



**037 - ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO DE SÃO PAULO: COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO**

**JOSÉ R. P. DE CARVALHO<sup>1</sup>, EDUARDO D. ASSAD<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD em Estatística - Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, EMBRAPA, Campinas, SP, Caixa Postal 6041, CEP 13083-886, E-mail: jruy@cnptia.embrapa.br

<sup>2</sup> Dr em Hidrologia e Matemática - Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, EMBRAPA, Campinas, SP, Caixa Postal 6041, CEP 13083-886.

Escrito para apresentação no  
XXXII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2003  
Goiânia - GO, 28 de julho a 01 de agosto de 2003

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho é comparar os interpoladores univariados: inverso do quadrado da distância e krigagem ordinária usando observações de precipitação pluvial anual média de mil e vinte e sete estações climáticas abrangendo todo Estado de São Paulo, representando uma área de aproximadamente 248.808,8 km<sup>2</sup> (2,91% do território nacional), no período de 1957 a 1997. Os mapas de variabilidade espacial não apresentaram grandes diferenças visuais, entretanto quando a estatística do quadrado médio do erro foi calculada para cada técnica, confirmou-se a grande vantagem em usar o interpolador ótimo de krigagem. A diferença entre os valores observados e estimados pela krigagem foi muito menor, indicando ser este o interpolador a ser usado na distribuição espacial de precipitação anual para os dados em estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** krigagem ordinária, geoestatística, variabilidade espacial.

**SPATIAL ANALYSIS OF THE PRECIPITATION DATA IN THE STATE OF SÃO PAULO: COMPARATION OF INTERPOLATION METHODS**

**ABSTRACT:** The objective of this paper is to compare the univariate interpolation algorithms: inverse square distance and ordinary kriging using observations of annual precipitation average of thousand and twenty-seven climatic stations including all State of São Paulo, representing an area of approximately 248,808.8 km<sup>2</sup> (2,91% of the national territory), in the period from 1957 to 1997. The maps of spatial variability didn't present great visual differences, however when the comparison criterion, the mean square error of prediction was calculated for each technique, the great advantage was confirmed in using kriging interpolator. The difference among the observed and predicted values for the kriging it was much smaller, indicating to be this the interpolator to be used in the spatial distribution of annual precipitation for this data.

**KEYWORDS:** Ordinary kriging, geostatistic, spatial variability

**INTRODUÇÃO:** Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, estão disponíveis na literatura (GOOVAERTS, 1999; CARVALHO et al., 2002). Como os métodos de krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, ou seja, são estimadores ótimos, este trabalho irá avaliar a krigagem ordinária. Este método geoestatístico de interpolação é muito usado no estudo da distribuição espacial de precipitação pluviométrica. A correlação espacial entre observações vizinhas para predizer valores em locais não amostrados é o aspecto fundamental que diferencia os interpoladores geoestatísticos dos demais. O objetivo deste trabalho é apresentar um método de comparação de interpoladores univariados usados na obtenção da distribuição espacial da precipitação média anual para o Estado de São Paulo.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Para definir a metodologia de interpolação foram utilizadas mil e vinte e sete observações provenientes de estações climatológicas, representando todo o Estado. Para obtenção do estimador de krigagem ordinária, consideremos a situação de estimar o valor de um atributo contínuo  $z$  para qualquer local não amostrado  $u$ , usando os dados de  $z$  que foram amostrados na área de estudo  $A$ . Krigagem é um nome genérico adaptado pelos geostatísticos para a família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados (GOOVAERTS, 1997; CARVALHO & VIEIRA, 2001).

Na krigagem ordinária as flutuações locais da média são consideradas, limitando o domínio de sua estacionaridade para a vizinhança do local  $W(u)$ . A média é constante, mas desconhecida. O estimador linear é definido por:

$$Z^*_{OK}(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} OK(u) Z(u_{\alpha}) \text{ para } \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha} OK(u) = 1$$

Os  $n(u)$  pesos  $\lambda_{\alpha} OK(u)$  são determinados de tal maneira que a variância do erro seja mínima. O inverso do quadrado da distância é um interpolador de médias ponderadas que não é exato. Quando o ponto de uma malha é calculado, os pesos atribuídos aos pontos são fracionários, porém sua soma é um. Se qualquer observação é coincidente com um ponto da malha, a distância entre esta observação e o ponto é zero com peso um, enquanto para as demais observações o peso é zero. É muito usado em diversas situações por ser um método muito rápido de interpolação (ISAKS et al., 1989). Sua equação é dada por:

$$Z^*(u) = \left( \sum_{\alpha=1}^{n(u)} z(u_{\alpha}) / h_{\alpha}^2(u) \right) / \left( \sum_{\alpha=1}^{n(u)} 1 / h_{\alpha}^2(u) \right)$$

em que,  $h_{\alpha}$  é a distância entre os pares de observação  $n(u)$ . Para comparar os dois procedimentos de interpolação: inverso do quadrado da distância e krigagem ordinária, o método do Quadrado Médio do Erro - QME (ADDINK et al. 1999; PHILLIPS, et al. 1992) será calculado pela seguinte fórmula:

$$QME = \left\{ \sum_{\alpha=1}^{n(u)} (Z_{est,\alpha} - Z^*_{\alpha})^2 \right\} / n(u)$$

Os resultados obtidos para o quadrado médio do erro serão comparados e conclusões serão obtidas. O método que apresentar o menor quadrado médio residual será o método considerado como o mais eficiente.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Os dados anuais de precipitação são médias de 40 anos para o período de 1957 a 1997. Todas as análises foram realizadas nestas médias sem se preocupar com as flutuações anuais de um ano para o outro. O semivariograma experimental para precipitação anual é apresentado na Figura 1 sendo utilizado para avaliar a dependência espacial da variável em estudo. Visando tornar mais homogêneo os dados do litoral e do interior, a transformação de logaritmo neperiano foi usada.

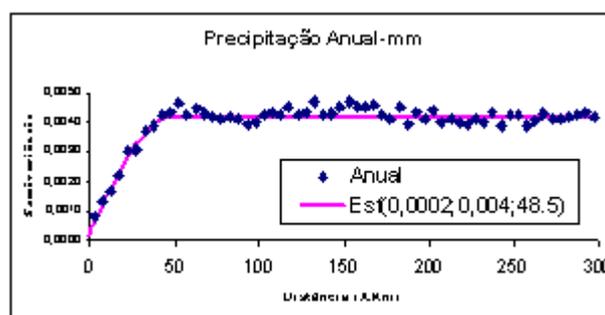


FIGURA 1 – Precipitação anual em mm. Modelo Esférico ajustado.

O grau de ajuste do modelo foi verificado através do coeficiente de determinação  $R^2 = 0,95$ , mostrando o quanto o modelo de regressão explica a variabilidade total da variável em estudo. A

validação desses modelos foi realizada através do procedimento de auto-validação "Jack-Knifing" (VIEIRA, 2000). O exame do semivariograma para precipitação anual, revela que existe dependência espacial, onde o efeito pepita é  $C_0=0,0002$  e o alcance  $a=48,5$  Km. O efeito pepita de 0,0002 significa que existe uma descontinuidade entre valores separados por distâncias menores do que o usado no intervalo de amostragem. A proporção deste valor para o patamar do semivariograma ( $C_0 + C_1$ ), no caso 4,76%, é um indicativo da quantidade de variação ao acaso de um ponto para outro, e quanto menor seu valor, mais parecidos são os valores vizinhos. O alcance (a) de 48,5 Km significa que todos os vizinhos dentro desse raio podem ser usados na estimativa de valores em espaçamentos mais próximos. A variável apresentou isotropia, ou seja, variabilidades idênticas independente da direção escolhida na área experimental. Como dependência espacial para a variável em estudo foi obtida, a krigagem ordinária foi usada para estimar valores em pontos não amostrados. Os valores obtidos através da krigagem são não viciados, têm variância mínima (VIEIRA, 2000; GOOVAERTS, 1997) e são ideais para a construção de mapas de isolinhas ou tridimensionais para verificação e interpretação da variabilidade espacial. As informações mostradas nestes gráficos de isolinhas são muito úteis para melhor entender a variabilidade das propriedades da precipitação pluvial e para identificar áreas que necessitam maiores ou menores cuidados, como pode ser visto na Figura 2, com as observações retransformadas para os padrões originais. A Figura 2 mostra uma faixa de alta precipitação pluviométrica no litoral do Estado. Os índices pluviométricos das estações localizadas no litoral, devido ao relevo da região, apresentam resultados que seguem uma ordem própria sendo discrepantes dos demais.

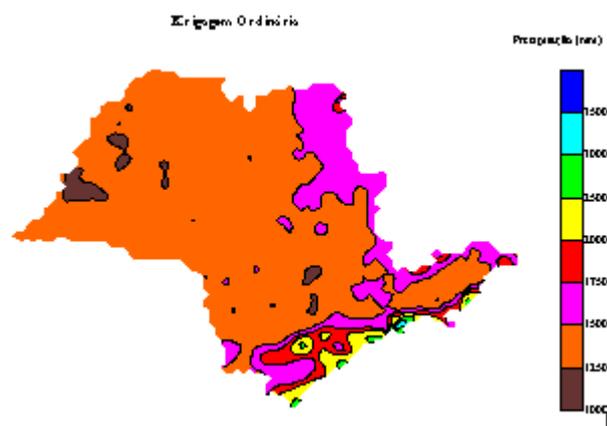


FIGURA 2 - Distribuição espacial para precipitação anual no Estado de São Paulo obtida através de krigagem ordinária

Com o objetivo de comparar o interpolador de krigagem ordinária com o interpolador do inverso do quadrado da distância, a distribuição espacial para a precipitação anual foi calculada conforme mostra figura 3. Pela comparação dos mapas obtidos, verifica-se que o método de krigagem ordinária apresenta distribuição espacial muito mais homogênea. Este resultado é obtido principalmente pelo fato deste interpolador ser não viciado com variância mínima, ou seja é um interpolador ótimo.



FIGURA 3 - Distribuição espacial para precipitação anual no Estado de São Paulo obtida através do inverso do quadrado da distância.

A performance destes interpoladores foi obtida e comparada usando o critério do quadrado médio do erro. Para os valores estimados pelo método do inverso do quadrado da distância, este critério pode ser aplicado diretamente, pois não são interpoladores ótimos e a diferença dos valores estimados e os observados não é nula. Entretanto, para o interpolador de krigagem ordinária, por ser ótimo, esta diferença é nula, logo para ter os valores estimados no ponto observado, o método de validação cruzada (VIEIRA, 2000; ISAACS et al., 1989) foi usado. Este método envolve a estimativa de cada ponto medido “fazendo de conta” que ele não existe, durante a sua estimativa. A razão é que krigagem ordinária é um interpolador exato, passando exatamente pelo ponto observado, quando este é usado no cálculo. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para o critério de comparação QME. O valor do critério deve ser próximo de zero se o algoritmo é preciso. Altos erros estimados são obtidos para os dois interpoladores. Para os dados em questão, o interpolador que apresentou resultado mais acurado foi o de krigagem ordinária, seguido pelo inverso do quadrado da distância.

TABELA 1 - Valores do quadrado médio do erro para interpoladores usado na distribuição espacial de precipitação anual.

Krigagem Ordinária	Inverso do Quadrado da Distância
	QME
24.952,80	114.050,44

### CONCLUSÕES:

Os resultados confirmam que os métodos geoestatísticos são técnicas cujos interpoladores, por serem ótimos, apresentam melhores resultados que os demais interpoladores que ignoram a dependência espacial entre observações.

As estações climatológicas situadas no litoral do Estado, apresentam distribuição de precipitação pluviométrica diferente das demais estações.

A observações são espacialmente dependente até um alcance de 48,5 Km, em todas as direções.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDINK, E.A . & STEIN, A . A comparison of convetional and geostatistical methods to replace cluoded pixels in NOAA-AVHRR images. *Int. J. Remote Sensing*, 20, 5, p. 961-977, 1999.

CARVALHO, J. R. P. de; VIEIRA, S. R. Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agrônômicas – uma proposta. — Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 21 p. : — (Documentos / Embrapa Informática Agropecuária ; 9)

CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P. M. da; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

GOOVAERTS, P. *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press, New

York, NY, 483 p., 1997.

GOOVAERTS, P. Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation. *GeoComputation*, 1999. p. 1 - 18.  
[http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/023/gc\\_023.htm](http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/023/gc_023.htm).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M.. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, 561 p., 1989.

PHILLIPS, D.L.; DOLPH, J.; MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitations in mountainous terrain. *Agric. And Forest Meteor.*, n. 58, p. 119-141, 1992.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVARZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em Ciência do Solo*, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.