

PROGNOSE DO CRESCIMENTO VOLUMÉTRICO DE ESPÉCIES DE *EUCALYPTUS* PARA A REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL

Carlos Alberto Ferreira¹
Roberto Trevisan²

RESUMO

Relatam-se os resultados obtidos para a prognose do crescimento volumétrico de *Eucalyptus deanei*, *E. viminalis*, *E. globulus* var. *bicostata*, *E. cambiju* e *E. nitens*, implantados na região de Ponta Grossa, PR. Dois modelos, comprovadamente adequados, foram testados com esse objetivo: i. método das regressões sucessivas, desenvolvido por Ferreira (1978) e melhorado por Guimarães e Castro (1982) e Ferreira (1989); ii. função sigmoideal de Chapman- Richards, de dois parâmetros, com diversas aplicações no campo florestal. Após as análises efetuadas, apresentam-se as seguintes conclusões: 1. O modelo das regressões sucessivas, com a vantagem de não necessitar da série histórica completa dos volumes para uma mesma parcela para ser ajustada, tem precisão satisfatória para os objetivos deste trabalho. 2. Os melhores resultados, expressos pelo menores erros da projeção volumétrica, foram obtidos com o modelo de Chapman – Richards. 3. A idade base para início da prognose, baseada nas regressões sucessivas, deve ser superior a três anos de idade. 4. Não foi possível ajustar-se os modelos testados aos dados de *E. nitens* devido à inadaptação da espécie à região de Ponta Grossa. Nessa espécie observou-se uma acentuada queda de sobrevivência ao longo da rotação. 5. Para o modelo de regressões sucessivas, a mesma equação pode ser utilizada para todas as espécies, com base no volume obtido ao quarto ano.

$$V_{i+1} = V_o + V_i * e^{a+b*i}$$

¹ Eng. Agrônomo, Pesquisador da *Embrapa Florestas*.

² Eng. Florestal, Agloflora S.A.

Sendo: $V_0 = -14,3$; V_i volume na idade i ; V_1 volume no ano subsequente; $b = -0,172$; $a = 1,167$; i = idade referência. 6. Para o modelo de Chapman - Richards foram obtidas as seguintes estimativas para os parâmetros descritores do crescimento, considerando valores médios:

$$V_i = V_m * (1 - e^{-k*t})^{1/(1-m)}$$

Sendo: V_m volume máximo obtido = 309; V volume prognosticado; t = idade em anos; k e $1/(1-m)$ coeficientes = 0,356 e 0,229 respectivamente. 7. Os erros absolutos das estimativas variaram de 5 a 16 m^3/ha e sempre inferiores a 10% do valor da média, para ambos os métodos. 8. A grande vantagem do método das regressões sucessivas, embora menos preciso que o modelo de Chapman – Richards, é não necessitar de uma série histórica para ser ajustada nem de uma estimativa do volume máximo a ser obtido.

PALAVRAS CHAVE: *Eucalyptus*, volume, projeção de crescimento.

PROJECTION OF THE VOLUMETRIC GROWTH OF *EUCALYPTUS* SPECIES IN THE BRAZILIAN SOUTHERN REGION

ABSTRACT

This paper presents the results obtained for the volumetric growth projection of *Eucalyptus deanei*, *E. viminalis*, *E. globulus* var. *bicostata*, *E. cambiju* e *E. nitens*, established in the region of Ponta Grossa, Paraná state. Two models, already tested for other species and region, were proposed: i. method of the "successive regressions" proposed by Ferreira (1978) and improved by Guimarães (1982) e Ferreira (1989), ii. the sigmoidal function with two parameters of Chapman- Richards. The following conclusions could be drawn: The model of the successive regressions, with the advantage of no need for a complete historical series for a same plot to be adjusted, has satisfactory precision for the objectives of this paper. The better results were obtained through the Chapman – Richards model. The minimum reference age, for the start of the volume projections with the successive regression model,

must be above three years . It was not possible to adjust the models for *E. nitens* due to the inadaptation of the species to the region of Ponta Grossa. The same equation for the successive regression model, can be used for all species , based on volumes obtained at least at four years old and on, and its coefficients are presented. For the Chapman - Richards model the estimates for average volumes are also presented. The estimated errors for both methods ranged from 5 to 16 m³/ha, always less than 10% of the average value.

KEY WORDS: *Eucalyptus*, volume, growth projection

1 INTRODUÇÃO

O método das regressões sucessivas tem sido utilizado, com sucesso, por vários autores para prognose de crescimento de *Eucalyptus sp* na região dos cerrados de São Paulo, (Ferreira, 1978, Couto & Bastos, 1986). A mesma metodologia, modificada, foi aplicada por Guimarães & Castro (1982), para *E. grandis*, em outras regiões do cerrado e de floresta tropical.

Descrições do método podem ser encontradas em Ferreira (1978), Couto & Bastos (1986) e Ferreira (1989). Apesar de sua simplicidade, a precisão do método é muito elevada. Couto & Bastos (1986) apresentam exemplos de sua validação. A limitação principal apontada pelos autores para o método é a necessidade de obtenção dos dados sempre múltiplos inteiros de um ano. Entretanto, Guimarães (1982) e Ferreira (1989), expressaram os coeficientes das regressões individuais em função da idade base de prognose , tornando-a possível, mesmo baseada em idades fracionárias.

A função de Chapman – Richards tem aplicações as mais variadas na ciência florestal, onde processos de crescimento sigmoidais são representados. Barros et al. (1984) utilizaram o modelo para análise do crescimento de *E. saligna* sob diferentes níveis de N, P e K no Vale do Jequitinhonha. Ferreira (1989) simulou respostas do *E. saligna* a diferentes dosagens de formulações completas de N:P:K, no cerrado do Estado de São Paulo. Venus & Causton (1979) recomendam o uso deste modelo pela flexibilidade e por fornecer parâmetros com significado biológico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração deste trabalho, foram utilizados dados de um ensaio de competição de espécies, implantado em novembro de 1982, em área da Empreendimentos Florestais Agloflora Ltda., localizada em Vila Velha, Paraná. As espécies componentes do experimento foram as seguintes: *E. "cambiju"* (híbrido natural), *E. deanei*, *E. viminalis*, *E. globulus* var. *bicostata* e *E. nitens*. O *E. nitens* devido a sua inadaptação, refletida pela baixa sobrevivência, não foi incluído neste trabalho. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com quatro repetições. Cada parcela foi constituída por 96 árvores, incluindo as bordaduras, sendo 32 mensuráveis. O espaçamento usado foi de 2,5 x 2,0 m sendo que todas as árvores receberam 150g da formulação N:P:K (7:28:12), no momento do plantio.

Foram registrados anualmente os valores referentes ao diâmetro à altura do peito, altura total e sobrevivência. Os cálculos de volume cilíndrico e estimativas de volumes reais sem casca seguiram metodologia proposta por Ferreira (1976). Para execução da prognose adotaram-se os modelos de Chapman – Richards, cuja formulação matemática é apresentada a seguir:

$$V_i = V_m * (1 - e^{-kt})^{1/(1-m)}$$

Onde: t idade em anos da prognose

V_m volume máximo obtido

V_i volume prognosticado

k e 1/ (1-m) são coeficientes a serem estimados

E o método das regressões sucessivas modificado para a forma exponencial:

$$V_{i+1} = V_0 + V_i \cdot e^{a+b \cdot i}$$

Onde : V₁ volume previsto para o ano subsequente

V_i volume obtido na idade base

i idade base

V₀, a e b são coeficientes a serem estimados

Os coeficientes obtidos, com o ajuste de regressões lineares aos dados de anos consecutivos, foram correlacionados com a idade base de projeção. A regressão obtida foi da forma exponencial. O interseção comum das regressões individuais foi calculado pelo método denominado de "nested regressions", segundo Alder (1980).

Para validação dos modelos e regressões obtidas, uma das repetições de cada espécie foi sorteada e não incluída para o ajuste dos coeficientes. Posteriormente, os volumes obtidos foram comparados com os volumes prognosticados para essas mesmas repetições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos referentes às regressões sucessivas e coeficientes de determinação para volume cilíndrico são apresentadas na Tabela 1. A análise dos dados dessa tabela revela relação estreita entre o volume acumulado em anos anteriores e o volume alcançado nos anos subsequentes. Estas relações permitem a elaboração de tabelas de produção, sem a necessidade de dados cumulativos para uma mesma parcela em anos consecutivos, apenas com dados de dois anos consecutivos de parcelas quaisquer.

Tabela 1 Estimativas dos coeficientes de determinação e coeficientes das regressões para estimar produções volumétricas de anos subsequentes a partir do volume do ano anterior (E.P. = erro padrão das estimativas de volume).

Idade Anos	Volume cilíndrico (m ³ .ha ⁻¹)			
	Coeficientes		R ²	E.P.(m ³ .ha ⁻¹)
	a	B		
3 – 4	0,354	1,976	0,95	21,5
4 – 5	-18,81	1,456	0,98	18,7
5 – 6	-30,0	1,469	0,99	18,2
6 – 7	-7,77	1,154	0,99	27,5

Volume real sem casca ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)

Idade (anos)	Coeficientes		R ²	E.P. ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)
	a	B		
3 – 4	4,30	1,924	0,92	23,2
4 – 5	-5,62	1,449	0,97	19,2
5 – 6	-12,8	1,480	0,99	18,8
6 – 7	2,17	1,121	0,98	24,3

Na Tabela 2, são apresentados os coeficientes das regressões e os coeficientes de determinação para as seguintes situações: primeiro com o ajuste de uma única equação para todas as espécies e, na segunda, considerando-se individualmente as diferentes espécies. O erro padrão no caso do ajuste da regressão geral dos três para os sete anos é elevado chegando a $96,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, enquanto que no segundo caso alcança $60,4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Como será discutido a seguir, essas diferenças são devidas aos volumes iniciais muito diferentes entre as espécies.

A análise da regressão para o ajuste individualizado das regressões nas diferentes idades, na Tabela 3, visando a estimativa do volume ao sétimo ano, permite concluir a não convergência das regressões. Assim, as regressões individualizadas para o *E. deanei*, na idade de três anos e o *E. viminalis*, nas idades de três e quatro anos, devem ter intercepto próprios. Dessa forma, a metodologia “nested regressions” pode ser aplicada para essas espécies apenas para o coeficiente “b”.

Tabela 2 Comparação entre as regressões obtidas, para as diferentes espécies, e para prognose do volume ao sétimo ano, a partir do volume aos 3, 4, 5 e 6 anos de idade. (E.P. = erro padrão das estimativas de volume).

Volume real sem casca (m³. ha⁻¹)

Idade (anos)	Geral (1)		Individualizada (2)	
	R ²	E.P. (m ³ . ha ⁻¹)	R ²	E.P. (m ³ . ha ⁻¹)
3 – 7	0,836	96,4	0,929	60,4
4 – 7	0,970	57,7	0,954	48,6
5 – 7	0,990	33,2	0,983	29,5
6 – 7	0,993	27,5	0,983	29,2

(1) calculada para o conjunto das espécies

(2) calculada separadamente por espécie

Tabela 3 Comparação entre as regressões obtidas, para as diferentes espécies, e para prognose do volume ao sétimo ano, a partir do volume aos 3, 4, 5 e 6 anos de idade.

Espécie	Idade/valor de "t"			
	3	4	5	6
E.cambiju	1,85(0,10)	0,92	0,39	0,07
E.deanei	3,02(0,02)	1,20	0,43	0,18
E.viminalis	4,04(0,005)	2,63(0,03)	1,72	1,00
E.bicostata	-	-	-	-

Valores entre parêntesis: níveis de significância para H₀

A análise do ajuste do modelo linear para várias idades e espécies mostra que a constante V_0 da regressão sucessiva difere entre as espécies. Na idade de três anos, *E. deanei* e *E. viminalis* diferem de *E. globulus* var. *bicostata* e *E. cambiju*. Na idade de quatro anos apenas o *E. viminalis* difere das demais espécies. Embora esta limitação, optou-se por ajustar uma equação única, a partir do quarto ano, com um intercepto comum.

Observou-se que a variação do coeficiente b das regressões lineares de primeiro grau, ajustadas para prognose de anos subsequentes, obedecia a um padrão exponencial negativo em função da idade base de projeção. Essa constatação também foi feita por Guimarães e Castro (1982). Dessa forma, obteve-se o ajuste da função do modelo exponencial das regressões sucessivas e os coeficientes apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Coeficientes obtidos para o modelo exponencial da regressão sucessiva para todas as espécies, expressando volume real sem casca ($m^3.ha^{-1}$).

Coeficientes	Estimativa	Erro padrão	Nível de Significância
a.	1,152	0,152	0,002
b.	0,170	0,025	0,006

$$R^2 = 0,937$$

$$E.P. = 0,08$$

Ajustando-se novamente as regressões e recalculando-se o valor de V_0 , obteve-se o valor médio de 1,44. Assim foi obtida a formulação final para a regressão sucessiva em sua formulação exponencial e as estimativas seguintes dos coeficientes expressando volume real sem casca por hectare.

$$V_0 = 1,44$$

$$a = 1,152$$

$$b = - 0,170$$

Adotando-se o mesmo procedimento para o cálculo do volume cilíndrico, obteve-se as seguintes estimativas para os mesmos coeficientes:

$$\begin{aligned} V_0 &= -14,4 \\ a &= 1,167 \\ b &= -0,172 \end{aligned}$$

Dessa forma, a regressão linear sucessiva, em sua forma exponencial, pode ser utilizada, a partir do volume ao quarto ano para todas as espécies, com restrições apenas para o *E. viminalis*, para o qual pode-se esperar erros mais elevados.

O ajuste da função sigmoidal de Chapman-Richards foi obtida através da aplicação do algoritmo de Marquard. Para facilitar o processo, foram calculados os valores iniciais dos parâmetros, considerando-se os valores mínimos, médios e máximos observados para os volumes obtidos. Após os ajustes, os coeficientes obtidos foram os seguintes:

$$\begin{aligned} V_m &= \text{estimativa do volume máximo esperado} = 309 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \\ k &= 0,356 \\ 1/(1-m) &= 0,229 \end{aligned}$$

A avaliação do ajuste proporcionado pelos métodos adotados foi efetuada considerando-se três condições que correspondem ao mesmo critério para ajuste da função de Chapman-Richards. Assim, projetou-se mediante os dois modelos produções máxima, médias e mínimas e comparou-se com os volumes obtidos. Os resultados desta comparação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Prognose do volume para a média de todas as espécies, erro absoluto e percentual máximo em relação aos volumes obtidos.

Volume cilíndrico (m ³ . ha ⁻¹) – mínimos				
Idade (anos)	Observado	Chapman Richards	Regressões Sucessivas	Erro percentual Máximo
3	39	39	39	-
4	79	73(-6)	74(-5)	7,5
5	108	109(1)	118(-10)	9,2
6	147	140(-7)	159(8)	5,4
7	167	167	182(15)	8,9

Volume cilíndrico (m³ . ha⁻¹) - médios

Idade (anos)	Observado	Chapman Richards	Regressões Sucessivas	Erro percentual Máximo
3	48	48	48	-
4	96	92(-4)	91(-5)	5,2
5	134	137(3)	146(12)	8,9
6	185	177(-8)	197(12)	6,4
7	209	210(1)	225(16)	7,6

Volume cilíndrico (m³. ha¹) - máximos

Idade (anos)	Observado	Chapman Richards	Regressões Sucessivas	Erro percentual Máximo
3	56	56	56	-
4	113	107(-6)	106(-7)	7,0
5	158	159(1)	171(13)	8,2
6	222	206(-16)	231(9)	7,2
7	252	244 (-8)	264(12)	4,8

Valores entre parêntesis: diferença absoluta em relação aos volumes observados.

Embora algumas diferenças entre as estimativas prognosticadas e os valores obtidos alcançaram valores de até 16 m³. ha¹, as diferenças em nenhuma das idades foi superior a 9,2%. Estes níveis de erro podem ser considerados plenamente satisfatórios, uma vez que erros de até 10% são admissíveis em inventários florestais.

A validação dos modelos pela comparação com os volumes obtidos para o bloco não incluído para os ajustes é apresentada na Tabela 6. Os resultados dessa tabela permitem concluir que os erros percentuais obtidos pela prognose pelo método das regressões sucessivas, até o sétimo ano, são pequenos. Apenas para o caso do *E. viminalis* observou-se uma subestimativa de 20% em relação ao volume prognosticado para o sétimo ano.

Tabela 6 Validação dos modelos pela comparação entre as estimativas prognosticadas e o volumes obtidos para as diferentes espécies, pelo método das regressões sucessivas em forma exponencial.

Espécie	Idades					
	(*)	3	4	5	6	7
<i>E. bicostata</i>	P	95	167	213	228	246
	O	95	163	206	249	289
	D%	-	2,5	3,4	- 8,4	- 13,7
<i>E. cambiju</i>	P	161	293	459	609	680
	O	161	337	492	676	701
	D%	-	- 13,0	- 6,7	- 10,0	- 3,0
<i>E. deanei</i>	P	167	305	477	633	708
	O	167	342	458	659	730
	D%	-	- 11,0	+ 4,1	- 3,9	- 3,0
<i>E. viminalis</i>	P	-	212	327	430	476
	O	-	212	337	485	597
	D%	-	-	- 3,0	- 11,3	- 20,3

(*) P Volumes prognosticados

O Volumes obtidos no bloco não incluído para obtenção dos coeficientes dos modelos

D% Diferença em porcentagem entre os volumes prognosticados e observados

4 CONCLUSÕES

Após as análises efetuadas apresentam-se as seguintes conclusões:

1. O modelo das regressões sucessivas, com a vantagem de não necessitar da série histórica completa dos volumes para uma mesma parcela para ser ajustada, tem precisão satisfatória para os objetivos deste trabalho.
2. Os melhores resultados, expressos pelos menores erros da projeção volumétrica, foram obtidos com o modelo de Chapman – Richards.

3. A idade base para início da prognose, baseada nas regressões sucessivas, deve ser superior a três anos de idade.
4. Não foi possível ajustar-se os modelos testados aos dados de *E. nitens* devido à inadaptação da espécie à região de Ponta Grossa; observou-se uma intensa queda de sobrevivência ao longo da rotação.
5. Para o modelo de regressões sucessivas, a mesma equação pode ser utilizada para todas as espécies, para estimativas de volume cilíndrico por hectare, com base no volume obtido ao quarto ano:

$$V_{i+1} = V_0 + V_i * e^{a+b*i}$$

Sendo: $V_0 = -14,3$

V_i volume na idade i

V_{i+1} volume no ano subsequente

$b = -0,172$

$a = 1,167$

i idade referência

6. Para o modelo de Chapman - Richards foram obtidas as estimativas seguintes para os parâmetros descritores do crescimento, considerando valores médios do volume cilíndrico por hectare:

$$V_i = V_m * (1 - e^{-k*t})^{1/(1-m)}$$

Sendo:

V_m volume máximo obtido = 309

V_i volume prognosticado

t idade em anos

k e $1/(1-m)$ coeficientes a serem estimados = 0,356 e 0,229 respectivamente.

7. Os erros absolutos das estimativas variaram de 5 a 16 m³/ha e sempre inferiores a 10% do valor da média, para ambos os métodos.
8. A grande vantagem do método das regressões sucessivas, embora menos preciso que o modelo de Chapman – Richards, é não necessitar de uma série histórica para ser ajustada nem de uma estimativa do volume máximo a ser obtido.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALDER, D. **Forest volume estimation and yield prediction**. Rome: FAO, 1980. 2v. (FAO. Forest Paper, 22/2).
- BARROS, N.F. de; SILVA, O.M.; PEREIRA, A.R.; BRAGA, J.M.; LUDWIG, A. Análise do crescimento de *Eucalyptus saligna* em solo de cerrado sob diferentes níveis de N, P e K no Vale do Jequitinhonha, M.G. IPEF, Piracicaba, n.26, p.13-17, 1984.
- COUTO, H.T.Z. do; BASTOS, N.L.M. **Second rotation Eucalypts growth curves for the State of São Paulo**. IPEF, Piracicaba, n. 34, p.15-21, 1986.
- FERREIRA, C.A. **A estimativa do volume de madeira aproveitável para celulose em povoamentos de *Eucalyptus sp.*** Piracicaba: ESALQ/USP, 1976. 112p. Dissertação Mestrado.
- FERREIRA, C.A. Inventário em florestas de eucalipto e projeções de crescimento. In: **SIMPÓSIO SOBRE INVENTÁRIO FLORESTAL**, 1978, Piracicaba. **Anais**, Piracicaba: USP-ESALQ / IPEF, 1978. p. 23-29.
- FERREIRA, C.A. **Nutritional aspects of the management of Eucalyptus plantations on poor sandy soils of the brazilian cerrado region**. Oxford: Oxford University, 1989. 193p.
- GUIMARÃES, D.P., CASTRO, L.H.R. **Novos métodos para estimativa do volume de árvores em pé**. Brasília: EMBRAPA/CPAC, 1982. 16p. (Boletim de Pesquisa, 12).
- VENUS, J.C., CAUSTON, D.R. Plant growth analysis: the use of the Richards function as an alternative to polynomial exponentials. **Annals of Botany**, v.43, p.623-632, 1979.