

CRESCIMENTO EM DIÂMETRO DE ÁRVORES DE *Podocarpus lambertii* EM DUAS REGIÕES FITOGEográfICAS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, BRASILDIAMETER GROWTH OF *Podocarpus lambertii* TREES FROM TWO PHYTOGEOGRAPHICAL REGIONS OF RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZILErni José Milani¹ Paulo Renato Schneider² Thiago Augusto da Cunha³**RESUMO**

O presente estudo avaliou o crescimento diamétrico em função da idade de árvores de *Podocarpus lambertii* oriundas de duas regiões fitogeográficas do Rio Grande do Sul, denominadas de Campos de Cima da Serra e Depressão Central. Os dados de crescimento foram obtidos a partir de análise de tronco e descritos pelo modelo assintótico logístico. A assíntota e a taxa de crescimento das árvores foram aleatorizadas por meio de um modelo não linear misto com o propósito de avaliar diferenças no comportamento de ambas variáveis entre as regiões. O modelo de crescimento explicou 85 % da variação na trajetória de crescimento das árvores e os componentes de variância foram significativos e precisos, tendo revelado maior taxa de crescimento em diâmetro para árvores que crescem na região dos Campos de Cima da Serra.

Palavras-chave: modelo não linear misto; componente de variâncias; crescimento; árvores individuais.

ABSTRACT

The present study evaluated the diameter growth of *Podocarpus lambertii* trees from two phytogeographical regions in Rio Grande do Sul State, Brazil, denominated 'Campos de Cima da Serra' and 'Depressão Central'. The data were obtained using Stem Analysis and described by the Logistic growth model. The asymptote and growth rate were randomized by a non-linear mixed model to verify differences in their performances in both regions. The growth model explained 85 % of the total variation in the tree growth trajectory and the variance component was significant and consistent and revealed that trees growing in 'Campos de Cima da Serra' region presented a higher diameter growth rate.

Keywords: non-linear mixed model; variance component; growth; individual tree.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores geradores e consumidores mundiais de produtos de origem florestal. Essa demanda é suprida, em parte, por madeira de espécies exóticas, por possuírem crescimento rápido e características que satisfazem um mercado relativamente pouco exigente. Porém, quanto à demanda por madeira de alta qualidade, o país continua dependendo da exploração das florestas nativas, buscando a madeira em locais cada vez mais distantes dos grandes centros consumidores (BRASIL, 2006).

Entre estas espécies nativas, o *Podocarpus lambertii*, vulgarmente conhecido como pinheiro-bravo, ocorre em duas áreas disjuntas: a primeira na Bahia, e a segunda entre Minas Gerais e o Rio Grande do Sul (CARVALHO, 2003) e desperta interesse do ponto de vista econômico dentre as gimnospermas arbóreas nativas do Brasil (MAIXNER e FERREIRA, 1976). Reitz et al. (1983) consideram ser uma espécie de interesse na recuperação de áreas degradadas, permitindo a diminuição do impacto ambiental causado por fatores antropogênicos.

1. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Colégio Politécnico, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, (RS). ejmilani@gmail.com
2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, (RS). paulors@smail.ufsm.br
3. Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria, (RS). etsfor@yahoo.com

Recebido para publicação em 14/12/2010 e aceito em 15/02/2012

Para se recomendar o plantio de uma determinada espécie florestal é necessário que se tenha conhecimento abrangente de suas características e ritmo de crescimento na região de ocorrência, informações ainda escassas para as espécies nativas brasileiras.

O desenvolvimento de planos de manejo envolve a determinação do potencial produtivo de cada povoamento dentro de uma unidade de manejo, de modo que o crescimento e a produção florestal possam ser prognosticados (ALEMDAG, 1991). Além disso, há necessidade da caracterização do crescimento para uma idade definida, a qual serve também como ferramenta na avaliação do desenvolvimento em diâmetro, volume, área basal, altura e produtividade, permitindo assim, a análise de diferentes sítios.

O potencial produtivo de um determinado sítio ou região pode ser determinado diretamente pelo crescimento das árvores representantes que sofrem a ação e interação de fatores bióticos, climáticos, edáficos e topográficos ao longo de toda a fase de desenvolvimento. Neste sentido, vários modelos de crescimento sigmoidal têm sido propostos para descrever o crescimento de árvores individuais, por exemplo, Richards, Backmann, Gompertz e o modelo logístico. A diferença essencial entre estes modelos está no tamanho em que a árvore apresenta o máximo incremento corrente anual (SEBER e WILD, 1989), ou seja, o ponto onde a curva de crescimento desloca de convexa para côncava no ponto de inflexão da curva. No modelo de crescimento de Richards (RICHARDS, 1959), é possível modelar o ponto de inflexão, o que torna o modelo bastante flexível, prático e eficiente.

Assim, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de ajustar o modelo de crescimento Logístico, conhecido também como autocatalítico, para descrever adequadamente a trajetória do crescimento em diâmetro, em toda a fase de vida de árvores de *Podocarpus lambertii* provenientes de duas regiões fitogeográficas do Estado do Rio Grande do Sul, denominadas de Campos de Cima da Serra e Depressão Central.

A importância geral do modelo Logístico de crescimento e seu uso em crescimento de árvores foram enfatizados por várias investigações, revelando ser vantajoso frente aos demais, porque sumariza os dados observados oriundos de uma série temporal em três parâmetros, tornando mais fácil comparar a performance das árvores entre as regiões avaliadas.

Justifica-se o presente estudo pela carência de registros históricos acerca do padrão de crescimento de árvores de *Podocarpus lambertii*, acompanhado da necessidade de avaliar o comportamento da espécie em diferentes sítios, visando a um maior aproveitamento com a expansão da sua produção, manejo e fomento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Origem e coleta de dados

Os dados de crescimento em diâmetro foram obtidos de árvores vegetando na região denominada Campos de Cima da Serra (município de São Francisco de Paula) e na região Depressão Central (município de São Sepé). A região dos Campos de Cima da Serra possui uma precipitação média anual de 2.470 mm ano⁻¹, com temperatura média de 14,1 °C e composição vegetal do tipo Florestal Ombrófila Mista, com *Araucaria angustifolia* (IBGE, 1992). Por outro lado, a região da Depressão Central apresenta um tipo de vegetação característico de Floresta Estacional Decidual, apresentando precipitação média anual de 1.600 mm ano⁻¹, com temperatura média de 19 °C.

Um total de 643 pares de dados de diâmetro e idade (343 para a região de São Francisco de Paula e 300 para São Sepé) foram obtidos por análise de tronco completa (SCHNEIDER et al., 1984) e utilizados para ajustar o modelo de crescimento em diâmetro.

Modelo de crescimento

A resposta do crescimento temporal foi examinada utilizando regressão não linear mista. O modelo Logístico (Modelo 1) foi ajustado aos dados observados para descrever o comportamento do crescimento em diâmetro.

Para este modelo, considerou-se que a assíntota estimada variou entre as *j-ésima* regiões por meio da inclusão de um nível a mais no modelo, o componente aleatório, específico para cada região (componente de variância), que incorpora a correlação para as observações decorrentes de cada região, o que possibilita avaliar o efeito dos dados, provavelmente correlacionados entre si, na análise da variável dependente.

Para o ajuste do modelo, utilizaram-se os Mínimos Quadrados Generalizados (GLS) para estimar o vetor de efeitos fixos (β), sendo os componentes de variância estimados simultaneamente, utilizando o método de Máxima Verossimilhança

Restrita (REML).

$$d(t)_{ijk} = \frac{\beta_0 + u_{0j}}{\{1 + \beta_1 \cdot e^{[-\beta_2 + u_{2j}] \cdot t_{ij}}\}} + r_{ijk} \quad (1)$$

Em que: $d(t)_{ij}$ representa o crescimento em diâmetro da i -ésima árvore na j -ésima região na idade t ; β_0 , β_1 , β_2 = parâmetros da regressão a serem estimados – em que $\beta_2 > 0$; $r_{ij} \sim N(0; \sigma_r^2)$ e $\sigma_r^2 \neq \sigma_r^2 I$; u_{0j} , u_{2j} = efeitos aleatórios que variam entre assíntota e taxa de crescimento para cada sítio, respectivamente.

A matriz de variância e covariância dos efeitos aleatórios (u_{0j} , u_{2j}), foi parametrizada e modelada utilizando a estrutura autorregressiva com variâncias heterogêneas, representada por Σ_j , considerando que ambas são independentes entre as regiões avaliadas:

$$\begin{pmatrix} u_{0j} \\ u_{2j} \end{pmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \Sigma_0 & 0 \\ 0 & \Sigma_2 \end{bmatrix} \right) \\ \therefore \\ \Sigma_0 = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_1 \sigma_2 \rho \\ \sigma_2 \sigma_1 \rho & \sigma_2^2 \end{bmatrix}$$

No modelo, o parâmetro β_2 governa a taxa de crescimento na qual o diâmetro aproxima-se ao seu máximo potencial (assíntota). Com base nesta definição, Fekedulegn et al. (1999) definiram uma expressão para calcular o valor inicial de β_2 , partindo da amplitude da variável dependente e da idade considerada (Equação 2). Os autores expressaram o valor inicial para a constante biológica β_1 , considerando o início do crescimento, quando a idade é zero ($d(0)$) e assíntota previamente estabelecida

para o modelo Logístico (Equação 3):

$$\beta_2 = \frac{(d_2 - d_1)/(t_2 - t_1)}{\beta_0} \quad (2)$$

$$d(0) = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1)} \quad (3)$$

Em que: β_0 = valor da assíntota ou valor potencial máximo do crescimento em diâmetro.

O objetivo de utilizar esta metodologia para a determinação de valores iniciais é diminuir o processo iterativo e facilitar a convergência, já que estas constantes possuem interpretação biológica e, portanto, devem ser calculadas de forma cuidadosa.

Testes de avaliação baseados na proporção da variação não explicada foram calculados para determinar a acurácia da predição da equação ajustada (VANCLAY e SKOVSGAARD, 1997). Os testes estatísticos foram definidos pelo coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) e coeficiente de variação (CV%). Devido à geometria não linear dos modelos de crescimento avaliados o teste estatístico de F não foi utilizado para avaliar o ajuste.

O modelo de crescimento Logístico é flexível para modelar a curva sigmoide de crescimento, com suficiente e boa propriedade estatística (DRAPER e SMITH, 1981); também, para $t = \infty$ leva a $d = \beta_0$ indicando o valor limite de crescimento.

Na Tabela 1 são apresentados os critérios e fórmulas para a avaliação do desempenho do modelo de crescimento logístico ajustado aos dados de diâmetro por idade.

TABELA 1: Critério para avaliação do desempenho do modelo de crescimento.

TABLE 1: Criterium to evaluate the performance of the growth model.

Critério	Símbolo	Fórmula	Ideal
Coeficiente de variação	CV%	$\left\{ \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2]^{1/2}}{\bar{y}_i} \right\} \cdot 100$	0%
Coeficiente de determinação ajustado	R_{aj}^2	$1 - \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2]}{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}$	1
Critério de informação de Akaike	AIC	$n \cdot \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} + 2k \right]$	Quanto menor, melhor

Em que: \bar{y}_p , \hat{y}_p , y_i são os valores médios, estimados e observados, respectivamente; n número de observações; p número de parâmetros do modelo; $k=p+1$; \ln =logaritmo natural.

Para o ajuste dos modelos, utilizou-se o procedimento NLMIXED do sistema estatístico SAS (SAS/STAT, 2007) com o método iterativo FIRO (*FirstOrder*). Os valores de $p < 0,05$ foram considerados para denotar significância estatística em todas as análises.

A modelagem empregada nesta pesquisa considera o grande número de medidas repetidas no tempo (120 anos) na unidade amostral (árvore), o que representa vantagem frente aos demais métodos que poderiam ser utilizados para descrever a curva de crescimento ao longo do tempo (p.e. MANOVA; ANOVA para cada idade dentre outros), porém, estes não são capazes de prover informações detalhadas do efeito de sítio ao longo da trajetória de crescimento das árvores (ZHAO et al., 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas de avaliação do modelo de crescimento em diâmetro mostraram ajustes aceitáveis ($R^2_{aj} = 0,848$), dentro do padrão para modelos de crescimento ajustados para larga abrangência. Apesar de Draper e Smith (1981) mencionarem que não há nenhum método para a obtenção de valores iniciais para os parâmetros em modelo não linear, a convergência foi bastante sensível aos valores iniciais calculados quando utilizando a metodologia proposta por Fekedulegn et al. (1999), medido pelo critério de convergência.

O modelo fixo logístico revelou elevado erro relativo ($CV=32,5\%$), possivelmente devido à amplitude de representação dos dados para uma única equação. Em base a estes critérios, poderíamos inferir que o modelo descreveu a dinâmica do crescimento em diâmetro, entretanto, demonstra, à primeira vista, que poderia haver efeito das regiões avaliadas no crescimento (variação).

Após ajustar o modelo considerando variação, componente aleatório aditivo, na assíntota e na taxa de crescimento das árvores, tornou-se evidente as diferenças no comportamento do crescimento entre as regiões avaliadas (Tabela 2).

Assim, a inclusão do efeito aleatório no modelo de crescimento foi decisivo para diminuir a variação do crescimento individual da unidade amostral ($r_{ij}=1$) dentro de cada região, evidenciado pela maior variância que ocorreu na assíntota entre as regiões ($\tau_{11}=219$). Isto revela que somente a idade como variável preditora não é suficiente para abranger a variação do crescimento em diâmetro, pois a descrição do crescimento é altamente artifi-

cial (ZEIDE, 2004), já que o modelo considera que todos os outros fatores de sítio são constantes. Por outro lado, o valor preditivo do modelo pode estar na consideração de que a variação dos fatores ambientais encontra-se em níveis estacionários para o período de crescimento considerado.

O critério de avaliação de Akaike mostrou valores de 541,9, indicando valores elevados, considerando os melhores valores quanto menores forem estes. Todos os coeficientes de regressão foram significativos (Tabela 2), entretanto, este fato pode originar conflitos entre os estudos preliminares acerca da significância dos coeficientes de regressão cuja resposta pode estar na metodologia empregada e na amplitude de dados coletados. Sobre isto, Fekedulegn et al. (1999) relataram que para o ajuste de modelos de crescimento sigmóides e não lineares deve-se evitar utilizar dados que não abrangem todo o estágio de crescimento da planta (juvenil, adolescente, maduro e senescente), pois, os parâmetros estimados podem não ser significativos. Entretanto, no presente estudo utilizaram-se dados de crescimento para todo o ciclo de crescimento da espécie estudada.

TABELA 2: Coeficientes de regressão e componentes de variância do modelo logístico ajustado para descrever o crescimento em diâmetro de *Podocarpus lambertii* para duas regiões no Rio Grande do Sul.

TABLE 2: Logistic regression parameters and variance components model fitted to describe diameter growth of *Podocarpus lambertii* trees from two regions in Rio Grande do Sul.

Efeitos	Modelo Logístico	
	Coeficiente (EP)	p
<u>Efeito fixo:</u>		
β_0	36,8250 (3,69)	<0,0001
β_1	10,4196 (0,23)	<0,0001
β_2	0,04268 (0,0009)	<0,0001
<u>Região:</u>		
u_{sf}	10,6562	0,0459
u_{ss}	-9,6887	0,0321
	Variância (EP)	p
<u>Efeito aleatório:</u>		
Nível 1 resíduo (r_{ij})	1,0443 (0,06)	<0,0001
Nível 2 resíduos		
Assíntota (u_{0j})	219,33 (0,03)	<0,0001
Taxa crescimento (u_{2j})	0,00014 (0,00003)	0,0017

Em que: EP = erro padrão; p = probabilidade.

Assim, em média, o crescimento em diâmetro das árvores de *Podocarpus lambertii* avaliadas na região da Depressão Central apresentou um ritmo menor do que na a região de Campos de Cima da Serra, representando tendências diferentes. Árvores amostradas em São Francisco de Paula (Campos de Cima da Serra) cresceram em ritmo mais acelerado, conforme Figura 1. Isto comprova a diferença da capacidade produtiva do sítio e justifica a inclusão do efeito aleatório para responder a esta diferença.

Partindo do ponto em que o parâmetro β_0 define o máximo valor possível do diâmetro, em determinadas situações, é possível mensurar a capacidade produtiva do sítio ou região avaliada (RICHARDS, 1959). Assim, para a região de Campos de Cima da Serra, a assíntota estimada para o diâmetro foi de 46,6 cm, culminando a maior taxa de crescimento aos 74 anos de idade. Já para a região da Depressão Central, foi de 26,3 cm com a taxa culminando aos 70 anos.

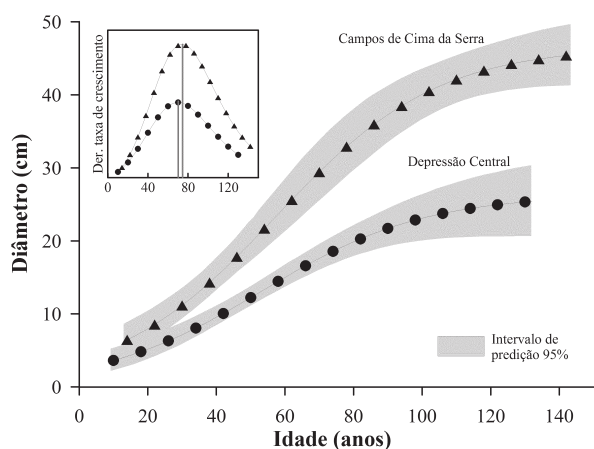


FIGURA 1: Crescimento em diâmetro e comportamento da taxa de crescimento (gráfico inserido) em função da idade para *Podocarpus lambertii*.

FIGURE 1: Diameter growth and growth rate (insertion) as a function of age for *Podocarpus lambertii* trees.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo, realizado com dados de *Podocarpus lambertii* dos Campos de Cima da Serra e da Depressão Central, permitiram concluir que o crescimento em diâmetro de árvores, quando comparado entre as duas localidades, apresentou uma tendência diferente a partir dos 70 anos, momento em que as árvores apresentaram o mesmo diâmetro de 21 cm, sendo

que, as árvores que crescem nos Campos de Cima da Serra tendem a um ritmo mais acelerado quando comparadas ao desenvolvimento na Depressão Central.

A inclusão do efeito aleatório foi decisiva para diminuir o erro associado às medições retrospectivas do crescimento em diâmetro, tendo aumentado a acurácia dos testes e estimações para os efeitos fixos, revelando que a maior fonte de variação esteve associada às regiões onde crescem as árvores de *Podocarpus lambertii*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEMDAG, I. S. National side-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canadá. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 21, n. 10, p. 1466-1474, 1991.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa nacional de florestas: políticas públicas para o setor florestal – linhas de crédito**. Piracicaba: ESALQ, 2006. 67 p. Disponível em: <<http://www.tume.esalq.usp.br/simp/arquivos/mma.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2006.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas; Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 1039 p. v. 1.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**, New York: John Wiley and Sons, 1981. 709 p.
- FEKEDULEGN, D.; SIURTAİN, M. P.; COLBERT, J. J. Parameter Estimation of Nonlinear Growth Models in Forestry. **Silva Fennica, Vantaa**, v. 33, p. 327-336, 1999.
- IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual técnico da vegetação brasileira (Série: Manuais técnicos em geociências n. 1). Rio de Janeiro, 1992.
- MAIXNER, A. E.; FERREIRA, L. A. B. Contribuição ao estudo das essências florestais e frutíferas nativas no Estado do Rio Grande do Sul. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, n. 18, p. 3-20, 1976.
- REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. Projeto madeira do Rio Grande do Sul. **Sellowia**, Itajaí, v. 34/35, n. 35, p. 1-525, 1983.
- RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 10, n. 2, p. 290-301, 1959.
- SAS/STAT. SAS Institute Inc., Cary, NC, 2007.

SCHNEIDER, P. R. **Anatro**: programa de computador, ambiente MS-DOS. Santa Maria: [s.n.], 1984.

SEBER, G. A. F.; WILD, C. J. **Nonlinear Regression**. New York: Wiley, 1989.

VANCLAY, J. K.; SKOVSGAARD, J. P. Evaluating forest growth models, **Ecological Modeling**, v. 98, p. 1-12, 1997.

ZEIDE, B. Intrinsic units in growth modeling. **Ecological Modelling**, v.175, p.249-259. 2004.

ZHAO, D.; WILSON, M.; BORDERS, B. E. Modeling response curves and testing treatment effects in repeated measures experiments: a multilevel nonlinear mixed-effects model approach. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v. 132, p. 122-132, 2005.