

Artigos

Efeito da adubação mineral e densidade de plantio nas características dendrométricas de plantações de eucalipto de rápido crescimento

Effect of mineral fertilization and planting density in the dendrometric characteristics of fast-growing eucalypt plantations

Humberto de Jesus Eufrede-Junior ¹, João Marcos Rebessi de Sousa ¹,
Saulo Philipe Sebastião Guerra ¹

¹ Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, SP, Brasil

RESUMO

Para alcançar um maior equilíbrio nutricional nas plantações de eucalipto conduzidas no sistema florestal de curta rotação (SFCR), este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes espaçamentos de plantio (1429 árvores ha⁻¹ a 7142 árvores ha⁻¹) e três regimes de adubação (D1 – 25% da dose comercial, D2 – 50% da dose comercial e D3 – dose comercial) nas características dendrométricas e no índice de competição entre as árvores nas plantações de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idade. Por meio do ajuste da função Weibull dois parâmetros, observou-se uma maior frequência de árvores nas classes diamétricas superiores com o aumento da área útil por árvore e da dose de adubação, o que indicou uma menor competição entre os indivíduos, sendo esse comportamento corroborado pelo maior índice de espaçamento relativo encontrado. O tratamento com 3571 árvores ha⁻¹ (2,8 m × 1,0 m) e com aplicação de metade da dose comercial praticada tradicionalmente nas plantações de eucalipto seria aquele com maior sustentabilidade nutricional.

Palavras-chave: Função densidade de probabilidade; Estrutura diamétrica; Índice de espaçamento relativo

ABSTRACT

To achieve a greater nutritional balance in eucalyptus plantations carried out in the short-rotation forestry (SRF), this study aimed to evaluate the effect of different planting spacings (planting densities of 1429 trees ha⁻¹ to 7142 trees ha⁻¹) and three fertilizing regimes (D1 – 25% of the commercial dose, D2 – 50% of the commercial dose and D3 – commercial dose) in the dendrometric characteristics and the competition index among trees of hybrid clone plantations of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* at two years old. After adjusted the Weibull function two parameters, it was observed a higher frequency of trees in the upper diametric classes with an increase of the vital area of tree and fertilization dose, which indicated a lower competition between the trees, this behavior was corroborated by the higher relative spacing index found. The treatment with 3571 trees ha⁻¹ (2.8 m × 1.0 m) and half of the commercial dose traditionally practiced in the eucalypt plantations would be the one with the highest nutritional sustainability.

Keywords: Probability density function; Diametric structure; Relative spacing index

1 INTRODUÇÃO

As plantações florestais são intensivamente manejadas, compostas de uma ou duas espécies com a mesma idade, plantadas com um espaçamento regular e para fins produtivos (FAO, 2020). Dentre as mais utilizadas, destacam-se as plantações de eucalipto (*Eucalyptus* spp.), que já estão presentes em todos os continentes e apresentam as maiores produtividades (Li *et al.*, 2018). No Brasil, esse gênero ocupa uma área de 5,7 milhões de hectares (73% do total da área do setor de florestas plantadas no país), localizado principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Bahia (IBÁ 2019).

O manejo de povoamentos de *Eucalyptus* spp. no sistema florestal de curta rotação (SFCR) tem como objetivo a produção de biomassa, sendo caracterizado pela alta densidade de plantio (6000 a 7000 árvores por hectare), pelo corte precoce (2 a 3 anos) com condução de até dois ciclos de rebrota, intensa adubação mineral, além de um rigoroso controle químico de pragas e doenças (GARCIA *et al.*, 2016; LEMOS *et al.*, 2015).

A colheita dos SFCR é realizada no sistema *cut-to-chip* e toda a biomassa acima do solo é cavaqueada e aproveitada comercialmente, incluindo o tronco, os galhos

e as folhas (GUERRA *et al.*, 2016), o que promove questionamentos, sobretudo da sustentabilidade nutricional desse sistema silvicultural ao longo do tempo. Sabe-se que a ciclagem de nutrientes é importante na fertilidade do solo, pois diminui a necessidade de adubação e assegura a produtividade de futuras rotações (REIS; BARROS, 1990; SCHUMACHER *et al.*, 2019). Quando há o aproveitamento do tronco e da copa na operação de colheita, essa se torna a principal via de exportação de nutrientes, o que agrava a manutenção dos nutrientes no sítio florestal (SCHUMACHER *et al.* 2019).

Outro ponto importante é entender o efeito da adubação e da densidade de plantio no crescimento e na dinâmica das plantações florestais. A alta densidade de plantio favorece um ambiente com intensa competição pelos recursos naturais e acarreta maiores taxas de árvores dominadas e mortalidade, o que tem efeito direto nos diâmetros, na altura e na área basal das florestas. Assim, é importante a obtenção de informações mais detalhadas sobre a estrutura horizontal do povoamento e o nível de competição entre as árvores (CLUTTER *et al.*, 1983; MACHADO *et al.*, 2009). Os modelos para o estudo da distribuição diamétrica de plantações florestais se baseiam em funções de densidade de probabilidade (f.d.p.), que estimam a frequência de árvores nas diferentes classes de diâmetros. Nesse contexto, destaca-se a função Weibull, por sua relativa simplicidade de ajuste e flexibilidade para representar diferentes comportamentos de distribuição diamétrica, bem como a facilidade de correlação entre seus parâmetros com as variáveis do povoamento (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2012; AZEVEDO *et al.*, 2016; BINOTI *et al.*, 2015; CAMPOS; LEITE, 2013). Para a análise da competição entre os indivíduos pode ser empregado o índice de espaçamento relativo – S% (FINGER; SCHNEIDER, 1999), que é a relação entre espaçamento médio de plantio das árvores e a altura dominante, essa última tem relação com o potencial do sítio florestal.

Diante do exposto, procuram-se alternativas para aumentar o equilíbrio ambiental das plantações florestais, sendo a adubação e o controle de densidade

do plantio, atividades passíveis de alteração pelo silvicultor. Como hipótese do trabalho, tem-se que a redução da dose de adubação em plantios mais adensados pode promover uma maior sustentabilidade nutricional das plantações de eucalipto conduzidas no sistema florestal de curta rotação. Sendo assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes espaçamentos de plantio e doses de adubação nos parâmetros silviculturais, na competição dos indivíduos e na estrutura diamétrica de plantações de clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* aos dois anos de idade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi realizado no município de Botucatu, estado de São Paulo, situado na longitude 48°26'42" W e latitude 22°53'09" S a 872 m de altitude, precipitação média de 1428 mm ano⁻¹ e temperatura média anual de 20°C (ALVARES *et al.*, 2013). Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA SOLOS, 2018), o solo no local do experimento foi classificado como sendo um Latossolo Vermelho Amarelo com textura média, sendo que as propriedades químicas e físicas do solo foram detalhadas em Garcia (2010).

O estudo foi implantado com um delineamento inteiramente casualizado devido à semelhança das condições de sítio do local e tamanho da área experimental disponível. Utilizou-se um clone híbrido interespecífico de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* (clone C219) aos 24 meses de idade. O experimento compreendeu cinco espaçamentos de plantio: 2,8 m × 0,5 m (7142 árvores ha⁻¹), 2,8 m × 1,0 m (3571 árvores ha⁻¹), 2,8 m × 1,5 m (2380 árvores ha⁻¹), 2,8 m × 2,0 m (1786 árvores ha⁻¹) e 2,8 m × 2,5 m (1429 árvores ha⁻¹) e três diferentes doses de adubação. Em relação aos regimes de fertilização mineral NPK (descritos na Tabela 1), a dosagem referencial (identificada como D3) é aquela tradicionalmente utilizada em florestas comerciais de eucalipto na

região do estudo (WILCKEN *et al.*, 2008), já as outras doses são subdosagens (D1 e D2, que equivalem 25% e 50% da dose referencial, respectivamente).

Tabela 1 – Descrição dos fertilizantes e regimes de aplicação utilizados no experimento

Fertilizantes	Dias após plantio	Dose 1	Dose 2	Dose 3
		g planta ⁻¹		
NPK (6-30-10)	0	35,0	70	140
NPK (19-00-19) + B (0,7%) e Zn (3%)	180	27,5	55	110
NPK (19-00-19) + B (0,7%) e Zn (3%)	360	27,5	55	110

Fonte: Autores (2020)

Em que: As Doses 1 e 2 são subdosagens da Dose 3, que é aquela utilizada tradicionalmente em florestas comerciais de eucalipto.

2.2 Determinação das características dendrométricas

Para determinação das características silviculturais, foram medidos todos os diâmetros à altura do peito (DAP) das árvores, bem como a altura dominante de uma parcela de 450m² para cada um dos 15 tratamentos (5 espaçamentos × 3 dosagens), desconsiderando-se as árvores da bordadura. Especificamente para a altura dominante foi considerada a definição proposta por ASSMANN, sendo, portanto, a média das alturas das quatro árvores com maior DAP na parcela.

Também, foram calculados a área transversal média de cada tratamento (\bar{g}), o diâmetro quadrático médio (Dg), a área basal (G) e o volume de madeira estimado (V) de acordo com as Equações (1), (2), (3) e (4).

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} d_i^2}{n} \quad (1)$$

Em que: \bar{g} – área transversal média (cm² árv⁻¹); d_i – diâmetro a altura do peito da árvore i (cm); n – número de observações.

$$d_g = \sqrt{\frac{4\bar{g}}{\pi}} \quad (2)$$

Em que: d_g – diâmetro quadrático médio (cm); \bar{g} – área transversal média (cm).

$$G = \sum_{i=1}^n g_i \quad (3)$$

Em que: G - área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$); g_i - área transversal da árvore i (cm).

$$V = G\bar{H}\bar{f} \quad (4)$$

Em que: V - volume de madeira estimado ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$); G - área basal ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$), \bar{H} - altura total média das árvores (m); \bar{f} - fator de forma médio sem casca de 0,40.

2.3 Análise da competição entre as árvores

Para analisar a competição entre as árvores foi calculado o índice de espaçamento relativo ($S\%$) ou também conhecido como Índice de Hart-Becking para cada tratamento conforme Equação (5).

$$S\% = EM/h_{100} \times 100 \quad (5)$$

Em que: $S\%$ - índice de espaçamento relativo (%); EM = espaçamento médio entre árvores (m); h_{100} = altura dominante de Assmann (m).

Sendo o espaçamento médio entre árvores (EM) calculado em metros lineares, expresso pela raiz quadrada da razão entre a área do hectare e o número de árvores restantes após o desbaste. Esse índice leva em consideração o espaçamento médio entre as árvores, bem como a altura dominante (h_{dom}) das árvores.

2.4 Estrutura diamétrica das plantações florestais

O número de classes diamétricas foi determinado pela equação de Sturges - Equação (6) - que apresenta o número mínimo de classes para os tratamentos.

$$nc = 1 + 3,3 \log n \quad (6)$$

Em que: nc - número de classes; n - número de indivíduos analisados.

Para a estimativa dos diâmetros das árvores foi utilizada a função de densidade de probabilidade Weibull dois parâmetros - Weibull 2P - Equação (7) (BAILEY; DELL, 1973). O ajuste foi realizado por meio da função `fitdistr` do pacote 'fitdistrplus' no

ambiente do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2013), estimando-se os parâmetros das funções pelo método da máxima verossimilhança.

$$f(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c} \text{ para } x \geq 0, b > 0, c > 0 \quad (7)$$

Em que: $f(x)$ – função de densidade da variável x ; x – diâmetro do centro de classe; b – parâmetro de escala; c – parâmetro de forma.

A qualidade do ajuste foi avaliada por meio da determinação do índice de ajustamento (IA) e pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ao nível de 5% de probabilidade.

O teste de aderência K-S refere-se ao grau de concordância entre uma distribuição observada e uma distribuição teórica esperada. Dessa forma, foi encontrada a maior diferença, comparando-se as frequências acumuladas em cada classe, das distribuições estimada e esperada de acordo com a Equação (8).

$$D = \max |f_{o_i}(x) - f_{e_i}(x)| \quad (8)$$

Em que: D – É o ponto de máxima divergência entre as frequências; \max – maior diferença entre o valor observado e o estimado; x – diâmetro do centro de classe; f_o – frequência observada acumulada para cada classe i ; f_e – frequência teórica esperada acumulada para cada classe i .

O índice de ajustamento (IA) da distribuição foi obtido pela Equação (9), valores maiores que 90% foram considerados satisfatórios.

$$IA = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma}_i)^2} \right] \quad (9)$$

Em que: IA – índice de ajustamento; γ_i – frequência observada na classe i ; $\hat{\gamma}_i$ – frequência teórica esperada na classe i ; $\bar{\gamma}_i$ – frequência média nas n classes.

Por último, utilizou-se o erro padrão da estimativa percentual (S_{yx}) para avaliar a precisão do ajuste – Equação (10). Esse parâmetro é comumente aplicado na análise de regressão em modelos matemáticos.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)^2}{N - p}} \times 100 \quad (10)$$

Em que: S_{yx} – erro padrão da estimativa (%); γ_i – frequência observada na classe i ; $\hat{\gamma}_i$ – frequência teórica esperada na classe i ; N – número de árvores por hectare; p – número de parâmetros da função.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da equação de Sturges aos sistemas florestais de curta rotação resultou em dez classes de diâmetros com um intervalo de classe de 2,2 cm, sendo que os centros das classes variaram de 1,2 cm a 11,1 cm, como observado na Tabela 2. Nos tratamentos com as maiores doses de adubação e menores densidade de plantio, houve um aumento na frequência de árvores nas classes diamétricas superiores.

Tabela 2 – Frequência relativa (%) das árvores para cada centro de classe de diâmetro nos tratamentos com cinco espaçamentos de plantio e três doses de adubação

Espaçamento de plantio	Dose	Centro das classes de diâmetro (cm)									
		1,2	2,3	3,4	4,5	5,6	6,7	7,8	8,9	10,0	11,1
2,8 m × 2,5 m	1	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	8,5	22,0	45,8	20,3	0,0
2,8 m × 2,5 m	2	0,0	0,0	4,5	0,0	3,0	15,2	21,2	25,8	28,8	1,5
2,8 m × 2,5 m	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	7,9	44,4	39,7	6,3
2,8 m × 2,0 m	1	0,0	0,0	0,0	3,9	5,3	14,5	30,3	36,8	9,2	0,0
2,8 m × 2,0 m	2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	5,3	13,2	60,5	18,4	1,3
2,8 m × 2,0 m	3	0,0	1,5	0,0	0,0	0,0	1,5	11,8	26,5	51,5	7,4
2,8 m × 1,5 m	1	0,0	0,0	1,9	3,8	11,5	33,7	35,6	12,5	1,0	0,0
2,8 m × 1,5 m	2	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	9,6	41,5	38,3	8,5	0,0
2,8 m × 1,5 m	3	0,0	0,0	1,1	1,1	4,2	10,5	21,1	44,2	15,8	2,1
2,8 m × 1,0 m	1	0,0	1,3	0,0	4,5	16,9	42,9	27,9	6,5	0,0	0,0
2,8 m × 1,0 m	2	0,0	0,0	2,7	3,4	2,7	25,9	35,4	29,3	0,7	0,0
2,8 m × 1,0 m	3	0,0	0,0	2,0	1,3	7,4	12,1	50,3	24,2	2,7	0,0
2,8 m × 0,5 m	1	0,4	2,4	3,6	14,7	32,5	35,7	9,5	1,2	0,0	0,0
2,8 m × 0,5 m	2	3,8	5,3	6,5	15,6	26,2	25,5	11,8	5,3	0,0	0,0
2,8 m × 0,5 m	3	0,0	2,2	6,2	11,5	11,9	27,0	27,0	12,8	1,3	0,0

Fonte: Autores (2020)

Em que: Foram destacadas as classes diamétricas que juntas contabilizam mais de 50% das árvores nos tratamentos estudados

Os valores de DAP observados nas distribuições diamétricas estão próximos daqueles reportados por Guerra *et al.* (2016), que estudaram sistemas florestais de curta rotação de 2,8 a 3,3 anos de idade com diferentes espaçamentos de plantio (3333 a 6666 árv ha⁻¹) nas cidades de Três Lagoas-MS, Taiobeiras -MG e Lins -SP.

A Tabela 3 apresenta os estimadores e estatísticas da função Weibull-2P para as florestas adensadas de eucalipto aos dois anos de idade, onde observa-se que há forte correlação entre as distribuições observadas e estimadas.

Considerando o teste de K-S, nota-se que para todas as doses de adubação, a

maior diferença em termos absolutos (D calculado) é sempre menor que os respectivos valores críticos (D tabelado) a um nível de 5%; dessa forma, permite-se aceitar a hipótese de que há concordância entre as distribuições observadas e estimadas, ou seja, a função Weibull teve aderência à distribuição dos diâmetros.

Houve, também, um bom ajuste da distribuição teórica esperada em relação à observada para a maioria dos tratamentos com IA maior que 90%, exceto para os espaçamentos 2,8 × 1,0 m e 2,8 × 2,5m, ambos com a Dose 2, que apresentaram IA igual a 89,3% e 87,7%, respectivamente. Todos os tratamentos que receberam a Dose 1 apresentaram um índice de ajustamento maior que 97,4%. De fato, o uso da função Weibull já é consolidado na análise das distribuições diamétricas de florestas convencionais de eucalipto (ARAÚJO JÚNIOR *et al.*, 2012; AZEVEDO *et al.*, 2016), sendo também verificado neste trabalho sua aplicação nos sistemas florestais de curta rotação.

Tabela 3 – Estimadores e estatísticas da distribuição de Weibull de dois parâmetros para florestas adensadas de eucalipto com cinco densidades de plantio e três doses de adubação aos dois anos de idade

Espaçamento	Dose	Parâmetros Weibull		D		IA (%)	Syx (%)
		Forma	Escala	Calculado	Tabelado		
2,8 m × 2,5 m	1	9,737343	9,009443	0,0527	0,1771	98,0	1,8
2,8 m × 2,5 m	2	6,569467	8,875399	0,0462	0,1674	87,7	3,2
2,8 m × 2,5 m	3	13,92357	9,596452	0,0638	0,1713	95,3	3,0
2,8 m × 2,0 m	1	7,816844	8,487763	0,0375	0,1560	98,1	1,3
2,8 m × 2,0 m	2	14,06264	9,063354	0,0403	0,1560	96,9	2,4
2,8 m × 2,0 m	3	12,44044	9,654257	0,0546	0,1649	95,9	2,6
2,8 m × 1,5 m	1	6,851991	7,531787	0,0323	0,1334	98,2	1,2
2,8 m × 1,5 m	2	10,79313	8,521124	0,0485	0,1403	96,9	1,9
2,8 m × 1,5 m	3	8,734847	8,785694	0,0426	0,1395	95,2	2,0
2,8 m × 1,0 m	1	7,050336	7,100771	0,0356	0,1096	97,4	5,8
2,8 m × 1,0 m	2	9,98953	7,938468	0,0674	0,1122	89,3	11,5
2,8 m × 1,0 m	3	8,417534	8,072821	0,0595	0,1114	90,5	2,6
2,8 m × 0,5 m	1	5,612809	6,280483	0,0295	0,0857	98,4	3,3
2,8 m × 0,5 m	2	3,592671	6,169191	0,0422	0,0839	91,7	5,2
2,8 m × 0,5 m	3	4,781312	7,154537	0,0481	0,0905	90,6	1,3

Fonte: Autores (2020)

Em que: D calculado e D tabelado - pontos de máxima divergência entre as frequências acumuladas observadas (calculado) e esperadas (teórico) para cada classe de diâmetro para análise do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ao nível de 5% de probabilidade; IA - índice de ajustamento (%) e Syx - erro padrão da estimativa (%).

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas diamétricas ajustadas para os sistemas florestais de curta rotação. Para um mesmo espaçamento de plantio, doses crescentes de adubação promoveram a movimentação das curvas de distribuição diamétrica em direção às classes superiores e, ao mesmo tempo, maior assimetria à esquerda. Esse resultado está de acordo com o encontrado por Oliveira-Neto *et al.* (2011) que estudaram florestas convencionais de *Eucalyptus camaldulensis* aos 32 meses de idade. Castro *et al.* (2016) em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* perceberam que o aumento da competição entre as árvores ocasiona um aumento na distribuição dos indivíduos em muitas classes de diâmetro, esse mesmo comportamento foi observado para os sistemas adensados deste estudo.

De forma mais detalhada, considerando os efeitos do espaçamento de plantio e da adubação na distribuição diamétrica dos tratamentos, é possível constatar ainda pela Figura 1 que a densidade de plantio teve um efeito mais relevante do que o do regime de adubação.

A densidade de plantio e a adubação influenciaram as características quantitativas, sobretudo aquelas relacionadas ao diâmetro, já as alturas das árvores não expressaram um comportamento padrão para os fatores de variação analisados (Tabela 4).

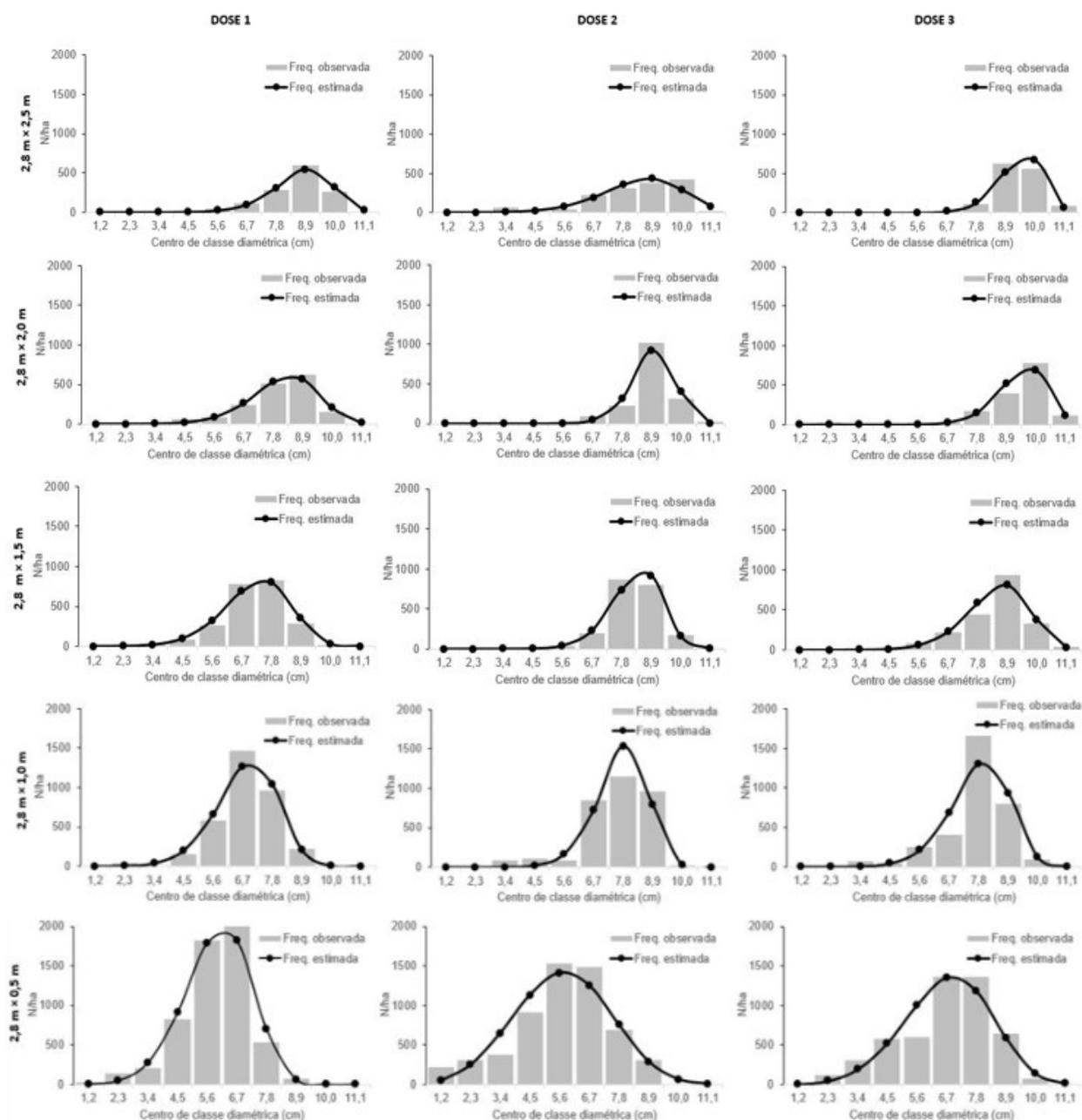
Tabela 4 – Características dendrométricas e o índice de espaçamento relativo (S%) das plantações de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com cinco densidade de plantio e três doses de adubação aos dois anos de idade

Espaçamento de plantio	Área vital (m ²)	Dose	\overline{DAP} (cm)	\bar{g} (cm ² árv ⁻¹)	d_g (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	\bar{H} (m)	H _D (m)	V (m ³ ha ⁻¹)	S (%)
2,8 m x 2,5 m	7,0	1	8,6	58,4	8,6	7,7	10,9	11,8	33,6	22,5
2,8 m x 2,5 m	7,0	2	8,6	56,6	8,5	8,4	10,3	11,9	34,6	22,2
2,8 m x 2,5 m	7,0	3	9,3	67,7	9,3	9,5	10,0	11,1	38,0	23,8
2,8 m x 2,0 m	5,6	1	7,9	51,2	8,1	8,6	10,8	12,6	37,2	18,8
2,8 m x 2,0 m	5,6	2	8,7	60,4	8,8	10,2	11,5	12,4	46,9	21,2
2,8 m x 2,0 m	5,6	3	9,3	68,5	9,3	10,4	11,6	12,7	48,3	18,7
2,8 m x 1,5 m	4,2	1	7,0	40,1	7,1	9,3	9,5	9,5	35,3	21,6
2,8 m x 1,5 m	4,2	2	8,1	52,7	8,2	11,0	11,8	12,1	51,9	17,0
2,8 m x 1,5 m	4,2	3	8,3	55,2	8,4	11,7	10,9	11,9	51,0	17,3
2,8 m x 1,0 m	2,8	1	6,6	35,8	6,7	12,1	11,3	12,0	54,7	13,9
2,8 m x 1,0 m	2,8	2	7,5	44,9	7,6	14,7	11,6	12,0	68,2	13,9
2,8 m x 1,0 m	2,8	3	7,6	46,7	7,7	15,5	11,9	12,2	73,8	13,7
2,8 m x 0,5 m	1,4	1	5,8	27,8	5,9	16,0	11,1	11,7	71,0	10,1
2,8 m x 0,5 m	1,4	2	5,7	26,9	5,9	15,7	10,9	11,9	68,5	9,9
2,8 m x 0,5 m	1,4	3	6,6	35,7	6,7	17,9	10,8	11,6	77,3	10,2

Fonte: Autores (2020)

Em que: \overline{DAP} – diâmetro à 1,30 m do solo (cm); \bar{g} – área transversal média (cm² árv⁻¹); d_g – diâmetro quadrático médio (cm); G – área basal (m² ha⁻¹); \bar{H} – altura média; H_D – altura dominante (m); V – volume de madeira estimado (m³ ha⁻¹); S = índice de espaçamento relativo (%).

Figura 1 – Distribuições diamétricas de Weibull para os sistemas florestais de curta rotação de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* em diferentes condições de densidade de plantio e doses de adubação aos 2 anos de idade

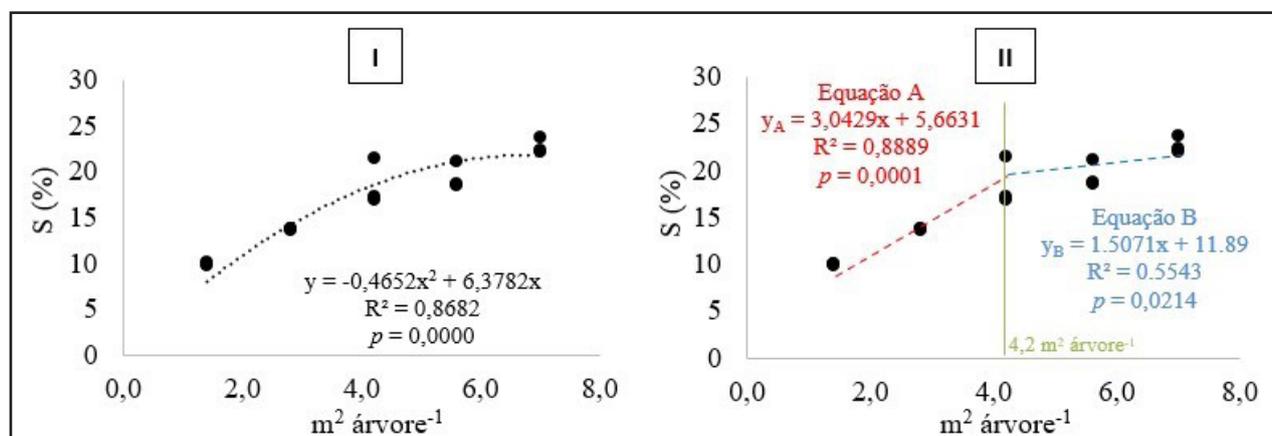


Fonte: Autores (2020)

Como já reportado em outros trabalhos, o DAP, a área transversal média e o diâmetro quadrático médio relacionam-se de maneira inversamente proporcional com o número de árvores por hectare (RIBEIRO *et al.*, 2017). Como o diâmetro é limitante na colheita mecanizada dos SFCR, os espaçamentos mais adensados são mais interessantes para uso do sistema *cut-to-chip* (GUERRA *et al.*, 2016).

Para o índice de espaçamento relativo – S, houve um aumento nos espaçamentos mais amplos, que indica uma menor competição entre as árvores. De fato, o índice S tende a alcançar um ponto assintótico na medida que aumenta a área vital por planta, como apresentado na Figura 2 (Gráfico I). De forma mais detalhada, na Figura 2 (Gráfico II), nota-se que a competição é mais severa (ou seja, maior inclinação da reta) de 1,4 a 4,2 m² por árvore (2,8 m × 1,5 m). Os valores de S% encontrados neste trabalho corroboram com os resultados encontrados por Finger e Schneider (1999), que estudaram plantações de *Eucalyptus grandis* de 8 a 15 anos de idade com diferentes pesos de desbaste no Sul do Brasil.

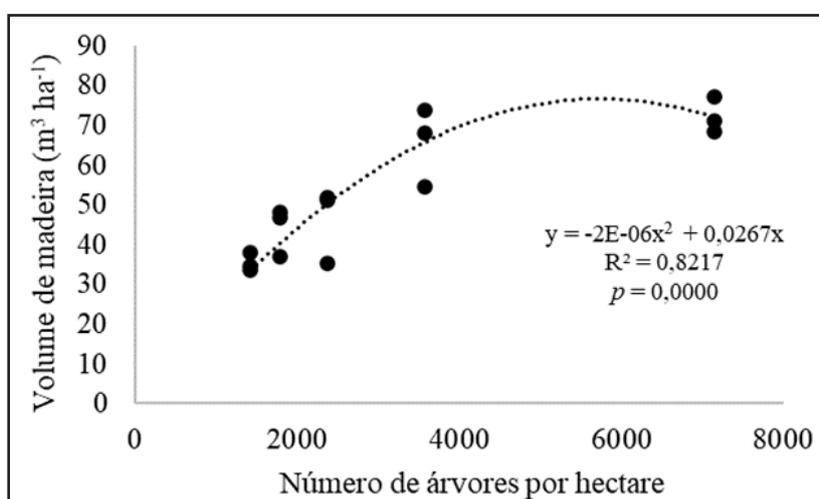
Figura 2 – Gráfico I - Variação do índice de espaçamento relativo - S (%) em função da densidade de plantio representada pela área vital das árvores; Gráfico II - Comportamento do S% por meio da regressão linear simples (Equação A e Equação B) antes e após o espaçamento 2,8 m × 1,5 m ou 4,2 m² árvore⁻¹ (linha verde vertical)



Fonte: Autores (2020)

A alta densidade de plantio, que propiciou uma maior competição entre os indivíduos (menores valores de S%), ocasionou, também, maiores valores de produção de madeira por hectare, como já reportado por Ribeiro *et al.* (2017) e Eloy *et al.* (2018). Entretanto, o aumento da produtividade dos tratamentos ocorreu até um determinado nível, como mostra a função quadrática ajustada na Figura 3.

Figura 3 – Produtividade florestal ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) das plantações de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* em função de diferentes densidades de plantio (árvores ha^{-1}) aos dois anos de idade



Fonte: Autores (2020)

É possível observar que o espaçamento $2,8 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ ($3571 \text{ árvores ha}^{-1}$) com a adubação nas doses 2 e 3 (vide Tabela 4), alcançou níveis de produtividade (V) similares ao espaçamento $2,8 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ ($7142 \text{ árvores ha}^{-1}$). Esse comportamento já foi observado em experimentos com desbastes e é chamado de teoria *Moller's plateau* (SKOVSGAARD; VANCLAY, 2007). Essa teoria diz que a produtividade das florestas é semelhante para certos níveis de densidade (excluindo-se os extremos), sendo que o ambiente pode suportar até uma determinada biomassa por hectare, que passa a ficar em função da qualidade desse sítio.

Pelo ponto de vista da sustentabilidade nutricional, a maior produtividade nos

espaçamentos adensados sugere uma maior eficiência de utilização dos nutrientes (CUB), que é a relação entre quantidade de biomassa e o teor de nutrientes na mesma (VIEIRA *et al.*, 2015). Entretanto, nos SFCR é utilizado uma elevada quantidade de fertilizantes minerais por área ($t\ ha^{-1}$), sendo que os espaçamentos que possuem uma alta produtividade e utilizam menores doses de adubos seriam aqueles mais sustentáveis nutricionalmente. Dessa forma, o espaçamento $2,8\ m \times 1,0\ m$ ($3571\ árvores\ ha^{-1}$) com a adubação na dose 2 seria o mais indicado para esse fim.

4 CONCLUSÃO

A densidade de plantio e as diferentes doses de adubação tiveram efeito na estrutura diamétrica das plantações de *Eucalyptus urophylla* \times *Eucalyptus grandis* no sistema florestal de curta rotação. Os tratamentos com maiores doses de adubação e menores densidades de plantio apresentaram um aumento na frequência de árvores nas classes diamétricas superiores.

O índice de espaçamento relativo (S%) foi maior nas plantações com alta densidade de plantio ($2,8\ m \times 0,5\ m$) e sugeriu uma intensa competição por fatores de crescimento, como água, luz e nutrientes, o que pode comprometer a produtividade desses sistemas ao longo do tempo.

Na busca de SFCR com maior sustentabilidade nutricional, destaque para o espaçamento de plantio de $2,8\ m \times 1,0\ m$ ($3571\ árvores\ ha^{-1}$) com redução de 50% da dose de adubação convencionalmente aplicada no manejo de plantações de eucalipto, que apresentou uma produtividade florestal nos mesmos patamares do espaçamento mais adensado com maiores quantidades de adubo por área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA/UNESP), ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN), ao Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia (LABB), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. *et al.* Uso da função Weibull para descrever a área basal por classe de diâmetro de um povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 401-406, 2012.
- AZEVEDO, G. B. *et al.* Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BINOTI, D. H. B. *et al.* Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos de eucalipto utilizando a função logística generalizada. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 707-711, 2015.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013. 605 p.
- CASTRO, R. V. O. *et al.* Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 107-116, 2016.
- CLUTTER, J. L. *et al.* **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley and Sons, 1983. 333 p.
- ELOY, E. *et al.* Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, p. 1-11, 2018.
- EMBRAPA SOLOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. 356 p.
- FAO. **Global forest resources assessment 2020: key findings**. Roma: FAO, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>. Acesso em: 22 jun. 2020.
- GARCIA, E. A. **Caracterização física e química do solo e avaliação do desenvolvimento de plantas de eucalipto em função do espaçamento e da adubação, visando a colheita precoce para a utilização em bioenergia**. 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.
- GARCIA, E. A. *et al.* Componentes químicos da madeira com casca proveniente do sistema florestal de curta rotação. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 1, p. 163-171, 2016.
- GUERRA, S. P. S. *et al.* Harvesting eucalyptus energy plantations in Brazil with a modified New Holland forage harvester. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 86, p. 21-27, 2016.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. Brasília, DF: IBA, 2019. 80 p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2020.

FINGER, C. A.; SCHNEIDER, P. R. Determinação do peso do desbaste para florestas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com base no índice de espaçamento relativo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 79-87, 1999.

LEMOS, S. V. *et al.* Geração energética de eucalipto de curta rotação. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 263-268, 2015.

LI, W. *et al.* A global yield dataset for major lignocellulosic bioenergy crops based on field measurements. **Scientific Data**, London, v. 5, p. 180169, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata2018169>. Acesso em: 12 fev. 2020.

MACHADO, S. D. A. *et al.* Distribuição diamétrica de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 10, n. 2, p. 103-110, 2009.

OLIVEIRA NETO, S. N. *et al.* Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de Cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing, 2013. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 30 jan. 2020.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. *In*: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (ed.). **Relação solo eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 265-302.

RIBEIRO, M. D. S. B. *et al.* Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017.

SCHUMACHER, M. V. *et al.* Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 144-156, 2019.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J.K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, Oxford, v. 81, n. 1, p.13-31, 2008.

VIERA, M. *et al.* Implicações nutricionais com base em diferentes intensidades de colheita da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 3, p. 432-439, 2015.

WILCKEN, C. F. *et al.* **Guia prático de manejo de plantações de eucalipto**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2008. 19 p.

Contribuição de Autoria

1 – Humberto de Jesus Eufrade-Junior

Engenheiro Florestal

<https://orcid.org/0000-0002-8402-2260> • h.eufrade@unesp.br

Contribuição: Conceituação, Curadoria de dados, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Validação, Visualização, Escrita – primeira redação, Escrita – revisão e edição

2 – João Marcos Rebesside Sousa

Engenheiro Florestal

<https://orcid.org/0000-0002-0746-2836> • joaomrdsousaa@gmail.com

Contribuição: Investigação, Metodologia, Software, Visualização, Escrita – revisão e edição

3 – Saulo Philipe Sebastião Guerra

Engenheiro Florestal, Professor

<https://orcid.org/0000-0002-6760-9094> • saulo.guerra@unesp.br

Contribuição: Conceituação, Obtenção de financiamento, Administração do projeto, Escrita – revisão e edição, Supervisão

Como citar este artigo

Eufrade-Junior, H. J.; Sousa, J. M. R.; Guerra, S. P. S. Efeito da adubação mineral e densidade de plantio nas características dendrométricas de plantações de eucalipto de rápido crescimento. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 31, n. 1, p. 350-366, 2021. DOI 10.5902/1980509842978. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509842978>. Acesso em: xx mês abreviado 202x.