
ESPAIALIZAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO MÁXIMA MÉDIA COM INTERPOLADOR GEOESTATÍSTICO: KRIGAGEM

FELIPE FERNANDES DA COSTA
GABRIEL DINIZ DE OLIVEIRA
PAULO RICARDO CORRÊA CAIXETA
GERSON RODRIGUES DOS SANTOS

Universidade Federal de Viçosa – UFV
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas
Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, MG
{felipe.fernandes, gabriel.diniz, paulo.caixeta, gerson.santos}@ufv.br

RESUMO – A precipitação máxima média, também conhecida por chuva de projeto, é de estratégico interesse em projetos hidráulicos ou relacionados ao escoamento superficial. É calculada em função da análise de séries históricas de intensidade, duração e frequência, registradas em estações pluviométricas, limitando a disponibilidade de dados para sua obtenção em regiões distantes da estação. Para contornar esta limitação, a chuva de projeto é calculada para o pluviômetro localizado na estação mais próxima ou por meio da interpolação de fatores da precipitação oriundos de estações próximas. Como método alternativo, o presente trabalho propõe a geração de uma superfície interpolada com os valores de precipitação máxima média para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, com período de retorno variando em 10, 25 e 50 anos e duração de precipitação definida em 30 minutos, com base nos parâmetros regionalizados por Freitas *et al.* (2001) para as estações pluviométricas de Minas Gerais. A interpolação é processada pelo método geoestatístico denominado Krigagem, cuja aplicação em variáveis com dependência espacial destaca-se pela premissa de não tendenciosidade e mínima variância do resultado (VIEIRA, 2000). Variações de 4,5% a 33,6% entre os parâmetros da validação cruzada indicam decaimento da precisão do ajuste com o aumento dos períodos de retorno.

ABSTRACT - The maximum average precipitation, also known as rain project is of strategic interest in water projects or related to runoff. It is calculated according to the analysis of time series of intensity, duration and frequency of rainfall stations recorded, thereby limiting the availability of data for collection from regions far from the station. To circumvent this limitation, the rain project is calculated for the rain gauge located at the nearest station or by means of interpolation factors of rainfall coming from nearby stations. As an alternative method, this paper proposes the generation of an interpolated surface with the maximum average precipitation values for the Rio Doce basin, with a payback period ranging from 10, 25 and 50 years and duration of rainfall set in 30 minutes, with based on the regionalized parameters by Freitas *et al.* (2001) for the rainfall stations of Minas Gerais. The interpolation is processed by the geostatistical method called kriging, whose application in variables with spatial dependence is distinguished by the assumption of no bias and minimum variance of the result (VIEIRA, 2000). Variations of 4.5% to 33.6% between the parameters of cross-validation indicate the accuracy of the fit decay with increasing return periods.

1 INTRODUÇÃO

Uma prudente maneira de se evitar o sub ou super dimensionamento de obras hidráulicas, estruturas urbanas ou agrícolas, é considerar o histórico de dados de pluviosidade intensa da região. Neste intuito, a definição da equação de intensidade-duração-frequência (IDF) permite ao analista se assegurar que, ao longo de um período (período de retorno) a precipitação máxima com duração estipulada, não será superada. Dada pela Equação 1, indicada por Schwab et al. (1966) e Villela e Mattos (1975), a equação de IDF é obtida pelo método de regressão linear múltipla sobre os dados históricos.

$$i = \frac{k.T^a}{(+b)^c}, \quad (1)$$

em que i = intensidade máxima média da chuva (mm h^{-1}), T = período de retorno (anos), t = tempo de duração da chuva (min) e k , a , b , c são coeficientes de ajustamento específicos para cada localidade.

Contudo, a limitada distribuição espacial das estações hidrológicas disponíveis no Brasil, inviabilizam a utilização direta dos parâmetros de cada estação em regiões distantes ou em condições climáticas distintas. Nesses casos, a regionalização dos parâmetros têm sido estudada por Cecílio & Pruski (2003), Melo et al. (2003), Silva et al. (2003), e Cecílio et al. (2009), que utilizaram com sucesso métodos de interpolação por inverso da potência das distâncias.

O método de interpolação geostatístico denominado Krigagem se destaca dos demais pela pressuposição de não ser tendencioso e gerar mínima variância no resultado, despontando como uma ferramenta alternativa na estimação de parâmetros em regiões não amostradas, desde que estas as variáveis analisadas expressem dependência espacial comprovadas pela análise do semivariograma (VIEIRA, 2000).

Neste intuito, Mello et al. (2003), avaliou comparativamente a aplicação do método de interpolação dos parâmetros hidrológicos (K , a , b e c) tradicionalmente utilizado (Inverso da potência da distância) com o interpolador Krigagem com base em 140 estações meteorológicas do Estado de São Paulo, e constatou que ambos os métodos resultaram em boa precisão. Observou-se ainda que considerando tempos de duração e períodos de retorno comumente utilizados em pequenas bacias rurais, a Krigagem foi o método que proporcionou os menores erros nas regiões interpoladas e que das 14 estações utilizadas para comparação de erros na estimativa da precipitação resultante, em 11 a Krigagem também apresentou menores erros. Já Vieira et al. (1991), citado por Mello et al. (2003), analisou chuvas máximas diárias com 232 estações, também no Estado de São Paulo, e empregou o método geostatístico com modelo exponencial e com alcance próximo a 100 km, reforçando a estrutura de dependência espacial.

Entretanto, Silva et al. (2003), ressalva que os erros na estimativa da precipitação máxima média considerando dados de outras localidades, tendem a crescer com o aumento na duração da precipitação. Uma conclusão semelhante foi destacada por Cecílio (2009), que indica a baixa qualidade na estimativa das intensidades de precipitação de chuvas intensas de longa duração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo é focado na Bacia Hidrográfica do Rio Doce, que abrange o leste do Estado de Minas Gerais e deságua a nordeste do Estado do Espírito Santo (Figura 1). Seu clima é caracterizado basicamente em três tipos pela classificação de Köppen, sendo eles: o clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, presente nas vertentes das serras da Mantiqueira e do Espinhaço e nas nascentes do rio Doce; o clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, presentes nas nascentes de seus afluentes; e clima quente com chuvas de verão, presentes nos trechos médio e baixo do rio Doce e de seus afluentes (ANA, 2001). A precipitação média anual na bacia varia de 1.500 mm, nas nascentes localizadas nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, a 900 mm, na região da cidade de Aimorés-MG, voltando a crescer em direção ao litoral (ANA, 2001).

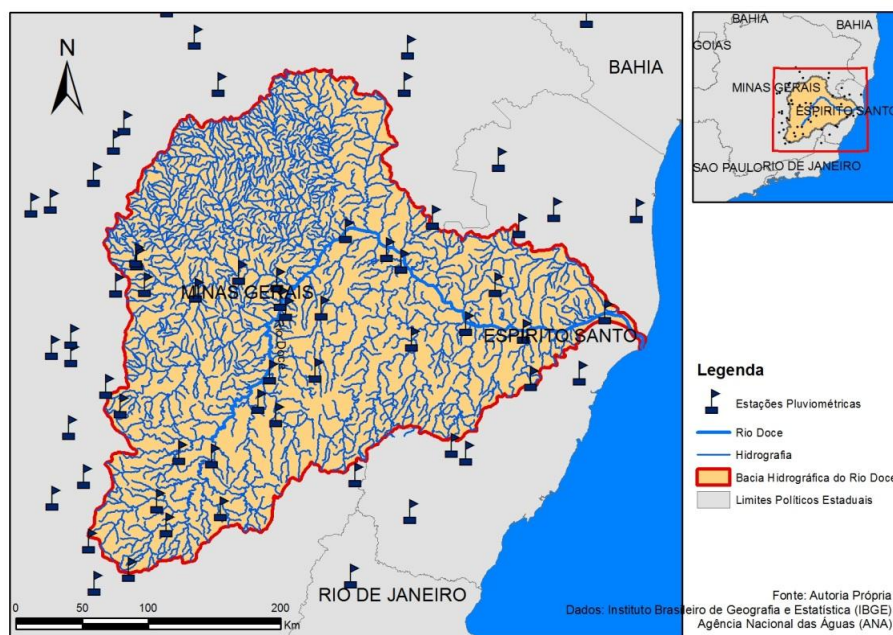


Figura 1 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Estações Pluviométricas.

Os parâmetros para o cálculo da precipitação máxima média das estações pluviométricas presentes na área de estudo foram obtidos no *software* Pluvio 2.1, disponível para *download* no site do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e pela equação de IDF (1), indicaram as precipitações estimadas para os períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos para o tempo de duração de 30 minutos.

A análise geoestatística executou-se no *software* GS+, onde, a partir das coordenadas do sistema de projeção Universal Transverso de Mercator (UTM), Fuso 23, Datum SAD69 e valores de precipitação calculados para cada cidade, gerou-se um semivariograma para cada período de retorno. O semivariograma (2) é definido como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_i) - Z(x_i+h)] \quad (2)$$

O seu padrão representa o que, intuitivamente, se espera de dados de campo, isto é, que as diferenças $\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}$ decresçam à medida que h , a distância que os separa decresce. É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que $g(h)$ aumente com a distância h .

Os parâmetros do semivariograma podem ser observados diretamente da Figura 2:

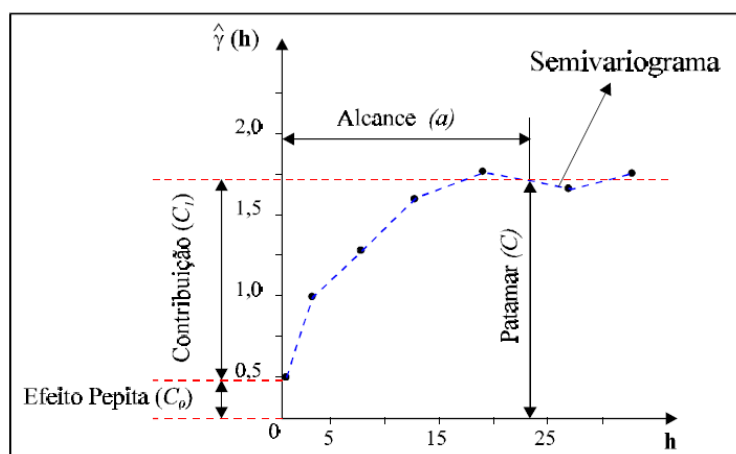


Figura 2 - Exemplo de semivariograma.

- Alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente. Na Figura 2, o alcance ocorre próximo de 25m.
- Patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente a seu alcance (a). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ($\text{Var}[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$) torna-se invariante com a distância.
- Efeito Pepita (C_0): idealmente, $g(0)=0$. Entretanto, na prática, à medida que h tende para 0 (zero), $g(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita (C_0), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem. Quando o Efeito Pepita (C_0) for aproximadamente igual ao Patamar ($C+C_0$), denomina-se Efeito Pepita Puro, demonstrando que a amostra não recebe influência espacial (Trangmar et al., 1985).
- Contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o Efeito Pepita (C_0).

Na aplicação da teoria geoestatística a dados experimentais, ajusta-se modelos teóricos de semivariogramas as semivariâncias experimentais, e desta forma trabalha-se com modelos estatísticos de semivariogramas.

De acordo com Guimarães (2004) os principais modelos de semivariograma utilizado na geoestatística são: modelo linear com patamar, modelo esférico e modelo exponencial. Tendo que, a escolha do modelo de semivariograma que será utilizado é um dos aspectos mais importantes da geoestatística. Todos os cálculos da geoestatística dependem do modelo de semivariograma ajustado e, conseqüentemente, se o modelo ajustado não for

apropriado, todos os cálculos seguintes conterão erros que poderão afetar as inferências, portanto o ajuste de semivariograma é uma fase crucial na análise geoestatística e deve receber uma atenção especial.

Utiliza-se de alguns critérios para a escolha do melhor modelo, sendo alguns dos fatores:

- Coeficiente de Determinação (R^2) é uma relação entre a soma de quadrados devido ao modelo ajustado e a soma de quadrados total (mede a variação dos dados devido ao modelo ajustado em relação à variação total dos dados) e quanto mais próximo da unidade estiver o valor de R^2 melhor será o modelo ajustado;
- Soma de Quadrados de Resíduos (RSS) diz-se que quanto menor for este valor, melhor será o modelo de semivariograma. O GS+ utiliza este resultado para a seleção do modelo e, por meio de combinações dos parâmetros do modelo, minimizando a soma de quadrados de resíduos.
- Índice de Dependência Espacial (IDE) calcula-se através da relação $[C/(C_0+C)]*100$, e classificado segundo Zimback (2001) que considera dependência espacial fraca ($IDE < 25\%$); moderada ($25\% \leq IDE \leq 75\%$) e forte ($IDE > 75\%$).

O processo de interpolação pelo método da krigagem compreende um conjunto de estimadores baseados em regressão linear pioneiramente estudados por Daniel Krige. Segundo Salviano (1996) o valor estimado da variável é dado pela expressão 3:

$$z(x_o) = \lambda_o + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \quad (3)$$

na qual n é o número de vizinhos medidos, $Z(x_i)$ utilizados na estimativa da variável e i são os ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$, os quais são selecionados de forma que a estimativa obtida seja não tendenciosa.

Sabe-se que toda análise estatística tem-se várias incertezas ao longo do processo sendo assim existe a necessidade de estimar esse erro. No caso da interpolação por Krigagem costuma-se utilizar a Validação Cruzada, que consiste em retirar um valor real do banco de dados e estimar o seu valor através do modelo estimado pelo semivariograma. Este procedimento é repetido para todos os valores do banco de dados (PIRES e STRIEDER, 2006). A validação é feita comparando os valores estimados com os valores reais. Neste método espera-se uma regressão linear, $Z(x_i) = B_0 + B_1 Z(x_i)$, onde $B_0=0$ e $B_1=1$.

Tem-se também o Erro Padrão (SE) que é a divisão da diferença, entre o valor estimado e o valor observado, pela variância de Krigagem.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do procedimento geoestatístico efetuado, obteve-se três mapas de precipitação máxima média, relativos aos períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos, respectivamente, através do método geoestatístico da Krigagem como interpolador. Os valores estatísticos descritivos das precipitações máximas médias e os parâmetros dos semivariogramas para cada período de retorno se encontram ilustrados a seguir no Quadro 1.

Estatística dos Dados de Precipitação	Período de Retorno (em anos)		
	10	25	50
Média	95.56852	114.30541	130.91131
Variância	92.327	147.991	217.407
Desvio Padrão	9.60869	12.16515	14.74471

Parâmetros do Modelo Ajustado	Período de Retorno (em anos)		
	10	25	50
Modelo Semivariograma Utilizado	<u>Esférico</u>	<u>Exponencial</u>	<u>Esférico</u>
Efeito Pepita (C_0)	35.100	48.200	94.700
Patamar ($C+C_0$)	102.200	172.200	226.500
Alcance (A)	306500.000	394800.000	259200
Soma de Quadrados de Resíduos (RSS)	590.000	1479.000	3041.000
Coeficiente de Determinação (R^2)	0.873	0.856	0.841
Índice de Dependência Espacial (IDE)	0.657	0.720	0.582

Quadro 1 – Estatística das estações de precipitação e parâmetros dos modelos ajustados dos semivariogramas.

Diante dos parâmetros dos modelos ajustados para os períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos apresentados no Quadro 1, podemos visualizar seus respectivos semivariogramas apresentados pela Figura 3(a), 3(b) e 3(c).

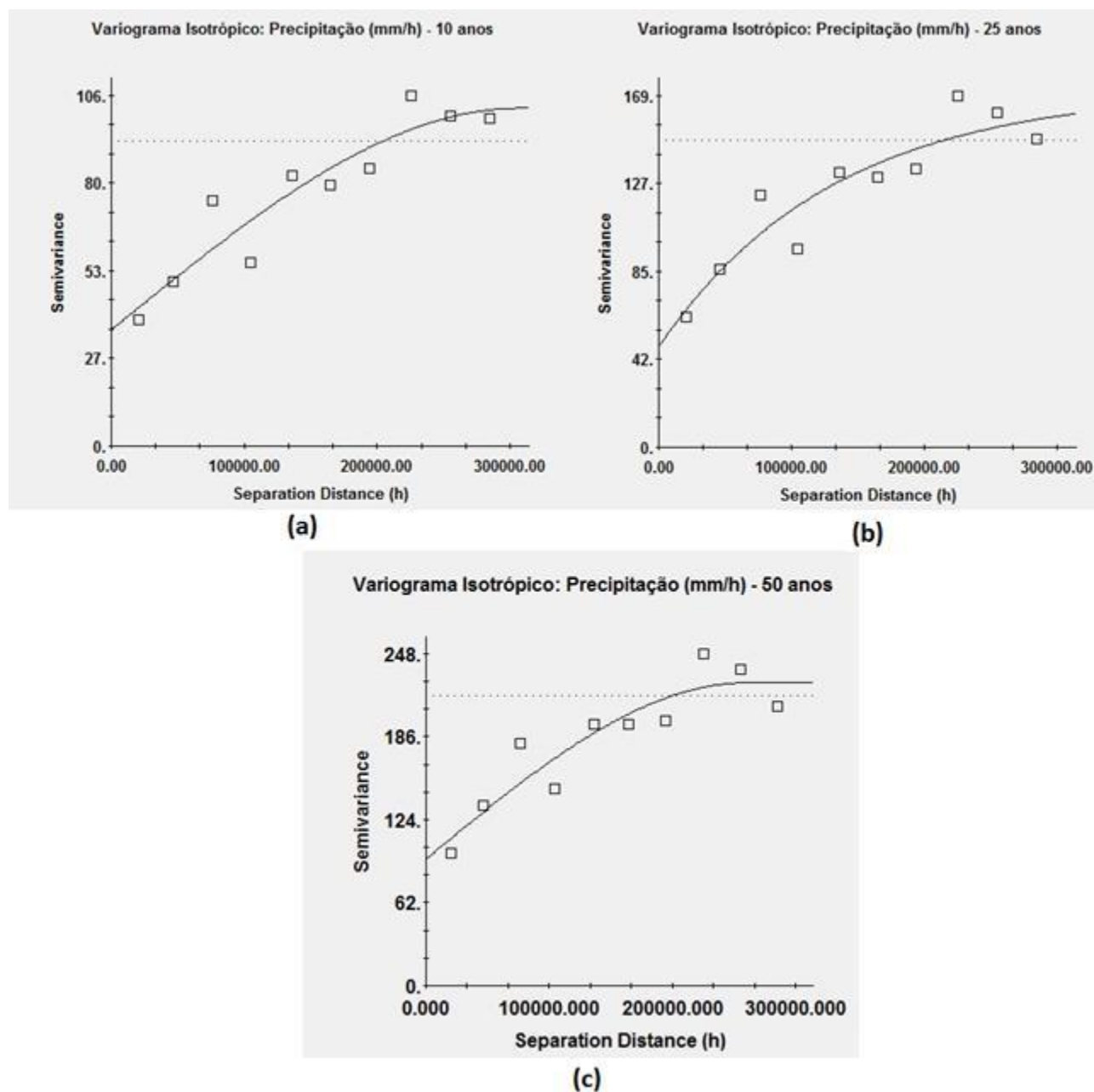


Figura 3 – Semivariogramas para o: (a) período de retorno de 10 anos; (b) período de retorno de 25 anos e (c) período de retorno de 50 anos.

Os semivariogramas possibilitam uma análise sobre as questões de autocorrelação da variável precipitação para os diferentes períodos de retorno. O decréscimo dos valores encontrados para R^2 ($R^2_{10\text{anos}} = 0,873$; $R^2_{25\text{anos}} = 0,856$; $R^2_{50\text{anos}} = 0,841$) evidenciam uma perda de autocorrelação, porém não significativa relativo a precipitação máxima média devido ao aumento do período de retorno. Esperado tal fato, uma vez que a precipitação se encontra diretamente relacionada com o tempo de retorno e o tempo de duração da chuva (t), sendo este último considerado igual a 30 minutos nas três situações, evidenciando a degradação devido ao período de retorno. A explicação para tal encontra-se relacionada a necessidade da correção da regressão linear que modela as bases históricas.

Outro fator, refere-se ao RSS indicando a mesma tendência analisada anteriormente para o R^2 , mas devemos ressaltar que para as dimensões das distâncias empregadas resulta em valores que permitem verificar uma minimização da soma dos quadrados dos resíduos.

Assim, como último identificador da qualidade dos parâmetros dos modelos ajustados elaborados trata-se do IDE, sendo classificado de acordo com o critério de Zimback (2001) em todos os semivariogramas obtidos como possuidores de uma dependência espacial moderada $\{25\% \leq (\text{IDE}_{10\text{anos}} = 65,7\%; \text{IDE}_{25\text{anos}} = 0,72,0\%; \text{IDE}_{50\text{anos}} = 58,2\% \leq 75\%\}$. No entanto, podemos verificar uma influência sobre o índice devido ao modelo empregado ao se observar o valor para o $\text{IDE}_{25\text{anos}} = 0,72$ (modelo exponencial), pois este apresenta características de modo a diminuir o Efeito Pepita (C_0) e consequentemente aumentando o Patamar ($C+C_0$), denotando assim uma maior ou menor dependência espacial relativo aos dados e ao modelo empregado e caracterizando o ajuste do modelo.

Diante da consolidação do ajuste dos modelos na determinação dos semivariogramas é necessário validar o interpolador. Neste caso, utilizou-se da Validação Cruzada, pois esta pressupõe uma análise entre valores estimados para precipitação através do interpolados e seus valores reais, permitindo assim avaliar as discrepâncias entre o real e os parâmetros dos modelos ajustados.

Os parâmetros determinados após a Validação Cruzada se encontram ilustrados no Quadro 2.

Validação Cruzada	Período de Retorno (em anos)		
	10	25	50
β_1	0.496	0.437	0.431
β_0 (Intercepta o eixo y)	48.250	64.463	74.723
R^2	0.055	0.040	0.034
SE	0.268	0.280	0.301

Quadro 2 – Parâmetros da Validação Cruzada dos semivariogramas ajustados.

Visando esclarecer a análise dos parâmetros da Validação Cruzada utilizaremos de uma analogia com a Figura 4.

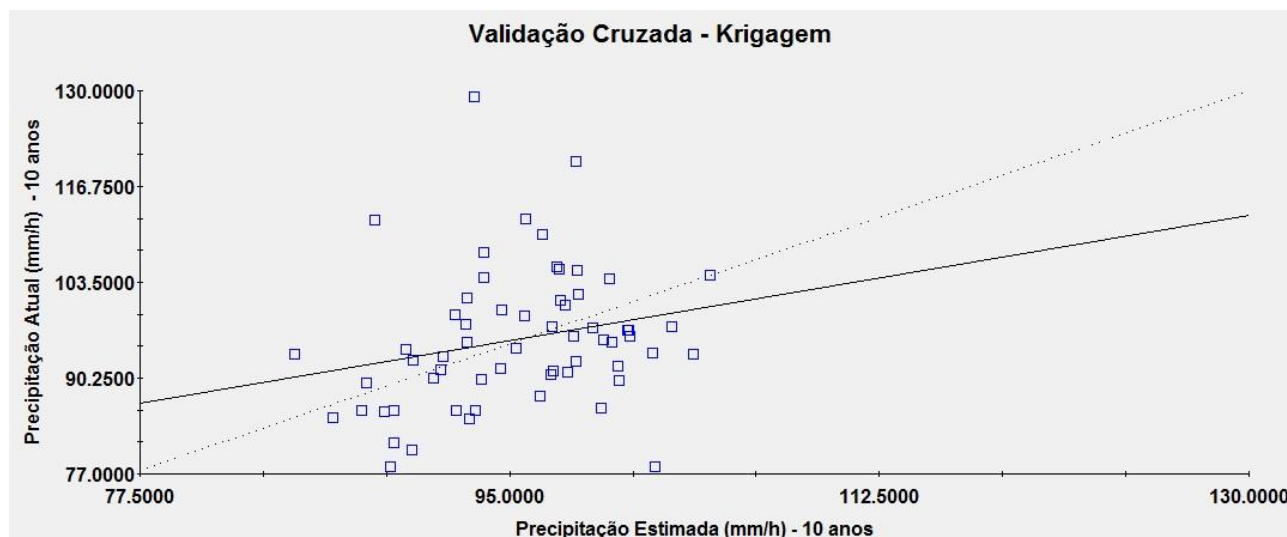


Figura 4 – Gráfico da Validação Cruzada de precipitação máxima média para o período de retorno de 10 anos.

Evidencia-se que através das regressões lineares da Validação Cruzada da Figura 4 a diferença entre os valores reais (linha pontilhada) e os valores semivariogramas ajustados (linha contínua). Logo, os parâmetros β_1 e β_0 que indicam o coeficiente angular e o valor onde a reta intercepta o eixo y, respectivamente, denotam que quanto mais semelhantes entre si os gráficos melhor é a validação, sendo o valor de β_1 ideal se próximo ou igual a 1 (igualando-se ao coeficiente angular da reta resultante da regressão linear dos valores reais de precipitação). Quanto ao Erro Padrão (SE) permite verificar a razão da diferença entre o valor estimado e o valor observado, pela variância de Krigagem, sendo ideal um SE igual ou próximo a zero, indicando as menores ou inexistência de diferenças entre os valores.

A seguir, encontram-se ilustradas pelas Figura 5(a), 5(b) e 5(c) os mapas gerados a partir da interpolação das precipitações máximas médias através da krigagem, realizada a partir dos semivariogramas de precipitação máxima média para os períodos de retorno de 10, 25 e 50 anos, respectivamente.

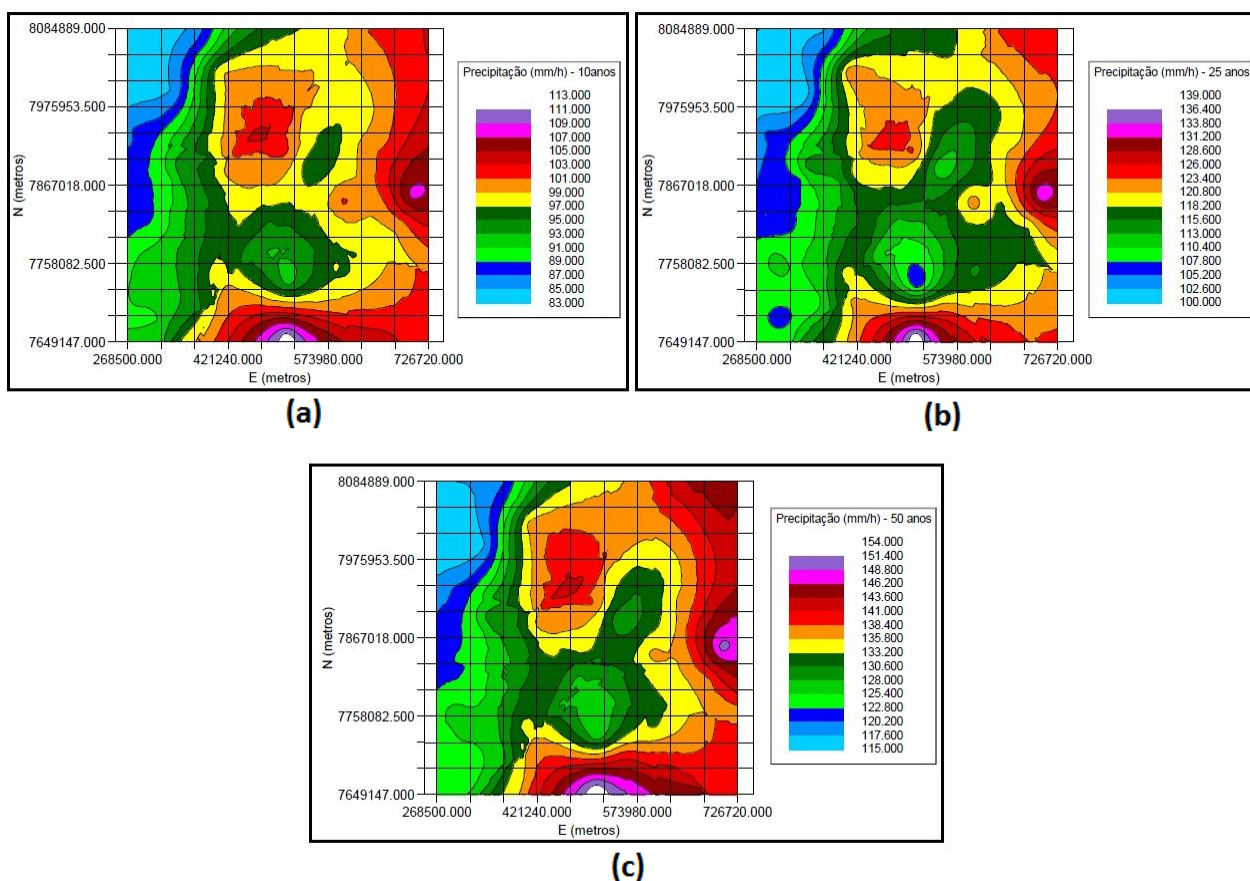


Figura 5 – Mapas de precipitação máxima média estimados para o: (a) período de retorno de 10 anos; (b) período de retorno de 25 anos e (c) período de retorno de 50 anos.

4 CONCLUSÃO

Tendo em vista que os dados analisados apresentaram autocorrelação espacial satisfatória temos que a interpolação através do método geostatístico de Krigagem apresenta-se como uma alternativa viável na determinação de precipitação máxima média em locais onde não dispõe de estação pluviométrica.

Acredita-se que uma amostragem próxima de uma malha regular gera resultados mais confiáveis, no entanto, a disposição geográfica das estações pluviométricas comumente encontram-se dispersas e com regiões com déficit de estações. Sendo assim, para fins de aplicação do método proposto, recomenda-se maior criteriosidade na avaliação da abrangência e adequação das localizações das estações pluviométricas na bacia a ser analisada.

Não se conclui a respeito de qual o melhor método de interpolação para fins de regionalização da precipitação máxima média, contudo, sabe-se que a Krigagem é um método não tendencioso e que gera as mínimas variâncias no resultado. Propõem-se para trabalhos futuros uma análise comparativa entre os métodos de interpolação tradicionais e o método geostatístico da Krigagem para todo Estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

ANA. **Proposta de Instituição do Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Resolução N° 5. Conselho Nacional De Recursos Hídricos, de 10 de Abril de 2000. Disponível em: <http://www.riodoce.cbh.gov.br/bacia_caracterizacao.asp>. Acesso em: 30 novembro 2011.

ACKERMANN, F.; EBNER, H.; KLEIN, H. Block triangulation with independent models. **Photogrammetric Engineering**, V. 39, p. 967-981, 1973.

CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PRUSKI, F. F.; HOLLANDA, M. P.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para os parâmetros das equações de chuvas intensa no Espírito Santo. **Ambi-Agua**, Taubaté, v.4, n.3, p. 82-92, 2009.

DEGASPARI, S. D.; VANALLI, T. R.; MOREIRA, M. R. G. **Apostila de Normalização Documentária (com base nas normas da ABNT)**. Disponível em <<http://www2.prudente.unesp.br/biblioteca/normalizacaobib.html>>. Acesso: 15 novembro 2006.

FREITAS, A. J., SILVA, D. D., PRUSKI, F. F., PINTO, F. A., PEREIRA, S. B., GOMES FILHO, R. R., TEIXEIRA, A. F., BAENA, L. G. N., MELLO, L. T. A., NOVAES, L. F. **Euações chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Companhia de Saneamento de Minas Gerais; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 65p.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da UFPR, 1994. 319p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística Básica e Aplicada**. Universidade Federal de Uberlândia, MG. 2004.

GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences, Version 7.0, Michigan USA: Gamma Design Software LLC, 2004. GS+ Help

GOODCHILD, M.; BRADLEY, P.; STEYAERT, I. **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. 488p.

IBGE. **A nova realização SIRGAS – SIRGAS 2000 – Grupo de trabalho I e III**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/geografia/seminário/sirgas/realizacao2000.html>>. Acesso: 6 março 2002.

LAURINI, R.; THOMPSON, D. **Fundamental of spatial information systems**. Toronto: Academic Press, 1992. 680p.

NEUSCH, T. **Multi-frequency and multi-polarization synthetic aperture radar for modeling hydrological parameters**. 1999. 128p. PhD Thesis - University of Karlsruhe, Karlsruhe.

PIRES, C. A. F.; STRIEDER, A. J. Modelagem Geoestatística de dados geofísicos, aplicada a pesquisa de au no prospecto volta grande (complexo intrusivo lavras do sul, RS, BRASIL). **Revista Geomática**, nº 1, Vol. 1, 2006.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos de solo e de Crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1996. 91p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

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

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. Tese (Livre-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia)- Faculdade de Ciências Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu. 114 p. 2001.