

**MODELAGEM DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO RENDIMENTO PRODUTIVO DE
Pinus taeda L. COM USO DA GEOESTATÍSTICA****Itamar Antonio Bognola¹, Antonio Rioyei Higa², Lorena Stolle³, Edilson Batista de
Oliveira⁴, Luziane Franciscon⁵**

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Silvicultura, Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira, Km 111, CEP: 83411-000, iabog@cnpf.embrapa.br

² Engenheiro Florestal, Professor Universidade Federal do Paraná/Departamento de Engenharia Florestal, higa@ufpr.br

³ Engenheiro Florestal, M.Sc., Autônoma, lorenastolle@yahoo.com.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Silvicultura, Embrapa Florestas, edilson@cnpf.embrapa.br

⁵ Estatístico, M.Sc., Embrapa Florestas, luziane@cnpf.embrapa.br

Resumo - O objetivo desse estudo foi avaliar a variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. associando-o com o índice de sítio para a idade de 15 anos e de propriedades do solo obtidas de um mapeamento detalhado de solos, na escala 1:10.000, em uma área localizada no município de Rio Negrinho, estado de Santa Catarina. Os dados dendrométricos para a realização desse estudo, coletados em parcelas de inventário florestal contínuo, foram obtidos de um povoamento com área de 2252,11 ha. Os dados foram analisados através de métodos geoestatísticos, modelo exponencial e interpolação espacial por cokrigagem para construção de um mapa que descreva o rendimento na região. Através do mapa construído foi possível visualizar o excelente grau da relação entre os dados do índice de sítio médio com o mapa das unidades de manejo para o *P. taeda* obtido através do modelo geoestatístico.

Palavras-chave: mapa de rendimento; índice de sítio; cokrigagem.

SPATIAL VARIABILITY MODELING OF *Pinus taeda* L. YIELD USING GEOSTATISTICS

Abstract - The aim of this study was to assess the spatial variability of yield production of *Loblolly Pine* *Linnaeus* associating it with the site index for age 15 and soil properties obtained from a detailed mapping of soils at 1:10.000 scale in an area located in Rio Negrinho, state of Santa Catarina. Dendrometric data for this study were collected in continuous forest inventory plots were obtained from a population with an area of 2252,11 ha. Data were analyzed using geostatistical methods, exponential models and spatial interpolation by co-kriging for construction of a map describing the yield in the region. Through the constructed map it was possible to view the excellent level of relations between the data of the site index and a map of management units for *Loblolly Pine Linnaeus* obtained through the geostatistical model.

Key words: statement of income; site index; co-kriging.

Introdução

A obtenção de informações precisas e a baixo custo da produção florestal é o desejável para todo empreendimento florestal. Uma alternativa refere-se à utilização de um método estatístico-espacial que explore adequadamente as relações existentes entre as unidades amostrais com base em sua localização. A modelagem espacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial de atributos de interesse espacialmente distribuídos e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados. Avaliar essa variabilidade faz da geoestatística uma eficiente ferramenta de suporte à decisão no manejo de solo e água das espécies florestais. As intervenções para corrigir variações indesejáveis da oferta de nutrientes e água passam a ser balizadas por mapas de isovalores das variáveis de interesse (BOLFE; GOMES, 2007). Mello et al. (2004; 2006) discutem o uso de geoestatística, opções de modelagem e seleção de modelos e métodos para avaliação de inventários florestais em área de eucalipto, adotando, em todos os casos, modelos geoestatísticos univariados.

Os métodos tradicionais de estatística, utilizados para análise do crescimento da floresta, geralmente utilizam uma medida central (média) e uma de dispersão (variância) para descrever um determinado fenômeno, sem levar em consideração, as possíveis correlações entre as observações vizinhas (MELLO,

2004). Vários trabalhos empregando técnicas da geoestatística têm mostrado que a variabilidade do solo não é aleatória e apresenta dependência espacial (WEBSTER, 1985; VILORIA, 1989; VIEIRA; MARIA, 1996; COUTO; KLAMT, 1999).

Os métodos geoestatísticos podem avaliar melhor as estruturas de dependência espacial entre as características dendrométricas de uma espécie e as variáveis do seu meio físico, ou seja, obter resultados que sejam capazes de explorar adequadamente as relações espaciais existentes entre os dados dendrométricos e o meio abiótico. Isso é de fundamental importância para o inventário, o manejo e o planejamento florestal.

O objetivo desse estudo foi avaliar a variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. associando-o com o índice de sítio para a idade de 15 anos (IS₁₅) e de propriedades do solo, com isso obter um mapa que especializasse o comportamento da variável de interesse, através de predições em locais não amostrados.

Material e Métodos

Este trabalho é parte da tese de doutorado do primeiro autor (BOGNOLA, 2007). Foram coletados dados em parcelas de inventário florestal contínuo (PIFC's), com área de 500 m² e espaçamento entre árvores de 2,80 x 2,80 m. As medidas de crescimento de *P. taeda* constam de cinco idades diferentes (11 a 15 anos), obtidas junto ao Setor de Inventário da Battistella Florestal, em função de variáveis do tipo de solo e de sua caracterização física, físico-hídrica e química, através de coletas deformadas e não deformadas de amostras nas profundidades de 0–20 cm e 30–50 cm para todas as parcelas de inventário estudadas; além da caracterização do espaço físico quanto aos aspectos de relevo, geologia e fisiografia. As variáveis foram estabelecidas a partir do levantamento de solos detalhados de uma área-piloto, além das avaliações químicas, físicas, físico-hídricas e morfológicas de perfis de solos, utilizando-se duas profundidades de coletas comuns (0-20 e 30-50 cm). A variável utilizada para caracterizar a qualidade do sítio de cada povoamento foi o Índice de Sítio (IS) dado pela altura dominante (HDOM) aos 15 anos de idade. Como as idades de medições dos povoamentos variaram de 11 a 15 anos, todas as alturas dominantes foram projetadas para 15 anos de idade através da Equação (1), disponível no software "Sispinus" (OLIVEIRA, 1995), dada por:

$$IS = HDOM \times e^{4,6433 [(1/I)^{0,56} - 0,2195]} \quad (1)$$

As análises de estatística multivariada foram realizadas através do software do sistema estatístico SAS[®] *Statistical Analysis System* (SAS Institute Inc., 1996), licenciado para a Embrapa Florestas.

Quanto às análises geoestatísticas, a idéia central foi de se obter mapas para representar o comportamento da variável de interesse, através de predições em locais não amostrados. A estimativa da variável de interesse, neste caso, foi a do Índice de Sítio (IS) para *P. taeda*, a partir de variáveis suportes feita pelo método da cokrigagem multivariada.

Segundo Diggle e Ribeiro Jr. (2007), o formato básico dos dados geoestatísticos multivariados é dado por (x, y) , onde x é o conjunto de n coordenadas amostrais na área de um espaço bidimensional e y indica uma medida escalar (caso univariado) ou vetorial (caso multivariado) tomada em cada coordenada x . Esse conjunto de medidas representa um número finito de observações de uma realização de um processo estocástico gaussiano $S(x)$ desconhecido. Dessa forma, a variável aleatória observável Y , que irá depender da localização x , foi modelada como: $Y(x_i) = \mu(x_i) + S(x_i) + \delta_i$, $i: 1, 2, \dots, n$. $Y(x_i) \sim N(\mu(x_i), \tau^2)$ e $\mu(x_i)$ é uma tendência espacial externa ao processo. Para modelos com média constante $\mu(x_i) = \mu$, o processo é definido como estacionário na média. $S(x_i)$ é um processo gaussiano multivariado com média zero e variância σ^2 e função de correlação que caracteriza o processo, e os $\delta_i \sim N(0, \tau^2)$ são os erros aleatórios independentes (BOGNOLA et al., 2007).

Resultados e Discussão

Nos resultados obtidos pela estatística multivariada através da técnica de componentes principais (CP), somente os cinco primeiros componentes apresentaram autovalores superiores a 1 e, ao mesmo tempo, ajudaram a explicar 90% da variância total. No entanto, pela limitação do uso de apenas três variáveis ou grupo de componentes principais do software ArcGis 9.1, para o método da cokrigagem multivariada, tem-se 72% de percentual da variância total acumulada associada até o terceiro componente principal (CP₁ a CP₃), o que mostra uma tendência de estimativa promissora, via cokrigagem multivariada, do IS₁₅ nos locais não amostrados.

Para o método aplicado, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou ao semivariograma experimental. As análises dos resíduos revelaram distribuição normal homocedástica pelo teste de Shapiro-Wilk ($w = 0,953$; $p\text{-valor} = 0,480$), indicando um ajuste adequado do modelo. Este conjunto de componentes principais que ajudam a explicar 72,2% da variância total na área do presente estudo proporciona ótima estimativa do Índice de Sítio nos locais não amostrados da presente área de estudo.

Os ajustes dos parâmetros estão apresentados na Tabela 1. Para verificar o grau de dependência espacial, entre as características, utilizou-se da relação entre a variação estruturada e o patamar (DE%). Essa relação foi relatada em trabalhos desenvolvidos por Biondi et al. (1994) e também por Mello (2004). O Índice de Sítio (IS₁₅) em função dos componentes principais "CP₁", "CP₂" e "CP₃", apresentou forte dependência espacial (DE%), com percentual da ordem de 80%. Na classificação de Cambardella et al. (1994), que trabalharam com atributos do solo, quando a relação for maior ou igual a 75%, diz-se que há uma forte dependência espacial. O fato do IS₁₅ ter apresentado forte correlação espacial é um ótimo indicativo do potencial da técnica de cokrigagem ordinária multivariada na definição das unidades de manejo para *P. taeda* (UM's). Na prática o alcance é três vezes o seu valor definido, ou seja, é de 21336 metros.

Tabela 1. Estimativa dos parâmetros do modelo exponencial ajustado à estrutura de correlação espacial da variável "IS₁₅" em função de três componentes principais

Variável	Nº Obs.	τ^2	σ^2	$(\tau^2 + \sigma^2)$	\emptyset (m)	DE (%)
IS ₁₅ = f(CP ₁ , CP ₂ , CP ₃)	18	0,5519	2,168	2,720	7.112,0	79,7

Através da interpolação espacial por cokrigagem foi possível obter uma malha de pontos interpolados que permitiu visualizar o comportamento do IS₁₅, um importante recurso para se definir a espacialização de quatro unidades de manejo (UM's) diferenciadas para o *P. taeda* (Figura 1).

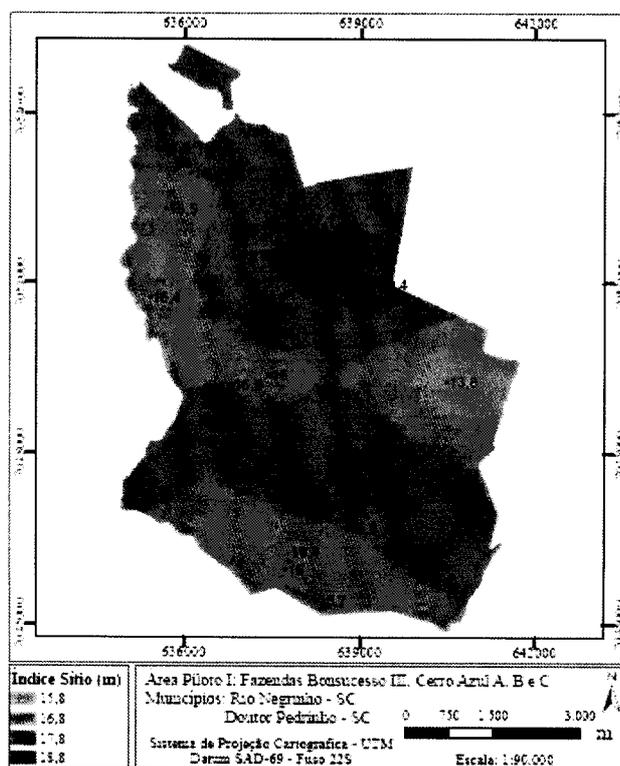


Figura 1. Mapa de distribuição espacial do "índice de sítio médio, IS₁₅" obtido pela equação do programa "Sispinus" com o "IS₁₅" predito por cokrigagem multivariada ordinária, utilizando-se de variáveis do meio físico, na área piloto nº 1, em Rio Negrinho, SC.

Na Figura 1 pode-se verificar, pelos pontos plotados, o excelente grau da relação entre os dados dos IS₁₅ - determinada via equação do Sispinus (OLIVEIRA, 1995), com o mapa das UM's para o *P. taeda* obtido através do modelo exponencial geoestatístico.

Conclusão

O desenvolvimento deste trabalho permitiu verificar que o índice de sítio médio (IS₁₅) apresentou-se estruturado espacialmente. Esse resultado sugere que, no processamento do inventário florestal, na presença de estrutura de continuidade espacial, as parcelas (unidades amostrais) não devem ser tratadas de forma independente.

Através do mapa construído foi possível visualizar o excelente grau da relação entre os dados do índice de sítio médio com o mapa das unidades de manejo para o *P. taeda* obtido através do modelo exponencial geoestatístico. Sendo assim, os levantamentos dos dados dendrométricos de uma floresta podem ser facilitados por estas ferramentas geoestatísticas e, até mesmo, contribuir para um menor custo na coleta das informações dos inventários florestais contínuos ou de pré-cortes.

Referências

- BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere**, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, 1994.
- BOGNOLA, I. A. **Unidades de manejo para *Pinus taeda* L. no planalto norte catarinense, com base em características do meio físico**. 2007. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR.
- BOLFE, E. L.; GOMES, J. B. V. **Geoestatística como subsídio à implantação de agricultura de precisão**. [on line]. Disponível em: <<http://www.agronline.com.br/artigos/artigo.php?id=210>>. Acesso em 23/11/2006.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. of Am. J.**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- MELLO, J. M. de. **Geoestatística aplicada ao inventário florestal**. 2004. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor Ciências Agrárias, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ-USP), Piracicaba, SP.
- MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. ; BATISTA, J. L. F. ; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. ; KANEGAE JUNIOR, H. **Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão**. *Floresta*, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251-260, maio/ago. 2006.
- OLIVEIRA, E.B. **Um sistema computadorizado para prognose do crescimento e produção do *P. taeda* L., como critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 1995. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM (SAS). 1996. **SAS/STAT Software: Changes and Enhancements through Release 6.11**. SAS Inst. Inc., Cary, NC.
- VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and meteorological paramaters. In: ALVAREZ V.H. *Tópicos em Ciência do Solo II*. Viçosa - MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.2, p.1-45, 2002.