ISSN 1676-918X / e-ISSN 2176-509X

Embrapa Cerrados

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 417

Planaltina, DF / Outubro, 2024

Comparação dos modelos de Clutter e modificado de Pienaar e Shiver na estimativa de produção e crescimento de eucalipto desbastado em sistema agrossilvipastoril

Sebastião Pires de Moraes Neto, Karina Pulrolnik, Lourival Vilela e Kleberson Worslley de Souza

Pesquisadores, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

Resumo – Modelos em nível de povoamento são amplamente utilizados pelas empresas florestais no Brasil para estimar as produções atuais e futuras de madeira. O presente experimento teve como objetivo comparar o desempenho dos modelos de Clutter e Modificado de Pienaar e Shiver para estimar o crescimento e a produção de povoamento de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* desbastado em sistema agrossilvipastoril. Os dados utilizados provieram de experimento em delineamento de blocos ao acaso com três repetições. As medidas de diâmetro à altura do peito e altura total foram realizadas anualmente a partir de 30 até 114 meses. O desbaste foi realizado aos 66 meses. Por meio das estatísticas de avaliação, observou-se que o modelo de Clutter, para os parâmetros volume comercial e área basal, se ajustaram melhor aos dados observados do que o modelo modificado de Pienaar e Shiver.

Termos para indexação: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urograndis*, sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, modelos em nível de povoamento, estimativa de sortimento de madeira.

Application of Clutter and modified Pienaar and Shiver models in estimating production and growth of thinned eucalypt in an agroforestry system

Abstract – Stand-level models are widely used by forestry companies in Brazil to estimate current and future wood production. The present experiment aimed to compare the performance of the Clutter model and the Modified Pienaar and Shiver model to estimate the growth and production of thinned *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* stands in an agroforestry system. The data used came from an experiment in a randomized block design with three replications and measurements of diameter at breast height and total height were carried out annually from 30 to 114 months and thinning was carried out at 66 months. Through evaluation statistics, it was observed that the Clutter model, for the commercial volume and basal area parameters, adjusted better to the observed data than the modified Pienaar and Shiver model.

Index terms: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urograndis*, Crop-Livestock-Forest Integration system, stand-level models, wood assortment estimation.

Embrapa Cerrados
BR 020, Km 18, Rod. Brasília-Fortaleza
Caixa Postal 08223
73310-970 Planaltina, DF
www.embrapa.br/cerrados
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente
Eduardo Alano Vieira
Secretária-executiva
Lidiamar Barbosa de Albuquerque
Membros
Alessandra de Jesus Boari
Alessandra Silva G. Faleiro
Angelo Aparecido Barbosa Sussel
Fábio Gelape Faleiro
Fabíola de Azevedo Araújo
Giuliano Marchi
Jussara Flores de Oliveira Arbues
Karina Pulrolnik
Maria Emília Borges Alves
Natália Bortoleto Athayde Maciel

Edição executiva e revisão de texto
Jussara Flores O. Arbues
Normalização bibliográfica
Marilaine Shaun Pelufe (CRB-1/2023)
Projeto gráfico
Leandro Sousa Fazio
Diagramação
Wellington Cavalcanti
Publicação digital: PDF

Todos os direitos reservados à Embrapa.

Introdução

Os sistemas agrossilvipastoris estão ganhando espaço na mentalidade do produtor agrícola brasileiro, que visualiza, apesar da maior complexidade do sistema, ganhos econômicos e maior sustentabilidade de suas terras, por meio de práticas que protegem e fertilizam o solo, além de promoverem maior biodiversidade. Quando tratados de maneira racional, ou seja, buscando interações proveitosas entre os componentes vegetal e animal escolhidos, esses sistemas produzirão maior equilíbrio ambiental, propiciando melhor controle de pragas e maior produtividade nas culturas agrícolas e florestais, além da criação de animais. O componente florestal pode ter diversos arranjos espaciais e de espécies, sendo algumas espécies de *Eucalyptus* as mais utilizadas, até o momento, devido ao seu rápido crescimento e geração de multiprodutos. Uma variedade muito procurada de eucalipto é o híbrido entre *Eucalyptus urophylla* e *E. grandis* (*Eucalyptus urograndis*), cuja madeira pode ser usada na produção de celulose, serraria, painéis, lenha e carvão, além de, na época de floração, ser útil na produção de mel pelas abelhas, que favorecem a polinização do eucalipto e de outras espécies ao redor.

Para gerenciar florestas, é necessário compreender os processos de crescimento e produção, uma vez que o manejo deve ser decidido em grande parte pela prognose de produções futuras a partir de informações correntes (Campos; Leite, 2013). Como as florestas constituem sistemas biológicos dinâmicos que estão continuamente mudando, modelos de crescimento e produção são necessários para projetar essas mudanças e fornecer informações relevantes que auxiliem nas tomadas de decisões (Santana et al., 2005).

Para estimar o crescimento e a produção de madeira, são utilizados modelos, sendo os em nível de povoamento os mais comuns no setor florestal brasileiro. Modelos de crescimento e produção em nível de povoamento, às vezes denominados modelos de povoamento total, não explicam diretamente a variação do tamanho das árvores dentro do povoamento. Eles estimam o crescimento e/ou a produção a partir de atributos em nível de povoamento, como idade, área basal e índice de local. O melhor exemplo desses modelos são os de densidade variável, que incluem a densidade como uma parte dinâmica do sistema de equações, sendo úteis quando o resultado pretendido é o volume por unidade de área, especialmente para povoamentos submetidos a desbaste (Campos; Leite, 2013). Entre esses modelos, podemos citar os de Clutter (1963) e Pienaar e Shiver (1986), bem como suas modificações (Dias, 2005; Gorgens et al., 2007). Os modelos analisados neste trabalho (Clutter e Pienaar e Shiver modificado) foram escolhidos por serem apropriados a experimentos com desbaste, que é uma peculiaridade deste estudo. Outros tipos de modelos de crescimento e produção também podem ser utilizados, como os de distribuição diamétrica e modelos de árvores individuais (Penido et al., 2020; Veridiano et al., 2020; Farias et al., 2021).

Entre as atividades de manejo do componente arbóreo, destaca-se o desbaste, que é a remoção de uma proporção de árvores num povoamento florestal, visando a conseguir mais espaço de crescimento para as árvores remanescentes, aumentando a produção de madeira utilizável durante o ciclo de corte do povoamento, além de garantir a produção contínua de madeira (Campos; Leite, 2013).

Neste estudo, buscou-se comparar dois modelos de crescimento e produção, a nível de povoamento, que melhor se ajustam aos dados de volume e área basal de plantio de *Eucalyptus urograndis* em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que passou por processo de desbaste.

Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido com dados de um experimento do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) implantado entre os meses de janeiro e fevereiro de 2009, na Embrapa Cerrados, em Planaltina, DF (15°36'S e 47°42'W; 980 m de altitude), em área anteriormente ocupada com pastagens de *Brachiaria brizantha* 'Marandu'; *B. brizantha* consorciada com *Stylosanthes guianensis* e *B. brizantha* consorciada com *Leucaena leucocephala*. O clima da região é Aw (classificação de Köppen), caracterizado como clima tropical com inverno seco. Apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e estação seca nítida no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C. As precipitações mensais e as temperaturas médias mensais mínimas e máximas (média mensal de 10 anos de experimento – 2009 a 2018) estão apresentadas na Figura 1. O solo é caracterizado como Latossolo Vermelho, de textura argilosa. As características químicas do solo estão apresentadas na Tabela 1.

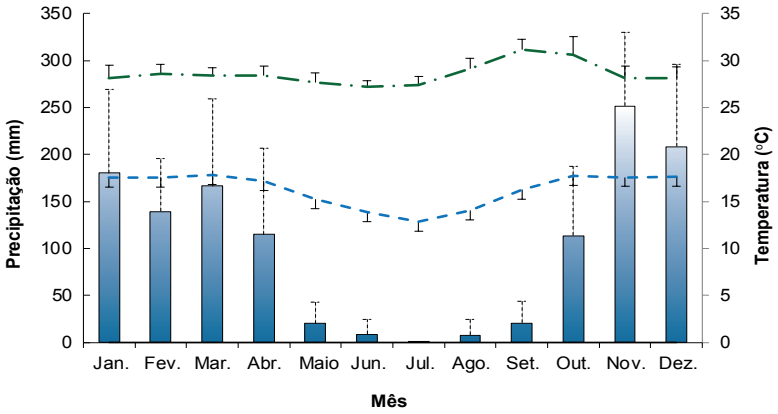

Figura 1. Precipitação em mm (barras), temperatura média mínima (°C) (linha tracejada), temperatura média máxima (°C) (linha traço-ponto), média de 10 anos de experimento para cada mês. As linhas verticais representam o desvio padrão para cada parâmetro.

Tabela 1. Características químicas do solo da área do experimento antes de sua instalação.

Profundidade (cm)	pH[1]	P (mg L^{-1})	K (mg L^{-})	Al	Ca	Mg	H + Al	CTC[2]	V[3] (%)	CO[4] (g kg^{-1})
				($Cmol_c/dm^3$)						
0 a 20	5,55	0,48	67,24	0,14	1,45	0,86	4,41	6,90	35,70	16,59
20 a 40	5,47	0,64	33,44	0,23	0,96	0,57	4,19	5,81	27,37	13,46

[1] pH em água (H_2O).
[2] CTC: capacidade de troca catiônica – *Ca* + *Mg* + *K*/391 + (*H* + *Al*).
[3] V: volume – [(*Ca* + *Mg* + *K*/391)/*CTC*)] x 100.
[4] CO: carbono orgânico.
Fonte: Pulrolnik et al. (2010).

O delineamento experimental consistiu em blocos ao acaso, com três repetições nos cinco tratamentos, os quais incluíam variações nos arranjos do componente arbóreo e das culturas plantadas (Tabela 2). No presente estudo, foi utilizado somente o arranjo com o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*), que foi plantado em renques de duas linhas, com espaçamento de 2 x 2 m entre as plantas e distância de 22 m entre os renques. Cada unidade experimental (um bloco e um tratamento) possuía, em média, 1,2 ha, pois, especialmente nos tratamentos com árvores, algumas unidades experimentais apresentavam diferentes números de parcelas. Informações sobre as principais atividades realizadas na área experimental deste estudo estão descritas, em ordem cronológica (Tabela 3).

Tabela 2. Relação dos tratamentos experimentais (sistemas) implantados na Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

Sistema[1]				Espaçamento (m)		Número de linhas do renque	Densidade (árvore por hectare)
2009	2010	2011	2012	Entre árvores	Entre renques		
L	L	L	P	–	–	–	Sem árvore
L + Eu	L + Eu	L + Eu	P + Eu	2 x 2	22	2	417
L + Eu	L + Eu	L + Eu	P + Eu	2 x 2	12	2	715
L + Ec	L + Ec	L + Ec	P + Ec	2 x 2	22	7	1.030
L + N	L + N	L + N	P + N	4 x 4	12	2	313

[1] L: lavoura de grãos. P: pastagem consorciada. Eu: *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*. Ec: *Eucalyptus cloeziana*. N: espécies nativas arbóreas.
Traço (–): informação não aplicável.
Fonte: Pulrolnik et al. (2010).

Tabela 3. Principais atividades realizadas na área experimental em ordem cronológica[1].

Ano	Adubação	Plantio/trato cultural/componente animal
2007	Janeiro: toda a área experimental recebeu em cobertura as doses de 2.000 e 800 kg ha^{-1} de calcário e gesso agrícola.	–
2009	Janeiro: 150 g de nitrogênio, fósforo e potássico (0 20 20) na cova para plantio de eucalipto. Fevereiro: 350 kg ha^{-1} de nitrogênio, fósforo e potássico (8 20 15 + micro) para plantio de sorgo. Setembro: adubação foliar com boro no eucalipto. Setembro: 400 kg de NPK (0 20 20) para a soja 'Favorita'.	Janeiro: plantio de eucalipto. Fevereiro: aplicação de glifosato entre renques, antes do plantio de sorgo 'BRS 310'. Setembro: plantio de soja 'Baliza'.
2010	Novembro: 400 kg de nitrogênio, fósforo e potássico (0 20 20) para a soja. Dezembro: cobertura de 150 g de NPK (20 0 20) + 75 g de super-simples + 12 g de bórax por planta de eucalipto.	Novembro: plantio de soja 'BRS 850'.
2011	Março: cobertura de 150 g de nitrogênio, fósforo e potássico (20 0 20) + 150 g de supersimples + 10 g de bórax por planta de eucalipto. Outubro: 1,5 t ha^{-1} de calcário + 400 kg de nitrogênio, fósforo e potássico 0 20 20 para a soja.	Abril a setembro: desrama de todas as árvores até altura de 6 m. Outubro: plantio de soja 'Favorita'.
2012	Janeiro: cobertura de 100 g de nitrogênio, fósforo e potássico (15 15 20) + 10 g de bórax + 10 g sulfato de zinco em eucalipto. Março: cobertura de 350 kg ha^{-1} de nitrogênio, fósforo e potássico (8 20 15) para sorgo e braquiária.	Março: plantio de sorgo granífero 'BRS 330' + *Brachiaria brizantha* 'BRS Piatã', semeada a lanço antes do plantio do sorgo.
2013	Março a abril: cobertura de 200 kg ha^{-1} de ureia para a braquiária.	Entrada do componente animal (gado *Bos indicus* da raça Nelore).
2014	Fevereiro: 130 kg ha^{-1} de ureia para a braquiária.	Agosto a outubro: primeiro desbaste seletivo, retirando aproximadamente 46% das árvores.
2016	Janeiro: 130 kg ha^{-1} de ureia para a braquiária.	–
2018	–	Desbaste alternado de renques (passando a distância entre renques de 22 para 46 m) nos três blocos, retirando-se todas as árvores dentro dos renques selecionados.

[1]Eucalipto: *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Sorgo: *Sorghum bicolor*. Soja: *Glycine max*. Braquiária: *Brachiaria brizantha*. Traço (–): informação não aplicável.

O desbaste das árvores, realizado aos 66 meses do plantio, variou em cada repetição, ou seja, o número de árvores derrubadas diferiu entre as repetições. O desbaste foi seletivo (mantendo apenas árvores com diâmetro à altura do peito superior a 16 cm) e sistemático (deixando maiores espaçamentos entre as árvores na linha de plantio).

Para o cálculo do volume, mediram-se a altura total e o diâmetro à altura do peito de todas as árvores contidas em cada parcela amostral (160 m² antes do desbaste e 320 m² após o desbaste) anualmente. O volume comercial (com diâmetro mínimo de 5 cm no ápice) foi calculado multiplicando-se a área basal à altura de 1,30 m do solo pela altura total e pelo fator de forma de 0,41, baseado em Moraes Neto et al. (2020), em estudo realizado na mesma área experimental do presente estudo. A área basal foi calculada com base nas mesmas árvores utilizadas para o cálculo do volume. Em ambos os casos, somaram-se o volume e a área basal de cada árvore individual em determinada área conhecida, e, posteriormente, extrapolou-se para hectare.

A altura dominante foi obtida por meio da média das alturas das cinco árvores de maior diâmetro de cada parcela. Foram utilizados os dados a partir dos 30 meses de plantio, com encerramento aos 114 meses.

Este estudo classificou a capacidade produtiva ou índice de local (S) de cada parcela dentro de cada repetição pelo método da curva guia, utilizando a altura dominante e a idade de referência de 78 meses, aplicando-se o modelo de Schumacher (modelo de índice local e modelo da curva guia) (Equações 1 e 2).

$$Ln(S) = Ln(H_d) - \beta_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_i}\right) \quad (1)$$

$$Ln(H_d) = Ln(S) + \beta_1 \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{I_i}\right) \quad (2)$$

em que
Ln = logaritmo neperiano.
H_d = altura dominante em determinada idade.
I = idade atual.
I_i = idade índice.
S = índice de local na idade atual por parcela.

Optou-se, neste estudo, pelos modelos de Clutter (1963) e o modelo modificado de Pienaar e Shiver (1986) por serem modelos de densidade variável, apropriados para estudos que envolvem desbaste.

Os modelos de Clutter (1963) e o modificado de Pienaar e Shiver (1986) consistem em equações simultâneas, nas quais variáveis dependentes aparecem como variáveis explicativas. Nesse caso, o ajuste do modelo para estimar a área basal e a produção futura foi obtido simultaneamente. Cabe considerar que o método mais adequado e indicado para o ajuste desse tipo de modelo é o dos mínimos quadrados em dois estágios, o qual garante consistência e baixa tendenciosidade.

A seguir são descritos os dois modelos que foram testados com os dados experimentais:

1) Modelo de Clutter (1963) na forma não reduzida (Equação 3 e 4):

$$LnB_2 = LnB_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_2\left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \epsilon \quad (3)$$

$$LnV_2 = \beta_0 + \beta_1 I_2^{-1} + \beta_2 S_1 + \beta_3 LnB_2 + \beta_4\left(\frac{S_1}{I_2}\right) + \beta_5(S_1 LnB_2) + \beta_6\left(\frac{LnB_2}{I_2}\right) + \epsilon \quad (4)$$

em que
Ln = logaritmo neperiano.
B_1 e B_2 = área basal em idades atual e futura ($m^2\ ha^{-1}$).
V_2 = volume com casca ($m^3\ ha^{-1}$).
I_1 e I_2 = idade atual e futura em meses.
S_1 = índice de local na idade atual.
β_i, i variando de 0 a 6 = coeficiente do modelo volumétrico.
α_i, i variando de 1 a 2 = coeficiente do modelo de área basal.
ϵ = erro aleatório NID ~ (0, σ).

2) Modelo modificado de Pienaar e Shiver (1986) descrito em Dias (2005) (Equação 5 e 6):

$$LnB_2 = \alpha_1 + \alpha_2 I_2^{-1} + \alpha_3 LnN_2 + \alpha_4 LnHd_2 + \alpha_5 LnN_2 I^{-1} + \alpha_6 Hd_2 I_2^{-1} + \alpha_7\left(\frac{B_d I_d}{B_r I_2}\right) \quad (5)$$

$$LnV_2 = \beta_0 + \beta_1 I_2^{-1} + \beta_2 S_1 + LnB_2 + \epsilon \quad (6)$$

em que
Ln = logaritmo neperiano.
V_2 = o volume com casca ($m^3\ ha^{-1}$).
β_i = coeficientes do modelo volumétrico.
α_i = coeficientes do modelo de área basal.
I_1 e I_2 = idade atual e futura em meses.
B_2 = área basal em idade futura ($m^2\ ha^{-1}$).
N_2 = Número de árvores por hectare na idade futura.
Hd_2 = altura dominante na idade futura (meses).
B_d = área basal desbastada ($m^2\ ha^{-1}$).
I_d = Idade em meses do desbaste.
B_r = área basal remanescente ($m^2\ ha^{-1}$).

Os dados gerados por esses dois modelos, em comparação com os observados, para volume e área basal, foram verificados quanto à normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e à homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Constatou-se que essas duas premissas foram obedecidas para os três parâmetros avaliados. A probabilidade de normalidade foi de 0,1975 para a área basal e 0,5162 para o volume, enquanto a probabilidade de homogeneidade de variâncias foi de 0,9424 para a área basal e 0,9728 para o volume. Probabilidades acima de 0,05, para esses dois parâmetros, indicam que há normalidade e homogeneidade de variâncias.

Para avaliar os métodos, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2), calculado com base nos dados transformados pelo logaritmo neperiano, a raiz do erro quadrático médio (RQME), a raiz do erro quadrático médio relativo (RQME%) e gráficos de erros relativos (ER%), distribuição de resíduos e volumes observados e estimados. Nestes últimos, os dados logaritmizados foram revertidos para a escala original (Equações 7 a 10).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y}_i)^2} \quad (7)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$RQME(\%) = \frac{RQME}{\bar{Y}}\ 100 \quad (9)$$

$$ER(\%) = \left(\frac{\hat{Y}_i - Y_i}{Y_i}\right) 100 \quad (10)$$

em que

R^2 = coeficiente de determinação.

$RQME$ = raiz do erro quadrático médio.

Y_i = valor observado da árvore i.

Y_i = valor estimado da árvore i.

$\bar{Y}$ = média de Y.

n = número de observações.

ER = erros relativos (%).

Resultados e discussão

Por meio do método da curva guia desenvolvido, no caso, pelo modelo de Schumacher, encontrou-se as seguintes equações, sendo a idade índice de 78 meses: curva média de índices de local (Equação 11); curva ou tabela de índice de local (Equação 12); cálculo de índice de local para determinada idade (Equação 13).

$$H_d = exp\ (3{,}76811 - 32{,}4465I^{-1}) \quad R^2 = 0{,}9328 \quad (11)$$

em que

H_d = altura dominante.

exp = função exponencial cuja base é o número de Euler (2,7183).

I^{-1} = inverso da idade atual.

R^2 = coeficiente de determinação.

$$H_d = \left[Ln(S) - 32{,}446541 - \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{78}\right)\right] \quad (12)$$

em que

H_d = altura dominante na idade futura (meses).

Ln = logaritmo neperiano.

S = índice de local para determinada idade.

$$S = exp\left[LnH_d + 32{,}44654\ \left(\frac{1}{I} - \frac{1}{78}\right)\right] \quad (13)$$

em que

S = índice de local na idade atual por parcela.

exp = função exponencial cuja base é o número de Euler (2,7183).

Ln = logaritmo neperiano.

H_d = altura dominante na idade futura (meses).

Casas et al. (2022), em estudo sobre a aplicação do modelo de Clutter e de redes neurais para projeções de produção em três povoamentos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, com idades entre 2 e 8 anos, observaram que os valores do coeficiente de correlação para altura dominante, usando a equação de Gompertz, variaram de 0,6093 a 0,7977, enquanto no presente estudo foi de 0,9658, provavelmente devido ao fato de as parcelas estarem em sítios similares.

Os modelos ajustados, considerando todas as medições (30, 42, 54, 66 meses antes do desbaste e 66 meses após o desbaste; 78, 90, 102 e 114 meses para área basal) e volume nos modelos de Clutter (1963) e no modificado de Pienaar e Shiver (1986), são apresentados a seguir. Os termos excluídos nos modelos apresentaram coeficientes não significativos, e aqueles que foram mantidos mostraram significância inferior a 1%. Dias et al. (2005) também removeram o índice de local na equação de área basal, por não apresentarem coerência biológica em estudo com povoamentos desbastados de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Observa-se que o modelo de Clutter (Equação 14 e 15) apresentou coeficientes de determinação superiores aos do modelo modificado (Equação 16 e 17).

$$LnB_2 = LnB_1\left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 3{,}184868\left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \quad R^2 = 0{,}9746 \quad (14)$$

$$LnV_2 = 2{,}164942 - 26{,}60681I_2^{-1} + 1{,}269263LnB_2 \quad R^2 = 0{,}9902 \quad (15)$$

em que

Ln = logaritmo neperiano.

B_1 e B_2 = área basal em idades atual e futura ($m^2\ ha^{-1}$).

V_2 = o volume com casca ($m^3\ ha^{-1}$).

R = coeficiente de determinação.

$$LnB_2 = -7{,}21432 + 0{,}55948Ln\mathrm{N}_2 + 1{,}914033Hd_2 \quad R^2 = 0{,}9328 \quad (16)$$

$$LnV_2 = 2{,}003262 - 37{,}1467I^{-1} + 0{,}029946S_1 + 1{,}016407LnB_2 \quad R^2 = 0{,}9770 \quad (17)$$

em que

Ln = logaritmo neperiano.

B_1 e B_2 = área basal em idades atual e futura ($m^2\ ha^{-1}$).

V_2 = o volume com casca ($m^3\ ha^{-1}$).

R^2 = coeficiente de determinação.

Os R^2 do presente trabalho para o modelo de Clutter, em relação ao volume e à área basal, foram superiores aos trabalhos de Dias et al. (2005) e Gorgens et al. (2007) com povoamentos desbastados de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, considerando todos os dados (antes e após o desbaste).

Na Tabela 4, apresenta-se a raiz do erro quadrático médio (RQME) e a raiz do erro quadrático médio relativo (RQME%) da área basal e do volume dos modelos de Clutter e do modificado de Pienaar e Shiver. Nota-se que a RQME e a RQME% foram menores no modelo de Clutter, denotando maior

precisão no ajuste. Salles (2010) realizou uma modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em sistema agroflorestal, utilizando o modelo completo de Clutter (descartando parâmetros que apresentavam coeficientes não significativos), com dados coletados de volume e área basal de clones, iniciando a medição entre 20,4 e 31,2 meses e finalizando entre 70,6 e 94,3 meses. Os clones apresentaram RQME entre 0,3733 e 0,6438 m^2 ha^{-1} para área basal e entre 5,9698 e 10,2547 m^3 ha^{-1} para volume. No presente estudo, o RQME do modelo de Clutter foi de 0,3638 m^2 ha^{-1} para área basal e 3,765 m^3 ha^{-1} para volume. Mendonça (2010), em trabalho com modelos não lineares de crescimento e produção de povoamentos de clone de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus camaldulensis com idades entre 2 e 8 anos, observou, ao empregar o modelo simplificado de Clutter, que o erro padrão relativo (similar ao RQME% quando os dados amostrais são grandes, como no caso do trabalho deste autor) foi de 3,97% para volume e 5,97% para área basal, enquanto no presente estudo foi de 3,73% para volume e 4,05% para área basal.

Na Figura 2, são apresentados os erros relativos (%) (ER%) em relação ao volume comercial de madeira e à área basal dos dois modelos. Nota-se que, no modelo de Clutter, os dados estão melhor distribuídos e mais aderentes ao eixo horizontal que cruza o eixo vertical em 0% para ambos os parâmetros (volume e área basal). Observa-se também que os ER% no modelo de Clutter estão limitados na faixa entre ± 10% para os dois parâmetros, enquanto no modelo modificado alguns pontos excedem essa faixa em ambos os parâmetros. Dias et al. (2005) observaram em povoamentos desbastados de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, medidos entre 27 e 76 meses, que os erros relativos variaram na faixa de ± 10% para a área basal e ± 15% para o volume. Mendonça (2010), em trabalho com povoamentos de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis*, de idades entre 2 e 8 anos, observou que os erros relativos no modelo de Clutter simplificado variaram de ± 15% para a área basal e ± 10% para o volume.

Na Figura 3, apresenta-se a distribuição das classes de erro relativo nos modelos de Clutter e modificado de Pienaar e Shiver para o volume comercial e a área basal. Observa-se que, em relação ao volume de madeira, há uma maior amplitude de erros relativos no modelo modificado. A maior frequência relativa para os dois modelos mostra que o erro relativo representado pelo ponto médio das classes foi de 0,5% no modelo de Clutter e 3,2% no modelo modificado. Quanto à área basal, também se nota uma maior amplitude de erros relativos no modelo modificado. As maiores frequências relativas dos erros no modelo de Clutter ocorreram nos pontos médios das classes de -1,9 e 0,5%, enquanto no modelo modificado ocorreram nos pontos médios das classes de -7,9 e 4,1%.

Na Figura 4, mostra-se a relação entre o volume e a área basal observados e estimados pelos modelos de Clutter e modificado. Observa-se que houve uma maior aderência à linha guia de aproximadamente 45°, tanto para o volume quanto para a área basal, no modelo de Clutter, sendo esta aderência mais pronunciada para a área basal.

Como complemento ao trabalho atual, foram descritos outros tipos de modelos além do modelo de povoamento total abordado neste artigo, e discutidas as limitações mais pronunciadas desse tipo de modelo. Consideraram-se também algumas possibilidades de como outros modelos podem trazer mais acurácia nas prognoses de crescimento e produção, bem como as desvantagens associadas a eles, que geralmente se traduzem em um nível de detalhamento que os torna mais onerosos e demorados para fornecer resultados.

Tabela 4. Raiz do erro quadrático médio (RQME) e relativo (RQME%) da área basal e volume nos modelos de Clutter e modificado de Piennaar e Shiver.

Modelo	Área basal		Volume	
	RQME[(1)] (m^2 ha^{-1})	RQME%[(2)] (%)	RQME (m^3 ha^{-1})	RQME% (%)
Clutter	0,3638	4,0510	3,7650	3,7264
Modificado	0,6280	6,9917	6,1752	6,1118

[(1)] RQME: raiz do erro quadrático médio.
[(2)] RQME%: raiz do erro quadrático médio relativo.

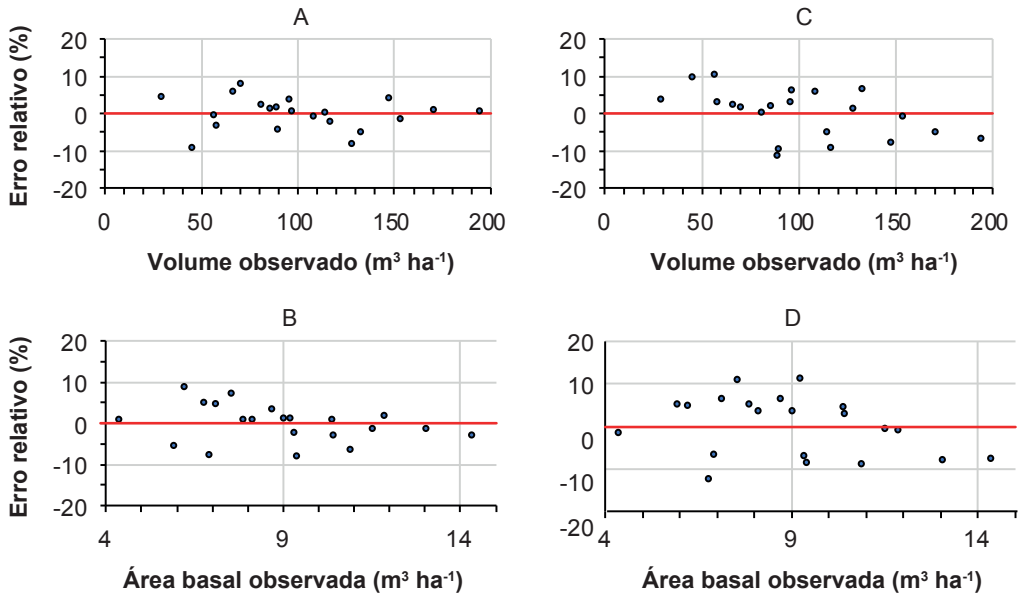

Figura 2. Erros relativos (%) nos modelos de Clutter (A e B) e Modificado (C e D) em relação ao volume modi e área basal.

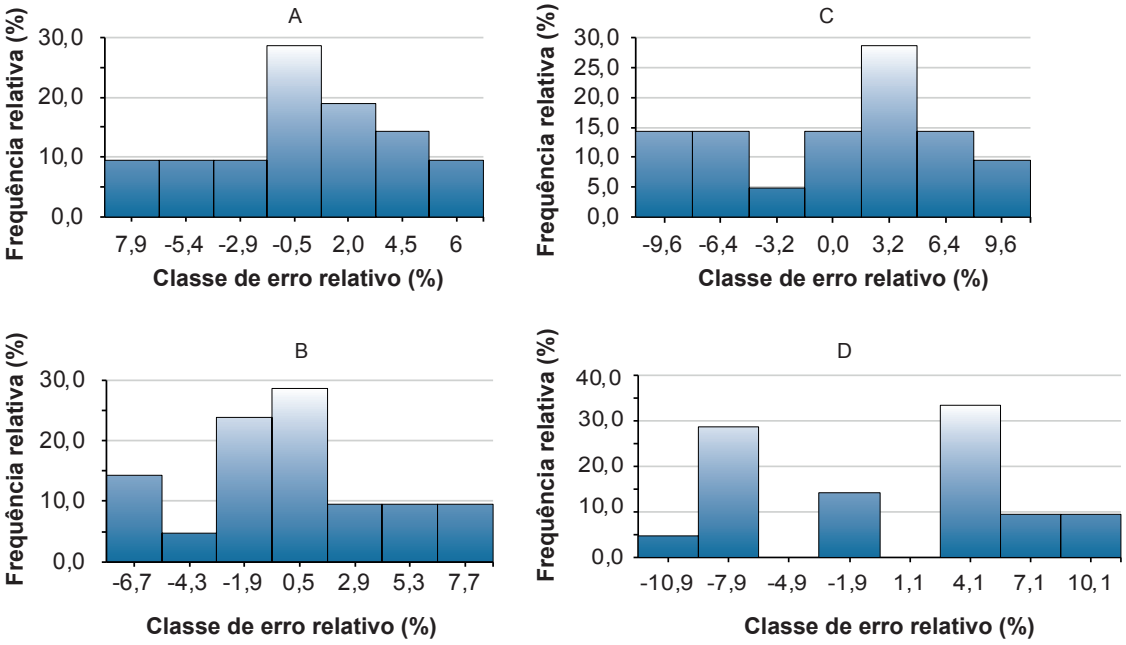

Figura 3. Distribuição de classes de erro relativo nos modelos de Clutter (A e B) e Modificado (C e D) de Pienaar e Shiver para volume modificado e área basal.

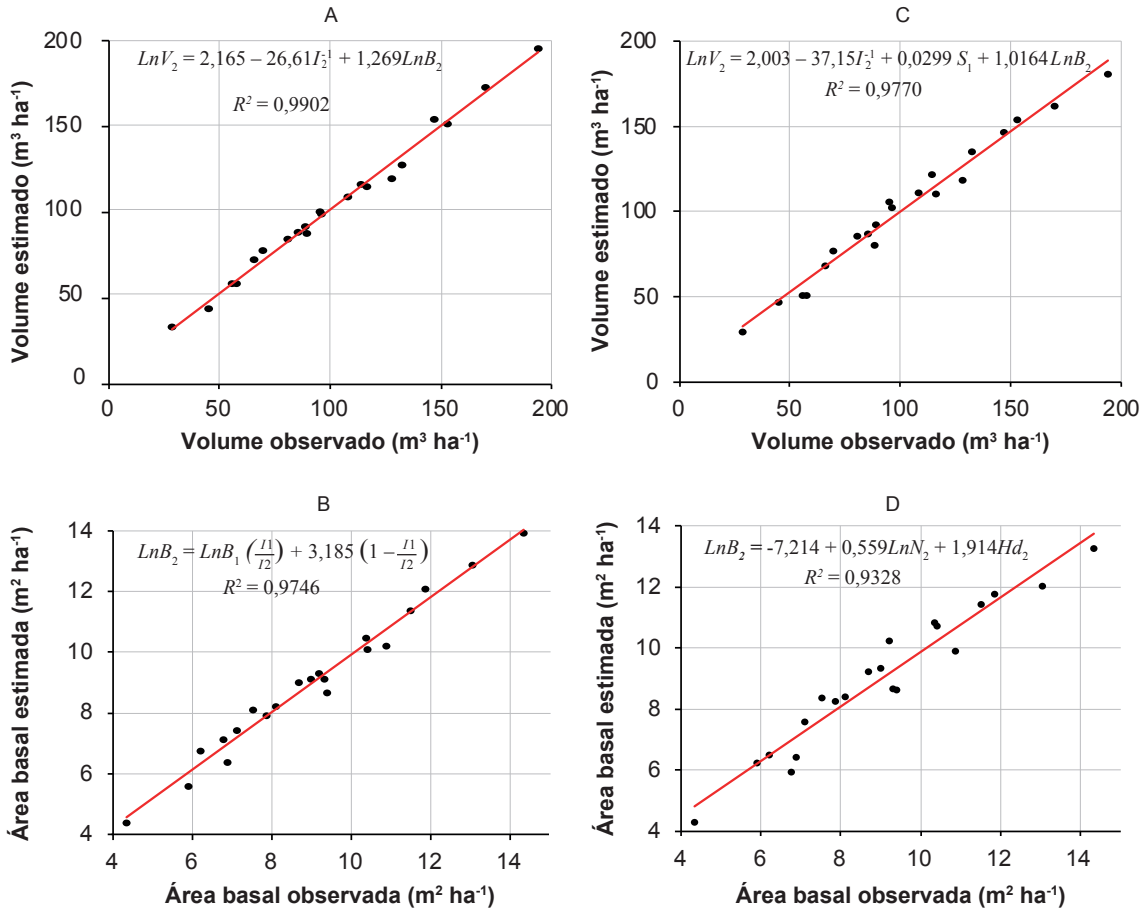

Figura 4. Relação entre volume e área basal observados e estimados nos modelos de Clutter (A e B) e Modificado (C e D).

Os modelos empíricos, atualmente mais utilizados pelas empresas florestais, podem ser divididos em: modelos de povoamento total, que incluem os modelos de Clutter e Pienaar e Shiver, entre outros; modelos de classes de tamanho, como de distribuição de diâmetros e volumes; e modelos de árvores individuais, onde a árvore é a unidade básica de modelagem usada para simular crescimento (diâmetro e altura) e mortalidade. O volume por hectare é obtido ao somar volumes de árvores individuais. Este tipo de modelo pode ser distinguido em duas categorias: aqueles que não requerem informações sobre a distribuição espacial das árvores e aqueles que incluem medidas de competição espacial, facilitadas pelo sensoriamento remoto. Em geral, o modelo de árvore individual é superior aos modelos de povoamento total, embora mais oneroso e demorado. O uso de redes neurais artificiais também pode gerar resultados satisfatórios em comparação ao modelo de Clutter (Casas et al., 2022).

O sistema de equações simultâneas de Clutter (1963) para prever crescimento e produção, com base no índice de local, idade e densidade de povoamento, é conhecido por levar a estimativas consistentes. No entanto, o índice de local pode não estar disponível para ajustar o modelo de Clutter ou outros modelos simultâneos de crescimento e produção. Além disso, o índice de local depende de medições precisas da idade e altura das árvores, e da premissa de que a competição não afetará o crescimento das árvores (Weiskittel et al., 2011 citado por Farias et al., 2021). Embora técnicas tenham sido desenvolvidas para representar atividades de manejo com modelos de povoamento total, elas não são a abordagem mais eficiente, especialmente quando se pretende representar múltiplos desbastes. Contudo, os modelos de povoamento completo continuam a ser desenvolvidos usando técnicas estatísticas mais modernas, pois são fáceis de usar, relativamente robustos e podem ser mais precisos em previsões de longo prazo (Twery; Weiskittel, 2013).

Como sugestão para projetos futuros, recomenda-se testar modelos híbridos, como modelos de povoamento total ou de árvore individual, utilizando dados fisiológicos das plantas, como índice de

área foliar, fotossíntese e transpiração. Além disso, os modelos de regressão deveriam ser comparados com modelos gerados por redes neurais artificiais.

Conclusão

Devido aos maiores coeficientes de determinação nos modelos de projeção de volume e área basal, menores raízes do erro quadrático médio (RQME) e erro quadrático médio relativo (RQME%) para volume e área basal, melhor aderência ao eixo de referência nos erros relativos e entre valores observados e estimados para volume e área basal, e maior frequência relativa de valores menores nos pontos médios das classes de erros relativos para volume e área basal, o modelo de Clutter ajustou-se melhor aos dados observados em comparação com o modelo modificado de Pienaar e Shiver.

Referências

CAMPOS, J. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal**: perguntas e respostas. Viçosa, MG: UFV, 2013. 650 p.

CASAS, G. G.; FARDIN, L. P.; SILVA, S.; OLIVEIRA NETO, R. R.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, R. V.; DOMICIANO, C. A. R.; LOPES, L. S. S.; CRUZ, J. P.; REIS, T. L.; LEITE, H. G. Improving yield projections from early ages in eucalypt plantations with the Clutter model and artificial neural networks. **Pertanika Journal of Science & Technology**, v. 30, n. 2, p. 1257-1272, 2022.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

DIAS, A. N. **Um modelo para gerenciamento de plantações de eucalipto**. 2005. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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**, v. 29, n. 5, p. 731-739.

FARIAS, A. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantile regression: prediction of growth and yield for a Eucalyptus plantation in northeast Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 983-989, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10342-021-01380-1.

GORGENS, E. B.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 879-885, 2007.

MENDONÇA, A. R. **Modelagem não linear do crescimento e da produção de plantações florestais**. 2010. 84 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MORAES NETO, S. P.; PULROLNIK, K.; VILELA, L.; SOUZA, K. W.; GUIMARÃES JUNIOR, R. **Estimativa do volume de madeira de eucalipto em sistema agrossilvipastoril**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2020. 22 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 354). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215586/1/Bolpd-354-Sebastiao-Neto.pdf. Acesso em: 28 out. 2024.

PARDO, T. A.; REZENDE, S. O. **Sistemas baseados em conhecimento (SBCs)**. 41 p. Disponível em: http://wiki.icmc.usp.br/images/c/c3/Aula11-230t.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.

PENIDO, T. M. A.; LAFETÁ, B. O.; NOGUEIRA, G. S.; ALVES, P. H.; GORGENS, E. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, 12 p., e3340, 2020. DOI: https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.06.

PIENAAR, L. V.; SHIVER, B. D. Basal area prediction and projection equations for pine plantations. **Forest Science**, v. 32, n. 3, p. 626-633, 1986.

PULROLNIK, K.; VILELA, L.; MORAES NETO, S. P. de; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JUNIOR, R. **Desenvolvimento inicial de espécies arbóreas no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 17 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 276).

SALLES, T. T. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em um sistema agroflorestal**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SANTANA, C.; MELLO, A. A.; EISFELD, R. L.; SANQUETTA, C. R. Sistema de equações para simulação do crescimento e da produção em povoamentos de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden. sem desbaste baseado no modelo de Clutter. **Ambiência**, v. 1, n. 2, p. 239-256, 2005.

TWERY, M. J.; WEISKITTEL, A. R. Forest-Management Modelling. In: WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. (ed.). **Environmental modelling**: finding simplicity in complexity. 2nd. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. p. 379-398. DOI: 10.1002/9781118351475.ch23.

VERIDIANO, M. F. O.; MIGUEL, E. P.; VASCONCELOS, P. G. A.; NAPPO, M. E.; ANGELO, H.; REZENDE, A. V.; MATIAS, R. A. M.; BIALI, L. J.; LUSTOSA JUNIOR, I. M. Are models of volumetric production at the diametric distribution and total stand level mutually compatible? **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 1691-1698, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s11676-018-0868-2.

Embrapa

Ministério da
Agricultura e Pecuária

CGPE 018802