

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA  
ROSÁLIA NAZARETH ROSA TRINDADE**

**MORFOMETRIA DA COPA DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DENSIDADES DE  
PLANTIO**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA**

**2017**

**ROSÁLIA NAZARETH ROSA TRINDADE**

**MORFOMETRIA DA COPA DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DENSIDADES DE  
PLANTIO**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Meio Ambiente.

Orientador: Dr. Aderlan Gomes da Silva

Co-orientador: Me. Bruno Oliveira Lafetá

**SÃO JOÃO EVANGELISTA**

**2017**

## FICHA CATALOGRÁFICA

T832m Trindade, Rosália Nazareth Rosa.  
2017

Morfometria da copa de eucalipto em diferentes densidades de plantios. / Rosália Nazareth Rosa Trindade. – 2017.  
24f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação Lato Sensu em Meio Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista, 2017.

Orientador:Dr. Aderlan Gomes da Silva.  
Coorientador:Me. Bruno Oliveira Lafetá .

1.Idade. 2. Índices morfométricos. 3. Plasticidade da copa.  
I. Trindade, Rosália Nazareth Rosa. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista. III. Título.

CDD 634.97342

Elaborada pela Biblioteca Professor Pedro Valério

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais  
Campus São João Evangelista

Bibliotecária Responsável: Rejane Valéria Santos – CRB-6/2907

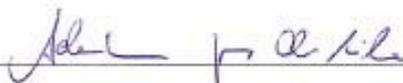
**ROSÁLIA NAZARETH ROSA TRINDADE**

**MORFOMETRIA DA COPA DE EUCALIPTO EM DIFERENTES DENSIDADES DE  
PLANTIO**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Minas Gerais – Campus São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Especialista em Meio Ambiente.

Aprovado em: 21/10/2017

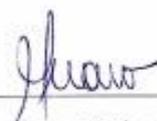
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Aderlan Gomes da Silva - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Avançado Itabirito-MG



Prof. Me. Bruno Oliveira Lafetá - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* São João Evangelista



Profª. Ma. Ana Carolina Ferraro - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* São João Evangelista

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por acreditar que nossa existência pressupõe outra infinitamente superior.

Aos orientadores, Aderlan Gomes da Silva e Bruno Oliveira Lafetá, pelo auxílio, disponibilidade de tempo e material, e por todo conhecimento adquirido.

Aos meus familiares que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que alcançasse meus objetivos.

Aos meus colegas e amigos, pela amizade de graça, pelo amor fiel e pela companhia ímpar de cada um.

Ao Vinícius, pela parceria que muito contribuiu para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São João Evangelista por todo apoio estrutural.

Muito obrigada!

## RESUMO

Os índices morfométricos de copa são relações matemáticas que permitem reconstituir o espaço ocupado pela planta e realizar inferências sobre a competição, estabilidade e vitalidade em povoamentos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da densidade de plantio e da idade na morfometria da copa de eucalipto. O experimento foi estabelecido em blocos ao acaso, com três blocos e no esquema de parcelas subdivididas no tempo. Os tratamentos principais foram constituídos por quatro espaçamentos de plantio e os secundários, quatro idades. Calcularam-se os seguintes índices morfométricos: Porcentagem de Copa (PC), Formal de Copa (FC), Grau de Esbeltez (GE), Índice de Abrangência (IA) e Índice de Saliência (IS). O espaçamento de plantio e a idade podem influenciar a morfometria da copa de árvores de eucalipto. O IA foi o único atributo morfométrico que interagiu com os espaçamentos e idades. A PC, IA e IS tenderam a diminuir ao longo do tempo. O FC e GE se mantiveram estatisticamente estáveis entre 24 e 59 meses de idade. O GE e IS aumentaram à medida que adensou o plantio. Espaçamentos mais amplos tendem apresentar árvores com maior estabilidade, vitalidade e potencial de crescimento.

**Palavras-chave:** Idade. Índices morfométricos. Plasticidade da copa.

## ABSTRACT

The morphometric indexes of crown are mathematical relationships that allow to reconstitute the space occupied by plant and to realize inferences about a competition, stability and vitality in stands. The aim of this work was to evaluate the effect of planting density and age on the crown morphometry of eucalypt. The experiment was established in a randomized three blocks design, split plot scheme in time. The main treatments consisted of four planting spacings and secondary, four ages. The following morphometric indexes were calculated: Crown Proportion (CP), Crown Form (CF), Slenderness Rate (SR), Range Index (RI) and Salience Index (SI). Plant spacing and age may influence the crown morphometry of eucalypt. RI was the only morphometric attribute that interacted with spacings and ages. CP, RI and SI tended to decrease over time. CF and SR remained statistically stable between 24 and 59 months of age. SR and SI increased with planting density. Larger spacings tend to present trees with greater stability, vitality and growth potential.

**Keyword:** Age. Morphometric index. Crown plasticity.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>10</b>
2.1 ESPAÇAMENTO DE PLANTIO .....	10
2.2 ÍNDICES MORFOMÉTRICOS .....	11
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>21</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>22</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sucesso de um empreendimento florestal requer planejamento adequado da cadeia produtiva (MARTINS et al., 2009). Informações da copa de árvores contribuem para melhor formulação de estratégias silviculturais e definição de regimes de manejo (ROMAN et al., 2009; SEIDEL et al., 2016).

A copa é o componente funcional mais importante da árvore, interface entre a vegetação e a atmosfera (CHAKRABORTY et al., 2017). É responsável pela conversão da energia radiante em química através da fotossíntese (TONINI e ARCO-VERDE, 2005). O desenvolvimento da copa é uma expressão do padrão espacial para aquisição de recursos (URIA-DIEZ e POMMERENING, 2017). Mudanças no seu tamanho, forma e posição ocorrem devido a carga genética e condições ambientais de sítio, como a competição por luz, água nutrientes e espaço (HOFMAN et al., 2016, OLIVIER et al., 2016). Espécies de rápido crescimento e exigentes de luz intensificam a fotossíntese pela otimização da distribuição da folhagem para melhor interceptação da radiação luminosa (MAMASHITA et al., 2015).

A morfometria da copa permite compreender a dinâmica de crescimento florestal, na presença ou não de interações espaciais competitivas (URIA-DIEZ e POMMERENING, 2017). Os índices morfométricos mais conhecidos são a proporção de copa, índice de saliência, índice de abrangência, grau de esbeltez e formal de copa (DURLO e DENARDI, 1998).

Os índices morfométricos da copa são utilizados para descrever o crescimento e produção florestal (PADOIN e FINGER, 2010). Estes podem auxiliar a marcação de desbastes, reconstituição de espaço ocupado por planta e em inferências sobre a competição, estabilidade e vitalidade de árvores (DURLO e DENARDI, 1998; TONINI e ARCO-VERDE, 2005; ORELLANA e KOEHLER, 2008).

O principal propósito da maioria dos inventários florestais é a quantificação de madeira. Apesar de pouco explorada, a morfometria da copa fornece subsídios para estimativas volumétricas e de biomassa (TONINI e ARCO-VERDE, 2005; ORELLANA e KOEHLER, 2008). Essa subutilização pode ser atribuída à indisponibilidade de dados, laboriosidade de medição ou de pesquisas que demonstrem seu potencial uso silvicultural. Para viabilizar o levantamento morfométrico, tem-se testado diferentes relações interdimensionais com variáveis independentes rotineiramente obtidas durante a amostragem, como o diâmetro do caule e a altura total (ROMAN et al., 2009; COSTA et al., 2016).

Recentemente, a aplicação de métricas da copa tem sido realizada em inventários que empregam fotografias aéreas de alta resolução e tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (OLIVEIRA et al., 2012; STABEN et al., 2016; HOLM et al., 2017).

Geralmente, as intervenções silviculturais se baseiam na manipulação da competição ou dos fatores que a influenciam para orientar o desenvolvimento das árvores (SILVEIRA et al., 2015; VAN DE PEER et al., 2017). A concorrência por espaço do dossel é uma característica estruturante em ecossistemas florestais, maiores espaçamentos favorecem a extensão lateral da copa de árvores (THORPE et al., 2010; SEIDEL et al., 2016). Essa modulação morfológica, ou plasticidade, é uma estratégia que favorece o acúmulo de biomassa individual em ambientes menos competitivos (VAN DE PEER et al., 2017). Plantios mais densos apresentam árvores menores, maior volume total por hectare e menor sobrevivência (LEITE et al., 2006; MARTINS et al., 2009).

A escolha da densidade de árvores por unidade área deve ser feita conforme o uso final da madeira (LEITE et al., 2006). Inicialmente, busca-se um espaçamento de plantio que possibilite o máximo crescimento a um menor custo (MARTINS et al., 2009). Embora exista uma estreita associação das dimensões da copa com a produtividade, o comportamento morfométrico sob diferentes espaçamentos de plantio ainda é pouco compreendido (PRETZCH et al., 2015; OLIVIER et al., 2016, van de PEER et al., 2017). Segundo Pretzchet al. (2015), o tamanho da copa pode determinar o crescimento da árvore. Todavia, copas maiores podem aumentar a susceptibilidade a perda de água por transpiração e danos por ventos, impactar negativamente a colheita, qualidade e custo da madeira (SEIDEL et al., 2016). O excesso de galhos prejudica o processamento da madeira, reduzindo sua capacidade produtiva e aumentando o risco de acidentes, principalmente, no desgalhamento semimecanizado com motosserra.

Mediante o exposto, o objetivo da realização do presente trabalho foi testar as seguintes hipóteses: i) a morfometria da copa de árvores de eucalipto pode ser influenciada pela densidade de plantio e idade do povoamento? ii) esse efeito é similar entre os índices morfométricos?

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O gênero *Eucalyptus* L. Heritier pertence à família Myrtaceae (CIFLORESTAS, 2013; FORREST e MOORE, 2008). O cultivo em escala comercial de eucalipto no Brasil iniciou-se no início do século XX com o propósito de fornecer dormentes e lenha para locomotivas (BERTOLA, 2013). Atualmente, é predominantemente utilizado para a produção de papel e celulose, painéis industrializados, serrados, compensado e carvão vegetal (ABRAF, 2013).

*Eucalyptus* é o principal gênero florestal cultivado no país e estima-se que represente 38 % de todas as árvores plantadas no mundo (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011). As plantações são estabelecidas conforme a demanda madeireira e pressão de políticas ambientais para conservação de espécies vegetais nativas. O setor brasileiro de árvores plantadas tem sido responsável por mais 6% do Produto Interno Bruto (PIB) industrial nacional (IBA, 2016). Estima-se que o setor apresentou um saldo anual de, aproximadamente, US\$ 6,5 bilhões em 2015, crescimento de 17% em relação ao ano anterior, contando com US\$ 7,8 bilhões em exportações no mesmo ano (IBA, 2016).

Embora a intensificação do plantio esteja relacionada à maiores produtividades, ainda são necessários estudos que contemplem a dinâmica de crescimento das árvores em nível de copa para auxiliar na definição de estratégias silviculturais e regimes de manejo.

### 2.1 ESPAÇAMENTO DE PLANTIO

O arranjo espacial das árvores em um talhão é normalmente definido pela finalidade da madeira. É comum empregar maiores densidades de plantio quando o fim é energético e utilizar espaçamentos mais amplos para madeira serrada. Diversos fatores devem ser avaliados na escolha do espaçamento, pois a densidade de plantas inadequada pode prejudicar o crescimento e elevar o custo de plantio e colheita florestal (LAFETÁ, 2012). A colheita pode ser impactada negativamente nos espaçamentos reduzidos devido à grande quantidade de toras com pequenas dimensões, diminuindo o rendimento operacional (PAIVA; JACOVINE e TRINDADE, 2011).

Segundo literaturas clássicas, como a de Chapman; Allan (1978), para determinar o espaçamento de plantio é necessário a observação de aspectos como clima, disponibilidade de investimentos, uso desejado da madeira, disponibilidade de água e nutrientes, competição por luz e com plantas daninhas, qualidade da madeira desejada, melhoramento genético da espécie e idade de corte.

O melhor espaçamento é aquele que produz o máximo de madeira, em tamanho, forma e qualidade, com menor custo (CAMPOS e LEITE, 2006). O monitoramento do crescimento das unidades de manejo é essencial para avaliar a adequabilidade do material genético à densidade de plantio e ao sítio. Além dos atributos biométricos coletados tradicionalmente em inventários, a análise com índices morfométricos permite verificar a situação de talhões quanto à competição por recursos ao longo do tempo e identificar prováveis necessidades de alteração no arranjo espacial.

## 2.2 INDICES MORFOMÉTRICOS

A morfometria da copa de árvores e suas relações com o espaço e o tempo subsidiam a tomada de decisões sobre o arranjo espacial no plantio e intervenções em povoamentos já estabelecidos (ROMAN et al., 2009; WINK, 2012). A obtenção de índices morfométricos da copa pode aumentar a precisão da modelagem volumétrica e de biomassa, principalmente, em árvores com abundância de galhos e ramos (BATISTA, 2014).

Existem diversos índices morfométricos da copa que são utilizados para descrever o crescimento e produção florestal (PADOIN e FINGER, 2010). Os índices mais conhecidos são o Grau de Esbeltez, Índice de Saliência, Índice de Abrangência, Proporção da Copa e Formal de Copa. Esses índices podem ser calculados a partir de relações matemáticas entre métricas de diâmetro e altura de árvores.

A relação entre altura total e o diâmetro a altura do peito (DAP) da árvore é denominado Grau de Esbeltez. Quando superior a 1, este índice demonstra que o crescimento da árvore em diâmetro é menor se comparado ao crescimento em altura, fato este que pode indicar a necessidade de desbaste (TONINI e ARCO-VERDE, 2005). Enquanto que o Índice de Saliência revela a relação entre o diâmetro da copa e o DAP, indicando quantas vezes o diâmetro da copa é superior ao DAP (DURLO e DENARDI, 1998).

A proporção da copa é uma medida relativa do comprimento da copa à altura total. Sua obtenção é simples e implica na tomada de mais uma altura nas árvores, a altura da base da copa (BATISTA, 2014). De acordo com Durlo e Denardi (1998), a relação entre diâmetro de copa e altura total é chamada Índice de Abrangência e pode ser empregado para auxiliar na definição de desbastes. É um índice que se apresenta inversamente proporcional ao crescimento em altura (TONINI e ARCO-VERDE, 2005). Já o Formal de Copa é um índice estreitamente ligado à arquitetura da copa, sendo calculado pela razão entre diâmetro de copa

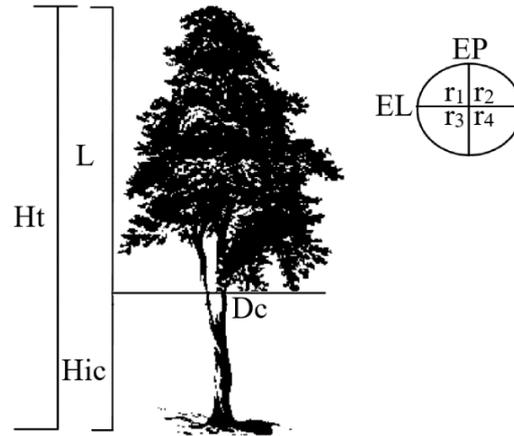
e o seu comprimento (BATISTA, 2014). Menores valores deste índice para um mesmo material genético e sítio implicam em maiores produtividades (DURLO; DENARDI, 1998).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido a 22°13' de latitude Sul e 54°48' de longitude Oeste (Datum Sirgas, 2000), no Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus de São João Evangelista. O clima da região é o temperado chuvoso-mesotérmico, do tipo Cwa pela classificação do sistema internacional de Köppen, com inverno seco e verão chuvoso. As médias anuais de precipitação e de temperatura são de 1211,41 mm e 21,08 °C, respectivamente (SCOLFORO; MELLO; SILVA, 2008).

O experimento foi instalado em maio de 2012 utilizando-se um híbrido de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *E. urophylla* S. T. Blake sobre Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo plano e a 1097 m de altitude. Adotou-se o delineamento experimental em blocos ao acaso, com três blocos e no esquema de parcelas subdivididas no tempo. Os tratamentos principais foram constituídos por quatro espaçamentos de plantio (T1:3,0 x 0,5 m – 6667 plantas ha<sup>-1</sup>; T2:3,0 x 1,0 m – 3333 plantas ha<sup>-1</sup>; T3:3,0 x 1,5 m – 2222 plantas ha<sup>-1</sup> e T4:3,0 x 2,0 m – 1667 plantas ha<sup>-1</sup>, 3 m foi a distância fixa entre linhas de plantio) e os secundários, quatro idades (24, 37, 48 e 59 meses). Cada unidade experimental foi definida por quatro linhas de plantio com 7 plantas, totalizando 28 indivíduos, dos quais 10 foram mensurados, por ter sido adotada a bordadura simples.

O inventário florestal contínuo (IFC) consistiu na medição do diâmetro à altura do peito (DAP – à altura de 1,30 m do solo, cm) com casca, altura total (Ht, m) e altura de inserção da copa (Hic – altura do primeiro galho vivo, m) de todos os fustes. O DAP e as alturas foram tomadas com suta mecânica e hipsômetro eletrônico Haglof, respectivamente. Foram calculados: o comprimento da copa (L, m) – definido como a diferença entre Ht e Hic e o diâmetro da copa (Dc, m) – média dos diâmetros da copa, obtida da medição de quatro raios nas direções entre linhas de plantio e entre plantas através da projeção vertical da copa, usando fita métrica para tomar as distâncias (raios). O modelo de uma árvore e suas características dimensionais são definidas na Figura 1.



**Figura 1.** Representação da altura total (Ht), altura de inserção da copa (Hic), comprimento da copa (L), diâmetro da copa (DC) e os raios (r1, r2, r3 e r4) da projeção de copa obedecendo à orientação entre linhas de plantio (EL) e entre plantas (EP). Adaptado de Wink et al. (2012).

Avaliaram-se os seguintes índices morfométricos baseados no tamanho e na morfologia da árvore: Porcentagem de Copa (PC), Formal de Copa (FC), Grau de Esbeltez (GE), Índice de Abrangência (IA) e Índice de Saliência (IS). Esses índices foram assim expressos:

$$1^{\circ} PC = 100 L/Ht;$$

$$2^{\circ} FC = Dc/L;$$

$$3^{\circ} GE = Ht/DAP;$$

$$4^{\circ} IA = Dc/Ht ; e$$

$$5^{\circ} IS = Dc/DAP.$$

A transformação proposta por Box e Cox (1964), que usa o método da máxima verossimilhança, foi aplicada apenas aos dados de formal de copa com o propósito de atender às premissas de normalidade segundo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias por Bartlett. O valor do parâmetro de transformação lambda ( $\lambda$ ) de Box-Cox foi de -1,39. Realizaram-se análises de variância (teste F), regressão e correlação linear de Pearson.

Testaram-se modelos de regressão polinomial de primeiro, segundo e terceiro grau pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) para a estimação dos índices morfométricos. A seleção dos melhores modelos para as análises gráficas subsequentes se embasou na significância dos parâmetros, teste de falta de ajuste (*lack of fit*), menor erro padrão da estimativa percentual ( $S_{yx}$ , %) e maior coeficiente de determinação ajustado ( $\bar{R}^2$ ).

Para diagnóstico de efeito estatístico, empregaram-se 1 e 5 % de significância em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio dos softwares Excel<sup>®</sup> e R versão 3.3 (R CORE TEAM, 2017), por meio dos pacotes estatísticos MASS (VENABLES e RIPLEY, 2002) e stats (R CORE TEAM, 2017).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação entre espaçamentos de plantio e tempo foi verificada apenas para o índice de abrangência, pelo teste F ( $p \leq 0,01$ ). Este resultado possui grande importância ecofisiológica, pois demonstra a plasticidade da arquitetura da copa de eucalipto quando se aplicam diferentes tratamentos silviculturais. Os tratamentos principais influenciaram apenas o grau de esbeltez ( $p \leq 0,01$ ) e índice de saliência ( $p \leq 0,05$ ). Por sua vez, observou-se efeito estatístico significativo dos tratamentos secundários ( $p \leq 0,01$ ) nesses dois índices morfométricos e na proporção de copa.

Independentemente da idade, as árvores vizinhas não afetaram as médias do formal de copa nos diferentes espaçamentos de plantio. A média desse formal foi de  $0,4731 \pm 0,1340$ , indicativo de copa esbelta ( $FC < 1$ ) conforme Orellana e Koehler (2008) e Silveira et al. (2015). Para árvores com mesmo diâmetro, as mais produtivas são aquelas com menor formal de copa (DURLO e DENARDI, 1998). Por este motivo, o índice tem sido recomendado na escolha de árvores para desbaste seletivo (DURLO e DENARDI, 1998, SILVEIRA et al., 2015). É importante destacar que espaçamentos menores são normalmente adotados para fins energéticos e aqueles mais amplos, para madeira serrada (LEITE et al., 2006). Nestes espaçamentos mais amplos, é comum a realização de desbaste para estimular o crescimento de árvores remanescentes e elevar a rentabilidade do investimento (CARNEIRO et al., 2012).

O formal de copa oscilou entre os tratamentos, porém tendeu à estabilidade ao longo do tempo para as diferentes densidades de plantio. Wink et al. (2012) também não verificaram mudanças significativas do formal de copa em plantações florestais de *Eucalyptus* sp. com 20, 44 e 240 meses. Portanto, é um índice cujo uso para a marcação de desbastes mistos e sistemáticos deve ser visto com cautela. Ressalta-se que o comportamento do formal de copa pode variar em razão do material genético e sítio (DURLO e DENARDI, 1998).

Constatado o efeito das fontes de variação pela análise de variância, procedeu-se com a regressão (Tabela 1). As equações contidas nesta tabela não apresentaram falta de ajuste ( $p > 0,01$ ), denotando adequabilidade dos modelos polinomiais testados para elucidar o comportamento dos índices morfométricos. Nenhum modelo se ajustou aos dados do grau de esbeltez em função da idade. As equações para estimar o índice de abrangência nos espaçamentos 3,0 x 1,0 m, 3,0 x 1,5 m e 3,0 x 2,0 m exibiram os maiores coeficientes de determinação ajustado ( $\bar{R}^2 \geq 0,7$ ). As relações funcionais estabelecidas para o índice de saliência foram as menos precisas ( $\bar{R}^2 < 0,40$  e  $S_{yx} > 20\%$ ), porém úteis para avaliar tendências.

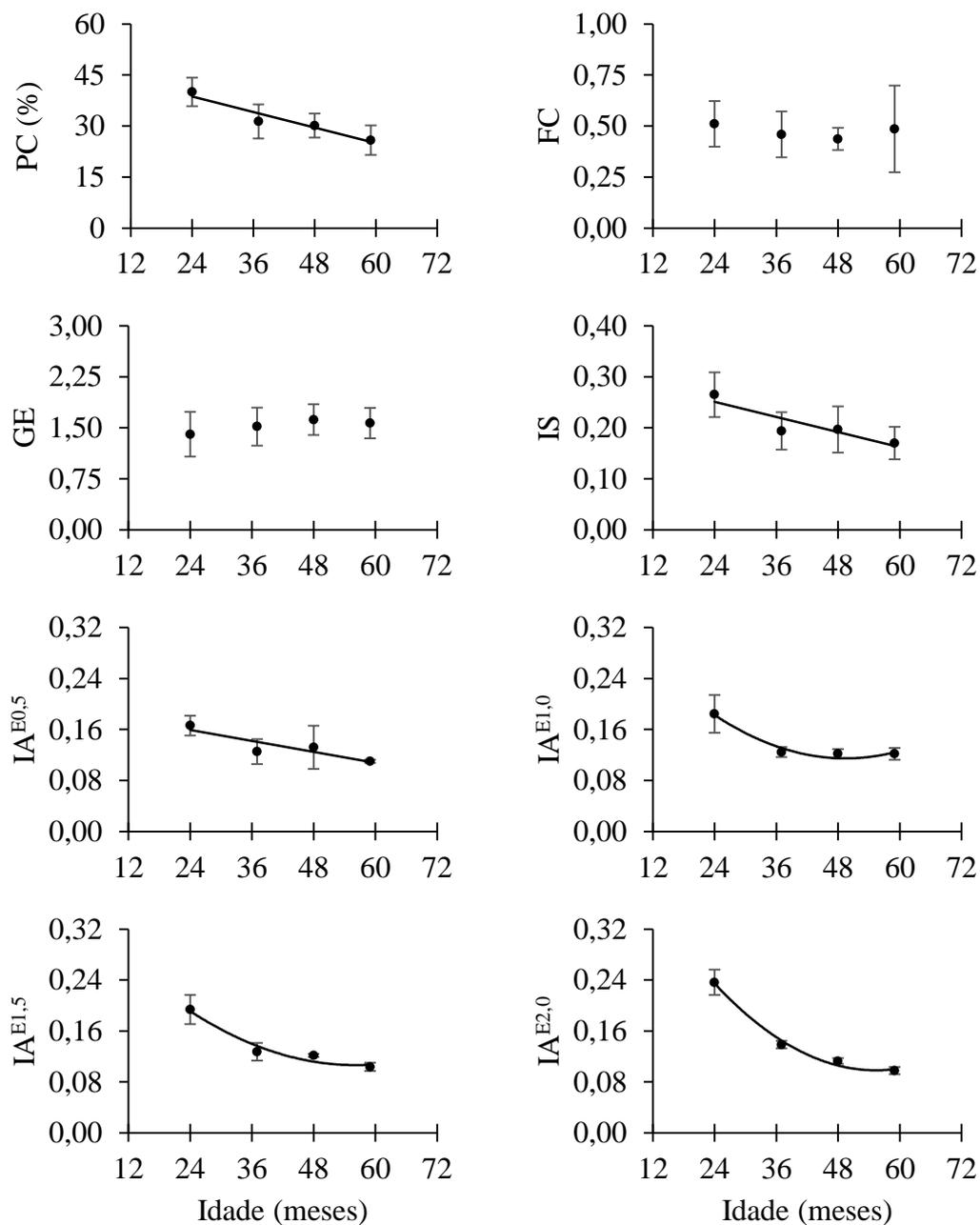
**Tabela 1.** Equações selecionadas para estimar os índices morfométricos da copa de árvores de eucalipto em função da idade (I, meses) e espaçamento entre plantas (E, m)

Índice	Equações	FA ( <i>p</i> )	$\bar{R}^2$	S <sub>yx</sub> (%)
PC	$PC = 47,8478^{**} - 0,3812^{**}I$	0,0827	0,55	13,99
IS	$IS = 0,3103^{**} - 0,0025^{**}I$	0,0452	0,37	20,27
IA <sup>E0,5</sup>	$IA = 0,1930^{**} - 0,0014^{*}I$	0,3763	0,42	16,00
IA <sup>E1,0</sup>	$IA = 0,3713^{**} - 0,0104^{**}I + 0,0001^{*}I^2$	0,3289	0,72	11,96
IA <sup>E1,5</sup>	$IA = 0,3647^{**} - 0,0092^{**}I + 0,0001^{*}I^2$	0,1180	0,83	11,19
IA <sup>E2,0</sup>	$IA = 0,5233^{**} - 0,0154^{**}I + 0,0001^{**}I^2$	0,1514	0,96	8,09
GE	$GE = 2,2813^{**} - 0,9318^{**}E + 0,2189^{*}E^2$	0,3674	0,67	10,23
IS	$IS = 0,2608^{**} - 0,0437^{**}E$	0,5859	0,20	22,76
IA <sup>I24</sup>	$IA = 0,1401^{**} - 0,0441^{**}E$	0,5185	0,57	11,18
IA <sup>I59</sup>	$IA = 0,1222^{**} - 0,0111^{*}E$	0,0254	0,29	8,47

\*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; PC = proporção de copa (%); IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbelteza; FA = teste de falta de ajuste.

O modelo de terceiro grau não se ajustou aos dados morfométricos. Os índices que contemplaram variáveis dendrométricas como DAP e altura total foram influenciados pelo espaçamento de plantio e/ou idade. A proporção de copa foi menor com o envelhecimento do povoamento, resultado da elevação da altura de inserção do primeiro galho vivo ( $r = -0,86$ ,  $p \leq 0,01$ ) e do crescimento em altura ( $r = -0,75$ ;  $p \leq 0,01$ ). A velocidade do crescimento apical foi menor que a velocidade de mortalidade dos ramos próximos a base da copa (desrama natural). Essa dinâmica de crescimento é conhecida e relaciona-se à tendência temporal de inversão da proporção de biomassa da copa em relação àquela do tronco, povoamentos mais antigos possuem mais biomassa de tronco que de copa e vice-versa (SANTANA et al., 2014).

A proporção de copa foi inferior a 50 %, alcançando 26 % na idade de 59 meses. Pela linha de tendência desse índice no tempo, espera-se que sua redução continue além da última idade inventariada (Figura 2); cenário que é desejável para espécies arbóreas cuja finalidade é a produção de madeira. Salienta-se que a densidade de plantio não provocou mudanças significativas desse índice no material genético estudado. No caso de florestas energéticas, que segundo Magalhães (1982) são aquelas que utilizam espaçamentos superadensados e curtas rotações, menores proporções de copa podem facilitar e aumentar a eficiência da colheita florestal. O levantamento da copa é um evento essencial para a ciclagem de nutrientes e acúmulo de resíduos no solo, contribuindo para minimizar a compactação de operações mecanizadas.



**Figura 2.** Representação gráfica dos índices morfométricos da copa de árvores de eucalipto em função da idade. Em que: PC = proporção de copa (%); FC= formal de copa IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez e E = espaçamento entre plantas (m); Barra de erro= desvio padrão da média..

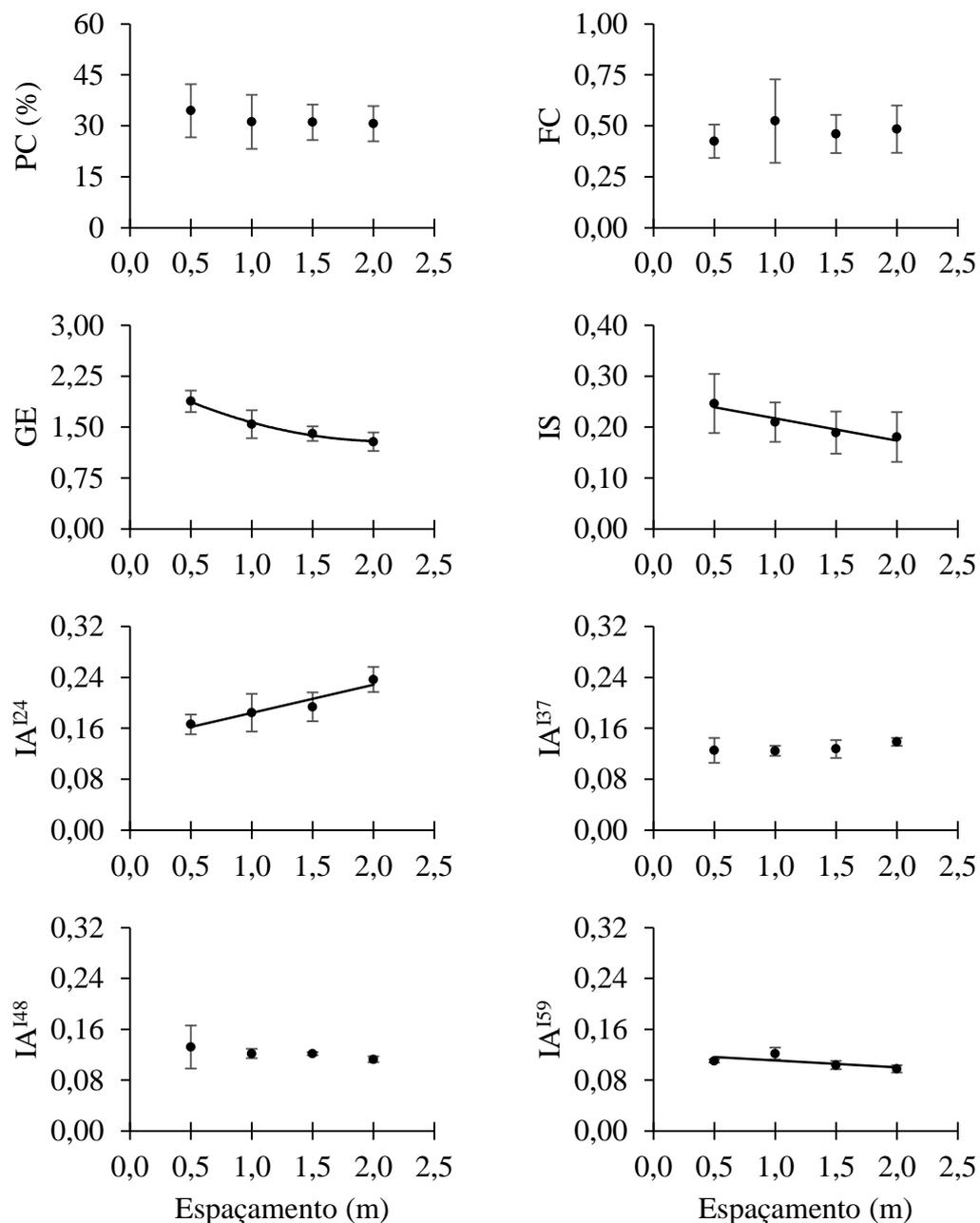
Os índices de abrangência e de saliência tenderam a diminuir ao longo do tempo, condizente com o averiguado para florestas de eucalipto por Wink et al. (2012). As maiores razões  $Dc/Ht$  e  $Dc/DAP$  nos primeiros anos de cultivo, seguidas de declínio, podem ser uma adaptação morfométrica necessária para o estabelecimento e rápido crescimento da espécie. Quando se prevê regimes de desbaste pelo diâmetro atingido por seus componentes, o segundo índice pode indicar o espaço a ser liberado ao redor da árvore remanescente para que ela cresça com menos competição (TONINI e ARCO-VERDE, 2005).

O índice de abrangência se correlacionou com o diâmetro de copa ( $r = 0,43$ ,  $p \leq 0,01$ ) e o de saliência, não ( $r = -0,06$ ;  $p > 0,05$ ). O crescimento relativo do tronco foi mais acelerado que o da copa. As árvores de 24 e 59 meses tiveram uma copa, em média, 26 e 17 vezes maior que seu DAP, respectivamente. Neste mesmo período, a relação da altura com o diâmetro da copa foi de 5:1 para 9:1. Caso mantivesse a proporção de copa com o envelhecimento, os custos com a respiração poderiam se intensificar e diminuir a produção final esperada de madeira (MENALLED e KELTY, 2001).

O comportamento do índice de abrangência no tempo se diferenciou entre os tratamentos principais (Figura 2); reduziu linearmente no plantio mais adensado e de forma não linear, nos demais espaçamentos. A redução desse índice com o crescimento e aumento da dimensão interior do povoamento já foi relatada por Wink et al. (2012). A curva do índice gerada no espaçamento 3,0 x 2,0 m teve a menor abertura de concavidade, o que implicou em maior taxa de variação de 24 para 59 meses. A competição por recursos de crescimento se intensifica com a idade e menor área útil por planta (FERRAZ et al., 2016). Tal fato pode ter contribuído para a menor taxa de variação do índice no espaçamento 3,0 x 0,5 m.

O índice de abrangência pode ser recomendado como critério para auxiliar a tomada de decisão em planos de desbaste, sobretudo, em povoamentos manejados pela altura (altura-objetivo). Aos 24 meses, o índice aumentou com a ampliação do espaçamento (Figura 3). Uma hipótese que deve ser considerada é a de que a limitação espacial tenha prejudicado o crescimento da copa em diâmetro ( $r = 0,89$ ;  $p \leq 0,01$ ), reduzindo o valor do índice com a densidade de plantio. Assim que iniciou o IFC, confirmou-se a sobreposição de copas no espaçamento 3,0 x 0,5 m.

Apenas aos 59 meses notou-se que o índice de abrangência reduziu nos maiores espaçamentos, árvores mais altas em relação ao diâmetro da copa. Neste cenário, a altura se correlacionou com o espaçamento entre plantas ( $r = -0,77$ ;  $p \leq 0,01$ ), mas o diâmetro da copa não ( $r = -0,03$ ;  $p > 0,05$ ). Considera-se, ainda, que esses pares tiveram correlação significativa ( $r > 0,75$ ;  $p \leq 0,01$ ) nas três primeiras medições. O crescimento desproporcional da altura em relação do diâmetro da copa já foi relatado para povoamentos homogêneos de 7 anos das espécies *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Carapa guianensis* Aubl., *Tabebuia avellanadae* Lorentz ex Griseb e *Hymenaea courbaril* L. por Tonini e Arco-Verde (2005).



**Figura 3.** Representação gráfica dos índices morfométricos da copa de árvores de eucalipto em função do espaçamento entre plantas. Em que: PC = proporção de copa (%); FC= formal de copa IS = índice de saliência; IA = índice de abrangência; GE = grau de esbeltez e I = idade (meses); Barra de erro= desvio padrão da média.

O grau de esbeltez e índice de saliência também podem ser usados como indicativo de competição intraespecífica por espaço, que se intensifica quando ocorre o entrelaçamento de copas (ROMAN et al., 2009). À medida que adensou o plantio, houve necessidade de mais espaço para o crescimento das árvores. Maiores valores do grau de esbeltez podem indicar menor estabilidade e maior competitividade pelos recursos do meio (DURLO e DENARDI, 1998).

Durante a condução do experimento foi verificada a presença de três árvores tortas (instáveis) no espaçamento mais denso, consequência provável do grau de esbeltez das plantas e da ação de fatores como chuvas intensas ocorridas na região em dezembro de 2013.

Plantios mais densos tenderam apresentar fustes mais finos ( $r = 0,76$ ;  $p \leq 0,01$ ), resultando em menor robustez e vitalidade. A correlação entre a altura e o DAP foi significativa ( $r = 0,82$ ;  $p \leq 0,01$ ); pequenos diâmetros estiveram associados à menores alturas. À medida que ampliou o espaçamento o DAP aumentou e o grau de esbeltez diminuiu, evidenciando que houve, proporcionalmente, maior crescimento em diâmetro que em altura (ROMAN et al., 2009). Ainda que não seja uma prática usual em florestas energéticas, é provável que a retirada de árvores nesse espaçamento através do desbaste propicie maior crescimento em diâmetro daquelas remanescentes, uma vez que haverá maior disponibilidade de espaço, radiação luminosa, água e nutrientes.

As árvores do espaçamento 3,0 x 2,0 m tenderam a expressar menores grau de esbeltez, índice de saliência e, na idade de 59 meses, índice de abrangência. Este resultado implicou em uma menor competição intraespecífica, mais resistência às intempéries do tempo e árvores com maior potencial de crescimento. Como a competição por luz ocorre em nível de folhagem (URIA-DIEZ e POMMERENING, 2017), a disponibilidade de área útil por planta e a plasticidade da copa permitiram melhor interceptação do recurso e desenvolvimento do fuste. Trata-se de um arranjo espacial promissor para manter o sucesso do material genético no sítio.

A morfometria da copa é consequência da interação com árvores vizinhas durante o desenvolvimento do povoamento, sendo relevante para a compreensão da dinâmica de crescimento em plantações de eucalipto. A morfometria demonstrou ser eficaz para inferir sobre a competição, vitalidade e estabilidade de árvores de eucalipto. Mais pesquisas que contemplem a definição de tratamentos silviculturais, simulações de desbaste e escolha de variáveis preditoras na modelagem ecofisiológica do crescimento e produção são necessárias para melhor planejamento das atividades florestais.

## 5 CONCLUSÕES

O espaçamento de plantio e a idade podem influenciar a morfometria da copa de árvores de eucalipto. A análise de um conjunto de índices morfométricos demonstrou potencial para inferir sobre a competição, vitalidade e estabilidade de árvores, além de auxiliar na definição de atividades silviculturais e regimes de manejo.

A proporção de copa e os índices de abrangência e de saliência tenderam a diminuir ao longo do tempo. As médias de forma de copa e grau de esbeltez se mantiveram estáveis entre 24 e 59 meses de idade.

O grau de esbeltez e o índice de saliência aumentaram à medida que adensou o plantio. O índice de abrangência foi o único atributo morfométrico que interagiu com o espaçamento de plantio e a idade, característica importante para a modelagens interdimensionais. As árvores do espaçamento mais amplo (3,0 x 2,0 m) tenderam à maior estabilidade, vitalidade e potencial de crescimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012. Brasília, 2013, 148p.
- AHO, K. **asbio**: a collection of statistical tools for biologists. R package version 1.3-4. 2016. Disponível em: < <https://CRAN.R-project.org/package=asbio> >. Acesso em: 23 maio 2017.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. ed. 4 Jaboticabal: Funep, 2006, 237p.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384p.
- BERGER, T.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; HASELEIN, C. R. Efeito do espaçamento e da adubação no crescimento de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 75-87, 2002.
- BERTOLA, A. **Eucalipto – 100 anos de Brasil**: “falem mal, mas continuem falando de mim!”. Curvelo – MG: V&M Florestal Ltda., 2013. 91p.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Society**, v. 26, p. 211-252, 1964.
- CAMPOS, J. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal**. Viçosa MG: UFV. 1982. 2006.
- CARNEIRO, J. G. A.; FERRAZ, T. M.; SILVA, M. P. S.; BARROSO, D. G. **Princípios de desrama e desbastes florestais**. Campos dos Goytacazes, RJ: O Coordenador, 2012. 96p.
- CHAKRABORTY, T.; SAHA, S.; MATZARAKIS, A.; REIF, A. Influence of multiple biotic and abiotic factors on the crown die-back of European beech at their drought limit. **Flora**, v. 229, p. 58-70, 2017.
- CHAPMAN, G. W.; ALLAN, T. G. **Técnicas de establecimiento de plantaciones forestales**. Roma: FAO, 1978. 213p.
- CIFlorestas. **Eucalipto**: aspectos botânicos. Brasil, Novembro 2013. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=eucalipto>> Acesso em: 14 de novembro de 2013.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; FLEIG, F. D. Influência da posição social nas relações morfométricas de *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 225-234, 2016.
- DURLO, M. A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 8, n. 1, p. 55-66, 1998.
- EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; MARESCHAL, L.; MOREIRA, R. M. E.; KOUTIKA, L. S.; GENESTE, B.; DELGADO-ROJAS, J. S.; LACLAU, J. P.; SOLA, G.; GONÇALVES, J. L. D. M.; BOUILLET, J. P. Partitioning of net primary production in *Eucalyptus* and *Acacia*

stands and in mixed-species plantations: Two case-studies in contrasting tropical environments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 102-111, ago. 2013;

FERRAZ, A. V.; MOMENTEL, L. T.; POGGIANI, F. Soil fertility, growth and mineral nutrition in *Eucalyptus grandis* plantation fertilizes with different kinds of sewage sludge. **New Forests**, v. 47, p. 861-876, 2016.

FORREST, M.; MOORE, T. *Eucalyptus gunnii*: A possible source of bioenergy? **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 978-980, 2008.

HOFMAN, J.; BARTHOLOMEUS, H.; JANSSEN, S.; CALDERS, K.; WUYTS, K.; van WITTENBERGUE, S.; SANSON, R. Influence of tree crown characteristics on the local PM<sub>10</sub> distribution inside an urban street canyon in Antwerp (Belgium): a model and experimental approach. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 20, p. 265-276, 2016.

HOLM, S.; NELSON, R.; STÅHL, G. Hybrid three-phase estimators for large-area forest inventory using ground plots, airborne LiDAR and space LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 197, p. 85-97, 2017.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Cenários IBÁ**: Estatísticas da indústria brasileira de árvores, Brasília, v. 20, jan. 2016. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Cenarios\\_Janeiro.pdf](http://iba.org/images/shared/Cenarios_Janeiro.pdf)>. Acesso em: 04 mar. 2016;

LAFETÁ, B. O. **Eficiência nutricional, área foliar e produtividade de plantações de eucalipto em diferentes espaçamento estimados com redes neurais artificiais**. 2012, 176f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 603-612, 2006.

MAGALHÃES, J. G. R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: USO DA MADEIRA PARA FINS ENERGÉTICOS, **Anais...** Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982.

MAMASHITA, T.; LAROCQUE, G. R.; DESROCHERS, A.; BEAULIEU, J.; THOMAS, B. R.; MOSSELER, A.; MAJOR, J.; SIDDEERS, D. Short-term growth and morphological responses to nitrogen availability and plant density in hybrid poplars and willows. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 88-97, 2015.

MARTINS, R. J.; SEIXAS, F.; STAPE, J. L. Avaliação técnica e econômica de um harvester trabalhando em diferentes condições de espaçamento e arranjo de plantio em povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 253-263, 2009.

MENALLED, F. D.; KELTY, M. J. Crow structure and biomass allocation strategies of three juvenile tropical tree species. **Plant Ecology**, v. 152, p. 1-11, 2001.

MERKLE, S. A.; NAIRN, C. J. Hardwood tree biotechnology. **In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant**, v. 41, p. 602-619, 2005.

OLIVEIRA, L. T.; CARVALHO, L. M. T.; FERREIRA, M. Z.; OLIVEIRA, T. C. A.; ARCEBI JUNIOR, F. W. Application of LiDAR to forest inventory for tree count in stands of *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 175-184, 2012.

OLIVIER, M.; ROBERT, S.; RICHARD A., F. Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. **Forest Ecology and Management**, v. 374, p. 20-32, 2016.

ORELLANA, E.; KOEHLER, A. B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 229-237, 2008.

PADOIN, V.; FINGER, C. A. G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 95-105, jan./mar. 2010;

PAIVA, H. N. JACOVINE, L.A. G., TRINDADE, C; RIBEIRO, G. T. **Cultivo de Eucalipto, Implantação e Manejo** (2ª edição ed.). Viçosa, MG: Aprenda Fácil Editora, 2011.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globules* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, p. 2839–2851, jul. 2011;

PRETZCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTY, J.; KOIKE, T.; van CON, T.; CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; TOIT, B.; FARNDEN, C.; PAULEIT, S. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, p. 466-479, 2015.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 4, p. 473-480, 2009.

SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. VALE, A. B.; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. P. **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa, MG: SIF, 2014. p. 161-186.

SCOLFORO, J. R. S.; MAESTRI, R.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D.; ASSIS, A. L. de. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, v. 2013, Article ID 139236, 7 p., 2013;

SCOLFORO, J. R.; MELLO, J. M. & SILVA, C. P. de C.(Ed.). **Inventário Florestal de Minas Gerais: Floresta Estacional Semidecidual e Ombrófila - Florística, Estrutura, Diversidade, Similaridade, Distribuição Diamétrica e de Altura, Volumetria, Tendências de Crescimento e Áreas aptas para o Manejo Florestal**. Lavras: UFLA, 2008.

SCOLFORO, J. R. S. **Manejo florestal**. Universidade Federal de Lavras/Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. Lavras, 433 p, 1997.

SEIDEL, D.; RUZICKA, K.; PUETTMANN, K. Canopy gaps the shade of Douglas-fir crowns in the western Cascades, Oregon. **Forest Ecology and Management**, v. 363, p. 31-38, 2016.

SILVEIRA, B. D.; FLORIANO, E. P.; NAKAJIMA, N. Y.; HOSOKAWA, R. T.; ROSOT, N. C.; GRACIOLI, C. R. Relação da morfometria e competição com o crescimento de *Trichilia claussenii* em um fragmento de floresta semidecidual, RS. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 373-382, 2015.

STABEN, G. W.; LUCIEER, A.; EVANS, K. G.; SCARTH, P.; COOK, G. D. Obtaining biophysical measurements of wood vegetation from high resolution digital aerial photography in tropical and arid environments: Northern Territory, Australia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 52, p. 204-220, 2016.

THORPE, H. C.; ASTRUP, R.; TROWBRIDGE, A.; COATES, K. D. Competition and tree crowns: a neighborhood analysis of three boreal tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 259, p. 1586-1596, 2010.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 7, p. 633-638, 2005.

URIA-DIEZ, J.; POMMERENING, A. Crown plasticity in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a strategy of adaptation to competition and environmental factors. **Ecological Modelling**, v. 356, p. 117-126, 2017.

VAN DE PEER, T.; VERHEYEN, K.; KINT, V.; van CLEEMPUT, E.; MUYS, B. Plasticity of tree architecture through interspecific and intraspecific competition in a young experimental plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 385, p. 1-9, 2017.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. 4 ed. New York: Springer, 2002. 495p.

VIDAURRE, G. B.; VITAL, B. R.; SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; CARVALHO, A. M. M. L.; LUCIA, R. M. D.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito da geometria dos dente da serra de fita na produção de madeira serrada de eucalipto. **Revista Árvore**, v.32, n.5, p.939-947, 2008.

WINK, C.; MONTEIRO, J. S.; REINERT, D. J.; LIBERALESSO, E. Parâmetros da copa e sua relação com o diâmetro das árvores de eucalipto em diferentes idades. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 93, p. 57-67, 2012.