

Recebido em 10/2017. Aceito para publicação em 05/2018.

MAPAS DE PROBABILIDADES PARA O TRIMESTRE CHUVOSO NO ESTADO DA PARAÍBA

PROBABILITY MAPS FOR THE RAINY QUARTER IN THE STATE OF PARAÍBA

Elias Silva de Medeiros¹
Ricardo Alves de Olinda²

Resumo: O Estado da Paraíba possui um clima caracterizado pela irregularidade espacial e temporal da precipitação, o que ocasiona desastres climáticos. Sabe-se, também, que, o comportamento da precipitação no Estado da Paraíba é bastante oscilante entre as microrregiões. Assim, para analisar esse comportamento foi proposto neste trabalho um estudo no qual se pretende investigar a dinâmica das variáveis regionalizadas. Para isso, foram utilizadas duas técnicas fundamentais que fazem parte da metodologia geoestatística, o semivariograma e a krigagem. O presente trabalho teve como objetivo mapear as microrregiões do Estado quanto à precipitação pluvial durante o Trimestre Chuvoso, utilizando-se uma abordagem geoestatística, buscando, assim, identificar quais dessas microrregiões estão em risco devido ao baixo índice pluviométrico. Por meio do mapa de probabilidade, observou-se que as microrregiões Cariri/Curimataú, Agreste e Brejo se encontram em risco, pois há uma alta probabilidade do nível pluviométrico mediano durante o Trimestre Chuvoso (Fevereiro, Março e Abril) estar entre 50 e 100 mm.

Palavras-chave: Escassez de chuvas; microrregiões; geoestatística.

Abstract: Paraíba State has a climate characterized by spatial and temporal irregularity of rainfall, which causes climate disasters. It is also known that the behavior of rainfall in Paraíba State is very oscillating among the microregions. To analyze this behavior, in this paper, a study was proposed with the intention of investigating the dynamics of regionalized variables. For this, two fundamental techniques that are part of the geostatistical methodology were used, semivariogram and kriging. The present study aimed to map the microregions of the State regarding rainfall during the Rainy Quarter using a geostatistical approach, seeking thereby to identify which of these microregions are at risk due to low amounts of rainfall. Using the probability map, we observed that the microregions Cariri/Curimataú, Agreste and Brejo are at risk because there is a high probability for the median level of rainfall during the Rainy Quarter (February, March and April) to be between 50 and 100 mm.

Keywords: Shortage of rainfall; microregions; geostatistics.

1. INTRODUÇÃO

O Estado da Paraíba, localizado no setor leste do Nordeste do Brasil, tem um clima que se caracteriza pela irregularidade espacial e temporal da precipitação, o que ocasiona desastres climáticos, tais como, secas, veranicos e enchentes. Tais fatos têm motivado o estudo dessas características sob os mais variados enfoques, uma vez que ele serve de base à obtenção de informações essenciais a diversas atividades, como, por exemplo, dimensionamento de obras hidráulicas, irrigação, prevenção e controles de enchentes.

¹ Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil. E-mail: eliasestatistica@gmail.com.

² Docente e Pesquisador Universidade Estadual da Paraíba, Brasil. E-mail: prof_ricardo@cct.uepb.edu.br.

De acordo com Silva, Brito e Costa. (2004), o Estado da Paraíba é caracterizado pela divisão em duas grandes áreas com períodos chuvosos diferentes. Uma delas é ao Leste da Serra da Borborema, representada pelas microrregiões do Litoral, Brejo e Agreste, e outra a Oeste, com as microrregiões do Cariri/Curimataú, Sertão e Alto Sertão. A representação gráfica dessas microrregiões pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - Localização geográfica das microrregiões do Estado da Paraíba.



Fonte: Silva, Brito e Costa (2004)

As microrregiões do Cariri/Curimataú, Sertão e Alto Sertão são conhecidas pela baixa precipitação pluvial durante todo o ano. Segundo os mesmos autores, verificou-se que o trimestre mais chuvoso, nessas microrregiões, é formado pelos meses fevereiro, março e abril.

O mapeamento da precipitação pluviométrica é de suma importância para identificar quais dessas microrregiões estão em risco devido a pouca quantidade de chuvas. Para isso, será utilizada a metodologia geoestatística para construção de mapas de riscos.

O conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial, surgiu a partir de Krige (1951), ao trabalhar com dados de concentração de ouro. Matheron (1963), baseado nas observações de Krige (1951), desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, a partir dos fundamentos da geoestatística, utilizando, duas técnicas: o semivariograma e a krigagem. Esta teoria vem sendo aplicada em diversas áreas de pesquisa, tais como, meteorologia, ecologia, geologia e hidrologia, desde que as variáveis estudadas apresentem dependência espacial.

O presente trabalho teve como objetivo mapear as microrregiões do Estado da Paraíba, quanto à precipitação, durante o Trimestre Chuvoso, utilizando uma abordagem geoestatística, buscando-se, assim, identificar quais dessas microrregiões estão em risco devido ao baixo índice pluviométrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O Estado da Paraíba (ver Figura 1) está situado a leste da região nordeste do Brasil, e apresenta uma área de 56.469,778 km². Encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18" de latitude sul e entre os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45" de longitude oeste.

Os dados utilizados, neste trabalho, foram obtidos na Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESAs), que é responsável pelas informações da precipitação pluvial no Estado. O conjunto de dados é referente a séries de observações diárias da precipitação registradas para 253 postos pluviométricos, distribuídos nos 223 municípios paraibanos, no período de 1994 a 2011. São analisados os totais mensais durante esse período e, em seguida, para cada posto pluviométrico, foram extraídos os valores medianos para o Trimestre Chuvoso (fevereiro, março e abril).

A implementação computacional foi realizada utilizando-se o programa R (R CORE TEAM, 2013). Para as análises geoestatísticas, foi utilizado, neste trabalho, o programa R/geoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

Para verificar a normalidade dos dados, foi utilizada a transformação Box-Cox. De acordo com Box e Cox (1964), quando o modelo gaussiano não descreve bem os dados e a variável resposta assume valores positivos, essa transformação mantém as características dos dados originais.

Na modelagem, foram analisados modelos com e sem estrutura de dependência espacial. Dos que apresentam dependência espacial, existem dois tipos de modelos de variogramas teóricos: os modelos com e sem patamar e, estes podem, ou não, apresentar o efeito pepita. Dentre os que apresentam patamar, os mais utilizados são: o modelo esférico (Matheron), o modelo exponencial (Formery) e o modelo gaussiano (Gaussian) (GUERRA; SALES, 1988).

O efeito pepita (τ^2) corresponde à cota do ponto em que o semivariograma corta o eixo das ordenadas, o alcance (ϕ) corresponde ao conceito de dependência espacial, marcando a distância a partir da qual as amostras se tornam independentes, o patamar ($\sigma^2 + \tau^2$) corresponde ao ponto onde toda semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total obtida pela estatística clássica. Quando o efeito pepita (τ^2) for, aproximadamente, igual ao patamar ($\sigma^2 + \tau^2$), denomina-se efeito pepita puro, demonstrando-se que a amostra não recebe influência espacial, (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). A seguir, serão apresentadas as expressões dos modelos de correlações do semivariograma com patamar que foram estudadas.

Os modelos mais clássicos com patamar são:

- Modelo Esférico ou Modelo de Matheron, Equação 1. É o modelo mais comum,

podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal,

$$\rho(h) = \begin{cases} \tau^2 + \sigma^2 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{\phi} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\phi} \right)^3 \right] & \text{se } 0 \leq h \leq \phi \\ \tau^2 + \sigma^2 & \text{se } h > \phi \end{cases} \quad (1)$$

- Modelo Matérn, Equação 2, que está diretamente relacionado com a distribuição Gama,

$$\rho(h) = \frac{2^{2-\nu}}{\Gamma(\nu)} \left(\frac{h}{\phi} \right)^\nu K_\nu \left(\frac{h}{\phi} \right), h > 0. \quad (2)$$

Na Equação 2, $K_\nu(\cdot)$ é a função Bessel modificada de terceiro grau de ordem $\nu > 0$ e $\Gamma(\nu)$ é a função Gama. O parâmetro ν está relacionado à suavidade do processo.

- O Modelo Gaussiano ou Parabólico, Equação 3, apresenta um comportamento parabólico na origem e tem como equação o modelo a seguir:

$$\rho(h) = \begin{cases} \tau^2 + \sigma^2 \left[1 - e^{-\frac{h^2}{\phi^2}} \right] & \text{se } 0 \leq h \leq \phi \\ \tau^2 + \sigma^2 & \text{se } h > \phi \end{cases} \quad (3)$$

Outras metodologias que permitem estudar a dependência espacial e a obtenção de semivariogramas ajustados foram propostas também por Diggle e Ribeiro Junior (2002).

Com o intuito de comparar os modelos com diferentes estruturas espaciais, foi utilizado o teste de razão de verossimilhanças, o qual é somente válido para modelos sequencialmente reduzidos. Segundo Rao (1973), a estatística do teste da razão de verossimilhanças é definida como:

$$LRT = 2 \times \ln \left(\frac{ML1}{ML2} \right). \quad (4)$$

Na Equação 4, $ML1$ e $ML2$ são os valores máximos obtidos para os logaritmos das funções de verossimilhanças do modelo reduzido e do modelo com um ou mais componentes espaciais adicionados, respectivamente. Para seleção de modelo, compara-se a quantidade calculada (LRT) com o quantil da distribuição qui-quadrado com número de graus de liberdade igual à diferença entre o número de parâmetros dos modelos em questão.

Para comparar os ajustes dos modelos com diferentes funções de correlação foi utilizado o critério de informação de Akaike – AIC. Os autores Burnham e Anderson (2004) justificam o uso dessa estatística. Esse critério é baseado na teoria de decisão e é definido como a quantidade:

$$AIC = 2 \times \ln(ML1) - 2 \times p. \quad (5)$$

Na Equação 5, p representa o número de parâmetros contido no modelo $ML1$. De

acordo com esse critério, o melhor modelo ajustado será aquele que possuir o menor valor do *AIC*.

Para verificar a existência de dependência espacial, foi realizada a análise variográfica da precipitação por meio do semivariograma e, em seguida, determinado o Índice de Dependência Espacial (*IDE*).

O grau de dependência espacial, Equação 6, proposto por Cambardella et al. (1994), é calculado por meio da seguinte expressão,

$$IDE = \frac{\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2} \times 100\%. \quad (6)$$

Esses autores propuseram os seguintes intervalos para avaliar a porcentagem da semivariância do Efeito Pepita:

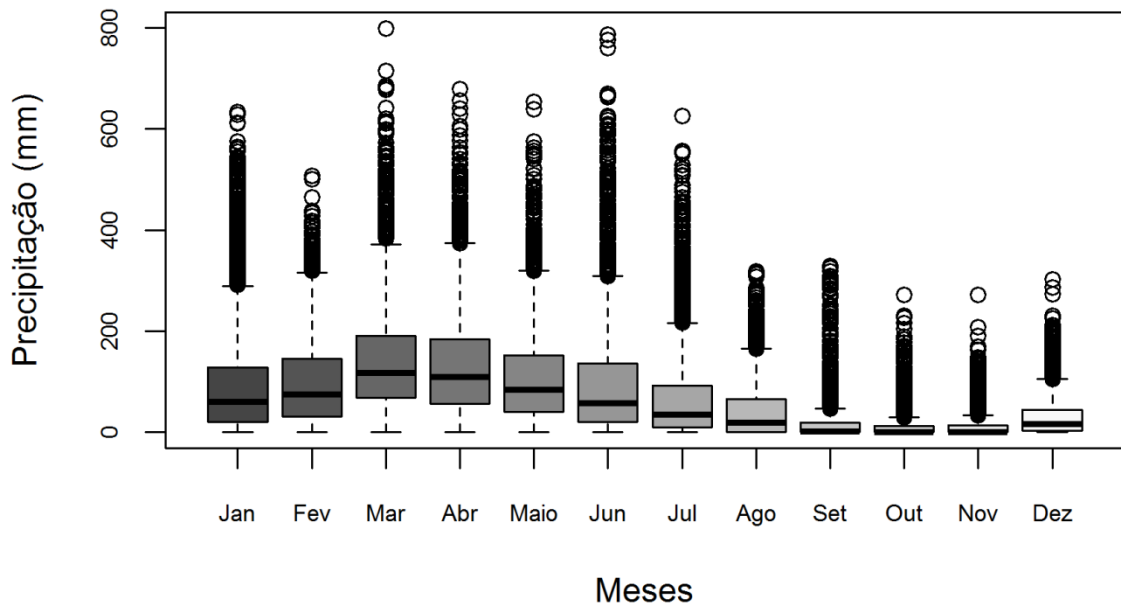
- $IDE \leq 25\%$ - forte dependência espacial;
- $25\% < IDE < 75\%$ - moderada dependência espacial;
- $IDE \geq 75\%$ - fraca dependência espacial.

Para a construção dos mapas de probabilidade, foi utilizada a krigagem por simulação (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2002; DIGGLE; LOPHAVEN, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

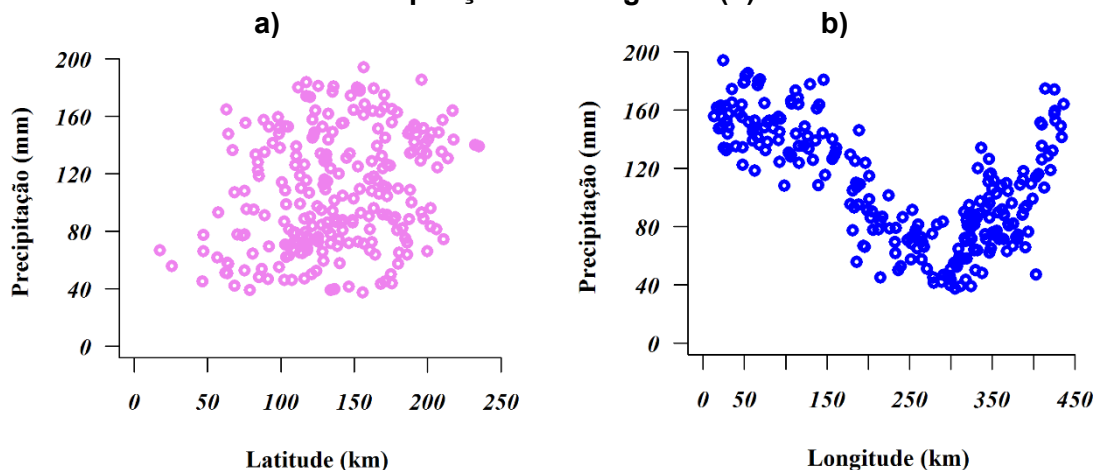
Na Figura 2, estão os gráficos de Box Plot para os doze meses do ano, referente ao período de 18 anos (1994 a 2011). Existe uma grande concentração do período chuvoso na Paraíba durante o primeiro semestre. Em todos os meses, a variável (precipitação) apresenta um comportamento assimétrico. Esse comportamento é uma característica climática na região, uma vez que a distribuição irregular está presente em todo o estado. Essa distribuição irregular das chuvas fica clara quando é analisada a distribuição das chuvas entre as mesorregiões da Paraíba. As chuvas no Sertão do Estado ocorrem, basicamente, de janeiro à abril, na Zona da Mata as chuvas, em média, distribuí-se durante todo o ano. Com base nisso, é notório a grande variabilidade espacial e temporal das chuvas no Estado (MACEDO et al., 2010).

Figura 2 - Box Plot dos totais mensais da precipitação pluviométrica dos 253 postos pluviométricos espalhados em 223 municípios paraibanos, referente ao um período de 18 anos (1994 a 2011).



Na Figura 3 (a), nota-se que há aumento no índice pluviométrico saindo do Sul para o Norte. Já na Figura 3 (b), fica evidente uma relação, provavelmente quadrática, da distribuição da precipitação, quando analisada do Leste ao Oeste. Ainda, nessas figuras, observa-se que na região do Litoral ocorrem altos índices pluviométricos, já, nas regiões do Cariri/Curimataú, esse comportamento é evidenciado de forma contrária, apresentando baixos níveis de precipitação.

Figura 3 - Análise da relação entre a Precipitação e a latitude (a). E entre a Precipitação e a Longitude (b).



Considerando-se que os valores medidos apresentam dependência espacial, os dados foram analisados com alguns modelos que incluíram a estrutura de dependência espacial $S(x)$.

Para ajustar um modelo teórico ao semivariograma amostral, foram utilizados quatro modelos teóricos, os quais constam na Tabela 1. Por meio de uma análise descritiva (Figura 3), pelo teste da razão de verossimilhanças e de uma análise residual, para todas as funções, o modelo que melhor descreveu o fenômeno é escrito da forma,

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^2 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + S(x) + \varepsilon_i. \quad (7)$$

No Modelo 7, x_1 e x_2 , representam os efeitos da longitude e da latitude, respectivamente. Os parâmetros β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 foram utilizados para modelar a tendência espacial.

Na Tabela 1, têm-se os resultados das estimativas dos parâmetros e os valores AIC, para cada função de correlação. Pelo AIC, o modelo Matérn (kappa=0,5) foi o que melhor se ajustou ao semivariograma experimental.

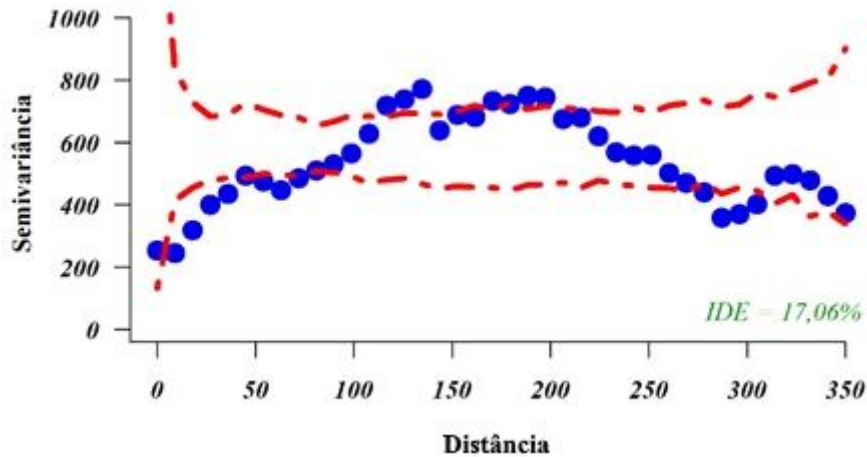
Tabela 1 - Estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros associados ao modelo e o valor do AIC.

Modelo	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3 \cdot 10^{-3}$	$\hat{\beta}_4 \cdot 10^{-3}$	$\hat{\beta}_5 \cdot 10^{-3}$	$\hat{\tau}^2$	$\hat{\sigma}^2$	$\hat{\phi}$	AIC
Matérn (kappa = 1,0)	168,29	-0,88	0,18	1,70	-0,30	0,40	163,27	502,49	32,06	2077,25
Matérn (kappa = 0,5)	157,32	-0,84	0,20	1,70	-0,40	0,40	134,14	651,92	81,84	2077,22
Esférico	173,32	-0,88	0,29	1,60	-0,40	0,30	131,07	482,18	87,46	2082,28
Exponencial	150,58	-0,82	0,31	1,60	-0,70	0,30	14,97	698,65	81,99	2083,62

Fonte: Autor.

Uma forma não-paramétrica de identificar a dependência espacial para o modelo 7 foi utilizando o envelope simulado, realizando 1.000 simulações, Figura 4. Por meio dessa figura, verificou-se uma quantidade considerável de pontos do variograma fora do envelope simulado, apresentando fortes evidências para uma dependência espacial. Nessa figura, ainda é possível observar que o modelo ajustado apresentou um IDE de 17,06%, o que representa uma forte dependência espacial com relação aos níveis de precipitação para o Trimestre Chuvoso da região estudada.

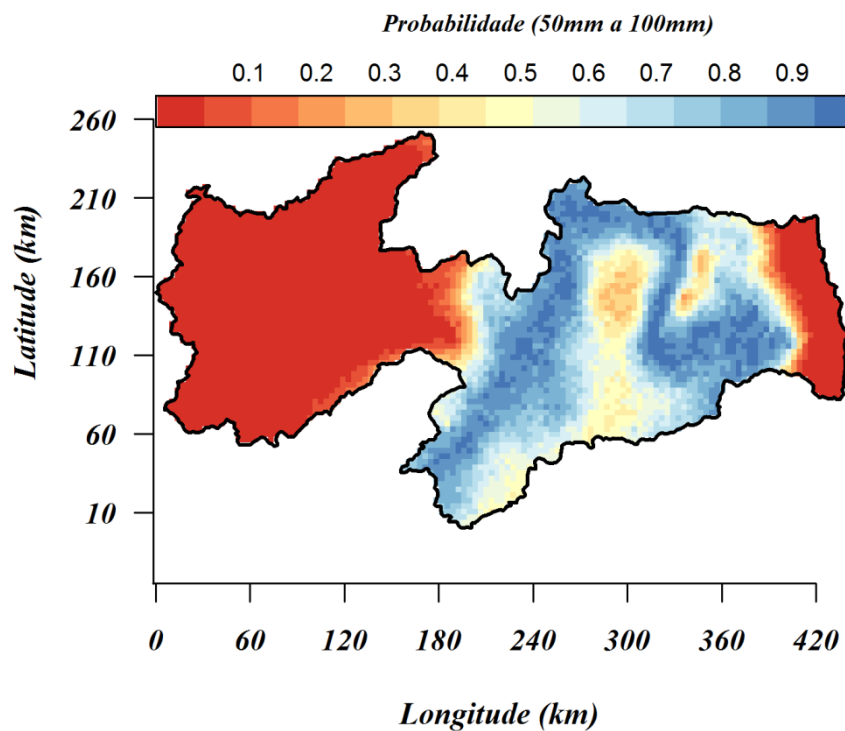
Figura 4 - Envelope simulado e variograma empírico. No eixo horizontal, tem-se a distância e no eixo vertical o semivariograma. As linhas tracejadas na cor vermelha indicam as bandas de 95% de confiança. No canto inferior, ao lado direito, na cor verde, está o Índice de Dependência Espacial (IDE).



Fonte: Autor.

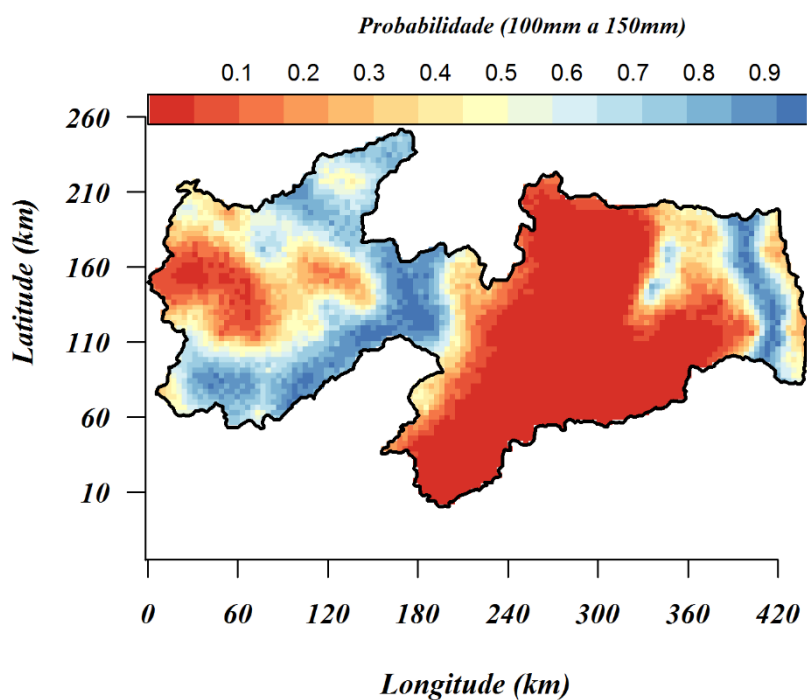
Encontra-se, na Figura 5, o mapa de probabilidade de ocorrência de chuvas de 50 a 100 mm. Verifica-se, em especial, nas microrregiões do Cariri/Curimataú, Brejo e Agreste, um forte agravante, pois a probabilidade é bastante alta para ocorrências da precipitação mediana do trimestre estar nesse intervalo. Na Figura 6, observa-se que as microrregiões do Cariri/Curimataú e Agreste apresentam uma baixa probabilidade do nível pluviométrico mediano do trimestre estar entre 100 e 150 mm. Este resultado mostra uma característica marcante dessa região, uma vez que ela está inserida dentro da região do semiárido nordestino, a qual é comumente conhecida pelos períodos prolongados de estiagem. Nessa figura, também fica clara a alta variabilidade das chuvas entre diferentes áreas no estado. No Sertão, por exemplo, durante os meses de dezembro a maio, é um período caracterizado pela irregularidade das chuvas, mas que também se concentram os maiores volumes pluviométricos nessa região. Esse período chuvoso apresenta alta variabilidade espacial devido à atuação de diferentes sistemas meteorológicos, tais como, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), conforme descrito por Macedo et al. (2010).

Figura 5 - Mapa de probabilidade da precipitação mediana entre 50 e 100 mm no Trimestre Chuvoso.



Fonte: Autor.

Figura 6 - Mapa de probabilidade da precipitação mediana entre 100 e 150 mm no Trimestre Chuvoso.



Fonte: Autor.

4. CONCLUSÃO

A metodologia da geoestatística possibilitou o mapeamento pluviométrico do Estado da Paraíba com boa precisão. A análise descritiva abordada, neste trabalho, evidenciou as características e a forma de como a chuva se distribui na Paraíba. Após a seleção do modelo, verificou-se que houve uma forte dependência espacial para o estado. O uso da krigagem mostrou-se eficaz, uma vez que foi possível interpolar valores da precipitação em locais não amostrados. Por meio do mapa de probabilidade, observou-se que as microrregiões, Cariri/Curimataú, Agreste e Brejo se encontram em risco, pois há uma alta probabilidade do nível pluviométrico mediano durante o Trimestre Chuvoso estar entre 50 e 100 mm.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An Analysis of Transformations. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)**, v. 26, n. 2, p. 211-252, 1964.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological methods & research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Bayesian inference in gaussian model-based geostatistics. **Geographical and Environmental Modelling**, v. 6, p. 131-148, 2002.
- DIGGLE, P.; LOPHAVEN, S. Bayesian geostatistical design. **Scandinavian Journal of Statistics**, v. 33, n. 1, p. 53-64, 2006.
- GUERRA, P. A. G.; SALLES, J. J. C. **Geoestatística operacional**. Brasília: Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988.
- KRIGE, D. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, p. 119-139, 1951.
- MACEDO, M. J. H. et al. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba. **Ambi-Agua**, v. 5, p. 204-214, 2010.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2013. Disponível em:
Revista Univap - revista.univap.br
 São José dos Campos-SP-Brasil, v. 24, n. 46, dez. 2018. ISSN 2237-1753

<<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

RAO, C. R. **Linear Statistical Inference and its Applications**. New York: John Wiley & Sons, 656 p, 1973.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: A package for geostatistical analysis. **R news**, v. 1, n. 2, p. 14-18, 2001.

SILVA, M. C. L.; BRITO, J. I. B.; COSTA, A. M. N. Proposta de Monitoramento da precipitação pluvial no Estado da Paraíba utilizando a Técnica dos Quantis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13, Fortaleza-CE. 2004. **Anais...**, Fortaleza: SBMET, 2004.

TRANGMAR, 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.