

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL PARA A ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO NO CEARÁ-BRASIL

DANILO BATISTA NOGUEIRA¹; ALEXSANDRO OLIVEIRA DA SILVA² E ANA PAULA NUNES DA SILVA³

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Avenida Mister Hull, S/N-Campus do Pici, Centro de Ciências Agrárias, Bloco 804, CEP 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil, danilo.b.n@alu.ufc.br

² Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Avenida Mister Hull, S/N-Campus do Pici, Centro de Ciências Agrárias, Bloco 804, CEP 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil, alexsandro@ufc.br

³ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Amapá, Avenida Presidente Vargas, N 650, Centro de Ciências Agrárias, CEP 68906-970, Macapá, Amapá, Brasil, apns@ymail.com

1 RESUMO

A distribuição espacial de precipitação ainda é largamente representada por métodos geostatísticos de interpolação e em áreas de semiárido necessita de estudos recorrentes por conta de sua variabilidade temporal e espacial. Diante disto, visando o aperfeiçoamento dos métodos de interpolação e o desenvolvimento de mapas no estado do Ceará, o presente trabalho teve como objetivo analisar a acurácia de cinco métodos de interpolação: Inverso do Quadrado da Distância (IQD), Krigagem com um semivariograma esférico, Krigagem com um semivariograma exponencial, Vizinho natural e *Spline* regularizada. Para isto foram utilizados dados de precipitação média anual de um período de vinte anos (1991 a 2010) de 252 postos pluviométricos. Como forma de determinação do método mais adequado optou-se pela técnica de validação cruzada como critério de comparação, determinando o erro médio quadrático (RMSE), o coeficiente de determinação (r^2), o coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de concordância (d) e o índice de desempenho (c) entre os dados estimados e os dados observados. Os resultados apontam que a interpolação por Krigagem exponencial apresentou critério de desempenho classificado como bom e um menor erro quadrático médio (164,09 mm), mostrando ser esse o interpolador de melhor representatividade espacial para o conjunto de dados.

Keywords: geostatística, postos pluviométricos, variáveis regionalizadas.

NOGUEIRA, D. B.; SILVA, A. O.; SILVA, A. P. N.
COMPARISON OF SPATIAL INTERPOLATION METHODS FOR THE
ESTIMATION OF PRECIPITATION DISTRIBUTION IN CEARÁ -BRAZIL

2 ABSTRACT

The spatial distribution of precipitation is still largely represented by geostatistical methods of interpolation and in semiarid areas it requires recurrent studies due to their temporal and spatial variability. Therefore, aiming at the improvement of interpolation methods and the improvement of rainfall maps in the state of Ceará, this study aimed to analyze the accuracy of five interpolation methods: Inverse of Square Distance (ISD), Kriging with a spherical semivariogram model, Kriging with a exponential semivariogram model, Natural neighbor and

Spline regularized. For that, data of annual average rainfall of a period of twenty years (1991 to 2010) of 252 rain gauges were used. As a form of evaluation and determination of the most appropriate method, the technique of cross-validation was chosen as the criterion of comparison, determining the root mean square error (RMSE), coefficient of determination (r^2), Pearson correlation coefficient (r), concordance index (d) and performance index (c) between the estimated data and the observed data. The results show that the interpolation by exponential Kriging method presented performance criterion classified as good and lower mean square error (164,09), showing that it is the interpolator of better spatial representation for the data set under study.

Keywords: statistical, rain gauges, regionalized variables.

3 INTRODUÇÃO

A precipitação pluviométrica é uma das principais variáveis meteorológicas utilizadas em estudos climatológicos e de suma importância para a região de estudo, tendo em vista que a principal fonte de fornecimento hídrico do Ceará são os reservatórios superficiais abastecidos pela chuva (CORTEZ; LIMA; SAKAMOTO, 2017). A quantificação das chuvas é bastante utilizada na gestão, conservação e manejo de recursos naturais, no dimensionamento de obras hidráulicas, no planejamento agrícola e urbano, entre tantas outras atividades, conforme exemplificado por Martins et al. (2017). Tradicionalmente, o monitoramento da lâmina diária de precipitação é acompanhado através de postos pluviométricos, que fornecem dados pontuais de cada estação, sendo necessário estimar, por interpolação, os locais onde não são registrados ou os outliers que ocorrem por erros aleatórios ou sistemáticos, transformando assim os dados pontuais em um mapa homogêneo de distribuição pluviométrica (MAZZINI; SCHETTINI, 2009)

Muitos métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, estão disponíveis na literatura (BERNDT; HABERLANDT, 2018; HU et al., 2019; LEBRENZ; BÁRDOSSY, 2019; VIGNESH; JOTHIPRAKASH; SIVAKUMAR, 2019). Esses métodos

podem ser baseados em variáveis regionalizadas, que são os chamados métodos geoestatísticos, ou podem ser formulados pela homogeneização do reticulado, levando em consideração exclusivamente a distância entre os locais de coleta das amostras (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Cada método de interpolação tem sua utilidade à uma aplicação específica que depende principalmente da sazonalidade do fenômeno estudado e da variabilidade espacial dos pontos amostrais (CAMARGO; DRUCK; CÂMARA, 2004). Até o momento, não existe, na literatura, um método mais preciso para interpolação espacial de precipitação pluviométrica em todas as regiões; isto porque a ocorrência desse fenômeno tem uma alta variabilidade espacial e temporal, logo cada método deve ser avaliado antes de cada aplicação geograficamente distinta e, ainda assim, o desempenho dos interpoladores mais aplicados devem ser constantemente testados por conta da variabilidade temporal do regime de chuvas. Em várias pesquisas, diferentes métodos de interpolação têm-se mostrado mais apropriados a cada situação.

Viola et al. (2010) avaliaram o desempenho dos interpoladores de krigagem, cokrigagem e inverso quadrático da distância na espacialização de dados de precipitação média mensal, precipitação média do período seco e precipitação média anual, em Minas Gerais, destacando a

cokrigagem com menor erro em 50% das situações analisadas.

Amini et al.(2019) compararam a precisões de seis métodos de interpolação espacial para mapear precipitação mensal na bacia do rio Zayandeh-Rud, no Irã, e os resultados mostraram que a interpolação por vizinho natural provou ser o método mais preciso.

Na Índia, DAS et al. (2017) utilizaram três técnicas de interpolação espacial (krigagem, inverso quadrático da distância (IDW) e *spline*) para avaliação do desempenho na espacialização de precipitação média semanal de 79 estações pluviométricas. Os resultados da análise indicaram que o IDW é o melhor interpolador para estimativa.

Considerando a importância da pluviometria na área de estudo e a necessidade de recorrente avaliação dos métodos de interpolação de chuva, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho e definir qual a técnica de interpolação mais indicada para espacialização de chuva no Ceará, dentre cinco interpoladores espaciais usados (Inverso do Quadrado da Distância (IQD), Krigagem com um modelo de semivariograma esférico, Krigagem com

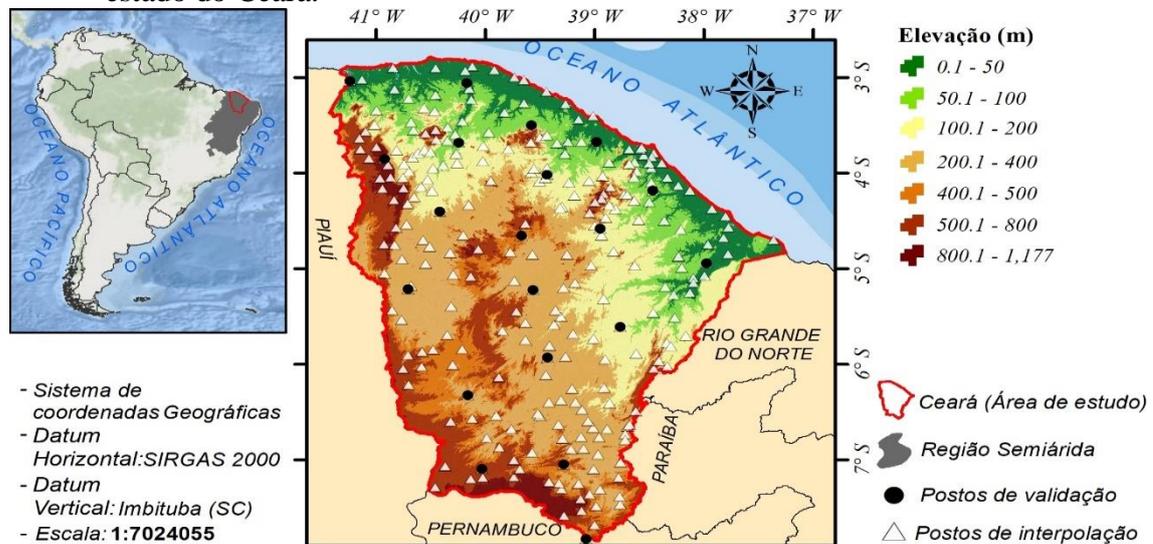
um modelo de semivariograma exponencial, Vizinho natural e *Spline* regularizada.) na estimativa da precipitação pluviométrica anual média de 252 postos de coleta com série histórica de 20 anos de coleta.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estado do Ceará está localizado na região nordeste, situado principalmente no semiárido do nordeste brasileiro (2,96°S – 7,81°S, 37,23°W – 41,31°W), apresentando índices de precipitações pluviométricas escassas e irregulares e, segundo a classificação climática de Köppen, é abrangido por dois tipos de climáticos, BSh (zona seca semiárida) e As (zona tropical com verão seco), com uma predominância do clima semiárido (ALVARES et al., 2013).

Os valores de precipitação média anual utilizados na interpolação se referem à média do total de chuva anual em 20 anos (1991-2010) de cada um dos 252 postos pluviométricos no Ceará (Figura 1). Este intervalo temporal foi escolhido por apresentar maior consistência dos dados dentro das séries históricas analisadas.

Figura 1. Localização dos postos pluviométricos utilizados na análise dos interpoladores no estado do Ceará.



Fonte: Google maps, MDE-IBGE (2015) e SRTM (2014)

Os métodos foram escolhidos na tentativa de abranger as principais metodologias encontradas na literatura. Para tanto, fez-se uso do Quantum GIS 3.1 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2018). Os interpoladores espaciais aplicados foram: Inverso do Quadrado da Distância (IQD), Krigagem com um modelo de semivariograma esférico, Krigagem com um modelo de semivariograma exponencial, Vizinho natural e *Spline* regularizada ou também denominada de superfície de mínima curvatura.

O banco de dados de precipitação foi obtido junto à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme). Todos os dados foram organizados em planilha eletrônica (Excel) para facilitar a manipulação e a detecção de divergências nos valores mensais de precipitação, bem como os meses ou anos sem registros, que foram estimados por média das normais climatológicas nos anos anteriores, caso os postos possuíssem mais de 30 anos de coleta, ou estimados pelo método da ponderação regional, conforme metodologia descrita por Bertoni e Tucci (2012), caso possuíssem menos que 30 anos; para isto, os postos vizinhos utilizados tinham uma homogeneidade dos dados com diferença média anual inferior a 10%.

Para verificar o melhor método de interpolação e a boa consistência dos dados, optou-se pela técnica de validação cruzada como critério de comparação, que consiste em retirar uma amostra do conjunto de dados (pontos de validação) e estimar seu valor através dos diferentes métodos de interpolação com os dados restantes. No presente trabalho, foram utilizados 20 postos como pontos de validação para análise da acurácia de cada modelo gerado na interpolação (Figura 1). O desempenho dos modelos foi analisado por meio do cálculo da magnitude dos erros através do erro médio quadrático (RMSE - Root Mean Square Error) (Equação 1).

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N} \quad (01)$$

Em que: x_i , é o valor observado (mm); y_i , valor estimado pelo método (mm); e N, o número de observações.

A precisão dos modelos foi calculada a partir da correlação entre os dados observados e os dados estimados, através do coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 2) e do coeficiente de determinação por regressão linear (r^2) (Equação 3). Já a exatidão foi obtida através do cálculo do índice de concordância (d), que indica o afastamento entre os dados observados e estimados (Willmott, 1982) (Equação 4).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (02)$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (03)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \right] \quad (04)$$

Em que: \bar{x} é a média dos valores observados (mm), \bar{y} é a média dos valores interpolados (mm), $(\hat{y}_i - \bar{y})^2$ corresponde à variação explicada e $(y_i - \bar{y})$ corresponde à variação não explicada e d é o índice de concordância adimensional variando de 0 (não existe concordância) a 1 (concordância perfeita)

Para a análise conjunta da precisão e a exatidão dos resultados obtidos, foi utilizado o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que define

o desempenho de cada modelo (Equação 5 e Tabela 1):

$$c = r \times d \quad (05)$$

Tabela 1. Critério de interpretação do desempenho do modelo com base no índice de confiança

Valor de "c"	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método interpolado por krigagem exponencial apresentou o menor valor de RMSE (164,09 mm ano⁻¹), enquanto que para o método de vizinho natural observou-se o maior valor (357,16 mm ano⁻¹) (Tabela 2). Isto deve-se à característica do método em não extrapolar valores além do interior do domínio dos dados, sendo que dois dos pontos de validação estavam fora da sua zona de interpolação. Castro et al. (2010), em estudos sobre métodos de interpolação para estimativa de precipitações médias anuais no estado do Espírito Santo, também observaram que o método de krigagem exponencial foi o que apresentou o menor valor de RMSE (124,84 mm ano⁻¹).

Gardiman et al. (2012), em estudo comparativo dos métodos de interpolação dos dados de precipitação média mensal na região sul do Espírito Santo, observaram valores de RMSE do método IQD (14,7 mm ano⁻¹) muito próximo ao da krigagem esférica (11,9 mm ano⁻¹), que é citado em sua pesquisa como o método de melhor desempenho; entretanto, neste estudo, o desempenho da krigagem esférica (184,17 mm ano⁻¹) foi inferior ao do método IQD (168,15 mm ano⁻¹), o que mostra que, apesar de ser o mesmo modelo para um mesmo fenômeno, o fato de mudar tanto a localização geográfica como até mesmo a escala temporal de análise dos dados, já reflete diferença no desempenho dos diferentes métodos de interpolação.

Tabela 2. Resumo estatístico das variáveis de dispersão calculadas para cada método de interpolação e o desempenho de cada um.

Métodos de interpolação	Variáveis de dispersão				Índice de confiabilidade
	(d)	(r)	(c)	RMSE (mm ano ⁻¹)	Desempenho
Krigagem esférica	0,99	0,54	0,53	184,17	Sofrível
Krigagem exponencial	0,99	0,65	0,69	164,09	Bom
IQD	0,99	0,66	0,65	164,71	Mediano
Vizinho natural	0,99	0,48	0,47	357,16	Sofrível
<i>Spline</i>	0,99	0,71	0,7	179,62	Bom

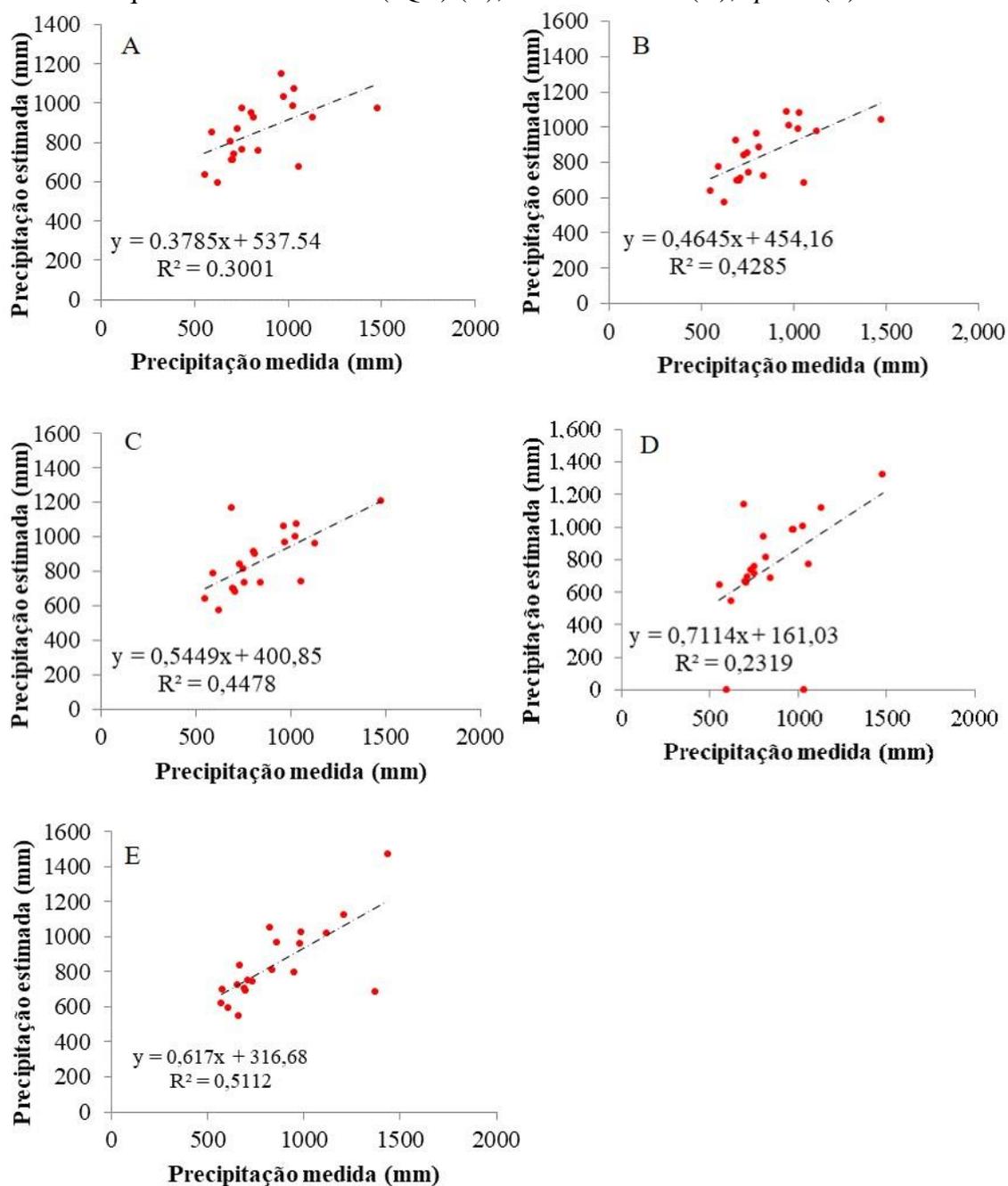
De acordo com a análise de dispersão, entre os dados de precipitação obtidos pelos diferentes modelos de interpolação e os dados observados nas estações pluviométricas, o coeficiente de determinação (r^2) dos modelos estudados foi menor que 0,60 (Figura 2). Viola et al. (2010), em estudos sobre métodos de interpolação para precipitação no estado de Minas Gerais, observaram valores de r^2 superiores a 0,70 para períodos mensais de chuva, com exceção de alguns meses em período seco, quando o coeficiente de determinação variou de 0,36 a 0,6, o que reforça a consistência dos resultados obtidos para este trabalho, tendo em vista a grande variabilidade e imprevisibilidade das chuvas no estado do Ceará, bem como a constante ocorrência de períodos secos no estado. Valores similares de r^2 obtido a partir de modelos de interpolação pluviométrica no estado do Espírito Santo são citados por Castro et al. (2010), com mínima de $r^2=0,41$ (IPD 6) e máximo de $r^2=0,59$ (krigagem exponencial) na análise de desempenho de dez métodos de interpolação para estimativa da precipitação média anual, e em Gardiman et al. (2012), com mínima de 0,02 (Topo do Raster) e máximo de 0,51 (krigagem esférica) na análise de desempenho de cinco métodos de interpolação para estimativa da precipitação média mensal. Dentre os métodos de interpolação avaliados, o *spline* (Figura 2E) foi o modelo que obteve melhor ajuste aos dados coletados nos postos de controle (r^2

=0,51), resultado semelhante também foi constatado em Alves e Vecchia (2011), que encontraram um maior coeficiente de determinação ($r^2 =0,77$) para o método *spline* quando comparam métodos de interpolação para precipitação pluvial do estado de Goiás.

Os índices de concordância (c) determinados para cada método de interpolação foram classificados conforme a Tabela 1, apresentando o desempenho classificado como “bom” para o método *spline* e para krigagem exponencial, mostrando alta confiabilidade das estimativas dos modelos gerados a partir desses métodos (Tabela2). A mesma concordância foi encontrada também para o krigagem exponencial no trabalho de Oliveira et al. (2008) sobre métodos de estimativa de precipitação máxima no estado de Goiás, sendo que o grande determinante do desempenho foi o coeficiente de correlação de Pearson (r), uma vez que o índice “d” foi igual a 0,99 em todos os métodos, o que segundo Silva, Lima e Bottega (2011), indica uma concordância perfeita entre os dados interpolados.

A krigagem é citada por Silva, Lima e Bottega (2011) como um método mais apto à representação do regime pluviométrico. Esse comportamento foi verificado no presente trabalho em relação ao índice de concordância, ao coeficiente de determinação e ao Erro Quadrado Médio.

Figura 2. Dispersão dos valores estimados de precipitação média anual no estado do Ceará, obtidos pelos métodos de krigagem esférica (A), krigagem exponencial (B), inverso do quadrado da distância (IQD) (C), vizinho natural (D), *spline* (E).



Na Figura 3 é apresentada a espacialização da precipitação pluvial anual no estado do Ceará com os diferentes métodos de interpolação. De todos os métodos, o mapa resultante da interpolação por vizinho natural (Figura 3D) foi o único que não executou a interpolação dos dados de chuva em toda a área de estudo; isto

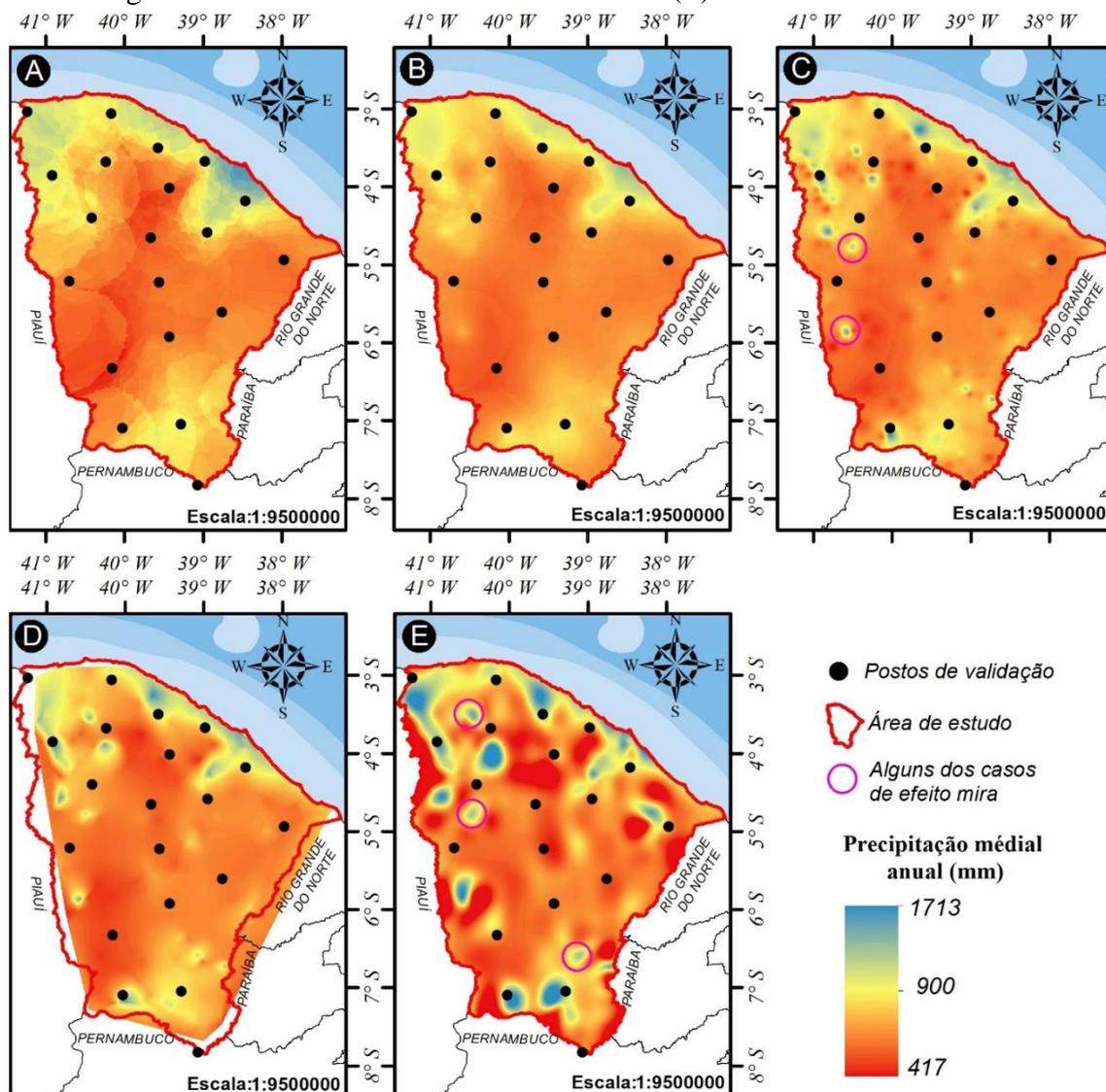
porque o mesmo não realiza extrapolação além do domínio dos dados, abrangendo assim somente as informações nos limites dos postos de coleta disponíveis. Nos mapas, foram identificados alguns efeitos miras, que é a concentração de pontos de chuva ou pontos de seca influenciados por estações que captam um comportamento

diferente da circunvizinhança, sendo mais evidentes para o método *spline* e o inverso do quadrado da distância (Figura 3), o que corrobora os resultados obtidos por Alves e Vecchia (2011), mostrando uma maior associação desses métodos com a densidade dos dados observados, uma vez que cada uma das observações é ponderada pela distância ao vizinho mais próximo.

Os dois modelos de krigagem tiveram bom desempenho nas análises estatísticas e, visualmente, são os que apresentam uma transição mais homogênea entre diferentes zonas de pluviometria; isto por serem modelos que preconizam a autocorrelação entre os valores de chuva observados e a regionalização dos postos de observação, sendo que o modelo exponencial foi o que gerou os resultados mais acurados e precisos. A distribuição espacial e temporal do volume pluviométrico no Ceará é influenciada por

sistemas atmosféricos e também pela estratificação geomorfológica da região, sendo a depressão sertaneja preponderante com baixos índices pluviométricos (menos de 800 mm), contudo ainda apresenta algumas transições abruptas com planície costeira, tabuleiros costeiros, chapadas, depressões sedimentares e maciços residuais cristalinos (HIERA; LIMA JUNIOR; ZANELLA, 2019), que possuem volumes de chuvas mais expressivos. Trabalhos como os de Assad et al. (2003) e Macedo et al. (2001), sobre a avaliação de modelos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos, demonstram que o método de interpolação por krigagem é o mais indicado para determinação dos índices de necessidades de água nas plantas, pois permite uma análise mais confiável da qualidade da informação gerada, associada à sua incerteza espacial.

Figura 3. Mapas da precipitação no estado do Ceará, com diferentes métodos de interpolação: krigagem com um semivariograma esférico (A); krigagem com um semivariograma exponencial (B); o inverso quadrático da distância (C); vizinho natural (D); *spline* regularizada ou método da mínima curvatura (E).



6 CONCLUSÃO

O método de krigagem com um modelo de semivariograma exponencial foi o que melhor se adequou para espacialização da precipitação média anual no estado do Ceará,

O método menos indicado para espacialização das chuvas no Ceará é a interpolação por vizinho natural.

A interpolação feita através de métodos inadequados resultam em erros cuja magnitude será distinta ao longo do modelo gerado.

7 REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, Maringá, PR, v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011.
- AMINI, M. A.; TORKAN, G.; ESLAMIAN, S.; ZAREIAN, M. J.; ADAMOWSKI, J. F. Analysis of deterministic and geostatistical interpolation techniques for mapping meteorological variables at large watershed scales. **Acta Geophysica**, Varsóvia, v. 67, n. 1, p. 191-203, 2019.
- ASSAD, E. D.; MACEDO, M. A.; ZULLO JÚNIOR, J.; PINTO, H. S.; BRUNINI, O. Avaliação de métodos geostatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 2, p. 161-171, 2003.
- BERNDT, C.; HABERLANDT, U. Spatial interpolation of climate variables in Northern Germany—Influence of temporal resolution and network density. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Hanover, v. 15, n. 1, p. 184-202, 2018.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012. p.177-241.
- CAMARGO, E.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise de Superfícies por Geoestatística Linear. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. V. M. (org.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, DF: Embrapa, 2004. p. 209.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, RS, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.
- DAS, M.; HAZRA, A.; SARKAR RAY, A.; BHATTACHARYA, S.; BANIK, P. Comparison of spatial interpolation methods for estimation of weekly rainfall in West Bengal, India. **Mausam**, Calcutá, v. 68, n. 1, p. 41-50, 2017.
- GARDIMAN, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Ambiência**, Guarapuava, PR, v. 8, n. 1, p. 61-71, 2012.

- CORTEZ, H. S.; LIMA, G. P.; SAKAMOTO, M. S. A seca 2010-2016 e as medidas do Estado do Ceará para mitigar seus efeitos. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, DF, v. 22, n. 44, p. 83-118, 2017.
- HIERA, M. D.; LIMA JUNIOR, A. F.; ZANELLA, M. E. Tendência da precipitação no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, PR, ano 15, v. 24, p. 39-47, 2019.
- HU, Q.; LI, Z.; WANG, L.; HUANG, Y.; WANG, Y.; LI, L. Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. **Water**, Basileia, v. 11, n. 3, p. 579-609, 2019.
- LEBRENZ, H.; BÁRDOSSY, A. Geostatistical interpolation by quantile kriging. **Hydrology and Earth System Sciences**, Munique, v. 23, n. 3, p. 1633-1648, 2019.
- MACEDO, M. A.; ASSAD, E. D.; CÂMARA, G.; OLIVEIRA, J. C. Avaliação de métodos para espacialização de índices de necessidade hídrica das culturas e sua aplicação em zoneamento agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, São José dos Campos, SP, v. 9, n. 3, p. 581-587, 2001.
- MARTINS, E. S.; SILVA, R. F. V.; BIAZETO, B.; QUINTANA, C. M. Northeast Drought Monitor: The Process. *In*: NYS, E.; ENGLE, N. L.; MAGALHÃES, A. R. **Drought in Brazil: Proactive Management and Policy**. Boca Raton ed. Australia: CRC Press, 2017. Cap 11, p.143–166.
- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase-sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, Itajaí, SC, v. 1, n. 13, p. 53-64, 2009.
- OLIVEIRA, L. F. C.; ANTONINI, J. C. A.; FIOREZE, A. P.; SILVA, M. A. S. Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 12, n. 6, p. 620-625, 2008.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Girona: Open Source Geospatial Foundation, 2018.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; BOTTEGA, E. L. Variabilidade espacial da precipitação pluviométrica para o Estado do Espírito Santo utilizando métodos multivariados. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE, v. 6, n. 4, p. 703-709, 2011.
- VIGNESH, R.; JOTHIPRAKASH, V.; SIVAKUMAR, B. Spatial rainfall variability in peninsular India: a nonlinear dynamic approach. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Berlim, v. 33, n. 2, p. 465-480, 2019.
- VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F.; MELLO, J. M.; ÁVILA, L. F. Spatial interpolation methods for mapping of rainfall. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2013.