



Cubagem de árvores em pé com dendrômetro óptico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

Rafaella De Angeli Curto¹, Aline Cristina Lauro¹, Helio Tonini², Sintia Valerio Kohler¹, Emanuel José Gomes de Araújo³, Scheila Cristina Biazatti⁴

¹Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Avenida Alexandre Ferronato, nº. 1200, Setor Industrial, CEP 78557-267, Sinop, MT, Brasil

²Embrapa Pecuária Sul, Rodovia BR-153, km 632,9, Vila Industrial, Zona Rural, CP. 242, CEP 96401-970, Bagé, RS, Brasil

³Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Rodovia BR 465, km 07, s/n, Zona Rural, CEP 23890-000, Seropédica, RJ, Brasil

⁴Universidade Federal do Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Avenida Fernando Corrêa da Costa, nº 2367, Boa Esperança, CEP 78060-900, Cuiabá, MT, Brasil

*Autor correspondente:

rafaellacurto@yahoo.com.br

Termos para indexação:

Volume de árvores
Cubagem não destrutiva
Eucalipto

Index terms:

Volume of trees
Cubing
Eucalyptus

Histórico do artigo:

Recebido em 28/04/2018
Aprovado em 14/05/2019
Publicado em 30/12/2019

Resumo - Objetivou-se avaliar a exatidão do dendrômetro ótico Criterion RD 1000®, em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, para mensuração do volume total e por secções com casca de eucalipto. As árvores selecionadas foram derrubadas, tendo seus volumes obtidos pelo método de Smalian por cubagem rigorosa. O mesmo método foi utilizado para cubagem não destrutiva, sendo usado o Criterion para obtenção dos dados. Verificou-se homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett para o volume total (p-valor 0,5125) e diâmetros ao longo do fuste (p-valor 0,1891). Não foram observadas diferenças entre os volumes totais obtidos pelo método destrutivo, não destrutivo e com o fator de forma médio. Os diâmetros ao longo do fuste obtidos pela cubagem destrutiva foram iguais àqueles obtidos pela cubagem não destrutiva. Para o volume por secções do fuste, verificou-se que apenas nas secções mais próximas ao topo, e considerando o volume até a ponta, houve diferença quando comparado ao volume real, mas refletindo cerca de 9% do volume total. As medições obtidas com o Criterion RD 1000® apresentaram-se sem tendências, fornecendo mensurações confiáveis, tanto para o diâmetro quanto para o volume ao longo do fuste.

Tree scaling standing with optical dendrometer in the crop-livestock-forest integration system



Abstract - The objective of this study was to evaluate the accuracy of the Criterion RD 1000® optical dendrometer in a crop-livestock-forest integration system for measuring total volume and sections with bark of eucalyptus trees. Selected trees were felled, having their actual strict volumes obtained. The Smalian method was used for destructive Non-destructive scaling was using carried out using criterion. Bartlett's test for total volume (p-value 0.5125) and diameter along the stem (p-value 0.1891) was found to be homogeneous. There were no statistical differences between the total volumes obtained by the destructive method compared to the non-destructive and the average form factor. The diameters along the bole obtained by the destructive scaling were the same as those obtained by the non-destructive scaling. For the volume by sections of the bole, it was verified that only in the sections closest to the top and considering the volume up to the top, there was difference with the actual volume. However it corresponded to a small proportion of the total volume (9%). Measurements obtained with the Criterion RD 1000® showed no trend, providing efficient measurements for both diameter and volume along the bole.

Introdução

A quantificação volumétrica de árvores individuais é um ponto fundamental para atender aspectos do manejo florestal. Sua determinação e quantificação por unidade de área é necessária para permitir ao administrador inferir sobre o crescimento, estoque, rotação e retorno econômico, entre outras possibilidades, visando auxiliar no planejamento das atividades em curto, médio e longo prazos (Finger, 1992). Para isso, é importante alcançar elevada exatidão na mensuração da referida variável, bem como de variáveis que permitam estimá-la.

A determinação do volume, por muitas vezes, é realizada por meio da cubagem rigorosa, que implica em medições de seções ao longo do fuste da árvore. Os dados são obtidos de árvores-amostra, geralmente derrubadas, em que, para obtenção do volume rigoroso de cada árvore, empregam-se fórmulas aproximativas, como as de Smalian, Huber e Newton (Machado & Figueiredo Filho, 2009). Assim, uma parte da população é medida e extrapolam-se as características dessa amostra para toda a floresta, com posterior ajuste de modelos volumétricos ou de afilamento.

Para o ajuste de equações de afilamento é necessário medir vários diâmetros ao longo do fuste, de modo a permitir a avaliação de multiprodutos da madeira (Kershaw Junior et al., 2017). Também se utiliza o fator de forma, sendo bastante eficaz nas estimativas de volume total, além de ser um método prático. Porém, não possui a capacidade de estimar os diferentes sortimentos que cada árvore produz.

Uma vez que a derrubada de árvores acarreta maiores custos, faz-se necessária a busca de métodos que permitam a estimativa volumétrica por meio da cubagem não destrutiva de árvores, facilitando o planejamento e a valorização dos povoamentos (Nicoletti et al., 2015a). No caso de sistemas integrados, a derrubada de árvores fora do período em que as árvores necessitem de um desbaste, pode comprometer a funcionalidade do sistema como um todo. Além disso, pode ser inviável também em plantios de espécies de alto valor comercial, em que a derrubada precoce não garante destinação a usos nobres e de maior retorno, acarretando prejuízos ao produtor.

Conhecer como se desenvolve o sortimento de um povoamento florestal ao longo dos anos é uma importante ferramenta para o planejamento da produção florestal, pois permite um melhor aproveitamento da madeira, reduzindo o volume de resíduos gerados e aumentando

os lucros (Kohler et al., 2015). Deste modo, para analisar as mudanças ocorridas no povoamento durante certo tempo, é feito o inventário em ocasiões sucessivas, para gerar os dados de modelagem de crescimento e produção, de sítio, e determinação da idade de rotação técnica e econômica em florestas plantadas (Campos & Leite, 2017). Porém, quando nos inventários florestais em sucessivas ocasiões se pretende avaliar a evolução dos sortimentos, tem-se como uma das grandes dificuldades a aplicação dos métodos tradicionais de cubagem, devido à necessidade de derrubar as árvores. Adiciona-se a este fato, que a prática da cubagem com método destrutivo torna as atividades de inventário mais demoradas e com custos mais elevados (Nicoletti et al., 2015a).

Um método não destrutivo, onde não há o corte da árvore, pode ser o mais indicado nesses casos. Para isso, métodos como a escalada ou uso de elevadores hidráulicos podem ser utilizados. No entanto, são consideradas atividades de risco para o operador, além de envolver alto custo para implementação, principalmente quando se opta pela utilização dos elevadores. Uma opção para a cubagem não destrutiva, a qual requer medidas de diâmetro ao longo do fuste da árvore em pé, é o uso de dendrômetros ópticos desenvolvidos especificamente para esta atividade (Nicoletti et al., 2012), tendo como exemplos o Relascópio de Bitterlich, dendrômetro de Barr e Stround, Criterion 400®, entre outros (Campos & Leite, 2017).

O Criterion RD 1000® é uma versão mais moderna que o Criterion 400®, e permite a leitura da altura e diâmetro da árvore em qualquer ponto ao longo do fuste, em variadas distâncias, de acordo com as condições do local. Deste modo, com a evolução do Criterion, esperam-se resultados exatos para a obtenção de volume, sendo uma aplicação promissora para levantamentos de variáveis dendrométricas, que podem determinar com exatidão o volume de árvores individuais em pé.

O Criterion vem sendo utilizado para diferentes finalidades de inventários, como quantificação do volume para ajuste de equações alométricas de árvores em área urbana (Yoon et al., 2013), medição dos diâmetros de árvores com sapopemas (Rutten et al., 2015), e aplicação do método de Bitterlich (Suzuki et al., 2013). Além disso, o Criterion também vem sendo utilizado para medição de alturas de árvores, como abordado por Huerta & Wal (2012), em vegetação de quintais domésticos de Tabasco, no México, e por Gaudin & Richard (2014) em floresta de área urbana na França.

O objetivo desse estudo foi avaliar a exatidão do dendrômetro óptico Criterion RD 1000® para mensuração do volume total e seções com casca de árvores de eucalipto para multiprodutos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta.

Material e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), na Embrapa Agrossilvipastoril, em Sinop, MT, localizado nas coordenadas geográficas de 11°51'43" S e 55°35'27" W, em uma altitude média de 384 m acima do nível do mar.

A região apresenta precipitações totais anuais com média de 1.974 mm, com temperatura média mensal de 24,7 °C. Pelas classificações de Köppen e de Thornthwaite a região é do tipo climático Aw e B2wA'a (Alvares et al., 2013; Souza et al., 2013).

Como componente florestal o sistema possui o clone H13 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*) consorciado com gado de leite. O componente agrícola do ILPF utilizado inicialmente foi composto por milho (*Zea mays* L.) e feijão caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp.), e posteriormente gado leiteiro. O sistema ILPF totaliza 40 ha e foi implantado em fevereiro de 2011 em delineamento de blocos ao acaso, sendo quatro blocos, com quatro repetições. Possui uma configuração de plantio de faixas, duplas com espaçamento de 3 m x 2 m x 52 m, e de faixas triplas, com um espaçamento de 3 m x 2 m x 15 m.

Coleta de dados

A partir de um inventário florestal prévio, e de acordo com o diâmetro quadrático médio (dg) verificado em cada bloco, variando entre 18,4 cm e 23,4 cm, foram selecionadas cinco árvores por bloco, totalizando 20 árvores amostra. A avaliação foi realizada quando o povoamento possuía 81 meses.

O Criterion RD 1000®, alocado sobre um tripé, foi posicionado em relação a cada árvore amostra, sendo escolhidas distâncias de acordo com o local onde se tinha uma melhor visualização da maior parte do fuste. As distâncias foram em média de 23 m, sendo as distâncias mínimas e máximas de 19,9 e 28 m, respectivamente. A distância do operador até a árvore foi medida com auxílio de uma trena, sendo a mensuração, realizada

sempre pelo mesmo mensurador. Em seguida, foi obtido o ângulo voltado para a base da árvore. Utilizou-se a função "magnifier" do instrumento.

As medidas de diâmetros foram tomadas a 0,1 m; 0,7 m; 1,30 m; com a fita diamétrica, e a partir desse ponto, de um em um metro ao longo do fuste da árvore até o diâmetro mínimo de 8 cm, quando possível. A altura correspondente à última medição de diâmetro nos fustes variou de 14,3 m a 18,3 m. A partir deste último ponto de medição, para obtenção do volume total, utilizou-se o volume do cone, considerando o comprimento até a altura total da árvore.

Após a mensuração dos diâmetros com o dendrômetro Criterion RD 1000®, as mesmas árvores foram derrubadas e então realizada a cubagem rigorosa com o uso de trena e suta, sendo as medidas tomadas nas mesmas posições ao longo do fuste quando cubadas ainda em pé. O volume individual de cada árvore, pelos métodos destrutivos e não destrutivos, foi calculado pela fórmula de Smalian, conforme Machado & Figueiredo Filho (2009). Após a derrubada, verificou-se que a altura média das árvores era 27 m.

Análises dos dados

Utilizou-se o teste de Bartlett para testar a homogeneidade dos volumes totais e diâmetros ao longo dos fustes (Snedecor & Cochran, 1989), cuja hipótese de nulidade expressa que os dados em questão possuem homogeneidade de variâncias. No caso de atendimento ao pressuposto, o teste *t* para amostras independentes foi aplicado para comparar as médias dos volumes obtidos com a cubagem rigorosa destrutiva e a cubagem não destrutiva, com 95% de probabilidade de confiança, bem como para comparar os diâmetros medidos nas duas situações. O teste *t* também foi utilizado para comparar o volume total obtido pelo método destrutivo como fator de forma artificial (*ff*). Foi considerado um *ff* igual a 0,38, obtido em um inventário florestal, com cubagem, realizado no ILPF aos 51 meses de idade. Todas as análises foram realizadas com auxílio do programa R (R Core Team, 2017).

Realizou-se o teste *t* para amostras independentes entre os dois métodos de cubagem utilizados para obtenção do volume em diferentes seções ao longo do fuste. Para tanto, dividiu-se cada árvore em quatro segmentos, sendo composto de quatro seções de um metro de comprimento cada, a partir de 2,3 m de altura, já que abaixo desta medida as medições foram feitas de

forma direta. Os limites dos segmentos ficaram assim definidos: 1 (de 2,3 m a 6,3 m); 2 (de 6,3 m a 10,3 m); 3 (de 10,3 m a 14,3 m) e; 4 (de 14,3 m a 18,3 m). Em cada segmento foi feita a soma dos volumes das quatro seções correspondentes, e o último segmento (4) foi analisado de duas formas: a primeira sem o volume da ponta, considerando somente as medições que foram obtidas com a cubagem não destrutiva, e a segunda incluindo o volume da ponta (considerada como cone).

Avaliaram-se as eventuais tendências na obtenção dos diâmetros, do volume total, do volume por segmento e do volume total com fator de forma por meio da análise gráfica de resíduos, em relação aos dados da cubagem destrutiva. Realizaram-se testes complementares de viés, média das diferenças absolutas e desvio padrão das diferenças, para avaliação do volume total e por segmento pelo método destrutivo, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Critérios e respectivos estimadores para avaliação dos métodos de obtenção de volume total e por segmento.

Table 1. Criteria and respective estimators for the evaluation of methods of obtaining total volume and volume by segments.

Estadística	Estimador	Estimador %
Resíduo (R)		$R = \frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i} \cdot 100$
Viés (V)	$V = \frac{\sum_{i=1}^n Y - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n}$	$V (\%) = \frac{V}{Y} \cdot 100$
Média das diferenças absolutas (MD)	$MD = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i }{n}$	$MD (\%) = \frac{MD}{\bar{Y}} \cdot 100$
Desvio padrão das diferenças (DPD)	$DPD = \frac{\left(\sum_{i=1}^n ei^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n ei \right)^2}{n} \right)}{n-1}$	$DPD (\%) = \frac{DPD}{\bar{Y}} \cdot 100$

Sendo: Y_i = volume da i-ésima árvore medida pela cubagem rigorosa, após ser abatida (m^3); \hat{Y}_i = volume da i-ésima árvore medida pelo método não destrutivo (m^3); n = número de observações; $ei = (Y_i - \hat{Y}_i)$; \bar{Y} = média das árvores medidas pelo método destrutivo (m^3).

Resultados

O teste de Bartlett indicou homogeneidade das variâncias para os dados de volume total (p-valor = 0,5125) e diâmetros ao longo do fuste (p-valor = 0,1891). Os diâmetros ao longo do fuste obtidos com cubagem destrutiva e não destrutiva não diferiram estatisticamente. Além disso, verificou-se igualdade estatística entre os volumes totais obtidos pelo método destrutivo, quando comparado com os obtidos pelo método não destrutivo e pelo uso do fator de forma médio (Tabela 2).

Verificou-se diferença média do volume comparado ao volume da cubagem destrutiva apenas nas seções mais altas do fuste, considerando o volume até a ponta. Vale destacar que ao considerar apenas o volume da ponta pelo método não destrutivo, o mesmo representa em média 9% do volume da árvore. Para os demais segmentos, bem como para o volume total, os valores obtidos com o Criterion RD 1000® resultaram em igualdade com o volume da cubagem destrutiva.

Tabela 2. Testes *t* para amostras independentes do volume total com a cubagem não destrutiva e o fator de forma, do volume por seções e diâmetros com a cubagem não destrutiva, de árvores de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, em Sinop, MT.

Table 2. T-tests for independent samples of total volume with non-destructive scaling and form factor, volume by sections and diameters with non-destructive scaling, of eucalyptus trees in a crop-livestock-forest integration system, in Sinop, Mato Grosso State.

Segmentos ao longo do fuste	Criterion RD 1000 (não destrutiva)		
	Diâmetros	Volume	Volume com <i>ff</i>
1 (2,3 a 6,3 m)		0,5667 ^{ns}	
2 (6,3 a 10,3 m)		0,3323 ^{ns}	
3 (10,3 a 14,3 m)		0,1363 ^{ns}	
4 (14,3 m até o limite de 8 cm de diâmetro)		0,4741 ^{ns}	
4 (14,3 m até a ponta)		0,0419*	
Base até altura total	0,0601 ^{ns}	0,3400 ^{ns}	0,4735 ^{ns}

Em que: *ff* = fator de forma médio; * = diferença significativa ($p < 0,05$) e; ns = diferença não significativa ($p \geq 0,05$).

A análise dos erros cometidos na mensuração do diâmetro ao longo do fuste é apresentada na Figura 1. É possível verificar que os diâmetros apresentam uma

distribuição residual com maior concentração entre -10 a 10%. Apenas a partir dos 11,3 m de altura a distribuição residual tende a aumentar. Nas posições mais baixas do fuste, os erros foram mais homogêneos, mas à medida que se avaliou as posições mais altas, ou seja, os locais onde foi possível um menor número de observações com o Criterion, os erros absolutos tenderam a ficar mais acentuados, com tendência maior em subestimar os diâmetros.

Verificou-se nas atividades de campo que, quando se está muito distante da árvore a ser medida, há uma limitação na flexibilidade da barra de medição do Criterion, não sendo possível medir os menores diâmetros nas partes mais altas do fuste. No entanto, quando se aproxima da árvore a limitação passa a ser a inclinação do instrumento, de modo que a aproximação passa a gerar erros na obtenção das alturas em que se pretende medir os diâmetros, acarretando também em erros no diâmetro. A maior dificuldade de visualização dos diâmetros nas partes mais altas do fuste é confirmada na Figura 1, onde os diâmetros tenderam a erros maiores, em alguns casos subestimando em até 17%.

Na Figura 2, é possível observar uma análise gráfica dos resíduos do volume total obtido com o fator de forma e o volume total com a cubagem não destrutiva sobre o volume obtido com a cubagem destrutiva.

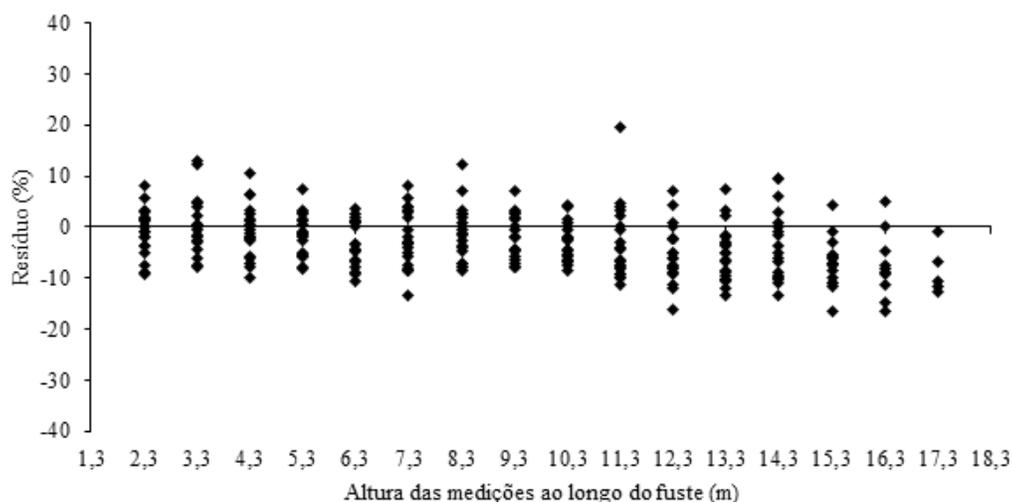


Figura 1. Resíduos em porcentagem para os diâmetros de árvores de eucaliptos medidos ao longo do fuste com o Criterion RD 1000®, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, em Sinop, MT.

Figure 1. Residuals in percentage for the diameters of eucalyptus trees measured along the stem with the Criterion RD 1000®, in a crop-livestock-forest integration system, in Sinop, Mato Grosso State.

Nota-se que o método de cubagem não destrutiva para o volume total apresentou leve tendência em superestimar os volumes. Porém, os erros não foram superiores a 10% para mais ou para menos, em sua maioria. Para o volume total obtido com fator de forma, a tendência foi de superestimar, resultando em erros de até 20%. A análise gráfica dos resíduos, levando-se em conta o volume em cada segmento, sobre o volume obtido com a cubagem destrutiva (volume observado) é apresentada na Figura 3, onde é possível verificar a amplitude dos erros observados ao longo do fuste. Para os segmentos 1 e 2, observa-se maior homogeneidade dos erros. A partir dos 10,30 m de altura (segmento 3), verifica-se um aumento gradativo dos erros resultantes da medição com o Criterion, tendendo a subestimação. Acima de 14,30 m de altura, onde há um menor número de observações, os erros absolutos tendem a ficar mais acentuados, indicando subestimativa ainda maior dos

volumes, pois dependendo da altura e do diâmetro não foi possível efetuar a leitura. Quando considerado o volume da ponta, o segmento 4 apresentou a maior dispersão dos erros, tendendo a subestimar o volume.

Na Tabela 3 são apresentadas as estatísticas viés (v), média das diferenças absolutas (MD) e desvio padrão das diferenças (DPD) para a cubagem não destrutiva, para o volume total e para os diferentes segmentos. Verifica-se que o segmento 1, correspondente aos maiores diâmetros, apresentou o melhor resultado em relação aos outros segmentos avaliados, já que os valores de viés, média das diferenças absolutas e desvio padrão das diferenças foram mais próximos de "0", indicando menores tendências (V) e amplitudes (MD) de erros, e maior homogeneidade (DPD) dos resíduos. Conforme os diâmetros se tornam menores, à medida que se aumenta a altura ao longo do fuste, verifica-se menor homogeneidade dos resíduos, com maiores amplitudes

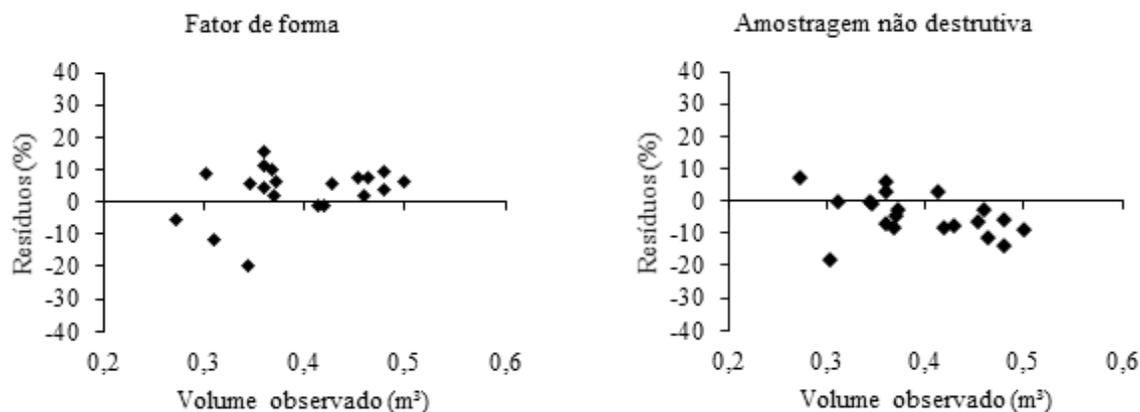


Figura 2. Resíduos em porcentagem para os volumes totais de árvores de eucaliptos obtidos com o fator de forma e com a cubagem não destrutiva com Criterion RD 1000®, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, em Sinop, MT.

Figure 2. Residues in percentage of the total volumes of eucalyptus trees obtained with form factor and non-destructive scaling with Criterion RD 1000®, in a crop-livestock-forest integration system, in Sinop, Mato Grosso State.

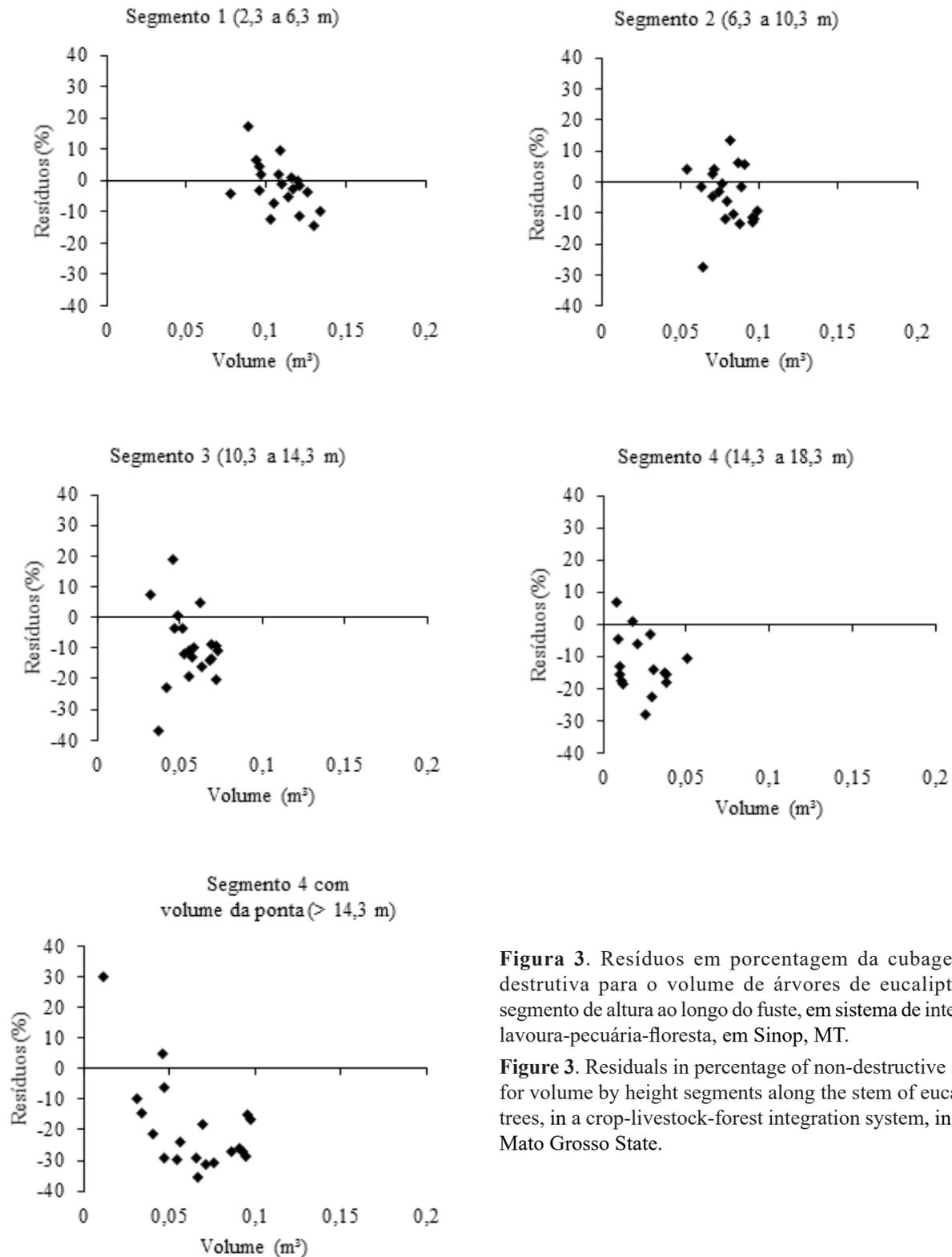


Figura 3. Resíduos em porcentagem da cubagem não destrutiva para o volume de árvores de eucaliptos por segmento de altura ao longo do fuste, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, em Sinop, MT.

Figure 3. Residuals in percentage of non-destructive scaling for volume by height segments along the stem of eucalyptus trees, in a crop-livestock-forest integration system, in Sinop, Mato Grosso State.

e tendências a erros.

Tabela 3. Estatísticas complementares para mensuração do volume total e dos diferentes segmentos ao longo do tronco de árvores de eucaliptos, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, em Sinop, MT.

Table 3. Supplementary statistics to estimate total volume and of different segments along the stem of eucalyptus trees, in a crop-livestock-forest integration system, in Sinop, Mato Grosso State.

Estatística	Total	Segmento 1 (2,3 a 6,3 m)	Segmento 2 (6,3 a 10,3 m)	Segmento 3 (10,3 a 14,3 m)	Segmento 4 (14,3 a 18,3 m)
V (%)	7,03	1,49	4,83	9,34	13,46
MD (%)	7,96	7,23	8,78	12,12	14,32
DPD (%)	9,54	9,10	11,22	15,07	16,64

V = viés; MD = média das diferenças absolutas; DPD = desvio padrão das diferenças.

Discussão

O volume total médio da cubagem não destrutiva foi estatisticamente igual ao volume da cubagem destrutiva, sendo esse resultado verificado também por Dalla Corte et al. (2016), que testaram o desempenho do instrumento Criterion RD 1000® para mensuração do volume em plantio homogêneo de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don no sul do Brasil, e por Rodriguez et al. (2013) em plantios de *Pinus* sp. no norte da Espanha. Tais resultados permitem concluir sobre a exatidão nas mensurações do volume total com o equipamento em análise. No entanto, para a obtenção do volume total, a metodologia com o uso do fator de forma médio também não apresentou diferença estatística em relação ao volume obtido pelo método destrutivo, podendo ser também indicada, mesmo tendo apresentado distribuição residual um pouco mais tendenciosa que a cubagem não destrutiva (Figura 2). Isto mostra que o fator de forma é uma ferramenta de grande valia para a obtenção de estimativas rápidas de volume, dada sua simplicidade de execução, visto que, uma vez obtido, pode ser aplicado apenas tendo-se conhecimento do diâmetro a 1,30 m de altura do solo (DAP) e altura da árvore.

É indicada a padronização de um fator de forma desenvolvido por espécie e de acordo com outras características, como espaçamento, sítio florestal e idade (Scolforo & Thiersch, 2004), para ser utilizado em casos em que não se pretende realizar a cubagem, seja ela destrutiva ou não. No entanto, vale ressaltar que por se tratar de uma redução do volume do cilindro (Scolforo & Thiersch, 2004), seu uso é restrito, pois não permite quantificar multiprodutos da madeira. Para isso, de acordo com Kohler et al. (2015), é necessário conhecer o diâmetro em qualquer altura do fuste. O Criterion,

por sua vez, permite tais quantificações, ao longo do fuste. Deste modo, devido à exatidão apresentada, esse equipamento pode substituir a derrubada de árvores, como no presente estudo.

O volume do segmento 4 com volume da ponta, obtido pelo Criterion RD 1000®, foi estatisticamente diferente do volume obtido com a cubagem destrutiva. Esse resultado deve-se ao fato de que nas seções mais altas não foi possível medir os diâmetros com o equipamento, sendo o volume a partir daí considerado como ponta. Em muitos casos a seção apresentava grande comprimento, sendo considerada como volume de um cone. No entanto, por ser a parte da árvore que representa um pequeno volume em relação ao total, já que é caracterizada pelos menores diâmetros do fuste, a dificuldade de medição não interferiu significativamente no volume total de cada árvore. Desse modo, o resultado que pode ser afetado é a quantificação de multiprodutos, porém, por corresponder a diâmetros muito finos, referem-se a produtos destinados a usos menos nobres, como lenha, ou até mesmo material de descarte. Com relação aos erros nas seções mais altas, Silva et al. (2017) indicam que, de forma geral, o uso de aparelho ópticos na mensuração florestal apresentam maiores erros, à medida que se aumenta a altura das árvores.

Apesar de em média os diâmetros medidos com o Criterion terem resultado em igualdade com os diâmetros reais obtidos com a cubagem destrutiva, a distribuição dos erros apresentou subestimativas nos menores diâmetros (Figura 1). Nicoletti et al. (2015a) também verificaram tendência de subestimativa dos diâmetros com o Criterion 400 em árvores de eucalipto, com o aumento da altura de medição, com um erro médio de 5%, ultrapassando 10% nas diferentes posições ao longo do fuste. No presente trabalho, o erro relativo médio

do diâmetro foi de 5%, porém atingindo erros pouco maiores que 10% em algumas situações (Figura 1). No estudo de Nicoletti et al. (2015a), as avaliações foram feitas apenas até 8 m de altura, um dos motivos pelo qual a dispersão dos erros foi menor que a encontrada no presente estudo.

Nicoletti et al. (2015b), em um estudo em uma floresta natural, em árvores que apresentavam DAP médio de 20 cm e altura de até 18 m, verificaram subestimativas de diâmetro em até 50% nas posições mais baixas do fuste, porém os autores fizeram a avaliação apenas até aproximadamente 5 m de altura. De todo modo, encontraram erros muito superiores aos aqui observados, talvez devido ao fato de a avaliação em florestas nativas impedir a visualização do fuste com clareza, devido à presença do sub-bosque. No entanto, de modo semelhante, os mesmos autores notaram maior dispersão dos erros nas árvores de menores diâmetros. No presente estudo, quando a avaliação foi feita para os diâmetros mais finos, o erro também aumentou, porém tratava-se da avaliação em alturas maiores ao longo do fuste.

Os fatores relacionados à aproximação da árvore e inclinação do instrumento, e que ocasionaram erros nas medições, foram relatados por Silva et al. (2017). Tais ocorrências também foram destacadas por Rodriguez et al. (2013), ao considerarem as distâncias correspondentes à metade e igual à altura da árvore entre o observador e a árvore, para medições de diâmetro visando obtenção do volume, sendo sugerido o uso da maior distância, uma vez que resultou em estimativas mais precisas para o volume de árvores em pé.

Pode-se inferir que o aparelho seja pouco preciso nas medições de diâmetros menores que 8 cm, nas posições mais altas do fuste, a partir dos 14,3 m, acentuando-se, principalmente, acima de 18,3 m. Tal evidência pode também ser confirmada ao se verificar que dentre os segmentos representantes das seções ao longo do fuste, que resultaram em volume médio igual ao obtido com o método de cubagem destrutiva, o segmento 4 foi o que mais subestimou os resultados (Figura 1 e Tabela 3).

Bonazza et al. (2015), avaliando plantios de *Pinus* em diferentes idades, verificaram resultados distintos, com erros de superestimação nas medidas de diâmetros nas posições mais altas do fuste. Os erros foram cerca de 29% em árvores mais jovens e até 26% nas árvores mais velhas, considerando todo o fuste. No entanto, considerando apenas 75% do tronco, os erros médios foram de 7,3% e 4% para árvores com 13 e 21 anos,

respectivamente, ambos apresentando superestimação. Assim, nota-se que quanto mais velhas as árvores e maiores os seus diâmetros, os erros são menores. Diante disso, podemos inferir que os erros dos diâmetros também tendem a ser menores em árvores de maior porte.

Dalla Corte et al. (2016) constataram que o Criterion RD 1000® apresentou maior dispersão dos erros em relação à suta mecânica nas medições de DAP, tendo a fita métrica como controle. Houve maior tendência de subestimativa dessa variável, aumentando a tendência à medida que os diâmetros aumentavam. Apesar disso, os erros foram bem baixos, sendo de 1,0% e 0,6% para o Criterion e a suta, respectivamente. De todo modo, considerando a possibilidade de alcance e maior facilidade de medição, para as alturas até 1,30 m, pode-se optar pelo uso da suta ou fita métrica, visto que a medição direta é ainda a melhor alternativa, resultando em menores erros no volume. As avaliações da exatidão do Criterion RD 1000® se deram a partir dos 2,3 m de altura, pois foi verificada tendência à subestimação dos diâmetros somente a partir dos 6 m, sendo mais notável a partir dos 9 a 10 m de altura.

Bonazza et al. (2015), realizando a medição de árvores com o Criterion RD 1000® e considerando diferentes distâncias de medição (10, 14 e 18 m) para árvores de 13 anos com altura média de 17,2 m e 21 anos com altura média de 26,3 m (semelhante à média do presente estudo), notaram que ambas idades apresentaram erros menores nas estimativas de volume individuais de árvores com a distância de 18 m. No entanto, as medidas foram mais exatas nos indivíduos com 21 anos. Rodriguez et al. (2013), testando técnicas de medição não destrutiva para desenvolvimento de equações *taper*, verificaram que a distância tomada em relação à árvore é um fator limitante na eficiência do método e, para garantir melhores mensurações do volume, a distância deve ser semelhante à altura da árvore.

Contudo, no estudo de Bonazza et al. (2015), mesmo para as árvores com 13 anos, tendo altura média mais próximas à distância tomada para a medição (18 m), os autores verificaram que os menores erros foram obtidos nas medições das árvores com 21 anos. Por serem árvores mais velhas e, conseqüentemente, mais grossas, há maior exatidão da leitura com o Criterion, relacionadas à maior eficiência da barra de medição.

A distância entre o mensurador e a árvore não foi um critério avaliado no presente trabalho, sendo escolhidas

de acordo com o local onde se tinha uma melhor visualização da maior parte do fuste. As distâncias foram em média de 23 m (desvio padrão $\pm 2,2$ m), sendo que as árvores medidas tinham em média altura de 27 m (desvio padrão $\pm 2,5$ m), não sendo possível um distanciamento maior, conforme recomendado por Rodriguez et al. (2013), pois em distâncias muito grandes há limitação de medição do instrumento. Além disso, os galhos nas posições mais elevadas do fuste também podem dificultar a medição, devido à dificuldade de visualização dos mesmos, problema ainda maior quando mais distante da árvore a ser medida.

Os erros averiguados no presente trabalho foram considerados satisfatórios, quando comparados aos obtidos por Bonazza et al. (2015). Nicoletti et al. (2015b) verificaram uma tendência média de subestimativa de aproximadamente 20%, inferindo parte desses erros devido à dificuldade do operador ou do aparelho em visualizar diâmetros menores em posições mais altas.

Além da distância entre o mensurador e a árvore e o ângulo de inclinação do Criterion prejudicarem a flexibilização da barra de medição, impedindo realizar medidas de pequenos diâmetros nas maiores alturas, Gaudin & Richard (2014) testaram equipamentos em condições controladas (prédios de alturas conhecidas) e em florestas e verificaram que dendrômetros, como o Criterion, podem resultar em erros devido a outros fatores, como densidade da floresta, comprometendo a exatidão. Relataram, também, que as condições de luminosidade favoreceram a qualidade e que a ocorrência de chuva não dificulta as medições.

A análise complementar (Tabela 3) aplicada para o volume total e para os segmentos confirma a precisão do Criterion RD 1000® para determinação dos volumes, assim como confirma que a precisão é maior nas partes mais baixas do fuste, cujos diâmetros são maiores, e que a precisão tende a diminuir conforme aumenta a altura das medições ao longo do fuste.

Desse modo, a utilização do Criterion RD 1000® demonstra ser uma possibilidade promissora para obtenção de volume total e volume parcial, em sistemas de ILPF. Tal ferramenta mostrou-se aplicável para a situação da pesquisa, em que não era viável a derrubada de árvores para não descaracterizar o arranjo do ILPF e onde era desejado obter volumes de partes específicas do fuste para definir um plano de manejo visando à utilização de multiprodutos.

Conclusões

O equipamento Criterion RD 1000® apresenta-se como promissor para uso em sistemas integração lavoura-pecuária-floresta, devido à exatidão para mensurar o volume ao longo do fuste e o diâmetro, exceto nas alturas superiores. No entanto, a quantificação de volume de madeira para multiprodutos não foi afetada, visto que se refere à parte de uso menos nobre da madeira. Aliado à precisão, o Criterion RD 1000® possibilita a redução de custos, permitindo a tomada de decisões de manejo com confiabilidade, sem descaracterizar a configuração do sistema.

Referências

- Alvares, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Bonazza, M. et al. Accuracy of non-destructive volumetric estimates in stands of *Pinus taeda* L. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 9, n. 31, p. 71-79, 2015.
- Campos, J. C. C. & Leite, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636 p.
- Dalla Corte, A. P. et al. Desempenho de diferentes equipamentos para mensuração de diâmetro a 1,30 m, altura individual total e volume do fuste em *Cryptomeria japonica* (Thunb. Ex L. f.) D. Don. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, n. 23, p. 432-441, 2016. http://dx.doi.org/10.18677/Enciclopedia_Biosfera_2016_038.
- Finger, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria, RS: CEPEF- UFSM, 1992. v. 1. 269 p.
- Gaudin, S. & Richard, J. B. Comparaison des dendromètres Vertex III et TruPulse 200b pour la mesure de la hauteur totale des arbres. *Revue Forestière Française*, v. 2, p. 163-181, 2014. <http://dx.doi.org/10.4267/2042/54353>.
- Huerta, E. & Wal, H. Soil macroinvertebrates abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. *European Journal of Soil Biology*, v. 50, p. 68-75, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.12.007>.
- Kershaw, Junior, J. A. et al. **Forest mensuration**. 5. ed. Chichester; Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 613 p.
- Kohler, S. V. et al. Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. *Floresta*, v. 45, n. 3, p. 545-554, 2015. <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v45i3.35746>.
- Machado, S. A. & Figueiredo Filho, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Ed. da UNICENTRO, 2009. 316 p.
- Nicoletti, M. F. et al. Exatidão de dendrômetros ópticos para determinação do volume de árvores em pé. *Ciência Florestal*, v. 25, n. 2, p. 395-404, 2015a. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509818458>.

- Nicoletti, M. F. et al. Metodologia não destrutiva para quantificação do volume e biomassa do fuste em remanescente florestal. **Nativa**, v. 3, n. 4, p. 287-291, 2015b. <http://dx.doi.org/10.14583/2318-7670.v03n04a11>.
- Nicoletti, M. F. et al. 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, 2012.
- R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical computing, 2017. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 julho 2017.
- Rodriguez, F. et al. 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, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-013-0739-5>.
- Rutten, G. et al. Forest structure and composition of previously selectively logged and non-logged montane forests at Mt. Kilimanjaro. **Forest Ecology and Management**, v. 337, p. 61-66, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.10.036>.
- Scolforo, J. R. S. & Thiersch, C. R. **Biometria florestal: medição, volumetria e gravimetria**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2004. 285 p.
- Silva, G. F. et al. Simulação de erros na medição de altura de árvores inclinadas com aparelhos baseados em princípios trigonométricos. **Nativa**, v. 5, n. 5, p. 372-379, 2017.
- Snedecor, G. W. & Cochran, W. G. **Statistical methods**. 8th ed. Iowa: Iowa State University Press, 1989. 247 p.
- Souza, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>.
- Suzuki, R. et al. Sensitivity of the backscatter intensity of ALOS/PALSAR to the above-ground biomass and other biophysical parameters of boreal forest in Alaska. **Polar Science**, v. 7, p. 100-112, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polar.2013.03.001>.
- Yoon, T. K. et al. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, p. 344-349, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.006>.