



## IMPACTO DA INCLUSÃO DO EFEITO ALEATÓRIO NA PREDIÇÃO DO AFILAMENTO DE ÁRVORES DE *Pinus taeda* L.

Ximena Mendes de Oliveira<sup>1</sup>, Rafaella Carvalho Mayrinck<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR (ximena@unicentro.br); <sup>2</sup>Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva, Itapeva, SP.

**RESUMO:** O objetivo do estudo foi verificar se a inclusão do efeito aleatório em nível de árvore individual é eficaz para reduzir o erro nas estimativas de diâmetros ao longo do fuste. Foram utilizados dados de cubagem indireta de 60 árvores de *Pinus taeda*, plantadas nos espaçamentos 3 m x 2 m e 4 m x 2 m, no município de Irati, Paraná. O modelo exponencial de Kozak (1988) foi ajustado pela abordagem fixa (1) e mista (2). Na abordagem mista, foi considerado a inclusão de um efeito aleatório em nível de árvore individual no intercepto do modelo. A avaliação dos ajustes foi realizada pelas estatísticas RMSE, MAE, T, AIC e BIC e por gráficos 1:1. A abordagem mista apresentou redução do erro em todas as estatísticas avaliadas e nos gráficos 1:1. Concluiu-se que a inclusão do efeito aleatório no intercepto do modelo é eficiente na redução do erro das estimativas.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo misto, função de afilamento, modelo exponencial

### INTRODUÇÃO

O gênero *Pinus* é o segundo mais plantado no Brasil e o mais plantado no Paraná e Santa Catarina (IBÁ, 2020). Entre as principais destinações da madeira, estão a construção civil, a movelaria e a produção de painéis, justificando a importância de conhecer o afilamento das árvores para estimar o sortimento em produtos ao longo dos fustes (SERPE et al., 2018).

O afilamento é a taxa de decréscimo do diâmetro que ocorre da base ao topo da árvore e pode ser estimado por funções de afilamento. Embora o polinômio de quinto grau seja muito difundido no Brasil (SCOLFORO et al., 2018), Liu et al. (2020) referem-se ao modelo exponencial de Kozak (1988) como o mais estudado em escala mundial, apresentando acurácia nas estimativas. Assim, o modelo de Kozak (1988) foi selecionado para este estudo.

A forma de ajuste do modelo pode variar de acordo com os efeitos empregados aos coeficientes. A abordagem de ajuste com efeitos fixos é amplamente aplicada para modelar o afilamento (NICOLETTI et al., 2020; SILVA et al., 2018). No entanto, para melhorar a acurácia das estimativas, a abordagem de ajuste com efeitos mistos (fixos e aleatórios) vem



sendo testada em diferentes modelos e diferentes coeficientes aleatorizados (SCOLFORO et al., 2018).

Nesse contexto, este estudo foi desenvolvido com objetivo de testar se a inclusão de um efeito aleatório (em nível de árvore individual) no modelo exponencial de Kozak (1988) é eficaz para obter estimativas mais acuradas de diâmetros ao longo do fuste de árvores de *Pinus taeda*.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada em Irati, Paraná (25°27'56'' de latitude S e 50°37'51'' de longitude O). Os dados foram coletados de árvores de *Pinus taeda* com 17 anos de idade, dispostas em dois talhões: talhão 1 - espaçamento 3 m x 2 m e área de 0,76 ha; talhão 2 - espaçamento de 4 m x 2 m e área de 1,12 ha. O clima da região é o temperado úmido com verão temperado (Cfb), caracterizado por ausência de estação seca (ALVARES et al., 2013).

Dados do inventário florestal foram usados para conhecer a distribuição diamétrica e, a partir disso, árvores foram cubadas uniformemente em classes diamétricas com amplitude de 4 cm. Foram cubadas 30 árvores por talhão, totalizando 60 árvores na base de dados.

A cubagem foi realizada de forma indireta com o Criterion RD 1000. Para calibração, foi adotada a mensuração direta com a suta, de forma simultânea, para medir os diâmetros no fuste nas alturas de 0,2 m; 0,5 m; 0,7 m; 1,0 m; 1,3 m e 2 m. Acima de 2 m, os diâmetros foram mensurados a cada 1 m até a altura comercial somente de forma indireta.

O modelo exponencial de Kozak (1988) foi utilizado para prever diâmetros ao longo dos fustes das árvores. Duas abordagens de ajuste foram consideradas: a) ajuste do modelo com efeitos fixos (1) e b) ajuste do modelo com efeitos mistos (2):

$$di = a_0 dap^{a_1} a_2^{dap} x^{\left[\beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{dap}{ht}\right)\right]} \quad (1)$$

$$di = (a_0 + c_0) dap^{a_1} a_2^{dap} x^{\left[\beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{dap}{ht}\right)\right]} \quad (2)$$

Em que  $a_{i/s}$  e  $\beta_{i/s}$  são os coeficientes de efeitos fixos;  $c_0$  é o coeficiente de efeito aleatório em nível de árvore individual;  $di$  é o diâmetro (cm) localizado em diferentes alturas ao longo do fuste;  $dap$  é o diâmetro à altura de 1,3 m do solo;  $x = \left[\frac{(1 - \sqrt{hi/ht})}{(1 - \sqrt{1,3/ht})}\right]$ ;  $hi$  é a altura (m) ao longo do fuste;  $ht$  é a altura total (m) da árvore;  $z = hi/ht$ ;  $\ln$  é o logaritmo neperiano;  $\exp$  é o exponencial.

O processamento foi realizado no *software* R (R Core Team, 2021). Os pacotes *ggplot2* (WICKHAM, 2016) e *nlme* (PINHEIRO et al., 2016) foram utilizados. Os ajustes



foram avaliados pela raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE), desvio (T), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação Bayesiana (BIC) e gráficos 1:1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as duas abordagens (1) e (2), o coeficiente  $\beta_4$  foi não significativo (valor de p superior a 0,05) e, portanto, foi removido e o ajuste foi realizado novamente. Os demais coeficientes fixos foram significativos para um  $\alpha = 5\%$  e estão representados na Tabela 1. O coeficiente aleatório variou de -0,0254 a 0,0177.

Tabela 1 – Coeficientes fixos do modelo de kozak (1988) ajustado pela abordagem fixa (1) e abordagem mista (2).

Ajuste	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_5$
(1)	0,8332	1,0792	0,9972	0,8239	-0,2254	0,1155	-0,0484
(2)	0,6999	1,1565	0,9940	0,7760	-0,2259	0,1230	-0,0501

A inclusão do efeito aleatório no intercepto do modelo resultou na redução do erro para todas as estatísticas avaliadas (Tabela 2). Resultado equivalente foi observado no gráfico 1:1 (Figura 1), com a maior proximidade dos pontos à linha diagonal no ajuste (2).

Tabela 2 – Estatísticas de avaliação aplicadas ao modelo de kozak (1988) ajustado pela abordagem fixa (1) e abordagem mista (2).

Ajuste	RMSE	MAE	T	AIC	BIC
(1)	0,8236	0,6022	0,5819	1899,814	1936,975
(2)	0,7422	0,5616	0,1738	1800,356	1842,162

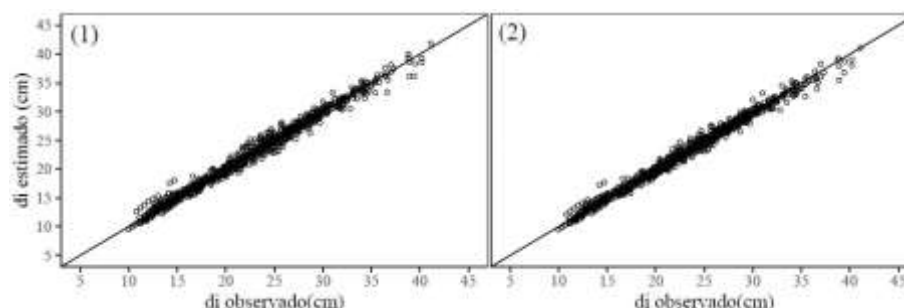


Figura 1 – Gráficos 1:1 das estimativas do modelo de kozak (1988) ajustado pela abordagem fixa (1) e abordagem mista (2).

Similarmente, Scolforo et al. (2018) concluíram que a abordagem mista propicia estimativas mais acuradas e generalistas para dados de eucalipto de diferentes famílias



genéticas e regiões do Brasil. Santos et al. (2021), utilizando dados de *Pinus taeda* também verificaram aumento da acurácia das estimativas ao inserir efeitos aleatórios. Liu et al. (2020) concluíram que a modelagem mista oferece aumento da acurácia das estimativas do afilamento de árvores de *Larix gmelinii* e que, além disso, é viável analisar a inclusão de variáveis auxiliares explicativas.

## CONCLUSÃO

A inserção do efeito aleatório em nível de árvore individual é eficaz no aumento da acurácia das estimativas de diâmetros ao longo do fuste das árvores. Essa abordagem é promissora e pode ser testada considerando outros modelos de afilamento e variações na base de dados, como outras espécies, espaçamentos e idades.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **IBÁ**. Relatório da IBÁ 2020, ano base 2019.
- KOZAK, A. Effects of upper stem measurements on the predictive ability of a variable exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 28, p. 1078–1083, 1988.
- LIU Y. *et al.* Tree profile equations are significantly improved when adding tree age and stocking degree: an example for *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. **European Journal of Forest Research**, v. 139, n. 3, p. 443-458, 2020.
- NICOLETTI *et al.* Equações hipsométricas, volumétricas e funções de afilamento para *Pinus* spp. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 4, p. 474-482, 2020.
- PINHEIRO J. *et al.* R Core Team. **nlme**: Linear and nonlinear mixed effects models. 2016.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021.
- SANTOS, G.M. *et al.* Modelagem mista generalizada para estimar afilamento do fuste de árvores de *Pinus taeda* em diferentes espaçamentos de plantio. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 1, p. 1261-1269, 2021.
- SCOLFORO, H. F. *et al.* Comparison of taper functions applied to eucalypts of varying genetics in Brazil: Application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 1, p. cjfr-2017-0366, 2018.
- SERPE, E.L. *et al.* Impacto volumétrico e econômico para diferentes sortimentos em toras de *Pinus*. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3 n. 1, p. 199-203, 2018.
- SILVA, S.A. *et al.* Funções de afilamento para *Pinus elliottii* Engelm. proveniente de condução de regeneração natural. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3 n. 1 p. 130-136, 2018.
- WICKHAM H. **ggplot2**: Elegant graphics for data analysis. 2016.