Modelagem da produção em nível de povoamento e
por distribuição diamétrica em plantios de eucaliptoModeling production by stand and diameter
distribution in eucalyptus plantationsGileno Brito de Azevedo¹, Erica Karolina Barros de Oliveira²,
Glauce Taís de Oliveira Sousa Azevedo², Hugo Macedo Buchmann³,
Eder Pereira Miguel⁴ e Alba Valéria Rezende⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar as estimativas geradas por duas categorias de modelos de crescimento e produção em plantios de *Eucalyptus urophylla*, sendo um modelo em nível de povoamento total (MPT), por meio de equações simultâneas de Clutter, e outro de distribuição diamétrica (MDD), pelo ajuste de função densidade de probabilidade de Weibull, com três parâmetros. Os dados utilizados nos ajustes dos modelos foram provenientes de 21 parcelas permanentes, mensuradas em quatro ocasiões. O ajuste do MPT proporcionou estimativas confiáveis da produção em volume, com diferenças entre valores observados e projetados de apenas -1,91%, -7,24% e -1,72% nas idades de 48, 60 e 72 meses, respectivamente. O MDD não se adequou à distribuição do povoamento, gerando estimativas não confiáveis do número de indivíduos por classe de diâmetro, e, por extensão, inconsistências na prognose volumétrica.

Palavras-chave: prognose da produção; modelo de Clutter; função Weibull.

Abstract

The aim of this study was to evaluate and compare the estimates generated by two categories of growth and yield models in *Eucalyptus urophylla* plantations. One of them was the model for total stand (MPT), using Clutter's simultaneous equations, and the other one was the diameter distribution model (MDD), by adjustment of the Weibull's probability density function, with three parameters. The data used for the adjustment were obtained from 21 permanent plots measured on four occasions. The MPT adjustment provided reliable estimates of volume production, with differences between observed and projected values of only -1,91%, -7,24% and -1,72% to the ages of 48, 60 and 72 months, respectively. The MDD was not suitable for the diameter distribution in the stand, generating non-reliable estimates for the number of individuals per diameter class, and, by extension, inconsistencies in volumetric prognosis.

Keywords: production prognosis; Clutter's model; Weibull function.

INTRODUÇÃO

A produção de povoamentos florestais é estimada utilizando modelos que simulam a dinâmica natural e preveem a produção ao longo do tempo, considerando diferentes possibilidades de exploração (VANCLAY, 1994). Esses modelos são denominados de modelos de crescimento e produção e podem ser classificados quanto ao nível de detalhamento em três categorias: modelos em nível de povoamento total, modelos de distribuição por classe diamétrica e modelos em nível de árvores individuais (CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos em nível de povoamento total (MPT) fornecem estimativas do crescimento ou da produção por unidade de área, sendo que o volume por área predito ou projetado é obtido a partir de variáveis como idade, altura, área basal e índice de local (CAMPOS; LEITE, 2013). O MPT atende de modo eficiente à maioria dos usuários e, atualmente, é a categoria mais utilizada pelas empresas

¹Professor Assistente. UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campus de Chapadão do Sul. Zona Rural - Caixa-postal: 112 - 79560000 - Chapadão do Sul, MS, Brasil. E-mail: gileno.azevedo@ufms.br.

²Doutorando (a) em Ciências Florestais. UnB - Universidade de Brasília. Asa Norte - 70910900 - Brasília, DF, Brasil E-mail: karolina.czs@gmail.com; gtosousa@gmail.com

³Graduando em Engenharia Florestal. UnB - Universidade de Brasília. Asa Norte 70910900 - Brasília, DF, Brasil E-mail: hugo.efl@gmail.com.

⁴Professor Associado do Departamento de Engenharia Florestal. UnB - Universidade de Brasília. Asa Norte - 70910900 - Brasília, DF, Brasil E-mail: miguelederpereira@gmail.com; albavr@unb.br.

florestais do Brasil (CAMPOS; LEITE, 2013; CASTRO et al., 2013). As principais relações funcionais utilizadas no MPT referem-se principalmente aos modelos de Schumacher (1939), Buckman (1962) e Clutter (1963) (CAMPOS; LEITE, 2013). No país, o modelo de Clutter é o mais difundido, devido à sua menor complexidade e pelo fato de atender às exigências de planejamento para produção de madeira de uso único (DIAS et al., 2005; GÖRGENS et al., 2007; CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos de distribuição diamétrica (MDD) estimam o número de árvores e a produção por hectare, por classe de diâmetro, logo a produção total é obtida por meio do somatório da variável de interesse em todas as classes de diâmetro (CAMPOS; LEITE, 2013). O procedimento utilizado nesses modelos se baseia no ajuste de uma função densidade de probabilidade (f.d.p.) para descrever o comportamento atual e futuro da distribuição dos diâmetros em classes de amplitudes previamente determinadas (ARAÚJO JR. et al., 2013). Diferentes funções e formas de obtenção de seus parâmetros são utilizadas para caracterização da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos (CAO, 2004; NOGUEIRA et al., 2005; PALAHÍ et al., 2007). A f.d.p. de Weibull é atualmente a mais utilizada no setor florestal (BINOTI et al., 2010; MIGUEL et al., 2010; WENDLING et al., 2011), devido sua flexibilidade para assumir diferentes formas e assimetrias, sendo essa uma condição favorável aplicá-la no ajuste de dados provenientes de diferentes locais (CAMPOS; LEITE, 2013; SOARES et al., 2010; WENDLING et al., 2011).

Nos modelos em nível de árvores individuais (MAI) o crescimento e a produção são obtidos para cada árvore individualmente, sendo que a produção do povoamento será a soma das produções individuais de cada árvore (CAMPOS; LEITE, 2013). Além das variáveis: diâmetro, altura e qualidade do local, são incluídos nesse tipo de modelo os índices que indicam o grau de competição ao qual a árvore está submetida (MARTINS et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2013). Esses modelos ainda são pouco utilizados no Brasil (MARTINS et al., 2011) devido à complexidade, ao maior número de funções que o compõem e à falta de estudos que demonstrem sua precisão (CASTRO et al., 2013). No entanto, essa categoria de modelo apresenta a vantagem de gerar informações detalhadas sobre a dinâmica da estrutura dos povoamentos (CASTRO et al., 2013).

Independentemente da categoria, os modelos de crescimento e produção baseiam-se no ajuste de modelos de regressão linear ou não linear (CASTRO et al., 2013). Estudos evidenciam que os três tipos de modelos empíricos propiciam estimativas acuradas da produção, então a escolha do modelo de produção depende basicamente da base de dados, dos recursos disponíveis e do nível de detalhamento que se deseja (SCOLFORO, 2006; CAMPOS; LEITE, 2013). Contudo, a maioria dos estudos com modelagem do crescimento e produção faz uso de apenas uma categoria de modelo, existindo ainda na literatura uma lacuna no que se refere à comparação da precisão das estimativas geradas pelas diferentes categorias de modelos.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar as estimativas geradas por duas categorias de modelos de crescimento e produção (MPT e MDD) em plantios de *Eucalyptus urophylla*.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados foram provenientes de inventários florestais contínuos, realizados entre os anos de 2011 a 2014, em plantios clonais de *Eucalyptus urophylla*, da empresa do Grupo Anglo American (CODEMIN), situado no município de Niquelândia, no estado de Goiás. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013). O clima local, segundo a classificação de Köppen é do tipo Aw, com duas estações bem definidas, uma seca que dura de maio a agosto e outra chuvosa, no restante do ano. A temperatura média anual é de 25°C e a precipitação é de 1700 mm.

Nas idades de 36, 48, 60 e 72 meses, foram medidas 21 parcelas permanentes, cada uma em formato retangular e área útil de 496 m², nas quais o espaçamento entre plantas era de 3,1 x 2 m. As variáveis mensuradas foram: o diâmetro com casca à altura 1,30 m do solo (DAP), superior a 4 cm de todas as árvores, a altura total (Ht) das árvores e altura dominante (Hd), sendo considerada a média das altura das cinco árvores de maior diâmetro de cada parcela, conforme Assmann (1970). Para a obtenção do índice de sítio, foi utilizado o método da curva-guia, ajustando-se o modelo logístico às séries armazenadas em um banco de dados:

$$S = \frac{Hd(1 + 136,10635 \cdot e^{(-0,15485 \cdot I)})}{1 + 136,10635 \cdot e^{(-0,15485 \cdot I_i)}}$$

Em que: S = índice de local (adimensional); Hd = altura dominante (metros); I = idade (meses); e I_i = idade-índice (66 meses).

O volume de cada árvore foi obtido a partir do ajuste do modelo de Schumacher e Hall, utilizando dados provenientes da cubagem rigorosa de 284 indivíduos do povoamento, distribuídos nas diferentes idades (37, 93, 92 e 62 indivíduos nas idades de 36, 48, 60 e 72 meses, respectivamente):

$$V = 0,000033 \cdot DAP^{1,696507} \cdot Ht^{1,222576} \quad (R^2 = 0,9789; S_{yx}\% = 10,7)$$

Em que: V = volume (m^3); DAP = diâmetro a altura do peito (cm); Ht = altura total (m).

Os dados foram separados aleatoriamente em dois subconjuntos, sendo o primeiro composto por 18 parcelas, que foram utilizadas no ajuste das duas categorias de modelos de crescimento e produção (MPT e MDD), e as três restantes, utilizadas para a avaliação desses modelos.

O modelo de povoamento total utilizado foi o de Clutter (1963), composto pelas seguintes relações funcionais (CAMPOS; LEITE, 2013), ajustadas de forma simultânea:

$$\begin{aligned} \ln B_2 &= \ln B_1 \cdot \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \cdot \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \cdot \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \cdot Hd_1 + \ln \varepsilon \\ \ln V_2 &= \beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{I_2}\right) + \beta_2 \cdot S + \beta_3 \cdot \ln B_2 + \ln \varepsilon \end{aligned}$$

Em que: B_2 = área basal do povoamento na idade futura ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); B_1 = área basal do povoamento na idade atual; I_1 = idade atual (meses); I_2 = idade futura; Hd_1 = altura dominante na idade atual (m); S = índice de local; V_2 = volume de madeira com casca do povoamento na idade futura ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); α_0 e α_1 = coeficientes do modelo de área basal; $\beta_0 \dots \beta_3$ = coeficientes do modelo volumétrico; e ε = erro aleatório.

As estimativas dos parâmetros do MPT, com base nas equações simultâneas, foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados, em dois estágios, com auxílio do *software* Eviews 7.1 (IHS GLOBAL, 2010). A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e do erro-padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) (LEITE et al., 2011; CASTRO et al., 2013). Também foi avaliada a distribuição gráfica dos resíduos para a área basal e o volume estimado pelas equações obtidas.

Para o ajuste do MDD, as árvores, de cada parcela e em cada idade, foram agrupadas de acordo com o seu diâmetro, em classes com amplitude de 2 cm (ARAÚJO JR. et al., 2010), sendo o limite inferior da primeira classe definido com base no diâmetro mínimo de inclusão (4 cm). O agrupamento resultou em dez classes diamétricas e o valor central de classe variou de 5 a 23 cm.

Para cada parcela, em cada idade, foi ajustada a função densidade de probabilidade de Weibull com três parâmetros (3P), definida por:

$$f(x) = \left(\frac{\gamma}{\beta}\right) \cdot \left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{x - \alpha}{\beta}\right)^{\gamma}}$$

Em que: X = centro de classe de diâmetro, em cm; α = parâmetro de locação; β = parâmetro de escala; γ = parâmetro de forma.

O método utilizado para a obtenção dos parâmetros da função de Weibull foi o da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fairweather (1989). Para testar a aderência da função aos dados, utilizou-se o teste Kolmogorov-Smirnov (SOKAL; ROHLF, 1995), que compara a frequência acumulada estimada com a observada, sendo a classe de maior divergência o valor D do teste, que sequencialmente é comparado com um D tabelado ($\alpha = 0,05$). O teste é dado por:

$$D = \max |F_o(x) - F_e(x)|$$

Em que: D = diferença máxima absoluta; $F_o(x)$ = frequência acumulada observada; $F_e(x)$ = frequência acumulada esperada.

A recuperação da distribuição diamétrica foi realizada correlacionando parâmetros da função de Weibull com características do povoamento e utilizando regressões lineares e não-lineares encontradas na literatura (LEITE et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2005; SCOLFORO, 2006; BINOTI et al., 2010; MIGUEL et al., 2010; RETSLAFF et al., 2012). Portanto, foram considerados como variáveis dependentes os parâmetros da função Weibull em uma idade futura e, como variáveis independentes, os parâmetros dessa mesma função em uma idade atual e os atributos do povoamento nas idades atual e futura (NOGUEIRA et al., 2005). Os atributos do povoamento utilizados foram: idade, número de árvores, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio quadrático, área basal, altura dominante e combinações dessas variáveis.

Os ajustes dos modelos foram feitos com o conjunto de dados oriundos de todas as medições e ocasiões, através do *software* Statistica 7.0 (STATSOFT INC, 2004), utilizando o algoritmo Levenberg-Marquadt para modelos não-lineares e o método dos Mínimos Quadrado Ordinários (MQO) para modelos lineares. Foram selecionados os modelos de melhor desempenho, com base no coeficiente de determinação (R^2), erro-padrão residual (S_{yx} %) e distribuição gráfica dos resíduos, gerando assim um sistema de equações para projetar a frequência de indivíduos por classe diamétrica.

Após a obtenção do número de indivíduos por classe de diâmetro, foi obtida a altura correspondente a cada centro de classe, utilizando a equação hipsométrica de Trorey:

$$Ht = 0,400497 + 2,113593.DAP - 0,034815.DAP^2 \quad (R^2 = 0,8500; S_{yx} \% = 9,11)$$

Em que: Ht = altura total (m); e DAP = diâmetro a altura do peito (cm).

Essa equação foi ajustada a partir dos mesmos dados utilizados na obtenção da equação de volume. De posse dos diâmetros, representados pelos centros de classe e por suas alturas correspondentes, foi aplicada a equação de volume e multiplicada pela densidade de indivíduos projetada para cada classe diamétrica, a fim de obter a produção por hectare em cada classe de diâmetro. O somatório da produção das classes resultou na produção total projetada para cada idade (CAMPOS; LEITE, 2013).

Para a avaliação dos modelos de MPT e MDD ajustados, foi projetado o volume por hectare, considerando as três parcelas independentes do ajuste, na idade inicial de 36 meses, para as idades futuras (48, 60 e 72 meses). Para a seleção do modelo mais adequado para a projeção da produção volumétrica, foram elaborados histogramas com os valores observados de volume por hectare com os valores estimados pelas duas categorias de modelo, em cada idade. Essas estimativas foram comparadas com os valores reais através do teste do qui-quadrado ($\alpha = 0,01$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste do MPT resultou em equações satisfatórias para as estimativas da projeção em área basal e volume em idades futuras. Todos os coeficientes foram estatisticamente significativos pelo teste t ($p < 0,0485$), além de a equação ter evidenciado alta correlação entre os valores observados e estimados e baixo valor do erro-padrão da estimativa (Tabela 1). Os sinais associados aos coeficientes estão coerentes com a literatura (CAMPOS; LEITE, 2013), em que o coeficiente α_1 , associado à idade e à altura dominante na idade atual, é positivo, e o coeficiente β_1 , associado ao inverso da idade, é negativo.

Tabela 1. Estimativas dos coeficientes da regressão para área basal e volume, e estatísticas dos ajustes dos modelos de povoamento total (MPT), pelas equações simultâneas de Clutter.

Table 1. Estimates of the regression coefficients for basal area and volume; and statistics of the adjustment of the model for the total forest stand (MPT); by Clutter's simultaneous equations.

Parâmetro	Área Basal		Volume			
	α_0	α_1	β_0	β_1	β_2	β_3
Estimativa	3,540954	0,016968	2,270680	-20,169710	0,006643	1,025544
Teste t	19,9103	1,9544	17,3043	-12,0945	3,4073	39,1675
Significância	0,0000	0,0485	0,0000	0,0000	0,0009	0,0000
Coeficiente de determinação (R^2)	0,9306		0,9467			
Erro-padrão (S_{yx} %)	5,05		5,75			

Quando ajustado o modelo de Clutter na forma reduzida, verificou-se inconsistência no coeficiente α_1 , que acompanha a expressão $[(1-I_1/I_2).S]$ e, portanto, essa expressão foi substituída por $[(1-I_1/I_2).Hd_1]$, conforme sugerido por Campos e Leite (2013); Salles et al., (2012), ao avaliar o modelo de Clutter para estimar a produção de sete clones de eucalipto, conduzido em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, verificaram relações funcionais diferentes para cada clone, indicando, portanto, a necessidade de avaliar as relações funcionais para cada situação específica.

O MPT estimou com precisão as áreas basais e os volumes em idades futuras (B_2 e V_2) (Figura 1). Os erros das estimativas variaram de -12% a 15% para a área basal e de -12% a 18% para o volume, não sendo verificadas, através da análise gráfica dos resíduos, tendências de sub ou superestimativas, e, portanto, as estimativas obtidas a partir das equações simultâneas são consideradas confiáveis. Na literatura, outros trabalhos também reportaram bom desempenho do modelo de Clutter para plantios de eucalipto não desbastados (DEMOLINARI et al., 2007; LEITE et al., 2011; SALLES et al., 2012; CASTRO et al., 2013) e desbastados (DIAS et al., 2005; GÖRGENS et al., 2007).

Figura 1. Distribuição dos erros das estimativas, em função dos valores observados, obtidos a partir do modelo de Clutter.

Figure 1. Distribution of errors of the estimates, related to the observed values obtained by application of the Clutter model.

Em relação ao MDD, os ajustes da função Weibull propiciaram boa aderência aos dados observados, sendo 86% dos valores não significativos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,01$). Dessa forma, os parâmetros da função foram utilizados no ajuste de modelos para a recuperação desses parâmetros, juntamente com os atributos do povoamento, em uma idade futura, permitindo, assim, fazer a prognose do número de indivíduos por classe de diâmetro e da produção em volume. Após selecionar o modelo de melhor desempenho para cada parâmetro da função de Weibull e para os atributos do povoamento, o MDD foi composto pelas equações apresentadas na tabela 2.

Ao avaliar as equações que compõem o MDD, para os atributos do povoamento, de uma forma geral, boas estatísticas de ajuste foram verificadas, com altos valores de R^2 e baixos valores de S_{yx} % (Tabela 2). Entretanto, para as equações que estimam os parâmetros da função de Weibull, essas estatísticas foram menos aceitáveis, principalmente para os parâmetros β e γ , que apresentaram valores de R^2 em torno de 0,50 e S_{yx} % superiores a 11%. Na literatura, geralmente os valores de R^2 encontrados nas equações que estimam esses parâmetros são superiores aos obtidos no presente trabalho (LEITE et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2005; BINOTI et al., 2010). Contudo, Binoti et al. (2014) cita que o parâmetro de forma (γ) geralmente apresenta baixa correlação com os atributos do povoamento.

A análise gráfica dos resíduos mostrou que as equações que compõem o MDD (Figura 2) propiciaram boas estimativas para os atributos do povoamento, sem apresentar tendências. Contudo, para as equações que estimam os parâmetros da função de Weibull, principalmente β e γ , houve tendência em superestimar os menores valores e subestimar os maiores valores desses parâmetros, corroborando com os valores obtidos nas estatísticas de ajuste.

Tabela 2. Equações que expressam os parâmetros da função de Weibull e os atributos do povoamento de *Eucalyptus urophylla*.

Table 2. Equations that express the parameters of the Weibull function and attributes of the stand of *Eucalyptus urophylla*.

Atributos	Equação selecionada	R ²	Syx%
α_2	$\alpha_2 = -1,963187 + 0,000479.N_2 + 1,041196.dmin_2 - 0,027544.\alpha_1$	0,8109	11,68
β_2	$\beta_2 = 6,365613 - 0,001641.N_2 + 0,047778.dmax_2 + 0,454983.\beta_1$	0,5101	11,43
γ_2	$Ln\gamma_2 = \left(0,267683.e^{\left(-1,489603.\left(\frac{l_2^{0,443185}}{l_1^{0,443185}}\right)\right)}\right) + 0,000430.\beta_2 + 0,767876.Ln\gamma_1$	0,4644	16,80
N_2	$N_2 = N_1.e^{\left(-94,247468.\left(\frac{l_2^{0,000518}}{l_1^{0,000518}}\right)\right)}$	0,9659	1,68
$dmin_2$	$dmin_2 = 1,034441.dmin_1 + 1,611783.\left(\frac{l_1}{l_2}\right) - 0,073947.q_1$	0,8310	8,06
$dmax_2$	$dmax_2 = 12,080196 + 9,615332.\left(\frac{l_1}{l_2}\right).LnHd_1 + 17,280014.\left(\frac{l_1}{l_2}\right).LnI_2 - 8,511530.\left(\frac{l_1}{l_2}\right).LnN_2 - 11,778787.\left(\frac{l_1}{l_2}\right).LnG_1$	0,8517	4,92
q_1	$q_1 = 10,799776 - 0,003761.N_1 + 0,310427.G_1 + 0,065893.Hd_1$	0,9964	0,87
G_1	$G_1 = -497,338554 + 0,261089.Hd_1 - 0,050150.N_1 + 77,839579.LnN_1 + 0,274840.I_1$	0,9458	4,82
Hd_1	$Hd_1 = \frac{67,408382.I_1}{104,329871 + I_1}$	0,8283	4,67

α_1 , β_1 e γ_1 = parâmetros da função de Weibull na idade atual; α_2 , β_2 e γ_2 = parâmetros da função de Weibull na idade futura; N_1 e N_2 = densidade de indivíduos (ind ha⁻¹) na idade atual e futura, respectivamente; $dmin_1$ e $dmin_2$ = diâmetro mínimo (cm) na idade atual e futura, respectivamente; $dmax_1$ e $dmax_2$ = diâmetro máximo (cm) na idade atual e futura, respectivamente; q_1 = diâmetro médio quadrático (cm) na idade atual; G_1 = área basal (m² ha⁻¹) na idade atual; Hd_1 = altura dominante (m) na idade atual; I_1 e I_2 = idade atual e futura (meses), respectivamente. r = coeficiente de correlação entre valores observados e estimados; $S_{yx\%}$ = erro-padrão residual (%).

Figura 2. Distribuição dos erros das estimativas, em função dos valores observados, para os parâmetros da função de Weibull e para os atributos do povoamento.

Figure 2. Distribution of errors of the estimates, as related to the observed values, for the parameters of the Weibull function and the stand attributes.

Ao avaliar a eficiência do modelo em projetar a frequência de indivíduos por classe de diâmetro, nas três parcelas utilizadas para a avaliação dos modelos, foi verificada tendência em superestimar o número de indivíduos das menores classes e subestimar nas maiores classes, sendo essa tendência mais acentuada com o aumento da idade (Figura 3). De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov, a frequência estimada diferiu estatisticamente da observada nas idades de 48, 60 e 72 meses ($p < 0,01$), confirmando que o modelo não se ajustou de forma adequada aos dados do povoamento. Esse fato pode estar associado à qualidade do ajuste verificada para os parâmetros da função de Weibull. Esses resultados não corroboram com os de outros trabalhos (SOARES et al., 2004; ARAÚJO JR. et al., 2010; MIGUEL et al., 2010), os quais reportaram resultados satisfatórios ao utilizar a função de Weibull, justificando assim a necessidade de ajustar e comparar diferentes categorias de modelos e funções, visando estimativas precisas na projeção da produção.

Figura 3. Média das frequências observadas (barras) e prognosticadas a partir do modelo de distribuição diamétrica ajustado (linhas tracejadas), para as idades de 36, 48, 60 e 72 meses.

Figure 3. Mean of observed frequencies (bars); and those predicted from the adjusted diameter distribution model (dashed lines), for ages 36, 48, 60 and 72 months.

Ao aplicar as duas categorias de modelos ajustados, nas três parcelas utilizadas para a avaliação dos modelos, foram verificadas que ambas subestimaram a produção em volume, para as idades de 48, 60 e 72 meses (prognose realizada a partir de atributos do povoamento na idade de 36 meses) (Figura 4). No entanto, o MPT resultou em diferenças entre os valores observados e estimados de apenas -1,91%, -7,24% e -1,72% nas idades de 48, 60 e 72 meses, respectivamente, enquanto que no MDD essa diferença foi de -7,72%, -15,16 e -12,99%, respectivamente.

Figura 4. Volume de madeira observado e estimado pelos modelos de povoamento total (MPT) e de distribuição diamétrica (MDD), em função da idade. As barras representam os desvios-padrões.

Figure 4. Wood volume observed and estimated by the total stand models (MPT) and diameter distribution (MDD), according to age. Bars represent standard deviations.

De acordo com o teste do qui-quadrado, os volumes projetados pelo MPT foram estatisticamente iguais aos volumes observados em todas as idades ($\chi^2_{tab(1\%)} = 9,21$; $\chi^2_{calc(48\text{ meses})} = 0,30$; $\chi^2_{calc(60\text{ meses})} = 3,35$; $\chi^2_{calc(48\text{ meses})} = 0,70$), ao passo que com o uso do MDD, esses valores foram diferentes para as idades de 60 e 72 meses ($\chi^2_{tab(1\%)} = 9,21$; $\chi^2_{calc(48\text{ meses})} = 3,49$; $\chi^2_{calc(60\text{ meses})} = 16,94$; $\chi^2_{calc(48\text{ meses})} = 15,82$). Esse resultado pode ser explicado pela ineficiência do MDD ajustado em prognosticar a frequência de indivíduos por classe de diâmetro. Dessa forma, considera-se que o MPT, apesar de fornecer informações menos detalhadas do povoamento, propiciou estimativas consistentes e mais confiáveis para a prognose do volume.

CONCLUSÕES

O ajuste do modelo para povoamento total, utilizando o sistema de equações simultâneas de Clutter, propiciou estimativas confiáveis da produção em volume, aos 48, 60 e 72 meses, para o povoamento estudado.

O modelo de distribuição diamétrica não se adequou à distribuição do povoamento estudado, gerando estimativas imprecisas do número de indivíduos por classe de diâmetro e, conseqüentemente, gerou estimativas não precisas do volume de madeira produzida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JR., C. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; BINOTI, D. H. B.; ALCÂNTARA, A. E. M.; BINOTI, M. L. M. S. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função Gama. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 2, p. 307-314, 2013.

ARAÚJO JR., C. A.; NOGUEIRA, G. S.; OLIVEIRA, M. L. R.; MIRANDA, R. O. V.; CASTRO, R. V. O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto em diferentes amplitudes de classe. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1275-1281, 2010.

ASSMANN, E. *The principles of forest yield study*. Oxford: Pergamon Press, 1970. 506 p.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 747-754, 2014.

BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R.; CRUZ, J. P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 147-156, 2010.

BUCKMAN, R. E. *Growth and yield of red pine in Minnesota*. Washington, DC: USDA, 1962. (General Technical Report, NC-271).

- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4.ed. Viçosa: UFV, 2013. 605 p.
- CAO, Q. V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, Bethesda, v. 50, n. 4, p. 682-685, 2004.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, 2013.
- CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda, v. 9, p. 354-371, 1963.
- DEMOLINARI, R. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Crescimento de plantios clonais de eucalipto não desbastados na região de Monte Dourado (PA). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 503-512, 2007.
- DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; COUTO, L.; CARVALHO, A. F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 731-739, 2005.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353 p.
- GÖRGENS, E.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 879-885, 2007.
- GOVE, J. H.; FAIRWEATHER, S. E. Maximum-likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 28, n. 1, p. 61-69, 1989.
- IHS GLOBAL. **Eviews 7: quantitative micro software**. Version 7.1. Irvine, 2010.
- LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CHAGAS, J. C. C.; SOUZA, A. L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 271-280, 2005.
- LEITE, H. G.; OLIVEIRANETO, R. R.; MONTE, M. A.; FARDIN, L.; ALCANTARA, A. M. de; BINOTI, M. L. M. S.; CASTRO, R. V. O. Modelo de afilamento de cerne de *Tectona grandis* L.f. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 53-59, 2011.
- MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 9, p. 1089-1098, 2011.
- MIGUEL, E. P.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. Using the Weibull function for prognosis of yield by diameter class in *Eucalyptus urophylla* stands. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 94-104, 2010.
- NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; CARVALHO, A. F.; SOUZA, A. L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.
- PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; BLASCO, E.; TRASOBARES, A. Comparison of beta, Johnson's SB, Weibull and truncated Weibull functions for modeling the diameter distribution of forest stands in Catalonia (north-east of Spain). **European Journal of Forest Research**, Berlin, v. 126, n. 4, p. 563-571, 2007.

- RETSLAFF, F. A. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; BERNETT, L. G.; FIGURA, M. A. Prognose do crescimento e da produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no Sul do Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 719-732, 2012.
- SALLES, T. T.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; BOECHAT, C. P. S.; PAIVA, H. N.; SANTOS, F. L. Modelo de Clutter na modelagem de crescimento e produção de eucalipto em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 47, n. 2, p. 253-260, 2012.
- SCHUMACHER, F. X. A new growth curve and its application to timber studies. *Journal of Forestry*, Bethesda, v. 37, p. 819-820, 1939.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 393 p.
- SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA, M. L. R.; CARVALHO, A. Especificação de um modelo de crescimento e produção florestal. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 831-837, 2004.
- SOARES, T. S.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; VALE, A. B. Comparação de diferentes abordagens na modelagem da distribuição diamétrica. *Floresta*, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 731-738, 2010.
- SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry**: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. 3.^{ed}. New York: W.H. Freeman, 1995. 887 p.
- STATSOFT, INC. **Statistica (data analysis software system)**, version 7.0. 2004.
- VANCLAY, J. K. **Modeling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Copenhagen: CAB International, 1994. 312 p.
- WENDLING, W. T.; EMERENCIANO, D. B.; HOSOKAWA, R. T. Ajuste da função de distribuição diamétrica Weibull por planilha eletrônica. *Floresta*, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 205-220, 2011.

Recebido em 09/03/2015

Aceito para publicação em 18/11/2015