



XIMENA MENDES DE OLIVEIRA

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS E DE
AFILAMENTO PARA MOGNO AFRICANO
(*Khaya ivorensis* A. Chev.) NOS ESTADOS DE
MINAS GERAIS E PARÁ, BRASIL**

**LAVRAS - MG
2017**

XIMENA MENDES DE OLIVEIRA

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS E DE AFILAMENTO PARA MOGNO
AFRICANO (*Khaya ivorensis* A. Chev.) NOS ESTADOS DE MINAS
GERAIS E PARÁ, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho
Orientador

Prof. Dr. Renato Ribeiro de Lima
Coorientador

**LAVRAS – MG
2017**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Ximena Mendes de.

Equações volumétricas e de afilamento para mogno africano
(*Khaya ivorensis* A. Chev.) nos estados de Minas Gerais e
Pará, Brasil / Ximena Mendes de Oliveira. - 2017.

130 p. : il.

Orientador(a): Antonio Carlos Ferraz Filho.

Coorientador(a): Renato Ribeiro de Lima.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Cubagem indireta. 2. Dendrômetro óptico. 3. Volumetria. I.
Ferraz Filho, Antonio Carlos . II. Lima, Renato Ribeiro de. III.
Título.

XIMENA MENDES DE OLIVEIRA

**EQUAÇÕES VOLUMÉTRICAS E DE AFILAMENTO PARA MOGNO
AFRICANO (*Khaya ivorensis* A. Chev.) NOS ESTADOS DE MINAS
GERAIS E PARÁ, BRASIL**

**VOLUMETRIC AND TAPER EQUATIONS FOR AFRICAN
MAHOGANY (*Khaya ivorensis* A. Chev.) IN THE STATES OF MINAS
GERAIS AND PARÁ, BRAZIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de fevereiro de 2017.

Dr. Christian Dias Cabacinha	UFMG
Dr. Lucas Rezende Gomide	UFLA
Dr. Renato Ribeiro de Lima	UFLA

Prof. Dr. Antonio Carlos Ferraz Filho
Orientador

**LAVRAS – MG
2017**

*Aos meus pais, Mary e José Henrique.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por tantos planos bons que já pude concluir com saúde e paz.

À Universidade Federal de Minas Gerais, pelo conhecimento adquirido durante a graduação e pelo interesse em continuar na pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao professor Antonio Carlos Ferraz Filho, pela orientação, ensinamento, paciência e disposição em ajudar.

Aos professores, funcionários e colegas da UFLA, que tive contato nesse período, pelas conversas e conhecimento adquirido.

Aos produtores de mogno, que disponibilizaram as áreas para o estudo e aos companheiros que ajudaram na coleta dos dados.

À família e aos amigos de Montes Claros, Goiânia, Patos de Minas e São Sebastião do Maranhão, que sempre me incentivaram e apoiaram nessa jornada.

À Nara Jorge, por se “dar a mais” e me mostrar um novo mundo a cada dia. Obrigada pelos ensinamentos, companheirismo, amor, histórias e passeios!

À Rafaella Mayrinck, pela grande parceria no desenvolvimento dessa dissertação, e por ser minha irmãzinha de vidas passadas.

Às meninas da República M4 (Fernanda, Gabriela e Taiane), minha família em Lavras, pelas histórias interpretadas na sala, cumplicidade, liberdade e amor.

Aos amigos especiais concebidos em Lavras, pelas conversas, risadas, comidas, atletismos e conselhos. A companhia de vocês foi fundamental para tornar dias mais leves e felizes!

MUITO OBRIGADA!

RESUMO GERAL

A espécie *Khaya ivorensis* (mogno africano) produz madeira com qualidade e alto valor comercial. Os plantios dessa espécie estão em expansão no Brasil e necessitam de informações quantitativas que colaborem com o planejamento e otimização das atividades florestais. Essa realidade motivou o desenvolvimento dessa dissertação, e dois artigos foram elaborados: no primeiro, foram testados modelos volumétricos de simples e dupla entrada para estimar volume do fuste e total das árvores e; no segundo artigo, modelos polinomiais não segmentados foram testados para estimar diâmetros e volumes em diferentes posições na árvore, até a altura do fuste, e foi calculada a taxa de afilamento até uma altura aproximada de 6 m e realizou-se o sortimento das árvores em toras com dimensões definidas. Foram utilizadas duas bases de dados: 100 árvores com idade próxima ao primeiro desbaste (7 anos) em Minas Gerais e 46 árvores com idade próxima ao corte final (14 - 15 anos) no Pará. As árvores foram cubadas pelo método não destrutivo, com uso do Criterion RD 1000. Essa metodologia indireta foi validada com 10 árvores cubadas diretamente após o abate, sendo os diâmetros e os volumes das duas cubagens semelhantes estatisticamente para $\alpha=0,05$. O volume foi calculado seguindo o método de Smalian. No primeiro artigo, as equações de dupla entrada foram superiores às de simples entrada. O modelo de Schumacher e Hall foi selecionado para estimar volume do fuste em plantios com idade próxima ao primeiro desbaste e ao corte final, Spurr logaritimizado para estimar o volume total em plantio com idade próxima ao primeiro desbaste e, Spurr para estimar o volume total em plantio com idade próxima ao corte final. No segundo artigo, as árvores com 14 e 15 anos se apresentaram mais cônicas do que as árvores com 7 anos. Os modelos polinomiais de Schöpfer, Hradetzky e Kozak, apresentaram ajuste e boas estatísticas de precisão, e o modelo de Schöpfer foi o mais acurado para as duas idades estudadas. As informações disponibilizadas neste estudo foram satisfatórias, e podem ser utilizadas para quantificação de árvores da espécie *Khaya ivorensis*.

Palavras-chave: Cubagem indireta. Dendrômetro óptico. Volumetria.

GENERAL ABSTRACT

Khaya ivorensis (African mahogany) yields high-quality and high-priced wood at the international market. Planting area is in expansion in Brazil and information is need to enhance planing and optimization of the forest activities. This motivated this dissertation and two papers were produced: the first tests single and double-entry models to fit commercial and total volume for *Khaya ivorensis* stands at first thinning (7 years) and final cut ages (14 – 15 years); and in the second paper polynomial non-segmented models were fitted to estimate diameters and volume at different positions the tree up to the commercial height. Taper was calculated up to 6 meters and the tree was assorted by different products. It was used 2 data bases: 100 trees with age close to the first thinning (from a Minas Gerais plantation) and 46 trees with ages close to final cut (from a Pará plantation). Tree volume was measured indirectly using Criterion RD 1000. Indirect measurements were validated comparing values obtained directly from 10 felled trees, being diameters and volumes from direct and indirect measurements statistically equal ($\alpha=0,05$). Volume was calculated using Smalian's formula. On the first paper, double-entry equations overperformed single-entry equations and Schumacher and Hall model was selected to estimate commercial volume for plantations with age close to the first thinning and final cut. Spurr Logarithmized model was the best to estimate total volume of the plantation with age close to the first thinning and Spurr was the best to estimate total volume for the plantation with age close to final cut. On the second paper, older trees were more conical than the younger. Schöepfer, Hradetzky and Kozak polynomial models presented good fit and good precision statistics. Schöepfer was the most accurate for both studied ages. Information from this study was satisfactory and can be used to quantify *Khaya ivorensis* dendrometric values.

Keywords: Indirect scaling. Optic dendrometer. Volumetry.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO GERAL	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	O mogno africano, origem e comercialização atual.....	13
2.2	O estabelecimento do mogno africano no Brasil e a espécie <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev.....	15
2.3	Metodologia de quantificação.....	18
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	26
	REFERÊNCIAS	28
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....	34
	ARTIGO 1 Volume equations for <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. Plantations in Brazil.....	35
1	INTRODUCTION	36
2	DEVELOPMENT.....	38
3	CONCLUSION	68
	REFERENCES	69
	ARTIGO 2 Modelos de afilamento não segmentados para estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste em plantios de <i>Khaya ivorensis</i> A. Chev. nos estados de Minas Gerais e Pará, Brasil.....	83
1	INTRODUÇÃO	84
2	MATERIAL E MÉTODOS	85
2.1	Áreas de estudo e descrição dos dados	85
2.2	Cubagem das árvores.....	87
2.3	Taxa de afilamento dos fustes em classes diamétricas	89
2.4	Modelos de afilamento testados.....	90

2.4.1	Modelo de Schöepfer (1966)	90
2.4.2	Modelo de Hradetzky (1976)	92
2.4.3	Modelo de Goulding e Murray (1976)	93
2.4.4	Modelo de Kozak et al. (1969)	95
2.5	Precisão e acurácia dos modelos de afilamento	95
3	RESULTADOS	97
3.1	Comparação entre a cubagem destrutiva e não destrutiva	97
3.2	Conicidade dos fustes	97
3.3	Ajuste e precisão dos modelos	98
3.4	Acurácia dos modelos na estimativa de diâmetros em diferentes alturas do fuste.....	100
3.5	Acurácia dos modelos na estimativa de volumes em diferentes alturas do fuste.....	111
4	DISCUSSÃO	121
5	CONCLUSÃO	125
	REFERÊNCIAS	126

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A implantação de reflorestamentos com espécies não convencionais (acácia, araucária, pópulus, teca, seringueira, paricá, dentre outras) é crescente no Brasil. Em 2010, estes plantios ocupavam uma área de 426,39 mil hectares, representando 6,6% da área total de reflorestamento do país (ABRAF, 2011). De acordo com ABRAF (2013), em 2012, essa área aumentou para 521,13 mil hectares, representando 7,2% da área total. Em 2015, segundo IBÁ (2016), essa área já totalizava 590,00 mil hectares, representando 7,6% da área de árvores plantadas.

O alto valor comercial, agregado à madeira de algumas espécies, conhecidas vulgarmente como ‘mogno africanos’, justifica o interesse pelo cultivo destas no Brasil. A *Khaya ivorensis* A. Chev. é uma das espécies de mogno africano mais utilizada. Ela se caracteriza por possuir um fuste retilíneo, crescimento rápido e alta resistência ao *Hypsiphyla grandella*, o que causa a broca do ponteiro. Os plantios são recentes no país, sendo necessário o desenvolvimento de estudos que possam colaborar com o estabelecimento destes.

Nesse contexto, se destaca a importância da quantificação volumétrica. As informações de volume dão sustento a melhorias no planejamento e nas práticas de silvicultura e manejo, além de serem essenciais na análise de viabilidade econômica dos plantios. Diversas são as formas de obter estimativas volumétricas, mas destacam-se as baseadas em modelos de regressão para estimar o volume e o afilamento das árvores por meio, respectivamente, de modelos de simples e dupla entrada para árvores individuais, e modelos de afilamento não segmentados e segmentados. Estes modelos são ajustados por meio de dados de cubagem rigorosa, coletados ao longo de toda a amplitude diamétrica do povoamento, para ser uma amostra representativa.

A finalidade deste estudo é fornecer informações quantitativas importantes para atrair mais investidores com uma perspectiva real da potencialidade da espécie. Conta com duas bases de cubagem de árvores de *Khaya ivorensis* em períodos próximos a intervenções no povoamento: idade próxima ao primeiro desbaste e próxima ao corte final. O conteúdo desse material foi dividido em duas partes. A primeira parte contém essa introdução geral e uma revisão de literatura sobre o tema e, a segunda parte está dividida em dois artigos. No primeiro artigo são testados modelos de simples e dupla entrada e selecionadas equações para estimar volume do fuste e volume total nas duas situações (árvores com idade próxima ao primeiro desbaste e ao corte final). No segundo artigo, testou-se modelos de afilamento não segmentados e realizou-se o sortimento do volume em toras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

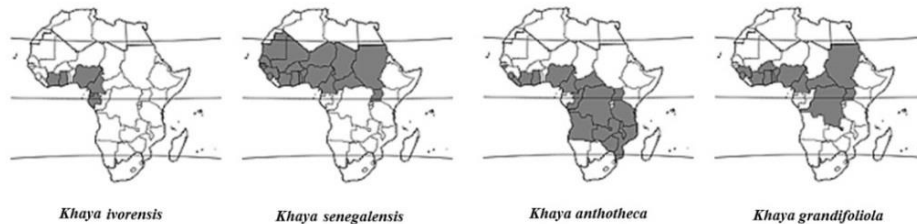
2.1 O mogno africano, origem e comercialização atual

A família Meliaceae possui cerca de 1.400 espécies, dentre as quais, aproximadamente 550, possuem importância no mercado florestal em diversos países. As espécies denominadas ‘mogno verdadeiro’, pertencem ao gênero *Swietenia*. Devido à qualidade da madeira, duas espécies desse gênero se realçam no comércio: *Swietenia macrophylla* e *Swietenia mahogany*. De forma mais abrangente, o termo mogno considera outros gêneros desta família, com destaque para o gênero *Khaya* (BARROSO, 1987; LAMPRECHT, 1990; PINHEIRO, 2011).

As espécies *Khaya ivorensis*, *Khaya senegalensis*, *Khaya anthoteca* e *Khaya grandifoliola* são denominadas mogno africano. Estas espécies têm origem de diferentes regiões da África (FIGURA 1). A *Khaya ivorensis* ocorre de Gabão até a Costa do Marfim, em que a precipitação média anual varia de 1600 a 2500 mm e a estação seca é de 2 a 3 meses. As plantas desta espécie podem chegar a uma altura de 40 a 60 m e um diâmetro a 1,3 m do solo (dap) de 1,9 m a 2,1 m. A *Khaya senegalensis* ocorre da Gâmbia ao norte da Nigéria, consideradas regiões mais áridas. As árvores possuem porte mediano, podendo chegar, aproximadamente, a 35 m em altura e 1 m em dap. A *Khaya anthotectae* e *Khaya grandifoliola* ocorrem em florestas com precipitação média anual de 1200 a 1800 mm e 3 a 5 meses de estação seca. Embora a *Khaya anthoteca* apresente uma distribuição espacial maior no continente, ambas são amplamente distribuídas na África. As árvores de *Khaya anthoteca* podem atingir, aproximadamente, 60 m em altura e 1 m em dap. As árvores de *Khaya grandifoliola* apresentam porte mediano para grande, atingindo uma altura de

cerca de 40 m e dap de cerca de 2 m (PINHEIRO, 2011; OPUNI-FRIMPONG et al., 2016).

Figura 1 - Ocorrência natural das espécies *Khaya ivorensis*, *K. senegalensis*, *K. anthoteca* e *K. grandifoliola* no continente africano.



Fonte: OPUNI-FRIMPONG et al. (2016).

O grande interesse comercial na exploração do mogno africano provocou intensa redução dessas espécies em seu ambiente natural (FALESI; BAENA, 1999). Em Gana, o volume de madeira exportado de mogno africano (*Khaya* spp.), em 1950, cerca de 100.00 m³, decresceu para 17.000 m³ em 2005. Devido à vulnerabilidade da *Khaya ivorensis*, a União Internacional para a Conservação da Natureza (UICN) a incluiu na lista vermelha de espécies ameaçadas de extinção em Gana (OPUNI-FRIMPONG et al., 2016).

Com o decréscimo da disponibilidade da madeira de mogno africano e a constante exigência do mercado por esta excelente matéria prima, alguns projetos foram desenvolvidos. O projeto nomeado PD 528/08 Rev.1 (F), da Organização Internacional da Madeira Tropical (OIMT), foi conduzido em Gana. Foram desenvolvidas pesquisas voltadas para técnicas de silvicultura e manejo de *Khaya* spp.. Como fruto destas pesquisas, foi publicado um manual prático sobre plantações de mogno africano, tendo por objetivo auxiliar produtores e pesquisadores (OPUNI-FRIMPONG et al., 2016).

Na Costa do Marfim, dois projetos da OIMT, PD 377/05 Rev.3 (F) e PD 419/06 Rev.3 (F), resultaram na criação de um programa de produção de mudas e clonagem de importantes espécies madeireiras, dentre elas, o mogno africano

(*Khaya* spp.), a teca (*Tectona grandis*) e o cedro (*Cedrela odorata*). Foram produzidas 43.270 mudas de mogno africano, e plantadas em consórcio com teca. Com essa ação, a instituição responsável pelo reflorestamento na Costa do Marfim (Société de Développement des Forêts de Côte d'Ivoire), se tornou autossuficiente na produção de mudas (ITTO, 2016).

Além de visar a proteção da biodiversidade das florestas nativas da África, os plantios de mogno africano apresentam importância significativa na economia. Atualmente, a exportação de madeira de *Khaya ivorensis* em Gana, atinge o valor de 1001 euros por m³ de madeira serrada (ITTO, 2017). Devido à valorização da madeira no mercado internacional e às condições ambientais favoráveis, a implantação dessa espécie é visada no Brasil. Ribeiro (2017) estudou plantios localizados nas regiões sudeste, norte e centro-oeste do país e verificou pela simulação de Monte Carlo que a probabilidade do investimento ser inviável é próxima a zero.

2.2 O estabelecimento do mogno africano no Brasil e a espécie *Khaya ivorensis* A. Chev.

O desmatamento das florestas nativas e o corte seletivo de espécies com alto valor comercial ameaçam a extinção de algumas espécies valiosas. O mogno nacional (*Swietenia macrophylla* King) e o cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) estão entre as espécies da família Meliaceae incluídas na lista vermelha de espécies ameaçadas da UICN (CITES, 2017).

Como resposta às preocupações sobre as explorações da *Swietenia macrophylla* em florestas nativas, os órgãos ambientais brasileiros reduziram as cotas de exportação desde 1990, proibiram a autorização de novos planos de manejo desde 1995, e proibiram o transporte, processamento e comercialização dessa espécie, após detectar práticas ilegais de exploração no Pará, em 2001. Assim, para garantir o comércio da madeira do mogno de forma renovável,

torna-se necessário um manejo que atenda aos interesses públicos, possua viabilidade econômica e seja aceitável pelos órgãos ambientais (PINHEIRO, 2011).

A vulnerabilidade do mogno nacional, ao ataque do microlepidóptero *Hypsipyla grandella*, inviabiliza os monocultivos dessa espécie. A lagarta dessa praga causa a broca de ponteiro, afetando os brotos terminais de mudas e árvores jovens, gerando a quebra da dominância apical e ramificação do fuste, prejudicando assim, a formação de um fuste retilíneo e comercialmente aproveitável (GRIJPMMA, 1976; HILJE; CORNELIUS, 2001; TREMACOLDI et al., 2013).

O mogno africano (*Khaya* spp.) é uma alternativa para substituir o mogno nacional, uma vez que são botanicamente muito semelhantes. São normalmente resistentes à broca de ponteiro e apresentam comercialização garantida, atingindo, muitas vezes, um preço superior ao do mogno nacional, sendo um investimento que varia de 12 a 20 anos (FALESI; BAENA, 1999).

Os plantios vêm sendo estimulados no Brasil. A Associação Brasileira de Produtores de Mogno Africano (ABPMA), criada em 2011, estima que há uma área superior a 10.000 hectares referentes a plantios de mogno africano no Brasil. A boa adaptação das espécies de mogno africano às condições edafoclimáticas do país, com destaque para a espécie *Khaya ivorensis*, tem colaborado para atrair produtores (ABPMA, 2017).

Ribeiro et al. (2016) utilizaram em seu estudo, plantios de *Khaya ivorensis* localizados nas regiões sudeste, centro-oeste e norte do Brasil. Os autores alegam que as plantações desta espécie no país possuem o material genético e o manejo florestal semelhantes, caracterizado por amplos espaçamentos (4x5 m a 6x6 m para plantios de até 8 anos e 12x12 m para plantios com idade superior a 8 anos), fertilização intensiva e, em algumas áreas com precipitação média anual inferior a 800 mm, a prática da irrigação. Castro

et al. (2008) e Falesi e Baena (1999) relatam que a *Khaya ivorensis* pode ser empregada em sistema silvipastoris, trazendo conforto térmico aos animais e sustentando a atividade pecuária nos aspectos produtivos, biológicos, econômicos e sociais.

A *Khaya ivorensis* apresenta crescimento relativamente rápido e madeira com alto valor agregado (SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014). É uma espécie decídua e monóica com folhas alternas, compostas e paripenadas e flores reunidas em inflorescência tipo panícula. O fuste retilíneo ou pouco sinuoso é coberto por uma casca marrom escura que tem apresentado grande rugosidade devido a um cancro de casca causado pelo fungo *Lasiodiplodia theobromae* (LEMMENS, 2008; LAMPRECHT, 1990; BARROSO, 1987). A madeira, de coloração vermelha a marrom, possui densidade variando de 0,46 a 0,55 g/cm³ e dureza de 1,3 a 2,2. Essas características são muito próximas às da madeira do mogno nacional (*Swietenia macrophylla*), que possui coloração avermelhada, densidade variando de 0,42 a 0,66 g/cm³ e dureza de 1,8 a 3,0 (PINHEIRO et al., 2011).

França et al. (2015) analisaram madeiras de duas espécies de mogno africano (*Khaya ivorensis* e *Khaya senegalensis*) de um plantio experimental com 19 anos localizado no estado do Espírito Santo. A madeira de *Khaya ivorensis* apresentou menor massa específica (0,491 g/cm³) do que a da *Khaya senegalensis* (0,588 g/cm³), sendo indicada para destinações que não exijam alta resistência mecânica, como produção de móveis.

Pesquisas estão sendo desenvolvidas por meio de uma parceria entre universidade e empresa no estado de Goiás. Estas visam estabelecer um melhoramento genético da *Khaya ivorensis* plantada no país e melhorar a condução do manejo (SOARES, 2014). Soranso et al. (2016) avaliaram três espaçamentos (5x5 m, 7x6 m e 10x10 m) para plantios de *Khaya ivorensis* e recomendaram o espaçamento 7x6 m, devido ao crescimento em diâmetro ter

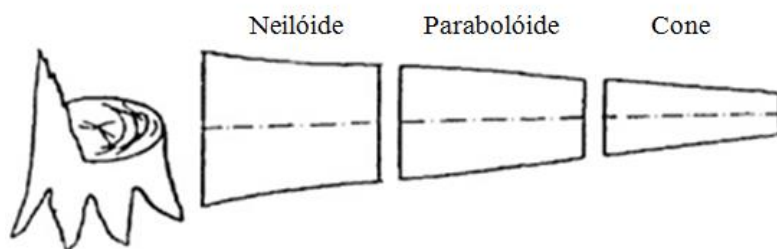
sido superior ao plantio de menor espaçamento e equivalente ao de maior espaçamento.

São poucas as informações quantitativas sobre o mogno africano no Brasil. Silva et al. (2016) estimaram relações hipsométricas, volumétricas e de crescimento com os dados de um plantio de *Khaya ivorensis* localizado no norte de Minas. As 21 árvores cubadas indiretamente, possuíam entre 30 e 74 meses, e estavam dispostas em um espaçamento de 4x3 m. Neste estudo, foi verificado que a espécie apresenta um grande potencial de estabelecimento no país.

2.3 Metodologia de quantificação

Pode-se considerar que a forma do fuste assume um comportamento de parabolóide de revolução, sendo dividida em três partes, como representado na Figura 2. A base da árvore caracterizada com maiores deformações, devido à função de sustentação, assemelha a uma parábola denominada neilóide, a porção intermediária se assemelha a um parabolóide e a ponta da árvore tende a assumir um comportamento cônico (VAN LAAR; AKÇA, 2007).

Figura 2 - Seccionamento de um fuste em sólidos geométricos.



Fonte: adaptado de LOETSH; HALLER (1973).

Esse comportamento ao longo da árvore pode também ser definido como o afilamento natural, ocasionado pela taxa de decréscimo do diâmetro, que

ocorre da base para o topo da árvore na maioria das espécies florestais. O afilamento sofre influência de diversos fatores, como por exemplo: material genético, idade, espaçamento, regime de corte, desbaste e qualidade de sítio (HUSCH; BEERS; KERSHAW JÚNIOR, 2003).

Se fosse possível determinar onde se inicia e termina cada característica geométrica do tronco, bastaria aplicar fórmulas correspondentes a cada segmento de sólido geométrico para obter o volume real da árvore. Porém, esse processo é muito difícil, o que justifica a aplicação de diferentes metodologias de cubagem rigorosa, de modo a segmentar a árvore em várias partes para melhor entender o seu comportamento e obter um volume mais próximo do real (SCOLFORO; THIERSCH, 2004).

A cubagem rigorosa utiliza métodos para estimar o volume das árvores a partir de diâmetros mensurados ao longo do fuste, subdividindo a árvore em seções, cuja somatória resultará no volume da árvore (VAN LAAR; AKÇA, 2007). A cubagem é considerada destrutiva, quando se faz necessário o abate da árvore. Neste caso os diâmetros são coletados de forma direta, ou seja, quando o operador tem contato com a árvore. A cubagem não destrutiva é importante quando não convém derrubar a árvore devido ao seu valor econômico, social ou ambiental. Nesta situação, os diâmetros são obtidos sem contato direto do operador com a árvore, por meio de dendrômetros ópticos (NICOLETTI; CARVALHO; BATISTA, 2012; RODRIGUEZ et al., 2014; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009).

Os métodos de cubagem são divididos em absolutos e relativos. São absolutos quando as medições de diâmetro são obtidas em intervalos determinados ao longo do fuste, sendo que quanto menor os segmentos, maior é a precisão. Os principais métodos empregados na cubagem absoluta são: Smalian, Huber e Newton. Nos métodos relativos, a divisão dos segmentos é dada por meio de porcentagens em relação à altura total da árvore, destacando-se

a utilização dos métodos de Hohenadl e FAO (SCOLFORO; THIERSCH, 2004; PHILIP, 1994).

Miranda, Azevedo e Santos (2013) compararam os métodos de Smalian, Huber e Newton, utilizando toras de árvores da espécie itaúba (*Mezilaurus itauba*), provenientes de um plano de exploração florestal no estado do Mato Grosso. As toras utilizadas estavam presentes em um pátio de madeira e possuíam 2,5; 4 e 5 m de comprimento. Para avaliar os métodos, utilizou-se como testemunha o volume obtido por Smalian em seções muito curtas (20 a 30 cm). Os métodos não diferiram estatisticamente da testemunha, mas foi observado que Smalian que apresentou leve tendência em superestimar o volume.

Machado et al. (2006) realizaram a cubagem em 54 árvores de bracatinga (*Mimosa scabrella*) provenientes de bracatingais localizados no estado do Paraná. Os métodos de Smalian, Huber, Newton e Centróide foram comparados com o volume obtido por meio de um xilômetro, ou seja, com base no descolamento da água ao imergir a madeira em um recipiente com água. Foram avaliados três comprimentos de tora: 1, 2 e 4 m. Todos os métodos superestimaram o volume obtido pelo xilômetro, porém, Huber foi o melhor dentre eles.

Lima et al. (2016) compararam 9 métodos de cubagem (Smalian, Newton, Huber, Seccional Padrão, Pressler, Hohenadl com cinco seções, Hohenadl com dez seções, FAO com cinco seções e Relativo com dezenove seções), com o volume obtido por meio de um xilômetro. Os dados foram coletados de um povoamento de *Pinus taeda* no estado de Santa Catarina. Foram cubadas 32 árvores com nove anos, 34 árvores com 13 anos e 32 árvores com 20 anos. Os métodos analisados superestimaram o volume, mas somente na idade de 13 anos, todos diferiram estatisticamente. O método de Huber apresentou os menores erros nas três idades.

A definição da quantidade e da escolha das árvores a serem cubadas, está intimamente ligada à variabilidade em diâmetro e forma das árvores da população. A cubagem do mesmo número de árvores em todas as classes diamétricas é uma alternativa para melhorar a representatividade da amostra. (CAMPOS; LEITE, 2013; PICARD et al, 2012).

Para quantificar o volume dos povoamentos utilizavam-se tabelas de volume. Nestas, considerava-se que árvores com valores de diâmetros semelhantes, apresentavam a mesma altura e o mesmo fator de forma, resultando, portanto, em um mesmo volume. A utilização desse método era específica para cada povoamento estudado. Havia também, as tabelas formais, menos utilizadas devido à necessidade em se criar uma tabela para cada fator de forma. Era mais prático usar um fator de forma médio por espécie. Devido à alta correlação do fator de forma com duas variáveis da árvore, diâmetro e altura, o desenvolvimento de modelos de estimativas volumétricas passou a ser considerado (SILVA et al., 1993).

Esses modelos são ajustados com os dados de volume de algumas árvores do povoamento, obtidos por meio da cubagem rigorosa. Dentre as diversas alternativas estimadoras utilizadas, estão presentes os modelos de simples e dupla entrada para árvores individuais, e os modelos de afilamento não segmentados e segmentados (LEITE et al., 2011).

Os modelos de simples entrada são explicados em função do diâmetro a 1,3 m do solo (dap), o que é possível quando o diâmetro tem forte relação com a altura. No entanto, na maioria das situações não existe essa forte relação, sendo nesses casos, utilizados os modelos de dupla entrada, em que o volume é explicado em função do diâmetro e da altura das árvores (SCOLFORO, 2005).

Fernandes et al. (2017) testaram 3 modelos de simples entrada (Hohenadl e Krenn, Husch e Brenac) e 4 de dupla entrada (Schumacher e Hall, Spurr, Stoate e Naslund) na estimativa do volume comercial. A base de cubagem

utilizada, contou com 100 árvores de mogno nacional (*Swietenia macrophylla*) e 100 árvores de andiroba (*Carapa guianensis*) de 7 anos de idade, presentes em um sistema silvipastoril no estado do Pará. Os modelos de dupla entrada foram superiores aos de simples entrada. A equação de dupla entrada com melhor ajuste para as duas espécies foi Schumacher e Hall e a de simples entrada foi Husch.

Thaines et al. (2010) utilizaram uma base de cubagem com 141 árvores, compreendendo 15 espécies comerciais, de uma floresta nativa, no estado do Amazonas. Tonini e Borges (2015) utilizaram 122 árvores cubadas, abrangendo 18 espécies, localizadas em uma floresta nativa no estado de Roraima. Em ambos os estudos, foi verificado uma superioridade dos modelos de dupla entrada em relação aos de simples entrada e recomendado a equação de Schumacher e Hall para estimativa do volume.

Caldeira et al. (2016) utilizaram dados de cubagem de 13 árvores de cedrinho (*Erisma uncinatum*) e 20 árvores de cambará (*Qualea paraensis*) localizadas em três municípios no estado do Mato Grosso. Foram testados modelos de simples e dupla entrada para estimar volume comercial e total das árvores. A equação de dupla entrada de Spurr não linearizada foi recomendada para as estimativas de volume comercial e total das duas espécies.

As funções de afilamento são modelos que descrevem matematicamente o perfil de um fuste. É uma operação complexa devido à variação do fuste ao longo da árvore, sendo que as irregularidades são mais acentuadas na base. O uso destes modelos, conciliados com o avanço dos recursos computacionais, apresentam flexibilidade para quantificar múltiplos produtos com dimensões determinadas (FAVALESSA et al., 2012).

Os modelos de afilamento são classificados na literatura por diferentes formas, mas, a modo de simplificação, eles podem ser agrupados em modelos não segmentados e segmentados. Nos modelos não segmentados, uma única

função representa a forma do fuste desde a base até o topo, apresentando facilidade de ajuste e emprego, porém, tendo a desvantagem de associar erros de tendência no fuste devido às variações na forma da árvore. Já os modelos segmentados são mais trabalhosos, e constituem uma variação dos modelos polinomiais, sendo ajustados em duas ou três seções do fuste. Esses modelos impõem restrições para segmentar a árvore em seções, havendo uma interligação entre estas (CAMPOS; LEITE, 2013).

Assis et al. (2002) avaliaram os modelos de afilamento não segmentados de Schöpfer (1966), Goulding e Murray (1976) e Hradetzky (1976) na estimativa de diâmetros e volumes comerciais. Os ajustes dos modelos, contaram com uma base de 58 árvores cubadas de *Pinus taeda*, com idade variando de 16 a 21 anos. Os modelos de Goulding e Murray e Hradetzky apresentaram resultados acurados nas estimativas de diâmetro e volume. O modelo de Schöpfer apresentou baixa acuracidade.

Téo et al. (2013) utilizaram dados de cubagem de 78 árvores de *Pinus elliotti*, com idades de 10, 18 e 27 anos e, Queiroz et al. (2008) utilizaram 121 árvores cubadas da espécie *Mimosa scabrella*, variando de 6 a 19 anos. Nos dois estudos, os dados foram estratificados em classes de idade, e foram testados os modelos de Hradetzky (1976), Kozak et al. (1969) e Schöpfer (1966). Para o *Pinus elliotti*, o modelo de Hradetzky foi o mais acurado na estimativa de diâmetros em todas as idades, e os modelos de Schöpfer e Kozak foram mais acurados na estimativa de volume. Já no estudo com a *Mimosa scabrella*, o modelo recomendado para estimativa do volume, em quase todas as classes de idade, foi o modelo de Hradetzky.

Lassanova et al. (2013) utilizaram dados de cubagem de 449 árvores, de algumas espécies florestais comercialmente exploradas na Amazônia Mato-grossense, sendo elas: *Goupia glabra*, *Qualea albiflora*, *Trattinnickia burseraefolia*, *Erismia uncinatam* e *Mezilaurus itauba*. Foram ajustados os

modelos não segmentados de Schöpfer (1966), Kozak et al. (1969), Hradetzky (1976) e Demaerschalk (1972) adaptado por Moura (1994) e o modelo segmentado de Max e Burkhart (1976) para estimar diâmetros ao longo do fuste. A função de afilamento de Demaerschalk adaptada foi a mais acurada para estimar os diâmetros ao longo do fuste.

Müller et al. (2014) utilizaram dados de cubagem de 27 árvores de *Eucalyptus grandise* de 17 árvores de *Acacia mangium* com 10 anos de idade, estabelecidas em um sistema silvipastoril, no estado de Minas Gerais. Foram utilizados quatro modelos não segmentados (Biging, Demaerschalk, Garay e Kozak) e dois modelos segmentados (Max e Burkhart e Parresol). Os modelos segmentados foram superiores aos não segmentados, tendo sido o modelo de Max e Burkhart recomendado para *Eucalyptus grandise* o modelo de Parresol para *Acacia mangium*.

Souza et al. (2008) utilizaram dados de cubagem de 41 árvores de *Eucalyptus* sp., com idade de 16 anos, coletados no estado da Bahia. Foram avaliados os modelos segmentados de Max e Burkhart (1976), Demaerschalk e Kozak (1977) e Parresol et al. (1987) na estimativa de volumes ao longo do fuste. O modelo de Max e Burkhart foi superior aos demais, seguido pelo modelo de Demaerschalk e Kozak. O modelo de Parresol et al. apresentou tendenciosidade na maioria das posições do fuste.

A melhoria nas estimativas volumétricas usuais é estudada visando aumento na eficiência e produtividade. Segundo Campos e Leite (2013), o uso da inteligência artificial, por meio das redes neurais artificiais, é uma alternativa que difere dos métodos baseados em regressão e, na maioria das vezes, necessita de um menor número de dados coletados. Estudos recentes mostram a eficiência das redes na estimativa de altura de árvores (BINOTI et al., 2013), de volume total (CORDEIRO et al., 2015; SILVA et al., 2009) e de afilamento (SCHIKOWSKI et al., 2015). O equipamento aerotransportado a laser, conhecido

como LIDAR, também vem ganhando espaço no meio florestal, gerando informações importantes para o inventário e planejamento (CARVALHO, 2013).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os dados de cubagem utilizados neste estudo foram obtidos por meio do Criterion RD 1000 e validados com a derrubada de 10 árvores, mostrando-se uma alternativa precisa para a medição de diâmetro em diferentes alturas do fuste de forma indireta. Essa alternativa minimiza o tempo de obtenção dos dados no campo e torna a atividade menos onerosa. Com essas informações, o trabalho desenvolvido buscou quantificar povoamentos de *Khaya ivorensis* A. Chev. em dois momentos importantes: árvores com idade próxima ao primeiro desbaste (7 anos) e árvores com idade próxima ao corte final (14-15 anos). A falta de informações sobre o cultivo dessa espécie no país dificulta o seu planejamento econômico e silvicultural.

No primeiro artigo foram testados modelos volumétricos de simples entrada (Kopezky-Gehrhardt, Meyer e Brenac) e dupla entrada (Schumacher e Hall e Spurr nas suas formas normais e linearizadas) para quantificar os povoamentos de *Khaya ivorensis*. Foram geradas equações para estimar o volume do fuste e o volume total das árvores próximas ao primeiro desbaste e ao corte final.

No segundo artigo obteve-se a informação volumétrica em relação ao afilamento das árvores ao testar quatro modelos polinomiais não segmentados, sendo eles o polinômio de quinto grau de Schöepfer, o polinômio de potências fracionárias de Hradetzky, o polinômio de Gouding e Murray e o polinômio de segundo grau de Kozak. O fator de conicidade (cm/m) também foi verificado para as duas idades, considerando as classes diamétricas.

Diferente do primeiro artigo, no segundo artigo, não foi possível estimar o volume total para o afilamento, pois a copa das árvores apresenta grande variação para ser medida de forma indireta pelo Criterion. À medida que as árvores crescem, maior é o tamanho da copa e, com isso, maior o erro da

estimativa do volume. Dessa forma, seria necessária uma cubagem direta dos galhos, para permitir estimar diâmetros e volumes ao longo do fuste até a altura total.

REFERÊNCIAS

ABPMA. Associação Brasileira dos Produtores de Mogno Africano. Disponível em: <<http://abpma.org.br/apresentacao/>>. Acesso em: 16 mar, 2017.

ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação de modelos polinomiais não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 89-107, 2002.

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2011 ano base 2010**. Brasília, 2011. 130 p.

_____. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília, 2013. 146 p.

BARROSO, G. M. **Sistemáticas das angiospermas do Brasil**. Viçosa: UFV, 1987. 427 p.

BINOTI, M. L. M. da S; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Árvore**, v. 37, n. 4, p. 639-645, 2013.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.

CARVALHO, S. de P. C. **Estimativa volumétrica por modelo misto e tecnologia laser aerotransportado em plantios clonais de *Eucalyptus* sp.** 2013. 104 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.

CASTRO, A. C.; LOURENÇO, J. B. J.; SANTOS, N. F. A.; MONTEIRO, E. M. M.; AVIZ, M. A. B.; GARCIA, A. R. Sistema silvipastoril na Amazônia: ferramenta para elevar o desempenho produtivo de búfalos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 8, p. 2395-2402, 2008.

CITES. Convention on international trade in endangered species of wild fauna and flora. **Appendices I, II and III**, Jan. 2017. Disponível em: <<http://www.cites.org/eng/app/appendices.php>>. Acesso em: 04 jan. 2017.

CORDEIRO, M. A.; PEREIRA, N. N. de J.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. da S.; LEITE, H. G. Estimativa do volume de *Acacia mangium* utilizando técnicas de redes neurais artificiais e máquinas vetor de suporte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 255-261, 2015.

FALESI, I. C.; BAENA, A. R. C. **Mogno-Africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) em sistema silvipastoril com leguminosa e revestimento natural do solo.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 52 p.

FAVALESSA, C. M.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Equações de sortimentos para *Tectona grandis* na região centro-sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 389-399, 2012.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; PAES, J. B.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; BARAÚNA, E. E. P. Caracterização anatômica e físico-mecânica das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 20-25, 2015.

GRIJPM, P. Resistance of Meliaceae against the shoot borer *Hypsipyla* with particular reference to *Toona ciliata* M.J. Roem. var. *australis* (F. v. Muell.) CDC. In: BURLEY, J.; STYLES, B. T. (Eds.). **Tropical Trees: Variation, Breeding and Conservation.** Londres: Linnaean Society, 1976. p. 69-78.

HILJE, L.; CORNELIUS, J. ¿Es in manejable *Hypsipyla grandella* como plaga forestal? **Manejo Integrado de Plagas**, Costa Rica, n. 61, p. 1-4, 2001.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JÚNIOR, J. A. **Forest mensuration.** 3 ed. New York: J. Willey, 2003. 443 p.

IBÁ. Indústrias Brasileiras de Árvores. **Relatório estatístico da IBÁ 2016 ano base 2015**, 2016. 100 p.

ITTO. International Tropical Timber Organization. **Annual Report 2015.** Yokohama: Japan, 2016. 60 p.

_____. International Tropical Timber Organization. **Tropical Timber Market Report.** v. 21, n.4, p.1-15, mar, 2017. 24 p.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais respectivas espécies arbóreas, possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado.** Eschborn: GTZ, 1990. 343 p.

LASSANOVA, R. L.; UBIALLI, J. A.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; FAVALESSA, C. M. C.; DRESCHER, R. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico Mato-grossense. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 2, p. 215-224, abr./jun. 2013.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Amostragem de árvores de *Eucalyptus* na cubagem rigorosa para estimativa de modelos volumétricos. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 91-103, 2015.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA-NETO, R. R. de; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M. de; BINOTI, M. L. M. da S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p.53-59, mar. 2011.

LEMMENS, R. H. M. J. 2008. *Khaya ivorensis* A. Chev. In: LOUPPE, D.; OTENG-AMOAKO, A. A.; BRINK, M. (Eds). **PROTA** (Recursos de l'Afrique vegetales tropicale), Wageningen, v. 7, n. 1, 2008.

LOETSCH, F.; HALLER, K. E. **Forest Inventory**. Munchen: BLV, v. 1, 1973. 436 p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2009. 316 p.

MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A. Seleção de equações volumétricas para a predição do volume total de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região do norte do estado de Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n.14, p. 1372 -1386, jun. 2012.

MIRANDA, D. L. C.; AZEVEDO, F. F.; SANTOS, J. P. Determinação do volume de toras da espécie *Mezilaurus itauba* (Meissn.) Taub. **Scientia Plena**, Aracaju, v. 9, n. 8, p. 1-7, 2013.

MÜLLER, M. D.; SALLES, T. T.; PACIULLO, D. S. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO; C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. **Floresta**, v. 44, n. 3, p. 473-484, 2014.

NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; BATISTA, J. L. F. Revisão Bibliográfica sobre Métodos Não-destrutivos de Cubagem de Árvores em Pé visando à Determinação da Biomassa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, v. 20, p. 102-116, ago. 2012.

OPUNI-FRIMPONG, E.; TEKPETEY, S. L.; OWUSU, S. A.; OBIRI, B. D.; APPIAH-KUBI, E.; OPOKU, S.; NYARKO-DUAH, N. Y.; ESSIEN, C.; OPOKU, E. M.; STORER, A. J. **Managing mahogany plantations in tropics. Field guide for farmers**. Kumasi, Gana: CSIRFORIG, 2016. 95 p.

PHILIP, M. S. **Measuring trees and forests**. Wallingford: CAB international, 1994. 310 p.

PINHEIRO, L. P.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos africanos (*Khaya spp.*)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura - SBAG, 2011. 102 p.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, abr./jun. 2008.

RIBEIRO, A. **African mahogany plantations: modeling growth and yield in Brazil**. 2017. 165 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.

RODRIGUEZ, F.; LIZARRALD, I.; FERNANDEZ-LANDA, A.; CONDÉS, A. Non-destructive measurement techniques for taper equation development: a study case in the Spanish Northern Iberian Range. **European Journal of Forest Research**, v.133, n.2, p.213-223, 2014.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Estudo da forma do fuste utilizando redes neurais artificiais e funções de afilamento. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 119-127, 2015.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: Parte I: Modelos de regressão linear e não-linear. Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento e peso da matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

SCOLFORO, J. R. S., THIERSCH, C. R. **Biometria Florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. 285 p.

SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Silvicultura e Manejo das Espécies Madeireiras. In: COELHO, L.; NASCIMENTO, A. R. T.; LEMES, E. M. (Org.). **Espécies nobres do Cerrado I** – Silvicultura e Perspectivas de Produção. 1 ed. Uberlândia: Composer, 2014. p. 11- 24.

SILVA, L. F.; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. P. Equações hipsométricas volumétricas e de crescimento para *Khayaivorensis* plantada em Pirapora. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 362-368, 2016.

SILVA, M. L. M. da; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste de modelo de Schumacher e Hall e a aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. de P.; SOUZA, A. L. de. **Dendrometria e inventário florestal**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. 272 p.

SOARES, S. D. **Diversidade genética em população de melhoramento de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.)**. 2014. 69 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Biologia Molecular) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2014.

SORANSO, D. R.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. da S.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA, J. G. M. da; ARANTES; M. D. C. Variabilidade física e anatômica da madeira de *Khaya ivorensis* A. Chev. em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 519-526, 2016.

SOUZA, C. A. M. de; SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L. de. Avaliação de modelos de afilamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptu* ssp. **Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 453-463, 2008.

TÉO, S. J.; MARCON, A.; EHLERS, T.; BIANCHI, J. C.; PELOSO, A.; NAVA, P. R.; COSTA, R. H. Modelos de afilamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 439-452, 2013.

THAINES, F.; BRAZ, E. M.; MATTOS, P. P. de; THAINES, A. A. R.
Equações para estimativa de volume de madeira para a região da bacia do Rio
Ituxi, Lábrea, AM. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 283-289,
2010.

TREMACOLDI, C. R.; LUNZ, A. M.; COELHO, I. L.; BOARI, A. J. Cancro
em mogno africano no estado do Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33,
n.74, p. 221-225, jun. 2013.

VAN LAAR, A.; AKÇA, A. (Eds.). **Forest Mensuration**. Springer Netherland,
v. 13, 2007. 383 p.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1 Volume equations for *Khaya ivorensis* A. Chev.
Plantations in Brazil**

Abstract

African mahogany (*Khaya ivorensis*) plantations are in expansion in Brazil and the world, which justifies the need for studies related to its growth and yield. This paper aims to evaluate the performance of double and single entries models in estimating commercial and total volume in African mahogany plantations before the first thinning (7 years) and final cut (14-15 years). Volume data was obtained from 100 and 46 trees in Minas Gerais and Pará states, respectively, by using an electronic dendrometer (Criterion RD 1000). Observed volumes were calculated by Smalian's formula. To validate the use of the optical dendrometer, 10 trees were felled and had their volume measured, and compared with the volumes measured indirectly. The results showed that observed and estimated volumes were statistically equal, and double-entry models were more precise than single-entry models. The Schumacher and Hall was the best model to estimate commercial volume for first thinning and final cut in Minas Gerais stands. Spurr logarithmized model was the best model to estimate the total volume for first thinning age and Spurr model for final cut in Pará stands. All chosen models and can be used to quantify commercial and total volumes of *Khaya ivorensis* grown under similar conditions.

Key-words: Non-destructive measurements, African mahogany, thinning, forest mensuration

1. INTRODUCTION

In order to supply the national wood market, there is a need for expanding Brazilian reforestation areas (Pinheiro et al. 2013). Brazilian forest area was 7.8 million hectares in 2015. From this total, 72.18% was composed by eucalyptus, 20.26% by pinus and 7.56% by non-conventional species plantations such as acacia, teak, araucaria, populus, rubber tree and paricá. In 2010, the total area with non-conventional species was 0.46 million hectare, increasing 0.13 million hectare in a 5-year interval (ABRAF 2011, IBÁ 2016).

Brazilian mahogany (*Swietenia macrophylla* King) commercial plantations are impractical in Brazil because of its susceptibility to the attack of *Hypsipyla grandella* Zeller shoot-borer when grown in pure stands (Ribeiro et al. 2016). The caterpillar attacks the terminal shoots of seedlings and young trees, which causes loss of the apical dominance, making difficult the formation of a straight stem for commercial use (Grijpma 1976, Hilje & Cornelius 2001, Tremacoldi et al. 2013). To avoid damage from *Hypsipyla grandella* attack, the initial growth (most vulnerable period) can be intensified by correct soil preparation, provision of shade, and pruning of sick trees. Other procedure is to create conditions to intensify natural control, such as low density stands and mixing different species (Yared & Carpanezzi 1981). Some Meliaceae species are resistant to *Hypsipyla grandella* attacks, such as *Khaya ivorensis* (African mahogany), *Toona ciliata* M. J. Roem. (Australian cedar) and *Azadirachta indica* A. Juss. (nim) (Lunz et al. 2009).

Khaya ivorensis is one of the most planted mahogany species in Brazil, due to its high wood quality, similar to *Swietenia macrophylla* (Pinheiro et al. 2011). It possesses red-brown wood, with high commercial value and endurance. Besides, it presents relatively fast growth (Castro et al. 2008, Scolforo & FerrazFilho 2014). Since large scale plantations of this species are recent in Brazil, few studies describe growth and yield parameters for forest management purposes. Recent studies evaluate the performance of plantations and wood quality in different Brazilian states (Carvalho et al. 2010, Corcioli et al. 2016, Andrade et al. 2016), but information is still scarce for forest management prescriptions, such as timber yield and rotation age.

Although African mahogany plantation area has increased in Brazil, information about management practices to ensure success of the plantations is still needed. Until the present, it is unknown the best thinning prescriptions for the species (time and intensity) to best control stem shape and growth competition. Besides, *Khaya ivorensis* wood value stress the need for studies about correct quantification of commercial and total tree volume, which is the basis for proper planning and management of the forest.

This study aims to evaluate the fit of single-entry and double-entry volume models for plantations of *Khaya ivorensis* in Minas Gerais and Pará state, Brazil, with ages close to the first thinning (7 years old) and final cut (15 years old) to predict commercial and total volume. To our knowledge, no volume equations are available for this species in similar plantation conditions (mainly wide spacing and close to rotation age).

2. DEVELOPMENT

MATERIAL AND METHODS

Study area

Data is from two *Khaya ivorensis* stands, one located in Piumhi, Minas Gerais state (20.42° S and 46.02° W) and another in Santo Antônio do Tauá, Pará state (1.18° S and 48.13° W). Piumhi's Köppen climatic classification is Cwa, classified as a humid subtropical climate (Sá Júnior et al. 2012), and Santo Antônio do Tauá is located in the Af region, classified as a tropical rainforest climate (Alvares et al. 2014). The initial planting spacings are 6 x 5.5 and 12 x 12 meters, for Piumhi and Santo Antônio do Tauá, respectively.

Data set

Volume determination was made indirectly, without tree felling. Criterion RD coupled with the laser hypsometer TruPulse 200 were used to measure diameters at different heights along the tree stem. In the first 2 meters of the stem the diameters were measured by 2 ways: with the optical dendrometer and using a caliper, in order to minimize errors from indirect measurement.

Because of the stem shape variation, diameters were measured in shorter intervals up to 2 meters height (0.1; 0.7 and 1.3 meters). Above that, diameter measurements were made in 1-meter intervals, up to the commercial height (hs), which corresponds to the height of insertion of the first main branch (Figure 1). Stem measuring positions and diameters were measured using measuring tape and caliper, respectively.

The Smalian method was used to calculate the volume of each log sections (Rodriguez et al. 2014, Figure 1). Commercial volume (v) was considered as the sum of each log section plus stump volume. Total volume (v_b) was considered as the commercial volume plus the volume of the top of the tree.

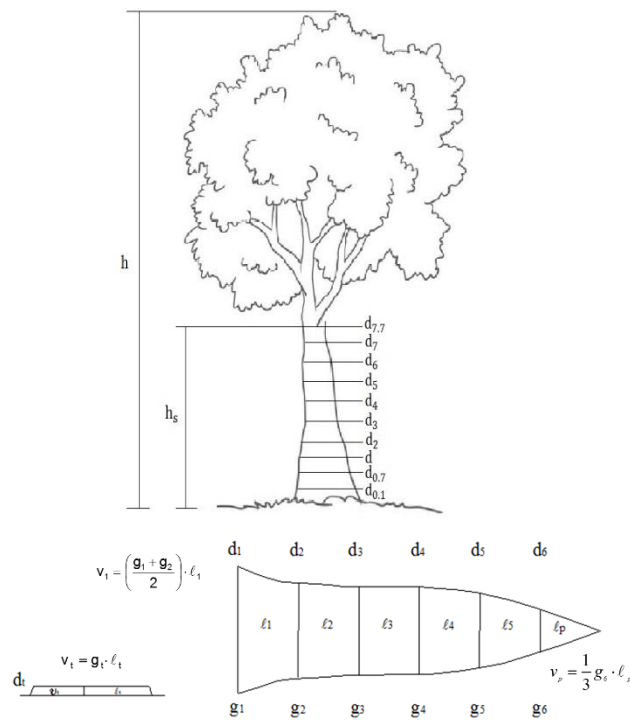


Figure 1 – Scaling illustration showing diameter (d) determination at different heights (commercial height in this case was 7.7 m) and the Smalian method for volume calculation.

Values of diameter at breast height (d) and total height (h) were obtained from forest inventories performed since 2010 in Minas Gerais

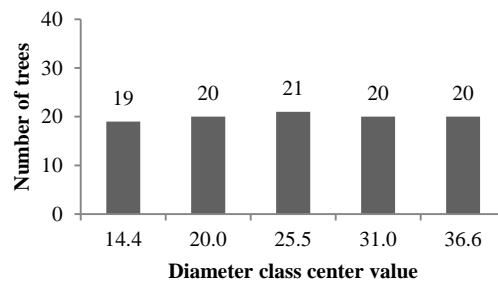
and since 2014 in Pará. Both variables presented normal distribution and were stratified into five classes with amplitude equal to the mean value plus and minus one standard deviation. Campos & Leite (2013) and Picard et al. (2012) pointed out that the variation of volume values is directly related to diameter variation, often observed empirically, based on rules established by experience. In order to best represent tree volume variability, tree volume was determined in all diameter classes.

To represent trees close to the first thinning age (Minas Gerais state), 100 7-year-old trees with had their volume determined in 2016. To represent trees at ages close to final cut (Pará state) volume measurements were performed twice, in 2014 and in 2015, on 14 and 15-year-old trees, respectively, totaling 46 trees. According to Silva et al. (2016a) the final rotation age for African mahogany in Brazil is estimated to occur between 15 and 20 years, considering one or two thinning operations. The plantations from Minas Gerais and Pará states were chosen because they had ages that we believe are close to first thinning and final cut, since determining volume at these points is important for planning harvest and commercialization operations. Figure 2 and Table 1 show information about the scaled trees.

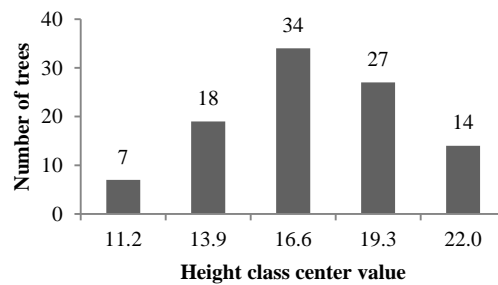
Table 1 - Summary statistics for the measured *Khaya ivorensis* trees, where Min = minimum, Med = mean, and Max = maximum values.

	First thinning (n=100)			Final cut (n=46)		
	Min	Med	Max	Min	Med	Max
Diameter (cm)	11.6	25.1	39.0	26.4	52.1	77.8
Total height (m)	9.8	17.1	23.0	15.5	25.5	33.7
Commercial height (m)	2.7	7.7	14.3	3.3	8.2	14.1
Total volume (m ³)	0.07	0.44	0.96	0.55	2.22	5.16
Commercial volume (m ³)	0.05	0.34	0.79	0.31	1.31	4.02

A



B



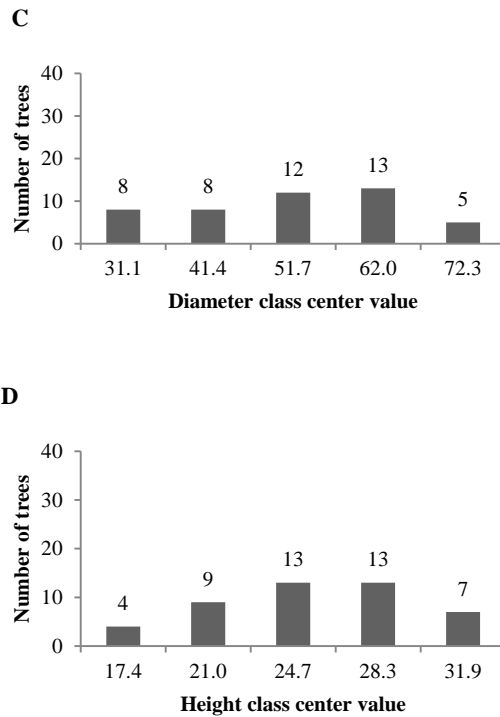


Figure 2 – Number of trees selected for volume determination per diameter at breast height and total height classes for *Khaya ivorensis* stands at the first thinning (A and B) and final cut (C and D) ages.

Accuracy of volume measurements

The accuracy of indirect volume determination (i.e. using the optical dendrometer) was assessed by felling 10 trees (2 in each diameter class) from the 100 trees which had its volume measured in the first thinning age (Minas Gerais).

To compare volumes obtained by the two methods (direct and indirect measurements) a statistical approach that evaluates the discrepancy between two values (X and Y) using a linear regression model was applied. According to the method, values are correspondent if $X=Y$, yielding a model with intercept equal to zero ($\beta_0=0$) and angular coefficient equal to one ($\beta_1=1$). The horizontal distance from each point to the line is the measurement error. X and Y were considered as explanatory and response variables at the same time. Thus, equivalence between data is rejected if the null hypothesis is rejected ($H_0: \beta_1=1$). The p-value of the test will be the smallest of the two obtained p-values (Borba & Nakano 2016).

Selection of the tested volume models

The models were fitted using *nls* and *lm* functions from R statistical environment (R Core Team 2016) for nonlinear and linear models, respectively. Single (equations 1 to 3) and double-entry (equations 4 to 7) volume equations were selected from: Santos et al. (2012); Melo et al. (2013), and Miranda et al. (2014). Parameter significance was verified by the t-test considering a 5% significance level.

$$\text{Kopezky-Gehrhardt (apud Assmann 1970): } v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$\text{Meyer (apud van Laar \& Akça 2007): } \text{Ln}(v_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(d_i) + \text{Ln}(\varepsilon_i) \quad (2)$$

$$\text{Brenac (apud Possu et al. 2016): } \text{Ln}(v_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(d_i) + \beta_2 \left(\frac{1}{d_i}\right) + \text{Ln}(\varepsilon_i) \quad (3)$$

$$\text{Schumacher \& Hall (1933): } v_i = \beta_0 d_i^{\beta_1} h_i^{\beta_2} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\text{Schumacher \& Hall logarithmized: } \text{Ln}(v_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(d_i) + \beta_2 \text{Ln}(h_i) + \text{Ln}(\varepsilon_i) \quad (5)$$

$$\text{Spurr (1952): } v_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 h_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$\text{Spurr logarithmized: } \text{Ln}(v_i) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(d_i^2 h_i) + \text{Ln}(\varepsilon_i) \quad (7)$$

Where: v_i = estimated commercial or total volume (m^3); d_i = diameter at breast height (cm); h_i = commercial (h) or total height (h_s) in m; β_i = parameters; Ln = natural logarithm; and ε_i = error.

Models were compared by the following statistics: root mean squared error (RMSE, equation 8) to measure precision in m^3 , mean

absolute bias (MAB, equation 9) to measure bias in m^3 and model efficiency (EF, equation 10), with values ranging from 0 to 1. These statistics are commonly used to assess model quality in studies dealing with volume modeling (Pelissari et al. 2011, Cecilia et al. 2014, Müller et al. 2014, Silva et al. 2016b).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v - \hat{v})^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$\text{MAB} = \sqrt{\frac{\sum |v - \hat{v}|^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{EF} = 1 - \frac{\sum (v - \hat{v})^2}{\sum (v - \bar{v})^2} \quad (10)$$

Where: n = number of observations; v = commercial or total volume (m^3); \bar{v} = mean commercial or total volumes (m^3); and \hat{v} = estimated commercial or total volume (m^3).

We ranked each candidate model (models 1 to 7) by the goodness of fit statistics (formulas 8 to 10), and then generated a unique value for each model by summing the rank obtained in each of the three statistics. The model with the smallest sum was considered the best, as long as no

problem was detected in the residual distribution. This was done independently for total and commercial volume. In case of equal rank sum values, the best model was considered the one with the smallest standard deviation and best residual distribution.

The best selected models were submitted to a weighted regression to correct possible heteroscedasticity of the residuals, since the increase in diameters usually results in increasing the error variance (Picard et al. 2012). Thus different weighting techniques were used to correct heteroscedasticity in the models (Tomé et al. 2007, Mascaro et al. 2011). In the method used in this study, models were multiplied by a factor (w_i , equation 11) to describe diameter variability through exponent c (Picard et al. 2012). To obtain the c value, diameter data were split into diameter classes and the volume standard deviation was calculated. This allowed the linear regression between the volume standard deviation log (dependent variable) and the central value of each diameter class (independent variable). The slope of the regression (β_1) corresponds to c .

$$w_i = \frac{1}{d^{2c}} \quad (11)$$

Where: w_i = weight; c = slope of the regression; d = diameter at breast

height (cm).

Assessment of prediction ability of the volume models

In order to verify how *Khaya ivorensis* tree volume behaves at different sites and under varying management practices, the best single and double entry commercial and total volume models found in this study were compared with other models from literature. The double-entry (Akindele 2005) and single-entry (Henry et al. 2011) models for commercial volume were used. In both cases, data was obtained from natural forests from Africa: Akindele's study area was in Nigeria and Henry's was in Gabon. This information was used to assess how trees growing under plantation conditions differ from trees grown under natural conditions.

We also compared the models fitted in this study to volume models from other *K. ivorensis* plantations. Silva et al. (2016b) studied a 2.5 to 4.9-year-old African mahogany plantation in Pirapora, Minas Gerais state, Brazil, planted in 3 x 4 m spacing. Both (Heryati 1) and (Heryati 2) are from Heryati et al. (2011), from a 6-year-old stand planted in 3 x 4 m spacing in Segamat, Johor, Malaysia.

Commercial volume:

$$\hat{v} = -0.0391 + 0.000107d^{1.6115}h^{1.2689}$$

(Akindele)

$$\hat{v} = 10.82d_{(m)}^{1.89}$$

(Henry)

Total volume:

$$\ln(\hat{v}) = -9.79216 + 2.022933\ln(d) + 0.813326\ln(h)$$

(Silva)

$$\hat{v} = 0.00021(d)^{2.26234}$$

(Heryati1)

$$\hat{v} = 0.00014(d^2h)^{0.84469}$$

(Heryati2)

RESULTS

Indirect volume measurement validation

The results of the discordance between the two forms of volume measurements (Criterion versus felled tree) was not significant (p-value = 0.7016). Figure 3 illustrates the volume values obtained directly and indirectly, showing that values are close to each other.

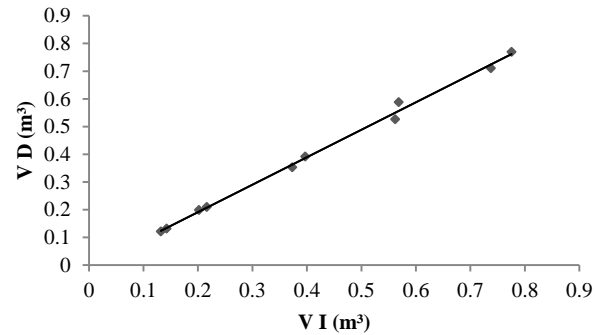


Figure 3 – Dispersion of volume values(m³) from direct (V D) and indirect measurements (V I).

Single and double-entry model fitting

Table 2 shows parameter values from the fit of the seven models to estimate commercial and total volumes for trees at first thinning and final cut ages. Double-entry models had significant parameters in most of the cases. The single-entry models of Kopezky-Gehrhardt (1) and Brenac (3) presented some non-significant parameters, considering 95% of confidence level. Residual distribution plots show only for models with best and worst fitting (Figure 4) presented no tendencies for most of the fitted models.

Table 2 - Fitted coefficients for volume models for *Khaya ivorensis* trees at the first thinning and final cut ages.

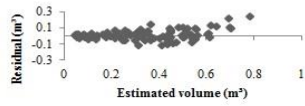
Age	Model	Coefficients	Commercial	Total
			volume	volume
			Estimated value	
First thinning	(1)	β_0	0.03959*	0.01103 ^{ns}
		β_1	0.00043*	0.00062*
	(2)	β_0	-7.64921*	-7.69610*
		β_1	2.00810*	2.10200*
	(3)	β_0	-0.98470 ^{ns}	-4.47490*
		β_1	0.38821 ^{ns}	1.31900*
		β_2	-34.37970*	-16.6172*
	(4)	β_0	0.00032*	0.00018*
		β_1	1.77300*	1.59400*
		β_2	0.57231*	0.90610*
	(5)	β_0	-8.43129*	-8.79555*
		β_1	1.89406*	1.78581*
		β_2	0.57470*	0.74577*
	(6)	β_0	0.04361*	0.06359*
β_1		0.00006*	0.00003*	
(7)	β_0	-8.47268*	-8.95236*	
	β_1	0.86313*	0.86475*	
Final cut	(1)	β_0	0.09395 ^{ns}	-0.11875 ^{ns}
		β_1	0.00049*	0.00082*

(2)	β_0	-7.88710*	-7.58550*
	β_1	2.03730*	2.10219*
(3)	β_0	-16.53600*	11.94910*
	β_1	3.82000*	3.00150*
	β_2	80.56700 ^{ns}	40.6467 ^{ns}
(4)	β_0	0.00004 ^{ns}	0.00015*
	β_1	2.28600*	1.69400*
	β_2	0.61360*	0.88300*
(5)	β_0	-8.9092*	-8.89308*
	β_1	1.9952*	1.62042*
	β_2	0.82117*	0.99075*
(6)	β_0	-0.02364 ^{ns}	0.29150*
	β_1	0.00006*	0.00003*
(7)	β_0	-8.71260*	-8.75890*
	β_1	0.88960*	0.85073*

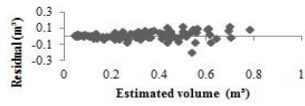
Where * indicates that the model coefficients are significant considering a 1% significance level and ns indicates that the model coefficients are not significant.

First thinning**Worst fit**

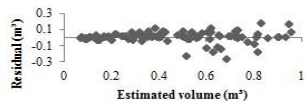
Commercial volume (3)



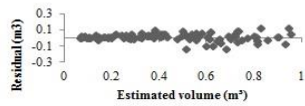
Commercial volume (7)



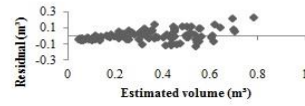
Total volume (2)



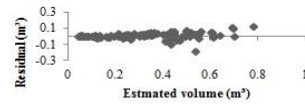
Total volume (5)

**Best fit**

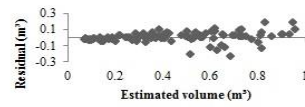
Commercial volume (1)



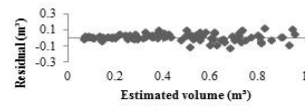
Commercial volume (4)



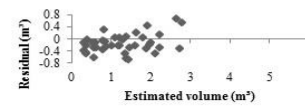
Total volume (1)



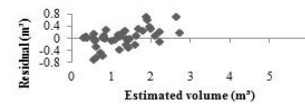
Total volume (7)

**Final cut****Worst fit**

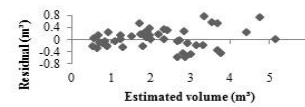
Commercial volume (1)



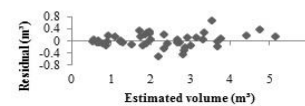
Commercial volume (7)



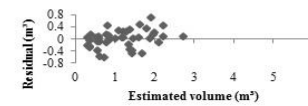
Total volume (3)



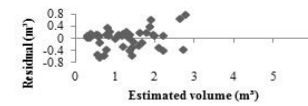
Total volume (5)

**Best fit**

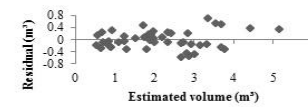
Commercial volume (2)



Commercial volume (4)



Total volume (1)



Total volume (6)

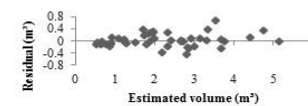


Figure 4 - Residual plots of the best and worst models for estimating commercial and total volumes for *Khaya ivorensis* at first thinning and final cut ages (number in brackets are the model number).

The sum of the position ranking (obtained from equations 8, 9 and 10) is presented in Table 3. Double-entry models were better at describing volume variation than single single-entry models. The Schumacher and

Hall model (4) was better for commercial volume prediction at either the first thinning or final cut ages, and the Spurr model (6 and 7) was the best to estimate total volume at either the first thinning or final cut ages (Table 3).

Table 3 - Goodness-of-fit statistics and overall ranking for commercial and total volume models for *Khaya ivorensis* at first thinning and final cut ages. The best models are highlighted in bold. Number in parenthesis correspond to the in position rank.

Age	Volume type	Equation	RMSE (m ³)	MAB (m ³)	EF	Rank sum
First thinning	Commercial	(1)	0.0681 (6)	0.0000 (1)	0.8605 (6)	13
		(2)	0.0718 (7)	0.0007 (3)	0.8448 (7)	17
		(3)	0.0628 (5)	0.0044 (6)	0.8827 (5)	16
		(4)	0.0379 (1)	0.0015 (4)	0.9571 (1)	6
		(5)	0.0392 (2)	0.0004 (2)	0.9543 (2)	6
		(6)	0.0503 (4)	0.0000 (1)	0.9240 (4)	9
		(7)	0.0477 (3)	0.0030 (5)	0.9315 (3)	11
	Total	(1)	0.0630 (6)	0.0000 (1)	0.9372 (6)	13
		(2)	0.0664 (7)	0.0003 (3)	0.9301 (7)	17
		(3)	0.0605 (5)	0.0027 (6)	0.9426 (5)	16
		(4)	0.0415 (1)	0.0018 (5)	0.9731 (1)	7
		(5)	0.0448 (3)	0.0004 (4)	0.9685 (3)	10

	(6)	0.0464 (4)	0.0000 (1)	0.9659 (4)	9
	(7)	0.0433 (2)	0.0002 (2)	0.9704 (2)	6
	(1)	0.4648 (7)	0.1879 (7)	0.6695 (7)	21
	(2)	0.4333 (6)	0.0638 (6)	0.7128 (6)	18
	(3)	0.4318 (5)	0.0480 (3)	0.7214 (4)	12
	(4)	0.3812 (1)	0.0077 (2)	0.7828 (1)	4
	(5)	0.3975 (2)	0.0514 (4)	0.7639 (2)	8
	(6)	0.4055 (3)	0.0000 (1)	0.7486 (3)	7
	(7)	0.4276 (4)	0.0623 (5)	0.7203 (5)	14
Final Cut	(1)	0.3196 (5)	0.0000 (1)	0.9279 (5)	11
	(2)	0.3210 (6)	0.0274 (7)	0.9273 (6)	19
	(3)	0.3291 (7)	0.0152 (6)	0.9253 (7)	20
	(4)	0.2164 (3)	0.0006 (3)	0.9677 (1)	7
	(5)	0.2187 (4)	0.0074 (4)	0.9670 (4)	12
	(6)	0.2152 (2)	0.0002 (2)	0.9673 (3)	7
	(7)	0.2143 (1)	0.0081 (5)	0.9676 (2)	8

Table 4 – Final equations to estimate commercial and total volume for *Khaya ivorensis* plantations at first thinning and final cut ages.

Age	Volume type	Selected equation	Equation
First thinning	Commercial	$\hat{v} = 0.01014 + 0.0004759d^2$	(1)
		$\hat{v} = 0.0002428d^{1.849}h_s^{0.5952}$	(4)
	Total	$\hat{v} = -0.007635 + 0.0006507d^2$	(1)
		$\text{Ln}(\hat{v}) = -9.09353 + 0.88027\text{Ln}(d^2h)$	(7)
Final cut	Commercial	$\text{Ln}(\hat{v}) = -6.4857 + 1.6628\text{Ln}(d)$	(2)
		$\hat{v} = 0.0001452d^{1.962}h_s^{0.6165}$	(4)
	Total	$\hat{v} = -0.01487 + 0.0007744d^2$	(1)
		$\hat{v} = 0.2276 + 0.00002589d^2h$	(6)

Where: \hat{v} = estimated volume in m³, d = diameter at 1,3 height (cm), h = total height, h_s = commercial height.

Although equation 3 presented the smallest rank sum, it was not selected to estimate commercial volume at final cut because parameter β_2 was not significant (Table 2). The best fitting models were then submitted to a weighted regression when necessary to correct for possible heteroscedasticity. The data was split into 5 diameter classes, adopting $c = 1$ for data from the first thinning and $c = 2$ to final cut data and fitting a new regression using the weights provide by formula (11). The final equations are presented in Table 4.

DISCUSSION

Single and double-entry volume models were assessed and resulted in accurate equations to estimate commercial and total volume for *Khaya ivorensis* trees. The data used do not corresponded to exact ages of first thinning and final cut, since till the present no commercial thinning or final cut was done in any Brazilian stands. We believe the chosen ages are close enough to the planned ages for these silvicultural interventions to yield relevant information, especially considering the lack of information for this species. In addition, the information provided in this study is specific for Brazilian silviculture, which uses very wide spacing in the management of the plantations and present good climate and edaphic conditions. The application of our equations to plantations using more conventional spacing (e.g. 3x3 to 4x4 m spacing, as mentioned by Yahya et al. 1999 and Yeboah et al. 2014) must be done with care, since spacing can influence stem form (Nogueira et al. 2008; Ferreira et al. 2014). However, the information generated in this paper contributes to knowledge and establishment of *Khaya ivorensis*

silviculture and are especially important considering the lack of information on the species.

Laser technology of the dendrometers used in this study gives support for indirect measurements (Nicoletti et al. 2012). Criterion RD 1000 have been used satisfactorily in recent studies (Yoon et al. 2013, Cushman et al. 2014, Uddin et al. 2015). No meaningful difference between tree volume obtained from indirect and direct measurements was found in our research. Different studies have also reached the same conclusion, considering the use of the dendrometer for measurement of diameters (Nicoletti et al. 2015) or for the models used to estimate volume (Rodriguez et al. 2014). Thus, indirect volume measurement is cheaper and desirable (He et al. 2016), especially for plantations with high value trees managed at small densities, such as the African mahogany plantations of this study.

Double-entry equations were better to estimate volume variation than single entry equations, which was expected since two variables (diameter and height) have a greater capacity to detect the variation of the tree's stem form (Thiersch et al. 2006). The single-entry equations tested yielded satisfactory volume estimates, and have as advantage the

optimization of data collection, since they rely on just one easily obtainable variable (d). However, its use is supported only in the cases that diameter have a high correlation with total height (Campos &Leite 2013). Hence, the single-entry equations generated in this study can be used with other plantations with ages close to the first thinning and final cut as long as they present height distribution similar to the ones of this study (mean of 17.1 m and 25.5 m, respectively, Table 1).

The volume equations for *K. ivorensis* in the studies estimating commercial volume (Akindele 2005, Henry et al. 2011) and total volume (Silva et al. 2016b, Heryati et al. 2011) were used to compare the behavior of the models from this study in estimating commercial and total volume to trees close to first thinning and final cut (Figure 5).

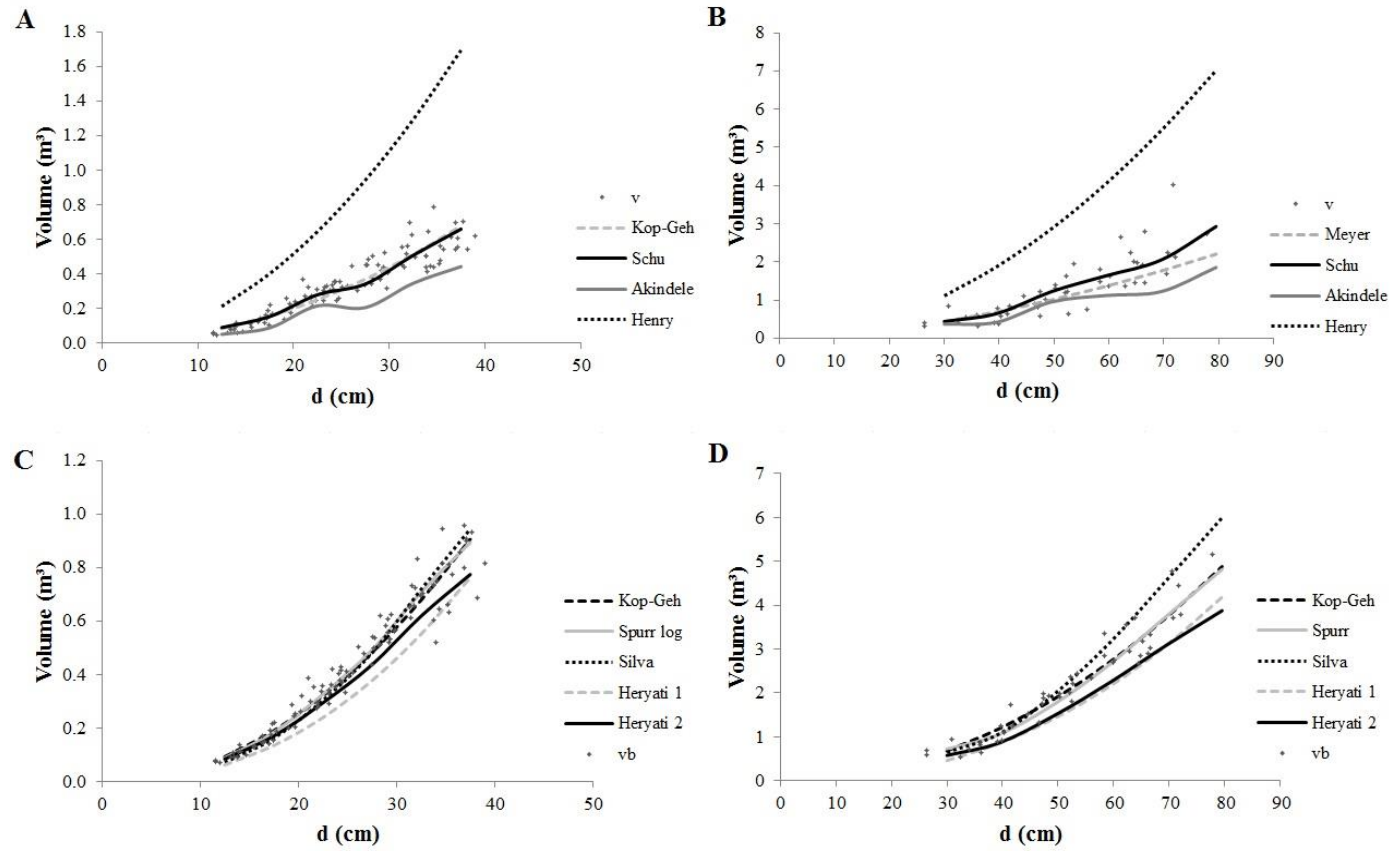


Figure 5 – Comparing selected equations to estimate commercial volume (v) of trees at ages close to the first thinning (A) and final cut (B) and total volume (v_b) of trees close to first thinning (C) and final cut (D), where: Kop-Geh = Kopezky-Gehrhardt model; Schu = Schumacher and Hall model; Meyer = Meyer's model; Spurr = Spurr model; Spurr log = Spurr logarithmized model. Henry, Akindele, Silva, Heriaty 1 and Heryati 2 were defined previously.

Considering the estimation of commercial volume, we found that the equation proposed by Henry significantly over estimated the observed commercial volume from the trees in our study, both for younger and older plantations (Figure 5 A and B). This large difference can be attributed to the fact that Henry's equation was developed for trees growing in native tropical rain forests in Gabon. Thus, given the different growth environment of trees grown under competition that is expected in tropical rain forests, it is expected that these trees will have much larger commercial heights than the trees measured in our study (around 8m, Table 1). For instance, Henry's equation gives an estimate of 1.1 m^3 for a tree with diameter of 30 cm. If we consider that this tree is a perfect cylinder, it would have to have a stem height of about 16 m. This illustrates the large errors that can arise from applying volume equations from the literature, especially single-entry equations.

On the other hand, Akindele's equation underestimated the commercial volume of the trees found in this study, although at a much smaller scale than Henry's overestimation (Figure 5 A and B). This equation better represent our data due to the fact that it is a double-entry equation. As for the equation's low estimated values compared to Henry's

equation, we believe this is because the data was collected from the South of Nigeria, which is a drier site than Gabon, thus yielding trees with smaller commercial heights.

The equations used to estimate the total volume (Figure 5 C and D) presented results more agreeable to each other when compared to the ones used to estimate commercial volume. This is expected since the trees used to build these models are from plantations. Silva's double-entry model yielded tree volume estimates that adequately portrayed the data found in our study for trees at the first thinning (Figure 5 C). This was probably because the equation was made using data similar to ours, from a plantation in Minas Gerais, with age between 30 and 59 months years old and 4 x 3 m spacing. However, at the final cut (Figure 5 D) the fit was not adequate, with large overestimation of volumes, especially for larger trees. This behavior supports the idea that descriptive equations have to be used on database similar to the fitting data, since parameters are correlated to stand attributes.

The single-entry model Heryati 1 and the double-entry model Heryati 2 underestimated volume at both first thinning and final cut (Figure 5 C and D). The fitting data had smaller spacing (4 x 3 m), which

could influence estimations, since smaller spacing yields smaller trees with slower growth (Rocha et al. 2016).

From an economic point of view, it is interesting to know the wood quality of *Khaya ivorensis* (França et al. 2015) and how much wood corresponds to the more valuable commercial timber. Figure 6 compares total volume and commercial volume of trees which ages are close to the first thinning and final cut using the equations presented in Table 4.

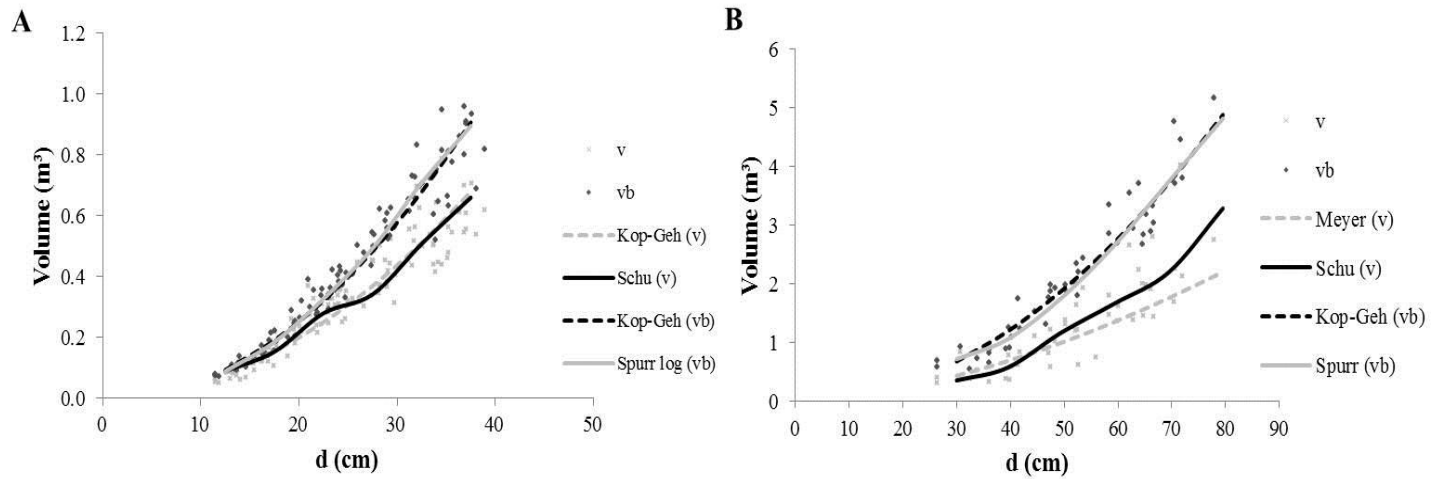


Figure 6 – Comparing selected equations to estimate commercial (v) and total volume (v_b) for trees at first thinning (A) and final cut (B) ages.

Significant difference between commercial and total volume were found in *Khaya ivorensis* trees (Figure 6). Considering a mean sized tree at first thinning ($d=25$ cm), the difference between commercial and total volumes is 0.0749 m^3 (Figure 6 A). Considering a large tree ($d = 52$ cm) with age close to final cut (Figure 6 B) the difference is even more significant, 1.5940 m^3 . Thus, information about commercial volume is very important for an adequate portrayal of the economic viability of the plantation, since it can be valued at a much higher price than smaller diameter wood coming from the tree top and branches.

3. CONCLUSION

Indirect measurements provided volumes statistically equal to volumes generated by direct measurements, assuring precision for indirect measurements.

The fitted models (Table 4) presented good volume estimates. The Schumacher and Hall model is recommended for estimating commercial volume for trees at ages close to first thinning and final cut. Spurr logarithmized model was the best to estimate total volume of trees

close to first thinning, and Spurr model was the best to estimate total volume of trees with ages close to final cut.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG for partial funding of this work (process number CAG-APQ-00822-14) and to Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior for providing the scholarship for the first author.

REFERENCES

- ABRAF. 2011. *Anuário estatístico da ABRAF, ano base 2010*. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Brasília.
- AKINDELE S O. 2005. *Volume functions for common timber Species of Nigeria's tropical rain forests*. International Tropical Timber Organization (ITTO), Yokohama.

ALVARES C A, STAPE J L, SENTELHAS P C, GONÇALVES J L M & SPAROVEK G. 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. Stuttgart 22 (6): 711-728.

ANDRADE A C A, SILVA J R M, BRAGA JUNIOR R A & MOULIN J C. 2016. Utilização da técnica sunset laser para distinguir superfícies usinadas de madeira com qualidades similares. *Cerne* 22 (2): 159-162.

ASSMANN E. 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon, Oxford.

BORBA M C V & NAKANO E Y. 2016. Uma alternativa para avaliar discordância entre duas medidas via modelo de regressão linear simples sem intercepto. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas* 37 (2): 41-50.

CAMPOS J C C & LEITE H G. 2013. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. UFV, Viçosa.

CARVALHO A M, SILVA B T B & LATORRACA J V F. 2010.

Avaliação da usinagem e caracterização das propriedades físicas da madeira de mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.). *Cerne* 16:106-114.

CASTRO A C, LOURENÇO J B J, SANTOS N F A, MONTEIRO E M

M, AVIZ M A B & GARCIA A R. 2008. Sistema silvipastoril na Amazônia: ferramenta para elevar o desempenho produtivo de búfalos. *Ciência Rural* 38 (8): 2395-2402.

CECILIA R B, MASON E G, WOOLLONS R & RESQUIN F. 2014.

Volume and Taper Equations for *P. taeda* (L.) and *E. grandis* (Hill ex. Maiden). *Agrociencia Uruguay* 18 (2): 47-60.

CORCIOLI G, BORGES J D & JESUS R P. 2016. Deficiência de macro

e micronutrientes em mudas maduras de *Khaya ivorensis* estudadas em viveiro. *Cerne* 22 (1):121-128.

CUSHMAN H C, MULLER-LANDAU H C, CONDIT R S & HUBBELL S P. 2014. Improving estimates of biomass change in buttressed trees using tree taper models. *Methods in Ecology and Evolution* 5:573–582.

FERREIRA G W D, FERRAZ FILHO A, PINTO A L R & SCOLFORO J R S. 2014. Influência do desbaste na forma do fuste de povoamentos naturais de *Eremanthus incanus* (Less.) Less. *Semina: Ciências Agrárias* 35 (4): 1707-1720.

FRANÇA T S F A, ARANTES M D C, PAES J B, VIDAURRE G B, OLIVEIRA J T S & BARAÚNA E E P. 2015. Caracterização anatômica e físico-mecânica das madeiras de duas espécies de mogno africano. *Cerne* 21 (4):20-25.

GRIJPMA P. 1976. *Resistance of Meliaceae against the shoot borer Hypsipyla with particular reference to Toona ciliata M. J. Roem. Var. Australis (F. V. Muell.) C D C. Tropical Trees: Variation, Breeding and Conservation, London.*

HE C, HONG X, LIU K, ZHANG S & WANG Q. 2016. An improved technique for non-destructive measurement of the stem volume of standing wood. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 78(1): 53-60.

HENRY M, PICARD N, TROTTA C, MANLAY R J, VALENTINI R, BERNOUX M & SAINT-ANDRÉ L. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45 (3B): 477–569.

HERYATI Y, BELAWAN D, ABDU A, MAHAT M N, ABDUL-HAMID H, MAJID N M, HASSAN A & HERIANSYAH J. 2011. Growth Performance and Biomass Accumulation of a *Khaya ivorensis* Plantation in three Soil Series of Ultisols. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 6 (1): 33-44.

HILJE L & CORNELIUS J. 2001. ¿Es in manejable *Hypsipyla grandella* como plaga forestal? *Manejo Integrado de Plagas* 61:1-4.

IBÁ. *Relatório estatístico da IBÁ 2016, ano base 2015*. Indústrias Brasileiras de Árvores.

LUNZ A M, THOMAZINI M J, MORAES M C B, NEVES E J M, BATISTA T F C, DEGENHARDT J, SOUZA L A & OHASHI O S. 2009. *Hypsipyla grandella* em Mogno (*Swietenia macrophylla*): Situação Atual e Perspectivas. *Pesquisa Florestal Brasileira* 59: 45-55.

MASCARO J, LITTON C M, HUGHES R F, UOWOLO A & SCHNITZER S A. 2011. Minimizing Bias in Biomass Allometry: Model Selection and Log- Transformation of Data. *Biotrópica* 46 (6) 649-653.

MELO L C, BARRETO P A B, OLIVEIRA F G R B & NOVAES A B. 2013. Estimativas volumétricas em povoamento de *Pinus Caribaea* var. *hondurensis* no Sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira* 33 (76): 379-386.

MIRANDA D, PARO B A V & COSTA G R. 2014. Estimativa do volume em árvores de *Hymenaea coubaril* no norte de Mato Grosso. *Nativa* 2 (4):219-223.

MÜLLER M D, SALLES T T, PACIULLO D S C, BRIGHENTI A M & CASTRO C R T. 2014. Equações de altura volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecidos em sistema silvipastoril. *Floresta* 44 (3): 473 – 484.

NICOLETTI M F, CARVALHO S P C & BATISTA J L F. 2012. Revisão bibliográfica sobre métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal* 20 (1): 102-116.

NICOLETTI M F, SILVA E & FLORIANI M M P. 2015. Metodologia não destrutiva para quantificação do volume e biomassa do fuste em remanescente florestal. *Nativa* 3 (2): 287-291.

NOGUEIRA G S, LEITE H G, REIS G G & MOREIRA A M. 2008.

Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. *Árvore* 32 (5): 855-860.

PELISSARI A L, LASSANOVA R L & DRESCHER R. 2011. Modelos

volumétricos para *Pinus* tropicais em povoamento homogêneo no estado de Rondônia. *Pesquisa Florestal Brasileira* 31 (67):173-181.

PICARD N, SAINT-ANDRÉ L & HENRY M. 2012. *Manual for building*

tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier.

PINHEIRO L P, COUTO L, PINHEIRO D T & BRUNETTA J M F C.

2011. Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos

africanos (*Khaya* spp.). Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura-SBAG, Viçosa.

PINHEIRO A L, LANI J L & COUTO L. 2013. *Cedro-australiano – Cultivo e utilização*. UFV, Viçosa.

POSSU W B, BRANDLE J R, DOMKE G M, SCHOENEBERGER M & BLANKENSHIP E. 2016. Estimating carbon storage in windbreak trees on U.S. agricultural lands. *Agroforestry Systems* 90 (5):889–904.

R Core Team. 2016. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. URL <http://www.Rproject.org/>, Viena.

RIBEIRO A, FERRAZ FILHO A C, TÓME M & SCOLFORO J R S. 2016. Site quality curves for African mahogany plantations in Brazil. *Cerne* 22 (4):439–448.

ROCHA M F V, VITAL B R, CARNEIRO A C O, CARVALHO A M M L, CARDOSO M T & HEIN P R G. 2016. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. *Journal of Tropical Forest Science* 28 (3):243–248.

RODRIGUEZ F, LIZARRALD I, FERNANDEZ-LANDA A & CONDÉS A. 2014. Non-destructive measurement techniques for taper equation development: a study case in the Spanish Northern Iberian Range. *European Journal of Forest Research* 133 (2):213–223.

SÁ JÚNIOR A, CARVALHO L G, SILVA F F & ALVES M C. 2012. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 108 (1):1-7.

SANTOS A T, MATTOS P P, BRAZ E M & ROSOT N C. 2012.

Equação de volume e relação hipsométrica em plantio de *Ocotea porosa*. *Pesquisa Florestal Brasileira* 32 (69):13-21.

SCHUMACHER F X & HALL F S. 1933. Logarithmic expression of

timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*. 47 (9):719-734.

SCOLFORO J R S & FERRAZ FILHO A C. 2014. Silvicultura e Manejo

das Espécies Madeireiras. Pp 11-24 in: Coelho. L; Nascimento. A. R. T.; Lemes. E. M. (Org.). *Espécies nobres do Cerrado I – Silvicultura e Perspectivas de Produção*. Comoser, Uberlândia.

SILVA J G M, VIDAURRE G B, ARANTES M D C, BATISTA D C,

SORANSO D R. & BILLO D F. 2016a. Qualidade da madeira de mogno africano para a produção de serrados. *Scientia Forestalis* 44:181-190.

SILVA L F, FERREIRA G L, SANTOS A C A, LEITE H G & SILVA M

P. 2016b. Equações hipsométricas volumétricas e de crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. *FLORAM - Revista Floresta e Ambiente* 23 (3): 362-368.

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

THIERSCH C R, SCOLFORO J R, OLIVEIRA A D, MAESTRI R &

DEHON G. 2006. Acurácia dos métodos para estimativa do volume comercial de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne* 12 (2): 167-181.

TOMÉ M, TOMÉ J, RIBEIRO F & FAIAS S. 2007. Equação de Volume

Total, Volume Percentual e de Perfil do Tronco para *Eucalyptus globulus* Labill em Portugal. *Silva Lusitana* 15 (1):25-39.

TREMACOLDI C R, LUNZ A M, COELHO I L & BOARI A J. 2013.

Cancro em mogno africano no estado do Pará. *Pesquisa Florestal Brasileira* 33 (74):221-225.

UDDIN M N & FUJIEDA J. 2015. Role of Satoyama Forest towards Sustainability: Contributing to Carbon Stock in Japan. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science* 3:22-32.

VAN LAAR A & AKÇA A. 2007. *Forest mensuration*. Vol. 13. Springer Science, Dordrecht.

YAHYA A Z, MAHAT M N, RASIP A & GHANI A. 1999. Growth of plantation grown *Khaya ivorensis* in peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Forest Science* 11 (4): 849-851.

YARED J A G & CARPANEZZI A A. 1981. Conversão de capoeira alta da Amazônia em povoamento de produção madeireira: o método “recrú” e espécies promissoras. Embrapa Amazônia Oriental, Belém.

YEBOAH D, BURTON A J, STORER A J & OPUNI-FRIMPONG E. 2014. Variation in wood density and carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forests* 45: 35-52.

YOON T K, PARK C W, LEE S J, KO S, KIM K N, SON Y, LEE K H,
OH S, LEE W K & SON Y. 2013. Allometric equations for
estimating the above ground volume of five common urban street
tree species in Daegu, Korea. *Urban Forestry & Urban Greening*
12:344–349.

This paper was submitted to Journal of Tropical Forest Science, written
with Antonio Carlos Ferraz Filho, Rafaella Carvalho Mayrinck, Andressa
Ribeiro, Renato Ribeiro de Lima and José Roberto Soares Scolforo as co-
authors.

ARTIGO 2 Modelos de afilamento não segmentados para estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste em plantios de *Khaya ivorensis* A. Chev. nos estados de Minas Gerais e Pará, Brasil

RESUMO

A espécie *Khaya ivorensis* (mogno africano) produz madeira de qualidade e alto valor agregado. A quantificação dos diâmetros e volumes ao longo do tronco, considerando o afilamento, é necessário no planejamento e otimização das atividades florestais. O objetivo desse estudo foi ajustar modelos polinomiais não segmentados para estimativa de diâmetros e volumes em diferentes posições de altura na árvore em duas condições: árvores com idade próxima ao primeiro desbaste (7 anos), em Minas Gerais e, árvores com idade próxima ao corte final (14 - 15 anos), no Pará. Foi realizada a cubagem indireta com o aparelho Criterion RD 1000 de 100 árvores em Minas Gerais e, de 46 árvores no Pará. Essa metodologia indireta foi validada com 10 árvores cubadas diretamente após o abate, sendo os diâmetros e os volumes das duas cubagens semelhantes estatisticamente para $\alpha=0,05$. Os modelos de Schöepfer, Hradetzky e Kozak apresentaram bons ajustes e estatísticas de precisão. Para as duas idades estudadas, o modelo de Schöepfer (polinômio do quinto grau) se apresentou o mais acurado e pode ser utilizado para outros povoamentos de *Khaya ivorensis*.

Palavras-chave: Mogno africano. Dendrômetro óptico. Funções de afilamento.

ABSTRACT

Khaya ivorensis yields high-quality and high-priced wood. The quantification of diameters and volume along the stem is necessary to plan and optimize forest activities. This study aims to fit non-segmented polynomial models to estimate diameters and volume at different heights for trees under 2 conditions: 7-year-old trees (age close to the first thinning - Minas Gerais state plantations) and 14 to 15 years old trees (ages close to final cut -Pará state plantations). Tree diameter was measured indirectly using Criterion RD 1000 on 100 7-year-old trees and 46 trees at the final cut age. Indirec measurements were validated using 10 trees which had its volume measured after felling, being diameters and volumes obtained directly and indirectly considered equal ($\alpha=0,05$). Schöepfer, Hradetzky and Kozak models yielded good fits and precision. For the two tree ages, the Schöepfer model (fifth degree polynomial) outperformed the others and can be applied for other plantations.

Keywords: African mahogany. Optical dendrometer. Taper function.

1 INTRODUÇÃO

Algumas espécies do gênero *Khaya*, da família Meliaceae, são conhecidas popularmente como mogno africano (PINHEIRO et al., 2011). Dentre estas, destaca-se a *Khaya ivorensis*, que apresenta um crescimento relativamente rápido e possui uma madeira de coloração marrom-avermelhado, com densidade média (densidade seca ao ar equivalente a 560 kg/m³) e alto valor comercial agregado (SCOLFORO; FERRAZ FILHO, 2014; YAHYA et al. 1999). São poucos os estudos quantitativos dessa espécie em condições nacionais (OLIVEIRA, 2017; RIBEIRO, 2017; SILVA et al, 2016) o que é grave uma vez que os plantios no país atingem idades próximas a desbastes e corte final, necessitando de planejamento e otimização das atividades florestais.

Diferentes métodos podem viabilizar a estimativa volumétrica, tais como: equações volumétricas de simples e dupla entrada, fatores de forma, funções *spline* e funções de afilamento (FIGUEIREDO et al., 2006). Esta última permite obter diâmetros e volumes em diferentes posições ao longo do fuste e são agrupadas, a modo de simplificação, em duas classificações: modelos não segmentados, quando uma única função representa a forma do fuste desde a base até o topo, e modelos segmentados, quando apresentam duas ou três funções interligadas para segmentar a árvore de acordo com as diferentes formas ao longo do fuste (CAMPOS; LEITE, 2013).

A forma das árvores varia de acordo com o afilamento natural do fuste, correspondente ao decréscimo de diâmetro que ocorre da base para o ápice. Larson (1963), mostra por meio de uma revisão de literatura, que a forma do fuste sofre influências de fatores ambientais e práticas silviculturais, sendo que maior parte dessas alterações são decorrentes do tamanho e distribuição da copa

da árvore. Friedl (1989) ao estudar o efeito da idade, sítio e posição sociológica na forma de *Araucaria angustifolia*, concluiu que a idade apresenta maior influência entre esses fatores e, devido a isso, para obter dados homogêneos na forma das árvores deve ser feita uma estratificação por classes de idade. De modo a respeitar essa sensibilidade da forma das árvores em relação a diversos fatores, os modelos polinomiais de afilamento são desenvolvidos e testados quanto à precisão e acurácia em diferentes condições (FIGUEIREDO FILHO et al., 2015; FAVALESSA et al., 2012; MIGUEL et al., 2011; ASSIS et al, 2002).

O objetivo desse estudo foi descrever o comportamento dos diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Khaya ivorensis* por meio dos modelos não segmentados propostos por Goulding e Murray (1976), Hradetzky (1976), Kozak et al. (1969) e Schöepfer (1966), em dois momentos importantes para o manejo: árvores com idade próxima ao primeiro desbaste e ao corte final. A taxa de afilamento dos fustes também foi quantificada até uma altura próxima a 6 metros para verificar a conicidade nas diferentes classes de diâmetro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo e descrição dos dados

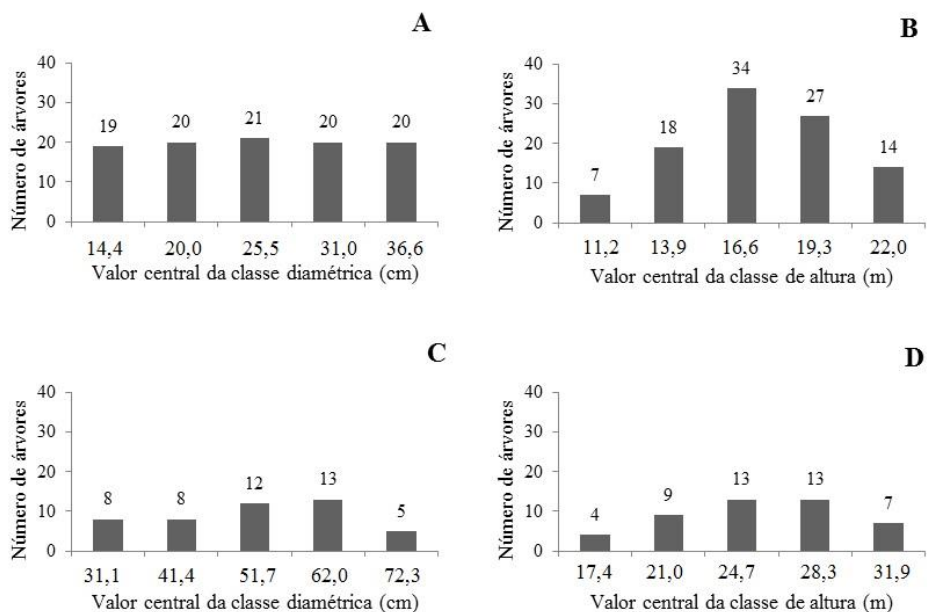
O presente estudo foi desenvolvido em povoamentos seminais de mogno africano (*Khaya ivorensis*) localizados nos municípios de Santo Antônio do Tauá, Pará (1,18° S e 48,13° W) e Piumhi, Minas Gerais (20,42° S e 46,02° W) que apresentam, respectivamente, clima tropical úmido (Af) e clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa) pela classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2014; SÁ JUNIOR et al., 2012).

Os plantios apresentam idade e espaçamento diferentes: no estado do Pará, as árvores foram plantadas no ano 2000 e espaçadas de 12 x 12 m e, em

Minas Gerais o plantio foi realizado em 2009, com um espaçamento de 5,5 x 6 m. Para selecionar as árvores a serem cubadas, foram analisados os dados de diâmetro à altura de 1,3 metros em relação ao solo (d) e altura total (h) das árvores provenientes de inventários florestais contínuos realizados nas áreas, de modo que, ao estratificar essas duas variáveis em classes, apresentassem árvores em todas elas, propiciando melhor representatividade do povoamento (MUGASHA et al., 2016). A Figura 1 ilustra a distribuição das árvores em classes de altura e diâmetro.

A base de dados consiste em 46 árvores cubadas no Pará nos anos de 2014 e 2015, ou seja, quando possuíam 14 e 15 anos de idade e em 100 árvores cubadas em Minas Gerais no ano de 2016, aos sete anos de idade. A expectativa de corte final do mogno africano em condições nacionais está entre 15 e 20 anos de idade e os desbastes são definidos ao longo do ciclo de rotação para melhorar a forma do fuste e reduzir a competição (SILVA et al., 2016; FERREIRA et al., 2014). Dessa forma, os dados foram divididos em: árvores com idade próxima ao corte final para os dados coletados no Pará, e árvores com idade próxima ao primeiro desbaste para os dados coletados em Minas Gerais.

Figura 1 – Número de árvores cubadas por classes de diâmetro à altura de 1,3 metros em relação ao solo (A) e altura total (B) em Minas Gerais e número de árvores cubadas por classes de diâmetro à altura de 1,3 metros em relação ao solo (C) e altura total (D) no Pará.



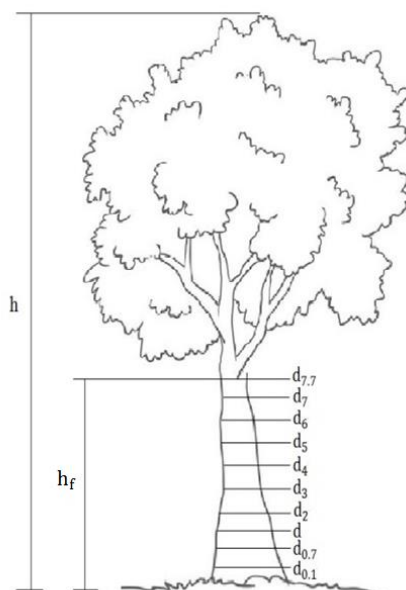
2.2 Cubagem das árvores

As árvores de mogno selecionadas foram submetidas a uma cubagem indireta com o uso do dendrômetro óptico Criterion RD 1000 acoplado ao hipsômetros laser TruPulse 200. Para minimizar erros da medição indireta, os diâmetros localizados até 2 metros de altura foram simultaneamente conferidos de forma direta com uma suta diamétrica, calibrando a informação obtida pelo dendrômetro. As árvores cubadas também tiveram o diâmetro à altura de 1,3 metros em relação ao solo mensurado com uso de uma suta diamétrica e a altura total coletada pelo hipsômetro TruPulse 200.

Os diâmetros foram mensurados nas alturas de 0,1; 0,7; 1,3 e 2 metros e depois de 1 em 1 metro até atingir a altura comercial do fuste (ponto em que a

árvore apresenta sua primeira bifurcação). A metodologia utilizada na cubagem está ilustrada na Figura 2. O método de Smalian foi utilizado para calcular o volume do fuste das árvores pela soma dos volumes do toco e das seções e o volume total pela soma do volume do toco, volume das seções e volume da ponta (CAMPOS; LEITE, 2013).

Figura 2 – Exemplo de cubagem com as posições utilizadas nesse estudo, considerando uma altura de fuste de 7,7 metros.



A acurácia da cubagem indireta foi validada com a derrubada de 10 árvores (duas por classe de d) entre as 100 árvores mensuradas com idade próxima ao primeiro desbaste. A cubagem destrutiva foi realizada nessas árvores, de modo que as alturas ao longo do fuste foram medidas com o uso de uma trena e os diâmetros mensurados com o uso de uma suta; o volume foi calculado conforme descrição anterior.

Para comparar as duas cubagens (direta e indireta), utilizou-se um modelo de regressão linear sem intercepto, avaliando uma possível relação linear

entre os diâmetros e volumes totais das árvores obtidos de forma direta e de forma indireta. O método considera os valores concordantes quando as duas variáveis, X e Y, são semelhantes e nesse caso a reta da regressão resultante passa pela origem ($\beta_0=0$) e o coeficiente angular é igual a um ($\beta_1=1$). A distância horizontal de cada ponto em relação à reta de regressão também implica em erro de medição. Para solucionar esse problema, as variáveis X e Y foram consideradas como variável explicativa de resposta e também foram invertidas (variável X como resposta e Y como explicativa), o que pôde ser aplicado visto que as medidas são aleatórias. Desse modo, a concordância é rejeitada se pelo menos uma das regressões rejeitarem a hipótese ($H_0: \beta_1=1$). Assim, o valor-p do teste de concordância será o valor mínimo dos dois p-valores obtidos (BORBA; NAKANO, 2016).

2.3 Taxa de afilamento dos fustes em classes diamétricas

Para determinar o fator de conicidade médio das árvores nas duas idades estudadas, foi utilizada a equação 1, que relaciona dois diâmetros (d e d_i) em duas alturas conhecidas (1,3 e i). A informação obtida indica que quanto maior o valor, maior a conicidade, pois diz respeito a quantos cm em diâmetro decresceram a cada 1 m. A equação foi aplicada em todas as árvores que tiveram o diâmetro mensurado a uma altura próxima a 6 metros e depois foi realizada a média em cada classe de diâmetro das duas bases de dado.

$$\text{Conicidade} = \frac{d-d_i}{i-1,3}, \quad (1)$$

em que: d_i = diâmetro em cm localizado a uma altura i do fuste; i= altura do fuste próxima a 6 m; d = diâmetro à altura de 1,3 metros em relação ao solo.

2.4 Modelos de afilamento testados

Os modelos não segmentados utilizados nesse estudo foram ajustados no software R (R Core Team, 2016). As formas de ajuste iniciais propiciaram a estimativa do diâmetro, sendo estas submetidas a uma integral para possibilitar a estimativa do volume.

2.4.1 Modelo de Schöpfer (1966)

O modelo de Schöpfer ou polinômio de quinto grau é amplamente utilizado no sul do Brasil para quantificar multiprodutos e avaliar a evolução da forma do tronco com o avanço da idade, pois apresenta fácil ajuste e, em geral, bons resultados (FIGUEIREDO FILHO et al., 2015). O ajuste foi realizado pelo método dos mínimos quadrados ordinários. O polinômio é expresso pela equação (2).

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

em que: β_i 's = parâmetros a serem estimados; d_i = diâmetro em cm localizado a uma altura i do fuste; h_i = altura comercial em m; ε_i = erro de estimativa; d e h = definidos anteriormente.

Para obter os diâmetros estimados a diferentes alturas no fuste da árvore, basta isolar o d_i do modelo anterior, obtendo a equação (3).

$$d_i = d \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h} \right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h} \right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h} \right)^5 \right] + \varepsilon_i. \quad (3)$$

Antes de integrar o modelo (2), foi realizada uma simplificação, de forma que: $C_0 = \beta_0$; $C_1 = \frac{\beta_1}{h}$; $C_2 = \frac{\beta_2}{h^2}$; $C_3 = \frac{\beta_3}{h^3}$; $C_4 = \frac{\beta_4}{h^4}$; $C_5 = \frac{\beta_5}{h^5}$. Após essa alteração a equação (3) assume a forma apresentada na equação (4). Considerando a integração das áreas seccionais entre o limite inferior (h_1) e superior (h_2) da árvore, o volume (v) foi integrado conforme a equação (5) e possibilitou a estimativa do volume a diferentes alturas pela equação (6).

$$d_i = d [C_0 + C_1 h_i + C_2 h_i^2 + C_3 h_i^3 + C_4 h_i^4 + C_5 h_i^5] + \varepsilon_i, \quad (4)$$

$$v = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h_i, \quad (5)$$

$$v = Kd^2 \left[C_0^2 h_i + C_0 C_1 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} C_0 C_2 + \frac{1}{3} C_1^2 \right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} C_0 C_3 + \frac{1}{2} C_1 C_2 \right) h_i^4 + \left(\frac{2}{5} C_0 C_4 + \frac{2}{5} C_1 C_3 + \frac{1}{5} C_2^2 \right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} C_0 C_5 + \frac{1}{3} C_1 C_4 + \frac{1}{3} C_2 C_3 \right) h_i^6 + \left(\frac{2}{7} C_1 C_5 + \frac{2}{7} C_2 C_4 + \frac{1}{7} C_3^2 \right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} C_2 C_5 + \frac{1}{4} C_3 C_4 \right) h_i^8 + \left(\frac{2}{9} C_3 C_5 + \frac{1}{9} C_4^2 \right) h_i^9 + \frac{1}{5} C_4 C_5 h_i^{10} + \frac{1}{11} C_5^2 h_i^{11} \right]_{h_1}^{h_2} + \varepsilon_i, \quad (6)$$

$$\text{em que: } K = \frac{\pi}{40000}; C_0 = \beta_0; C_1 = \frac{\beta_1}{h}; C_2 = \frac{\beta_2}{h^2}; \dots; C_5 = \frac{\beta_5}{h^5}.$$

2.4.2 Modelo de Hradetzky (1976)

O modelo de Hradetzky ou polinômio de potências fracionárias e inteiras é uma adaptação do polinômio do quinto grau, que aplica potências fracionárias e inteiras para melhorar a representação do fuste em diferentes alturas. As potências utilizadas para o ajuste desse polinômio (7) foram selecionadas pelo método *Stepwise*, considerando o teste F com α de 0,05 e o valor menos significativo, respectivamente, para a retirada de variável até se obter uma equação com número de coeficientes significativos menor ou igual a 6. Nesse estudo, as seguintes potências (p_{is}) foram testadas: 0,009; 0,008; 0,007; 0,006; 0,005; 0,004; 0,09; 0,08; 0,07; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03; 0,02; 0,01; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 1; 2; 3; 4; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60. Ao isolar o d_i , é possível estimar diâmetros em diferentes alturas (8).

$$\frac{d_i}{d} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_n} + \varepsilon_i, \quad (7)$$

$$d_i = d \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_1} + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_2} + \dots + \beta_n \left(\frac{h_i}{h}\right)^{p_n} \right] + \varepsilon_i. \quad (8)$$

Para integrar (7), a simplificação em que p_j corresponde aos expoentes selecionados no processo *Stepwise*, é dada da seguinte forma: $C_0 = \beta_0$; $C_1 = \frac{\beta_1}{h^{p_1}}$; $C_2 = \frac{\beta_2}{h^{p_2}}$. A versão simplificada (9) foi integrada, resultando a expressão que possibilita a estimativa de volumes em ao longo do fuste (10).

$$d_i = d[C_0 + C_1 h_i^{p_1} + C_2 h_i^{p_2} + \dots + C_n h_i^{p_n}] + \varepsilon_i, \quad \text{b} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
v = & \\
& Kd^2 \left[C_0^{2h_i} + 2C_0C_1 \left(\frac{h_i^{(p_1+1)}}{p_1+1} \right) + 2C_0C_2 \left(\frac{h_i^{(p_2+1)}}{p_2+1} \right) + \dots + \right. \\
& 2C_0C_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)}+1)}}{p_{(n-1)}+1} \right) + 2C_0C_n \left(\frac{h_i^{(p_n+1)}}{p_n+1} \right) + 2C_1C_2 \left(\frac{h_i^{(p_1+p_2+1)}}{p_1+p_2+1} \right) + \dots + \\
& 2C_1C_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_1+p_{(n-1)}+1)}}{p_1+p_{(n-1)}+1} \right) + 2C_1C_n \left(\frac{h_i^{(p_1+p_n+1)}}{p_1+p_n+1} \right) + \\
& 2C_2C_{(n-1)} \left(\frac{h_i^{(p_2+p_{(n-1)}+1)}}{p_2+p_{(n-1)}+1} \right) + 2C_2C_n \left(\frac{h_i^{(p_2+p_n+1)}}{p_2+p_n+1} \right) + \dots + \\
& 2C_{(n-1)}C_n \left(\frac{h_i^{(p_{(n-1)}+p_n+1)}}{p_{(n-1)}+p_n+1} \right) + C_1^2 \left(\frac{h_i^{(2p_1+1)}}{2p_1+1} \right) + C_2^2 \left(\frac{h_i^{(2p_2+1)}}{2p_2+1} \right) + \dots + \\
& \left. C_{(n-1)}^2 \left(\frac{h_i^{(2p_{(n-1)}+1)}}{2p_{(n-1)}+1} \right) + C_n^2 \left(\frac{h_i^{(2p_n+1)}}{2p_n+1} \right) \right]_{h_1}^{h_2} + \varepsilon_i. \tag{10}
\end{aligned}$$

2.4.3 Modelo de Goulding e Murray (1976)

A proposta do modelo é permitir uma compatibilidade entre um modelo volumétrico e um modelo de afilamento, por meio de uma adaptação do polinômio de quinto grau, como pode ser visto em sua forma geral (11). O ajuste foi realizado pela forma linearizada desse polinômio (12) e os expoentes selecionados pelo método *Stepwise* conforme descrito anteriormente. As potências testadas para este modelo foram: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37.

O volume estimado (\hat{v}) utilizado nas equações foi obtido por meio dos modelos volumétricos selecionados por Oliveira (2017) para cada base de dados. Para as árvores com idade próxima ao primeiro desbaste o volume foi estimado por

$\text{Ln}(\hat{v}) = -9.09353 + 0.88027\text{Ln}(d^2h)$ e com idade próxima ao corte final por $\hat{v} = 0.2276 + 0.00002589d^2h$.

$$d_i^2 = \frac{\hat{v}}{Kh} \left[\beta_1 \left(\frac{h-h_i}{h} \right) + \beta_2 \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^3 + \dots + \beta_n \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^n \right] + \varepsilon_i, \quad (11)$$

$$\frac{d_i^2 Kh}{\hat{v}} - \frac{2(h-h_i)}{h} = \beta_2' \left[3 \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^2 - \frac{2(h-h_i)}{h} \right] + \beta_3' \left[4 \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^3 - \frac{2(h-h_i)}{h} \right] + \beta_n' \left[(n+1) \left(\frac{h-h_i}{h} \right)^n - \frac{2(h-h_i)}{h} \right] + \varepsilon_i. \quad (12)$$

Os parâmetros obtidos após o ajuste do modelo (12) foram recuperados para propiciar a estimativa de diâmetros por meio da equação (11), ao considerar: $\beta_1 = 2(1 - \sum_{i=2}^n \beta_i')$; $\beta_2 = 3\beta_2'$; $\beta_n = (n+1)\beta_n'$.

O modelo (13), obtido após integrar a expressão da forma geral (11), permite a estimativa do volume comercial (v_c) de modo diferente em relação aos outros modelos testados. Isso ocorre, pois a expressão utiliza a altura total até uma altura qualquer da árvore ($h - h_i$) e, da mesma forma, os volumes estimados correspondem ao volume da ponta da árvore até uma altura h_i . Devido a isso, para obter o volume da base até uma altura comercial, como nos demais modelos, é necessário subtrair o volume encontrado do volume total da árvore.

$$v_c = \frac{\hat{v}}{h} \left[\frac{\beta_1(h-h_i)^2}{2h} + \frac{\beta_2(h-h_i)^3}{3h^2} + \frac{\beta_3(h-h_i)^4}{4h^3} + \dots + \frac{\beta_n(h-h_i)^{(n+1)}}{(n+1)h^n} \right]_0^h + \varepsilon_i. \quad (13)$$

2.4.4 Modelo de Kozak et al. (1969)

O modelo de Kozak ou polinômio de 2º grau é muito utilizado devido a facilidade de ajuste e resultados satisfatórios. Ao isolar o d_i da sua forma geral (14) é possível estimar diâmetros em diferentes alturas por meio do modelo (15) e ao integrar o modelo (14) é possível calcular o volume da árvore em diferentes alturas por meio da expressão (16).

$$\left(\frac{d_i}{d}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \varepsilon_i, \quad (14)$$

$$d_i = d \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2} + \varepsilon_i, \quad (15)$$

$$v = Kd^2 \left[\beta_0(h_2 - h_1) + \frac{\beta_1(h_2^2 - h_1^2)}{2h} + \frac{\beta_2(h_2^3 - h_1^3)}{3h^2} \right] + \varepsilon_i. \quad (16)$$

2.5 Precisão e acurácia dos modelos de afilamento

Para verificar se, de forma geral, os modelos tiveram ajustes satisfatórios, duas estatísticas de precisão foram avaliadas: o erro padrão residual (S_{yx}) na escala da variável dependente, indicando o quão próximo os valores estimados estão dos valores observados, ou seja, quanto mais próximo de zero melhor, e o coeficiente de determinação R^2 que mostra o quanto as variáveis dependentes estão sendo explicadas pelas independentes e, nesse caso, o resultado será melhor a medida que estiver mais próximo a 1.

A acurácia dos modelos em diferentes posições do fuste foi analisada para as estimativas dos diâmetros e volumes por meio das estatísticas da Tabela

1, que também foram utilizadas em outros estudos (FIGUEIREDO et al., 2006; ASSIS et al., 2002; FIGUEIREDO FILHO et al., 1996; PARRESOL et al., 1987). Para auxiliar a interpretação do resultado de acurácia das variáveis (diâmetro e volume) em cada posição e permitir uma comparação entre os modelos, foram atribuídos pesos em ordem crescente às estatísticas supracitadas, de modo que nota 1 equivale à equação mais acurada e assim, sucessivamente, até a equação menos acurada. Se ocorrerem situações em que o mesmo valor da estatística for encontrado por equações diferentes, elas recebem o mesmo peso. A soma dos pesos das 4 estatísticas em cada posição resume o comportamento do modelo ao longo do fuste e a soma dos pesos de todas as posições define o melhor modelo, ou seja, aquele em que a equação obteve a menor soma.

Tabela 1 – Estatísticas utilizadas para avaliar as estimativas de diâmetros e volumes em diferentes posições do fuste de *Khaya ivorensis*.

Estatísticas	Medidas de diâmetro ou volume
Desvio (D)	$\frac{(\sum_{i=1}^n \text{Diff}_i)}{n}$
Desvio padrão das diferenças (SD)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\text{Diff}_i - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Diff}_i}{n} \right) \right]^2}{n - 1}}$
Soma do quadrado do resíduo relativo (SSRR)	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Diff}_i}{m_i} \right)^2$
Porcentagem dos resíduos (RP)	$\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{Diff}_i}{m_i} \right)^2}{n} * 100$

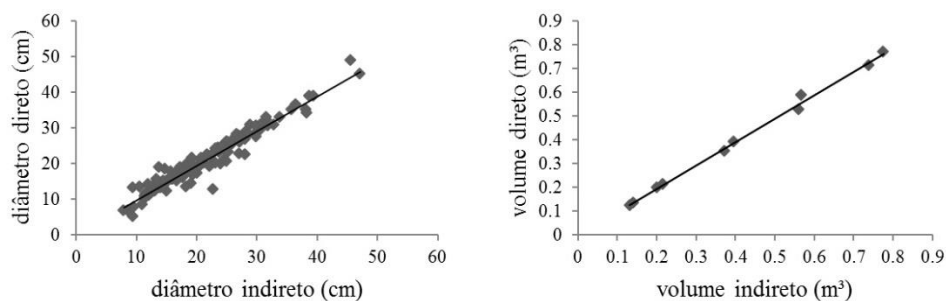
Em que: $\text{Diff}_i = \text{desvio dos volumes } (v_i - \hat{v}_i) \text{ ou dos diâmetros } (d_i - \hat{d}_i)$; $n =$ número de árvores, $m =$ medidas de diâmetro (d_i) ou volume (v_i) nas posições i do fuste.

3 RESULTADOS

3.1 Comparação entre a cubagem destrutiva e não destrutiva

A cubagem destrutiva e não destrutiva foram estatisticamente semelhantes de acordo com o método adotado em relação aos diâmetros mensurados com o Criterion e com a suta (Figura 3A) e aos volumes totais das árvores obtidos a partir dos dados de diâmetros indiretos e diretos (Figura 3B). O valor p encontrado na comparação dos diâmetros foi 0,1244 e na comparação dos volumes foi 0,7016. Ambos foram superiores a 0,05, indicando que não há diferença entre as duas medições. A Figura 3 ilustra a reta média da regressão que representa a relação linear entre os valores analisados.

Figura 3 – Gráfico de dispersão para o volume obtido de forma direta e indireta.



3.2 Conicidade dos fustes

As árvores apresentaram um aumento da conicidade ao longo das classes diamétricas para as duas idades analisadas (TABELA 2). O decréscimo de diâmetro em cm a cada 1 m em altura é mais acentuado para as árvores próximas ao corte final. Nestas, o diâmetro decresceu de 1,25 a 3,36 cm/m, com o

aumento das classes. As árvores próximas ao primeiro desbaste se apresentaram menos cônicas, variando de 0,78 a 1,98 cm/m.

Tabela 2 - Fator de conicidade por classe diamétrica em duas idades de povoamentos de *Khaya ivorensis*.

Primeiro desbaste		Corte final	
Valor central da classe diamétrica (cm)	Fator de conicidade médio (cm/m)	Valor central da classe diamétrica (cm)	Fator de conicidade médio (cm/m)
14,4	0,78	31,1	1,25
20,0	0,96	41,4	1,45
25,5	1,18	51,7	1,97
31,0	1,51	62,0	2,75
36,6	1,98	72,3	3,36
Conicidade média	1,28	Conicidade média	2,10

3.3 Ajuste e precisão dos modelos

Os valores estimados dos parâmetros e respectivas potências dos modelos que propiciaram ajuste estão representados na Tabela 3, sendo que, todos os parâmetros foram significativos para $\alpha=0,01$. O polinômio de Goulding e Murray proposto nesse estudo não apresentou ajuste adequado e, devido a isso, não foi inserido nos resultados. Os polinômios de Schöepfer, Hradetzky e Kozak apresentaram coeficiente de determinação e erro padrão residual conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros estimados para os modelos de afilamento ajustados para *Khaya ivorensis*.

Idade próxima ao primeiro desbaste (7 anos)						
Parâmetros	Schöpfer		Hradetzky		Kozak	
	Valor estimado	Potência	Valor estimado	Potência	Valor estimado	Potência
β_0	1,3300		-358,014		1,3694	
β_1	-6,0769	1	-5257,90	0,09	-2,7458	1
β_2	31,4330	2	5521,422	0,08	1,4501	2
β_3	-81,4756	3	-1349,06	0,8		
β_4	96,1531	4	1100,419	0,7		
β_5	-41,3620	5	345,4188	1		
β_6			-2,0219	5		
Idade próxima ao corte final (14 - 15 anos)						
	Schöpfer		Hradetzky		Kozak	
	Valor estimado	Potência	Valor estimado	Potência	Valor estimado	Potência
β_0	1,2051		1,6651		1,1531	
β_1	-5,0347	1	-107,18	0,9	-2,3539	1
β_2	29,3132	2	195,1622	0,8	1,2074	2
β_3	-87,0803	3	-91,1472	0,7		
β_4	115,0195	4	6,3808	3		
β_5	-53,4227	5	-4,8806	4		

Tabela 4 – Medidas de precisão dos ajustes dos modelos afilamento para *Khaya ivorensis*.

Idade	Modelo	R ²	Syx (cm)
Primeiro desbaste	Schöepfer	0,9520	0,0704
	Hradetzky	0,9575	0,0663
	Kozak	0,7532	0,2279
Corte final	Schöepfer	0,9756	0,0518
	Hradetzky	0,9759	0,0516
	Kozak	0,8995	0,1137

3.4 Acurácia dos modelos na estimativa de diâmetros em diferentes alturas do fuste

Os resultados das estatísticas de acurácia de desvio (D), desvio padrão das diferenças (DPD), soma do quadrado do resíduo relativo (SSRR) e porcentagem dos resíduos (RP) para diâmetros em diferentes posições no fuste de árvores com idade próxima ao primeiro desbaste e árvores com idade próxima ao corte final estão representadas, respectivamente nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Ranqueamento da acurácia para os modelos de Schöepfer, Hradetzky e Kozak dos diâmetros estimados ao longo do fuste das árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao primeiro desbaste. (continua...)

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Schöepfer	0,1	0,32	3,19	0,77	1,63	2	2	2	2	2	8
	0,7	-1,24	12,32	0,43	-3,73	3	3	3	3	3	12
	1,3	-0,54	5,35	0,14	-1,35	1	1	1	1	1	4
	2	0,27	2,73	0,26	2,02	1	1	1	1	1	4
	3	0,49	4,83	0,51	2,70	1	1	1	1	1	4
	4	0,02	0,23	0,64	0,28	1	1	1	1	1	4
	5	-0,45	4,40	0,67	-1,57	1	1	1	1	1	4
	6	-0,54	5,07	0,63	-2,00	2	2	1	2	2	7
	7	-0,37	3,10	0,51	-1,07	1	1	1	1	1	4
	8	-0,21	1,48	0,44	-0,83	1	1	1	1	1	4
	9	-0,23	1,42	0,37	-0,95	1	1	1	1	1	4
	10	-0,46	2,20	0,18	-2,81	1	1	1	1	1	4
	11	-0,73	2,74	0,17	-4,92	1	1	1	1	1	4
	12	-1,48	3,92	0,14	-10,27	1	1	1	1	1	4
13	-1,07	2,14	0,06	-8,37	1	1	1	1	1	4	
14	0,71	1,00	0,06	7,28	1	1	2	2	2	6	

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos				
	D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Total										81
Hradetzky	0,1	-0,31	3,12	0,68	-0,99	1	1	1	1	4
	0,7	-1,09	10,84	0,40	-3,14	2	2	2	1	7
	1,3	-0,95	9,50	0,14	-3,48	2	2	2	2	8
	2	-1,44	14,44	0,47	-5,64	2	2	2	2	8
	3	-2,15	21,35	1,33	-9,01	3	3	3	3	12
	4	-2,72	26,94	2,35	-12,51	3	3	3	3	12
	5	-3,13	30,55	2,85	-14,81	3	3	3	3	12
	6	-3,35	31,42	3,07	-16,56	3	3	3	3	12
	7	-3,51	29,81	3,01	-18,51	3	3	3	3	12
	8	-3,86	27,32	3,08	-22,57	3	3	3	3	12
	9	-4,41	27,52	3,37	-26,83	3	3	3	3	12
	10	-5,30	25,41	2,88	-32,97	3	3	3	3	12
	11	-6,02	22,51	2,35	-37,61	3	3	3	3	12
	12	-6,33	16,75	1,62	-43,28	3	3	3	3	12
13	-4,19	8,38	0,70	-31,16	3	3	3	3	12	
14	-0,71	1,01	0,05	-4,08	2	2	1	1	6	
Total										165

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos				
	D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Kozak	0,1	3,66	36,39	1,92	11,62	3	3	3	3	12
	0,7	-1,03	10,21	0,33	-3,37	1	1	1	2	5
	1,3	-2,07	20,55	0,64	-7,80	3	3	3	3	12
	2	-2,07	20,71	0,85	-7,84	3	3	3	3	12
	3	-1,72	17,14	1,11	-6,59	2	2	2	2	8
	4	-1,37	13,58	1,28	-5,45	2	2	2	2	8
	5	-0,93	9,05	1,08	-3,06	2	2	2	2	8
	6	-0,18	1,68	0,93	0,56	1	1	2	1	5
	7	0,67	5,73	1,00	5,19	2	2	2	2	8
	8	1,43	10,13	1,15	9,34	2	2	2	2	8
9	2,00	12,46	1,37	13,55	2	2	2	2	8	

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
	10	2,55	12,24	1,00	16,89	2	2	2	2	2	8
	11	3,06	11,47	0,81	19,94	2	2	2	2	2	8
	12	3,71	9,80	0,75	27,19	2	2	2	2	2	8
	13	3,38	6,77	0,54	26,85	2	2	2	2	2	8
	14	4,31	6,09	0,56	35,29	3	3	3	3	3	12
Total											138

(conclusão)

Para as árvores com idade próxima ao primeiro desbaste, o modelo de Schöpfer apresentou o melhor resultado em 70,6% das posições e empatou com o modelo de Hradetzky na altura do fuste de 14 m. Além disso, foi o modelo que apresentou o menor somatório em relação aos demais, seguido pelo modelo de Kozak e, por fim, pelo modelo de Hradetzky que teve o maior valor de somatória.

Tabela 6 - Ranqueamento da acurácia para os modelos de Schöpfer, Hradetzky e Kozak dos diâmetros estimados ao longo do fuste das árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao corte final (Continua...)

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos				
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota
Schöpfer	0,7	0,74	4,99	0,12	1,82	2	2	1	2	7
	1,3	-0,81	5,43	0,04	-1,09	2	2	3	2	9
	2,3	-0,68	3,33	0,05	-1,15	2	2	2	1	7
	3,3	0,56	3,87	0,25	2,01	2	2	2	2	8
	4,3	-0,16	0,74	0,11	-0,30	1	1	1	1	4
	5,3	-0,20	1,21	0,18	0,07	2	2	1	1	6
	6,3	-1,67	7,64	0,13	-3,60	3	3	2	3	11
	7,3	-0,84	4,36	0,16	-1,50	3	3	2	2	10
	8,3	-1,16	3,27	0,07	-2,60	3	3	2	3	11
	9,3	-1,67	4,09	0,12	-4,22	2	2	2	2	8
Total										81

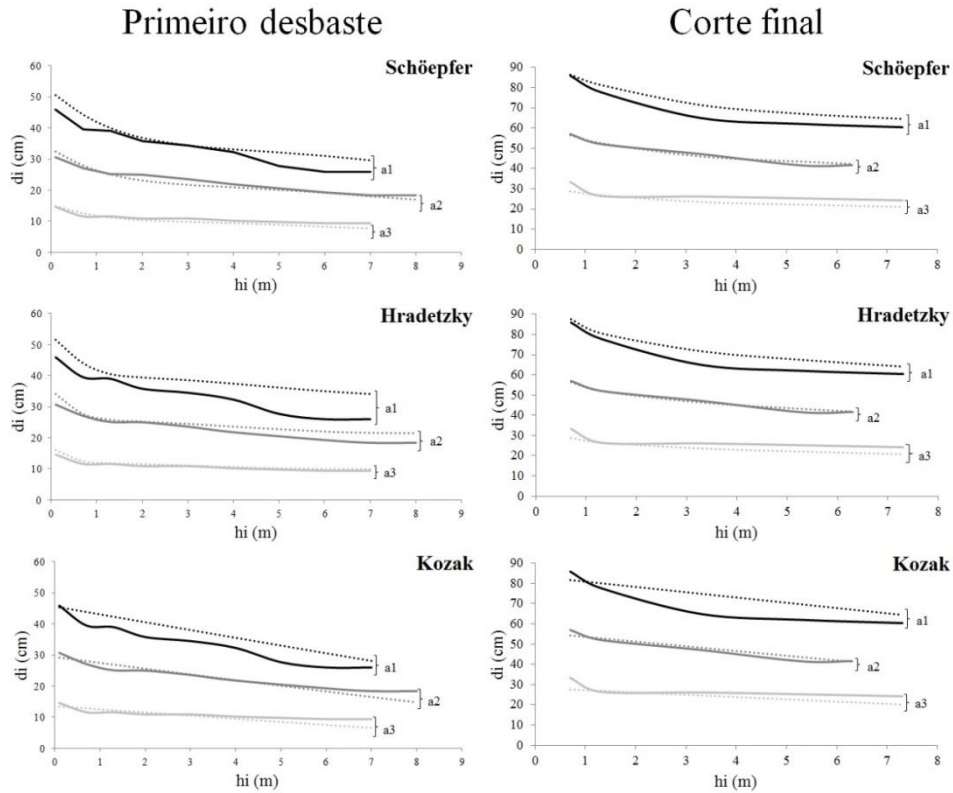
Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Kozak	0,7	3,03	20,34	0,22	5,61	3	3	3	3	3	12
	1,3	-0,94	6,27	0,02	-1,60	3	3	1	3	10	
	2,3	-2,82	13,84	0,12	-5,37	3	3	3	3	12	
	3,3	-1,62	11,11	0,31	-2,56	3	3	3	3	12	
	4,3	-2,23	10,44	0,19	-4,32	3	3	3	3	12	
	5,3	-0,86	5,21	0,24	-1,02	3	3	3	3	12	
	6,3	-1,40	6,43	0,14	-2,88	1	2	3	1	7	
	7,3	0,52	2,70	0,22	2,32	1	1	3	3	8	
	8,3	0,82	2,32	0,08	2,28	1	1	3	1	6	
	9,3	0,98	2,39	0,13	3,68	1	1	3	1	6	
Total										97	

(Conclusão)

Já para a base de dados com árvores próximas ao primeiro desbaste, as medidas de acurácia das árvores próximas ao corte final (Tabela 6) indicam o modelo de Hradetzky como o que obteve melhor resultado, ou seja, menor somatória. Esse modelo apresentou melhores resultados em 60% das posições e empatou com o modelo de Schöpfer na altura de 5,3 m. De forma geral, após o modelo de Hradetzky, Schöpfer assumiu a segunda posição e Kozak a terceira em relação a acuracidade.

A Figura 4 apresenta uma comparação entre os diâmetros mensurados e os diâmetros estimados pelos modelos de Schöpfer, Hradetzky e Kozak. Foram representadas as árvores com menor diâmetro (a1), com o diâmetro médio (a2) e com o maior diâmetro (a3) de cada base de dados. Dessa forma, as árvores com idade próxima ao primeiro desbaste apresentam $d=11,6$; 25,1 e 39,0 cm e as árvores próximas ao corte final, $d=26,4$; 52,1 e 77,8 cm. É possível observar que para as duas idades, os diâmetros estimados apresentaram melhores ajustes nas árvores com menor d e d médio, no entanto, todos os modelos foram eficientes para estimar diâmetros ao longo do fuste para as três árvores consideradas.

Figura 4 – Diâmetros mensurados (linha sólida) e estimados (linha tracejada) até a altura do fuste de árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao primeiro desbaste e próxima ao corte final. Em que: a1 = árvore com menor d; a2 = árvore com d médio; a3 = árvore com maior d; d_i = diâmetro em cm localizado a uma altura i do fuste; h_i = altura comercial em m.



3.5 Acurácia dos modelos na estimativa de volumes em diferentes alturas do fuste

As mesmas estatísticas utilizadas para analisar a acurácia dos diâmetros ao longo do fuste, foram aplicadas aos volumes da base da árvore até a altura do fuste para as árvores com idade próxima ao primeiro desbaste (TABELA 7) e idade próxima ao corte final (TABELA 8).

Tabela 7 – Ranqueamento da acurácia para os modelos de Schöpfer, Hradetzky e Kozak dos volumes estimados ao longo do fuste das árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao primeiro desbaste. (Continua...)

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Schöpfer	0,1	0,0033	0,0324	3,2455	0,3252	1	1	1	1	1	4
	0,7	0,0040	0,0400	2,2332	0,4018	1	1	1	1	1	4
	1,3	-0,0108	0,1073	1,6008	-1,0788	1	1	1	1	1	4
	2	0,0002	0,0023	1,2401	0,0231	1	1	1	1	1	4
	3	0,0159	0,1580	1,0158	1,5877	1	1	1	1	1	4
	4	0,0191	0,1891	0,8958	1,9107	1	1	1	1	1	4
	5	0,0116	0,1133	0,8049	1,1628	1	1	1	1	1	4
	6	-0,0006	0,0057	0,6015	-0,0611	1	1	1	1	1	4
	7	-0,0053	0,0453	0,5206	-0,5334	1	1	1	1	1	4
	8	0,0043	0,0304	0,3178	0,4305	1	1	1	1	1	4
	9	0,0001	0,0008	0,3162	0,0128	1	1	1	1	1	4
	10	-0,0065	0,0311	0,1367	-0,6485	1	1	1	1	1	4
	11	-0,0291	0,1089	0,1309	-2,9099	1	1	1	1	1	4
	12	-0,0293	0,0776	0,0889	-2,9344	1	1	1	1	1	4
13	0,0044	0,0088	0,0354	0,4412	1	1	1	1	1	4	
14	0,7100	1,0000	0,0600	7,2800	1	1	2	2	2	6	

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Total										64	
Hradetzky	0,1	-3,8953	38,7573	1649,7161	389,5255	3	3	3	3	3	12
	0,7	-0,7081	7,0451	58,8906	-70,8056	3	3	3	3	3	12
	1,3	-0,4484	4,4618	23,9701	-44,8430	2	2	2	2	2	8
	2	-0,3403	3,4034	13,9655	-34,0338	2	2	2	2	2	8
	3	-0,2884	2,8695	9,8625	-28,8393	2	2	2	2	2	8
	4	-0,2767	2,7396	8,8959	-27,6737	2	2	2	2	2	8
	5	-0,2826	2,7545	8,8543	-28,2603	2	2	2	2	2	8
	6	-0,2946	2,7631	8,6945	-29,4550	2	2	2	2	2	8
	7	-0,3039	2,5788	7,5446	-30,3911	2	2	2	2	2	8
	8	-0,3004	2,1243	5,0590	-30,0423	2	2	2	2	2	8
	9	-0,3186	1,9896	4,5023	-31,8589	2	2	2	2	2	8
	10	-0,3428	1,6439	3,0120	-34,2782	2	2	2	2	2	8
	11	-0,3864	1,4458	2,4208	-38,6398	3	3	3	3	3	12
	12	-0,4108	1,0869	1,4809	-41,0798	3	3	3	3	3	12
13	-0,3742	0,7484	0,7550	-37,4204	3	3	3	3	3	12	
14	-0,3936	0,5566	0,5271	-39,3553	3	3	3	3	3	12	
Total										152	

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Kozak	0,1	0,7209	7,1730	52,1693	72,0913	2	2	2	2	2	8
	0,7	0,6786	6,7523	46,2180	67,8629	2	2	2	2	2	8
	1,3	0,6338	6,3058	40,2838	63,3760	3	3	3	3	3	12
	2	0,5968	5,9682	36,0670	59,6817	3	3	3	3	3	12
	3	0,5564	5,5363	31,0447	55,6421	3	3	3	3	3	12
	4	0,5209	5,1571	26,9595	52,0948	3	3	3	3	3	12
	5	0,4873	4,7498	22,9106	48,7317	3	3	3	3	3	12
	6	0,4550	4,2685	18,5474	45,5020	3	3	3	3	3	12
	7	0,4259	3,6141	13,3630	42,5923	3	3	3	3	3	12
	8	0,4052	2,8654	8,4440	40,5231	3	3	3	3	3	12
	9	0,3796	2,3705	5,8364	37,9583	3	3	3	3	3	12
	10	0,3527	1,6917	3,0259	35,2742	3	3	3	3	3	12
	11	0,3208	1,2005	1,5831	32,0845	2	2	2	2	2	8
	12	0,2909	0,7697	0,7039	29,0923	2	2	2	2	2	8
13	0,2750	0,5501	0,3926	27,5028	2	2	2	2	2	8	
14	0,2171	0,3071	0,1843	21,7140	2	2	2	2	2	8	
Total										168	

(Conclusão)

Para as árvores com idade próxima ao primeiro desbaste (TABELA 7), o modelo de Schöpfer foi o mais acurado em todas as posições e o modelo de Hradetzky ficou em segundo lugar, em 67,5% das posições, perdendo para o modelo de Kozak nas duas alturas iniciais e nas quatro finais. A ordem dos modelos mais acurados foi: Schöpfer em primeiro lugar, Hradetzky em segundo e Kozak em terceiro.

Tabela 8 – Ranqueamento da acurácia para os modelos de Schöpfer, Hradetzky e Kozak dos volumes estimados ao longo do fuste das árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao corte final. (Continua...)

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Schöpfer	0,7	-0,1195	0,8018	2,8080	11,9533	1	1	1	1	1	4
	1,3	-0,0232	0,1555	2,0262	-2,3185	1	1	2	1	1	5
	2,3	-0,0690	0,3379	0,3788	-6,8965	1	1	1	1	1	4
	3,3	0,0028	0,0189	2,3732	0,2758	1	1	2	1	1	5
	4,3	-0,0296	0,1389	0,1394	-2,9614	1	1	1	1	1	4
	5,3	0,0420	0,2557	2,6112	4,2042	2	2	2	2	2	8
	6,3	-0,0265	0,1214	0,1275	-2,6488	1	1	1	1	1	4
	7,3	0,0689	0,3582	3,3362	6,8942	2	2	2	2	2	8
	8,3	-0,0116	0,0329	0,0410	-1,1625	1	1	1	1	1	4
	9,3	-0,0077	0,0188	0,0436	-0,7658	1	1	1	1	1	4

Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos					
		D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
Total										50	
Hradetzky	0,7	-0,3347	2,2454	6,1277	33,4727	2	2	2	2	2	8
	1,3	-0,1419	0,9517	1,7471	14,1869	2	2	1	2	2	7
	2,3	-0,1261	0,6177	0,6891	12,6097	2	2	2	2	2	8
	3,3	-0,0666	0,4566	0,8937	-6,6601	2	2	1	2	2	7
	4,3	-0,0688	0,3227	0,2444	-6,8804	2	2	2	2	2	8
	5,3	-0,0293	0,1780	0,3522	-2,9262	1	1	1	1	1	4
	6,3	-0,0553	0,2534	0,1920	-5,5291	2	2	2	2	2	8
	7,3	-0,0164	0,0854	0,2448	-1,6437	1	1	1	1	1	4
	8,3	-0,0330	0,0934	0,0534	-3,3025	2	2	2	2	2	8
	9,3	-0,0276	0,0677	0,0497	-2,7642	2	2	2	2	2	8
Total										70	
Kozak	0,7	0,6663	4,4700	20,4889	66,6344	3	3	3	3	3	12
	1,3	0,6712	4,5027	20,7858	67,1218	3	3	3	3	3	12
	2,3	0,6307	3,0900	9,9805	63,0739	3	3	3	3	3	12
	3,3	0,6144	4,2120	18,2086	61,4382	3	3	3	3	3	12
	4,3	0,5977	2,8035	8,2283	59,7701	3	3	3	3	3	12
	5,3	0,5858	3,5631	13,0692	58,5764	3	3	3	3	3	12

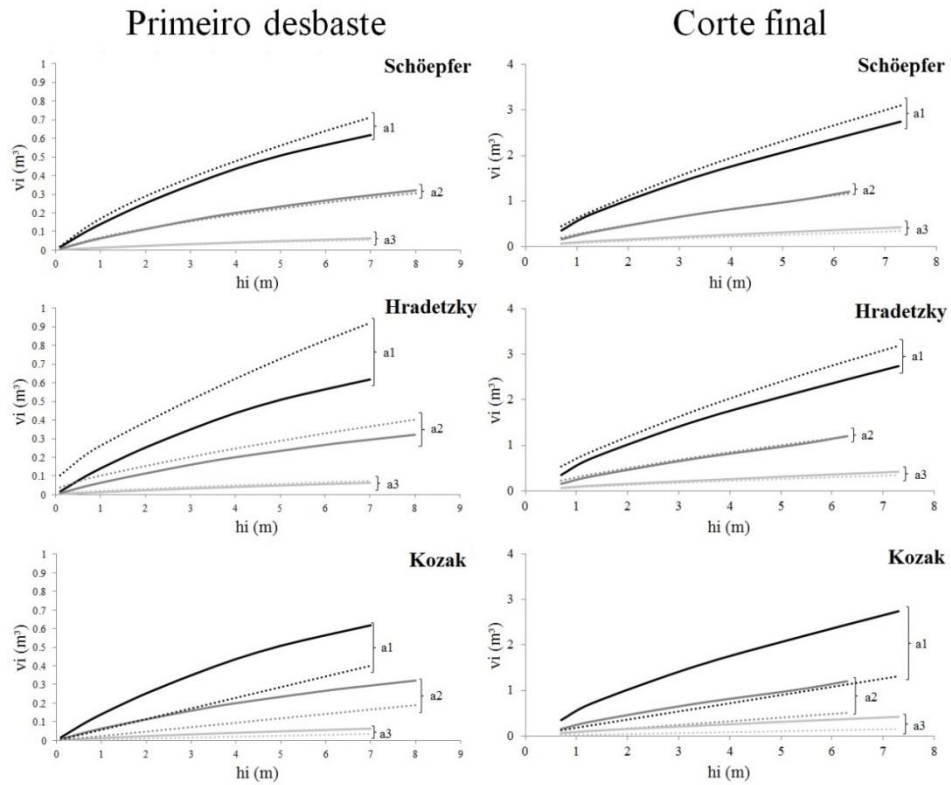
Modelo	hi	Estatísticas de acurácia				Ranqueamento dos pesos				
Schöepfer	D	SD	SSRR	RP	D	SD	SSRR	RP	Nota	D
	6,3	0,5610	2,5711	6,9418	56,1049	3	3	3	3	12
	7,3	0,5546	2,8818	8,6418	55,4596	3	3	3	3	12
	8,3	0,5392	1,5250	2,6226	53,9185	3	3	3	3	12
	9,3	0,5182	1,2693	1,8865	51,8175	3	3	3	3	12
Total										120

(Conclusão)

A Tabela 8 mostra que a ordem geral de acurácia dos modelos permanece a mesma para as árvores com idade próxima ao corte final. O modelo de Schöepfer aparece como o mais acurado em quase todas as posições, perdendo para o modelo de Hradetzky apenas nas alturas de 5,3 e 7,3 m, que ficou em segundo em todas as outras posições do fuste, deixando o modelo de Kozak sempre como o menos acurado em relação aos demais.

A Figura 5 ilustra os volumes reais obtidos pelo método de Smalian após a cubagem e os estimados pelos três modelos ao longo do fuste. Foram utilizadas as mesmas árvores representadas na Figura 4. Assim como na estimativa de diâmetro, as árvores com menor d e d médio apresentaram volumes estimados mais próximos do real para os modelos de Schöepfer e Hradetzky. As árvores com maior d foram melhores estimadas por Schöepfer, porém, Hradetzky também apresentou um bom resultado para essa árvore na idade próxima ao corte final. O modelo de Kozak apresentou resultados inferiores em relação aos demais, subestimando os volumes para as árvores de maior d e d médio.

Figura 5 – Volumes reais (linha sólida) e estimados (linha tracejada) até a altura do fuste de árvores de *Khaya ivorensis* com idade próxima ao primeiro desbaste e próxima ao corte final. Em que: v_i = volume em m^3 localizado a uma altura i do fuste. a_1 ; a_2 ; a_3 ; h_i = definidos anteriormente.



4 DISCUSSÃO

A cubagem indireta das árvores não permitiu a mensuração dos diâmetros ao longo dos galhos e, como as árvores utilizadas apresentavam copas grandes e densas, as informações foram insuficientes para gerar uma estimativa do volume total, principalmente para as árvores maiores. Informações sobre volume total das árvores para esses mesmos dados podem ser obtidas no estudo de Oliveira (2017). Os modelos recomendados para estimativas de diâmetros e volumes nas duas idades (primeiro desbaste e corte final) foi Schöepfer, que é amplamente utilizado nos estudos com *Araucária angustifolia* (FIGUEIREDO FILHO et al., 2015), *Tectona grandis* (FAVALESSA et al., 2012), *Eucalyptus camaldulensis* (RIBEIRO; ANDRADE, 2016) e *Pinus taeda* (YOSHITANI JUNIOR et al., 2012), dentre outras espécies. Esse estudo contribui para o estabelecimento e incentivo de plantios de *Khaya ivorensis* no país, uma vez que não há outras publicações que abordem informações quantitativas de afilamento nessas condições.

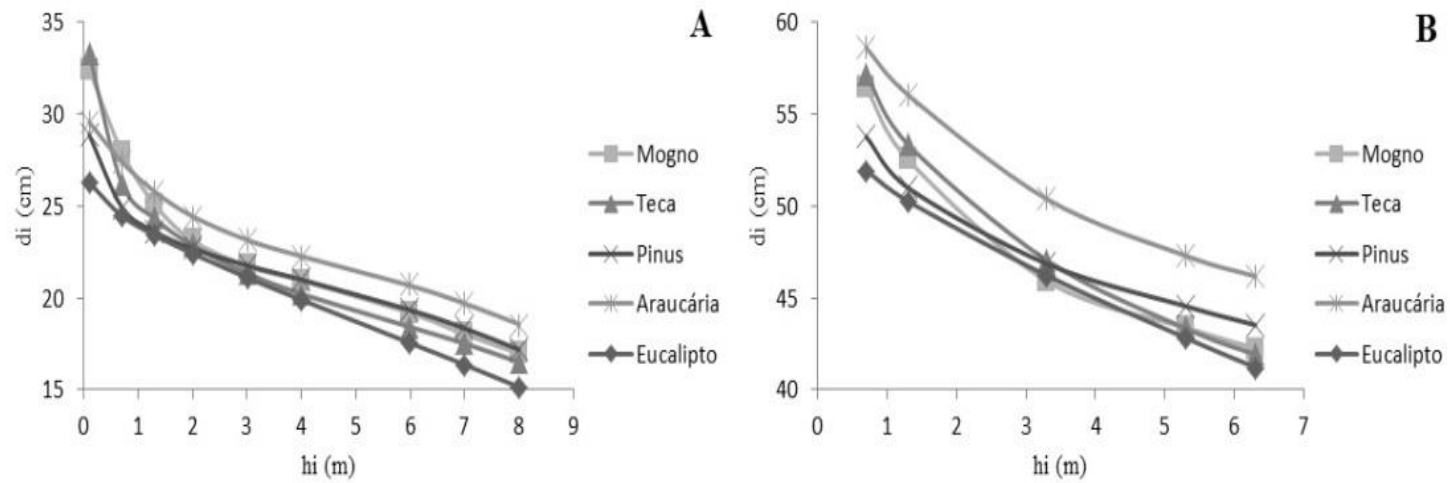
Os dendrômetros ópticos foram desenvolvidos para permitir a estimativa de diâmetros em diferentes alturas da árvore sem a necessidade de práticas mais onerosas, como o abate ou escalada da árvore (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). Essa mensuração indireta é recomendada em plantios com espécies de alto valor, como o mogno africano. Com a evolução tecnológica dos dendrômetros surgiu o Criterion RD 1000 (NICOLETTI et al., 2012). Outros estudos verificaram erros mínimos na mensuração do diâmetro (RODRIGUEZ et al., 2016) e na obtenção de modelos de estimativa de volume (NICOLETTI et al., 2015) com esse aparelho e Costa et al. (2016) utilizaram do mesmo para cubar oitenta e cinco árvores de *Araucaria angustifolia* e gerar funções de afilamento.

O fuste das árvores próximas ao corte final (14 – 15 anos) apresentou um afilamento maior em comparação com as árvores próximas ao primeiro desbaste (7 anos), ao contrário do que se espera com a melhoria da forma do fuste ao longo do tempo, como foi visto por Téo et al. (2013) em que os fustes de *Pinus taeda* com as idades de 5, 6, 7 e 21 anos foram mais cônicos em árvores mais jovens e por Queiroz et al. (2006), que ao analisar a forma do fuste de *Mimosa scabrella* com idade variando de 6 a 19 anos, concluiu que há influência do aumento da idade na diminuição do afilamento. No entanto, Maestri et al. (2005) relatam que árvores dispostas em plantios menos adensados dispõem de maior liberdade para o desenvolvimento de copas, exigindo do tronco uma estrutura física que compense os esforços aos quais as árvores são submetidas e, devido a isso, em seu estudo concluiu que árvores de eucalipto conduzidas sob o manejo multiproduto (espaçamento menos adensado) foram mais cônicas em comparação aos plantios mais adensados, manejados para celulose, apresentando respectivamente, taxas de decréscimo em diâmetro de 1,10 cm/m e 0,71 cm/m, considerando diâmetros tomados nas alturas de 1,3 m e 4,15 m. Valério et al. (2007) avaliaram o fator de conicidade médio de toras com comprimento de 3,5 a 4 m, oriundas de povoamentos de *Araucaria angustifolia*. O afilamento das toras com casca mostrou-se crescente da menor classe diamétrica (20,0 - 27,9 cm) para a maior classe (> 60 cm), variando de 1,29 a 3,53 cm/m, ou seja, valores bem próximos ao encontrado neste estudo para árvores de *Khaya ivorensis* próximas ao corte final (1,25 a 3,33 cm/m).

O afilamento do mogno foi comparado ao afilamento de outras espécies na Figura 6, sendo elas: teca (FAVALESSA et al., 2012), pinus (ASSIS et al., 2002), araucária (FIGUEIREDO FILHO et al., 2015) e eucalipto (MIGUEL et al., 2011). O modelo utilizado para araucária foi Schöpfer e, para as outras três espécies, foi utilizado Hradetzky. Tanto para a árvore com $d = 25,1$ cm (FIGURA 6A) quanto para a árvore com $d = 52,1$ cm (FIGURA 6B), a araucária

se apresentou como a menos afilada, pois os dados utilizados no estudo contemplavam árvores mais velhas de um plantio de 30 anos. A espécie que teve o afilamento mais próximo ao do mogno foi a teca, apresentando um alto decréscimo em diâmetro até a altura de 2 metros, principalmente para a árvore menor (FIGURA 6A). O eucalipto e o pinus apresentaram comportamento semelhante, com a diferença de que o pinus apresenta um decréscimo mais intenso de diâmetro no primeiro momento, mas depois se mostra mais cilíndrico que o eucalipto.

Figura 6 - Diâmetros estimados até a altura do fuste de árvores para árvores de mogno, teca, pinus, araucária e eucalipto com $d = 25,1$ cm e $h = 15,7$ m (A) e $d = 52,1$ cm e $h = 24,5$ m (B).



5 CONCLUSÃO

A cubagem indireta realizada com o Criterion RD 1000, não apresentou diferença estatística significativa em relação à cubagem direta das 10 árvores abatidas, tanto na comparação entre os diâmetros quanto na comparação entre os volumes totais obtidos pelas duas formas, afirmando a precisão do método.

Os modelos de Schöpfer, Hradetzky e Kozak apresentaram bons ajustes e foram menos eficientes para estimar diâmetros e volumes ao longo do fuste de árvores maiores. O modelo de Kozak estimou satisfatoriamente os diâmetros, mas apresentou baixa acurácia para estimar volumes. Apesar de que o Hradetzky tenha sido menos acurado nas posições iniciais e finais do fuste, ele apresentou resultados acurados para estimar diâmetros e volumes. Porém, de forma geral, o modelo de Schöpfer foi o mais acurado, e então, o selecionado neste estudo, para estimar o volume de fuste das árvores com idade próxima ao primeiro desbaste e ao corte final.

As árvores próximas ao corte final se apresentaram mais cônicas do que as árvores próximas ao primeiro desbaste e, ao estratificar essa informação em classes de diâmetro, verificou-se que para as duas idades, há um aumento na conicidade com o aumento da classe diamétrica.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ASSIS, A. L.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação de modelos polinomiais não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, v. 12, n.1, p. 89-107, 2002.
- BORBA, M. C. V.; NAKANO, E. Y. Uma alternativa para avaliar discordância entre duas medidas via modelo de regressão linear simples sem intercepto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 37, n. 2, p. 41-50, 2016.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; HESS, A. F. Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 523-533, 2016.
- FAVALESSA, C. M.; UBIALLI, J. A.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. Equações de sortimentos para *Tectonagrandis* na região centro-sul de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 72, p. 389-399, 2012.
- FERREIRA, G. W. D.; FERRAZ FILHO, A. C.; PINTO, A. L. R.; SCOLFORO, J. R.; S. Influência do desbaste na forma do fuste de povoamentos naturais de *Eremanthusincanus*(Less.) Less. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 1707-1720, 2014.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taperequations for *Pinus taeda* in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 83, n. 1, p. 39-46, 1996.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; KOHLER, S. V; BECKER, M.; BRANDES, D. Efeito da Idade no Afilamento e Sortimento em Povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 1, p. 50-59, 2015.

FIGUEIREDO, E. O.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectonagrandis* L.f. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 4, p. 465-482, 2006.

FRIEDL, R. A. **Dinâmica e prognose da forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 1989. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. "Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations". **New Zealand Journal of Forest Science**, v. 5, n. 3, p. 313-322, 1976.

HRADETZKY, J. **Analyse und interpretation statistischer Abhängigkeiten. (Biometrische Beiträge zu aktuellen Forschungsprojekten).** Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 1976. 146 p.

KOHLER, S. V. **Evolução do afilamento do tronco e do sortimento em plantios de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina.** 2013. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. "Taper functions and their application in forest inventory. **Forest Chronicle**, v. 45, n.4, p.278-283, 1969.

LARSON, P. R. Stem form development of forest trees. **Forest Science**, Bethesda, Monograph 5, 1963. 42 p.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria.** 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2009. 316 p.

MAESTRI, R.; NUTTO, L.; SARTORIO, R. C. Ganhos tecnológicos na produção de madeira Reflorestada sob manejo. SEMINÁRIO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO – SIF, 3., **Anais...** p.1-19, 2005.

MAYRINCK, R. C.; RIBEIRO, A.; LIMA, R. R.; SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Volume equations for *Khayaivorensis* A. Chev. plantations in Brazil. **Journal of Tropical Forest Science**. (No prelo).

MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptusurophyllana* região norte do estado de Goiás. **Floresta**, v. 41, n. 2, p. 355-368, 2011.

MUGASHA, W. A.; MWAKALUKWA E. E.; LUOGA, E.; MALIMBWI, R. E.; ZAHABU, E.; SILAYO, D. S.; SOLA, G.; CRETE, P.; HENRY, M.; KASHINDYE, A. Allometric Models for Estimating Tree Volume and Aboveground Biomass in Lowland Forests of Tanzania. **International Journal of Forestry Research**, p.1-14, 2016.

NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; BATISTA, J. L. F. Revisão bibliográfica sobre métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 20, n. 1, p.102-116, 2012.

NICOLETTI, M. F.; SILVA, E.; FLORIANI, M. M. P. Metodologia não destrutiva para quantificação do volume e biomassa do fuste em remanescente florestal. **Nativa**, v. 3, n. 2, p. 287-291, 2015.

OLIVEIRA, X. M. **Modelos volumétricos e de afilamento para mogno africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) nos estados de Minas Gerais e Pará, Brasil**. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

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

PINHEIRO, L. P.; COUTO, L.; PINHEIRO, D. T.; BRUNETTA, J. M. F. C. **Ecologia, silvicultura e tecnologia de utilização dos mognos africanos (*Khaya spp.*)**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Agrossilvicultura- SBAG, 2011. 102 p.

QUEIROZ, D.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Avaliação e validação de funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, v. 36, n. 2, 2006.

R Core Team 2016. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. URL <http://www.Rproject.org/>, Viena.

RIBEIRO, J. R.; ANDRADE, V. C. L. Equações de Perfil do Tronco para *Eucalyptuscamaldulensis* Dehn no Centro-sul Tocantinense. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 4; p.534-543, 2016.

RODRIGUEZ, F.; LIZARRALD, I.; FERNANDEZ-LANDA, A.; CONDÉS, A. Non-destructive measurement techniques for taper equation development: a study case in the Spanish Northern Iberian Range. **European Journal of Forest Research**, v. 133, n. 2, p. 213–223, 2014.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais. Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1, p. 1-7, 2012.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, Sorten und WertberechnungstenenderWaldbeständeSchriftenreihe Bad.** Berlin: Wurttemberg-Forstl., 1966. n. p.

SCOLFORO, J. R. S.; FERRAZ FILHO, A. C. Silvicultura e Manejo das Espécies Madeireiras. In: Coelho, L.; Nascimento, A. R. T.; Lemes, E. M. (Org.). **Espécies nobres do Cerrado I – Silvicultura e Perspectivas de Produção**. 1. ed. Uberlândia: Comoser, 2014. p. 11- 24.

SILVA, L. F.; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. P. Equações hipsométricas volumétricas e de crescimento para *Khaya ivorensis* plantada em Pirapora. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 3, p. 362-368, 2016.

TÉO, S. J.; MARCON, A.; EHLERS, T.; BIANCHI, J. C.; PELOSO, A.; NAVA, P. R.; COSTA, R. H. Modelos de afileamento para *Pinus elliottii* em diferentes idades, na região de Caçador, SC. **Floresta**, v. 43, n. 3, p. 439-452, 2013.

VALÉRIO, A. F.; WATZLAWICK, L. F.; SANTOS, R. T. dos; BRANDELERO, C.; KOEHLER, H. S. Quantificação de resíduos e rendimento no desdobro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze. **Floresta**, v. 37, n. 3, p.387-398, 2007.

YAHYA, A. Z.; MAHAT, M. N.; RASIP, A.; GHANI, A. Growth of plantation grown *Khayaivorensis* in peninsular Malaysia. **Journal of Tropical Forest Science**, v.11, n. 4, p. 849-851, 1999.

YOSHITANI JUNIOR, M.; NAKAJIMA, N. Y.; ARCE, J. E.; MACHADO, S. A.; DRUSZCZ, J. P.; HOSOKAWA, R. T.; MELLO, A. A. Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 42, n. 1, p. 169-176, 2012.

Esse artigo será submetido à revista *Árvore*, atendendo as normas de formatação da mesma. Contou com a colaboração dos seguintes co-autores: Antonio Carlos Ferraz Filho, Rafaella Carvalho Mayrinck, Andressa Ribeiro e Renato Ribeiro de Lima.