

INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DE ALAGOAS UTILIZANDO TÉCNICAS GEOESTATÍSTICA

SPATIAL INTERPOLATION OF PRECIPITATION IN THE STATE OF ALAGOAS UTILIZING TECHNICAL GEOSTATISTICS

Henderson Silva Wanderley¹; Ricardo Ferreira Carlos de Amorim²; Frede de Oliveira Carvalho³

¹Departamento de Engenharia Agrícola da Univ. Fed. de Viçosa, Viçosa-MG, BR.

²Instituto de Ciências Atmosféricas da Univ. Fed. de Alagoas, Maceió-AL, BR.

³Unidade Acadêmica de Tecnologia da Univ. Fed. de Alagoas, Maceió-AL, BR.

Endereço para correspondência: e-mail: henderson.wanderley@ufv.br

Resumo

Este estudo teve por objetivo investigar a utilização de técnicas geoestatísticas no estudo da variabilidade espacial de dados pluviométricos para Estado de Alagoas, mediante análise da dependência espacial, variograma, técnica de krigagem ordinária e da validação cruzada. Para tanto, nesta pesquisa utilizou-se o total anual médio da precipitação de 63 estações pluviométricas no período de 1965 a 1980. A utilização da geoestatística mostrou que as características estruturais da precipitação estão correlacionadas e apresentaram forte dependência espacial. A distribuição espacial da precipitação apresentou variabilidade espacial, com totais pluviométricos que variaram de 500 mm/ano na região do sertão e 2.000 mm/ano no litoral.

Palavras chaves: geoestatística, krigagem, validação cruzada, variograma.

Abstract

The objective this paper was to investigate the uses of technical geostatistic in the study of the spatial variability of pluviometric data for the Alagoas state, with analysis of the spatial dependence through isotropic variograms of ordinary kriging technique and of cross-validation. For the study, we selected the average total annual rainfall 63 pluviometric stations from period 1965 to 1980. The use of geostatistic has shown that structural characteristics of precipitation are correlated and have strong spatial dependence. The spatial distribution of precipitation showed spatial variability with rainfall totals ranging from 500 mm/year in the wilderness region and 2000 mm/year in the coast region.

Key words: geostatistic, kriging, cross-validation.

Recebido em: 16/04/2013.

Aceito em: 18/07/2013.

Introdução

Na região tropical brasileira a precipitação pluviométrica pode caracterizar e determinar as denominadas estações secas e chuvosas, e o conhecimento de sua variabilidade espacial e temporal torna-se fundamental para obter os padrões definidores do regime hidrológico. A precipitação influencia de uma maneira geral, na climatologia local, onde seu conhecimento possibilita o planejamento do ciclo vegetativo, bem como, a melhor época e local para o plantio.

Para compreender essa variabilidade, existe a necessidade de se obter informações provenientes de estações de medições de superfície. No entanto, para algumas regiões do Nordeste Brasileiro, essas informações são escassas e até mesmo inexistentes, tornando difícil uma análise específica, devido estas localidades não apresentarem informações.

Igualmente, o banco de dados de várias estações apresentam falhas, as quais dificultam o processo de entendimento de sua variabilidade de acordo com a época do ano e sub-regiões,

como Litoral, Agreste e Sertão. Essas localidades apresentam peculiaridades em função da distribuição anual da precipitação.

Deste modo, torna-se necessário obter para essas regiões, informações tanto espacial quanto temporal utilizando técnicas de interpolação. Uma vez que, o processo de interpolação permite construir informações a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos.

Para o Nordeste Brasileiro, região com histórico secular de secas, as quais rotineiramente são responsáveis por causar impactos econômicos e perdas expressivas na agricultura e pecuária. A representação da distribuição das chuvas é essencial na tentativa de mitigar a ação da seca para estados como o de Alagoas, maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste.

Haberlandt (2007) e Bargaoui; Chebbi (2009) destacaram a utilização da geoestatística em ciências ambientais e naturais no estudo da distribuição da precipitação. A aplicação da geoestatística é sucedida pela utilização de técnicas como a de krigagem para gerar informações espaciais.

Veer et al. (2009) ratificaram que apesar da existência de outros métodos de interpolação, a utilização da técnica de krigagem vem demonstrando resultados realistas e condizentes quando comparados com outros métodos de interpolação. Esse método de interpolação é precedido da utilização do variograma, que expressa a dependência entre as amostras. Havendo a dependência espacial, se utiliza a krigagem.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi investigar a utilização de técnicas geoestatística no estudo da variabilidade espacial da precipitação para Estado de Alagoas, mediante análise da dependência espacial por meio de variograma, da técnica de krigagem ordinária e validação cruzada.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no Estado de Alagoas, o qual se localiza na região leste do Nordeste Brasileiro. O Estado está dividido em seis microrregiões ambientais: Litoral, Zona da Mata, Agreste, Sertão, Sertão do São Francisco e Baixo São Francisco (Figura 1).

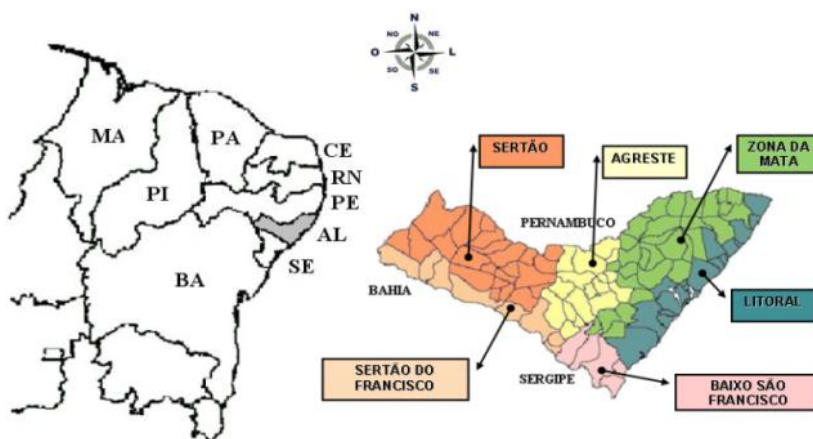


Figura 1. Estado de Alagoas e suas microrregiões

Para o estudo, foi utilizado o total anual médio de precipitação (mm/ano) compreendido entre os anos de 1965 a 1980, procedente do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram utilizados dados provenientes de

63 estações pluviométricas, espacialmente distribuídas por todas as microrregiões do Estado.

Neste estudo foram analisados os modelos isotrópicos experimental de variogramas (ou



semi-variogramas) dos tipos esférico, exponencial e gaussiano, ambos com patamar, com a análise de seus parâmetros: patamar ($C + C_0$), efeito pepita (C_0), alcance (a) e variância estrutural (C),

Figura 2. Segundo Zamboti (2001) esses tipos de variogramas vêm demonstrando resultados satisfatórios em estudos que utilizam a precipitação.

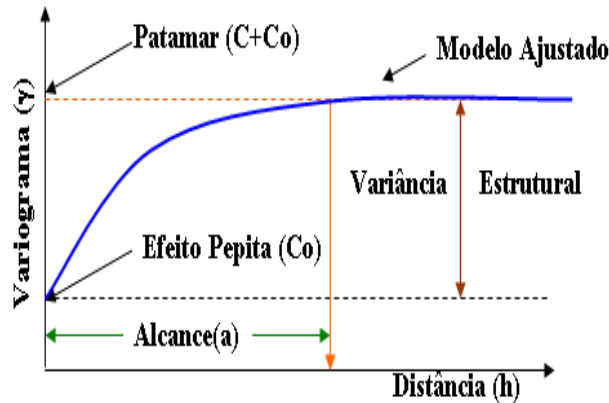


Figura 2. Modelo de variograma experimental com Patamar, adaptado pelo autor de Karl Maurer (2010).

No variograma, o patamar ($C + C_0$) é o ponto no qual a função se estabiliza no variograma, valor do variograma correspondente ao alcance (a), deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras.

O efeito pepita (C_0) corresponde ao ponto onde o variograma toca o eixo das ordenadas, esse ponto revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras utilizadas. A variância estrutural (C) é compreendida pela diferença entre o patamar ($C + C_0$) e o efeito pepita (C_0).

A representação matemática do variograma $2\gamma(h)$ é definida pelo quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados pelo vetor distância h , Eq. (1) Shoji e Kitaura (2006).

(1)

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

em que:

$n(h)$ = número de pares de valores amostrados $[Z(x_i) - Z(x_i+h)]$ separados pelo vetor h .

O modelo esférico de variograma é o que geralmente explica grande parte dos fenômenos estudados (BENAVIDES et al., 2007). Neste modelo, o patamar e o alcance são claramente identificados e geralmente o efeito pepita é pequeno em relação a este patamar, Eq. (2).

(2)

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[1,5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & 0 < h < a \\ C_0 + C_1 & h \geq a \end{cases}$$

O modelo exponencial apresenta um crescimento menos acentuado da origem para o patamar, o qual não se pode dizer que o modelo atinge realmente o patamar, Eq. (3).

(3)

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-ha^{-1})] \quad h > 0$$

em que:

d é a máxima distância na qual o variograma é definido.

O modelo gaussiano apresenta boa continuidade na variabilidade à medida que os pontos se afastam entre si. Neste modelo, se o efeito pepita é pequeno a estrutura de variabilidade cresce de uma maneira suave (JIAN et al., 1996), Eq. (4).



$$y(h) = C_0 + C_1[1 - \exp(-ha^{-1})^2] \quad h > 0 \quad (4)$$

Os parâmetros obtidos com o ajuste dos variogramas foram utilizados para calcular o Índice de Dependência Espacial (IDE) para a precipitação, propostos por Trangmar et al. (1985) e Zimback (2001). Os intervalos definidos por Cambardella et al. (1994) e modificados por Zimback (2001) são apresentados nas Eqs. (5 e 6) respectivamente.

(5)

$$IDE (\%) = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \times 100$$

sendo: $\leq 25\%$ corresponde uma fraca dependência espacial
entre 25% e 75% uma moderada dependência espacial
 $\geq 75\%$ uma forte dependência espacial

(6)

$$IDE (\%) = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \times 100$$

sendo:

$\leq 25\%$ corresponde uma forte dependência espacial
entre 25% e 75% uma moderada dependência espacial
 $\leq 75\%$ uma fraca dependência espacial

Para a interpolação da precipitação o método de krigagem ordinária (K_0) foi utilizado neste estudo por apresentar resultados satisfatórios quando comparadas com os outros tipos de krigagem (LANDIM, 2006; ALSAMAMRA et al., 2009).

O método de krigagem ordinária é um estimador espacial usado para se obter a melhor estimativa linear de segunda ordem. Segundo Daya (2012) na interpolação por krigagem a média é constante e desconhecida em cada ponto da avaliação, Eq. 7.

(7)

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

sendo:

$Z'(x_0)$ - valor estimado pela krigagem no ponto x_0

$Z(x_i)$ - valor da amostra no ponto x_i

λ_i - fator de peso de $Z(x_i)$

Assim, o erro obtido na estimativa é definido pela Eq. 8.

(8)

$$Z'(x_0) - Z(x_0) = \varepsilon(x_0) \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x_0)$$

sendo:

$Z(x_0)$ - valor medido no ponto x_0

$\varepsilon(x_0)$ - erro estimado

Deste modo, para obter um estimador ótimo, a média do erro deve ser igual a zero e o somatório de $\lambda_i=1$ (DAYA, 2012).

O processo de validação cruzada foi utilizado para verificar qual entre os modelos de variograma testados descreveu melhor o comportamento espacial das propriedades da precipitação. O método de validação cruzada permite por meio de um procedimento interpolativo, como o de krigagem, estimar valores de dados amostrais.

Este procedimento retira do conjunto de dados, valores conhecidos $Z(x_i)$ e o estima $Z'(x_i)$, repetindo o processo para todo o conjunto de dados. A utilização desta abordagem proporciona obtendo dois valores para cada ponto, o real e o estimado, a diferença entre os valores é definida como erro da estimativa, ou cálculo da validação cruzada. Segundo Martin e Simpson (2004) a regressão linear dos valores é obtida pela Eq. (9).

(9)

$$Z'(x_i) = a + bZ(x_i)$$

em que:

a - intercepto da reta

b - coeficiente angular da reta.

Os resultados obtidos com a utilização da validação cruzada foram avaliados por meio do erro absoluto médio (EAM) e desvio padrão, Eqs. (10) e (11), respectivamente (PIAZZA et al., 2011).



(10)

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |Z_{(xi)} - Z'_{(xi)}|}{n}$$

(11)

$$DP = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Z_{(xi)} - \bar{Z})^2}$$

Resultados e Discussões

Nos resultados obtidos com a utilização dos variogramas observou-se que os três modelos teóricos escolhidos, esférico, exponencial e gaussiano, apresentaram resultados satisfatórios ao ajuste da precipitação. Entretanto, dois destes modelos, esférico e exponencial, demonstraram melhor ajuste de sua

curva aos dados pluviométricos, demonstrados na Tabela 1.

Também foi verificado para ambos os modelos, os valores representativos e satisfatórios dos índices de dependência espacial (IDE). Por este índice, foi evidenciada forte dependência espacial dos dados.

Nos parâmetros variográficos, o efeito pepita (Co), para ambos os modelos, apresentou valores próximo de zero. Como o efeito pepita reflete as variações à pequena escala não detectada pela amostragem, devido à presença de erros na medição; os dados não apresentam erros significativos ou variações nas medições, que comprometessem a utilização dos dados neste estudo.

Tabela 1. Parâmetros variográficos (efeito pepita (Co), patamar (C + Co), variância estrutural (C) e alcance (a)) e Índice de Dependência Espacial (IDE)

Modelos	C ₀	C+C ₀	C	a	IDE (%)	
					Zimback	Cambadella
Esféricos	0,01	1,50	1,49	90	99,33	0,66
Exponencial	0,01	2,24	2,23	87	99,33	0,66
Gaussiano	0,09	1,54	1,44	82	93,84	6,15

O patamar (C+Co) e a variância estrutural (C) apresentaram-se com valores iguais da escala do variograma, devido ao efeito pepita (Co) resultar em número muito próximo à zero (Tabela 1), o que é recomendado pela literatura.

O índice de dependência espacial (IDE) calculado pelo método descrito por Cambadella et al. (1994) e Zimback (2001), para o modelo esférico e exponencial, demonstraram valores de 0,66 e 99,33, respectivamente. Estes intervalos ratificam forte dependência espacial para os intervalos propostos pelos autores acima referenciados, entre 0 e 100%.

O alcance obtido pelos modelos de variogramas variaram entre 82 e 90 Km.

Resultados condizentes como os obtidos por Mello et al. (2003) e Haberlandt (2007) que oscilaram de 80 a 140 Km. Essa distância expressa à área máxima de influência da variável em estudo, após essa distância, as amostras tornam-se independente, não sendo mais caracterizada a dependência espacial.

Os respectivos valores do erro absoluto médio (EAM) e do desvio padrão (DP) obtidos pela validação cruzada para os variogramas são apresentados na Tabela 2. A estimativa feita por meio do variograma esférico obteve os menores valores para o EAM e para o DP, adotando seus resultados para a interpolação da precipitação por meio da krigagem ordinária.



Tabela 2. Erro absoluto médio (EAM) e desvio padrão obtidos pela validação cruzada para os modelos de variogramas

Esférico		Exponencial		Gaussiano	
EAM	DP	EAM	DP	EAM	DP
0,05	151,67	0,13	152,57	0,90	268,17

O modelo esférico de variograma por ter apresentado menores EAM e DP, demonstrado pela validação cruzada, é apresentado na Figura

3, seu ajuste aos dados pluviométricos e sua regressão obtida pela validação cruzada.

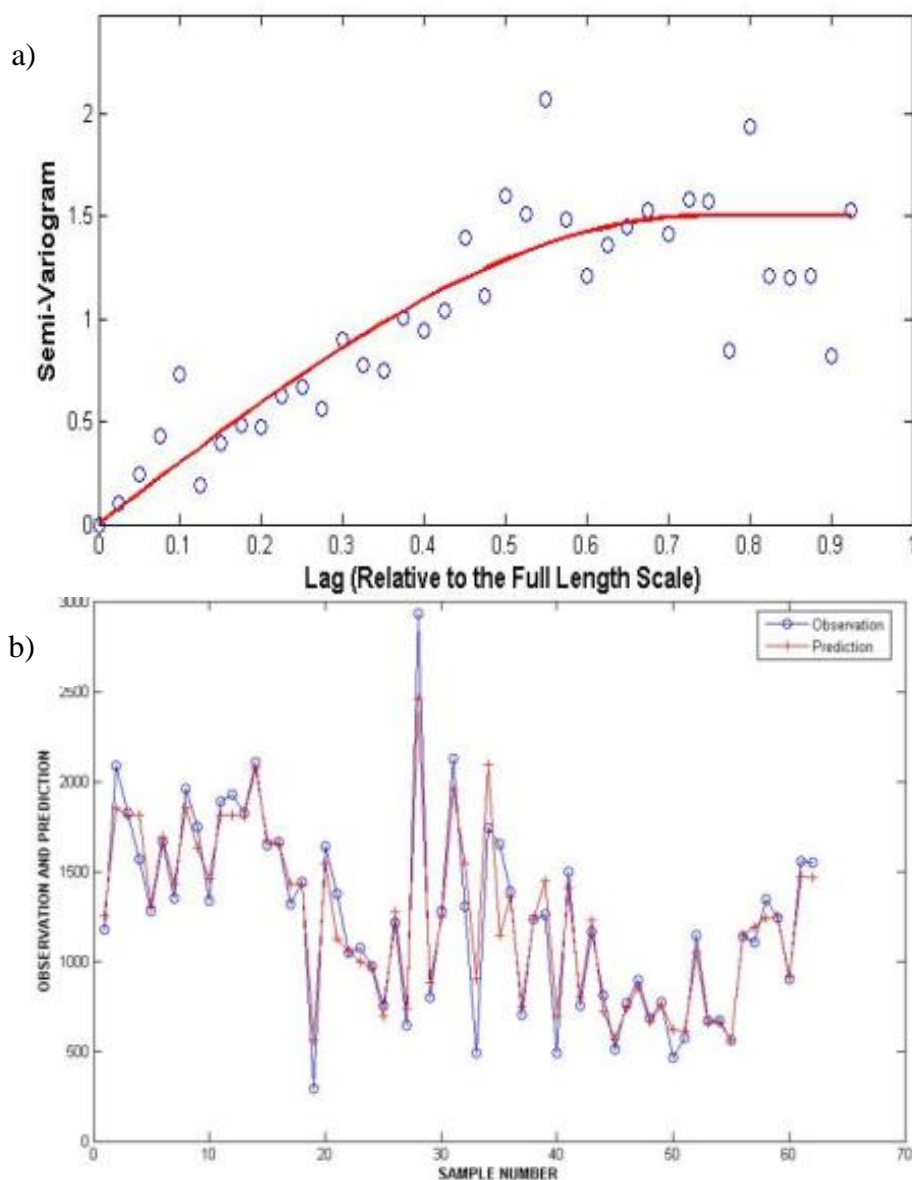


Figura 3. a) Modelo de variograma esférico ajustado aos dados de precipitação; b) regressão obtida pela validação cruzada correspondente ao modelo esférico de variograma (em azul - valores observados, em vermelho - valores estimados)

A precipitação anual obtida pelo método de krigagem ordinária para Alagoas apresentou variabilidade espacial considerável (Figura 4). Na

distribuição da precipitação observou-se a influência direta do fluxo de umidade proveniente do oceano Atlântico sobre o Litoral e



a Zona da Mata alagoana, regiões que apresentaram precipitações de até 2.000

mm/ano, consideradas áreas com grande potencial agrícola e econômica.

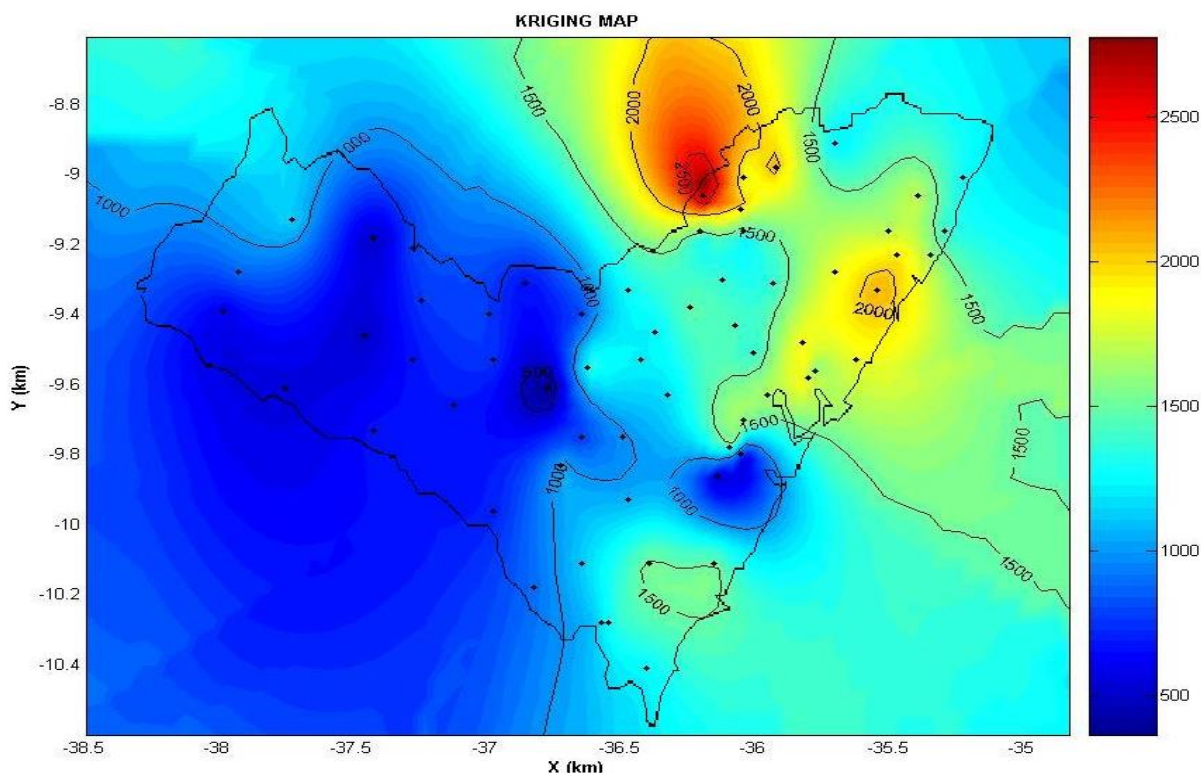


Figura 4. Interpolação da precipitação para o Estado de Alagoas por meio do método de krigagem ordinária (os pontos pretos no mapa são referentes às estações utilizadas para a interpolação)

No Litoral e Zona da Mata de Alagoas, notam-se precipitações acima de 1.500 mm/ano em quase toda a Região Nordeste do Estado, sendo observados os maiores totais de chuva no litoral norte destas regiões. A precipitação diminui de forma significativa quando alcança a parte central do Estado, sendo o Agreste uma região de transição, ou seja, um divisor agrícola. Na região leste do Agreste, os índices pluviométricos foram superiores a 1.000 mm/ano, e inferiores a oeste da região, com precipitação de até 500 mm/ano.

O Sertão e o Sertão do São Francisco alagoano, quase que em sua totalidade, não apresenta índices pluviométricos superiores a 1.000 mm/ano. A escassez de chuva nesta região é um dos principais responsáveis para o comprometimento agrícola, principalmente entre os meses de outubro a janeiro, período de índices pluviométricos inferior a 50 mm.

Essa menor variabilidade também foi observada por Quadro (2005), onde o autor utilizando dados de precipitação acumulada obteve padrão análogo de variabilidade ao encontrado neste estudo. A precipitação observada no interior apresentou índice pluviométrico inferior a 500 m/ano, e na costa leste da região Nordeste Brasileiro superior a 1.500 mm/ano.

Essa variabilidade interanual da distribuição das chuvas sobre o Nordeste Brasileiro ocorre em função da mudança na configuração da circulação atmosférica e de sua interação com os oceanos. Assim, regiões como o Agreste e Sertão, sofrem menor influência de sistemas locais de interação oceano-atmosfera, como os sistemas de brisas marítima e terrestre, por isso se observa essa redução na precipitação em Alagoas.



A convecção local também está diretamente relacionada com a distribuição da precipitação em Alagoas. Esse sistema é caracterizado por apresentar movimentos ascendentes de ar úmido, resultante da ocorrência de pressões atmosféricas mais baixas, junto à superfície terrestre, seja em consequência do aquecimento do ar em contato com essa superfície, sejam pela ação de fenômenos transientes, de caráter puramente dinâmico, como sistemas frontais, e perturbações ondulatórias no campo dos ventos Alísios (MOLION; BERNARDO, 2002).

A pluviometria do Nordeste Brasileiro está relacionada com os fenômenos que variam desde micro a macroescala. Esses sistemas são constituídos por circulações orográficas, células convectivas, sistemas frontais, associados à convergência de umidade dos ventos Alísios e dos sistemas de circulação das brisas, zona de convergência intertropical (ZCIT), vórtices ciclônicos de altos níveis (VCANS), fenômenos de La Niña e El Niño/Oscilação Sul (ENOS). Esses fenômenos são considerados os principais mecanismos produtores de chuvas do Nordeste Brasileiro (RAO et al., 1993).

Pela sua localização no leste no Nordeste, o Estado de Alagoas possui sua variabilidade

pluviométrica regida por esses sistemas referenciados acima. Embora esses sistemas apresentem uma dinâmica própria para cada região do Nordeste. A costa leste do Nordeste, juntamente com o Estado de Alagoas, apresenta sua principal estação chuvosa compreendida entre os meses de abril a julho, podendo ocorrer neste período até 60% da chuva anual (MOLION; BERNARDO, 2002).

Conclusão

A utilização de técnicas geoestatísticas apresentou resultado satisfatório no estudo da variabilidade espacial da precipitação no Estado de Alagoas, com o modelo esférico apresentando melhor ajuste aos dados pluviométricos, demonstrado pela validação cruzada.

Os índices de dependência espacial obtida no estudo, por ambos os métodos, demonstraram forte dependência espacial. A estimativa da precipitação obtida pelo método de Krigagem Ordinária apresentou resultados condizentes com as características climatológicas da região.

Referências

- ALSAMAMRA, H. et al. A comparative study of ordinary and residual kriging techniques for mapping global solar radiation over southern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1343-1357. 2009.
- BARGAOUI, K. K.; CHEBBI, A. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 365, p. 56-73. 2009.
- BENAVIDES, R. et al. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, p. 173-188. 2007.
- CAMBARDELLA, C.A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science**, v. 58, p. 1501-1511. 1994.
- DAYA, A. A. Reserve estimation of central part of Choghart north anomaly iron ore deposit through ordinary kriging method. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 22, p. 573-577. 2012.
- HABERLANDT, U. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. **Journal of Hydrology**, v. 332, p. 144-157. 2007.



- JIAN, X.; OLEA, R. A.; YU, Y. S. Semivariogram modeling by weighted least squares. **Computers & Geosciences**, v. 22, p. 387-397. 1996.
- KARL, J. W.; MAURER, B. A. Spatial dependence of predictions from image segmentation: A variogram-based method to determine appropriate scales for producing land-management information. **Ecological Informatics**, v. 5, p. 194-202. 2010.
- LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v. 2. p. 19-33. 2006.
- MARTIN, J. D.; SIMPSON, T. W. On the use of kriging models to approximate deterministic computer models. In: ASME 2004 INTERNATIONAL DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES AND COMPUTERS AND INFORMATION IN ENGINEERING CONFERENCE. **Anais...** USA: September 28 - October 2. 2004.
- MELLO, C. R. et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para a interpolação dos parâmetros da equação de chuva intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27. p. 925-933. 2003.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. Uma revisão das dinâmicas das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n.1, p. 1-10. 2002.
- PIAZZA, A. et al. 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.
- QUADRO, M. F. L. et al. **Climatologia de precipitação e temperatura**. Centro de previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE, p. 2-11. 2005.
- RAO, V.B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S.H. Seasonal Interrannual variation of rainfall over Eastern Northeast Brazil. **Journal Climate**, v. 6, p. 1754-1763. 1993.
- SHOJI, T.; KITAURA, H. Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan. **Computers & Geosciences**, v. 32, p. 1007-1024. 2006.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to special studies of soil properties. **Advance in Agronomy**, v. 38, p. 45-94. 1985.
- VEER, G. V. D. et al. Spatial interpolation of the deuterium and oxygen-18 composition of global precipitation using temperature as ancillary variable. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 101, p. 175-184. 2009.
- ZAMBOTI, J. L. **Mapas pluviométricos médios mensais no verão para o Estado do Paraná, utilizando métodos geoestatísticos**. 2001. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do solo e Fotopedologia) - Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.

