

Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude

José Ruy Porto de Carvalho⁽¹⁾, Eduardo Delgado Assad⁽¹⁾ e Hilton Silveira Pinto⁽²⁾

⁽¹⁾Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo, CEP 13083-886 Campinas, SP. E-mail: jruy@cnptia.embrapa.br, assad@cnptia.embrapa.br ⁽²⁾Universidade Estadual de Campinas, Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP 13083-970 Campinas, SP. E-mail: hilton@cpa.unicamp.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi quantificar a contribuição da variável auxiliar altitude, na estimativa da distribuição espacial da precipitação anual média no Estado de São Paulo. A estatística quadrado médio do erro (QME) foi usada em dois conjuntos de observações de precipitação anual média (1957 a 1997): o completo, com 1.027 observações, e o reduzido, com 445. Bolsões de precipitação foram perfeitamente definidos nos mapas de variabilidade espacial que utilizaram o conjunto completo de dados, e indicaram a existência de possíveis microclimas. O interpolador geoestatístico de krigagem ordinária apresentou desempenho 82 vezes mais preciso que o interpolador do inverso do quadrado da distância, quando o QME foi usado como critério de comparação para o conjunto de dados completo. Para o conjunto reduzido, essa magnitude foi de duas vezes. Os erros de estimação obtidos por krigagem ordinária foram menores no conjunto completo, enquanto os obtidos por cokrigagem ordinária foram menores no reduzido. Isso indica que esses interpoladores devem ser usados para determinação da distribuição espacial da precipitação anual média. O uso da altitude como variável auxiliar beneficia o interpolador de cokrigagem ordinária e define microrregiões mais uniformes quanto à distribuição espacial da precipitação anual média.

Termos para indexação: cokrigagem ordinária, geoestatística, krigagem ordinária, métodos de interpolação, microclima, risco climático.

Geostatistical interpolation in the analysis of spatial distribution of annual rainfall and of its relationship to altitude

Abstract – The objective of this work was to quantify the contribution of the auxiliary variable elevation in the estimate of the spatial distribution of annual average rainfall in the state of São Paulo, Brazil. The statistic mean square error (MSQR) was used in two observation sets for the mean annual rainfall (1957 to 1997): a full set, with 1,027 observations, and a reduced one, with 445. Areas of rainfall concentration were clearly defined in spatial variability maps that used the full data set, indicating possible microclimates. Ordinary kriging geostatistical interpolation had a performance 82 times more accurate than that of interpolation by the inverse square of the distance when the MSQR was used as a benchmark for the full set. For the reduced set, this magnitude was of two times. The estimation errors obtained by ordinary kriging were lower in the full set, whereas those obtained by ordinary cokriging were lower in the reduced one. This indicates that these interpolators should be used for determining the spatial distribution of annual average rainfall. The use of altitude as an auxiliary variable benefits the ordinary cokriging interpolator and defines more uniform micro regions as to the spatial distribution of annual average rainfall.

Index terms: ordinary cokriging, geostatistics, ordinary kriging, interpolation methods, microclimate, climatic risk.

Introdução

Tanto o setor público quanto a administração privada têm exigido informações meteorológicas e climáticas cada vez mais precisas e confiáveis, para estabelecer metas, formular o planejamento estratégico e minimizar custos. Com os investimentos que têm sido feitos pelo governo federal, a qualidade das previsões de tempo tem melhorado substancialmente ao longo dos últimos cinco anos, o que auxilia em muitas atividades

econômicas sensíveis ao clima, como a construção civil, a aviação, a agricultura e a medicina (Carvalho & Vieira, 2004).

Especificamente na agricultura, a necessidade de informações meteorológicas vem se tornando cada vez mais importante. A duração da estação de crescimento das diferentes espécies ou variedades de plantas depende diretamente da temperatura do ar e da disponibilidade de água, o que condiciona locais geográficos de maior ou menor risco ao desenvolvimento vegetal. A frequência

e a quantidade das precipitações pluviais, juntamente com a capacidade de armazenamento de água no solo, definem a eficiência do uso da água (Bergamaschi, 1992). A ocorrência dos chamados veranicos, ou períodos estiagem na estação chuvosa, é um dos fatores de maior risco para a produção da maioria das culturas agrícolas no mundo (Lana et al., 2006).

As principais dificuldades em se definir uma região como sendo de maior ou menor risco econômico ao desenvolvimento de determinada cultura agrícola residem na quantificação da distribuição das chuvas durante o ano. O zoneamento de riscos climáticos para a agricultura (Assad et al., 2008), atualmente uma política pública do Brasil, tem como grande desafio a estimativa da precipitação pluvial. É necessário medir e armazenar dados de chuvas para, por exemplo, estimar a produção da cultura, estabelecer o manejo dos recursos hídricos, avaliar o comportamento ambiental, proteger os solos contra a erosão hídrica, e avaliar riscos climáticos presentes e futuros. A obtenção da correta distribuição espacial das chuvas é primordial no planejamento agrícola, principalmente com referência à instalação de culturas anuais, quando o excesso ou a falta de água podem prejudicar ou inviabilizar safras inteiras. Já a quantificação das chuvas com intensidades superiores ao suporte do ambiente é importante tanto no planejamento agrícola como no ambiental, para o correto dimensionamento de obras (Carvalho & Assad, 2002).

Quando não há dados em quantidade suficiente para se obter mapas de isolinhas ou mapas de contorno de precipitação pluvial para a região em estudo, é necessário recorrer a métodos que permitam estimar esses valores por meio das informações disponíveis. Normalmente, utiliza-se a técnica de interpolação, um procedimento de estimação do valor de um atributo, em locais não amostrados, a partir de pontos amostrados na mesma área ou região. A interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, o que produz padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas. A interpolação pressupõe que, em média, valores do atributo tendem a ser similares em locais mais próximos do que em locais mais afastados. Há relatos na literatura de diversos métodos de interpolação, univariados e multivariados, com diferentes níveis de complexidade (Carvalho et al., 2002; Carvalho &

Assad, 2005; Diodato & Ceccarelli, 2005; Di Piazza et al., 2011).

Krigagem é o nome genérico, adaptado pelos geostatísticos, para a família de algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados (Goovaerts, 1997). Os métodos de krigagem usam a dependência espacial expressa no semivariograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, o que os torna ótimos estimadores no estudo da distribuição espacial de precipitação pluvial (Machado et al., 2010). A correlação espacial entre observações vizinhas, para predizer valores em locais não amostrados, é o aspecto fundamental que diferencia os interpoladores geostatísticos dos demais.

A altitude tem sido usada em diversos trabalhos como variável auxiliar na estimativa de diferentes variáveis principais, com excelentes resultados (Carvalho & Queiroz, 2002; Diodato & Ceccarelli, 2005; Brito et al., 2010; Viola et al., 2010; Di Piazza et al., 2011). No entanto, a quantificação de sua contribuição nesse aspecto, em relação aos interpoladores, ainda necessita ser mais bem determinada.

O objetivo deste trabalho foi quantificar a contribuição da variável auxiliar altitude na estimativa da distribuição espacial da precipitação anual média no Estado de São Paulo.

Material e Métodos

Foram utilizados dois conjuntos de observações de precipitação anual média, no período de 1957 a 1997, provenientes de estações pluviométricas que abrangem todo o Estado de São Paulo, numa área de 248.808,8 km². O primeiro conjunto, denominado completo, foi composto por 1.027 observações, e o segundo, denominado reduzido, foi composto por 445 observações. Todas as observações foram correspondentes a estações pluviométricas localizadas em altitude igual ou superior a 600 m, situação em que o efeito orográfico é mais significativo na ocorrência de chuvas (Conti, 1975; Melo Júnior et al., 2006; Milanesi & Galvani, 2011). Os dados foram observados nas estações pluviométricas do Departamento de Águas e Energia Elétrica.

O inverso do quadrado da distância, interpolador univariado de médias ponderadas (Isaaks & Srivastava, 1989), foi utilizado por meio da equação:

$$z^*(x_i) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{z(x_i)}{h_i^2} \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_i^2} \right)} \quad (1),$$

em que h_i é a distância entre os pares de observação x_i .

O método geoestatístico foi utilizado na avaliação da variabilidade espacial dos atributos estudados (Vieira, 2000; Carvalho et al., 2002; Vieira & Dechen, 2010). A dependência espacial entre as observações foi expressa por meio do semivariograma, estimado pela seguinte equação:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2),$$

em que $N(h)$ é o número de pares dos valores medidos, $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$, separado pela distância h , se a variável for escalar. O gráfico dos valores de $\gamma^*(h)$ em função dos valores de h é denominado semivariograma. Modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, no intuito de permitir a visualização da natureza da variação espacial das variáveis avaliadas.

Para a definição do estimador de krigagem ordinária (OK), estimou-se o valor de um atributo contínuo z para qualquer local não amostrado x_0 , tendo-se utilizado os dados de z amostrados na área de estudo A . O estimador linear foi definido por:

$$Z_{OK}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \text{ para } \sum_{i=1}^n \lambda_i^{OK} = 1 \quad (3).$$

Os n pesos λ_i^{OK} foram determinados para que a variância do erro fosse mínima.

A extensão multivariada de krigagem, conhecida como cokrigagem, foi utilizada quando houve dependência espacial das variáveis em estudo e, também, entre as variáveis; portanto, sua utilização foi possível na estimativa de valores não amostrados (Carvalho & Queiroz, 2002; Chiba et al., 2010; Paz-Ferreiro et al., 2010). Na cokrigagem ordinária (OC) (Vieira, 2000; Viola et al., 2010), para estimar valores z_{OC}^* em qualquer local x_0 , o valor estimado foi uma combinação linear de Z_1 e Z_2 :

$$z_{OC}^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} z_1(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} z_2(x_{2j}) \quad (4),$$

em que N_1 e N_2 são os números de vizinhos de Z_1 e Z_2 , respectivamente, e λ_1 e λ_2 são os pesos associados a

cada valor de Z_1 e Z_2 . Ao se tomar $z_1(x_{1i})$ e $z_2(x_{2j})$ como sendo a realização das funções aleatórias $Z_1(x_{1i})$ e $Z_2(x_{2j})$, respectivamente, e ao se assumir estacionaridade de ordem 2, o estimador pode ser rescrito como:

$$Z_{OC}^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(x_{2j}) \quad (5).$$

Esta equação expressa que a estimativa da variável Z_{OC}^* deve ser uma combinação linear de Z_1 e Z_2 , com os pesos λ_1 e λ_2 distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e com a correlação cruzada entre elas. Os mapas de variabilidade espacial foram construídos com uso do programa Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

O desempenho do interpolador univariado (inverso do quadrado da distância) e dos dois interpoladores geoestatísticos uni e multivariados (krigagem ordinária e cokrigagem ordinária) foi avaliado pelo critério do quadrado médio do erro, QME (Carvalho & Assad, 2005), para os dois conjuntos de dados, conforme a fórmula:

$$QME = \left\{ \sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i^*)^2 \right\} / n \quad (6),$$

em que Z_i é o valor da variável e Z_i^* é o valor interpolado no ponto. Na validação cruzada, supõem-se que um elemento da amostra não foi observado. Portanto, retira-se o valor amostrado e obtém-se a sua estimativa pelo interpolador, tendo-se utilizado os valores dos pontos vizinhos. Este processo foi realizado para todos os pontos amostrados. Segundo este critério, o melhor interpolador, para cada variável, é aquele com menor valor de QME.

Resultados e Discussão

Os dados de precipitação anual média, utilizados no presente trabalho não foram analisados quanto às flutuações interanuais no período avaliado (1957 a 1997). A correlação linear entre altitude e precipitação foi de 0,12 (significativa a 0,1%), para o conjunto completo, e de 0,27 (significativa a 0,1%) para o conjunto reduzido. Apesar de numericamente baixas, as correlações foram altamente significativas, o que indica que a adequação do uso da altitude como variável auxiliar na determinação da distribuição espacial da precipitação.

Os semivariogramas experimentais, para precipitação anual média e altitude, e os semivariogramas cruzados correspondentes foram utilizados na avaliação da dependência espacial das variáveis em estudo, nos dois conjuntos de dados (Tabela 1). O modelo esférico foi ajustado aos semivariogramas e foi considerado o mais compatível com os indicadores ideais pelo procedimento de autovalidação “jack-knifing” (Vieira, 2000; Carvalho et al., 2009; Vieira et al., 2010). Os parâmetros de “jack-knifing” analisados

Tabela 1. Valores do quadrado médio do erro para interpoladores usados na distribuição espacial da precipitação total anual média.

Conjunto de dados	Inverso do quadrado da distância	Krigagem ordinária	Cokrigagem ordinária
Completo	976,94	11,95	91,33
Reduzido	32,06	24,91	16,23

foram: interseção, coeficiente angular e coeficiente de correlação para regressão linear entre valores estimados e medidos.

Os efeitos pepitas para precipitação foram bastante distintos e sofreram influência direta do conjunto de dados usado: $C_0 = 0,15$ e $0,25$ para os dados de precipitação total no conjunto completo e reduzido, respectivamente (Figura 1 C e D). A dependência espacial continuou forte para os dois conjuntos de observações. No conjunto completo, o efeito pepita de $0,15$ indicou a existência de descontinuidade entre valores separados por distâncias menores do que a utilizada no intervalo de amostragem. A proporção (16,67%) deste valor, para o patamar do semivariograma ($C_0 + C_1$), indicou quantidade de variação ao acaso de um ponto para outro. Cabe ressaltar que quanto menor o patamar, mais parecidos são os valores vizinhos.

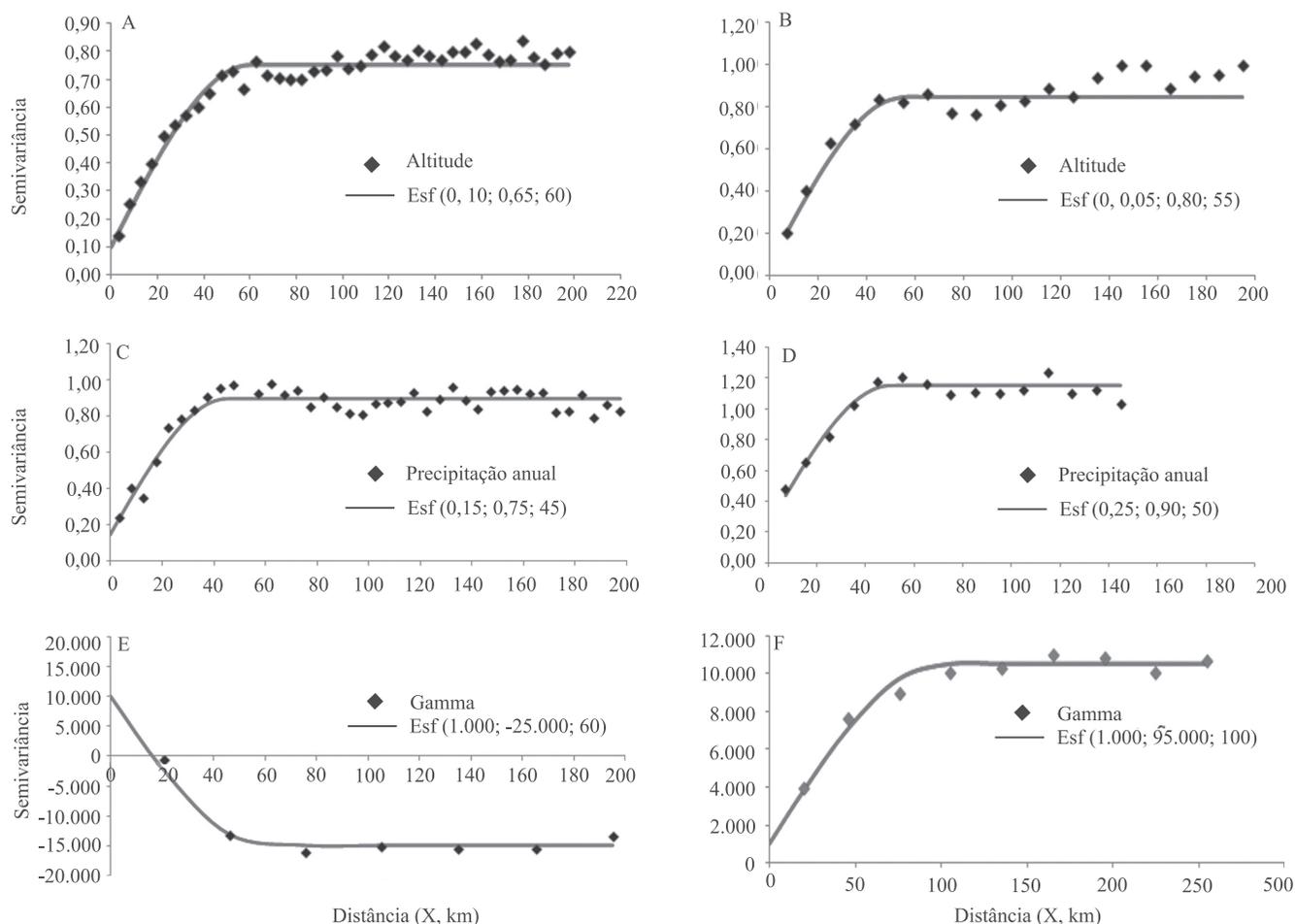


Figura 1. Modelo esférico ajustado aos semivariogramas para: A, altitude do conjunto de dados completo; B, altitude do conjunto reduzido; C, precipitação total anual média do conjunto completo; D, precipitação total anual média do conjunto reduzido; E, semivariograma cruzado do conjunto completo; F, semivariograma cruzado do conjunto reduzido.

A dependência espacial é considerada forte quando o efeito pepita é menor ou igual a 25% do patamar; moderada quando o efeito pepita esta entre 26–75% do patamar; e fraca quando for acima de 75% (Cambardella et al., 1994).

O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas que indicam a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance são mais semelhantes entre si do que os dos separados por distâncias maiores (Carvalho et al., 2002). O alcance de 45 km, para a variável precipitação, mostra que todos os vizinhos dentro desse raio podem ser usados na estimativa de valores em espaçamentos mais próximos (Figura 1 C). Para a variável altitude, nos dois conjuntos de observações, a dependência espacial (13,33%, no conjunto completo, e 5,88% no reduzido) mais forte foi verificada para o conjunto reduzido, com alcance de 55 km.

Em situações em que há correlação espacial entre as duas variáveis, a estimativa de uma delas pode ser feita a partir das informações de ambas, expressas no semivariograma cruzado. Para o conjunto completo de observações, a correlação linear entre precipitação anual média e altitude ($r = -0,12$) foi significativa a 0,1%, o que mostra que a precipitação é maior para menores altitudes, especificamente no litoral. No conjunto reduzido, a correlação linear ($r = 0,27$) também foi significativa a 0,1% mas, nesse caso, indicou que a precipitação aumenta com a altitude. Essa situação deve ser considerada nas análises espaciais de regiões litorâneas e continentais. O semivariograma cruzado entre essas variáveis indica que o modelo ajustado foi o esférico (Figura 1 E e F) e que há forte relação espacial entre precipitação anual média e altitude para o conjunto reduzido (grau de dependência espacial de 5,88%), e moderada para o conjunto completo (grau de dependência espacial de 66,07%). Consequentemente, a variável altitude pode ser usada como variável auxiliar na obtenção de estimativas, em lugares não amostrados, para a precipitação anual média, em toda a área em estudo dentro do alcance, com maior ênfase no conjunto reduzido.

As estimativas dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas são essenciais na obtenção de valores não amostrados pelos métodos de krigagem. Valores obtidos por meio de krigagem são não viciados,

têm variância mínima (Goovaerts, 1997; Vieira, 2000) e são ideais para a construção de mapas de isolinhas, com vistas à verificação e à interpretação da variabilidade espacial.

Foram construídos mapas de isolinhas ou contornos para a variável precipitação anual média, obtidos por meio do uso de interpoladores espaciais pelo inverso do quadrado da distância, pela krigagem ordinária e pela cokrigagem ordinária para o conjunto completo (Figura 2 A, C e E, respectivamente) e o conjunto reduzido (Figura 2 B, D e F, respectivamente). As informações mostradas nos gráficos de isolinhas são úteis para avaliar a variabilidade das propriedades da precipitação pluvial e para identificar áreas que necessitam de maiores ou menores cuidados. Como houve dependência espacial em cada variável e entre elas, o método de cokrigagem ordinária foi usado na estimativa de valores, tendo-se utilizado a altitude como variável auxiliar.

Ao se comparar os mapas obtidos para o conjunto completo, foram observados bolsões de precipitação bem definidos, o que indicou presença de possíveis áreas diferenciadas, com informações essenciais para o planejamento agrícola (Figura 2 A, C e E). Esses resultados estão de acordo com os de Paz-Ferreiro et al. (2010), que concluíram que a abordagem geoestatística é altamente eficaz na caracterização de pequenas zonas homogêneas. Essas áreas são mais bem definidas na Figura 2 E, e mostram a importância de se considerar a variável auxiliar altitude. Entretanto, em razão de problemas de instabilidade numérica, inerente ao método, também foram incluídas zonas de descontinuidade espacial. A possibilidade de o método de interpolação indicar, com clareza, esses bolsões é de grande importância para estudos de zoneamento agrícola, previsão de safras e caracterização climatológica.

O método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância (Figura 2 A), apesar de ter delimitado microclimas por todo o Estado de São Paulo, é um processo de estimação que depende do correto valor do expoente para o método, o que pode afetar significativamente a qualidade da estimação (Isaaks & Srivastava, 1989; Di Piazza et al., 2011). Para o conjunto reduzido, os bolsões de precipitação foram menores e se concentram nas regiões de maior altitude (Figura 2 B, D e F). A instabilidade numérica do interpolador inverso do quadrado da distância mostra claramente bolsões de precipitação para regiões com altitudes menores do que 600 m.

A análise dos semivariogramas e dos mapas de krigagem ilustra os possíveis processos ambientais que operam dentro da área em estudo e permite fazer inferências sobre os fatores que controlam a distribuição espacial da precipitação e da altitude. Portanto, a abordagem do método geoestatístico tem se mostrado altamente eficaz em separar a

homogeneidade em pequenas zonas caracterizadas por meio da observação de semelhanças e diferenças nos processos meteorológicos.

O valor obtido com o critério de comparação, por meio da estatística do quadrado médio do erro, deve ser próximo de zero se o algoritmo for preciso (Tabela 1). Baixos erros estimados são obtidos para

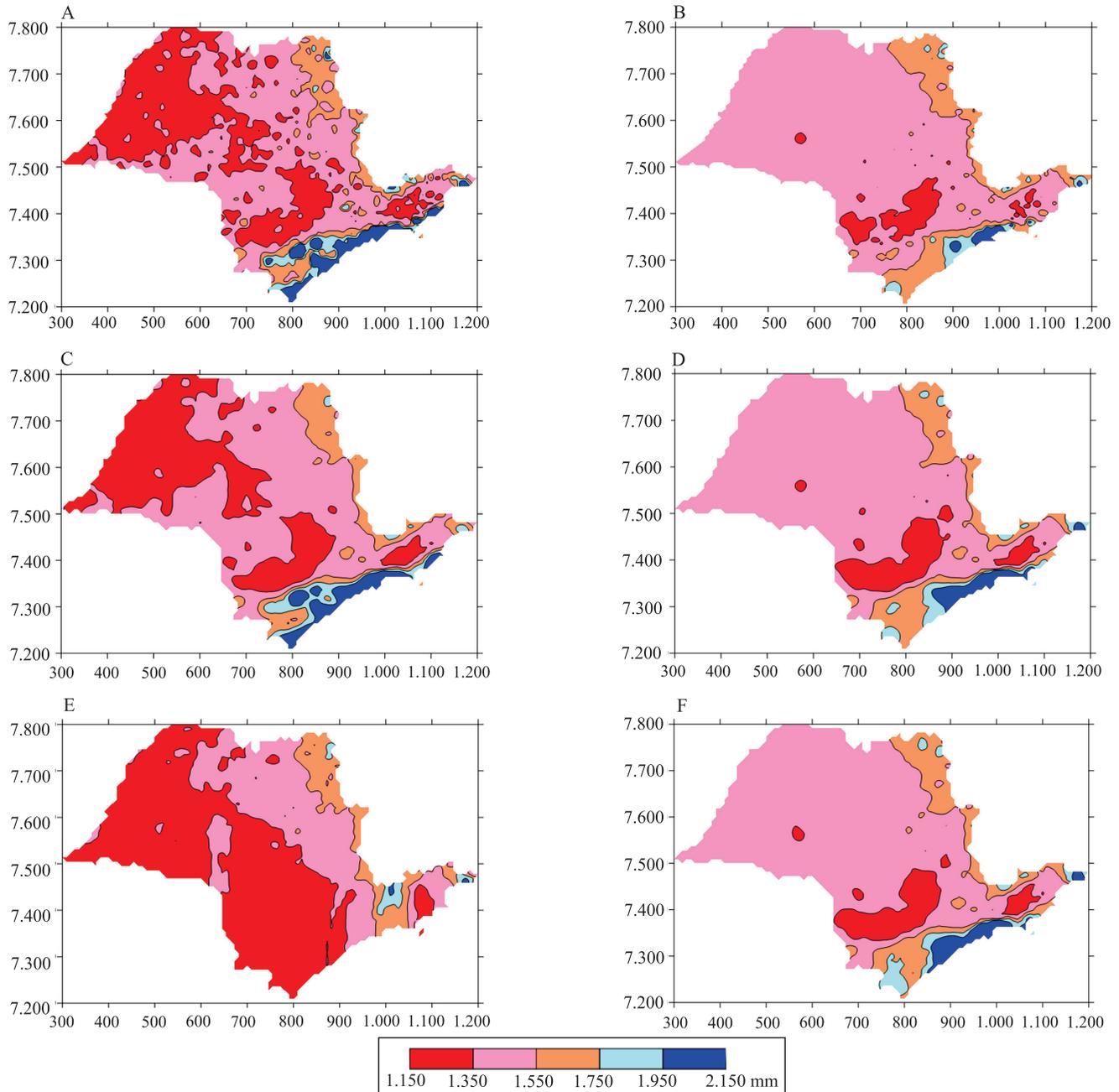


Figura 2. Mapas de precipitação média anual obtidos para os interpoladores: A, inverso do quadrado da distância do conjunto de dados completo; B, inverso do quadrado da distância do conjunto reduzido; C, krigagem ordinária referente ao conjunto completo; D, krigagem ordinária referente ao conjunto reduzido; E, cokrigagem ordinária referente ao conjunto completo; F, cokrigagem ordinária referente ao conjunto reduzido.

os interpoladores baseados nos métodos de krigagem. Os erros obtidos pela krigagem ordinária são, em média, 82 vezes mais precisos que os erros obtidos pelo interpolador do inverso do quadrado da distância para o conjunto completo de dados. Para a cokrigagem ordinária, esta relação é de 11 vezes. Os interpoladores que apresentaram resultados mais acurados foram o de krigagem ordinária, para o conjunto completo, e o de cokrigagem ordinária para o conjunto reduzido. O uso de altitude como variável auxiliar melhorou a estimativa da distribuição espacial de precipitação anual média em 1,5 vezes, em comparação à krigagem ordinária, e em duas vezes quando comparado ao inverso do quadrado da distância. Diodatto & Ceccarelli (2005) e Di Piazza et al. (2011) encontraram resultados semelhantes, ao utilizar a altitude como variável auxiliar na estimação de precipitação pluvial, para o sul da Itália.

Em relação às regiões com insuficiência de dados e de acordo com os resultados obtidos pelo sistema reduzido, observa-se que, para altitudes acima de 600 m, as estimativas de precipitação anual média podem ser obtidas com mais precisão (menor quadrado médio do erro, Tabela 1) com uso do interpolador de cokrigagem ordinária.

Conclusões

1. Microrregiões, com áreas pluviométricas homogêneas, são detectadas com mais precisão quando são utilizados interpoladores de krigagem.

2. As estimativas de precipitação anual média obtidas pelos interpoladores geoestatísticos são mais precisas do que as obtidas pelo interpolador do inverso do quadrado da distância.

3. O uso de altitude como variável auxiliar beneficia o interpolador de cokrigagem ordinária e define microrregiões mais uniformes quanto à distribuição espacial da precipitação anual média.

4. Os interpoladores ótimos têm a vantagem de definir, com mais exatidão, o alcance da dependência espacial, para obter a correta distribuição espacial da precipitação.

5. Estimativas ótimas de precipitação anual média são obtidas por meio da cokrigagem ordinária, com menor número de estações pluviométricas.

Referências

ASSAD, E.D.; MARIN, F.R.; PINTO, H.S.; ZULLO JÚNIOR, J. Zoneamento agrícola de riscos climáticos do Brasil: base teórica,

pesquisa e desenvolvimento. **Informe Agropecuário**, v.29, p.47-60, 2008.

BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. 125p.

BRITO, L. de F.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA JUNIOR, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, v.69, p.19-27, 2010.

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 Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, J.R.P. de; ASSAD, E.D. **Comparação de interpoladores espaciais univariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado técnico, 33).

CARVALHO, J.R.P. de; ASSAD, E.D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.377-384, 2005.

CARVALHO, J.R.P. de; QUEIROZ, E.F. de. **Uso da cokrigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. 4p. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado técnico, 21).

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**, v.37, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, J.R.P. de; VIEIRA, S.R. **Validação de modelos geoestatísticos usando teste de Filliben**: aplicação em agroclimatologia. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2004. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado técnico, 60).

CARVALHO, J.R.P. de; VIEIRA, S.R.; GRECO, C.R. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.443-448, 2009.

CHIBA, M.K.; VIEIRA, S.R.; GONZÁLEZ, A.P.; DECHEN, S.C.F.; CLERICI DE MARIA, I. Alterations and spatial variability of soil fertility in successive years under no tillage system. **Bragantia**, v.69, p.29-38, 2010.

CONTI, J.B. **Circulação secundária e efeito orográfico na gênese das chuvas na região lesnordeste paulista**. 1975. 82p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

DI PIAZZA, A.; LO CONTI, F.; LOTO, L.V.; VIOLA, F.; LA LOGGIA, G. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.13, p.396-408, 2011.

DIODATTO, N.; CECCARELLI, M. Interpolation processes using multivariate geostatistics for mapping of climatological

- precipitation mean in the Sannio Mountains (southern Italy). **Earth Surface Processes and Landforms**, v.30, p.259-268, 2005.
- GOLDEN SOFTWARE. **Surfer plotting software information brochure**. [S.l.]: Golden Software, 1999. 619p.
- GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University, 1997. 496p.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**. Oxford: Oxford University 1989. 561p.
- LANA, X.; MARTÍNEZ, M.D.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C.; MARTÍN-VIDE, J.; GÓMEZ, L. Distributions of long dry spells in the Iberian Peninsula, years 1951-1990. **International Journal of Climatology**, v.26, p.1999-2021, 2006.
- MACHADO, R.L.; CEDDIA, M.B.; CARVALHO, D.F. de; CRUZ, E.S. da; FRANCELINO, M.R. Spatial variability of maximum annual daily rain under different return periods at the Rio de Janeiro state, Brazil. **Bragantia**, v.69, p.77-84, 2010.
- MELO JÚNIOR, J.C.F. de; SEDIYAMA, G.C.; FERREIRA, P.A.; LEAL, B.G.; MINUSI, R.B. Distribuição espacial da frequência de chuvas na região hidrográfica do Atlântico, Leste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.417-425, 2006.
- MILANESI, M.A.; GALVANI, E. Efeito orográfico na Ilha de São Sebastião (Ilhabela – SP). **Revista Brasileira de Climatologia**, v.9, p.68-79, 2011.
- PAZ-FERREIRO, J.; VIDAL VÁZQUEZ, E.V.; VIEIRA, S.R. Geostatistical analysis of a geochemical dataset. **Bragantia**, v.69, p.121-129, 2010.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F. de; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.
- VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P. de; PAZ GONZÁLEZ, A. Jackknifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v.69, p.97-105, 2010.
- VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. Spatial variability studies in São Paulo, Brazil along the last twenty five years. **Bragantia**, v.69, p.53-66, 2010.
- VIOLA, M.R.; MELLO, C.R. de; PINTO, D.B.F.; MELLO, J.M. de; ÁVILA, L.F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.970-978, 2010.

Recebido em 9 de junho de 2011 e aprovado em 13 de agosto de 2012