

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA CHUVA NA BACIA DO MÉDIO SÃO FRANCISCO: Estudo do período chuvoso 2010-2011 na sub-bacia 46**

Oswalcélio Mercês Furtunato

*Pesquisador em Geociências do Serviço Geológico do Brasil. Email: [osvalcelio.furtunato@cprm.gov.br](mailto:osvalcelio.furtunato@cprm.gov.br)*

Samara Samir Santos Conceição

*Estagiária do Serviço Geológico do Brasil. Email: [samarasamirs@gmail.com](mailto:samarasamirs@gmail.com)*

Myrla de Souza Batista Vieira

*Pesquisadora em Geociências do Serviço Geológico do Brasil. Email: [myrla.vieira@cprm.gov.br](mailto:myrla.vieira@cprm.gov.br)*

**RESUMO** – A ocorrência da precipitação é um dos fenômenos de maior importância na determinação do clima e a que mais afeta a produção agrícola devido a sua característica aleatória. Como a maioria dos demais fenômenos climáticos, apresenta uma variabilidade espacial contínua que pode ser detectada através de métodos geoestatísticos. Aliada aos métodos de estatística clássica a geoestatística torna-se uma poderosa ferramenta nos estudos hidrológicos. Para o estudo geoestatístico é fundamental o uso de uma função de estrutura denominada variograma, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno no espaço. Utilizando parâmetros da função variograma, pode-se fazer a krigagem, que é o método de interpolação através de médias móveis ponderadas, que possibilita minimização da variância de estimação. Neste trabalho analisou-se a variabilidade espacial da chuva. As séries temporais de precipitação mensal no período chuvoso 2010-2011 foram estudadas.

**Palavras-chave:** Variabilidade espacial, precipitação, geoestatística.

**ABSTRACT** – The rain occurrence is one of the most important phenomena to determinate the climate and a factor that affects the agricultural production due to its random character. Most of the other climatic phenomena, shows a continuous spatial variability that can be detected through geostatistical methods. Geostatistics becomes a powerful tool in the hydrological studies when associated with the classic statistical methods. In the geostatistical study, the use of a structural function named variogram is fundamental, allowing to numerically represent the variation of the phenomenon (precipitation) in space. Using the variogram parameters, we can do the kriging, that is an interpolation method, using weighted moving averages, which implies the minimization of variance estimation. In this paper, the spatial variability of the rain was analyzed. Monthly precipitation of historical series in the period between 2010-2011 had been studied.

**Palavras-chave:** Spatial variability, precipitation, geoestatística.

## INTRODUÇÃO

A precipitação pluviométrica tem grande importância na caracterização do clima de uma região, interferindo nas alternâncias de rendimento das culturas. A caracterização espacial e temporal da precipitação, como forma de estabelecer o comportamento hídrico de uma região, torna-se mais importante na medida em que se percebe uma alta variabilidade na sua ocorrência, inviabilizando a utilização de valores médios para subsidiar os estudos em recursos hídricos (FONTES *et al.*, 2007).

Na região Nordeste, onde as chuvas são muito freqüentemente de tipo convectivo, a variabilidade espacial das precipitações é muito elevada. Essa irregularidade e a deficiência do índice pluviométrico dessa região podem ser explicadas pela localização dessa região quando analisada a circulação atmosférica das massas de ar e o relevo, pois se apresenta como ponto de encontro das massas de ar, que têm sua ação parcialmente neutralizada pelas barreiras orográficas e perda de umidade no seu deslocamento (QUADRO, 2002).

A estimativa da precipitação numa bacia hidrográfica é um dos principais problemas que se apresentam em hidrologia. Trata-se, na prática, do problema de passagem de uma informação pontual, dada por observações em postos pluviométricos situados em pontos isolados, para valores sobre a área da bacia, obtendo-se assim o que se denomina "média espacial" da precipitação. Esta média espacial é usada como dado de entrada nos modelos hidrológicos chuva-vazão, para dimensionamento de obras hidráulicas (AMARAL *et al.*, 2004).

Para o estudo pluviométrico é necessária a disponibilidade de dados em diversos pontos da região em estudo, para se determinar valores característicos que representem o seu comportamento e a utilização de metodologias apropriadas que consigam detectar e descrever a espacialização da ocorrência da precipitação. Entretanto, a extrapolação de medidas pontuais de chuva visando à estimativa da distribuição espacial em áreas extensas necessita incorporar fatores que descrevam a dependência espacial possibilitando a obtenção de modelos de interpolação mais robustos (SILVA *et al.*, 2003).

Para geração de mapas que representem a variabilidade espacial da precipitação em uma bacia hidrográfica é necessária a interpolação dos dados pontuais obtidos por meio de pluviômetros ou pluviógrafos componentes de uma rede pluviométrica. A interpolação espacial converte dados de observações pontuais em campos contínuos, produzindo padrões espaciais que podem ser comparados com outras entidades espaciais contínuas (Queiroga *et al.*, 2007). Mine (2006) destaca que ainda é comum o uso de métodos manuais em hidrologia para interpolação dos dados de precipitação, sendo freqüentemente utilizado o Método do Quadrado da Distancia e o os Polígonos de Thiessen. A autora ainda destaca que estes métodos são na maioria dos casos considerados arbitrários e inflexíveis, e defende o uso de métodos geoestatísticos, por serem facilmente automatizados e apresentarem resultados confiáveis a partir de um modelo explícito da variabilidade espacial.

Ao longo do tempo vêm sendo utilizadas várias técnicas para representar espacialmente variáveis cujos valores são medidos em pontos bem definidos no espaço, desde uma simples análise visual de mapas de isolinhas, passando pela utilização de técnicas de estatística clássica univariável, até técnicas de estatística multivariável.

Os métodos estatísticos, uni ou multivariáveis, classicamente utilizados não consideram a repartição espacial das variáveis estudadas, a saber, nem sua posição relativa (coordenadas geográficas), nem a variabilidade ou as correlações que porventura existam em função da distância de um ponto de observação a outro. Da mesma forma, a maior parte dos métodos de interpolação utilizados, também não consideram a variabilidade espacial da variável estudada.

A geoestatística, desenvolvida inicialmente por G. Matheron, Matheron (1965), visando à solução de problemas de estimação de reservas minerais, é um método topo-probabilístico, isto é, que utiliza um modelo probabilístico e a posição espacial das observações, para estudar a variabilidade dos valores observados. A principal característica da geoestatística é o uso de variogramas, para quantificar o modelo de correlação espacial dos dados e também técnicas de krigagem, que utilizam esses modelos de correlação espacial para estimar e interpolar os dados.



## Métodos

Foi realizada uma análise estatística dos dados coletados com o objetivo de avaliar a variação das chuvas mensais, calculados os parâmetros descritivos: média, desvio padrão e coeficiente de variação. Sendo também testado o ajuste da distribuição de freqüência à distribuição normal e log-normal, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov (DKS) no nível de significância de 5%, utilizando o programa STATISTICA® (StatSoft Inc., 2001).

Para a análise da variabilidade espacial empregou-se métodos geoestatísticos. Geoestatística, ou Teoria das Variáveis Regionalizadas, é a ciência que estuda a variabilidade de uma quantidade através de um modelo probabilístico associado à consideração da posição relativa das observações no espaço e possíveis correlações dessas observações em função da distância de separação entre elas.

A estrutura de correlação de uma Variável Regionalizada (VR) é identificada através de uma função conhecida como variograma. A função variograma, denominação usual para o semivariograma, relaciona a metade da variância (semivariância) das diferenças entre valores observados com a distância de separação desses pontos definindo um semivariograma experimental. A função do semivariograma pode ser definida como:

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

onde:

$N(h)$ : número de pares de valores medidos,  $Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ , separados por uma distância

$d = |h|$ ,

$Z(x_i)$  e  $Z(x_i + h)$ : valores da  $i$ -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $x_i$  e  $x_i + h$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , separados por  $d = |h|$ .

A parametrização do variograma é normalmente feita ajustando-se um modelo paramétrico ao semivariograma experimental, destacando-se em pesquisas anteriores o emprego dos seguintes modelos no ajuste: modelo Esférico (Esf), o modelo Exponencial (Exp) e o modelo Gaussiano (Gauss). Os parâmetros a ajustar são aqueles relacionados à caracterização do semivariograma (Figura 3), tais como: o efeito pepita, o patamar e o alcance (VIEIRA, 2000).

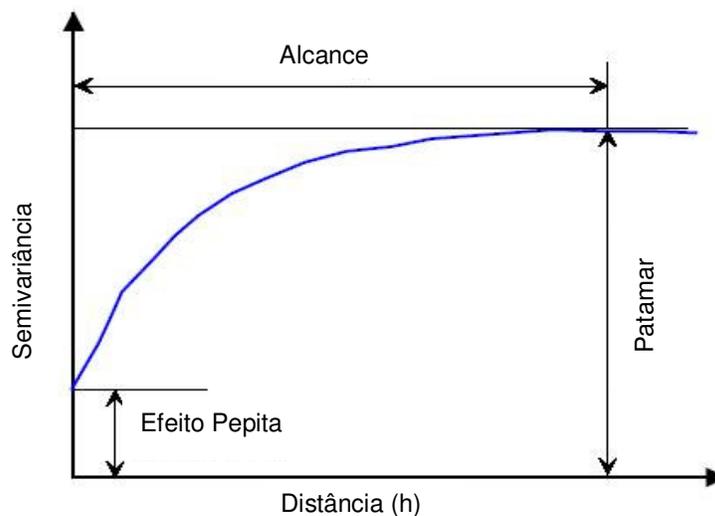


Figura 3 – Parâmetros relacionados à caracterização do semivariograma

Os semivariogramas experimentais foram calculados e modelados com o programa geoestatístico VARIOWIN® (PANNATIER, 1996). A seleção dos modelos teóricos se baseou na inspeção visual e no índice IGF (*Indicative goodness of fit*) dos semivariogramas experimentais.

Após ter-se encontrado os melhores ajustes de cada modelo e proceder à seleção final do melhor, é necessário validar este para saber se o mesmo é adequado e consistente com o conjunto dos dados amostrais. Um dos métodos utilizados é o da validação cruzada, que é baseado na técnica de interpolação de kriging.

Determinado o modelo de melhor ajuste ao semivariograma experimental, a técnica de interpolação kriging é utilizada para representar a variabilidade espacial e busca de correlações das variáveis em estudo, para diferentes períodos (VIEIRA, 2000). Os mapas de distribuição espacial da precipitação na área de estudo foram produzidos com o programa ArcMap na versão 8.1 (ESRI, 2001), que utiliza a Krigagem ordinária para a interpolação de dados.

Para a caracterização do grau de variabilidade, foram analisados os valores de coeficiente de variação (CV), conforme sugerido por Warrick & Nielsen (1980), os quais sugerem os limites  $CV < 12\%$ ,  $12 \leq CV \leq 52\%$  e  $CV > 52\%$  para as propriedades de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente.

Segundo classificação proposta por Cambardella et al. (1994), os semivariogramas podem ser considerados como caracterizando forte, moderada ou fraca dependência espacial entre os dados. O critério proposto para classificação é a relação  $[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$ . Valores inferiores a 25% caracterizam forte (Fort) dependência espacial, entre 25% e 75% moderada (Mode) e acima de 75%, fraca (Frac) dependência espacial.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos resultados mostrados na Tabela 1 é possível verificar que a distribuição normal dos dados foi formalmente confirmada comparando-se os valores de  $D_t$  (KS) com o valor admissível  $D_{c,n,5\%}$  (KS) do teste de Kolmogorov-Smirnov.

De acordo com a classificação sugerida por Warrick & Nielsen (1980), os valores de CV denotaram uma alta variabilidade para os dados do mês de janeiro de 2011. Sendo média para os demais meses do período avaliado.

Tabela 1 - Resumo da estatística descritiva dos dados para o período analisado

Período Analisado	Estatística Descritiva dos Dados					
	n	Média	Desvio Padrão	CV (%)	$D_t$ (KS)	$D_{c,n,5\%}$ (KS)
Outubro de 2010	45	96,3 mm	44,9 mm	46,7	0,073	0,202
Novembro de 2010	45	175,3 mm	77,4 mm	44,2	0,128	0,202
Dezembro de 2010	45	169,5 mm	62,1 mm	36,7	0,104	0,202
Janeiro de 2011	43	137,8 mm	76,5 mm	55,5	0,135	0,206
Fevereiro de 2011	43	146,7 mm	66,5 mm	45,4	0,099	0,206
Março de 2011	40	208,7 mm	96,9 mm	46,4	0,203	0,212
Trimestre de 2010	45	147,0 mm	44,9 mm	30,5	0,073	0,202
Trimestre de 2011	45	164,6 mm	57,5 mm	34,9	0,080	0,202
Média do Período	45	155,6 mm	42,8 mm	27,5	0,088	0,202

$D_t$  (KS) =  $\max [F(X)-G(X)]$ , em que  $F(X)=P(X \leq x)$  e  $G(X)$  são as freqüências acumuladas dos valores observados;

$D_{c,n,5\%}$  (KS) é o valor crítico do teste KS para  $n= N^\circ$  de pontos.

Na Tabela 2 pode ser visualizado o resultado da análise geoestatística dos dados com o modelo de melhor ajuste e seus respectivos parâmetros (efeito pepita =  $C_0$ ; patamar =  $C_0+C_1$  e alcance =  $a$ ), a dependência espacial e o índice IGF para o período analisado.

Os resultados mostram que os dados apresentaram dependência espacial, ou seja, a variação média entre duas observações é uma função da distância entre elas. Dos principais modelos de semivariogramas teóricos testados, os que melhor se ajustaram ao semivariograma experimental foram o modelo Exponencial (Exp) e o Esférico (Esf).

Tabela 2 - Resumo da análise geoestatística dos dados para o período analisado

Período Analisado	Análise Geoestatística dos Dados					
	Modelo	$C_0$	$C_0+C_1$	$[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$	$a$ (km)	IGF
Outubro de 2010	Esf	204,7	3071	6,67 (Fort)	102,5	0,073
Novembro de 2010	Exp	3918	5140	76,22 (Frac)	125,5	0,239
Dezembro de 2010	Exp	761	5510	13,81 (Fort)	127,5	0,201
Janeiro de 2011	Exp	2381	5910	40,29 (Mode)	124,9	0,107
Fevereiro de 2011	Exp	3541	4006	88,39 (Frac)	124,5	0,186
Março de 2011	Exp	3325	13443	24,73 (Fort)	122,5	0,117
Trimestre de 2010	Esf	425	3115	13,64 (Fort)	121,5	0,027
Trimestre de 2011	Esf	1561	6165	25,32 (Mode)	127,0	0,105
Média do Período	Esf	654	4371	14,93 (Fort)	126,5	0,203

Conforme a classificação proposta por Cambardella *et al.* (1994), para os meses de novembro de 2010 e fevereiro de 2011 a precipitação tem uma dependência espacial caracterizada como fraca, sendo moderada para janeiro de 2011 e forte para os demais meses do período de avaliação desta variável.

Percebe-se também para o mês de outubro de 2010 a menor relação de dependência espacial (6,67%) quando comparado com os outros meses do período avaliado. Uma provável explicação para este fato pode ser devido ao baixo valor do total de chuva observado para esse mês, já que para os outros meses do período analisado ocorreram precipitações superiores ao que foi contabilizado para o referido mês. Ou seja, a menor precipitação está associada à menor dependência espacial.

Os alcances foram praticamente os mesmos, variando de 102,5 a 127,0 km. Amaral *et al.* (2004) fazendo uma análise espacial de eventos máximos de precipitação pelo método geoestatístico nas bacias do alto São Francisco e alto rio Doce observaram que, na grande maioria dos anos avaliados, o valor do alcance ficou entre 110 e 200 km.

Nas Figuras 4 a 9 são apresentados os mapas da distribuição espacial da precipitação na área da sub-bacia 46, os quais foram produzidos a partir da análise geoestatística e a interpolação por krigagem ordinária utilizando o programa ArcMap na versão 8.1 (ESRI, 2001).

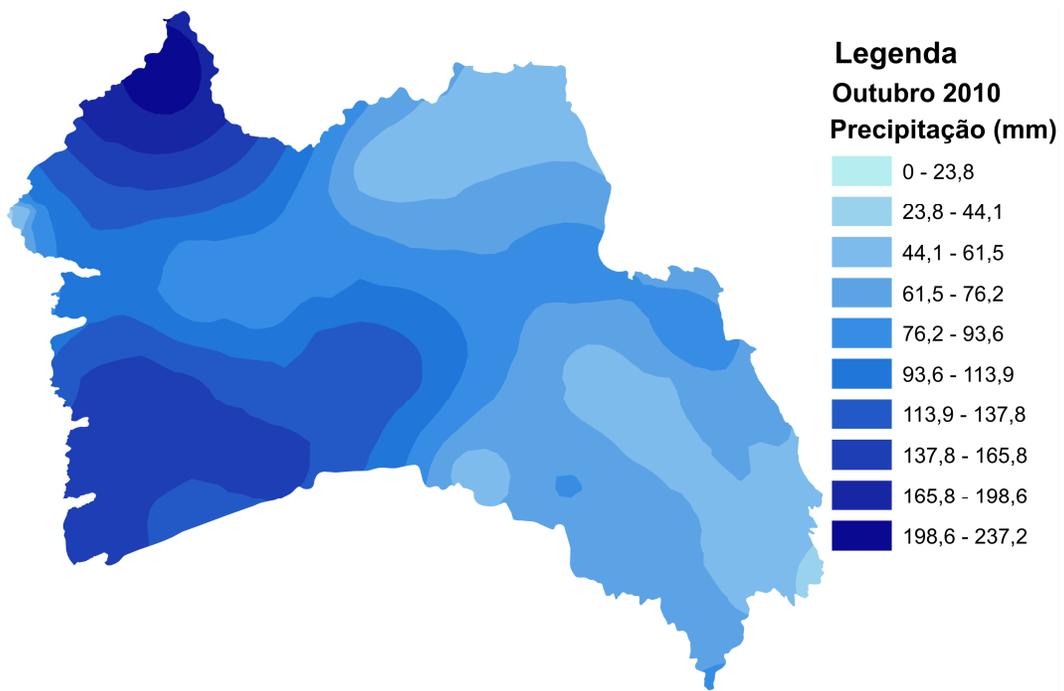


Figura 4. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de outubro de 2010.

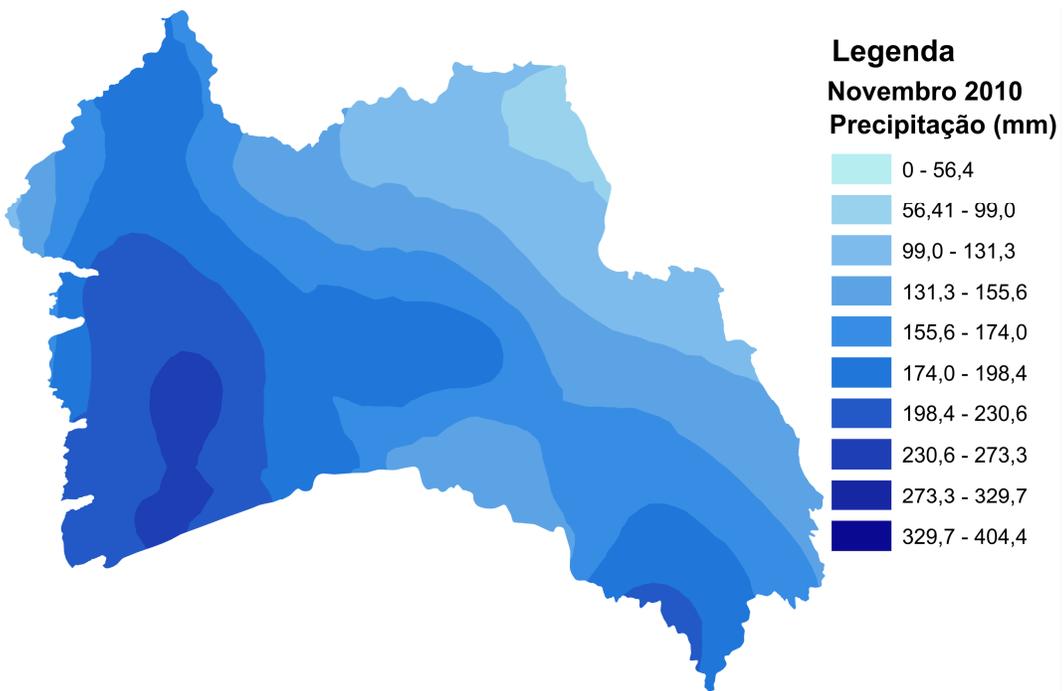


Figura 5. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de novembro de 2010.

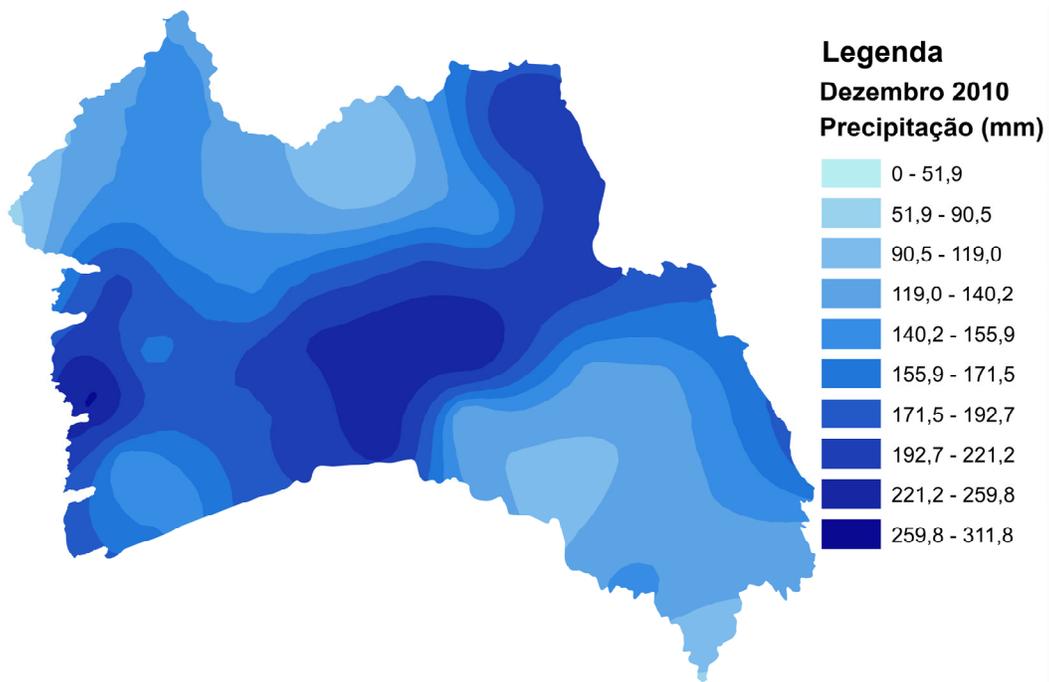


Figura 6. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de dezembro de 2010.

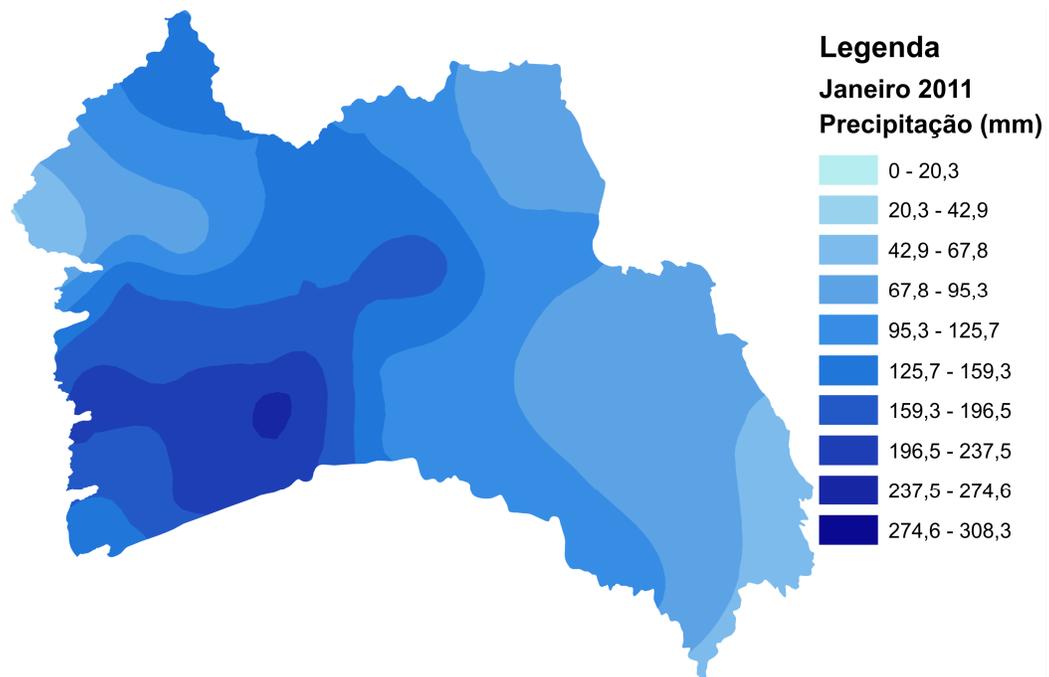


Figura 7. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de janeiro de 2011.

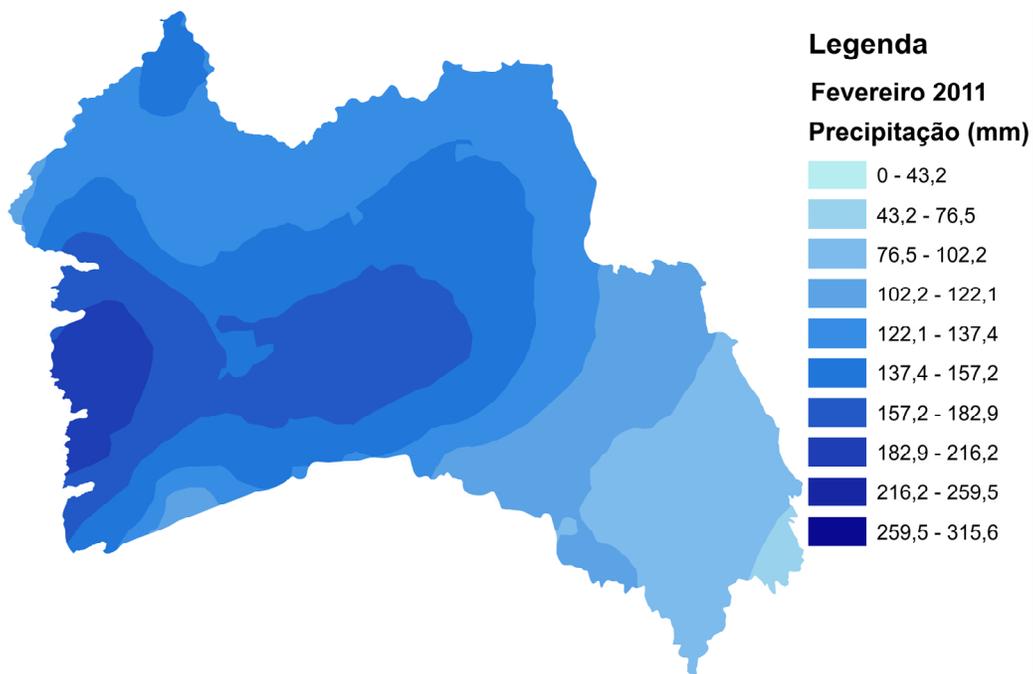


Figura 8. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de fevereiro de 2011.

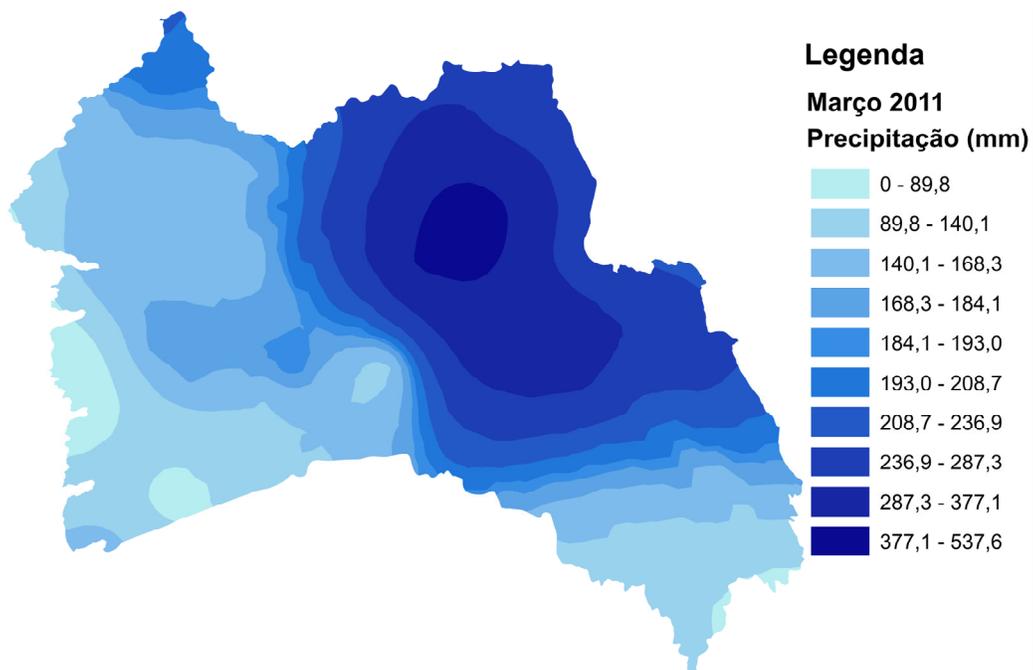


Figura 9. Distribuição Espacial da precipitação (mm) na sub-bacia 46 no mês de março de 2011.

Os cenários de distribuição espacial demonstraram que, mesmo em períodos de regime bem diferenciados, a precipitação mantém aproximadamente um padrão de distribuição semelhante corroborando com o regime de distribuição das chuvas na área da sub-bacia 46.

## CONCLUSÃO

As interpolações demonstraram isolinhas com faixas que corresponderam ao atual conhecimento sobre a distribuição espacial das precipitações e seus padrões de ocorrências na área de estudo.

Os resultados obtidos são coerentes com os mecanismos de formação de precipitação atuantes na sub-bacia 46 e evidenciam a alta variabilidade espacial e temporal da precipitação influenciada por estes sistemas.

Os mapas produzidos a partir da análise espacial permitem identificar na sub-bacia 46 quais são as áreas onde há maior ocorrência de chuva. Estas informações são úteis quando se analisa a possibilidade de se disponibilizar uma área para agricultura.

O conhecimento da estrutura de precipitação, pelos variogramas e estimativa da precipitação por krigagem fornecem subsídio para os estudos de modelagem chuva-vazão.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da ANA (Agência Nacional de Águas) e da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) pela disponibilização dos dados para a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AMARAL, I. R.; GRIPP, A. H.; VERSIANI, B. R. (2004). Análise espacial de eventos máximos de precipitação pelo método geoestatístico estudo das bacias do alto São Francisco e alto rio Doce. In: Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís – MA, nov. 2004, CD-ROM.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIM, T. B.; KARLEN, D. I.; TURCO, R. F.; KOOPKA, A. E. (1994). "Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils". Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 58, n. 5, p.1501-1511.

ESRI. Inc. ArcMap versão 8.1. Copyright – US Patent No. 5710835. 2001.

FONTES, A. S.; CIDREIRA, M. A. S.; ALMEIDA, R. B.; MIRANDA, J. G. V.; SILVA, E. D.; SANTANA, C. N.; GONZÁLES, A.; MEDEIROS, Y. D. P. (2007). Estudo da dependência espacial da precipitação no Semi-Árido baiano – Bacia do Rio Jacuípe. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo – SP, nov. 2007, CD-ROM.

MATHERON, G. (1965). "Les variables regionalisées et leur estimation". Paris, Masson et Cie,. apud JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. Mining Geostatistics (1993). New York: Academic Press.

MINE, M. R. M. (2006). Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade da precipitação. In: Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá – PE, nov. 2006, CD-ROM.

PANNATIER, Y. Variowin: Software for spatial data analysis in 2D Springer, New York. 1996.

QUADRO, M. F. L et al. (2002).Climatologia de Precipitação e Temperatura. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE. Disponível: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 13 jul.

QUEIROGA, Y. G. A.; ASSUNÇÃO, R.; SILVA, F. E. O. (2007). Análise das previsões de precipitação do modelo ETA realizadas durante a operação do sistema de alerta da bacia do rio Doce – o uso da krigagem na interpolação espacial. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo – SP, nov. 2007, CD-ROM.

SILVA, J. W.; GUIMARÃES, E. C.; TAVARES, M. (2003). Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 27, n. 3, p.665-674.

STATSOFT. STATISTICA: Data analysis software system. Version 6. [S. L.]. 2001.

VIEIRA, S. R. (2000). Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R., (eds).Tópicos em Ciências do Solo. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa-MG, v 1, p.1-54.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. (1980). Spatial variability of soil physics properties in the field. In: HILLEL, D. (ed) Applications of soil physics. New York, Academic Press, p.319-344.