

Desempenho da co-krigagem integrada com estatística multivariada e geoprocessamento, na definição de unidades de manejo florestal

Itamar Antonio Bognola¹
Christel Lingnau²
Osmir José Lavoranti¹
Lorena Stolle³
Antonio Rioyei Higa²
Edílson Batista de Oliveira¹

¹ Embrapa Florestas
Caixa Postal 319 - 83400-000 - Colombo - PR, Brasil
{iabog, osmir, edilson}@cnpf.embrapa.br

² Universidade Federal do Paraná - UFPR
80210-170 - Curitiba - PR, Brasil
{lingnau, higa}@ufpr.br

³ Engenheira Florestal, M.Sc., Autônoma
Curitiba - PR, Brasil
lorenastolle@yahoo.com.br

Abstract. The objective of this study was to assess spatial variability of *Loblolly Pine* Linnaeus in properties function of the soil obtained from a detailed mapping, in the scale 1:10.000, in an area of the Forest company – Battistella, located in the Rio Negrinho municipal district, state of Santa Catarina. In precision silviculture management principles must be adapted to the field variability. This requires efficient techniques to estimate and map the spatial and/or temporary variability of attributes of the soil for “management unit’s” definition. However, the determination of some variables that characterize the properties of a particular soil is often onerous. In these situations it is interesting to estimate such variables as a function of others that present good space correlation with the former and are of simple determination. This is possible by a cross-semivariogram. The interpolator that uses the cross-semivariogram in modeling is called co-kriging. The aim of this study was to test the co-kriging method for estimating “management unit’s” related to soil properties by means of statistical techniques multivariate and by geostatistical. Results showed these “management unit’s” can be estimated with high precision by co-kriging. It also got evident the importance of if ally technical multivariate with geostatistical and geoprocessing in the definition of the “Management Unit’s” for loblolly pine.

Palavras-chave: space variability; precision silviculture; geoprocessing; geostatistical; variabilidade espacial, silvicultura de precisão, geoprocessamento, geoestatística.

1. 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. 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). Portanto, estes métodos não exploram suficientemente as relações que possam existir entre as unidades amostrais. Já os métodos de estatística multivariada (LAVORANTI, 2005) aliados com os métodos geoestatísticos, tais como o uso da técnica de co-krigagem, podem explicar melhor estas relações, pois analisam as variáveis explicativas de modo integrado e consideram a

dependência espacial existente entre as amostras no processo estimativo de uma variável, respectivamente.

Vários trabalhos demonstram, desde a muito tempo, que a variabilidade das propriedades do solo é espacialmente dependente (KRIGE, 1966; MATHERON, 1971; TRANGMAR et al., 1985; VIEIRA et al., 2002; MELLO et al., 2006), ou seja, num certo domínio a diferença dos valores de determinada propriedade pode ser expressa como uma função da distância de separação dos pontos mensurados. Portanto, quando uma propriedade do solo varia de um local para outro com algum grau de continuidade, expresso pela dependência espacial, a geoestatística permite uma visão espacial útil ao planejamento e ao controle das informações de produção da espécie florestal de interesse.

A modelagem geoespacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados. Acessar essa variabilidade faz da geoestatística uma eficiente ferramenta de suporte a decisão no manejo de solo das espécies florestais.

Segundo Bolfe e Gomes (2006), devem-se analisar e planejar o número de coletas de dados, através do custo/benefício, pois um grande número de pontos amostrais aumenta o custo da operação e pode inviabilizar a implantação do processo. Os métodos geoestatísticos de interpolação, em especial o da co-krigagem, apresentam propriedades ótimas de estimativas em dados esparsos. Para a aplicação das técnicas de geoestatística, necessita-se, primeiramente, detalhar a área onde será implantado o estudo. Esse processo é viabilizado pela implantação de um sistema de coordenadas locais ou geográficas, onde cada atributo ou característica do solo terá suas informações quantitativas e/ou qualitativas (relevo, granulometria, textura, teor de argila, acidez, matéria orgânica etc.) associados a um ponto no espaço. Essas informações podem ser obtidas por meio de coleta in loco, mapas temáticos, imagens de satélite ou fotografias aéreas. Para referenciar essas informações utiliza-se o GPS (Sistema de Posicionamento Global), ou de forma mais simplificada através da topografia convencional, obtendo coordenadas locais.

Em etapa posterior, utilizam-se os SIG's (Sistemas de Informações Geográficas) para processar e fornecer as informações da variabilidade espacial dos atributos do solo (variáveis independentes – X) e suas inter-relações com os aspectos de produtividade (variáveis dependentes – Y) da espécie florestal de interesse. Os SIG's realizam funções de análises espaciais baseados nos atributos das entidades gráficas armazenadas na base de dados e a partir de módulos específicos, geram um conjunto de dados estimados (semivariograma), utilizando-se dos pontos (X_i , Y_i , Z_i , $i=1,2,3,...n$) amostrados nos pontos de coleta da informação, em que as variáveis X e Y representaram a posição desses pontos (coordenadas geográficas ou locais) e a variável Z, os atributos do solo, estimando o valor dos parâmetros nos locais não amostrados (VIEIRA et al., 2002).

Dentro deste contexto, o objetivo desse estudo foi o de avaliar a variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. em função de propriedades do solo por meio de geoprocessamento integrado com estatística multivariada e com geoestatística, através da técnica de co-krigagem. Este trabalho é parte da tese de doutorado do primeiro autor (BOGNOLA, 2007).

2. Metodologia de Trabalho

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 estatísticas 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 o de se obter mapas que espacializassem o comportamento de uma 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 co-krigagem multivariada onde se procurou selecionar as variáveis explicativas que se destacaram nas análises estatísticas multivariadas obtidas pelas Análises de Componentes Principais e de Fatores utilizando-se para isto, o método de interpolação de dados por co-krigagem ordinária multivariada, sendo que, neste caso, a análise exploratória de dados e a cartografia elaborada foram realizadas no software ArcView 9.1 com a extensão *Geostatistical Analyst*.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos pela estatística multivariada através da técnica de componentes principais (cp) com seus autovalores, os quais apresentaram percentuais de variância da ordem de 8,13% a 43,92%. 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 co-krigagem 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 co-krigagem multivariada, do IS₁₅ nos locais não amostrados.

Tabela 1. Autovalores (λ) de cinco componentes principais (CP) extraídas da matriz de correlação das variáveis explicativas (independentes) obtidas da análise de regressão linear múltipla, percentuais das variâncias associadas do primeiro ao quinto componente principal, e percentuais das variâncias acumuladas

CP	Autovalores (λ)	% Variância da CP	% Var. Acumulada
CP ₁	5,7090	43,92	43,92
CP ₂	2,2998	17,69	61,61
CP ₃	1,3775	10,60	72,21
CP ₄	1,1915	9,17	81,38
CP ₅	1,0566	8,13	89,51

Para o método aplicado, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou ao semivariograma experimental. Os ajustes dos parâmetros estão apresentados na Tabela 2. 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). Ainda, pela Tabela 2, verificou-se que o Índice de Sítio (IS₁₅) em função dos componentes principais “CP₁”, “CP₂” e “CP₃”, apresentou uma 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. Isto mostra que houve uma ótima estimativa, nos locais não amostrados, do IS₁₅ com o modelo exponencial. O fato do IS₁₅ ter apresentado forte correlação espacial é um ótimo indicativo do potencial da técnica de co-krigagem ordinária multivariada na definição das unidades de manejo para *P. taeda* (UM's). O diâmetro de alcance por volta de 7.112 m é chamado de alcance teórico, uma vez que este parâmetro no modelo exponencial é considerado infinito (JOURNAL e HUIJBREGTS, 1978).

Tabela 2. Estimativa dos parâmetros “efeito pepita (τ^2), variação estruturada (σ^2), patamar ($\tau^2 + \sigma^2$), alcance (\emptyset) e relação variação estruturada/patamar (DE %) 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

Desta forma, com os resultados alcançados do modelo exponencial, foi possível obter uma malha de pontos interpolados que permitiu visualizar o comportamento do IS₁₅, estimado via componentes principais, por meio de isolinhas ou contorno e ou superfícies contínuas, recursos importantes para se definir a espacialização de quatro unidades de manejo (UM's) diferenciadas para o *P. taeda* (Figura 1).

Nessa 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.

4. Conclusões

- A espacialização de valores preditos dos índices de sítio para o *P. taeda* através da relação deste índice com os três primeiros componentes principais, pelo método da co-krigagem multivariada, via modelo exponencial, resulta em estimativas médias adequadas com explicação de 72,2% da variância total.
- O alcance espacial médio de 3.600 m para a definição de classes de índices de sítio revela que, para distâncias superiores a este valor, os dados devem ser tratados como independentes. Este resultado sugere que as parcelas de inventário florestal para serem tratadas de forma dependentes espacialmente podem ser distanciadas umas das outras até esta distância definida.
- A integração de geoprocessamento com técnica geoestatística, através da co-krigagem ordinária multivariada, permite definir com boa precisão “Unidades de Manejo” para o *P. taeda*.

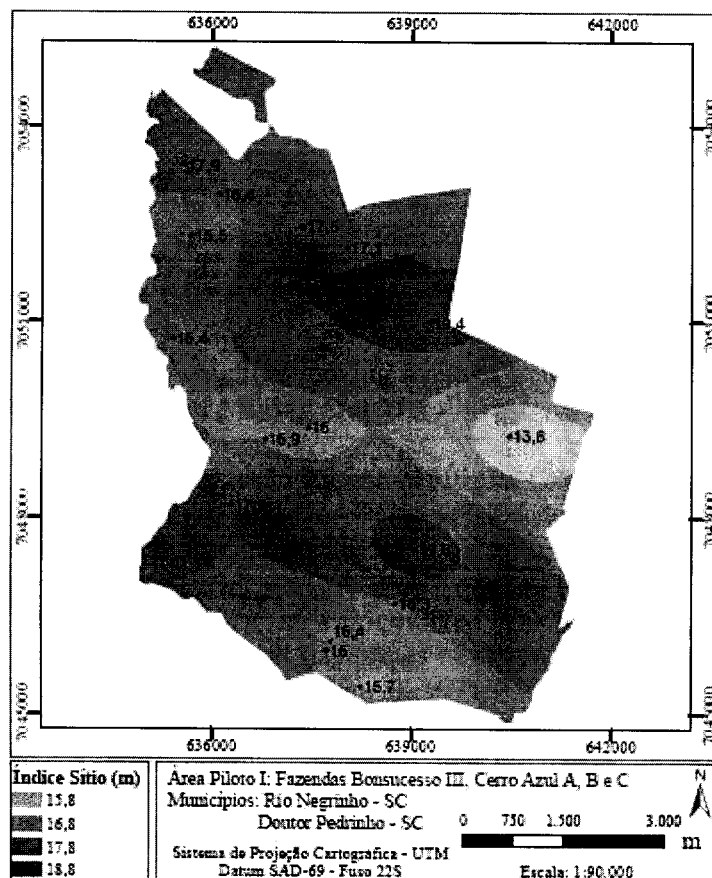


Figura 1. Mapa de distribuição espacial do “índice de sítio médio, IS₁₅” obtido pela equação do programa “Sispinus” com o “IS₁₅” predito por co-krigagem multivariada ordinária, utilizando-se de variáveis do meio físico, selecionadas por análise de regressão linear múltipla, na área piloto nº 1, em Rio Negrinho, SC.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao total apoio logístico e financeiro dado pela empresa Battistella Florestal para que este trabalho pudesse ser realizado.

Referências Bibliográficas

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.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600 p.

KRIGE, D.G. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore-evaluation. **Journal of the African Institute of Mining and Metallurgy**. v.66, p.13-38, 1966.

LAVORANTI, O.J. **Análise de Regressão Linear Múltipla**. Curitiba, 2005. 41 f. Apostila da Disciplina CE-216 do Curso de Pós-graduação - Setor de Ciências Exatas – Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

MATHERON, G. 1971. **The theory of regionalized variables and its applications**. Fontainebleau, École Nationale Supérieure des Mines de Paris. 211p. (Les Cahiers de Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 5). 1971.

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.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Academic Press, v.38, p.45-94. 1985.

VIEIRA, S.R.; MILLETE, J.; TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and meteorological parameters. In: ALVAREZ V.H. **Tópicos em Ciência do Solo II**. Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.1-45.