

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

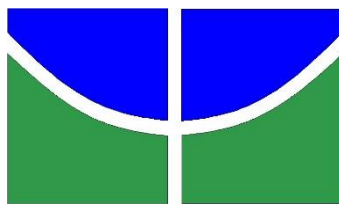
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Comprimento ótimo das seções na cubagem rigorosa de árvores de
Eucalipto para ajuste de modelos volumétricos e de *taper***

PEDRO FARIA LOPES

Brasília – DF, 09 de julho de 2014.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Comprimento ótimo das seções na cubagem rigorosa de árvores de
Eucalipto para ajuste de modelos volumétricos e de *taper***

Estudante: Pedro Faria Lopes, matrícula 10/04042

RG: 2.595.110 – SSP – DF

CPF: 028.686.671-47

Orientador: Prof. Renato Vinícius Oliveira Castro

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília – DF, 09 de julho de 2014.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**Comprimeto ótimo das seções na cubagem rigorosa de árvores de
Eucalipto para ajuste de modelos volumétricos e de *taper***

Estudante: Pedro Faria Lopes, matrícula 10/04042


Orientador: Prof. Renato Vinícius Oliveira Castro

Menção: SS

Aprovada por:



Dr. Mauro Eloi Nappo
Engenheiro Florestal
DEF/UnB
Presidente da Banca



Dr. Ricardo de Oliveira Gaspar
Engenheiro Florestal
DEF/UnB
Membro da banca



Milton Serpa de Meira Junior
Engenheiro Florestal – UFVJM
Membro da banca

Brasília, 09 de julho de 2014

Agradecimentos

Agradeço ao Universo.

Graças e Louvores a todos os seres espirituais que me acompanham nesta jornada terrena.

Gratidão aos Messias, seres na condição de Buda, Profetas, Pajés, Shamans e Druidas que, com sua sabedoria, nos auxiliam a trilhar o caminho da retidão.

Máximo respeito ao Leão Conquistador da Tribo de Judá, Haile Selassie I Jah Rastafari e a Marcus Mosiah Garvey, por seus ensinamentos e ideais de Igualdade e Justiça.

Gratidão à Santa Maria e seu amor.

Agradeço, sem encontrar as palavras certas,

À minha Família

Ester Aparecida Faria e Zemir Lopes Nascimento, minha origem.

À minha Companheira Mayara Bernardo Albuquerque e meu filho Ravi, pela emoção indescritível de ser pai, e por me permitirem sonhar junto.

Aos meus avós Eurípedes Mariano de Faria e Leila Coelho, pelo exemplo de trabalho, perseverança e retidão.

Ao meu tio Estevão pela sinceridade nos momentos mais importantes.

À minha tia Fátima pela iniciação na ciência do autoconhecimento.

Agradeço aos estudantes egressos, da Universidade de Brasília, Juan Sugasti e Luiz Gustavo Peirrut Pedrosa, por terem falado sobre os Sistemas Agroflorestais Sucessionais Biodiversos, na aula de IEF, quando eu estava no 1º semestre do curso.

Agradeço de todo o coração ao agricultor, pesquisador Ernst Götsch pelos inúmeros ensinamentos, pelas verdades ditas, pelo exemplo de vida e por me ajudar a encontrar um sentido para a vida. Mudou completamente o meu modo de compreender a natureza.

“Porque a vida não é uma conserva, vida é fluxo”

Ernst Götsch

Agradeço à todos os colegas da UnB, especialmente da Engenharia Florestal que fizeram parte dessa caminhada. É impossível escrever todos os nomes, os aprendizados, as trocas, as festas, as músicas, as emoções, as viagens, as sementes plantadas, os grupos de estudos.

Tenho todos em meu coração!

Agradeço aos funcionários da UnB, especialmente a Paula, ao Chiquinho, e ao Itamar.

Agradeço à todos os professores da Universidade de Brasília que me propiciaram essa graduação.

Gratidão ao Professor Renato Vinícius Oliveira Castro, pela paciência, profissionalismo e apoio durante a orientação desde trabalho.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, por mais que não tenha me lembrado nesse momento fizeram parte da minha caminhada como estudante, até este momento, Jah sabe o quanto foram importantes!!

Nas alturas de Sião!

“A enxada também é uma espada,

assim como

a espada é também uma enxada.

*Na lavoura não se esqueçam da rebelião,
mas rebelados, não se esqueçam da lavoura.*

Dispersos, voltem sempre a unir-se.

E lembre-se ainda:

Os caminhos do mundo não podem ser contrariados. ”

Miyamoto Musashi

RESUMO

O eucalipto é amplamente utilizado nos florestamentos para aproveitamento como fonte energética (energia da biomassa), produção de celulose, chapas, construção civil e madeira serrada, destacando-se o uso dos multiprodutos florestais. A necessidade de boas estimativas de volumes comerciais nos cultivos florestais tem despertado o interesse pelo uso das funções de afilamento. Com o intuito de testar diferentes comprimentos de seções na cubagem rigorosa, foram selecionados 60 indivíduos para a cubagem rigorosa, pelo método destrutivo. As árvores foram selecionadas ao acaso, respeitando um número de 10 árvores por cada classe de diâmetro, sendo as classes de diâmetro: 8+10, 10+12, 12+14, 16+18, 18+20 e 20 + 22 cm, esses diâmetros foram medidos no DAP. Os diâmetros com casca foram medidos com suta a cada 0,25 m, até a altura comercial (diâmetro igual a 4 cm), além do DAP. Após a cubagem foram selecionadas aleatoriamente 40 árvores de forma proporcional em cada classe diamétrica para ajuste dos modelos volumétricos e de *taper*, para cada um dos cinco métodos de amostragem referente aos comprimentos de seções. As 20 árvores restantes foram utilizadas na validação do modelo volumétrico e do modelo de *taper*. Para verificar o efeito do comprimento das seções durante a cubagem, na qualidade dos modelos volumétricos e de *taper*, foram avaliados cinco diferentes métodos, com combinações de comprimentos de seções, sendo que o método A é o método consagrado de CAMPOS e LEITE, 2013, e os métodos B, C e D diminuem gradativamente as seções utilizadas até o modelo E, que representa o maior esforço de cubagem, com as menores seções. Foi utilizado o modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933) linearizado e o modelo de afilamento utilizado foi o de Demaerschalk (1972). O teste *t* para amostras dependentes, para os modelos volumétricos, não mostrou diferença significativa para nenhum método de amostragem, portanto o método de amostragem A (menor esforço amostral), foi considerado a melhor alternativa. Para os modelos de afilamento os métodos B, C e E apresentaram diferença significativa pelo teste *t* para amostras dependentes, e somente os métodos A e D foram validados. O método A foi escolhido como a melhor alternativa por representar o menor esforço de coleta e os demais modelos não apresentaram ganhos que justifiquem o aumento do esforço de cubagem.

Palavras – chave: Função de afilamento, Eucalipto, Schumacher e Hall e Demaerschalk.

ABSTRACT

Eucalyptus is widely used in forestation because of its use as an energy source (biomass energy), pulp production, plates, construction and lumber, highlighting the use of forest multiproducts. The need for good estimates of trade volumes on forest crops has raised interest in the use of taper functions. In order to test different lengths of sections in cubing, 60 individuals were selected for cubing by the destructive method. The trees were selected randomly, observing a number of 10 trees per diameter class, and the diameter classes are: 8 + 10, 10 + 12, 12 + 14, 16 + 18, 18 + 20 and 20 + 22 cm, these diameters were measured at the DAP (1,30 m). The diameters, including the bark, were measured with calipers every 0.25 m, to the commercial height (diameter of 4 cm), including the DAP. After cubing 40 trees were randomly selected, in a proportional way, in each diameter class of volumetric models for the adjustment of the volumetric and taper models, the remaining 20 trees were used in the validation of the volumetric model and taper models. To verify the effect of the length of the sections during the scaling, at quality of volumetric and taper models, five different methods were evaluated with combinations of lengths of sections. The A method is the established method of CAMPOS e LEITE, 2013 and B, C and D methods gradually decrease the sections length until E method, which represents the largest effort in cubing, with smaller sections. The models that were used were the linearized volumetric model of Schumacher and Hall (1933) and the Demaerschalk (1972) taper model. The *t* test for dependent samples showed no significant difference for any volumetric model. The A method was considered the best alternative because it's already established in the consulted literature, and it represents the less cubing effort. For the taper models B, C and E methods showed significant difference by *t* test for dependent samples, and only A and D methods were validated. Method A was chosen as the best alternative for representing the lowest collection effort, the other models showed no gains that justify increasing the cubing effort.

Key – words: Taper function, eucalyptus, Schumacher e Hall e Demaerschalk.

Sumário

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Introdução | 1 |
| 2. | Revisão de Literatura | 2 |
| 2.1 | O eucalipto..... | 2 |
| 2.2 | Cubagem e <i>taper</i> | 4 |
| 3. | Material e Métodos | 6 |
| 4. | Resultados e Discussão | 9 |
| 4.1 | Equações Volumétricas – Ajuste..... | 9 |
| 4.2 | Equações Volumétricas – Validação | 11 |
| 4.3 | Taper – Ajuste | 13 |
| 4.4 | Taper - Validação | 17 |
| 5 | Conclusões | 19 |
| 6 | Considerações Finais | 19 |
| 7 | Bibliografia | 20 |

1. Introdução

As vegetações nativas remanescentes no mundo não suportam mais a demanda irracional por recursos florestais. Neste contexto as florestas plantadas são uma alternativa à exploração impensada de florestas nativas.

As florestas plantadas suprem grande parte da demanda por madeira, principalmente a madeira destinada para produção de celulose e de energia. O gênero *Eucalyptus* é extremamente importante, pois se desenvolve rápido, quando comparado com outros gêneros, sendo utilizado para produção de energia, produção de celulose, aglomerados, postes de cercas, estacas para escoramentos em construções civis e para obtenção de madeira serrada, dentre outros usos.

A produtividade florestal aumentou por diversos motivos, colocando o Brasil como destaque na silvicultura mundial. Entre eles, os avanços tecnológicos ocorridos ao longo das últimas décadas, principalmente voltados ao melhoramento florestal. As condições edafoclimáticas favoráveis permitiram ao Brasil obter o produto final com rotação mais curta em relação aos países de clima temperado. Isso fez com que os produtos de origem florestal se tornassem competitivos no mercado externo (SANTOS, 2010).

Nesse contexto de busca por aumento de produtividade, uma tarefa importante para o manejo florestal é a estimação do volume de madeira estocada nas florestas. Tradicionalmente se recorre a técnicas de cubagem rigorosa de árvores-amostra, acompanhada de ajuste de modelos volumétricos, para estimar o volume comercial. Estas técnicas estão consolidadas para estimar volume de árvores tanto em áreas de produção (empresas) quanto em pesquisas florestais. Entretanto, esses modelos não possibilitam a quantificação de sortimentos (multiprodutos). O sortimento possibilita identificar diferentes produtos que os povoamentos florestais podem oferecer (SOARES, 2002).

A modelagem do afilamento do fuste – *taper*– consegue representar a relação do diâmetro para qualquer altura, medida ou não. A integral de um modelo de afilamento permite estimar o volume entre quaisquer segmentos ao longo do fuste (sortimento) e, desse modo, pode-se maximizar o aproveitamento de uma árvore e, conseqüentemente, de um povoamento florestal (SOUZA et al., 2008a). A forma do tronco das árvores, e os diferentes volumes para múltiplos fins são básicos nos estudos de planejamento e de viabilidade econômica (ANGELO et al., 1997).

Diversos modelos matemáticos têm sido propostos e empregados para exprimir o perfil do fuste, contemplando as variações de forma, segundo a espécie. O melhor modelo depende dos objetivos, ou seja, enquanto determinado modelo tem melhor performance para estimar diâmetros (d) ao longo do fuste, ele pode não ser o melhor para calcular alturas comerciais (h) e volumes (V) (CAMPOS e LEITE, 2013). A maioria dos modelos de *taper* não descreve todo o fuste com a mesma precisão. Por exemplo, a estimativa do volume geralmente é de baixa precisão na região entre o nível do terreno até o DAP (CAMPOS e LEITE, 2013) e na parte superior da árvore, próxima à ponteira. Os pesquisadores e técnicos das empresas florestais utilizam, para árvores de Eucalipto, o método de cubagem pelo método destrutivo, que trata da derrubada das árvores-amostra e medição dos diâmetros na base (0m), e nas alturas de 0,50 m, 1 m, no DAP (1,3 m), 2 m e, em seguida, a cada 2 m até um diâmetro mínimo comercial (em torno de 4 cm).

A região entre o nível do solo e o DAP é a região com maior valor agregado das toras, no entanto é a região com menor precisão nas estimativas de volume e é uma região que apresenta, proporcionalmente, um número baixo de medições, em relação a árvore inteira.

Com base no exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o comprimento ótimo de cubagem para a determinação dos modelos volumétricos e de *taper*, verificar se reduzindo o comprimento das seções de cubagem, existe uma melhoria da qualidade dos modelos volumétricos e de *taper* para a estimação do volume total, comercial e de multiprodutos de árvores de *Eucalyptus*, especialmente para a região da base (0m) até o *dap*.

2. Revisão de Literatura

2.1 O eucalipto

O mundo está tendo a sua cobertura vegetal reduzida, devido à pressão que os seres humanos exercem. Como uma alternativa à exploração madeireira de vegetações nativas, as florestas plantadas vêm ganhando cada vez mais espaço. O setor industrial de base florestal tem sido marcado por um processo de utilização crescente de madeiras provenientes de florestamento, o que coloca o Brasil em sintonia com a ordem mundial, que enfatiza a preservação das florestas naturais e incentiva a implantação de florestas renováveis (SOARES et al., 2003).

Atualmente há um aumento da fiscalização na tentativa de reduzir as pressões sobre as florestas nativas, mas por outro lado o consumo de madeira é crescente. Com isso, o

Eucalipto, engloba três gêneros da família Myrtaceae, é uma alternativa viável para abastecer este mercado devido, principalmente, ao seu rápido crescimento e às tecnologias silviculturais já desenvolvidas para sua produção (CARVALHO, 2010).

Os projetos de florestamento no Brasil tiveram início com a introdução do eucalipto em 1904 (SOARES et al., 2003). O Programa de Incentivos Fiscais, iniciado no final da década de 60, proporcionou ao setor florestal brasileiro uma significativa expansão, resultando no aumento considerável das áreas plantadas com eucalipto (MURTA-JÚNIOR, 2013). Aliado a isso, um fato que marcou a silvicultura brasileira, foi a Lei 5.106 de 1966 que instituiu os incentivos fiscais, dando grande impulso para o crescimento da área de florestas plantadas (SANTOS, 2010). A pesquisa florestal foi importante neste processo, em particular quanto ao melhoramento genético de espécies de eucalipto, aumentando a eficiência na formação de híbridos altamente produtivos.

No ano de 2012, a área plantada com espécies de eucalipto totalizou 5.102.030 hectares, 76,6% da área total de florestas plantadas no Brasil, e o Valor Bruto da Produção Florestal estimado para florestas plantadas correspondeu a R\$ 56,3 bilhões, neste mesmo ano. Estima-se que o setor florestal manteve 4,4 milhões de postos de empregos, incluindo empregos diretos (0,6 milhão), empregos indiretos (1,3 milhões) e empregos resultantes do efeito-renda (2,4 milhões) (ABRAF, 2013).

O Brasil tornou-se ainda mais competitivo economicamente no setor florestal, pois as condições edafoclimáticas e fundiárias, aliadas aos fatores política de investimento em pesquisa e desenvolvimento, verticalização do setor e qualidade de mão de obra empregada, proporcionam uma maior produtividade por hectare e, conseqüentemente, um menor ciclo de colheita para os plantios florestais estabelecidos no Brasil, em relação aos demais países produtores (ABRAF, 2013).

A madeira de eucalipto, por sua vez, é amplamente utilizada nos florestamentos e reflorestamentos para aproveitamento como fonte energética (energia da biomassa), produção de celulose, aglomerado, construção civil e madeira serrada, destacando-se o uso dos multiprodutos florestais (MÔRA, 2011).

Diante desse contexto, aumenta-se a necessidade da realização de trabalhos que visem uma administração mais eficiente dos recursos florestais, ou seja, que busquem um maior e melhor aproveitamento da matéria-prima e conseqüente aumento no retorno econômico do

empreendimento a partir da agregação de valores aos produtos possíveis de serem obtidos (LEITE et al., 2011).

2.2 Cubagem e *taper*

A cubagem consiste na realização de medidas sucessivas dos diâmetros ao longo do fuste de árvores, para a quantificação de volume. Elas podem ser derrubadas ou escaladas para a realização destas medidas. O método de medição mais empregado consiste na medição do diâmetro na base (0m), e nas alturas de 0,50 m, 1 m, no DAP (1,3 m), 2 m, e em seguida, a cada 2 m até um diâmetro mínimo comercial (em torno de 4 cm) (CAMPOS e LEITE, 2013) (Figura 1).

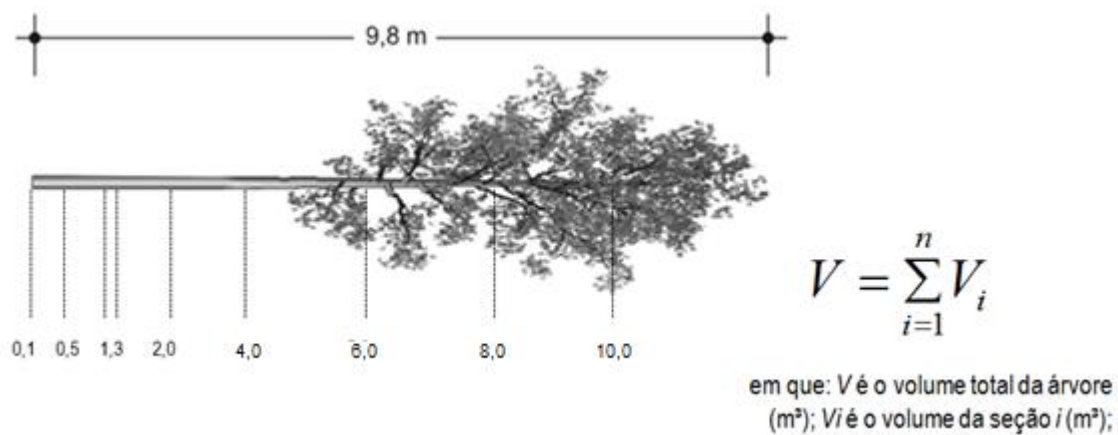


Figura 1. Método de medição as árvores na cubagem rigorosa. Adaptado de Campos e Leite (2013).

O fuste das árvores apresenta formas bastante variáveis, modificando-se de acordo com a espécie e até mesmo dentro da mesma espécie. A forma varia de indivíduo para indivíduo, conforme as condições edafoclimáticas, os tratamentos silviculturais e a posição sociológica em que cada árvore se desenvolve (MÔRA, 2011).

No processo de cubagem, é importante que sejam levados em consideração os fatores que influenciam a forma das árvores. Devido a isso, é importante definir os estratos de cubagem (MURTA-JÚNIOR, 2013). Na prática, quanto maior o número de estratos, maior a precisão, porém maior é também o custo de amostragem devido ao aumento do número de árvores para suficiência amostral em cada estrato (OLIVEIRA et al., 2009).

A frequência dos dados de cubagem está diretamente relacionada com a variação em diâmetro e forma das árvores da população. Para melhor atendimento dessa variação, as árvores-amostra devem abranger todas as classes de diâmetro (DAP) a partir de um diâmetro mínimo especificado, observando-se, de preferência, a mesma frequência por classe (CAMPOS e LEITE, 2013).

A necessidade de boas estimativas de volumes comerciais nos cultivos florestais tem despertado o interesse pelo uso das funções de afilamento. Essas funções permitem a estimativa do diâmetro em uma altura qualquer do fuste, da altura comercial para um dado diâmetro, ou, ainda, do volume até um diâmetro mínimo qualquer. Resultados mais elaborados de inventário têm sido obtidos, enriquecendo a tradicional informação de volume total e volume por unidade de área (YOSHITANI JUNIOR et al., 2012).

Normalmente, para se estimar o volume de árvores individuais são empregadas equações de volume ou de afilamento de fuste (*taper*) que dependem de dados de cubagem para serem geradas (MURTA-JÚNIOR, 2013). Os modelos de *taper* buscam descrever o afilamento do fuste conforme a altura cresce, e a integral da equação permite obter a forma da árvore. Uma vez descrito o perfil da árvore, é possível estimar o diâmetro para qualquer altura, ou seja, quantificar os multiprodutos da madeira (CAMPOS e LEITE, 2013).

Os dados para o ajuste de equações volumétricas e de *taper* consistem no corte de árvores-amostra, onde são medidos os diâmetros com e/ou sem casca ao longo do fuste, bem como as alturas em que estes ocorrem, além da altura total. Essas árvores devem estar dispersas pela população-objeto, de modo a assegurar a representatividade da amostra a ser utilizada (CAMPOS e LEITE, 2013).

Pode-se afirmar que a multiplicidade de produtos florestais possíveis de se obter a partir dos povoamentos de eucalipto permite à empresa florestal direcionar suas atividades para o fornecimento destes multiprodutos. Tal procedimento representa um diferencial competitivo, pois agrega uma crescente flexibilidade no que diz respeito à comercialização dos produtos de determinada empresa, propiciando a redução dos riscos de prejuízos (SOARES et al., 2003)

Uma vez realizada a qualificação e quantificação dos produtos madeireiros das árvores (volumes comerciais), evidencia-se a potencialidade dos cultivos florestais para uma combinação de usos de material lenhoso, de suma importância no planejamento florestal (YOSHITANI JUNIOR et al., 2012).

É um fato claro que equações de afilamento são mais atrativas de uso em manejo florestal, por permitirem o sortimento de uma árvore, para diferentes comprimentos de toras, em um mesmo diâmetro comercial ou para um mesmo comprimento de toras com diferentes diâmetros comerciais. Isso implica em conhecer o volume e o número de toras em uma árvore (MÔRA, 2011).

Para gerar as equações volumétricas e de *taper* pode-se ainda, obter as informações dos diâmetros ao longo das árvores em pé, empregando-se instrumentos específicos como o telerelescópio, pentaprisma, ou *criterion* (OLIVEIRA et al., 2009). Entre os modelos volumétricos, o de Schumacher e Hall (1933) é o mais usado para as espécies de eucalipto (MÔRA, 2011). Os modelos de *taper* mais difundidos no meio florestal são Kozak et al. (1969) e Demaerschalk (1972) (MÔRA, 2011). Com a frequente evolução da tecnologia, a fabricação de novos *hardwares* e a criação de novos *softwares*, os ajustes de modelos não lineares estão sendo obtidos com grande facilidade (MÔRA, 2011).

As funções de afilamento, quando comparadas com as funções de volume, possuem precisão equivalente. No entanto apresentam muito mais vantagens, na medida em que permitem estimar volume de qualquer porção da árvore devido a sua alta flexibilidade, possibilitando assim maior amplitude de informações geradas, quando essas são necessárias (QUEIROZ et al., 2006).

A tendência atual é que parte dos plantios de eucalipto sejam utilizados segundo o conceito de florestas de multiprodutos, onde de um mesmo fuste de uma árvore consegue-se extrair madeira para laminação, serraria, fabricação de papel e celulose, e, ainda, o aproveitamento dos resíduos da madeira para fabricação de chapas de fibras e geração de energia, entre outros produtos (SOARES, 2002). Esse fato tem justificado a realização de estudos na tentativa de aliar estimativas confiáveis à praticidade de utilização das funções que propiciam tais estimativas (SOUZA, et al., 2008b).

3. Material e Métodos

A área de estudo contempla dois hectares de povoamentos do eucalipto híbrido clonal (GG100) com cinco anos de idade, localizada na Fazenda Água Limpa - FAL/UnB, em Brasília, Distrito Federal, com ponto central do povoamento nas coordenadas 15°58'02.46''S e 47°53'24.58''O. O solo predominante da região é o Latossolo Vermelho, o espaçamento utilizado foi o de 3 m x 2 m, a temperatura média é de, aproximadamente, 21°C e a precipitação média, de 1600 mm.ano⁻¹.

Foram selecionados 60 indivíduos para a cubagem rigorosa, pelo método destrutivo. As árvores foram selecionadas ao acaso, respeitando um número de 10 árvores por cada classe de diâmetro.

A amplitude das classes de diâmetro foi obtida com base na distribuição diamétrica, calculada após a realização de um censo do povoamento em questão. As classes de diâmetro utilizadas no presente trabalho são: 8+10, 10+12, 12+14, 16+18, 18+20 e 20 + 22 cm, esses diâmetros foram medidos no DAP.

Após a cubagem foram selecionadas aleatoriamente 40 árvores de forma a se obter uma proporção semelhante de árvores de cada classe diamétrica para ajuste dos modelos volumétricos e de *taper*, para cada um dos cinco métodos de amostragem referente aos comprimentos de seções. Para tal foram selecionadas ao acaso 6 árvores de cada classe diamétrica, o que totaliza 36 árvores, e as 4 árvores necessárias para totalizar 40 foram selecionadas ao acaso entre as classes diamétricas. As 20 árvores restantes foram utilizadas na validação do modelo volumétrico e do modelo de *taper*.

Os diâmetros com casca foram medidos com suta a cada 0,25 m, até a altura comercial (diâmetro igual a 4 cm), além do DAP (à 1,3 m de altura). Para verificar o efeito do comprimento das seções durante a cubagem, na qualidade dos modelos volumétricos e de *taper*, foram avaliados cinco diferentes métodos, com combinações de comprimentos de seções:

- **Método A:** medição dos diâmetros à 0 m (base); 0,50 m; 1,00 m; 1,30 m (DAP); 2,00 m, e a partir dessa altura, a cada 2,00 m até a altura comercial (CAMPOS e LEITE, 2013);

- **Método B:** a cada 0,25 m, a partir da base (0 m) até a altura de 1,00 m; 1,30 m (DAP); 2,00 m; e a partir dessa altura, a cada 2,00 m até a altura comercial;

- **Método C:** a cada 0,25 m, a partir da base (0 m) até a altura de 2,00 m; além do DAP (1,30 m) e a partir dessa altura, a cada 2,00 m até a altura comercial;

- **Método D:** a cada 0,25 m, a partir da base (0 m) até a altura de 2,00 m; além do DAP (1,30 m) e a partir dessa altura, a cada 1,00 m até a altura comercial;

- **Método E:** a cada 0,25 m até a altura comercial, além do DAP.

Para determinação do volume de cada seção das árvores foi utilizando o método de Smalian (CAMPOS e LEITE, 2013):

$$V = \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) * Li$$

Em que:

V = volume do tronco, em m³; g = área seccional, dada por $g = \frac{\pi Di^2}{40.000}$, em m²; Di = diâmetros nas extremidades da seção em questão; Li = comprimento da seção em questão.

O volume total de cada indivíduo foi obtido pela fórmula:

$$V_{total} = \sum Volumes/seção$$

Para gerar as equações volumétricas foi utilizado o modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933) linearizado:

$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln dap + \beta_2 \ln Ht$$

Em que:

V é o volume (m³); dap é o diâmetro à 1,3 m (cm); Ht é a altura total (m) e β_i = parâmetros a serem estimados.

O modelo de afilamento (*taper*) utilizado foi o modelo de Demaerschalk (1972):

$$\left(\frac{d}{dap} \right)^2 = 10^{2\beta_0} \cdot dap^{2\beta_1 - 2} \cdot (Ht - h)^{2\beta_2} \cdot Ht^{2\beta_3}$$

Em que:

d é diâmetro (cm) em qualquer altura (h, em m); dap é o diâmetro à 1,3 m (cm); Ht é a altura total (m) e β_i = parâmetros a serem estimados.

O erro médio percentual foi calculado para cada estimativa, por meio da seguinte expressão:

$$E\% = \frac{(Volume_{observado} - Volume_{estimado})}{Volume_{observado}} * 100$$

A qualidade dos ajustamentos foi avaliada pela análise de resíduos e pelas estatísticas: coeficiente de correlação múltipla (R^2) e pelo teste t para amostras dependentes (CAMPOS e LEITE, 2013) entre os volumes (para o modelo de Schumacher e Hall e para o modelo de Demaerschalk).

A validação foi realizada aplicando as equações ajustadas à base de dados das 20 árvores (não utilizadas no ajuste). Com o objetivo de selecionar a melhor metodologia para estimativa dos volumes totais e comerciais de árvores de *Eucalyptus*, utilizando-se dos mesmos critérios estatísticos utilizados nos ajustes.

4. Resultados e Discussão

4.1 Equações Volumétricas – Ajuste

O modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933) foi ajustado conforme as equações já descritas, a seguir são apresentadas as equações utilizadas para o cálculo de volume para os cinco métodos, com os respectivos parâmetros (β_i) e os respectivos coeficientes de determinação (R^2):

- Método A: $R^2 = 0,9784$

$$\ln(V) = -9,95517 + 1,87866 * \ln DAP + 1,00685 * \ln Ht + 0,0128$$

- Método B: $R^2 = 0,9769$

$$\ln(V) = -9,97673 + 1,888588 * \ln DAP + 1,00474 * \ln Ht + 0,0128$$

- Método C: $R^2 = 0,9780$

$$\ln(V) = -9,97630 + 1,88661 * \ln DAP + 1,00624 * \ln Ht + 0,0128$$

- Método D: $R^2 = 0,9769$

$$\ln(V) = -9,90026 + 1,86957 * \ln DAP + 0,99846 * \ln Ht + 0,0128$$

- Método E: $R^2 = 0,9773$

$$\ln(V) = -9,85174 + 1,84929 * \ln DAP + 1,00117 * \ln Ht + 0,0128$$

Na Figura 2 é apresentada a distribuição dos resíduos percentuais, com os erros distribuídos, visualmente, de forma homocedástica e dispersão aceitável para as estimativas volumétricas para os métodos de cubagem utilizados.

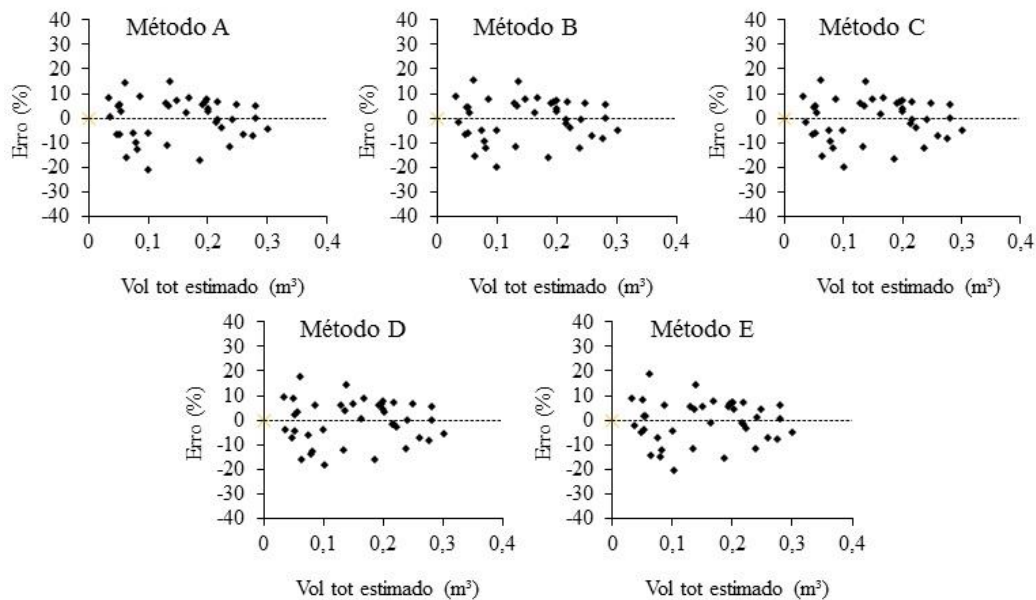


Figura 2. Gráficos de volume total estimado e erro percentual referentes ao ajuste do modelo volumétrico Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Na Figura 3, são apresentados os gráficos de dispersão entre os volumes observados e estimados pelo modelo volumétrico Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de cubagem A, B, C, D e E.

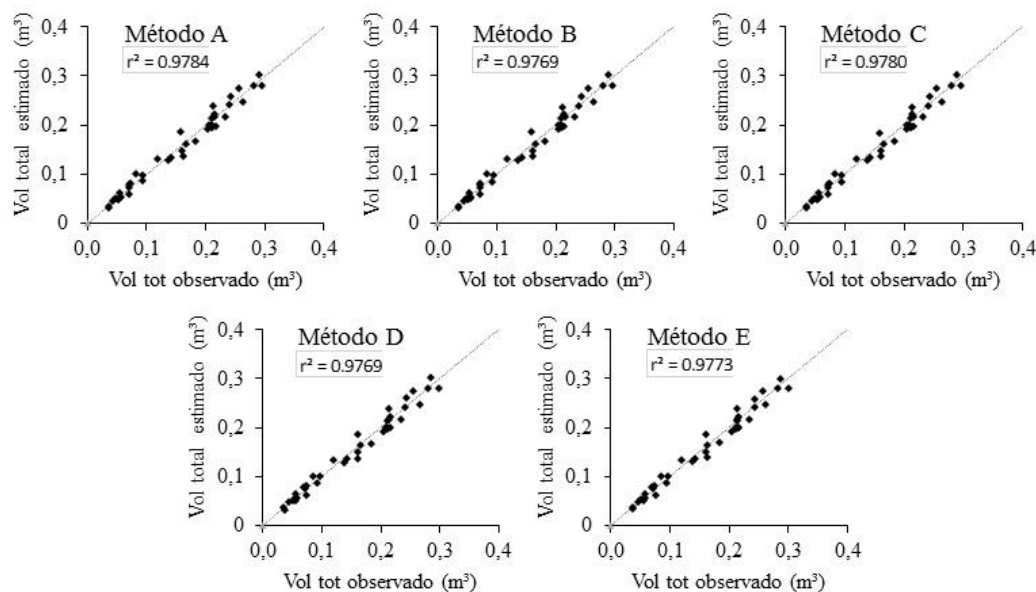


Figura 3. Gráficos de volume total observado e volume total estimado percentual referentes ao ajuste do modelo volumétrico Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Todas as equações de estimação dos volumes das árvores apresentaram coeficientes de determinação maiores que 0,97, que indica alta precisão entre as estimativas e os valores reais das variáveis analisadas (Figura 3), com maior valor de coeficiente de determinação ajustado (R^2) para o método de cubagem A.

Os resultados do teste t para amostras dependentes (Tabela 1), entre os volumes observados e estimado não mostrou diferença significativa para nenhum método de cubagem.

Tabela 1. Valores encontrados no teste t para amostras dependentes e o respectivo valor p , entre volume total observado e volume total estimado, referentes ao ajuste do modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

| Método de cubagem | t para amostras dependentes | Valor p |
|-------------------|-------------------------------|-----------|
| A | 0,235992 | 0,814674 |
| B | 0,208571 | 0,835868 |
| C | 0,211089 | 0,833917 |
| D | 0,236430 | 0,814336 |
| E | 0,259302 | 0,796766 |

4.2 Equações Volumétricas – Validação

Observou-se o mesmo poder de estimação dos volumes aos dados de validação pelas equações resultantes do modelo de Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E, com ligeira superestimação dos menores volumes (Figura 4).

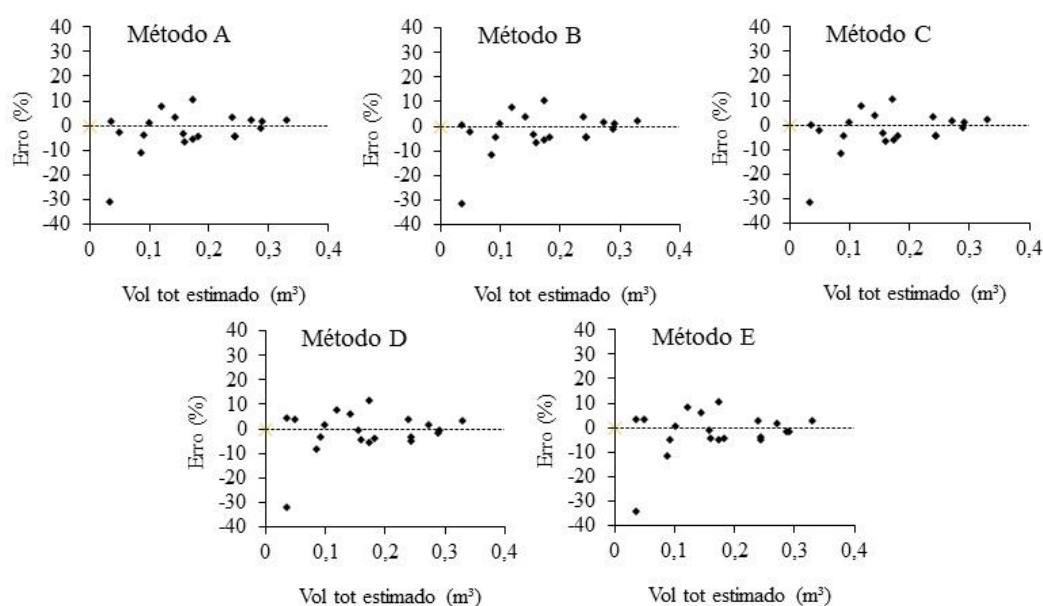


Figura 4. Gráficos de volume total estimado e erro percentual referentes à validação do modelo volumétrico Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Na Figura 5 é possível verificar, em todos os gráficos, uma distribuição bem uniforme, com análise visual bem próxima e todos os métodos apresentaram coeficiente de determinação superior a 0,99.

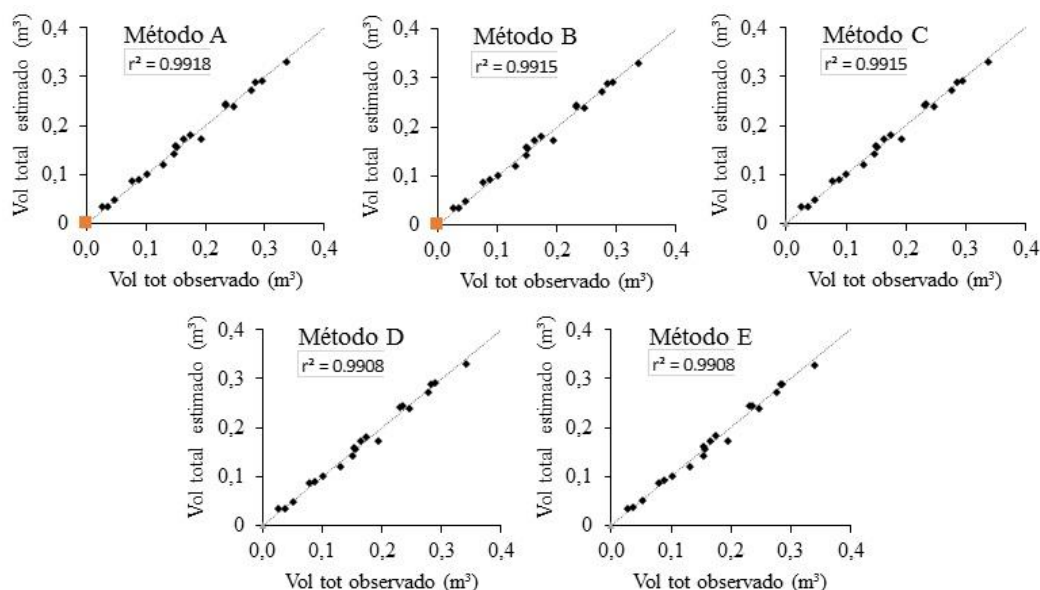


Figura 5. Gráficos de volume total observado e volume total estimados referentes à validação do modelo volumétrico Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Na validação também foram observadas estimativas muito semelhantes entre as equações originadas pelos diferentes métodos de amostragem e coeficientes de correlação superiores a 0,99.

O teste *t* para amostras dependentes (Tabela 2), entre os volumes observados e estimado não mostrou diferença significativa para nenhum método de amostragem (Tabela 4).

Tabela 2. Valores encontrados no teste *t* para amostras dependentes e o respectivo valor *p*, entre volume total observado e volume total estimado, referentes à validação do modelo volumétrico de Schumacher e Hall (1933) linearizado para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

| Método de cubagem | <i>t</i> para amostras dependentes | Valor <i>p</i> |
|-------------------|------------------------------------|----------------|
| A | -0,285882 | 0,778062 |
| B | -0,383999 | 0,705243 |
| C | -0,394406 | 0,697674 |
| D | 0,146206 | 0,885299 |
| E | -0,235766 | 0,816137 |

O método de cubagem A (menor esforço amostral), apesar de não aparecer como alternativa superior nos indicadores estatísticos é a melhor alternativa, visto que já é um método consagrado, representa o menor esforço de coleta e, conseqüentemente, o menor

tempo de coleta. Os demais métodos de amostragem não representaram ganhos que justifiquem o maior esforço.

4.3 Taper – Ajuste

O modelo de afilamento (*taper*) de Demaerschalk (1972) foi ajustado conforme as equações já descritas, a seguir são apresentadas as equações, calculadas com ajuda do *software* Statistica 7, utilizadas para os cinco métodos, com os respectivos parâmetros (β_i) e os respectivos coeficientes de determinação (R^2):

- Método A: $R^2 = 0,9828$

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2*0,20552} \cdot DAP^{2*0,86651-2} \cdot (Ht-h)^{2*0,79173} \cdot Ht^{2*-0,80380}$$

- Método B: $R^2 = 0,9822$

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2*0,20836} \cdot DAP^{2*0,85988-2} \cdot (Ht-h)^{2*0,78624} \cdot Ht^{2*-0,79640}$$

- Método C: $R^2 = 0,9821$

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2*0,19954} \cdot DAP^{2*0,86592-2} \cdot (Ht-h)^{2*0,78165} \cdot Ht^{2*-0,79158}$$

- Método D: $R^2 = 0,9809$

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2*0,18784} \cdot DAP^{2*0,86795-2} \cdot (Ht-h)^{2*0,75661} \cdot Ht^{2*-0,76091}$$

- Método E: $R^2 = 0,9809$

$$\left(\frac{d}{DAP}\right)^2 = 10^{2*0,14822} \cdot DAP^{2*0,87232-2} \cdot (Ht-h)^{2*0,71612} \cdot Ht^{2*-0,69980}$$

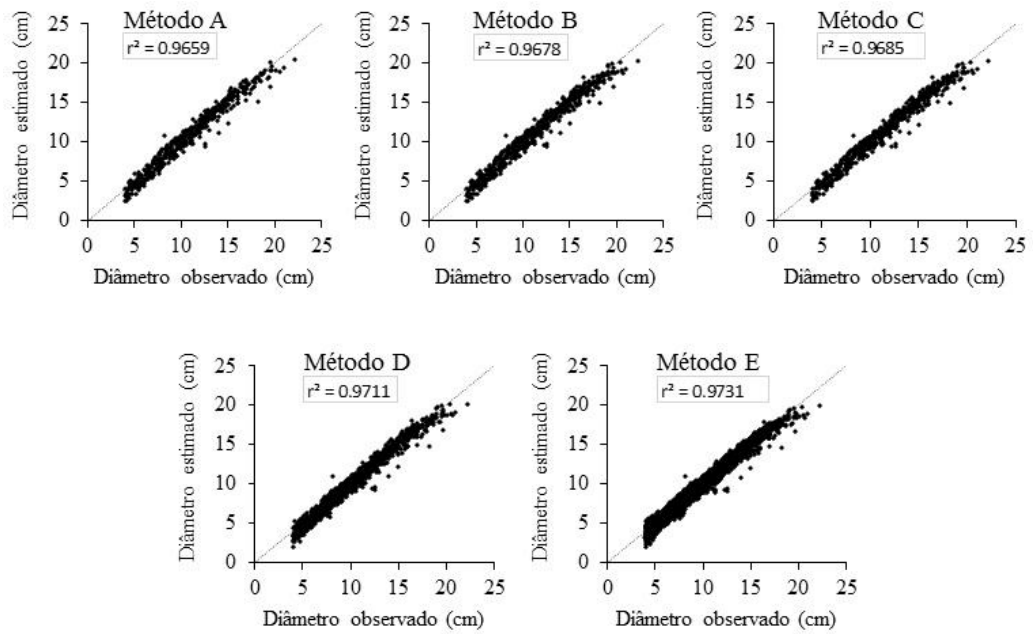


Figura 6. Gráficos de diâmetro observado e diâmetro estimado referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Os modelos apresentaram leve tendência de subestimar os valores nos diâmetros inferiores a 5 cm e superiores a 15 cm (Figura 7).

A análise visual dos gráficos permite observar que, ao diminuir o tamanho das seções, os erros ficaram melhor distribuídos entre a subestimação e a superestimação (Figuras 7 e 8).

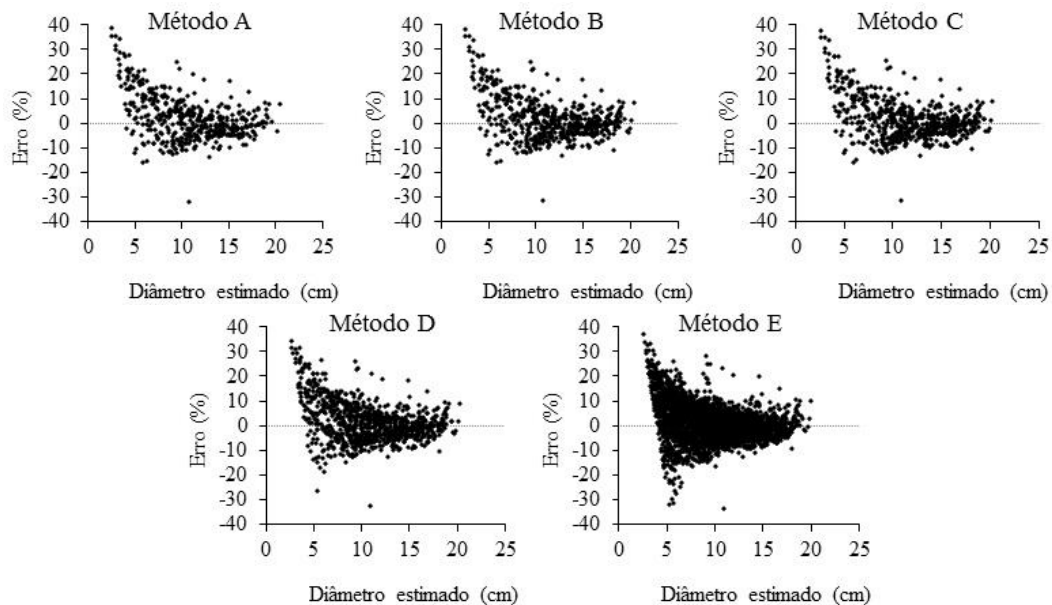


Figura 7. Gráficos de diâmetro estimado e erro percentual referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E

Houve um aumento gradual do coeficiente de determinação ajustado R^2 com a diminuição do tamanho das seções, o que já era esperado devido ao aumento do n da amostra (Figura 8).

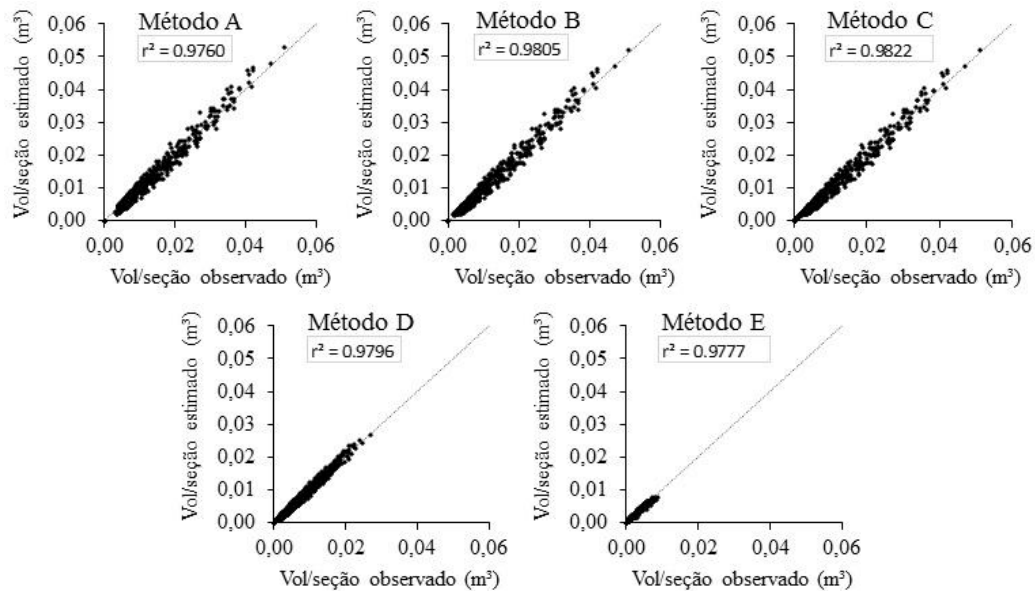


Figura 8. Gráficos de volume/seção observado e volume/seção estimado referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

A Figura 8 ilustra que, logicamente, quanto menor o comprimento das seções, menor o volume dessas seções, e que as menores seções apresentam uma menor variação de volume entre si.

Quando totalizados os volumes das árvores após a estimativa dos diâmetros ao longo dos fustes (pelo modelo de *taper* ajustado para cada método de amostragem) foi observada uma tendência muito semelhante entre os modelos (Figuras 9 e 10). Entretanto, de acordo com o teste t (Tabela 5), as equações obtidas pelos métodos A e D foram selecionadas para a validação.

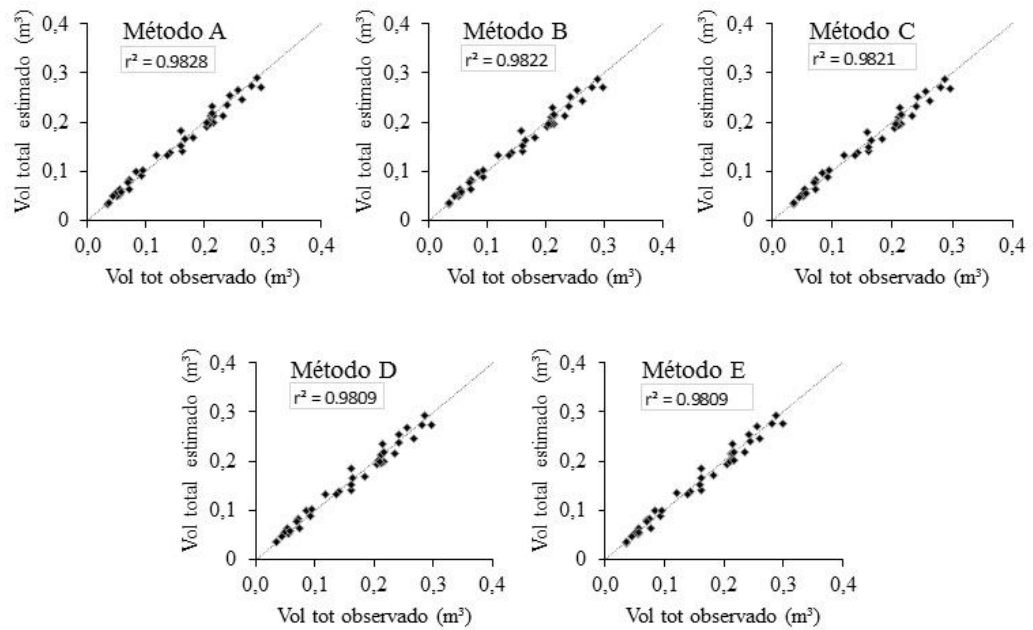


Figura 9. Gráficos de volume total observado e volume total estimado referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

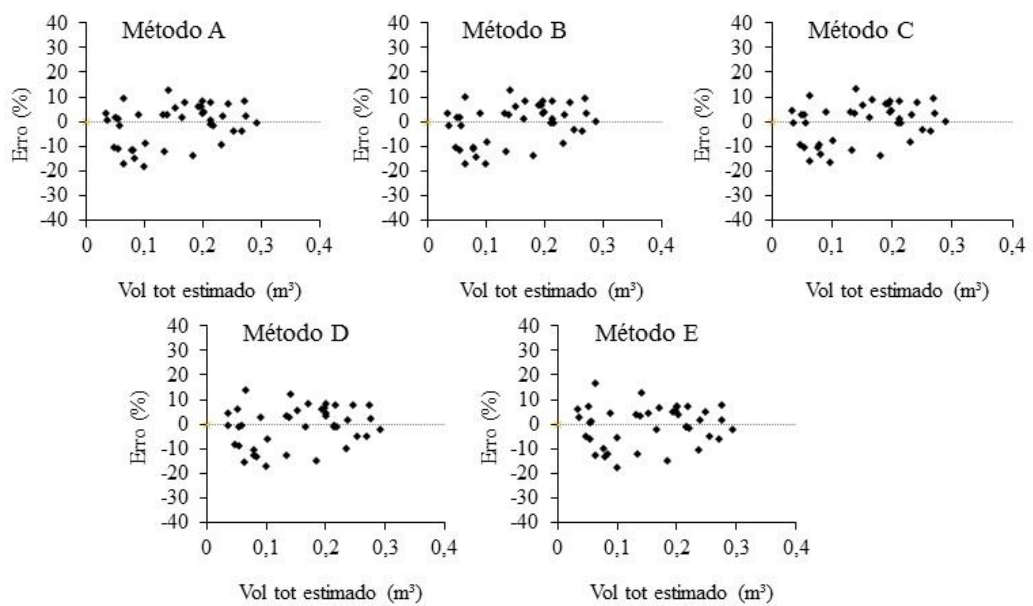


Figura 10. Gráficos de volume total estimado e erro percentual referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Pela análise visual dos gráficos, todos métodos apresentaram uma distribuição uniforme e considerada aceitável.

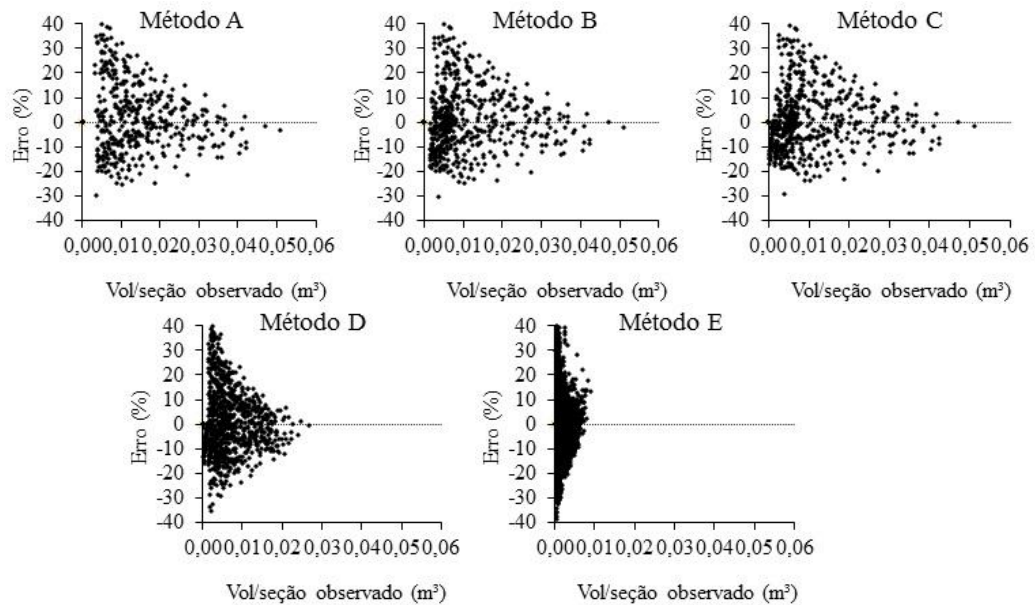


Figura 11. Gráficos de volume/seção observado e erro percentual referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

Os resultados do teste *t* para amostras dependentes (Tabela 3) entre os volumes observados e estimados mostrou diferença significativa para os métodos de amostragem B, C e E, portanto somente os modelos A e D foram validados (Tabela 4).

Tabela 3. Valores encontrados no teste *t* de Student e o respectivo valor *p*, para volume total observado e volume total estimado, referentes ao ajuste do modelo de *taper* para os métodos de amostragem A, B, C, D e E.

| Método de amostragem | <i>t</i> para amostras dependentes | Valor <i>p</i> |
|----------------------|------------------------------------|----------------|
| A | 1,367117 | 0,172259 |
| B | 2,261785 | 0,024081* |
| C | 2,855073 | 0,004447* |
| D | 1,845788 | 0,065238 |
| E | 2,868391 | 0,004156* |

* Métodos que apresentaram diferença significativa pelo teste *t* de Student

4.4 Taper - Validação

O modelo de afilamento (*taper*) de Demaerschalk (1972) foi validado utilizando as equações e os parâmetros obtidos no ajuste, anteriormente descritas e os resultados são apresentados a seguir:

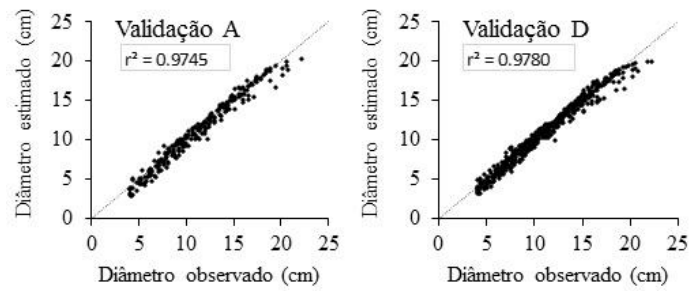


Figura 12. Gráficos de diâmetro observado e diâmetro estimado referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A e D.

O modelo D apresentou um valor de R^2 ligeiramente superior e ambos apresentaram uma tendência de subestimar os diâmetros acima de 18 centímetros.

Ambos os modelos apresentaram tendências de subestimar os diâmetros menores, com maior intensidade nos diâmetros até 7 centímetros. Por análise visual o modelo D parece melhor distribuído (Figura 13).

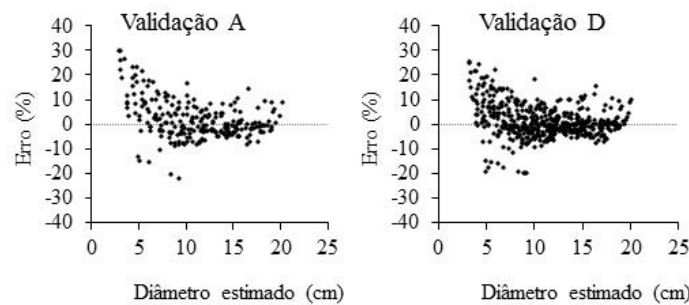


Figura 13. Gráficos de diâmetro estimado e erro percentual referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A e D.

O modelo D apresenta um coeficiente de determinação ajustado R^2 maior, e uma amplitude de volume/seção menor e visualmente os dados apresentam-se mais bem dispersos na linha 1:1 (Figura 14). A mesma tendência é observada para o volume total (Figura 15).

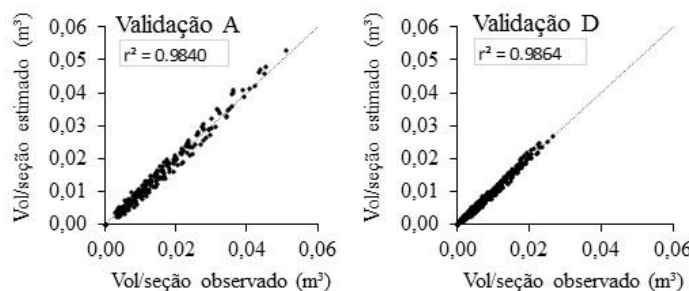


Figura 14. Gráficos de volume/seção observado e volume/seção estimado referentes ao ajuste do modelo de *taper* Demaerschalk (1972) para os métodos de amostragem A e D.

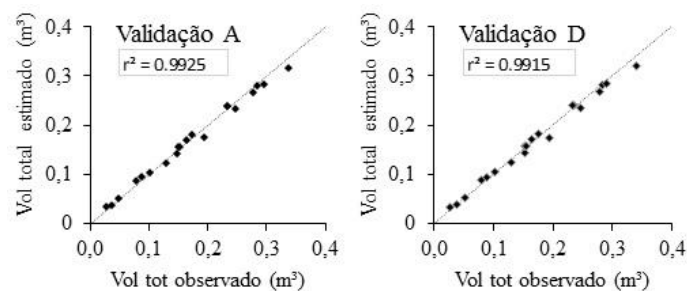


Figura 15. Gráficos de Volume total observado X Volume total estimado, referentes à validação do modelo de *taper* para os métodos de amostragem A e D.

Pelos resultados do teste *t* para amostras dependentes (Tabela 4) entre os volumes observados e estimados pode-se observar que ambas as metodologias estimaram com precisão e o método A apresentou melhores resultados neste teste.

Tabela 4. Valores encontrados no teste *t* para amostras dependentes e o respectivo valor *p* para volume/seção observado e volume/seção estimado, referentes à validação do modelo volumétrico para os métodos de amostragem A e D.

| Método de cubagem | <i>t</i> para amostras dependentes | Valor <i>p</i> |
|-------------------|------------------------------------|----------------|
| A | 0,885538 | 0,376772 |
| D | 1,503991 | 0,133243 |

O método de cubagem D não representou ganhos estatísticos que justifiquem o aumento do esforço de cubagem, portanto o método de cubagem A foi considerado superior.

5 Conclusões

- Para modelos volumétricos o método de amostragem atualmente consolidado (CAMPOS e LEITE, 2013), Método A, foi considerado melhor;
- Para modelos de *taper* o método de amostragem atualmente consolidado (Método A) foi considerado melhor;

6 Considerações Finais

- É necessário a realização de testes semelhantes utilizando diferentes modelos volumétricos e de afilamento.

7 Bibliografia

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012. Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012.** Brasília: [s.n.]. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>, 2013. Acesso em: 25/03/2014

ANGELO, H. et al. **Análise de componentes principais e função spline para definir a forma do tronco de *Pinus tropicais*.** FLORESTA (UFPR), Curitiba-Paraná-Brasil, v. 25, n. 1/2, p. 55–67, 1997.

BALDWIN JR, V. C.; FEDUCCIA, D. P. **Compatible Tree-volume and upper- stem diameter equations for plantation Loblolly Pines in the West Gulf region.** South. Journal Applied Forestry, v. 15, n. 2, p. 92-97, 1991.

CAMPOS, J. C. C. e LEITE, H. G. **Mensuração Florestal : Perguntas e Respostas.** 4^a. ed. Viçosa-MG, 2013. p. 605

CARVALHO, S. de P. C. e. **Uma nova metodologia de avaliação do crescimento e da produção de *Eucalyptus sp* clonal para fins energéticos.** Universidade Federal de Lavras - MG. 2010.

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

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

LEITE, D. R. et al. **Análise comparativa entre dois procedimentos para estimativa da variável volume em um povoamento de *Eucalyptus urophylla*, no município de Mineiros – Goiás.** Enciclopédia Biosfera, v. 7, n. 13, p. 1684–1700, 2011.

MÔRA, R. **Influência da forma de ajuste e do comprimento das seções no desempenho de funções de afilamento.** Universidade Federal do Espírito Santo - ES. 2011.

MURTA-JÚNIOR, L. S. **Procedimentos alternativos para determinação do volume individual de árvores de eucalipto.** Universidade Federal dos Vale do Jequitinhonha e Mucuri - Diamantina - MG. 2013.

OLIVEIRA, M. L. R. de et al. **Estimação do volume de árvores de clones de eucalipto pelo método da similaridade de perfis.** Revista Árvore, Viçosa - MG. v. 33, n. 1, p. 133–141, 2009.

ORMEROD, D. W. **A simples bole model.** Forestry Chronicle, V. 49, n. 3, p.136 – 138, 1973.

QUEIROZ, D. et al. **Avaliação e validação de funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos da região metropolitana de Curitiba/PR.** FLORESTA (UFPR), Curitiba-Paraná-Brasil, v. 36, n. 2, p. 183–199, 2006.

SANTOS, F. R. **Caracterização dendrométrica e avaliação econômica de povoamentos de eucalipto para multiprodutos.** Universidade Federal do Espírito Santo - [S.l.]. 2010.

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

SOARES, T. S. **Otimização do uso da madeira em povoamentos de eucalipto.** Universidade Federal de Viçosa - MG. 2002.

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

SOUZA, C. A. M. de; SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; et al. **Avaliação de modelos de afileamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus sp.***Revista Árvore, Viçosa - MG. v. 32, n. 3, p. 453–463, 2008. [a]

SOUZA, C. A. M. de; SILVA, G. F. da; XAVIER, A. C.; MENDONÇA, A. R. de; et al. **Avaliação de modelos de afileamento não-segmentados na estimação da altura e volume comercial de *Eucalyptus sp.*** Ciência Florestal, Santa Maria - RS. v. 18, n. 3, p. 387–399, 2008. [b]

YOSHITANI JUNIOR, M. et al. **Funções de afileamento para plantios desbastados de *Pinus taeda.***FLORESTA (UFPR), Curitiba-Paraná-Brasil, v. 42, n. 1, p. 169–176, 2012.