raios X, avaliaram o lenho de *Swietenia macrophylla*, a determinação da largura dos anéis de crescimento e a variação radial da densidade. Ao comparar a densitometria de raios X com o método clássico de mesa de medição, afirmaram que a densitometria de raios X possibilita a identificação e demarcação dos anéis de crescimento do lenho das árvores de mogno, sendo uma importante metodologia para estudos dendrocronológicos.

Oliveira et al. (2012) analisaram a variação radial e longitudinal da densidade do lenho de *Eucalyptus grandis*, utilizando a técnica de microdensitometria de raios X, a qual proporcionou uma análise acurada das variações da densidade aparente do lenho.

Quirino et al. (2012), ao avaliar o uso da técnica de densitometria de raios X para determinar a qualidade dos briquetes de resíduos de madeira, o uso da densitometria de raios X demonstrou ser uma técnica promissora para a análise de qualidade de briquetes de resíduos de madeira, dessa forma, melhorar os processos de produção de briquetes.

Belini, Tomazello Filho e Chagas (2009) avaliaram as propriedades tecnológicas de painéis MDF de eucalipto por meio da técnica de densitometria

de raios X. A obtenção do perfil de densidade dos painéis MDF por essa técnica possibilitou a determinação acurada da densidade ao longo da espessura dos painéis MDF e a avaliação de variáveis do processo industrial, bem como a caracterização das propriedades tecnológicas.

A densitometria de raios X é uma importante ferramenta na caracterização detalhada das características tecnológicas da madeira e a avaliação do efeito dos tratamentos silviculturais na qualidade do lenho.

A técnica de densitometria de raios X pode ser aplicada em estudos da estrutura e qualidade da madeira com a genética, a idade, a procedência, a fertilização, a irrigação, os tratamentos silviculturais, o manejo florestal, as injúrias causadas por fungos e insetos, e as características de solo e clima.

REFERÊNCIAS

ALVARADO, J. R. et al. Variação da densidade do lenho e relação com a largura dos anéis de crescimento de árvores de mogno, *Swietenia macrophylla*, da floresta tropical amazônica do Peru. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 171-179, jun. 2010.

AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1994.

AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* através de microdensitometria de raios X. **Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 6, p. 17-23, jun. 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013, ano base 2012**. Brasília, 2013. 142 p.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 149-163, dez. 2001.

BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P. Densitometria de raios X aplicada na avaliação tecnológica de painéis MDF de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 84, p. 343-350, dez. 2009.

BIGING, G. S. Taper equations for second mixed-conifers of Northean California. **Forest Science**, Washington, v. 30, n. 4, p. 1103-1117, Dec. 1984.

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

CALEGARIO, N. et al. Desenvolvimento de um modelo linear de efeito misto na estimativa do crescimento e produção de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 10, n. 1, p. 67-86, jan./jun. 2004.

CALEGARIO, N. et al. Estimativa do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus* baseada na teoria dos modelos não lineares em multinível de efeito misto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 285-292, set. 2005a.

CALEGARIO, N. et al. Melhoria da qualidade de ajuste de modelos biométricos florestais pelo emprego da teoria dos modelos não lineares generalizados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 69, p. 38-50, dez. 2005b.

CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, J. C. A análise de tronco como fonte de dados para estudos de crescimento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 11, n. 1, p. 66-77, jan. 1987.

CARMEAN, W. H. Site index curves for upland oaks in Central States. **Forest Science**, Washington, v. 18, n. 2, p. 109-120, June 1972.

CARVALHO, S. de P. C. e et al. Different strategies to estimate the commercial volume of *Anadenanthera colubrina* (Vell) Brenan. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 399-406, jul./set. 2010.

CASTRO, V. R. de. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.)**. 2011. 104 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.

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.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Washington, v. 18, n. 3, p. 241-245, Sept. 1972.

DYER, M. E.; BAILEY, R. L. A test of 6 methods for estimating true heights from stem analysis data. **Forest Science**, Washington, v. 33, n. 1, p. 3-13, Mar. 1987.

ESPÉCIES tropicais promissoras. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 108, out. 2007. Disponível em:
<http://www.remade.com.br/revistadamadeira_materia.php?num=1164&subject=E%20mais&title=Esp%E9cies%20tropicais%20promissoras>. Acesso em: 4 jun. 2013.

FABBIO, G.; FRATTEGANI, M.; MANETTI, M. C. Height estimation in stem analysis using 2nd differences. **Forest Science**, Washington, v. 40, n. 2, p. 329-340, May 1994.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, 1992. 269 p.

FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **Papel**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 35-40, maio 1992.

GRAVES, H. S. **Forest mensuration**. New York: J. Wiley, 1906. 458 p.

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

KARIUKI, M. Height estimation in complete stem analysis using annual radial growth measurements. **Forestry**, Oxford, v. 75, n. 1, p. 63-74, Jan. 2002.

KOZAK, A. My last words on taper equations. **The Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 80, n. 4, p. 507-515, July/Aug. 2004.

KOZAK, A. A variable-exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 18, n. 11, p. 1363-1368, Nov. 1988.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper function and their application in forest inventory. **The Forestry Chronicle**, Ottawa, v. 45, n. 4, p. 278-283, Aug. 1969.

LENHART, J. D. An alternative procedure for improving height-age data from stem analysis. **Forest Science**, Washington, v. 18, n. 4, p. 332-332, Dec. 1972.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. 352 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2000. 384 p.

MACHADO, S. do A. et al. Comparison of methods for estimating heights from complete stem analysis data for *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 45-55, jan./mar. 2010.

MATTOS, P. P. de; SEITZ, R. A. Growth dynamics of *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* and *Tabebuia impetiginosa* from Pantanal Mato-grossense, Brazil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 427-434, out./dez. 2008.

MLODZIANSKY, A. K. **Measuring the forest crop**. Washington: USDA, 1898. 71 p.

MORI, C. L. S. de O. et al. Caracterização da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (Benth) Speng) para confecção de móveis. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 77, p. 29-36, ago. 2003.

NEWBERRY, J. D. A note on Carmean estimate of height from stem analysis data. **Forest Science**, Washington, v. 37, n. 1, p. 368-369, Mar. 1991.

NICOLETTI, M. F. et al. Acurácia de dois dendrômetros ópticos na cubagem não destrutiva para a determinação da biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 70, p. 139-149, abr./jun. 2012.

OLIVEIRA, B. R. U. de et al. Microdensitometria de raios X aplicada na determinação da variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 103-112, mar. 2012.

PIRES, L. M.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 5, p. 845-852, set./out. 2007.

QUIRINO, W. F. et al. Densitometria de raios X na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 96, p. 525-536, dez. 2012.

RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**: manual de dendrologia brasileira. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 1981. 296 p.

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

SOARES, C. P. B. et al. Hipsometric, volumetric and taper equations for eleven brazilian native species. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1039-1051, set./out. 2011.

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

CAPÍTULO 2 Reconstrução do histórico de crescimento e dinâmica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

RESUMO

Objetivou-se neste Capítulo reconstruir o histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp., compreender a dinâmica do fragmento florestal e reconstruir o perfil longitudinal das árvores por meio de equações não lineares. A finalidade é fornecer informações sobre o crescimento de *Anadenanthera* e desenvolver ajustes de equações biométricas florestais para futuros estudos relacionados com a conservação e manejo florestal que auxiliem na definição do uso da madeira. Os dados foram provenientes de um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, localizado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sul de Minas Gerais. As árvores da área de estudo apresentam lenho com camadas de crescimento, delimitadas por faixa de parênquima axial visível a olho nu, portanto, com potencial para estudos com anéis de crescimento. Ao ajustar o comportamento da altura total em função do diâmetro à altura do peito, a equação assintótica (6) foi a que melhor representou a relação altura-diâmetro do fragmento florestal. Ao incluir variáveis explicativas de cada árvore (diâmetro à altura do peito e altura total) nas funções de *taper* por meio de dados da cubagem rigorosa não destrutiva, observaram-se melhorias nas estimativas. O uso da técnica de análise de tronco e da dendrocronologia possibilitou a reconstrução do histórico de crescimento em diâmetro, altura e volume de *Anadenanthera* e a compreensão da dinâmica do fragmento florestal. Com base nos dados de análise de tronco, foi possível reconstituir o perfil longitudinal das árvores. A função de Gompertz foi a que melhor representou o perfil das árvores provenientes da análise de tronco.

Palavras-chave: Anéis de crescimento. Análise de tronco. Perfil longitudinal.

ABSTRACT

The objective of this chapter is to reconstruct the historic of growing of the *Anadenanthera* spp., to comprehend the dynamic of a forest fragment and to reconstruct the tree taper through non-linear equations. The purpose is to provide informations about the growing of the *Anadenanthera* and develop adjustments in forest equations for future studies related to conservation and forest management that help to define the use of the wood. All the data are originating from a fragment of a forest with predominance of *Anadenanthera*, at the Federal University of Lavras (UFLA), south of Minas Gerais. The trees of the studied area presents wood with growth rings defined by tracks of axial parenchyma visible to the naked eye, therefore, with high potential to dendrochronological studies. To adjust the behavior of the total height in the diameter at breast height, the asymptotic equation (6) was the one that better represented the relation height-diameter of the forest fragment. When including the explanatory variables of each tree (diameter at breast height and total height) at the function of taper by means non-destructive measures, improvement was observed in estimates. The use of the stem analysis technique and of the dendrochronology enabled the reconstruction of the historic of growing in diameter, height and volume of the *Anadenanthera* and the comprehension of the dynamic of a forest fragment. From the stem analysis data was possible to reconstruct the trees tapers. The Gompertz's function was the one that better represented the trees tapers originating from the stem analysis.

Keywords: Growth rings. Stem analysis. Taper.

1 INTRODUÇÃO

As florestas plantadas com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* representam quase o total de plantios florestais no Brasil. Consequentemente, estudos relacionados ao crescimento são preferencialmente voltados para essas espécies. As florestas naturais, no entanto, são extremamente ricas em biodiversidade e estudos, ainda, são incipientes.

O crescimento é o resultado de complexas interações da espécie de interesse com as condições ambientais. No entanto, a curva de crescimento cumulativo, ou incremento em cada idade, em longo prazo, apresenta tendência sigmoideal, com duas características fundamentais: assíntota, que se refere à capacidade de suporte máxima do local; e inflexão, que representa o nível em que a taxa de crescimento corrente está no máximo, considerado o ótimo teórico de produção máxima sustentável (ODUM, 1986).

Conhecer a tendência da curva de crescimento cumulativo e as características fundamentais (assíntota e ponto de inflexão) da espécie de interesse é importante para definir as estratégias de manejo que contribuam na definição do uso da madeira.

Em florestas naturais, as informações do monitoramento de unidades amostrais permanentes são escassas, uma alternativa para recuperar e reconstruir essas informações é por meio do estudo dos anéis de crescimento, ao utilizar a técnica de análise de tronco, que permite conhecer o crescimento passado de uma árvore por meio da medição da largura dos anéis de crescimento.

Considerando as medições dos anéis de crescimento das seções transversais retirados ao longo do fuste, é possível determinar o perfil longitudinal da árvore nas idades coletadas e obter o seu volume individual.

Os modelos lineares são mais comumente empregados para representar o perfil longitudinal das árvores. Entretanto, os modelos não lineares apresentam

fundamentação biológica, portanto, os seus parâmetros são interpretáveis, e apresentam maior confiança na extrapolação ao utilizar outra base de dados.

Neste contexto, objetivaram-se reconstruir o histórico de crescimento de *Anadenanthera* spp., baseado no estudo dos anéis de crescimento, compreender a dinâmica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* e reconstruir o perfil longitudinal das árvores por meio de equações não lineares.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em um fragmento florestal, com área total de, aproximadamente, 7,56 hectares, com predominância de *Anadenanthera*, situado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sul de Minas Gerais (Figura 1). O clima de Lavras é do tipo Cwa, segundo a classificação de Köppen, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso, a precipitação e a temperatura média anual é de 1.460 mm e 20,4 °C, respectivamente (DANTAS; CARVALHO; FERREIRA, 2007).

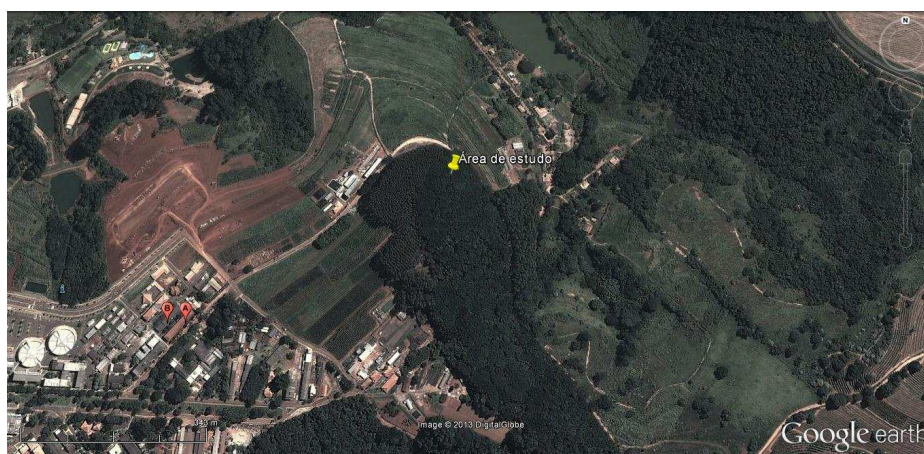


Figura 1 Ilustração da área de estudo: fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*. A e B, correspondentes ao Departamento de Ciências Florestais e Laboratório de Tecnologia da Madeira, respectivamente

Fonte: DigitalGlobe (2013), Google Earth (2013) e MapLink (2013)

Nascimento et al. (2009) relataram que em 1943 foi conduzido um experimento, na área de estudo, para investigar os efeitos de sombra nas culturas de café diante de ocorrência de geadas, utilizando espécies de *Anadenanthera* como agentes de sombreamento. O experimento foi abandonado após cerca de

trinta e cinco anos, em virtude da constatação de que os cafezais a pleno sol apresentavam uma maior produção quanto às áreas sombreadas, instalando-se, desde então, uma regeneração natural intensa nessa área. Desse modo, um fragmento florestal atípico, natural, misto e inequiâneo foi estabelecido, com predominância do gênero *Anadenanthera*, possivelmente, em decorrência da seleção natural e das propriedades alelopáticas desse gênero.

Nascimento et al. (2009) observaram 25 famílias e 66 espécies na área de estudo, com predominância do gênero *Anadenanthera* e da espécie *Anadenanthera peregrina*. Segundo Nascimento et al. (2009), o fragmento florestal apresenta duas espécies do gênero *Anadenanthera*, as espécies *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg. e *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan.

2.1 Coleta de dados

A área experimental foi dividida em unidades amostrais permanentes de 10 m x 10 m (NASCIMENTO et al., 2009). A mensuração dos diâmetros à altura do peito (DAP) dos indivíduos do gênero *Anadenanthera* foi realizada em todas as unidades amostrais, totalizando 1,05 hectares. Os indivíduos da regeneração natural que alcançaram o diâmetro mínimo de cinco centímetros, diâmetro mínimo de uso da madeira, foram medidos e marcados com plaquetas de alumínio numeradas.

A mensuração do DAP foi realizada nos seguintes anos: 2008, 2010 e 2012. A síntese dos dados de DAP do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em cada ano, está apresentada na Tabela 1. Nota-se uma grande variabilidade dos dados, isso ocorre porque o fragmento florestal apresenta árvores de diferentes idades e dimensões, composto por uma regeneração natural intensa e contínua.

Tabela 1 Síntese dos dados de diâmetro à altura do peito (DAP) do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em cada ano de coleta

Estatísticas	DAP (cm)		
	2008	2010	2012
Mínimo	5,00	5,00	5,00
1º Quadrante	6,80	7,10	7,10
Mediana	9,30	9,60	9,80
Média	12,07	12,44	12,71
3º Quadrante	15,00	15,40	15,80
Máximo	46,70	46,70	49,30
Desvio padrão	7,34	7,50	7,79
Coeficiente de variação	60,81	60,29	61,29

Em que: 2008 e 2010 = fonte de dados do grupo de pesquisa Manejo Florestal Intensivo e Integrado; 2012 = autora.

A mensuração do DAP foi realizada com duas medições perpendiculares entre si, com auxílio da suta mecânica e foi calculada a média. Após a medição do DAP, foi realizada a distribuição diamétrica, em cada ano, pelo método empírico, considerando classes de 5 cm de amplitude.

A estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* foi ajustada pela equação não linear (RATKOWSKY, 1989) a seguir, a qual representou a tendência de redução exponencial para direita ou J-reverso:

$$N_i = \Phi_1 (1 + D_i)^{\Phi_2} \quad (1)$$

Em que N_i é o número de árvores por classe diamétrica (frequência); D_i é o diâmetro centro da i-ésima classe diamétrica (cm); Φ_s = parâmetros estimados.

Para cada classe diamétrica, na coleta de 2012, foi mensurada aleatoriamente a altura total (HT) de uma parte dos indivíduos, por ser uma

variável de difícil obtenção, em virtude da densidade da copa das árvores. A altura total foi medida com auxílio do hipsômetro de Carl Leiss Blume-Leiss e, também, foi proveniente de dados de altura total da cubagem rigorosa não destrutiva, com auxílio do dendrômetro eletrônico Criterion RD 1000 com tripé, conforme a descrição do item 2.3

As árvores-amostra mensuradas, para estimativa da relação altura-diâmetro, estão apresentadas na Tabela 2. A seleção aleatória das árvores-amostra, para a estimativa da relação altura-diâmetro, seguiu a tendência da curva da distribuição de frequência de diâmetros por classe em florestas inequidâneas, o J-reverso.

Tabela 2 Distribuição diamétrica e de altura total das árvores-amostra para estimativa da relação altura-diâmetro

Centro da classe de DAP	Centro da classe de altura total					Total
	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	
7,5	10	6				16
12,5		7	7			14
17,5		4	10	2	1	17
22,5		1		7	1	9
27,5			2	4		6
32,5				4	1	5
37,5				4	1	5
42,5					2	2
Total	10	18	19	21	6	74

Uma síntese dos dados de DAP e altura total das árvores-amostra do fragmento florestal para estimativa da relação altura-diâmetro estão apresentadas na Tabela 3. A variabilidade dos dados, principalmente a variável DAP, é ocasionada pelas diferentes idades do fragmento florestal.

Tabela 3 Estatísticas descritivas das variáveis do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em 2012

Estatísticas	Variável do fragmento florestal	
	DAP (cm)	HT (m)
Mínimo	5,20	6,50
1º Quadrante	11,43	13,43
Mediana	17,20	16,50
Média	18,80	16,98
3º Quadrante	24,07	21,43
Máximo	41,40	28,00
Desvio padrão	9,63	5,52
Coefficiente de variação	51,22	32,51

2.2 Relação altura-diâmetro

Com os pares de altura-diâmetro mensurados, foi estimada a altura total de todos os indivíduos do gênero *Anadenanthera*, por ser uma variável de difícil obtenção, em razão da densidade da copa das árvores. O comportamento da altura total em função do diâmetro está apresentado na Figura 2.

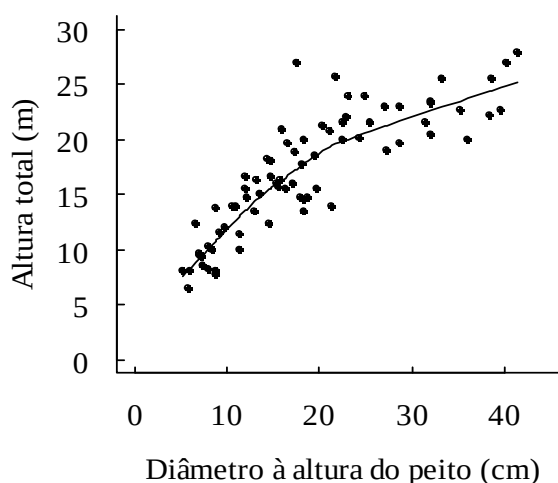


Figura 2 Comportamento da altura total em função do diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

As equações hipsométricas testadas para estimativa da altura total do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* são apresentadas a seguir:

1) Equação polinomial de 2º grau

$$HT_i = \Phi_1 + \Phi_2 DAP_i + \Phi_3 DAP_i^2 + \varepsilon_i \quad (2)$$

2) Equação potencial

$$HT_i = \Phi_1 DAP_i^{\Phi_2} + \varepsilon_i \quad (3)$$

3) Equação exponencial

$$HT_i = \Phi_1 \exp\left(\frac{\Phi_2}{DAP_i}\right) + \varepsilon_i \quad (4)$$

4) Equação assintótica (1)

$$HT_i = \Phi_1 + (\Phi_2 - \Phi_1) \exp\left[-\exp(\Phi_3) DAP_i\right] + \varepsilon_i \quad (5)$$

5) Equação assintótica (2)

$$HT_i = \Phi_1 \left\{ 1 - \exp\left[-\exp(\Phi_2)(DAP_i - \Phi_3)\right] \right\} + \varepsilon_i \quad (6)$$

6) Equação assintótica (3)

$$HT_i = \Phi_1 \left\{ 1 - \exp\left[-\exp(\Phi_2) DAP_i\right] \right\} + \varepsilon_i \quad (7)$$

Em que: HT_i = altura total da i -ésima árvore (m); DAP_i = diâmetro à altura do peito da i -ésima árvore (cm); $\exp$ = base do logaritmo natural; Φ_s = parâmetros a serem estimados; $\mathcal{E}_i$ = erro estatístico com distribuição normal, média zero e variância constante.

As análises dos dados e a obtenção dos parâmetros das equações foram realizadas no programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

Os parâmetros das equações hipsométricas não lineares foram estimados por meio da escolha dos valores iniciais dos parâmetros para o processo de iteração por meio da interpretação desses.

Para a equação assintótica (1), conforme Pinheiro e Bates (2000), Φ_1 é a assíntota horizontal superior quando o DAP tende para o infinito positivo; Φ_2 é o valor da variável dependente no intercepto (DAP=0), representa o declínio da curva; Φ_3 representa o logaritmo natural da taxa constante, $t_{0,5} = \log 2 / \exp(\Phi_3)$. Para a equação assintótica (2), Φ_1 é a assíntota horizontal superior quando o DAP tende para o infinito positivo; Φ_2 representa o logaritmo natural da taxa constante, $t_{0,5} = \log 2 / \exp(\Phi_2)$; Φ_3 é o valor da variável independente quando a variável dependente é igual a zero (HT=0). Para a equação assintótica (3), conforme Pinheiro e Bates (2000), Φ_1 é a assíntota horizontal superior quando o DAP tende para o infinito positivo; Φ_2 representa o logaritmo natural da taxa constante, $t_{0,5} = \log 2 / \exp(\Phi_2)$.

2.3 Cubagem rigorosa não destrutiva

Após a seleção aleatória dos indivíduos nas unidades amostrais permanentes, foi feita a cubagem rigorosa das árvores em pé, em que os diâmetros foram mensurados com o auxílio do dendrômetro eletrônico Criterion

RD 1000 com tripé, nas posições a 0,1 m; 0,7 m; 1,30 m e a cada 1 metro ao longo do tronco, para árvore até 15 metros de altura total, ou a cada 2 metros, para árvore com mais de 15 metros de altura total, até um diâmetro mínimo que diferenciou para cada árvore em função da densidade da copa que dificultou a leitura do diâmetro com o Criterion RD 1000 com tripé. Foram cubadas 57 árvores de *Anadenanthera* (Tabela 4). O critério de seleção das árvores-amostra seguiu a tendência da curva da distribuição de frequência de diâmetros por classe em florestas inequidâneas.

As árvores-amostra mensuradas para estimativa da cubagem rigorosa não destrutiva estão apresentadas na Tabela 4. Para as classes de DAP VIII e IX, não foram selecionadas nenhuma árvore para a cubagem rigorosa não destrutiva em virtude da densidade da copa dificultar a leitura completa dos diâmetros nas devidas posições com o equipamento.

Tabela 4 Distribuição diamétrica e de altura total das árvores-amostra para estimativa da cubagem rigorosa não destrutiva

Classe de DAP	Centro da classe de DAP	Centro da classe de altura total					Total
		7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	
I	7,5	8	4				12
II	12,5		5	5			10
III	17,5		4	7	1		12
IV	22,5		1		6	1	8
V	27,5			2	3		5
VI	32,5				4	1	5
VII	37,5				4	1	5
VIII	42,5					0	0
IX	47,5						0
Total		8	14	14	18	3	57

A Figura 3 representa os perfis longitudinais para cada classe diamétrica. Observa-se que as árvores, em geral, apresentaram o mesmo padrão. Para uma determinada posição da cubagem rigorosa não destrutiva obteve-se quase mesmo raio, por classe diamétrica.

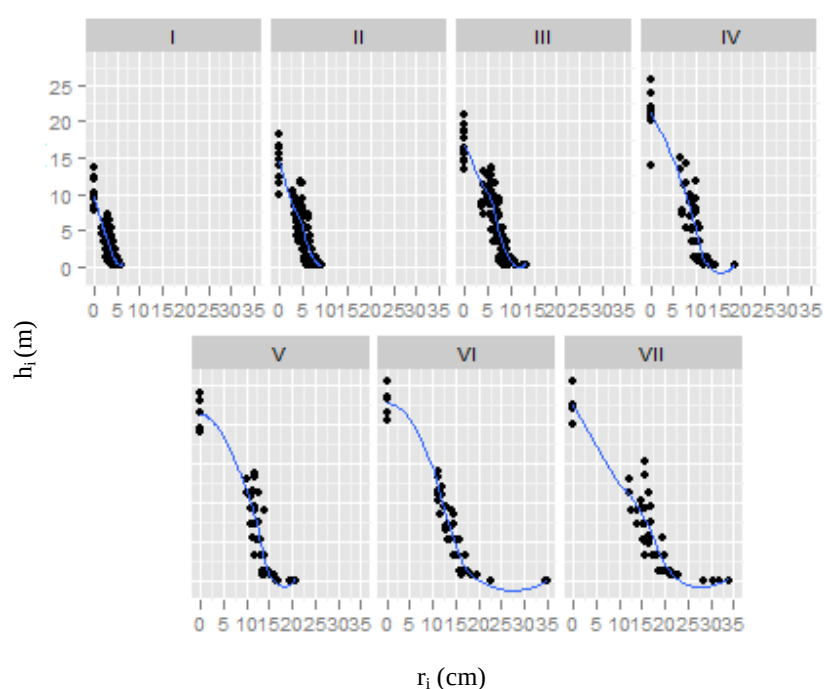


Figura 3 Representação dos perfis longitudinais por classe de diâmetro. Em que: h_i = posição da cubagem rigorosa não destrutiva, em metros; r_i = raio, em centímetros

2.4 Análise completa de tronco

Para fins da análise completa de tronco, foram selecionadas 5 árvores de *Anadenanthera* spp. (Figura 4-A), correspondentes às classes diamétricas superiores a 20 cm. Dessas 5 árvores-amostra, A1, A2, A3 e A4 foram

provenientes do fragmento florestal de estudo (Tabela 5). A árvore A5 foi selecionada fora do fragmento florestal, do outro lado da estrada, proveniente de uma área livre de sombreamento, regeneração natural e competição intensa. Essa seleção foi feita com o objetivo de comparar o comportamento dos anéis de crescimento com as condições de luminosidade e crescimento. As árvores-amostra para a análise completa de tronco estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Diâmetro à altura do peito e altura total das árvores-amostra para a análise completa de tronco

Árvore	Diâmetro à altura do peito (cm)	Altura total (m)	Classe DAP
A1	21,7	18,5	IV
A2	25,6	22,0	V
A3	20,8	22,5	IV
A4	25,7	21,0	V
A5	28,0	16,4	V

Após o abate das árvores-amostra, essas foram desganhadas e marcadas nas posições onde foram retirados os discos para a análise. Os discos, com espessura de 3 cm a 5 cm, foram coletados nas posições: base da árvore (variou de 0,2 m a 0,4 m); 0,7 m; 1,30 m e a cada 2 metros até a altura total (Figura 4-B). Os discos coletados foram ausentes de nós, a fim de não interferir nas medições dos anéis de crescimento em virtude da dificuldade e imprecisão desses nas medições. Para cada árvore derrubada, foram mensurados no campo: o DAP, em centímetros; a altura total com o auxílio da trena, em metros.

A face inferior dos discos foi aplainada com a plaina desempenadeira grande. Em seguida, os discos foram identificados e secos ao ar livre (Figura 4-C). Após a secagem natural, a face inferior foi polida com lixadeira de cinta manual (100 mm x 610 mm) por meio de cintas de lixa abrasiva nas granulometrias de 36, 60, 80 e 120 grãos polegadas⁻² (Figura 4-D). Posteriormente, foi polida com lixadeira roto orbital manual em séries

sucessivas por meio de discos de lixas 226U de 127 mm (5 polegadas) nas granulometrias de 120, 180 e 320 grãos polegadas⁻² (Figura 4-E), a fim de tornar os anéis de crescimento mais visíveis e a superfície mais lisa, facilitando a observação, contagem e medição (Figura 4-F).

A secagem ao ar livre e os polimentos dos discos foram realizados no Laboratório de Usinagem da Madeira, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras.



Figura 4 Obtenção dos discos para análise completa de tronco. A - Seleção e marcação das árvores-amostra; B - Coleta dos discos; C - Secagem ao ar livre; D - Polimento com lixadeira de cinta manual; E - Polimento com lixadeira orbital manual; F - Disco de árvore-amostra pronto para observação, contagem e medição dos anéis de crescimento

A mensuração das dimensões dos anéis de crescimento foi feita sobre raios traçados na seção transversal dos discos, com base na medula, conforme Prodan (1965 apud FINGER, 1992). Primeiramente, foi marcado o maior raio da

seção (raio máximo) com auxílio de uma régua, tomando a medula como o centro. Considerando o maior raio, foram marcados dois diâmetros, formando um ângulo de 45° com o raio máximo. Assim, o raio de cada anel de crescimento foi representado pela média dos 4 raios mensurados. O diâmetro em cada idade foi dado pelo raio médio do anel de crescimento multiplicado por 2.

A medição da largura de cada anel de crescimento foi feita na estação de medição LINTABTM 6 do Laboratório de Dendroecologia, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. Com auxílio de uma lupa estereoscópica, os anéis de crescimento foram visualizados e medidos em mesa de medição linear (0,001 mm de precisão) conectada ao computador que armazena e manipula os dados pelo programa TSAP-Win (RINNTECH, 2013).

2.5 Determinação do índice de competição

Para analisar o índice de competição para cada árvore selecionada dentro do fragmento florestal, foram coletados os diâmetros à altura do peito das árvores competidoras e a distância entre os fustes das árvores selecionadas e árvores competidoras, conforme o índice de competição de Hegyi (1974 apud CLUTTER et al., 1983) (Equação 8).

$$IC_i = \sum_{j=1}^n \frac{(DAP_j / DAP_i)}{DIST_{ij}} \quad (8)$$

Em que: IC_i = índice de competição para a i-ésima árvore selecionada; DAP_j = diâmetro à altura do peito da j-ésima árvore competidora (cm); DAP_i = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore selecionada (cm); $DIST_{ij}$ = distância

entre a i -ésima árvore selecionada e j -ésima árvore competidora; n = número de competidores.

O índice de competição de Hegyi (1974 apud CLUTTER et al., 1983) atribui maior peso a competidores mais próximos da árvore selecionada e maiores valores indicam competição intensa.

2.6 Reconstituição do perfil longitudinal das árvores

A reconstituição do perfil longitudinal das árvores de *Anadenanthera* spp. foi representada por funções de *taper*. As funções de *taper* testadas para representar o afilamento dos fustes são descritas a seguir:

1) Polinômio de quinto grau modificado

$$h_{ij} = \Phi_1 + \Phi_2 \left(\frac{r_{ij}}{DAP_i} \right) HT_i + \Phi_3 \left(\frac{r_{ij}}{DAP_i} \right)^2 HT_i + \Phi_4 \left(\frac{r_{ij}}{DAP_i} \right)^3 HT_i + \Phi_5 \left(\frac{r_{ij}}{DAP_i} \right)^4 HT_i + \Phi_6 \left(\frac{r_{ij}}{DAP_i} \right)^5 HT_i + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

2) Logística de 3 parâmetros

$$h_{ij} = \Phi_1 / \left\{ 1 + \exp \left[\left(\Phi_2 - r_{ij} \right) / \Phi_3 \right] \right\} + \varepsilon_{ij} \quad (10)$$

3) Gompertz

$$h_{ij} = \Phi_1 \left\{ \exp \left[-\exp \left(\Phi_2 - \Phi_3 r_{ij} \right) \right] \right\} + \varepsilon_{ij} \quad (11)$$

4) Weibull

$$h_{ij} = \Phi_1 - \Phi_2 \exp \left[-\exp(\Phi_3) r_{ij}^{\Phi_4} \right] + \varepsilon_{ij} \quad (12)$$

5) Logística de 4 parâmetros

$$h_{ij} = \Phi_1 + (\Phi_2 - \Phi_1) / \left\{ 1 + \exp \left[(\Phi_3 - r_{ij}) / \Phi_4 \right] \right\} + \varepsilon_{ij} \quad (13)$$

Em que: h_{ij} = altura da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (m); r_{ij} = raio da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (cm); HT_i = altura total da i-ésima árvore (m); DAP_i = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore (cm); Φ_s = parâmetros a serem estimados; ε_{ij} = erro estatístico com distribuição normal, média zero e variância constante.

As análises dos dados e a obtenção dos parâmetros das funções de *taper* foram realizadas no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

O volume total foi obtido por meio da integração do raio mínimo (r_{min}) para o raio máximo (r_{max}), ou vice-versa, ao utilizar o método de camadas cilíndricas, conforme Calegario (2002), utilizando a Equação 14.

$$\hat{V}_i = \int_{r_{min}}^{r_{max}} 2\pi r f(r) dr \quad (14)$$

O raio mínimo representa o raio da árvore (com ou sem casca) até a altura em função do raio mínimo, e o raio máximo representando o raio da árvore até a altura em função do raio máximo. $\hat{V}_i$ é o volume estimado na seção

do raio mínimo e raio máximo, com ou sem casca, a depender da especificação do raio.

As funções de *taper* testadas possuem a variável dependente representada pela altura da árvore na j -ésima posição e o raio da árvore na j -ésima posição, representando a variável independente.

As funções de *taper* não lineares testadas apresentam fundamentação biológica na forma funcional, consequentemente, apresentam interpretação dos seus parâmetros. Os parâmetros dessas funções não lineares foram estimados por meio da escolha dos valores iniciais dos parâmetros para o processo de iteração por meio da interpretação desses, os quais fornecem as estimativas pela convergência do algoritmo de Gauss-Newton, na maioria das vezes.

Dentre as funções não lineares testadas, a função logística de três parâmetros apresenta maior facilidade de interpretação. Em que: Φ_1 é o valor médio máximo de h_{ij} , representa a assíntota horizontal superior quando o r_{ij} tende para o infinito negativo; Φ_2 é o valor do r_{ij} quando a h_{ij} atinge a metade da assíntota horizontal superior, representa o ponto de inflexão da curva; Φ_3 é a diferença entre o r_{ij} a $3/4$ (Φ_1) e o r_{ij} no ponto de inflexão, representa o parâmetro escala. Conforme Pinheiro e Bates (2000), a função logística de três parâmetros é linear em Φ_1 e não linear em Φ_2 e Φ_3 .

Para a função de Gompertz, conforme Ratkowsky (1983), Φ_1 é a assíntota horizontal superior; Φ_2 é em função da equação de regressão linear simples: $n \left[-\ln(h_{ij} / \Phi_1) \right] = \Phi_2 - \Phi_3 r_{ij}$, relacionado com o valor da função para o r_{ij} igual a zero; Φ_3 é descrito como Φ_2 e é relacionado com a escala do r_{ij} .

Para a função de Weibull, conforme Ratkowsky (1983), Φ_1 é a assíntota horizontal superior; Φ_2 é a diferença entre assíntota horizontal superior e o valor da variável dependente no intercepto ($r_{ij}=0$), representa o declínio da curva; Φ_3 é em função do Φ_4 e o raio no ponto de inflexão: $\Phi_3 = \Phi_4 r_{ijInf}^{\Phi_4} / \Phi_4 - 1$, representa

a taxa constante da mudança do Φ_2 para Φ_1 ; Φ_4 é em função da altura no ponto de inflexão, da assíntota horizontal superior e do Φ_2 : $h_{ijInf} = \Phi_1 - \Phi_2 \exp\left[-(\Phi_4 - 1) / \Phi_4\right]$, representa a potência a qual o raio é elevado.

Para a função logística de quatro parâmetros, Φ_1 é a assíntota horizontal superior quando o r_{ij} tende para o infinito negativo; Φ_2 é a assíntota horizontal inferior quando o r_{ij} tende para o infinito positivo; Φ_3 é o valor do r_{ij} quando a h_{ij} atinge a metade da diferença entre a assíntota horizontal superior e a inferior, representa o ponto de inflexão da curva; Φ_4 é a diferença entre o r_{ij} a 3/4 ($\Phi_1 - \Phi_2$) e o r_{ij} no ponto de inflexão, representa o parâmetro escala.

Ao substituir a função $f(r)$ da Equação 13 pela função logística de 4 parâmetros, obtém-se a Equação 15.

$$V_i^{\wedge} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} 2\pi r \left\{ \Phi_1 + \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{1 + \exp\left[\frac{(\Phi_3 - r_{ij})}{\Phi_4}\right]} \right\} dr \quad (15)$$

A função logística de 4 parâmetros é uma função de *taper*, a qual estima a altura em função do raio da árvore. Se a equação é resolvida para o raio variável, é possível estimar o raio em função da altura, conforme Calegario (2002):

$$r_{ij}(h_{ij}) = \Phi_{3i} - \ln\left(-\frac{\Phi_{2i} - h_{ij}}{h_{ij} - \Phi_{1i}}\right) \Phi_{4i} + \varepsilon_{ij} \quad (16)$$

Em que: r_{ij} = raio da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (cm);
 h_{ij} = altura da i-ésima árvore na j-ésima posição do fuste (m); $\ln$ = logaritmo natural; Φ_{si} = parâmetros estimados.

O volume total é obtido pela integração da Equação 15, representada pela Equação 17.

$$\hat{V}_i = K \int_{h_1}^{h_2} r_{ij}^2 \Delta h \quad (17)$$

Em que: $\hat{V}_i$ = volume estimado da i-ésima árvore (m³); h_s = limites de integração correspondendo às alturas inferior e superior de qualquer seção (m);
 r_{ij}^2 = estimativa do raio da i-ésima árvore na j-ésima posição (cm); $K = \frac{\pi}{10.000}$;
 Δh = comprimento da seção (m).

2.7 Análises estatísticas das equações ajustadas

A avaliação da qualidade do ajuste das equações biométricas florestais foi realizada por meio das seguintes estatísticas apresentadas a seguir:

1) Erro padrão da estimativa (S_{yx})

$$S_{yx} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 / n - p} \quad (18)$$

2) Erro padrão relativo [$S_{yx}(\%)$]

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} * 100 \quad (19)$$

Em que: Y_i = variável dependente observada; $\hat{Y}_i$ = variável dependente estimada pela equação ajustada; $\bar{Y}$ = média da variável dependente; n = número de observações da amostra; p = número de parâmetros da equação ajustada.

As análises gráficas dos valores ajustados *versus* valores observados e dos resíduos, também, foram realizadas. Pela análise gráfica dos resíduos ressalta-se a finalidade de verificar se as suposições do erro foram atendidas: normalidade, independência, homocedasticidade, ausência de observação influente e ausência de *outliers*. As estatísticas e as análises gráficas foram realizadas no programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estrutura diamétrica

Em florestas inequidâneas, como é o caso da área de estudo, o conhecimento da distribuição de frequência de diâmetros por classe é necessário para prescrições de manejo florestal. Desse modo, a estrutura da distribuição de frequência dos diâmetros do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, nos três anos observados, seguiu uma tendência decrescente com o aumento da classe diamétrica, apresentando a forma característica de J-reverso ou redução exponencial para direita (Figura 5).

Quaisquer que sejam os objetivos do manejo sustentável, de acordo com Souza e Soares (2013), a estrutura diamétrica adequada é aquela que apresenta número decrescente de árvores por sucessivas classes de DAP, tal como o fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* (Figura 5).

Ao manter essa distribuição diamétrica, haverá número suficiente de árvores por classes diamétricas para compensar os efeitos da mortalidade natural e suprir árvores para possíveis desbastes seletivos. De acordo com esses autores, conforme os processos de *ingrowth*, árvores que ingressam na menor classe, e processos de *upgrowth*, árvores que se movem entre classes sucessivas, ocorre a dinâmica da estrutura diamétrica. Para estimular o crescimento das árvores das classes diamétricas desejáveis, é necessário aplicar tratamentos silviculturais, de forma a reduzir a competição por fatores de crescimento, de acordo com o preceito do manejo florestal sustentável.

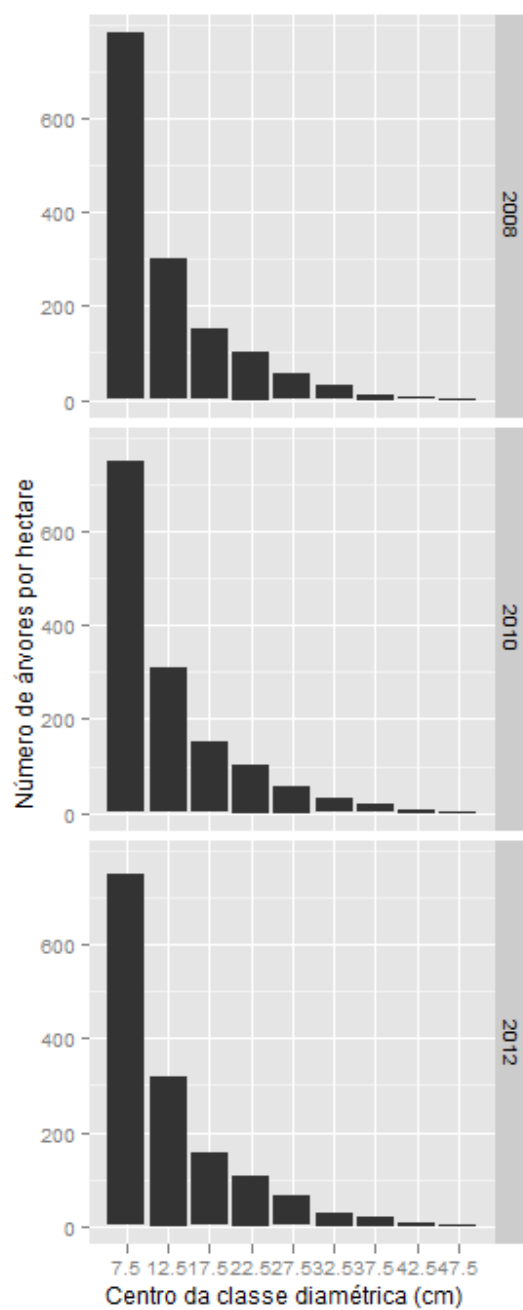


Figura 5 Representação da estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em cada ano

A maioria dos estudos sobre prescrição de desbaste por classe de diâmetro para floresta natural é fundamentada na estimativa da distribuição diamétrica por meio de equação linear com transformação logarítmica da frequência de árvores por classe diamétrica. Uma alternativa é o uso de equações não lineares, por meio da convergência do algoritmo de Gauss-Newton, que apresentam estimativas com menores erros padrões residuais e sem necessidade de transformação da variável dependente.

Os parâmetros estimados da equação que representa a estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, em cada ano (2008, 2010 e 2012), estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Estatísticas de ajuste da equação não linear da estrutura diamétrica do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p (p> t)
Equação (19) [$S_{yx}=15,91$; $S_{yx}(\%) = 9,46$]				
Φ_1	$6,761*10^4$	$6,119*10^3$	11,05	<0,0001
Φ_2	-2,072	$3,998*10^{-2}$	-51,84	<0,0001

3.2 Relação altura-diâmetro

As estatísticas de ajuste das equações para a estimativa da altura total do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 Estatísticas de ajuste das equações da relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p (p> t)
Equação (2) (polinomial de 2º grau) [S_{yx} = 2,61 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,37]				
Φ_1	2,1782	1,3825	1,58	0,12
Φ_2	1,1363	0,1423	7,99	<0,0001
Φ_3	-0,0148	0,0031	-4,70	<0,0001
Equação (3) (potencial) [S_{yx} = 2,71 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,96]				
Φ_1	3,7512	0,4365	8,60	<0,0001
Φ_2	0,5265	0,0374	14,07	<0,0001
Equação (4) (exponencial) [S_{yx} = 2,62 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,43]				
Φ_1	29,9670	1,1336	26,44	<0,0001
Φ_2	-8,8590	0,6543	-13,54	<0,0001
Equação (5) (assintótica 1) [S_{yx} = 2,57 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,13]				
Φ_1	26,2684	1,8017	14,58	<0,0001
Φ_2	-1,2107	2,6226	-0,46	0,646
Φ_3	-2,7034	0,2189	-12,35	<0,0001
Equação (6) (assintótica 2) [S_{yx} = 2,57 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,13]				
Φ_1	26,2684	1,8017	14,58	<0,0001
Φ_2	-2,7034	0,2189	-12,35	<0,0001
Φ_3	0,6727	1,3259	0,51	0,613
Equação (7) (assintótica 3) [S_{yx} = 2,56 m; $S_{yx}(\%)$ = 15,08]				
Φ_1	26,9371	1,4098	19,11	<0,0001
Φ_2	-2,8002	0,1054	-26,57	<0,0001

Em que: Φ s = parâmetros estimados; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em metros; $S_{yx}(\%)$ = erro padrão relativo, em porcentagem.

Os parâmetros estimados foram significativos para as equações (3), (4) e (7), as quais apresentaram valores de erro padrão da estimativa (S_{yx}) semelhantes

(Tabela 7). A equação assintótica (3) apresentou menor valor do erro padrão da estimativa, a qual melhor representou a relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*.

Quanto às análises de dispersão gráfica dos resíduos, todas as equações ajustadas não indicaram problemas de superestimativa e/ou subestimativa e a suposição de normalidade foi atendida em todos os ajustes. Observa-se, nos gráficos dos valores ajustados *versus* valores observados, que todas as equações foram semelhantes e seguiram a tendência dos dados (Figura 6).

Batista, Couto e Marquesini (2001) relataram que a equação polinomial de 2º grau (2) apresenta uma curvatura artificial ao representar a relação altura-diâmetro. Para a equação potencial (3), esses autores afirmaram que essa equação permite interpretação biológica. Quanto à equação exponencial (4), relataram que a curvatura foi semelhante às equações não lineares testadas, enquanto com uma curvatura menos acentuada. Entretanto, pelo presente estudo demonstrou-se que a curvatura da equação exponencial apresentou-se mais acentuada que as demais equações (Figura 7).

Quanto às equações não lineares, a fundamentação biológica, para a forma funcional dessas equações, é a razão para o padrão contínuo da curva, o que acarreta maior segurança nas suas extrapolações e grande independência das particularidades dos dados utilizados no ajuste (BATISTA; COUTO; MARQUESINI, 2001).

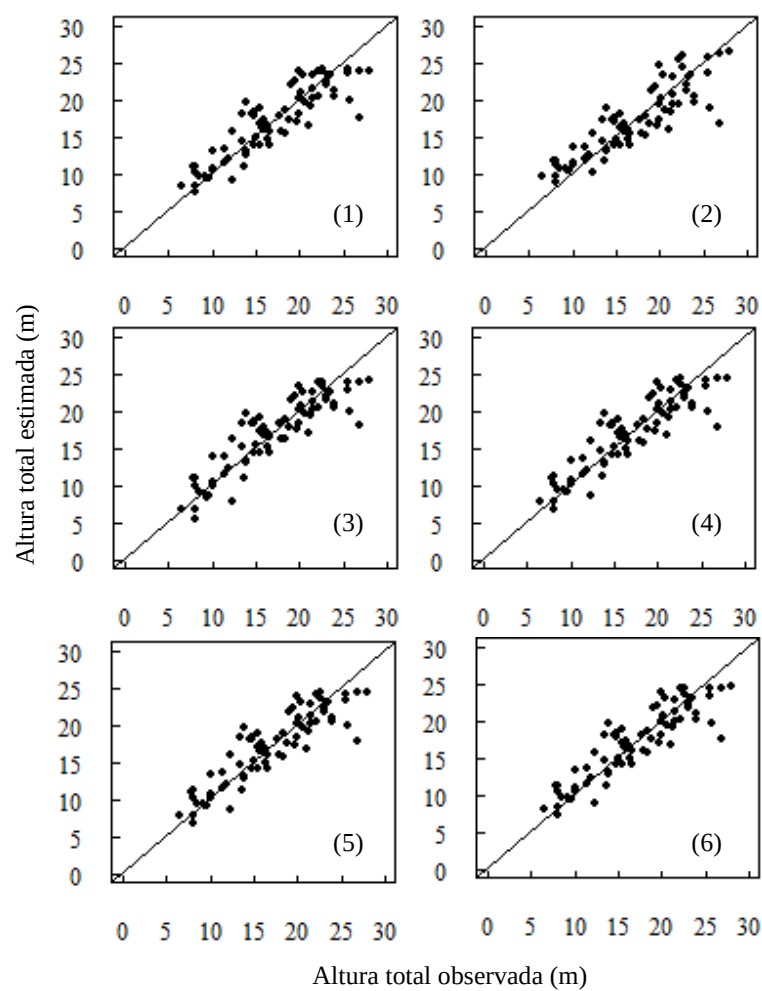


Figura 6 Altura total estimada versus altura total observada para as equações da relação altura-diâmetro: (1) polinomial de 2º grau; (2) potencial; (3) exponencial; (4) assintótica 1; (5) assintótica 2; (6) assintótica 3

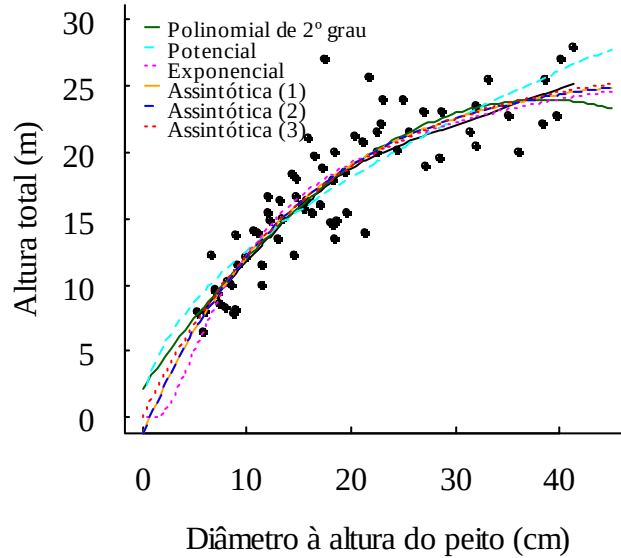


Figura 7 Curvas ajustadas para representar a relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

3.3 Ajuste das funções de *taper* com dados de cubagem rigorosa não destrutiva

Dentre as funções de *taper* testadas para estimar a altura ao longo do fuste com dados de cubagem rigorosa não destrutiva, para cada classe diamétrica, a Equação (10), função logística de 3 parâmetros, foi a que obteve todos os parâmetros significativos em todas as classes diamétricas.

A fim de diminuir o erro padrão da estimativa (S_{yx}) da Equação (10), fez-se a inclusão das variáveis explicativas das árvores (DAP_i e HT_i), por meio da decomposição de parâmetros, conforme a Equação 20. As variáveis explicativas das árvores foram incluídas em todos os parâmetros da função, retiraram-se os efeitos não significativos até chegar à equação final.

$$h_{ij} = \Phi_1 / \left\{ 1 + \exp \left[\left(\Phi_2 - r_{ij} \right) / \Phi_3 \right] \right\} + \varepsilon_{ij} \quad (20)$$

Em que: $\Phi_k = \Phi_{k1} + \Phi_{k2} DAP_i + \Phi_{k3} HT_i$; $k = 1, 2, 3$

As estatísticas de ajuste da função logística de 3 parâmetros e os parâmetros finais após a inclusão das variáveis explicativas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 Estatísticas de ajuste da função logística de 3 parâmetros com inclusão de covariantes, por classe de DAP, para representar o afilamento de *Anadenanthera*

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p ($p > t $)
Classe I [$S_{yx} = 0,6991$ m; $S_{yx}(\%) = 20,04$]				
Φ_{11} (intercepto)	-0.3744	1,1313	-0,3310	0,7414
Φ_{13} (HT _i)	1,0671	0,1171	9,1128	<0,0001
Φ_{21} (intercepto)	1,3245	0,2606	5,0818	<0,0001
Φ_{22} (DAP _i)	0,2821	0,0310	9,1139	<0,0001
Φ_{23} (HT _i)	-0,0930	0,0223	-4,1759	0,0001
Φ_{31} (intercepto)	-0,0400	0,2308	-0,1733	0,8628
Φ_{32} (DAP _i)	-0,0916	0,0305	-3,0005	0,0035
Classe II [$S_{yx} = 0,9766$ m; $S_{yx}(\%) = 18,39$]				
Φ_{11} (intercepto)	4,0855	3,1461	1,2986	0,1972
Φ_{12} (DAP _i)	-0,8710	0,2344	-3,7162	0,0003
Φ_{13} (HT _i)	1,4927	0,1218	12,2519	<0,0001
Φ_{21} (intercepto)	-3,0756	0,6383	-4,8188	<0,0001
Φ_{22} (DAP _i)	0,8655	0,0432	20,0113	<0,0001
Φ_{23} (HT _i)	-0,2417	0,0204	-11,8224	<0,0001
Φ_{31} (intercepto)	-2,3036	0,5153	-4,4701	<0,0001
Φ_{32} (DAP _i)	0,2438	0,0339	7,1993	<0,0001
Φ_{33} (HT _i)	-0,1243	0,0182	-6,8407	<0,0001

“Tabela 8, continuação”

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p (p> t)
Classe III [$S_{yx} = 1,4489$ m; $S_{yx}(\%) = 23,19$]				
Φ_{11} (intercepto)	5,9051	3,3977	1,7380	0,0849
Φ_{13} (HT _i)	0,6511	0,1940	3,3568	0,0011
Φ_{21} (intercepto)	-6,6037	1,7051	-3,8729	0,0002
Φ_{22} (DAP _i)	0,5350	0,0548	9,7567	<0,0001
Φ_{23} (HT _i)	0,1866	0,0549	3,3960	0,0009
Φ_{31} (intercepto)	-4,0493	0,7556	-5,3595	<0,0001
Φ_{33} (HT _i)	0,1484	0,0412	3,6006	0,0005
Classe IV [$S_{yx} = 1,4879$ m; $S_{yx}(\%) = 22,48$]				
Φ_{11} (intercepto)	-4,3152	2,5466	-1,6945	0,0949
Φ_{13} (HT _i)	1,1956	0,1209	9,8871	<0,0001
Φ_{21} (intercepto)	2,0554	1,2836	1,6013	0,1141
Φ_{22} (DAP _i)	0,2797	0,0584	4,7933	<0,0001
Φ_{31} (intercepto)	-1,3553	0,1028	-13,1876	<0,0001
Classe V [$S_{yx} = 2,0875$ m; $S_{yx}(\%) = 29,58$]				
Φ_{11} (intercepto)	-14,4752	10,1303	-1,4289	0,1606
Φ_{13} (HT _i)	1,6684	0,4702	3,5482	0,0010
Φ_{21} (intercepto)	41,8134	6,9488	6,0173	<0,0001
Φ_{22} (DAP _i)	-0,6658	0,2131	-3,1242	0,0033
Φ_{23} (HT _i)	-0,5955	0,0983	-6,0594	<0,0001
Φ_{31} (intercepto)	11,7687	4,4472	2,66463	0,0115
Φ_{32} (DAP _i)	-0,4979	0,1720	-2,8948	0,0061

“Tabela 8, conclusão”

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p ($p > t $)
Classe VI [$S_{yx} = 1,2237$ m; $S_{yx}(\%) = 17,33$]				
Φ_{11} (intercepto)	-8,3330	6,2924	-1,3243	0,1927
Φ_{13} (HT _i)	1,3759	0,2776	4,9572	<0,0001
Φ_{21} (intercepto)	37,5397	12,6162	2,9755	0,0049
Φ_{22} (DAP _i)	-0,8091	0,3976	-2,0352	0,0483
Φ_{31} (intercepto)	31,5762	10,2484	3,0811	0,0037
Φ_{32} (DAP _i)	-1,0556	0,3212	-3,2866	0,0021
Classe VII [$S_{yx} = 1,5108$ m; $S_{yx}(\%) = 21,53$]				
Φ_{11} (intercepto)	23,6074	0,8290	28,4785	<0,0001
Φ_{21} (intercepto)	-24,1764	4,5898	-5,2674	<0,0001
Φ_{22} (DAP _i)	0,2999	0,1270	2,3612	0,0231
Φ_{23} (HT _i)	1,1317	0,1670	6,7761	<0,0001
Φ_{31} (intercepto)	-16,0285	3,1989	-5,0106	<0,0001
Φ_{33} (HT _i)	0,5660	0,1298	4,3617	0,0001

Em que: Φ s = parâmetros estimados; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em metros; $S_{yx}(\%)$ = erro padrão relativo, em porcentagem.

Todos os parâmetros, exceto alguns interceptos, foram significativos para todas as classes de DAP. Os interceptos que não foram significativos foram mantidos na função (Tabela 8).

Os volumes reais com casca das árvores-amostra de *Anadenanthera* pela cubagem rigorosa não destrutiva variaram de 0,010795 m³ (Classe de DAP I) a 1,912660 m³ (Classe de DAP VII). Os volumes estimados, obtidos pela integral por meio do método das camadas cilíndricas, *versus* os volumes reais são apresentados na Figura 8.

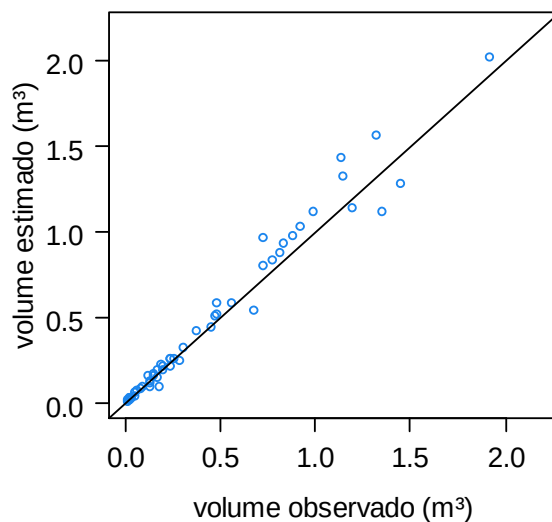


Figura 8 Volume estimado *versus* volume observado por meio da função logística de 3 parâmetros com inclusão de covariantes

Os valores estimados de volume total, exceto o toco, foram próximos dos volumes reais. Entretanto, com base em 0,5 m³, com o aumento da classe de DAP, os volumes estimados apresentaram mais dispersos, apresentando subestimativas e superestimativas (Figura 8).

3.4 Análise completa de tronco

Baseando-se na seção transversal das amostras do lenho das árvores de *Anadenanthera*, fez-se a análise dos anéis de crescimento. As camadas de crescimento apresentaram-se delimitadas por faixa de parênquima axial visível a olho nu. As características dos anéis de crescimento foram semelhantes com as apresentadas por Lisi et al. (2008).

A árvore A1, presente no fragmento florestal, apresentou anéis de crescimento mais estreitos, próximos à medula, apresentando taxas de crescimento baixas para diâmetros menores, aumentando gradualmente quando

um crescimento ótimo é alcançado nos diâmetros intermediários, o que pode ser caracterizado por crescimento em baixas condições de luminosidade (Figura 9-A). A árvore A5, exterior ao fragmento florestal, apresentou um comportamento diferente da árvore A1, com anéis de crescimento mais largos próximos à medula e, nos diâmetros maiores, apresentaram anéis de crescimento mais estreitos, o que pode ser em virtude da competição por nutrientes (Figura 9-B).

A mensuração da largura dos anéis de crescimento da árvore A4 não foi possível em decorrência da não visualização e identificação do parênquima axial das amostras do lenho, ocasionada pela idade avançada da árvore.

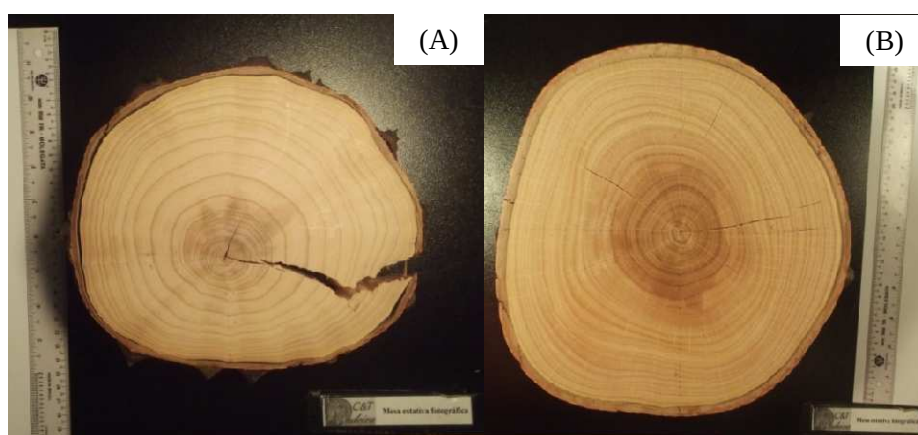


Figura 9 Discos de *Anadenanthera* spp. (A): árvore A1, presente no fragmento florestal; (B): árvore A5, exterior ao fragmento florestal

O crescimento cumulativo, em diâmetro, altura e volume, o incremento corrente anual (ICA) e o incremento médio anual (IMA) de cada árvore foram determinados conforme Ridder et al. (2013) e Schöngart (2008).

O ponto de máximo do IMA é aquele onde sua derivada é igual a zero e coincide com o ponto onde uma tangente passando pela origem atinge a curva de crescimento cumulativo. A taxa de crescimento (ICA) aumenta rapidamente até

atingir um ponto máximo que coincide com o ponto de inflexão na curva de crescimento cumulativo e com o zero da taxa de aceleração. A curva de incremento médio anual decresce mais suavemente que a curva de incremento corrente anual (Figuras 10 a 13).

O período entre o ICV (máximo) e o IMV (máximo) é definido como o período favorito para o desbaste. O diâmetro na idade do ICV (máximo) é definido como o diâmetro mínimo de corte (DMC), o qual é derivado da relação entre o diâmetro e a idade.

O crescimento cumulativo, em diâmetro, altura e volume, o incremento corrente anual (ICA) e o incremento médio anual (IMA) de cada árvore, no DAP, estão apresentados nas Figuras 10 a 13.

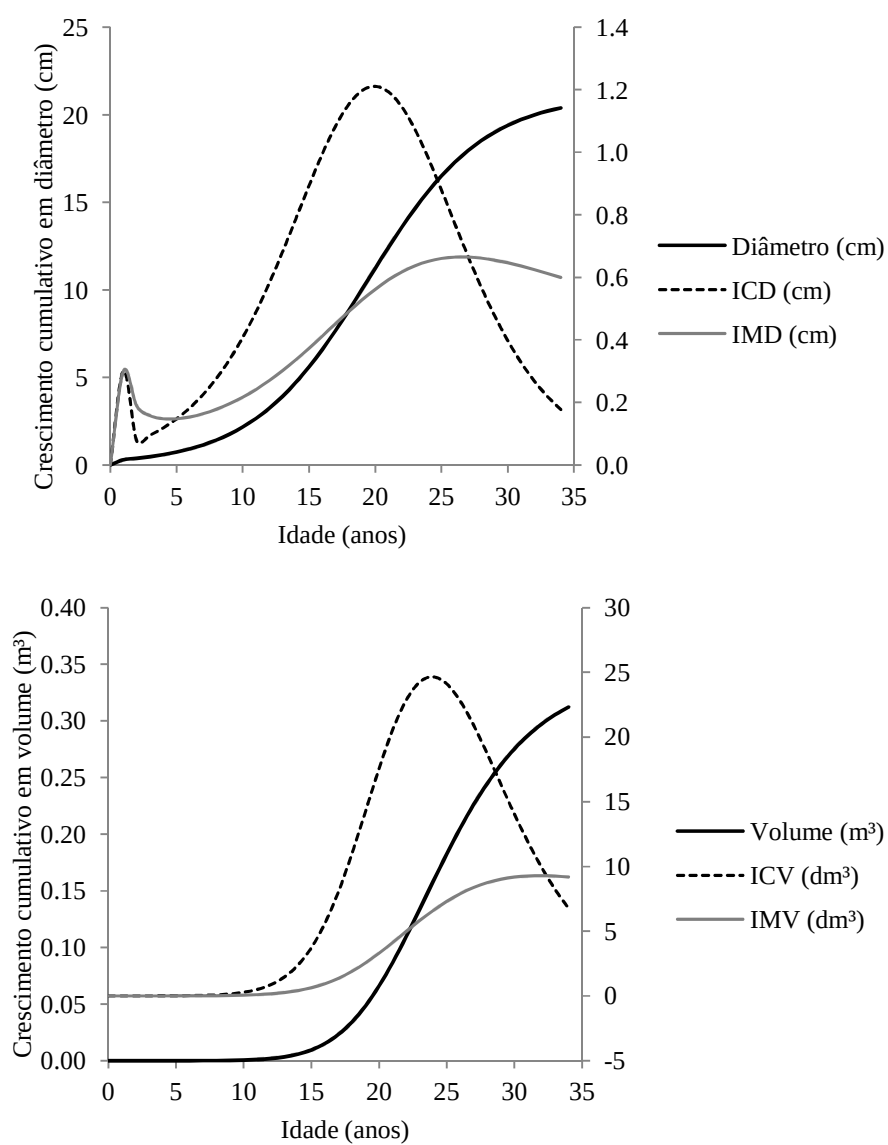
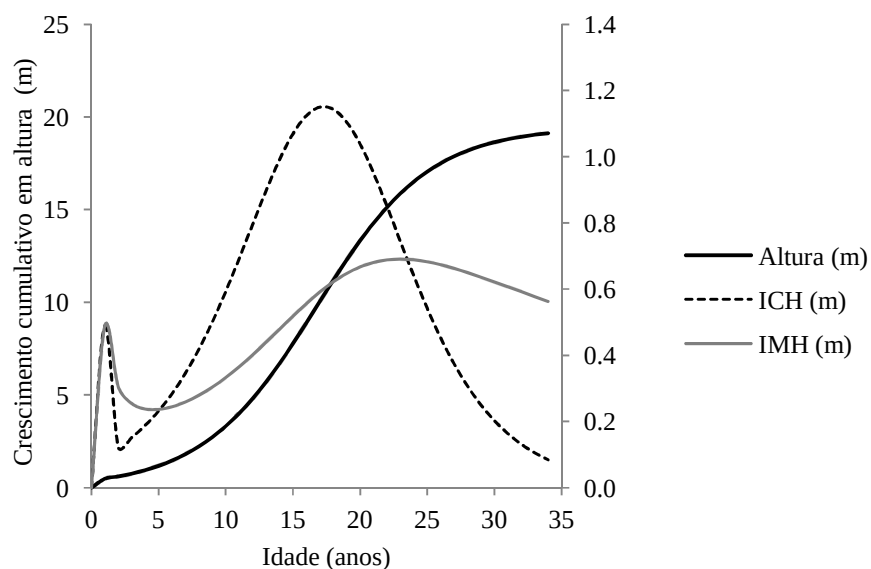


Figura 10 Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A1.
 Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura

(...continua...)

“Figura 10, conclusão”



A árvore A1 apresentou incremento em diâmetro médio, mínimo e máximo de $0,60 \text{ cm ano}^{-1}$, $0,08 \text{ cm ano}^{-1}$ e $1,21 \text{ cm ano}^{-1}$, respectivamente. O incremento em altura médio, mínimo e máximo foi de $0,56 \text{ m ano}^{-1}$, $0,08 \text{ m ano}^{-1}$ e $1,15 \text{ m ano}^{-1}$, respectivamente. A idade do ICV (máximo) e o DMC foram de 24 anos e, aproximadamente, 16 centímetros, respectivamente. O período de preferência para o desbaste, período entre o ICV (máximo) e o IMV (máximo), ocorreu entre 24 a 32 anos.

Com base na análise da curva do crescimento cumulativo em diâmetro e altura, a árvore A1 apresentou um incremento em diâmetro de, aproximadamente, 11 cm em 20 anos, e um incremento em altura de, aproximadamente, 13 m em 20 anos (Figura 10).

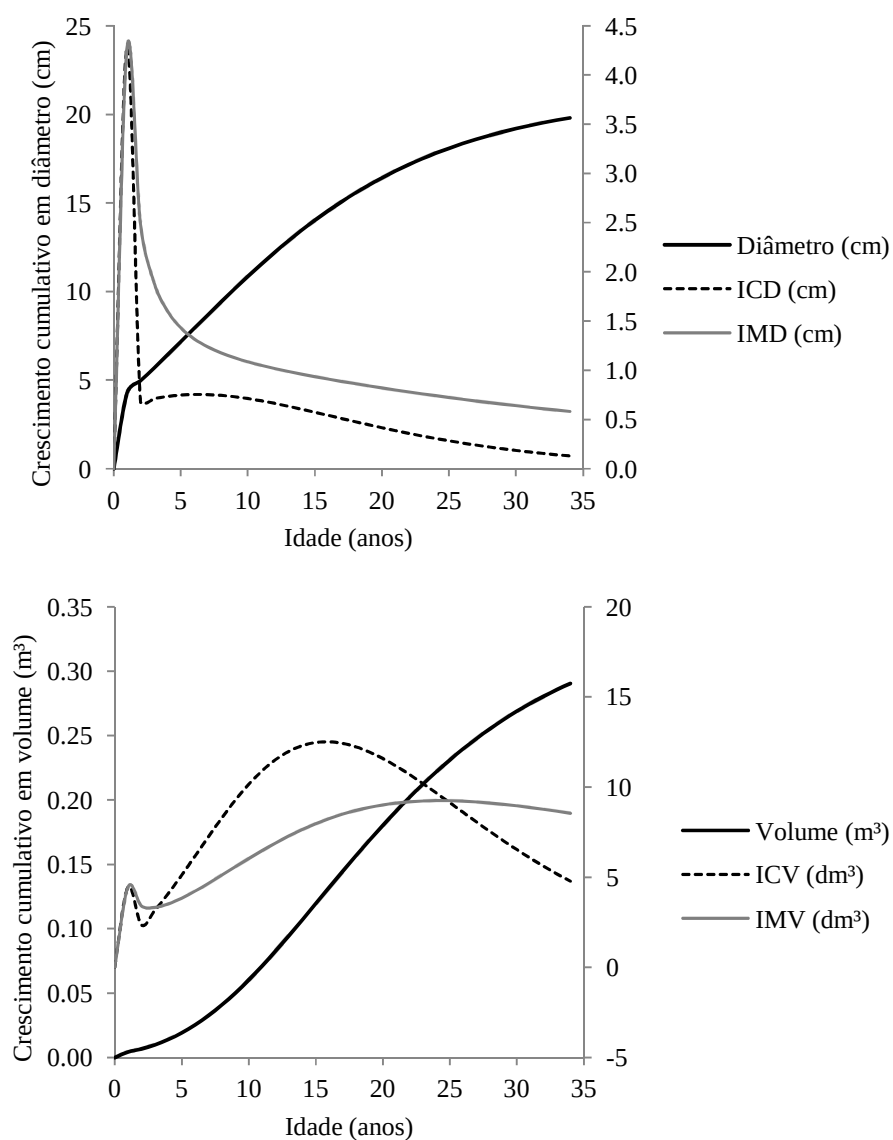
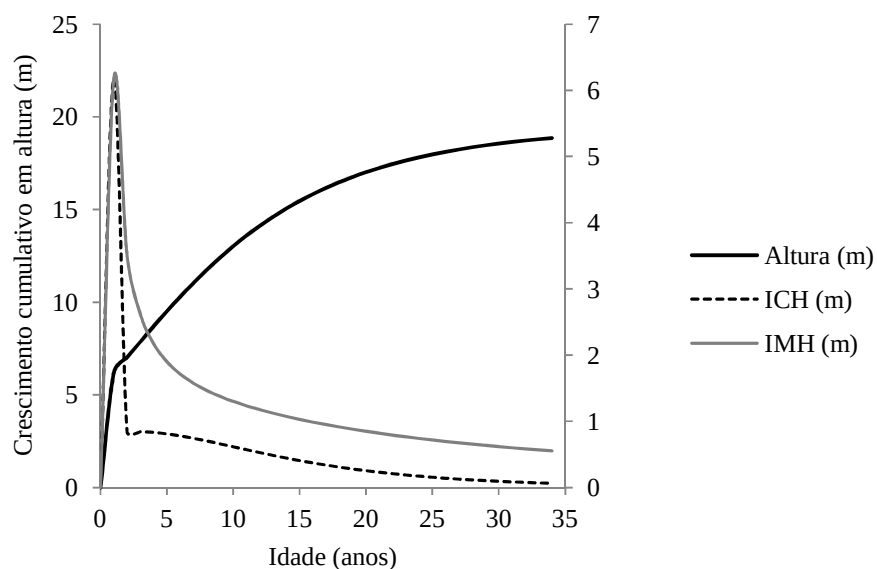


Figura 11 Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A2. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura

(...continua...)

“Figura 11, conclusão”



A árvore A2 apresentou incremento em diâmetro médio, mínimo e máximo de $0,58 \text{ cm ano}^{-1}$, $0,13 \text{ cm ano}^{-1}$ e $4,29 \text{ cm ano}^{-1}$, respectivamente. O incremento em altura médio, mínimo e máximo foi de $0,55 \text{ m ano}^{-1}$, $0,06 \text{ m ano}^{-1}$ e $6,18 \text{ m ano}^{-1}$, respectivamente. A idade do ICV (máximo) e o DMC foram de 16 anos e, aproximadamente, 15 centímetros, respectivamente. O período de preferência para o desbaste ocorreu entre 16 a 24 anos.

Com base na análise da curva do crescimento cumulativo em diâmetro e altura, a árvore A2 apresentou um incremento em diâmetro de, aproximadamente, 16 cm em 20 anos, e um incremento em altura de, aproximadamente, 17 m em 20 anos (Figura 11).

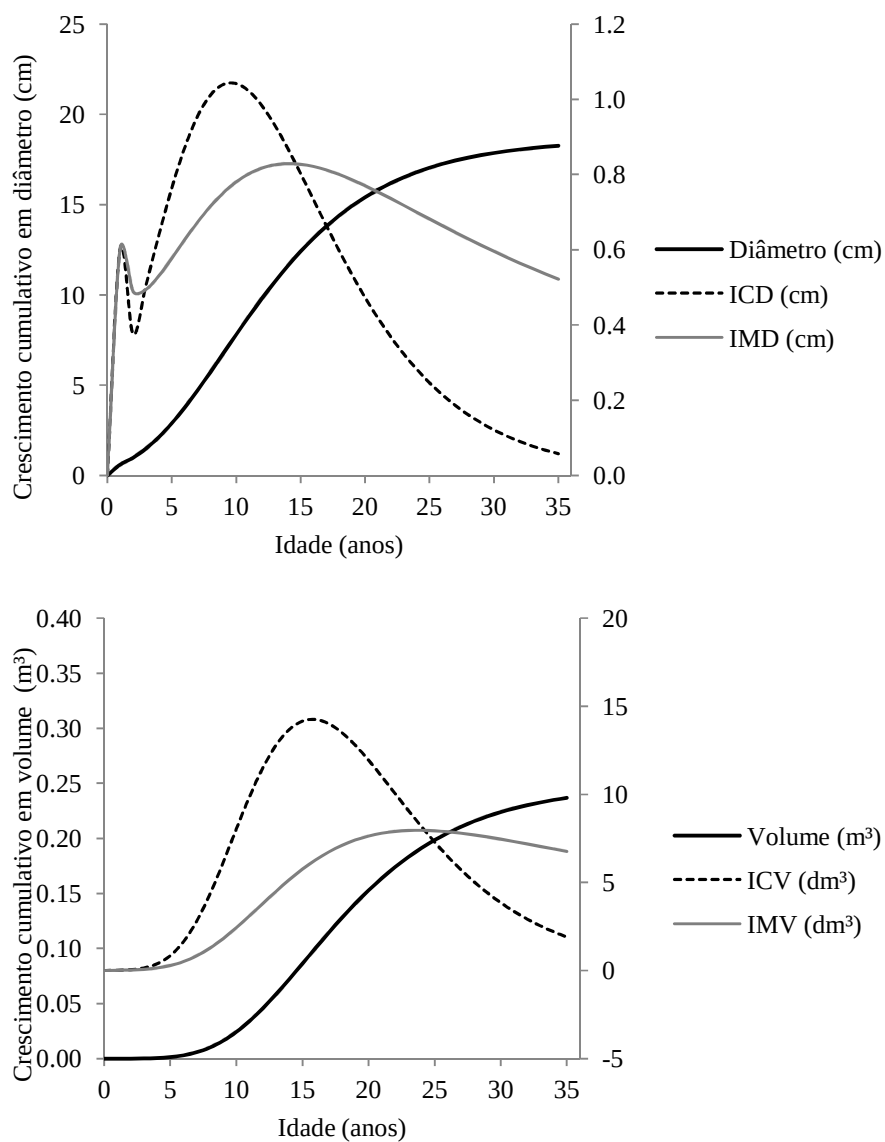
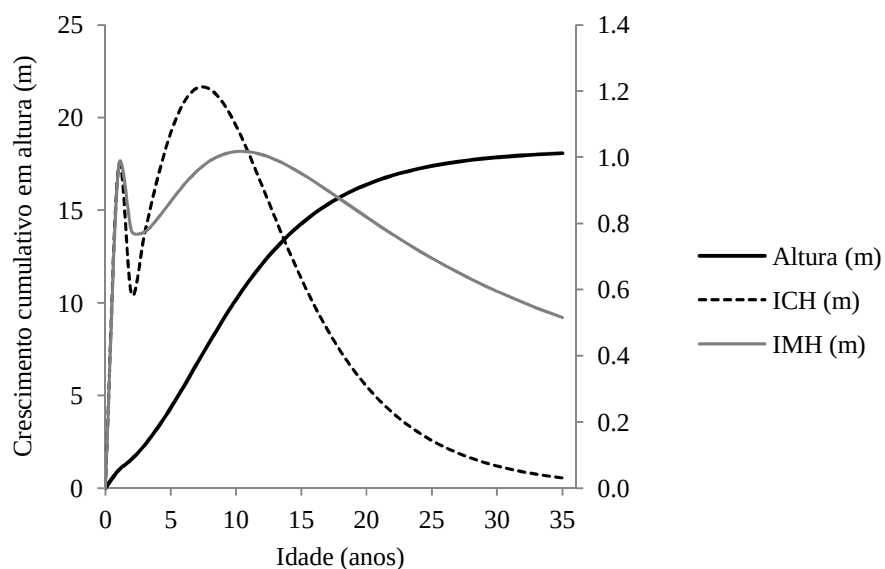


Figura 12 Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A3. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura

(...continua...)

“Figura 12, conclusão”



A árvore A3 apresentou incremento em diâmetro médio, mínimo e máximo de $0,52 \text{ cm ano}^{-1}$, $0,06 \text{ cm ano}^{-1}$ e $1,04 \text{ cm ano}^{-1}$, respectivamente. O incremento em altura médio, mínimo e máximo foi de $0,52 \text{ m ano}^{-1}$, $0,03 \text{ m ano}^{-1}$ e $1,21 \text{ m ano}^{-1}$, respectivamente. A idade do ICV (máximo) e o DMC foram de 16 anos e, aproximadamente, 13 centímetros, respectivamente. O período de preferência para o desbaste ocorreu entre 16 a 24 anos.

Com base na análise das curvas do crescimento cumulativo em diâmetro e altura, a árvore A3 apresentou um incremento em diâmetro de, aproximadamente, 15 cm em 20 anos, e um incremento em altura de, aproximadamente, 16 m em 20 anos (Figura 12).

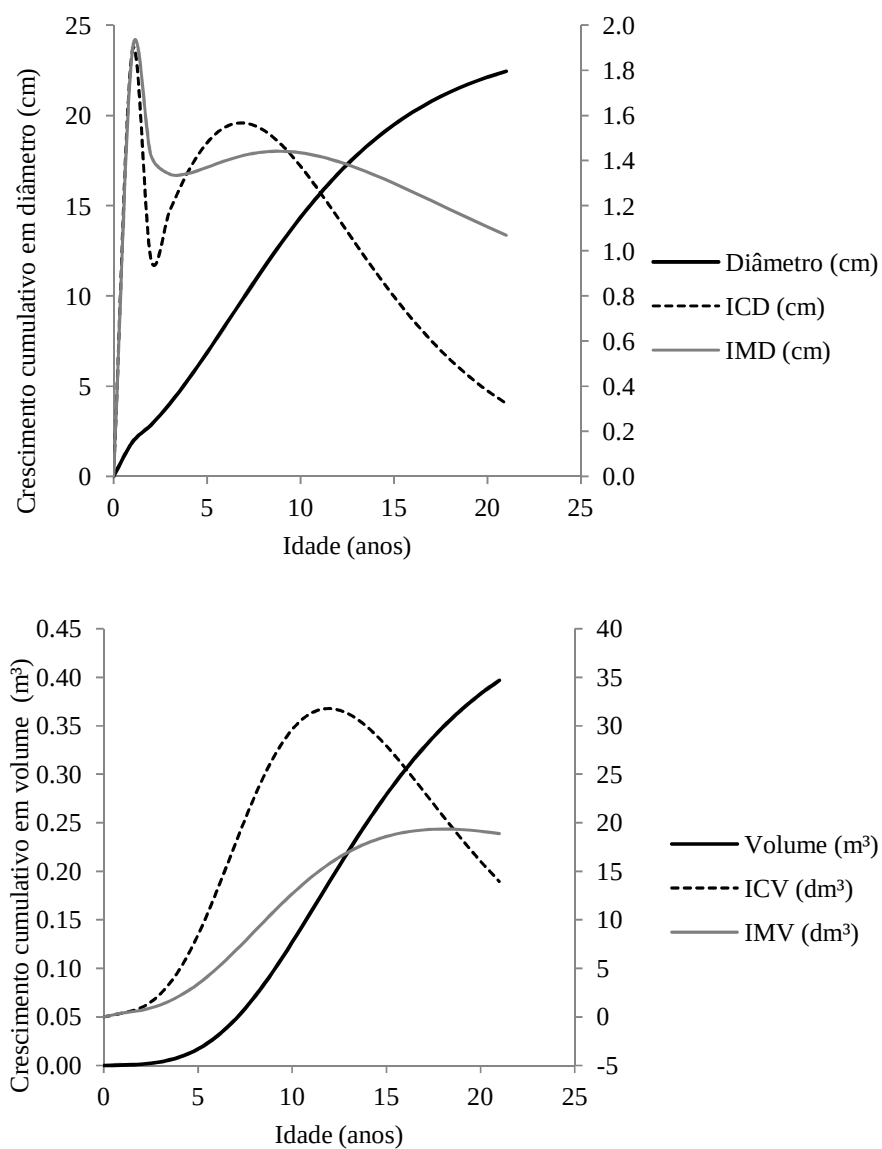
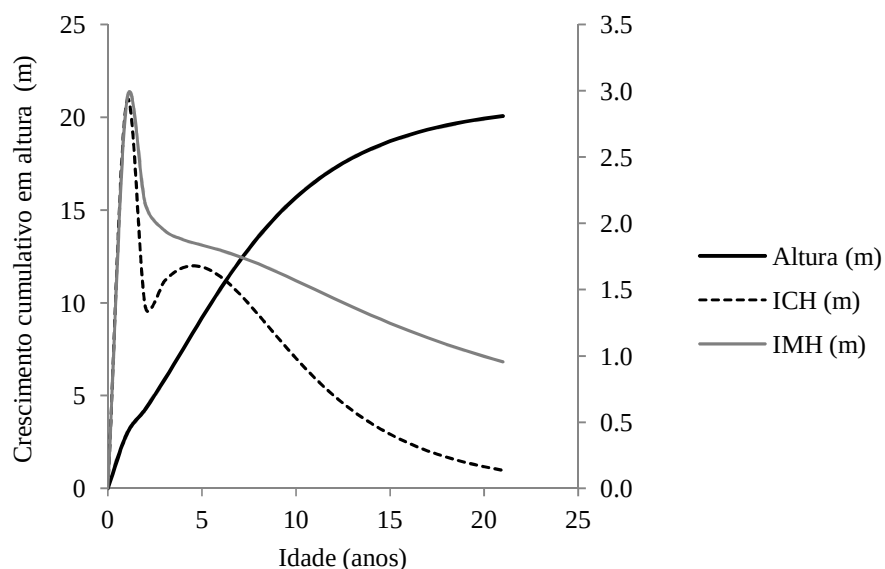


Figura 13 Crescimento cumulativo em diâmetro, volume e altura da árvore A5. Em que: ICD = incremento corrente em diâmetro; IMD = incremento médio em diâmetro; ICV = incremento corrente em volume; IMV = incremento médio em volume; ICH = incremento corrente em altura; IMH = incremento médio em altura

(...continua...)

“Figura 13, conclusão”



A árvore A5 apresentou incremento em diâmetro médio, mínimo e máximo de $1,07 \text{ cm ano}^{-1}$, $0,32 \text{ cm ano}^{-1}$ e $1,88 \text{ cm ano}^{-1}$, respectivamente. O incremento em altura médio, mínimo e máximo foi de $0,95 \text{ m ano}^{-1}$, $0,14 \text{ m ano}^{-1}$ e $2,91 \text{ m ano}^{-1}$, respectivamente. A idade do ICV (máximo) e o DMC foram de 12 anos e, aproximadamente, 17 centímetros, respectivamente. O período de preferência para o desbaste ocorreu entre 12 a 18 anos.

Com base na análise da curva do crescimento cumulativo em diâmetro e altura, a árvore A5 apresentou um incremento em diâmetro de, aproximadamente, 22 cm em 20 anos, e um incremento em altura de, aproximadamente, 20 m em 20 anos (Figura 13).

A árvore A5, localizada no exterior do fragmento florestal de *Anadenanthera*, apresentou uma maior taxa de crescimento em diâmetro e altura, o que pode ser em virtude da regeneração natural intensa, das condições

de crescimento, como baixas condições de luminosidade e crescimento em sub-bosque das árvores pertencentes ao fragmento florestal.

López, Villalba e Bravo (2013), ao estimar a taxa de crescimento em diâmetro e a idade de rotação biológica para sete espécies do Cerrado Boliviano em um intervalo de cem anos, inclusive a espécie *Anadenanthera colubrina* (Vell. Conc.) Benth, por meio de métodos dendrocronológicos, observaram que essa espécie apresentou incremento em diâmetro de 0,49 cm ano⁻¹, idade de rotação biológica de 98 anos e diâmetro na idade de rotação biológica de 48 cm.

Por meio dos resultados encontrados, López, Villalba e Bravo (2013) afirmaram que a espécie *Anadenanthera colubrina* apresentou incremento em diâmetro de, aproximadamente, 10 cm em 20 anos, resultado semelhante foi encontrado para a árvore A1.

Mattos e Seitz (2008), ao estimar a idade e os incrementos radiais da espécie *Anadenanthera colubrina* var. *cebil*, no Pantanal Mato-Grossense, por meio da análise dos anéis de crescimento, observaram que a espécie apresentou crescimento anual médio em diâmetro a 1,30 m do solo de 0,54 cm a 0,80 cm.

Considerando os resultados encontrados, Mattos e Seitz (2008) afirmaram que a espécie *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* alcança 40 cm de diâmetro em, no mínimo, 55 anos.

Em florestas naturais existem grandes variações no incremento em diâmetro dentro de uma mesma classe diamétrica. Essas variações podem ser atribuídas, principalmente, ao *status* competitivo da árvore, aos fatores genéticos e à interação entre o genótipo e o ambiente.

3.5 Determinação do índice de competição

Os índices de competição das árvores-amostra para a análise completa de tronco estão apresentados na Tabela 9. Dentre as árvores do fragmento

florestal de *Anadenanthera*, a árvore A3 apresentou um maior índice de competição, seguida da árvore A2.

O índice de competição de Hegyi (1974 apud CLUTTER et al., 1983), é computado pela soma das razões entre o diâmetro do competidor e da árvore selecionada ponderada pela distância entre os mesmos. É uma técnica simples para investigar os efeitos de interações competitivas no crescimento em curto prazo. Baixo valor do índice indica baixo nível de competição, entretanto, não indica estado livre de competição.

Tabela 9 Índice de competição das árvores-amostra para a análise completa de tronco

Árvore	Diâmetro à altura do peito (cm)	Altura total (m)	IC _i
A1	21,7	18,5	0,660
A2	25,6	22,0	1,873
A3	20,8	22,5	2,938
A4	25,7	21,0	1,379

Em que: IC_i = índice de competição para a i-ésima árvore selecionada.

3.6 Reconstituição do perfil longitudinal das árvores

O perfil longitudinal das árvores-amostra para a análise completa de tronco no último ano (2013) está representado na Figura 14.

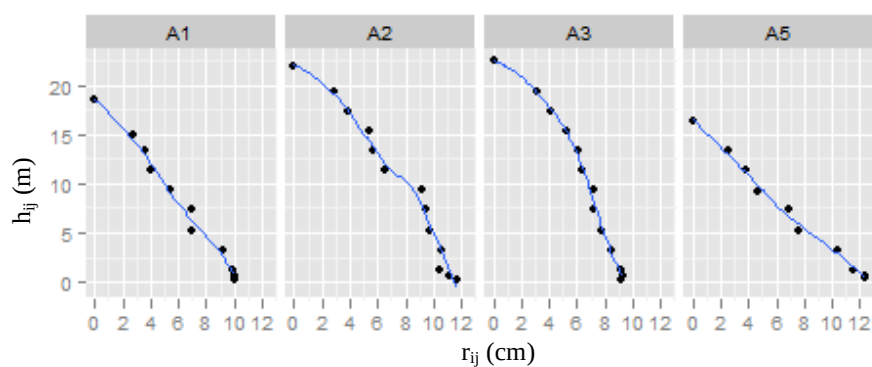


Figura 14 Representação do perfil longitudinal das árvores de *Anadenanthera* spp. por meio da análise de tronco. Em que: h_{ij} = altura da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (m); r_{ij} = raio da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (cm)

Dentre as funções de *taper* testadas, a função de Gompertz apresentou um menor erro padrão da estimativa e melhor representou o perfil longitudinal das árvores (Tabela 10; Figura 15).

Tabela 10 Estatísticas de ajuste da função de Gompertz, para cada árvore, para representar o perfil longitudinal de *Anadenanthera* spp.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p ($p > t $)
A1 [$S_{yx} = 0,85$ m; $S_{yx}(\%) = 10,99$]				
Φ_1	23,3051	2,8217	8,259	<0,0001
Φ_2	-1,4567	0,3768	-3,866	0,0048
Φ_3	-0,2516	0,0409	-6,146	0,0003
A2 [$S_{yx} = 1,58$ m; $S_{yx}(\%) = 16,28$]				
Φ_1	23,6340	2,7292	8,660	<0,0001
Φ_2	-2,3544	0,6359	-3,703	0,0041
Φ_3	-0,2882	0,0600	-4,800	0,0007
A3 [$S_{yx} = 0,80$ m; $S_{yx}(\%) = 8,22$]				
Φ_1	22,2170	0,8229	27,00	<0,0001
Φ_2	-3,7692	0,3749	-10,05	<0,0001
Φ_3	-0,5267	0,0474	-11,10	<0,0001
A5 [$S_{yx} = 0,56$ m; $S_{yx}(\%) = 8,23$]				
Φ_1	25,4165	3,9186	6,486	0,0003
Φ_2	-0,8236	0,3012	-2,734	0,0292
Φ_3	-0,1622	0,0255	-6,360	0,0004

Em que: Φ s = parâmetros estimados; S_{yx} = erro padrão da estimativa, em metros; $S_{yx}(\%)$ = erro padrão relativo, em porcentagem.

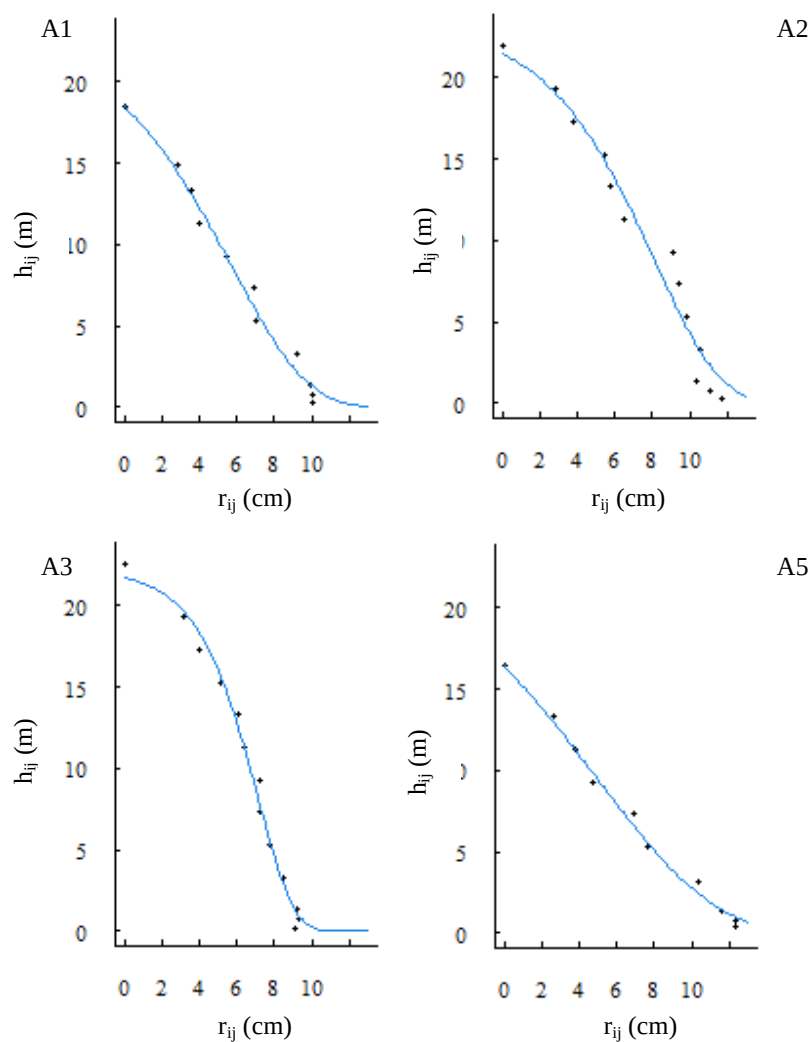


Figura 15 Curvas do ajuste com a função de taper Gompertz para representar o perfil longitudinal das árvores de *Anadenanthera* spp. Em que: h_{ij} = altura da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (m); r_{ij} = raio da i -ésima árvore na j -ésima posição do fuste (cm)

Com base na função de *taper* ajustada, o volume total, sem casca, para cada árvore, foi obtido por meio da integração do raio mínimo para o raio máximo, ao utilizar o método de camadas cilíndricas, conforme Calegario (2002). Os valores estimados de volume total, exceto o toco, foram próximos dos valores reais obtidos pelo método de Smalian (Tabela 11).

Tabela 11 Volume real e volume estimado, para cada árvore

Árvore	DAP (cm)	HT (m)	Volume real (m³)	Volume estimado (m³)
A1	21,7	18,5	0,21792	0,21774
A2	25,6	22,0	0,39202	0,40162
A3	20,8	22,5	0,28699	0,29248
A5	28,0	16,4	0,24276	0,25258

A Equação 21 foi proposta para estimar o raio em função da altura a partir da função não linear de Gompertz (Equação 10):

$$r_{ij}(h_{ij}) = -\frac{\ln\left(-\ln\left(\frac{h_{ij}}{\Phi_{1i}}\right)\right) - \Phi_{2i}}{\Phi_{3i}} + \varepsilon_{ij} \quad (21)$$

Em que: r_{ij} = raio da i-ésima árvore da j-ésima posição do fuste (cm); h_{ij} = altura da i-ésima árvore da j-ésima posição do fuste (m); $\ln$ = logaritmo natural; Φ_{si} = parâmetros estimados.

Para verificar a precisão da Equação 21, os valores de raio (cm) de cada árvore foram estimados, a qual estima o raio em função da altura (Figura 14). Observa-se que valores estimados de raio foram próximos dos valores observados, conforme a Figura 16.

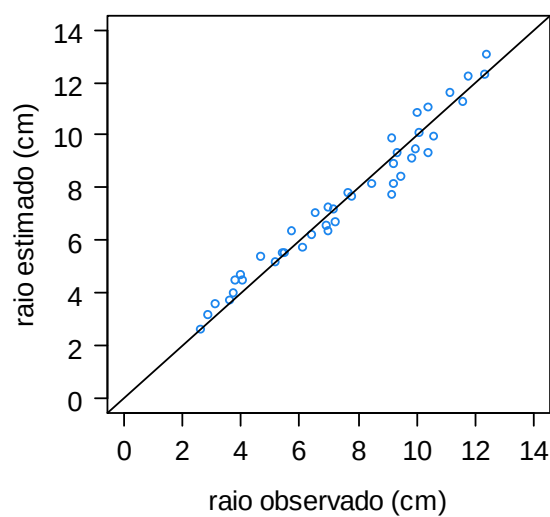


Figura 16 Raio estimado (cm) *versus* raio observado (cm) por meio da função de *taper* Gompertz

Quanto à espessura da casca ao longo do fuste, percebeu-se que o fator de casca não é constante ao longo do fuste, o que determina que a quantificação do volume da casca, considerando a coleta apenas na altura do DAP, ocasiona erros de subestimativas ou superestimativas de volume.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste Capítulo permitem concluir que:

A equação assintótica (6), a que passa pela origem, apresentou menor erro padrão da estimativa e melhor representou a relação altura-diâmetro do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*.

A árvore A5, localizada no exterior do fragmento florestal, apresentou uma maior taxa de crescimento em diâmetro e altura em relação às árvores do fragmento florestal.

A competição e as condições de crescimento são fatores limitantes quanto ao desenvolvimento e crescimento de *Anadenanthera* spp..

A função de Gompertz foi a que melhor representou o perfil das árvores provenientes da análise de tronco.

As informações obtidas, por meio do estudo dos anéis de crescimento, não substituem o monitoramento por unidades amostrais permanentes, mas fornecem uma valiosa ferramenta para estudos em conjunto.

REFERÊNCIAS

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, M. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 149-163, dez. 2001.

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

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management**: a quantitative approach. New York: J. Wiley, 1983. 333 p.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

DIGITALGLOBE. Disponível em: <<http://www.digitalglobe.com/>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, 1992. 269 p.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

LISI, C. S. et al. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 29, n. 2, p. 189-207, 2008.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R.; BRAVO, F. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 292, p. 49-55, Mar. 2013.

MAPLINK. Disponível em: <<http://www.maplink.com.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2013.

MATTOS, P. P. de; SEITZ, R. A. Growth dynamics of *Anadenanthera colubrina* var. *cebil* and *Tabebuia impetiginosa* from Pantanal Mato-Grossense, Brazil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 427-434, out./dez. 2008.

NASCIMENTO, G. de A. et al. Floristic aspects and diversity of regenerated arboreal species under a stand of *Anadenanthera* spp. SPEG. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 187-195, abr./jun. 2009.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-plus**. New York: Springer-Verlag, 2000. 528 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 20 set. 2012.

RATKOWSKY, D. A. **Handbook of nonlinear regression models**. New York: M. Dekker, 1989. 241 p.

RATKOWSKY, D. A. **Nonlinear regression modeling**. New York: M. Dekker, 1983. 276 p.

RIDDER, M. de et al. Tree-ring analysis of an African long-lived pioneer species as a tool for sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 304, p. 417-426, Sept. 2013.

RINNTECH. **Rinntech: technology for tree and wood analysis**. Disponível em: <<http://www.rinntech.de/index-28703.html>>. Acesso em: 16 abr. 2013.

SCHÖNGART, J. Growth-Oriented Logging (GOL): a new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, n. 1/2, p. 46-58, July 2008.

SOUZA, A. L. de; SOARES, C. P. B. S. **Florestas nativas**: estrutura, dinâmica e manejo. Viçosa, MG: UFV, 2013. 322 p.

CAPÍTULO 3 Variação da densidade aparente do fuste de *Anadenanthera* spp.

RESUMO

Objetivou-se neste Capítulo determinar a variação radial e longitudinal da densidade aparente de *Anadenanthera* spp. por meio da técnica de densitometria de raios X, avaliar o uso dessa técnica no estudo dos anéis de crescimento e propor a modelagem da variação longitudinal da densidade aparente do lenho. Os dados foram provenientes das baguetas diametrais do lenho coletadas dos discos da análise completa de tronco em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, localizado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sul de Minas Gerais. A técnica de densitometria de raios X proporcionou a demarcação acurada dos anéis de crescimento. Os perfis radiais indicaram aumento da densidade aparente do lenho no sentido medula-casca; estabilização no lenho externo, próximo à casca; picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras mais espessadas; e menores valores de densidade aparente na região central, com aumento progressivo em direção à casca. A densidade aparente do lenho no sentido base-topo apresentou maior valor na base, seguido de decréscimo até uma determinada posição do fuste, aproximadamente 5 metros, e aumento progressivo da densidade. Os perfis radiais de densidade aparente podem ser aplicados em estudos com anéis de crescimento, caracterização da madeira e sua aplicação tecnológica.

Palavras-chave: Densidade aparente. Densitometria de raios X. Variação da madeira.

ABSTRACT

The objective of this chapter was to determinate the radial and longitudinal variation of the apparent density of *Anadenanthera* spp. trees through the technique of X-ray densitometry and to evaluate the use of this technique in the study of the growth rings as well as to propose the modeling of the longitudinal variation the apparent density. All the data was originated from the diametric samples of the wood collected from the discs of the stem analysis in a forest fragment with predominance of *Anadenanthera*, at the Federal University of Lavras (UFLA), south of Minas Gerais. The technique of X-ray densitometry provided the accurate demarcation of the growth rings. The radial profiles indicated the increase of the apparent density of wood from pith-bark; the wood external stabilization; density peak in the growth rings of thicker fibers; and smaller of apparent density in the center region, approximately 5 meters, with the progressive increase in the direction of the bark. The apparent density of the wood in the direction base-top showed a high value in the base, followed by a decrease until certain position of trunk, approximately 5 meters, and a progressive increase of density. The radial profiles of apparent density can be applied in studies with growth rings, wood description and its technological application.

Keywords: Apparent density. X-ray densitometry. Variation in the wood.

1 INTRODUÇÃO

A densidade é uma das principais propriedades tecnológicas da madeira, pois está relacionada com outras propriedades, como a resistência mecânica e a retratibilidade. É considerada um dos principais parâmetros da avaliação da qualidade da madeira (FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1992).

Os fatores que influenciam a densidade da madeira são: a dimensão e a frequência das células, a espessura da parede celular, as características químicas da madeira (FOELKEL; MORA; MENOCELLI, 1992), as condições de crescimento, os tratamentos silviculturais (WILKINS; HORNE, 1991), o genótipo, a interação entre o genótipo e o ambiente, a idade e a taxa de crescimento das árvores (BRASIL; FERREIRA, 1971; FERREIRA; FREITAS; FERREIRA, 1979).

De acordo com Panshin e Zeeuw (1964), madeiras com densidade básica menor que $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ são consideradas madeiras leves; entre $0,36 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,50 \text{ g cm}^{-3}$, são consideradas relativamente leves a pesadas; e acima de $0,50 \text{ g cm}^{-3}$ são consideradas madeiras pesadas.

A densidade da madeira apresenta variação nos sentidos longitudinal (base-topo) e radial (medula-casca) entre árvores, entre árvores de uma mesma espécie e dentro da árvore, a depender da estrutura anatômica e composição química da madeira.

Panshin e Zeeuw (1964) apresentaram três tipos de variação longitudinal da densidade da madeira: decréscimo da base ao topo; inferior na base, seguido de acréscimo regular; e acréscimo da base ao topo. Quanto à variação radial da densidade da madeira, eles apresentaram as seguintes variações: aumento no sentido medula-casca; maior valor na região próxima à medula, decréscimo até uma determinada proporção do raio, seguido de acréscimo até a casca ou

decréscimo; maior valor na região próxima à medula, seguido de decréscimo até a casca.

A densidade da madeira, também, apresenta variação entre o lenho inicial e tardio dos anéis de crescimento. O aspecto da transição do lenho inicial ao tardio apresenta grande influência sobre as propriedades da madeira, principalmente, a densidade.

Uma alternativa para estudar os anéis de crescimento e obter os valores de densidade aparente do lenho em intervalos micrométricos é por meio da técnica de densitometria de raios X. O uso da técnica de densitometria de raios X apresenta como principais vantagens, em relação aos métodos gravimétricos, a velocidade de processamento dos dados de densidade e a interpretação por meio dos perfis radiais de densidade da madeira, além da análise da variação da densidade da madeira em distâncias micrométricas.

Os primeiros estudos ao utilizar a técnica de densitometria de raios X no Brasil foram Amaral (1994) e Amaral e Tomazello Filho (1998), sendo considerada uma importante ferramenta na qualidade do lenho e na caracterização tecnológica da madeira.

Em decorrência de sua ampla distribuição geográfica (RIZZINI, 1981) e das características de trabalhabilidade e grande potencial do uso da madeira (MORI et al., 2003), o gênero *Anadenanthera* apresenta como uma madeira de uso alternativo. Entretanto, estudos relacionados às propriedades tecnológicas da madeira, sua variação medula-casca e variação base-topo, ainda, são incipientes. Nesse contexto, objetivou-se determinar a variação radial e longitudinal da densidade aparente de *Anadenanthera* spp. por meio da técnica de densitometria de raios X, propor a modelagem da variação longitudinal da densidade aparente do lenho e avaliar o uso dessa técnica no estudo dos anéis de crescimento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras foram provenientes de um estudo conduzido em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*, situado no Campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), sul de Minas Gerais, descrito no item 2 do Capítulo 2.

2.1 Coleta de dados

Os dados foram provenientes de baguetas diametraais do lenho, coletadas dos discos da análise completa de tronco das 5 árvores selecionadas de *Anadenanthera* spp. (Figura 1-A), descritas na Tabela 1. Os discos foram coletados nas posições: base da árvore (variou de 0,2 m a 0,4 m); 0,7 m; 1,30 m e a cada 2 metros até a altura total. A quantidade de baguetas por árvore é descrita na Tabela 1.

Tabela 1 Diâmetro à altura do peito, altura total e quantidade de baguetas coletadas das árvores-amostra para avaliação da densidade aparente do lenho

Árvore	DAP (cm)	HT (m)	Classe DAP	Quantidade de baguetas
A1	21,7	18,5	IV	10
A2	25,6	22,0	V	12
A3	20,8	22,5	IV	12
A4	25,7	21,0	V	11
A5	28,0	16,4	V	9

2.2 Avaliação da densidade aparente do lenho

Para fins da avaliação da densidade aparente do lenho e do estudo dos anéis de crescimento, a variação radial e longitudinal da densidade aparente de *Anadenanthera* spp. e a demarcação dos anéis de crescimento foram avaliados pela técnica de densitometria de raios X.

A avaliação da densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho de *Anadenanthera* spp. foi realizada no Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP).

Para essa finalidade, as baguetas diametraais do lenho, com 1 cm de largura, foram coladas em suporte de madeira e sua seção transversal foi cortada em equipamento de dupla-serra circular paralela, com 1,5 mm até 2 mm de espessura (Figuras 1-B, C). Posteriormente, as baguetas diametraais foram acondicionadas em câmara de climatização (20 °C, 50% de umidade, 24 horas) até atingirem 12% de umidade para posteriores análises, conforme Amaral e Tomazello Filho (1998).

O perfil radial de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho foi obtido pelo equipamento QTRS-01X, da Quintek Measurement Systems, Inc (Figura 1-D). As amostras do lenho foram depositadas no suporte metálico e transferidas para um compartimento interno blindado do equipamento, seguindo-se a calibração e o escaneamento radial contínuo por um feixe de raios X colimado.

Os valores de raios X que atravessaram a amostra do lenho foram transformados em densidade aparente por meio do programa QMS. Os valores pontuais de densidade que compõem o perfil radial de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho foram observados na tela do monitor,

simultaneamente à imagem da seção transversal da amostra do lenho (Figura 1-E).

Os valores radiais de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho, obtidos pelo programa QMS, originam um arquivo DAT, relatório da análise com os valores pontuais de densidade aparente a cada 80 micrômetros, equivalente a 0,008 centímetros. Esse arquivo é lido pelo programa EXCEL, determinando-se os valores de densidade aparente mínima, média e máxima, o desvio padrão e o coeficiente de variação de cada perfil radial (APÊNDICE A).

Com base nesse arquivo, construíram-se os gráficos dos perfis radiais de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho das árvores de *Anadenanthera* spp. com as imagens digitalizadas das amostras radiais (Figura 1-F) no scanner Epson PerfectionTM V750 PRO (APÊNDICE B).

A nomenclatura das amostras foi descrita da seguinte forma: A11R1 = árvore A1, disco coletado na posição 1 (base da árvore) da análise completa de tronco, raio R1; A11R2 = árvore A1, disco coletado na posição 1 (base da árvore) da análise completa de tronco, raio R2; A12R1 = árvore A1, disco coletado na posição 2 (0,7 m) da análise completa de tronco, raio R1; A12R2 = árvore A1, disco coletado na posição 2 (0,7 m) da análise completa de tronco, raio R2; A13R1 = árvore A1, disco coletado na posição 3 (1,3 m) da análise completa de tronco, raio R1; A13R2 = árvore A1, disco coletado na posição 3 (1,3 m) da análise completa de tronco, raio R2; e, assim, sucessivamente.

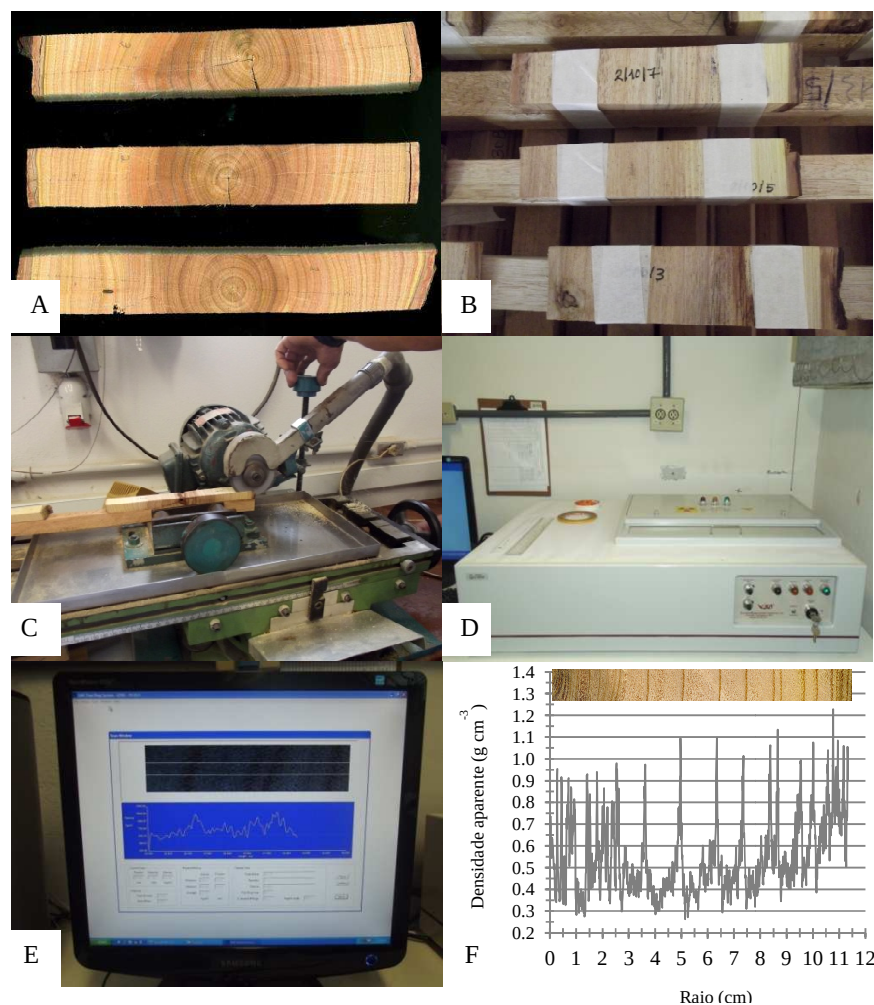


Figura 1 Obtenção dos perfis radiais de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho de *Anadenanthera* spp. A - Baguetas diametraais do lenho (Árvore A5); B - Colagem da amostra do lenho em suporte de madeira; C - Corte das amostras do lenho em equipamento de dupla-serra circular paralela; D - Equipamento de raios X QTRS-01X; E - Perfil da densidade aparente observado em tela de monitor; F - Amostra do lenho A12R1 e perfil radial de densidade aparente

2.3 Análises estatísticas

Os valores pontuais de densidade aparente dos anéis de crescimento do lenho que compõem o perfil radial foram tabulados em planilhas do programa EXCEL e analisados segundo as estatísticas descritivas, como média, desvio padrão e coeficiente de variação. Observou-se o padrão da variação longitudinal e radial da densidade aparente de *Anadenanthera* spp. Considerando a tendência dos dados da variação longitudinal da densidade aparente, ajustou-se uma equação que representasse a variação base-topo do lenho.

As estatísticas e as análises gráficas foram realizadas no programa estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011).

2.4 Variação longitudinal da densidade aparente do lenho

O padrão da variação longitudinal da densidade aparente média de cada lenho de *Anadenanthera* spp. está apresentado na Figura 2.

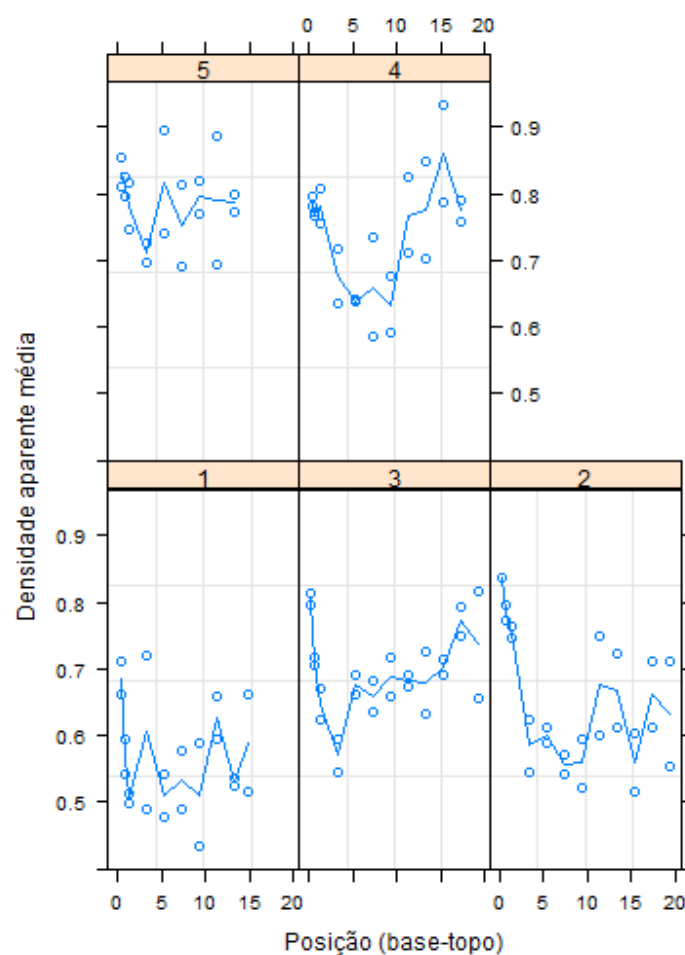


Figura 2 Variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de *Anadenanthera* spp. Densidade aparente média, em g cm⁻³; posição base-topo, em metros. 1= Árvore A1; 2= Árvore A2; 3= Árvore A3; 4= Árvore A4; 5=Árvore A5

A variação longitudinal da densidade aparente do lenho das árvores de *Anadenanthera* apresentou a mesma tendência, ajustou-se, então, uma equação não linear de densidade aparente média em função da posição da coleta das seções transversais no lenho. A variação longitudinal da densidade aparente

média do lenho de *Anadenanthera* foi ajustada pela equação não linear proposta, a seguir, a qual apresentou um ponto de mínimo:

$$\rho_i = (\Phi_2 * h_i - \Phi_1) * h_i^{\Phi_1} \quad (1)$$

Em que: ρ_i é a densidade aparente média na i-ésima posição do fuste (g cm^{-3}); h_i é a i-ésima posição do fuste (m); Φ_s = parâmetros estimados.

Com base na equação não linear (1), aplicou-se a adição de efeitos aleatórios, a teoria dos modelos mistos (pdDiag), a qual melhorou a estimação dos parâmetros. A equação com efeitos fixos e aleatórios foi ajustada, conforme Calegario et al. (2005) e Pinheiro e Bates (2000), em que os parâmetros estimados são determinados por um vetor de efeitos fixos e um vetor de efeitos aleatórios. Aplicou-se o efeito aleatório (árvore) nos dois parâmetros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X

A análise da densitometria de raios X utilizando o equipamento QTRS-01X permitiu a leitura direta, precisa e pontual da densidade aparente do lenho das seções radiais das amostras de *Anadenanthera* spp.

O limite dos anéis de crescimento no lenho das árvores de *Anadenanthera* spp., ao analisar o perfil radial de densidade por meio da densitometria de raios X, é demarcado com nitidez quando comparado com a imagem digitalizada da seção transversal do lenho (Figura 3). O uso da técnica de demarcação dos anéis de crescimento por meio do perfil radial da densidade aparente do lenho proporciona uma análise acurada ao demarcar as zonas fibrosas, o que facilita em outras análises, como a análise de tronco.

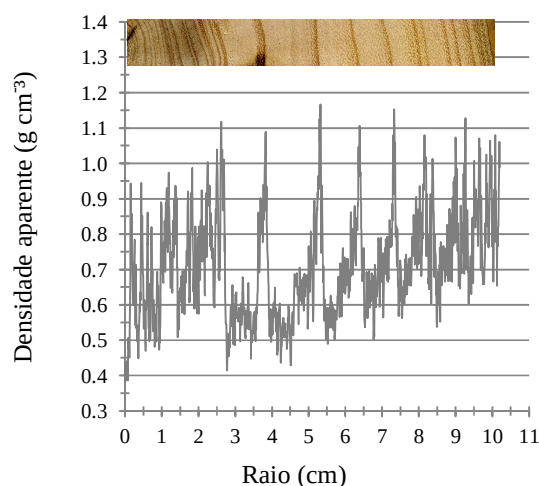


Figura 3 Perfil radial de densidade aparente do lenho (g cm^{-3}) da amostra A11R1 (disco da base) de *Anadenanthera* spp., no sentido medula-casca

Os valores de densidade aparente média, mínima e máxima das amostras do lenho de *Anadenanthera* spp. estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Resultados de densidade aparente média, mínima e máxima (g cm^{-3}) do lenho de *Anadenanthera* spp. por meio da densitometria de raios X

Árvore	DAP	HT	Densidade aparente		
			Média	Mínima	Máxima
A1	21,7	18,5	0,567 ($\pm 0,08$; 14,32) ¹	0,202	1,300
A2	25,6	22,0	0,656 ($\pm 0,10$; 15,53)	0,170	1,264
A3	20,8	22,5	0,694 ($\pm 0,07$; 9,67)	0,229	1,515
A4	25,7	21,0	0,739 ($\pm 0,09$; 11,68)	0,227	1,643
A5	28,0	16,4	0,786 ($\pm 0,06$; 7,83)	0,328	1,366
Média (g cm^{-3})			0,688	0,231	1,418
Desvio padrão (g cm^{-3})			$\pm 0,08$	$\pm 0,06$	$\pm 0,16$
CV (%)			12,13	25,58	11,17

Em que: DAP = diâmetro à altura do peito (cm); HT = altura total (m); 1 = valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (g cm^{-3}) seguido do coeficiente de variação (%); CV (%) = coeficiente de variação, em porcentagem.

A densidade aparente mínima do lenho variou de 0,170-0,328 g cm^{-3} e a densidade aparente máxima variou de 1,264-1,643 g cm^{-3} e as árvores A2 e A4 foram as de menor e maior densidade aparente, respectivamente (Tabela 2). Para as 5 árvores de *Anadenanthera* spp. os valores de densidade aparente média, mínima e máxima foram de 0,688, 0,170 e 1,643 g cm^{-3} , respectivamente (Tabela 2).

A árvore A1 apresentou menor valor de densidade aparente média (0,567 g cm^{-3}) e menor taxa de crescimento em diâmetro (0,60 cm ano^{-1}) e altura (0,56 m ano^{-1}), conforme o Capítulo 2. A árvore A5 apresentou maior valor de densidade aparente média (0,786 g cm^{-3}) e maior taxa de crescimento em diâmetro (1,07 cm ano^{-1}) e altura (0,95 m ano^{-1}), conforme o Capítulo 2. No presente estudo, o comportamento observado da densidade, em função da taxa

de crescimento, apresentou diferença ao encontrado na literatura: a densidade apresenta função inversa da taxa de crescimento (BRASIL; FERREIRA, 1971).

A densitometria de raios X proporcionou uma elevada precisão da densidade aparente, com leitura a cada 80 μm de distância no sentido radial da amostra. Os perfis radiais do lenho de *Anadenanthera* spp. (APÊNDICE B), obtidos por densitometria de raios X, indicaram aumento da densidade aparente no sentido medula-casca; estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 4-a); picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras espessadas (Figura 4-b); menores valores de densidade aparente do lenho na região central, com aumento gradativo em direção à casca (Figura 4-b).

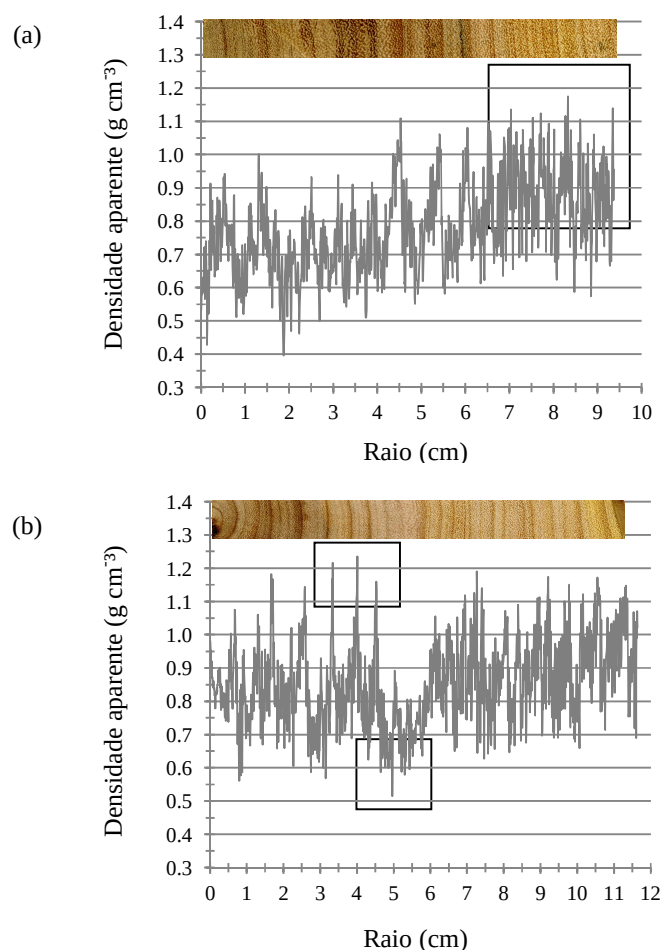


Figura 4 Perfil radial de densidade aparente do lenho (g cm⁻³) de *Anadenanthera* spp., no sentido medula-casca. (a) - Amostra A41R2 (disco da base); (b) - Amostra A51R2 (disco da base)

O perfil da variação da densidade aparente no sentido medula-casca neste estudo foi semelhante ao observado por Valente et al. (2011), ao estudarem a massa específica básica de *Anadenanthera peregrina* (L.) Speg., obtiveram massa específica básica média de 0,560 g cm⁻³ e aumento do seu valor na direção medula-casca.

Castro (2011), ao estudar a variação radial da densidade aparente de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Tectona grandis*, observou aumento da densidade aparente, com base na medula com estabilização no lenho externo, próximo à casca, conforme observado em amostras no perfil radial do lenho de *Anadenanthera* spp. (Figura 4-a; APÊNDICE B).

Oliveira et al. (2012), ao estudarem a variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill., observaram a variação intra e interanual de densidade aparente, indicativa da presença de zonas fibrosas de coloração escura, maiores valores de densidade, e mais clara, menores valores de densidade. Característica semelhante foi encontrada neste estudo, os perfis radiais de densidade aparente apresentaram picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras espessadas. De acordo com Tomazello Filho, Botosso e Lisi (2001), as condições ambientais, como temperatura, precipitação e luminosidade, afetam os processos fisiológicos da árvore, refletindo na atividade cambial, na anatomia da madeira e na qualidade do lenho.

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho podem ser aplicados em estudos com anéis de crescimento, para seleção das árvores que produzem madeira com densidade mais uniforme e mais elevada, para caracterização das propriedades da madeira e aplicação tecnológica.

3.2 Variação longitudinal da densidade aparente do lenho

Downes et al. (1997) afirmaram que a densidade tende a aumentar do centro da árvore para a casca, e da base do lenho para o topo, entretanto, esse padrão não é constante. Quanto ao presente estudo, a variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de *Anadenanthera* spp. apresentou uma tendência de maior valor da densidade na base, seguido de decréscimo até uma

determinada posição do fuste, em torno de 5 metros, e aumento progressivo da densidade (Figura 2).

Os parâmetros estimados da equação não linear de efeitos fixos e aleatórios que representa a variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de *Anadenanthera* spp. estão apresentados na Tabela 3. A adequação do modelo misto é apresentada na Figura 5. As estimativas para cada árvore foram próximas dos valores observados, o que indica que o modelo misto representa melhor os dados que o modelo com apenas o efeito fixo.

Tabela 3 Estatísticas de ajuste da equação não linear proposta de efeitos fixos e aleatórios da variação longitudinal da densidade aparente média do lenho de *Anadenanthera* spp.

Parâmetro	Efeito fixo			Efeito aleatório	
	Estimativa	Erro padrão	Valor-t	Valor-p	Erro padrão
Φ_1	-0,4647	0,0147	-31,5602	<0,0001	0,0272
Φ_2	0,1474	0,0149	9,8727	<0,0001	0,0318
Resíduo					0,0951

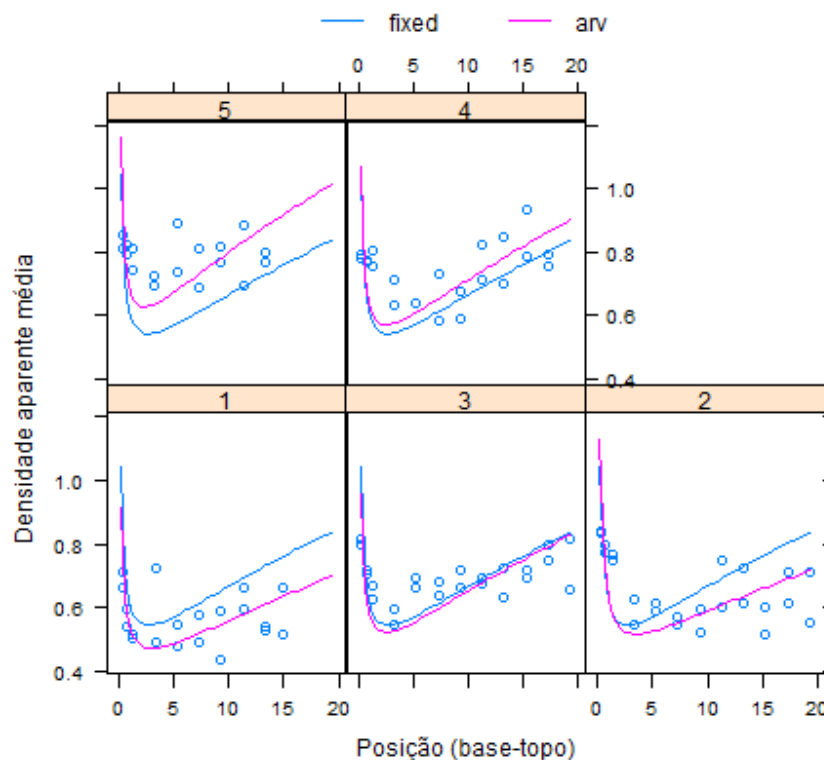


Figura 5 Densidade aparente média (g cm⁻³) observada e ajustada do lenho de *Anadenanthera* spp. em função da posição longitudinal (m) para efeitos fixos e aleatórios (arv= árvore). 1= Árvore A1; 2= Árvore A2; 3= Árvore A3; 4= Árvore A4; 5=Árvore A5

3.3 Aplicabilidade da equação proposta ajustada da densidade aparente do lenho

Em virtude das variações de densidade aparente ao longo do fuste, a estimativa de massa por árvore individual do fragmento florestal de *Anadenanthera* (1,05 ha) pode ser obtida por meio da seguinte integral:

$$\hat{M}_{ij} = K \int_{h_1}^{h_2} r_{ij}^2 * \hat{\rho}_{ij} * \Delta h \quad (2)$$

Em que: $\hat{M}_{ij}$ = massa estimada da i-ésima árvore na j-ésima posição (Mg); h_s = limites de integração correspondendo às alturas inferior e superior de qualquer seção (m); $\hat{r}_{ij}$ = estimativa do raio da i-ésima árvore na j-ésima posição (cm), correspondente à função de *taper* ajustada; $\hat{\rho}_{ij}$ = estimativa da densidade aparente da i-ésima árvore na j-ésima posição (g cm^{-3}), correspondente à equação (1); $K = \frac{\pi}{10.000}$; Δh = comprimento da seção (m).

A função de *taper* ajustada para o fragmento florestal de *Anadenanthera* foi o polinômio de quinto grau modificado. Os dados, para o ajuste da função de *taper*, foram provenientes da cubagem rigorosa não destrutiva, descritos no item 2.3 do Capítulo 2.

A estimativa de massa, por meio da equação (2), é de grande importância, dado que existe um comportamento da variação da densidade aparente ao longo do fuste e do perfil longitudinal das árvores, o que pode ocasionar estimativas mais precisas em relação às estimativas em que a densidade média é considerada apenas no DAP.

O volume total com casca por hectare ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$), a estimativa de massa considerando a densidade aparente média apenas no DAP por hectare (Mg ha^{-1}) e a estimativa de massa por meio da equação proposta ajustada da densidade aparente do lenho por hectare (Mg ha^{-1}) do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Estimativas do fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera*

Volume total ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	Massa total (Mg ha^{-1}) (ρ_{DAP})	Massa total (Mg ha^{-1}) (ρ_{estimada})
309,04	214,47	221,24
Nº de indivíduos (2012)		1.533

De acordo com a Tabela 4, nota-se uma diferença de, aproximadamente, 7 Megagramas comparando a estimativa de massa, considerando a densidade aparente média apenas no DAP em relação à estimativa de massa utilizando a equação proposta ajustada da densidade aparente ao longo do fuste.

Uma vez que existe um comportamento da variação da densidade aparente ao longo do fuste e do perfil longitudinal das árvores, a estimativa de massa por meio da equação proposta ajustada da densidade aparente do lenho é considerada uma estimativa mais precisa, já que a densidade média apenas no DAP não representa a variação da densidade aparente do lenho de *Anadenanthera*. O uso da equação proposta ajustada da densidade aparente do lenho para representar a variação da densidade torna os inventários florestais mais precisos e o planejamento florestal mais eficaz.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste Capítulo permitem concluir que:

Os perfis radiais indicaram aumento da densidade aparente no sentido medula-casca do lenho de *Anadenanthera* spp.; estabilização no lenho externo; picos de densidade aparente nas camadas de crescimento de fibras mais espessadas; menores valores de densidade aparente na região central, com aumento progressivo em direção à casca.

A variação longitudinal da densidade aparente do lenho de *Anadenanthera* spp. apresentou maior valor na base, seguido de decréscimo até uma determinada posição do fuste, em torno de 5 metros, e aumento progressivo.

O uso da teoria de modelos mistos na estimativa da densidade aparente média em função da altura ocasionou melhores estimativas e representou melhor a variação longitudinal da densidade aparente média.

A estimativa de massa, considerando a densidade média no DAP, apresentou diferença em relação à estimativa de massa utilizando a equação proposta ajustada da densidade aparente ao longo do fuste.

Os perfis radiais de densidade aparente, obtidos pela técnica de densitometria de raios X, permitem a precisa demarcação dos anéis de crescimento anuais.

Os perfis radiais de densidade aparente podem ser aplicados em estudos com anéis de crescimento, na caracterização da madeira, sua aplicação tecnológica e planejamento florestal.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1994.
- AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* através de microdensitometria de raios X. **Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 11/12, n. 6, p. 17-23, jun. 1998.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill Ex-Maiden aos 5 anos de idade, em função do local e do espaçamento. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-149, 1971.
- CALEGARIO, N. et al. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal *Eucalyptus* plantation case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, n. 1, p. 11-21, jan. 2005.
- CASTRO, V. R. de. **Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.)**. 2011. 104 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2011.
- DOWNES, G. M. et al. **Sampling plantation *Eucalyptus* for wood and fibre properties**. Melbourne: CSIRO, 1997. 132 p.
- FERREIRA, C. A.; FREITAS, M. de; FERREIRA, M. Densidade básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu, SP. **IPEF**, Piracicaba, n. 18, p. 106-117, jun. 1979.
- FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. **Papel**, São Paulo, v. 20, n. 1, p. 35-40, maio 1992.

MORI, C. L. S. de O. et al. Caracterização da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (Benth) Speng) para confecção de móveis. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 77, p. 29-36, ago. 2003.

OLIVEIRA, B. R. U. de et al. Microdensitometria de raios X aplicada na determinação da variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 93, p. 103-112, mar. 2012.

PANSIN, A. J.; ZEEUW, C. de. **Textbook of wood technology**: structure, identification, properties of the commercial woods of the United States. 2nd ed. Boston: McGraw-Hill Book, 1964. v. 1, 643 p.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-effects models in S and S-plus**. New York: Springer-Verlag, 2000. 528 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2011. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 20 set. 2012.

RIZZINI, C. T. **Árvores e madeiras úteis do Brasil**: manual de dendrologia brasileira. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 1981. 296 p.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C. S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N. B.; MARTOS, H. L. (Ed.). **Indicadores ambientais**: conceitos e aplicações. São Paulo: EDUC/COMPED/INEP, 2001. p. 117-143.

VALENTE, B. M. dos R. T. et al. Avaliação radial e longitudinal das propriedades mecânicas e da massa específica básica da madeira de angico-vermelho (*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 463-468, dez. 2011.

WILKINS, A. P.; HORNE, R. Wood-density variation of young plantation-grown *Eucalyptus grandis* in response to silvicultural treatments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 39-50, 1991.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em razão do potencial do gênero *Anadenanthera*, são necessários outros estudos que contemplem o conhecimento sobre as características silviculturais, fisiológicas e tecnológicas das espécies desse gênero.

Além disso, é importante o conhecimento sobre as vantagens que as espécies desse gênero poderiam trazer para produtores, como madeira de boa qualidade, resistência ao ataque de pragas e doenças, resistência mecânica, durabilidade, regeneração natural, a fim de justificar o uso dessa madeira. Observa-se que o gênero *Anadenanthera* pode formar agrupamentos quase homogêneos, com grande potencial na recuperação de áreas degradadas.

É recomendável, também, a execução desse estudo com árvores de outras procedências e com maior número de amostras, em virtude da variabilidade que poderá ocorrer a depender do sítio e condições de crescimento.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Resultados de densidade aparente média (g cm^{-3}), desvio padrão (g cm^{-3}) e coeficiente de variação (%) dos perfis radiais do lenho (medula-casca) de *Anadenanthera* spp. por densitometria de raios X.

Amostra	Densidade aparente			Desvio padrão	Coeficiente de variação
	Mínima	Média	Máxima		
A11R1	0,384	0,710	1,166	0,146	20,595
A11R2	0,357	0,661	1,160	0,137	20,784
A12R1	0,264	0,541	1,229	0,168	31,078
A12R2	0,251	0,596	1,060	0,157	26,395
A13R1	0,232	0,499	1,066	0,152	30,548
A13R2	0,202	0,513	1,300	0,185	36,142
A14R1	0,243	0,490	1,141	0,174	35,520
A14R2	0,314	0,721	1,197	0,163	22,659
A15R1	0,228	0,478	1,257	0,173	36,301
A15R2	0,227	0,542	1,128	0,168	31,056
A16R1	0,262	0,576	1,112	0,179	31,095
A16R2	0,230	0,489	1,078	0,167	34,214
A17R1	0,272	0,589	1,261	0,157	26,639
A17R2	0,233	0,433	1,162	0,151	34,800
A18R1	0,300	0,594	1,145	0,159	26,737
A18R2	0,211	0,660	1,086	0,203	30,831
A19R1	0,258	0,525	1,143	0,166	31,667
A19R2	0,252	0,536	1,016	0,151	28,272
A110R1	0,315	0,662	1,184	0,181	27,274
A110R2	0,258	0,515	1,167	0,174	33,742
A21R1	0,506	0,837	1,146	0,115	13,775
A21R2	0,515	0,836	1,176	0,112	13,450
A22R1	0,514	0,797	1,073	0,102	12,824
A22R2	0,455	0,772	1,144	0,123	15,906
A23R1	0,426	0,746	1,153	0,138	18,518
A23R2	0,462	0,765	1,192	0,118	15,420

APÊNDICE A, continuação.

A24R1	0,213	0,624	1,113	0,182	29,162
A24R2	0,196	0,546	1,252	0,230	42,192
A25R1	0,289	0,612	1,194	0,180	29,407
A25R2	0,277	0,589	1,094	0,172	29,180
A26R1	0,172	0,543	1,208	0,209	38,402
A26R2	0,220	0,570	1,197	0,187	32,863
A27R1	0,189	0,595	1,264	0,208	34,977
A27R2	0,170	0,523	1,125	0,189	36,134
A28R1	0,311	0,750	1,260	0,176	23,446
A28R2	0,224	0,600	1,188	0,185	30,799
A29R1	0,252	0,612	1,130	0,157	25,609
A29R2	0,334	0,722	1,075	0,125	17,267
A210R1	0,213	0,517	1,140	0,160	30,964
A210R2	0,311	0,602	1,154	0,165	27,348
A211R1	0,311	0,613	1,057	0,155	25,253
A211R2	0,406	0,712	1,172	0,126	17,645
A212R1	0,455	0,711	1,165	0,115	16,133
A212R2	0,314	0,553	1,003	0,134	24,309
A31R1	0,509	0,797	1,099	0,113	14,170
A31R2	0,494	0,814	1,076	0,092	11,332
A32R1	0,378	0,718	1,118	0,132	18,331
A32R2	0,360	0,706	1,123	0,125	17,693
A33R1	0,230	0,623	1,174	0,172	27,681
A33R2	0,229	0,669	1,175	0,156	23,375
A34R1	0,234	0,546	1,120	0,187	34,221
A34R2	0,233	0,596	1,193	0,170	28,593
A35R1	0,354	0,663	1,219	0,162	24,355
A35R2	0,374	0,690	1,189	0,154	22,310
A36R1	0,296	0,635	1,127	0,164	25,868
A36R2	0,372	0,683	1,177	0,151	22,129
A37R1	0,405	0,716	1,331	0,138	19,304
A37R2	0,345	0,660	1,272	0,148	22,393
A38R1	0,395	0,691	1,181	0,137	19,874

APÊNDICE A, continuação.

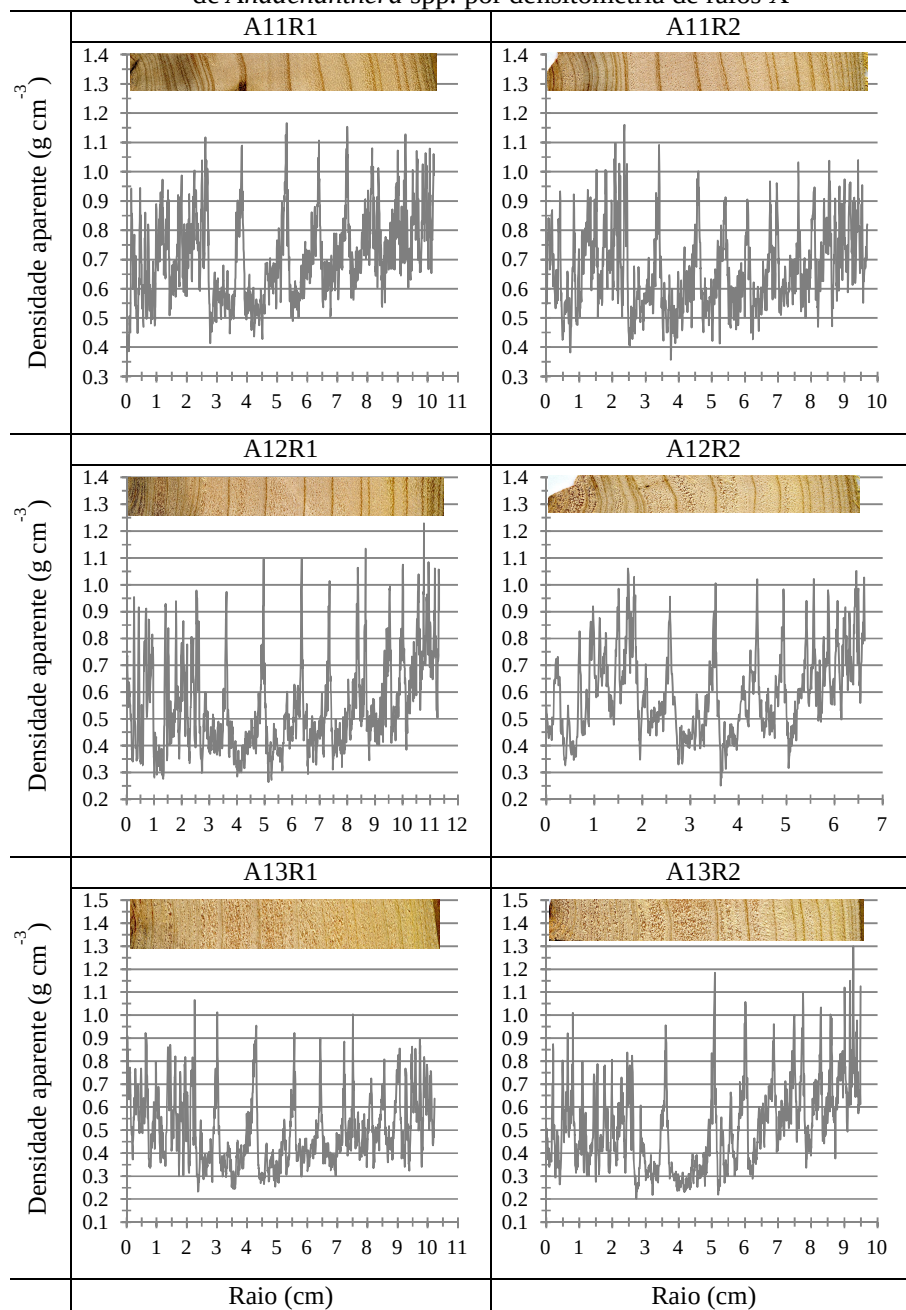
A38R2	0,355	0,674	1,155	0,162	24,016
A39R1	0,299	0,634	1,163	0,156	24,543
A39R2	0,443	0,725	1,169	0,145	20,058
A310R1	0,404	0,714	1,192	0,133	18,629
A310R2	0,392	0,692	1,216	0,152	22,022
A311R1	0,411	0,748	1,291	0,142	18,967
A311R2	0,513	0,794	1,515	0,156	19,652
A312R1	0,457	0,816	1,393	0,168	20,582
A312R2	0,415	0,657	1,085	0,128	19,516
A41R1	0,467	0,795	1,210	0,135	17,033
A41R2	0,396	0,781	1,175	0,133	17,088
A42R1	0,375	0,768	1,209	0,156	20,362
A42R2	0,371	0,773	1,168	0,148	19,157
A43R1	0,269	0,754	1,643	0,199	26,342
A43R2	0,429	0,808	1,425	0,138	17,045
A44R1	0,251	0,636	1,390	0,223	35,019
A44R2	0,338	0,716	1,192	0,170	23,765
A45R1	0,296	0,641	1,193	0,192	30,003
A45R2	0,269	0,638	1,288	0,200	31,366
A46R1	0,227	0,585	1,228	0,198	33,823
A46R2	0,299	0,734	1,363	0,208	28,363
A47R1	0,256	0,592	1,124	0,193	32,589
A47R2	0,277	0,675	1,415	0,222	32,920
A48R1	0,395	0,824	1,508	0,219	26,554
A48R2	0,340	0,712	1,363	0,188	26,480
A49R1	0,481	0,847	1,414	0,149	17,652
A49R2	0,355	0,702	1,332	0,192	27,354
A410R1	0,631	0,933	1,250	0,112	12,028
A410R2	0,465	0,788	1,169	0,136	17,280
A411R1	0,396	0,757	1,279	0,167	21,998
A411R2	0,445	0,791	1,298	0,170	21,551
A51R1	0,402	0,809	1,193	0,116	14,390
A51R2	0,515	0,854	1,236	0,122	14,325
A52R1	0,404	0,796	1,172	0,121	15,201

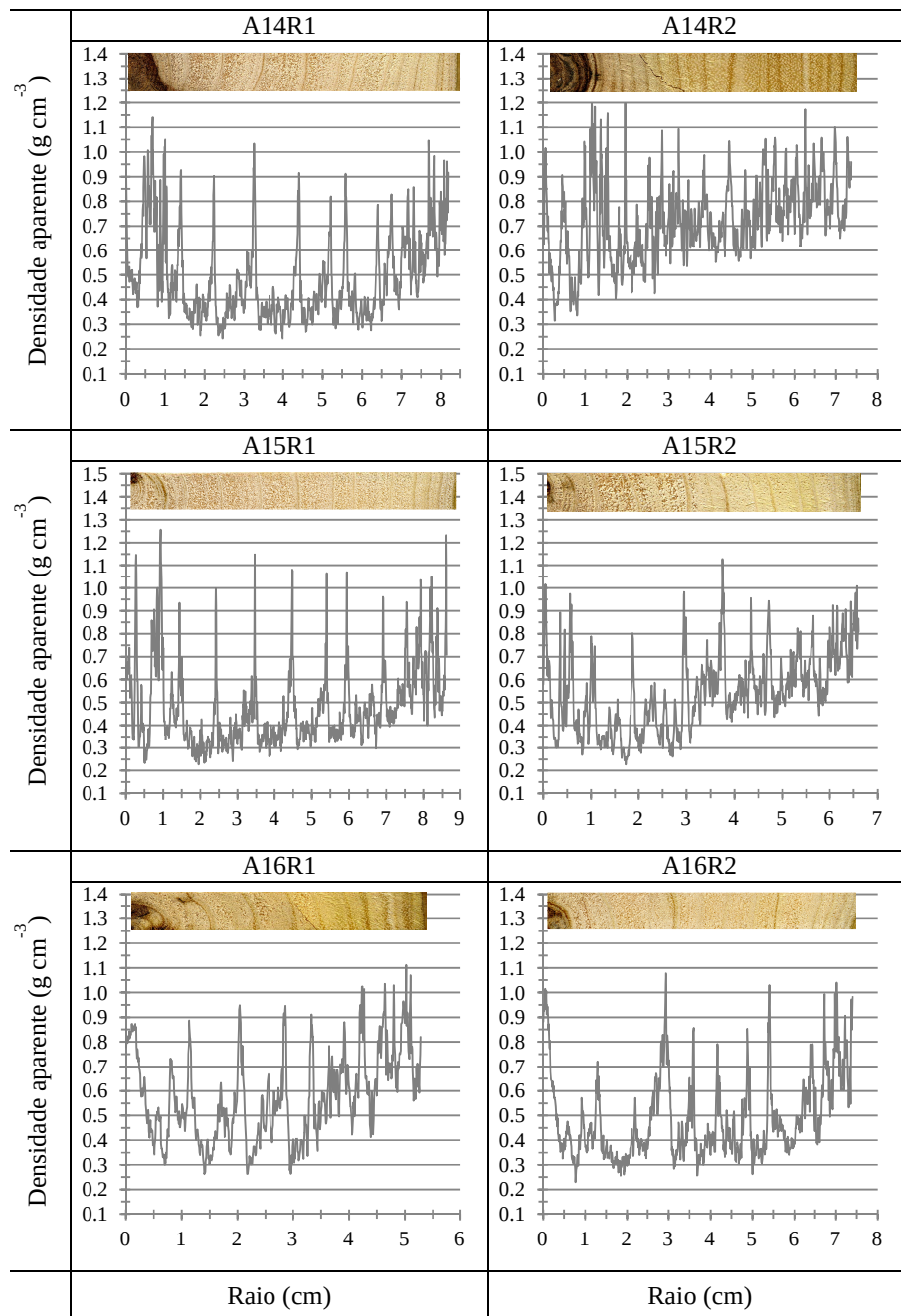
APÊNDICE A, conclusão.

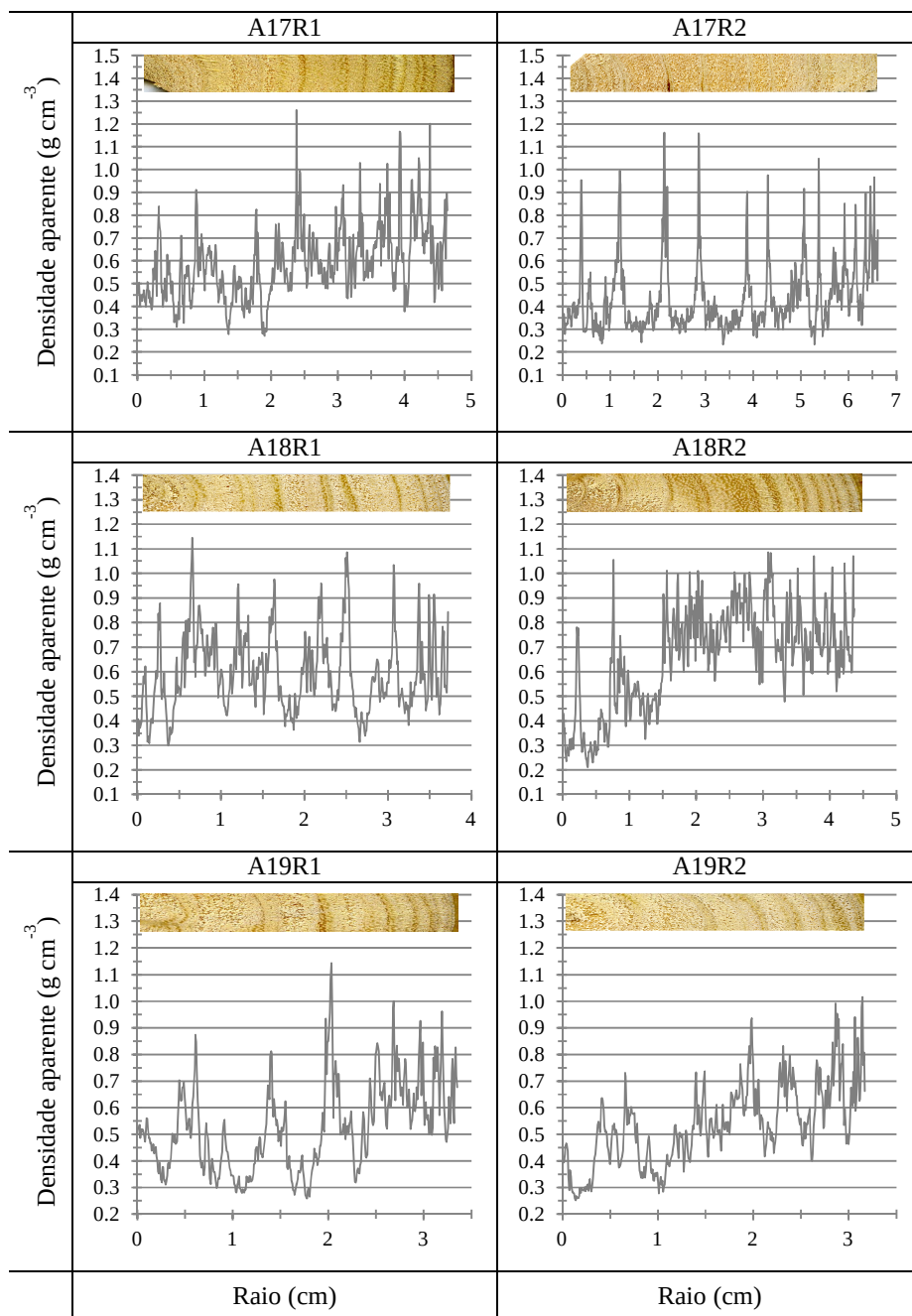
A52R2	0,478	0,826	1,222	0,132	15,959
A53R1	0,493	0,815	1,225	0,142	17,459
A53R2	0,391	0,745	1,146	0,120	16,072
A54R1	0,330	0,697	1,169	0,139	19,942
A54R2	0,388	0,726	1,195	0,147	20,256
A55R1	0,571	0,894	1,314	0,116	13,001
A55R2	0,382	0,741	1,356	0,162	21,820
A56R1	0,447	0,812	1,266	0,112	25,113
A56R2	0,328	0,692	1,366	0,179	25,817
A57R1	0,495	0,819	1,320	0,153	18,692
A57R2	0,419	0,771	1,317	0,135	17,541
A58R1	0,549	0,887	1,303	0,113	12,727
A58R2	0,375	0,694	1,158	0,132	19,071
A59R1	0,468	0,772	1,302	0,145	18,852
A59R2	0,378	0,800	1,233	0,143	17,890

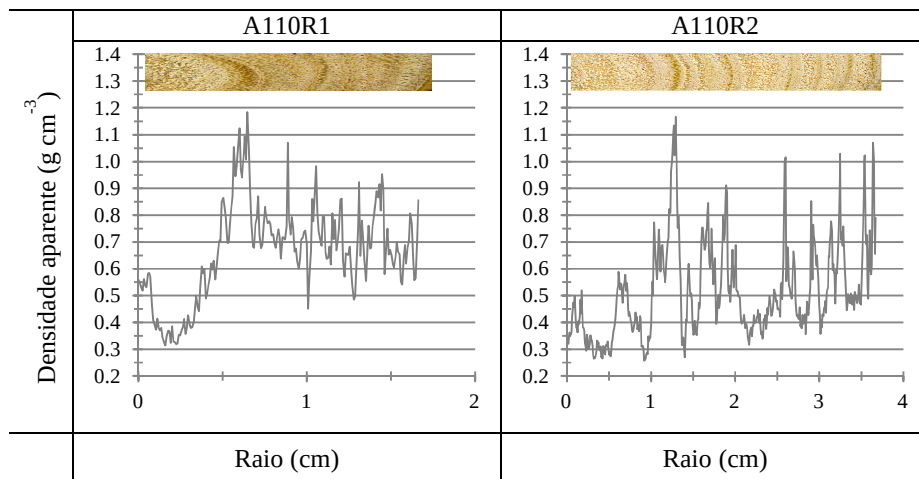
Em que: A11R1 = árvore A1, disco coletado na posição 1 (base da árvore) da análise completa de tronco, raio R1; A11R2 = árvore A1, disco coletado na posição 1 (base da árvore) da análise completa de tronco, raio R2; A12R1 = árvore A1, disco coletado na posição 2 (0,7 m) da análise completa de tronco, raio R1; A12R2 = árvore A1, disco coletado na posição 2 (0,7 m) da análise completa de tronco, raio R2; A13R1 = árvore A1, disco coletado na posição 3 (1,3 m) da análise completa de tronco, raio R1; A13R2 = árvore A1, disco coletado na posição 3 (1,3 m) da análise completa de tronco, raio R2; e assim sucessivamente.

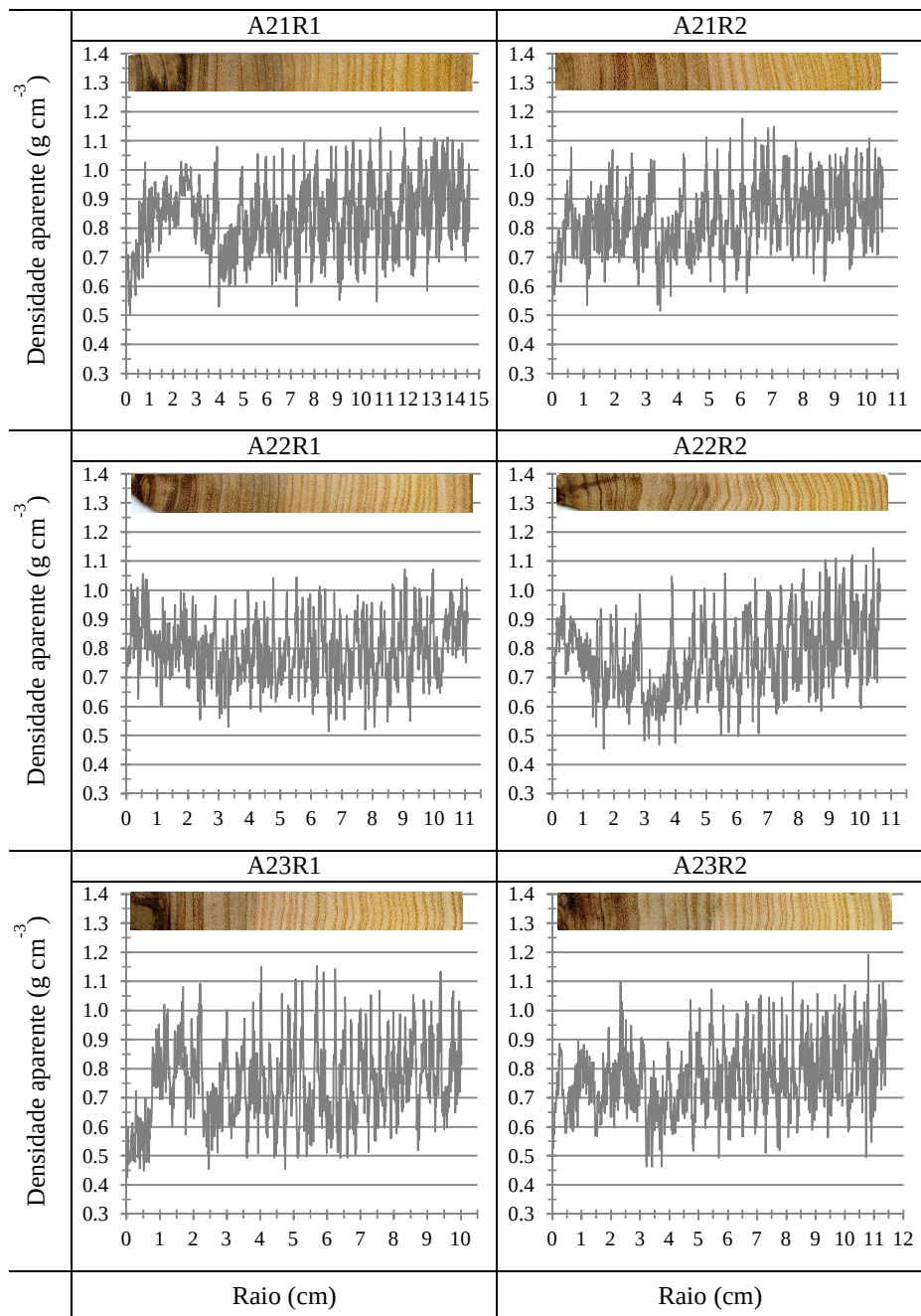
APÊNDICE B - Perfis radiais de densidade aparente (medula-casca) do lenho de *Anadenanthera* spp. por densitometria de raios X

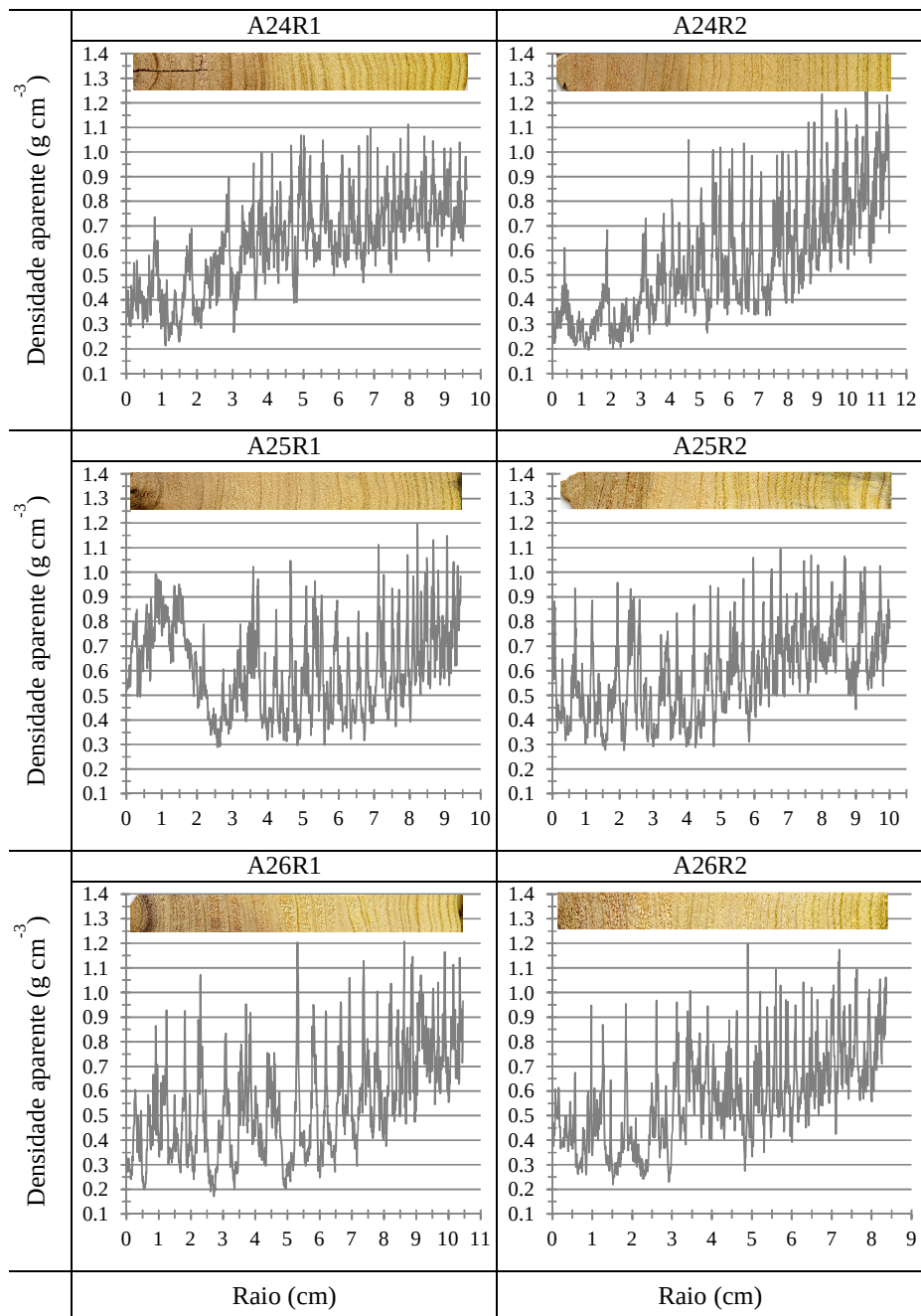


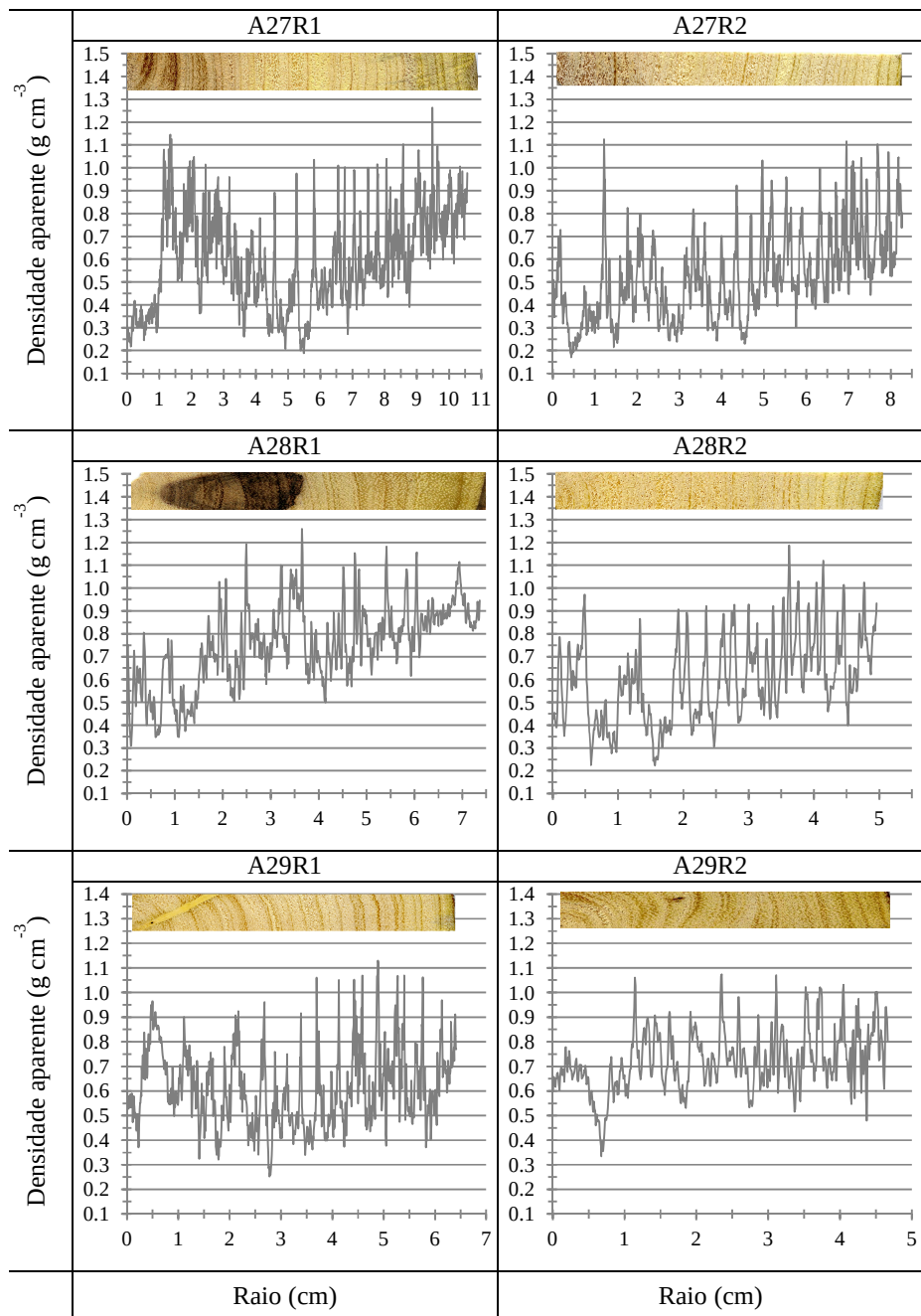


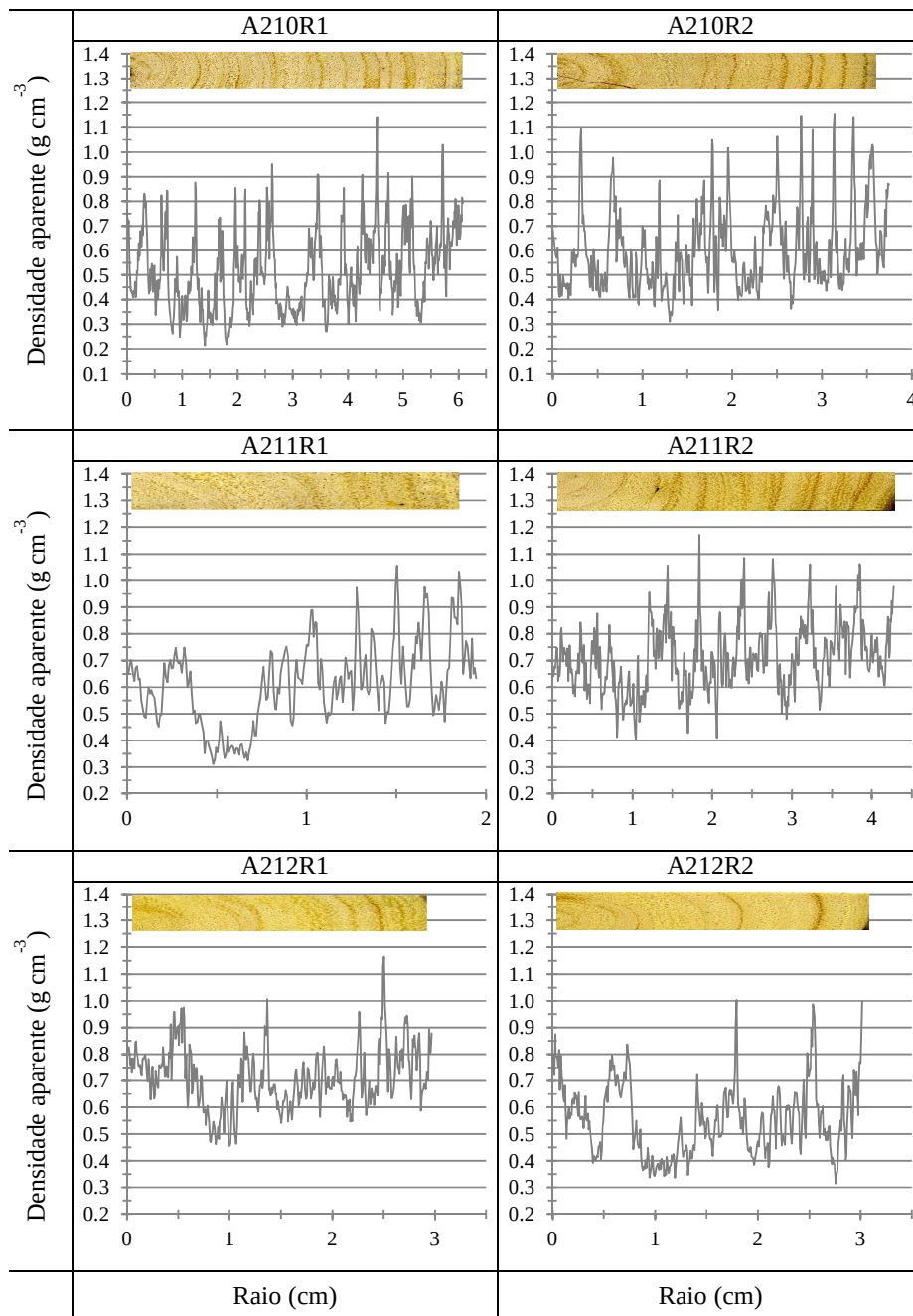


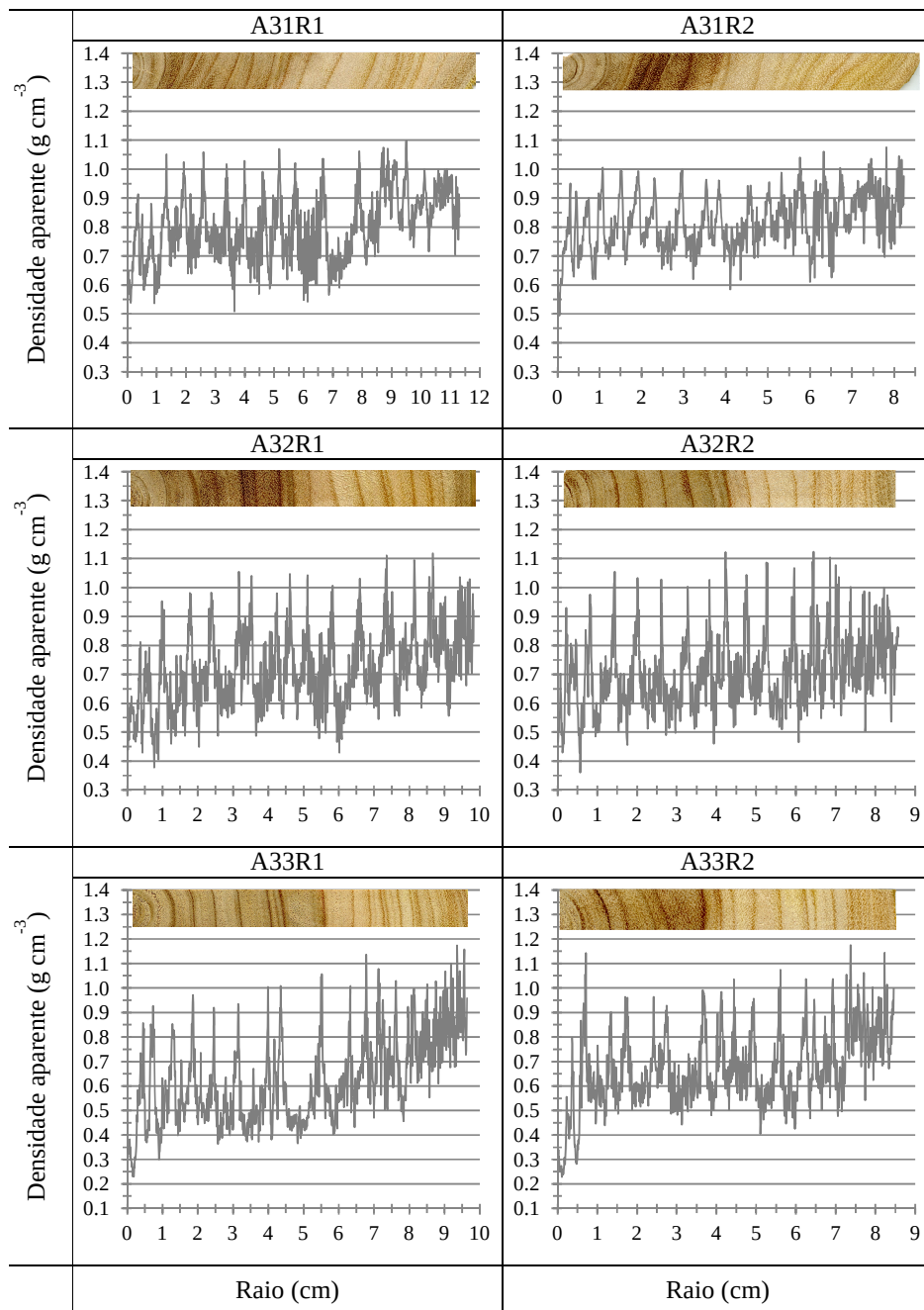


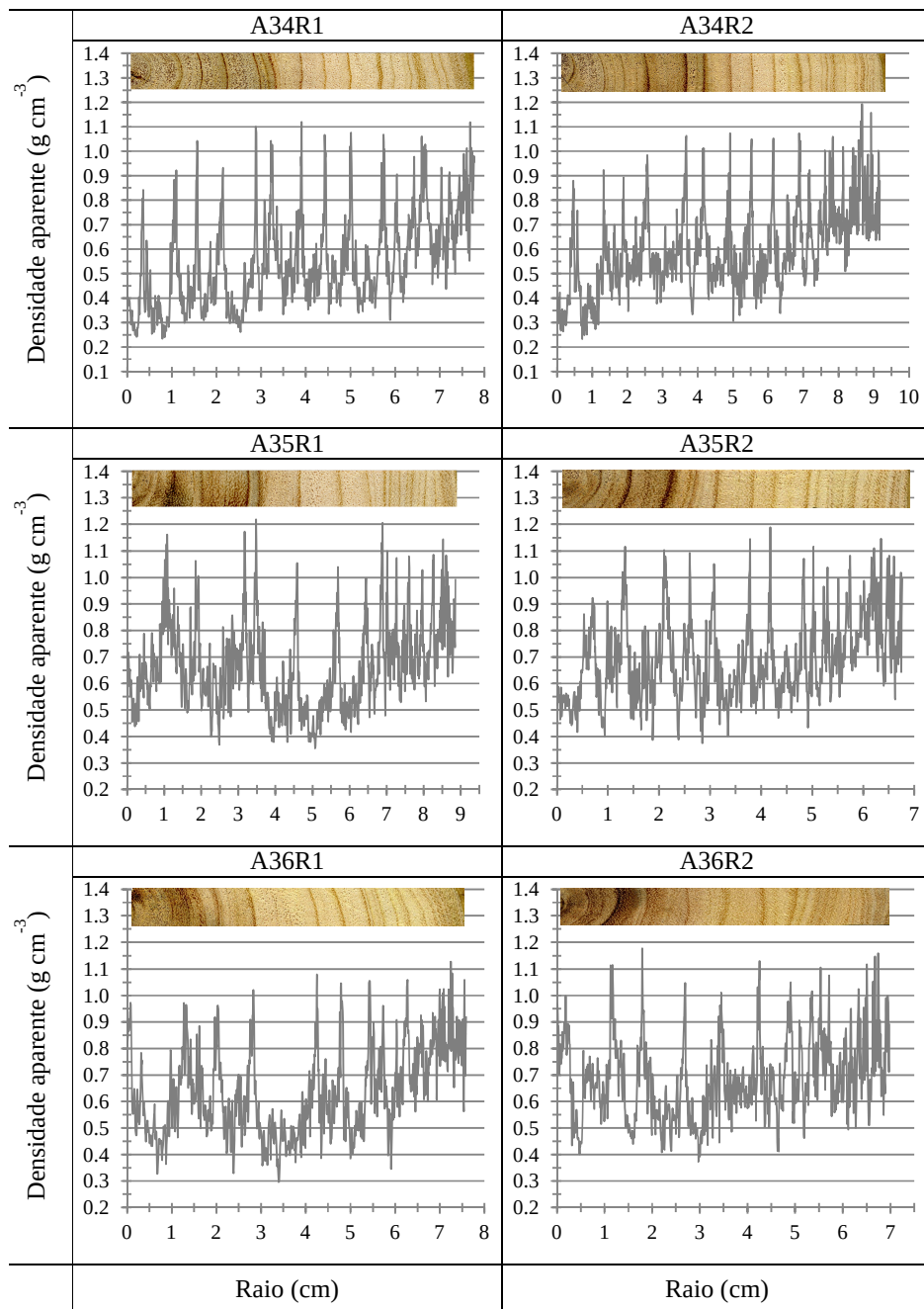


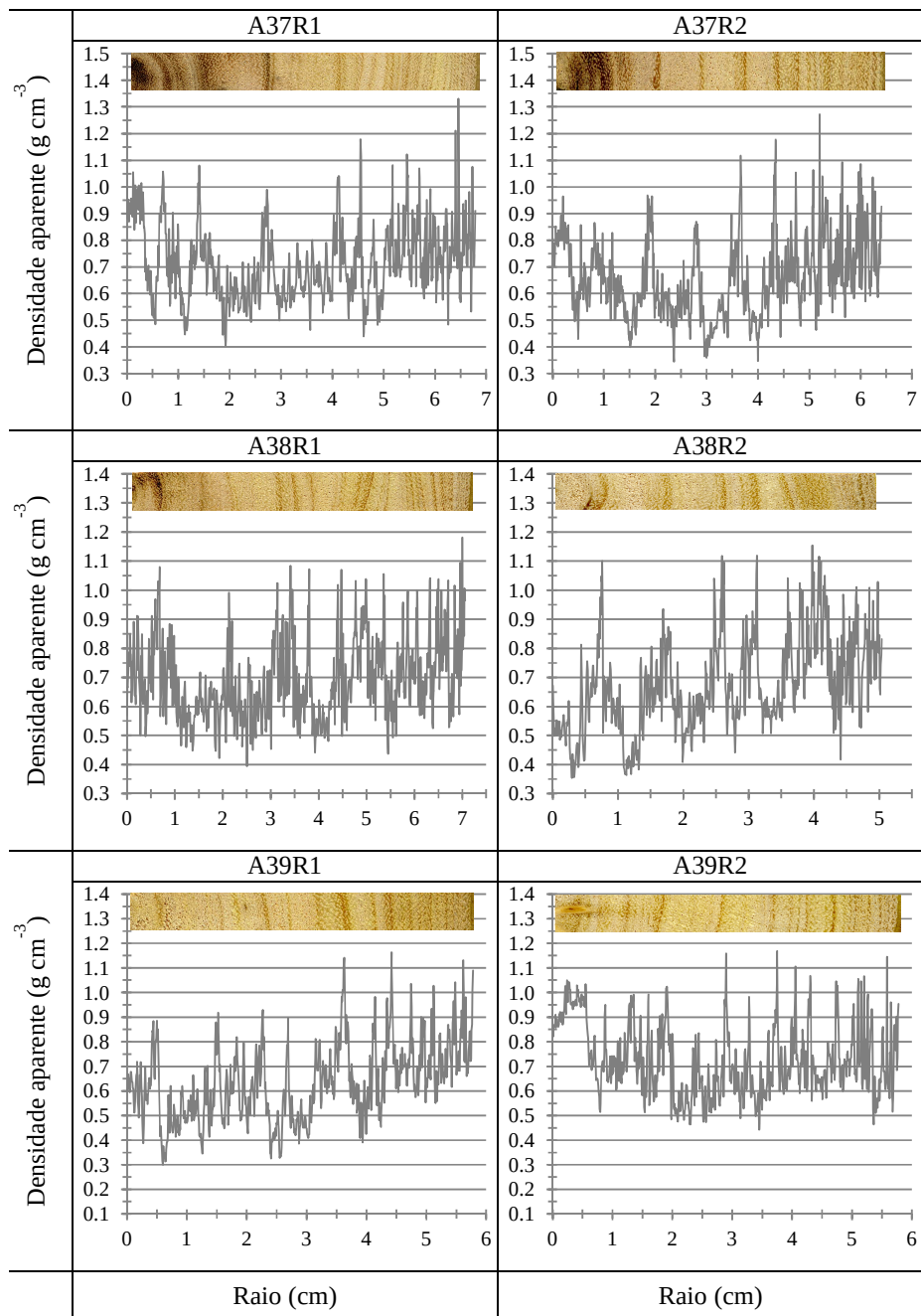


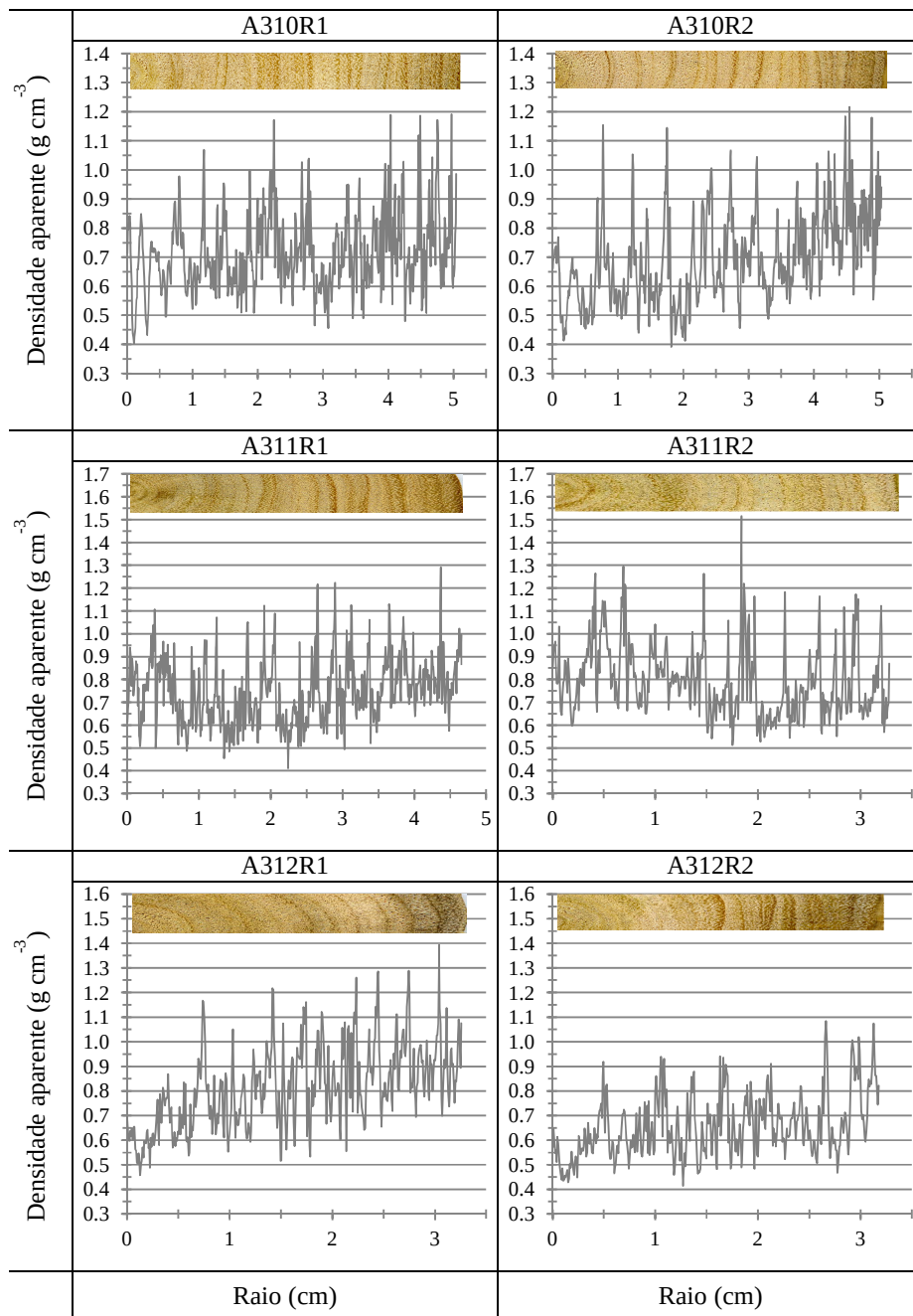


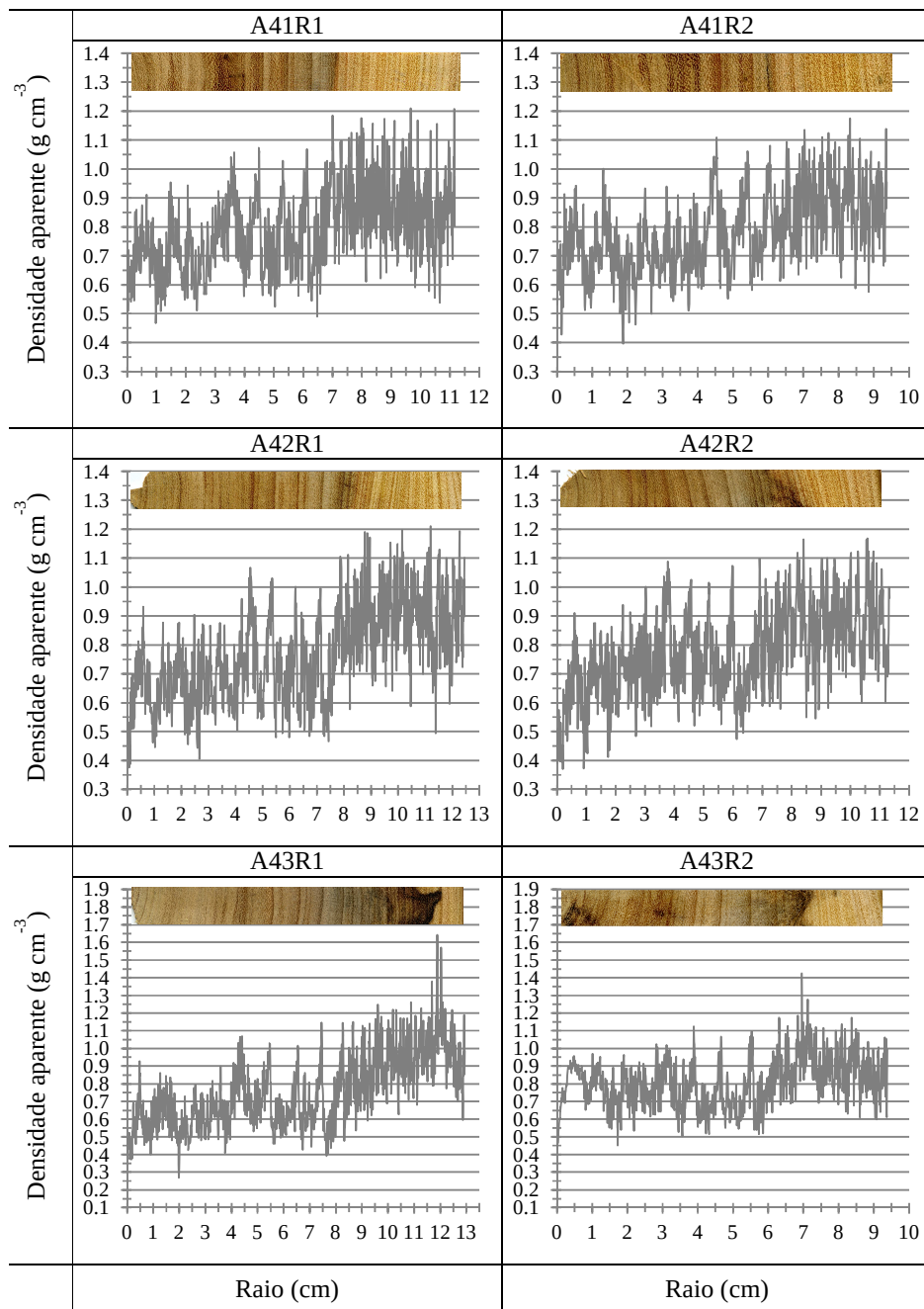


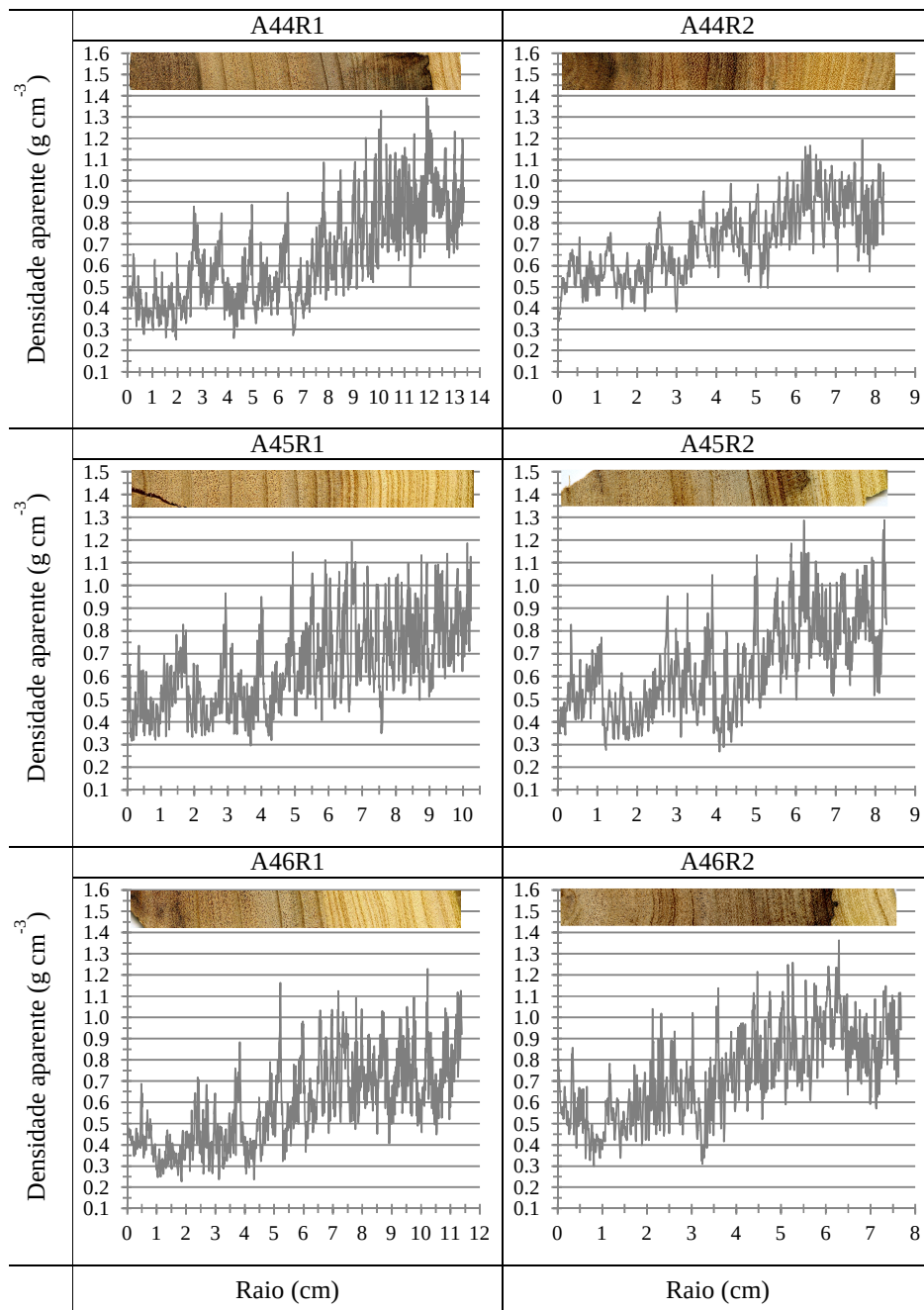


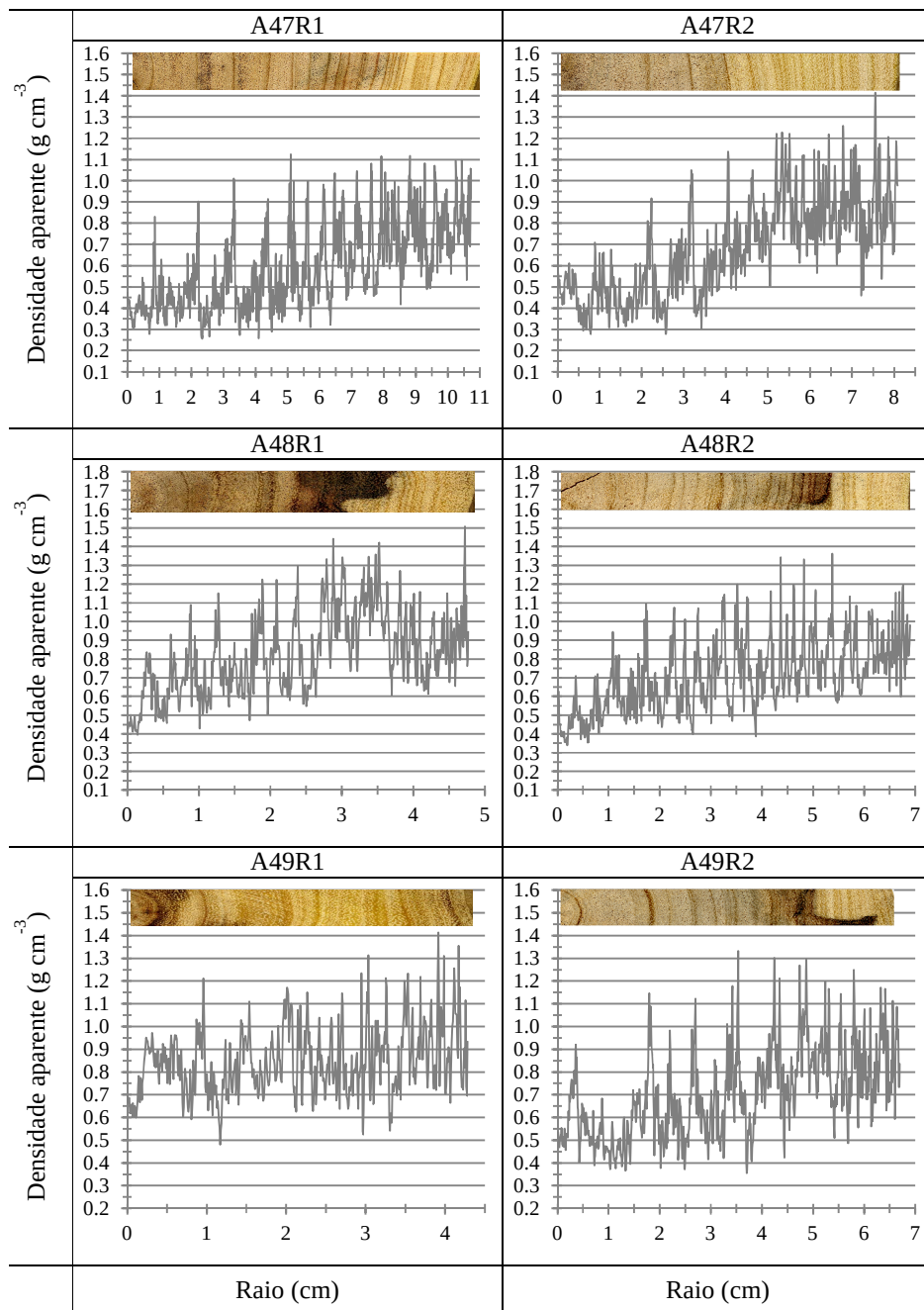


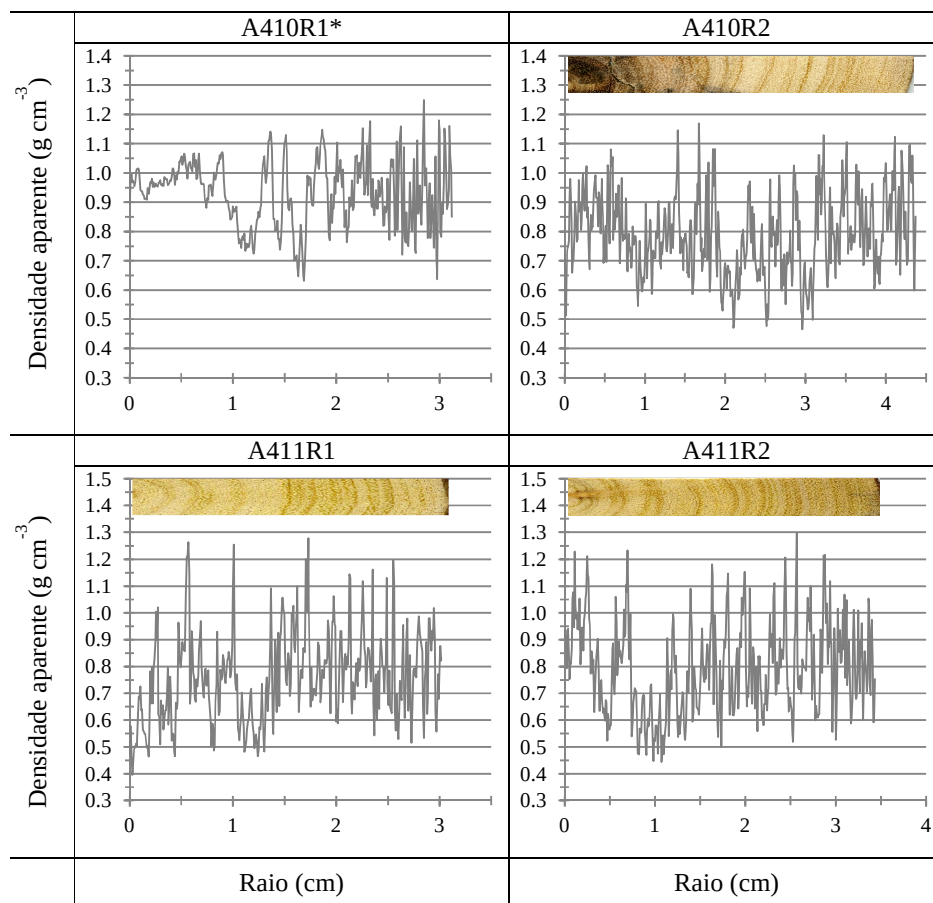












*Não foi possível colocar a imagem digitalizada do perfil radial da amostra A410R1 em consequência de uma perfuração.

