

# Modelação Espacial da Precipitação na Ilha de Santiago, Cabo Verde, com o GeoStatistical Analyst<sup>©</sup>

Silva, J., Monteiro, P., Negreiros, J., Aguilár, F, Aguilár, M.

**Resumo** — A utilização dos métodos de interpolação espacial está cada vez mais frequente nas análises espaciais. Paralelamente, diversos softwares já contêm vários destes métodos, permitindo obter melhores resultados do desconhecido como acontece com o ArcGIS<sup>©</sup> através das extensões do Spatial Analyst<sup>©</sup> e do Geostatistical Analyst<sup>©</sup>. Este artigo apenas analisa a segunda extensão utilizando a distribuição espacial da precipitação média da ilha de Santiago, Cabo Verde, de 70 postos udométricos. O método de interpolação estocástico usado foi a Krigagem normal. Juntamente com outro tipo de dados geográficos, o mapa gerado permite questionar questões pertinentes como a avaliação dos riscos de poluição dos solos pelo transporte das águas, ocupação humana em termos de urbanizações e possíveis locais de inundação, ampliação de práticas de agricultura irrigada ou deslizamento de encostas e respectivas consequências.

**Palavras-Chave** — Cabo Verde, Interpolação Espacial, Pluviometria, Sistemas de Informação de Geográficos.

## 1 INTRODUÇÃO

A precipitação é um fenómeno que pode ser modelado através da geoestatística dado ser um fenómeno contínuo e sujeito a variabilidade espacial. Certamente, medir os dados de precipitação é crucial para a identificação de áreas com condições para a prática de agricultura, dimensionamento de recursos hídricos e respectiva implementação de infra-estruturas hidráulicas, avaliação ambiental e quantificação da erosão do solo [1].

Os métodos estocásticos de Krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no variograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo de estudo. Esta correlação espacial existente entre observações vizinhas (Lei de Tobler) para prever valores em locais não-amostrados é, assim, o aspecto fundamental que diferencia os interpoladores geoestatísticos dos demais.

A quantidade de precipitação na ilha de

Santiago, Cabo Verde, está muito condicionada pela situação geográfica do território, numa região muito afectada pelas altas pressões subtropicais (ver Figuras 1 e 2). As precipitações nesta ilha ocorrem num curto período do ano, geralmente entre Julho e Outubro, com uma média anual a não ultrapassar os 300 mm. Por outro lado, existe uma grande variabilidade espacial de distribuição da precipitação na ilha, por causa da influência de relevo e da direcção dos ventos. Os valores mais elevados ocorrem nas zonas de maior altitude com um forte contraste em relação às zonas de baixa altitude.

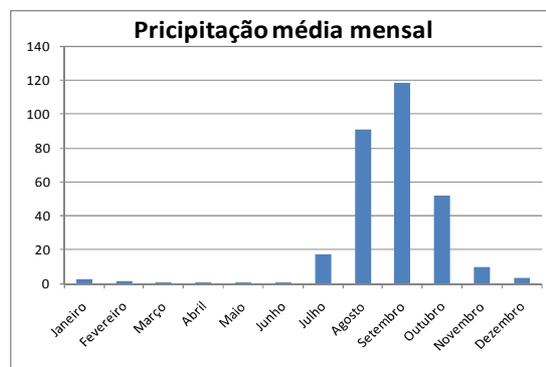


Fig. 1. Precipitação média mensal em Cabo Verde.

O presente artigo apresenta como objectivo analisar a distribuição de precipitação para toda a ilha de Santiago, a partir das amostras da média anual dos 70

- Silva e Monteiro são actuais mestrandos de Sistemas de Informação Geográficos (Programa Europeu SUGIK) na Universidade de Cabo Verde (Unicv), Santiago. jose.veiga@palgov.gov.cv e mpaula\_dias@hotmail.com.
- Negreiros é professor no Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. c8057@isegi.unl.pt
- Fernando e Manuel Aguilár são professores na Universidade de Almeria, Espanha. faguilar@ual.es e maguilár@ual.es.

postos udométricos existentes, com a utilização do método de Krigagem normal. Não sendo possível a obtenção de registos de precipitação em todas as unidades territoriais, a interpolação por Krigagem revela ser o método mais adequado para estimar os valores de precipitação para os locais não amostrados.

O software de sistemas de informação geográficos (SIG) de eleição foi o ArcGIS Geostatistical Analyst© da ESRI pois possui ferramentas avançadas para exploração de dados geográficos, identificação de anomalias e criação de superfícies (funções radiais, polinomiais locais e globais, inverso da distância ponderada, Krigagem e Co-Krigagem). Também providencia métodos objectivos para quantificar tendências e detectar padrões em dados espaciais.

## 2 O CASO ESPECÍFICO DE CABO VERDE

Santiago, uma das dez ilhas de Cabo Verde, pertence ao grupo de Sotavento. A posição do vento dominante é Norte-Este. Em termos geográficos, Cabo Verde encontra-se localizada entre os paralelos de 14°54' e 15°20' latitude Norte e entre os meridianos 23°46' e 23°25' longitude Oeste. Santiago é a maior ilha de Cabo Verde com 991 km<sup>2</sup> de superfície e a mais populosa do arquipélago com 300 mil habitantes. Paralelamente, a capital de Cabo Verde, Cidade da Praia, encontra-se em Santiago.

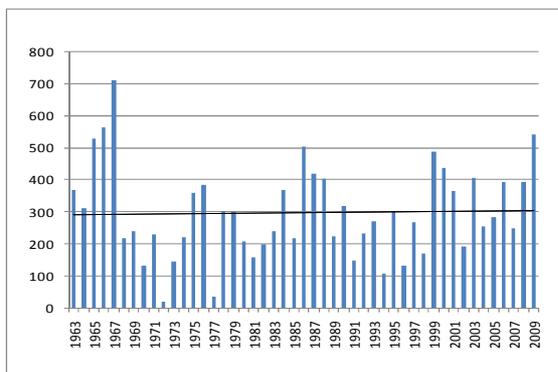


Fig. 2. Precipitação média anual entre 1963 e 2009.

A sua origem é vulcânica com alguns maciços montanhosos e o seu relevo é dominado por duas serras: Malagueta e Pico de Antónia (esta atingindo uma altitude de 1394 metros). Na ilha existe uma diversidade de formas de relevo, marcados por declives acentuados e por uma grande diversidade de vertentes que, associado a diferentes graus de rocha e à variabilidade das precipitações, induz a uma forte erosão. Contudo, os vestígios da

actividade vulcânica ainda são bem evidentes como, por exemplo, as crateras que formam as belas baías de Santiago.

A temperatura média anual ronda os 25°C e amplitude térmica anual é relativamente baixa (inferior a 10°C). Já referido anteriormente, a precipitação é fortemente marcada pela altitude e pela exposição das ingremes vertentes. A média anual de precipitação varia aproximadamente entre 190 mm na região litoral (Chão Bom, a 20 m de altitude) e 472,6 mm (São Jorge dos Órgãos, a 319m de altitude) mas pode ultrapassar os 800 mm a partir dos 1000 m de altitude. Associado à forte variação espacial, acrescenta-se a variação temporal. De acordo com a série de dados referente ao posto pluviométrico de Babosa (região de Picos) nos últimos dez anos, é notória a grande variabilidade dos valores médios anuais que podem variar entre os 20 mm e 765 mm [2].

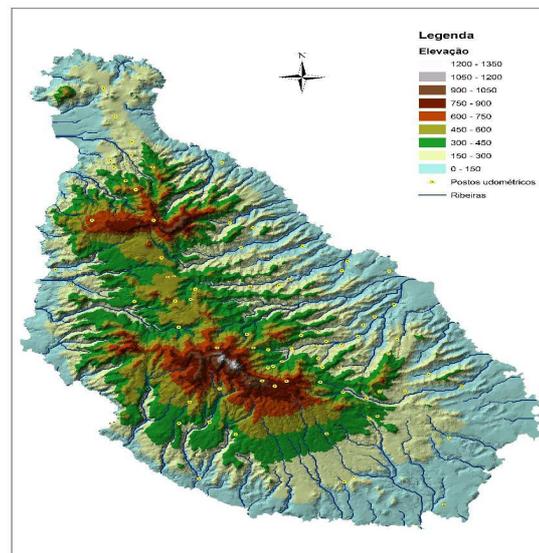


Fig. 3. O mapa de elevação da ilha de Santiago.

## 3 A ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA

Inicialmente, a geoestatística foi utilizada na solução de problemas de geologia e mineração tratando-se de técnicas específicas de interpolação espacial. Desenvolvido na Escola de Minas de Paris pelo Professor Matheron em 1963, o autor foi auxiliado pelos trabalho estatístico da escola Sul-africana e realizado nas minas de ouro e urânio. Estatisticamente, a geoestatística está baseada na teoria das variáveis regionalizadas em que os valores estão relacionados, de alguma forma, com a posição que ocupam no espaço.

Actualmente, esta ciência é sinónimo de uma classe de técnicas usada para inferir valores de uma variável distribuída no espaço

e/ou no tempo. Tais valores são implicitamente assumidos ser correlacionados com outros (modelagem do variograma). Após esta análise estrutural, as inferências em localizações não amostradas são realizadas pela Krigagem ou por simulações condicionais. Resumidamente, os passos clássicos num estudo empregando técnicas geoestatísticas inclui: (a) análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural (cálculo e modelação do variograma) e (c) computação do mapa de inferências.

A variografia apresenta como objectivo a construção do modelo que sintetiza os traços estruturais da variável regionalizada para obtenção das estimações. Esta traduz a função de autocorrelação espacial baseado no acréscimo quadrático médio entre pares de pontos distanciados de uma distância  $h$  (lag). Os variogramas experimentais são ajustados a modelos teóricos como é o caso do modelo esférico, exponencial e gaussiano.

Genericamente, a Krigagem normal é um método que usa esta dependência espacial entre as amostras vizinhas, expressa no variograma, para estimar os valores em qualquer posição dentro do campo de estudo. Por defeito, estes estimadores apresentam uma variância mínima e considera-se que a média é relativamente contante mas desconhecida (estacionaridade). Contudo, a modelação por Krigagem normal pode também levar em consideração as variações locais da variável, limitando o seu domínio de estacionaridade a uma vizinhança local. Assim, apenas as amostras da vizinhança do ponto a estimar são consideradas na estimação. Como seria de esperar, os pesos da Krigagem dependem da localização do ponto a estimar e da configuração geométrica entre as restantes amostras.

### 3.1 Análise Exploratória dos Dados

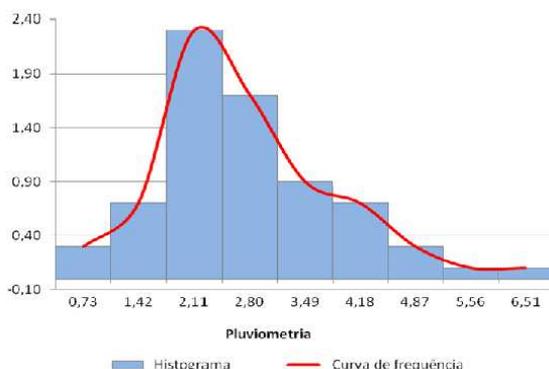


Fig. 3. O histograma das 70 amostras udométricas.

O coeficiente de Skewness (0,63598) mostra que a pluviosidade apresenta uma assimetria positiva mas com uma dispersão suave.

Naturalmente, a mediana (292,21) é menor que a média (304,05). Numa análise do nível de achatamento, a curva demonstra ser leptocurtica (3,7696). Em relação às medidas de tendência não central verifica-se que os valores não estão concentrados onde o range interquartil é de 27,32. De referir que o valor mínimo é 73,06 e o máximo é 651,48 enquanto o desvio padrão é 105,6. Não se verificam valores atípicos que possam indicar existência de outliers.

### 3.2 Análise de Tendência Geral

Este item tenta identificar a presença ou ausência da tendência global dos dados. Neste caso, os pontos estão projectados em dois planos perpendiculares: Este-Oeste e Norte-Sul. Nota-se que ambas as linhas são curvas um pouco acentuadas o que indica a presença de uma determinada tendência geral, demonstrando que a pluviosidade tende a aumentar no centro da ilha de Santiago e a diminuir nos extremos (baixas altitudes implica baixos valores e vice-versa).

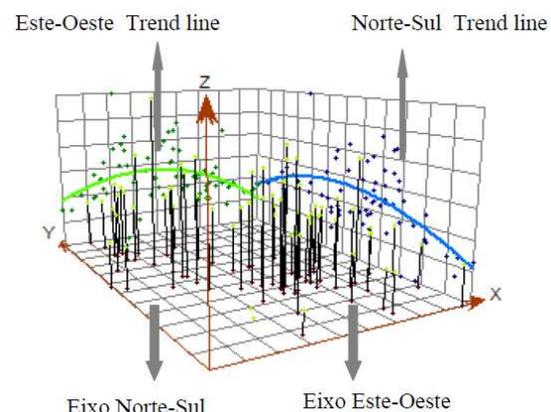


Fig. 4. Análise de trend do Geostatistical Analyst© do ArcGIS©.

### 3.3 Modelação da Continuidade Espacial

A correlação espacial quantifica a primeira Lei da Geografia de Tobler matematicamente: coisas mais próximas são mais parecidas que as coisas mais distantes. A nuvem do variograma permite verificar esta lei espacial entre as amostras medidas. De acordo com a figura 5, cada ponto indica a variância entre um par de pontos separados por uma determinada distância (lag). Naturalmente, é de esperar que a dissimilaridade entre valores aumente com a distância entre pontos. Isto é, à medida que a distância entre os pares localizados no mapa aumenta (movendo-se para a direita no eixo do xx) os valores de variograma também aumenta (movendo para cima no eixo do yy).

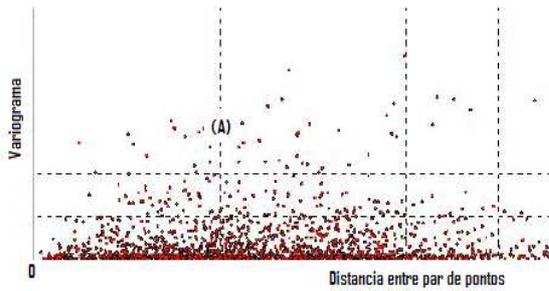


Fig. 5. A capacidade de seleccionar pontos desta nuvem do variograma e localizar espacialmente no mapa é uma grande característica do Geostatistical Analyst©.

Todavia, a uma determinada distância (ver simbolo A da figura 5), verifica-se um plateau (sill) que indica que a relação existente entre par de pontos separados a partir dessa distância (range) já puramente não existe. Contrariamente, par de pontos com alta variância mas curta distância entre ambos implica a presença de alta variabilidade de valores locais (ver Soares [3] para mais detalhes).

### 3.4 Variogramas Experimentais

Realizaram-se diferentes variogramas esféricos experimentais (ver figura 6) para decidir a modelação do variograma final dos 70 postos udométricos. O variograma que resultou com menor erro é o que apresenta a direcção NW-SE. De facto, verifica-se que para os parâmetros bandwidth=3, tolerance angle=45°, number of lags=12 e uma direcção de 325°, o variograma aumenta gradualmente até atingir 1,3 (sill ou patamar) com uma distancia de 0,13 (range maior). Comparando com as outras direcções, atinge-se o mesmo sill com distancias menores de 0,07 e 0,09, respectivamente. Trata-se, assim, de uma anisotropia geométrica na medida em que todos atingem o mesmo patamar de variabilidade a diferente distâncias.

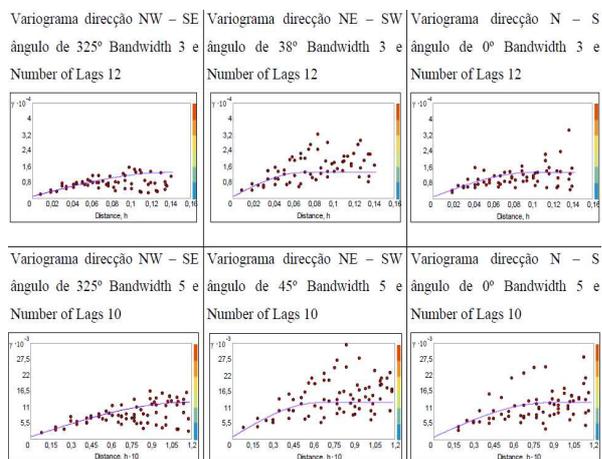


Fig. 6. Variograma experimentais.

### 3.5 Krigagem Normal e Validação Cruzada

De acordo com a figura 7, constata-se que a proximidade das linhas indica alteração acentuada de valores da elevação. Assim, os valores de maior concentração de pluviometria ocorrem nas zonas elevadas (Serra Malagueta e de Pico de Antónia) enquanto as zonas de baixa altitude (litoral) apresentam baixos valores. O comportamento da variável em causa é anisotrópico. De facto, visualiza-se uma direcção principal (325°) de continuidade ou homogeneidade espacial nesta direcção.

O processo de validação cruzada permite dar uma ideia do quão bem o modelo estimou, servindo assim como medida de incerteza da predição realizada. Genericamente, o cross-validation omite uma amostra do conjunto de dados inicial e estima o seu valor usando os restantes dados. Compara-se o valor estimado com o real e obtém-se o erro associado. Realiza-se este processo sucessivamente com as restantes amostras. O objectivo é, por exemplo, caso se queira comparar modelos, ajudar o utilizador a decidir sobre qual o modelo que apresenta maior precisão de estimação. O Geostatistical Analyst© calcula várias estatísticas deste tipo de erro: (A) Média estimada (próximo de 0 se a estimação é “unbiased”); (B) Raiz quadrada da média e o respectivo desvio padrão (o mais baixo melhor); (C) Raiz quadrada standardizada (próximo de 1 melhor);

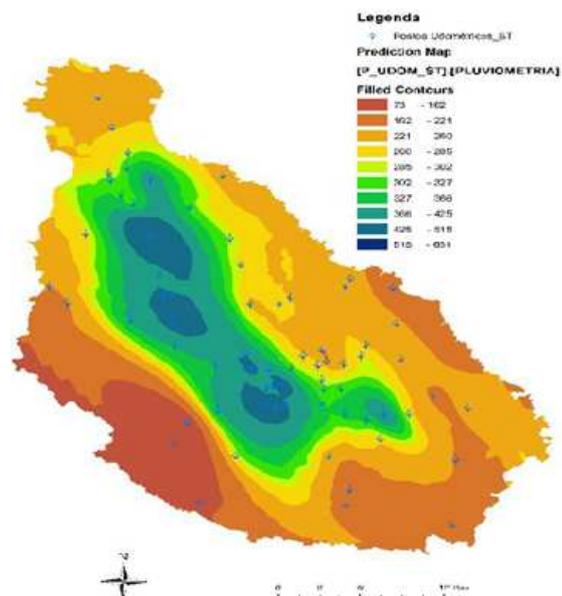


Fig. 7. Mapa resultante do processo de Krigagem

No gráfico 8, a linha contínua mostra a recta  $x=y$  enquanto a linha a tracejado mostra a melhor correlação do scatterplot entre os

pontos estimados (eixo yy) e os valores reais (eixo xx). Como seria de esperar, verifica-se que os valores altos são subestimados enquanto os valores baixos são sobrestimados, uma característica clássica de todos os interpoladores lineares. A média dos erros é 4,67 (superior a um) e a diferença entre valores estimados e reais apresentam uma grande variabilidade, logo o estimador não é, provavelmente, BLUE (Best Unbiased Estimator) mas sim BLUE (Best Linear Unbiased Estimator).

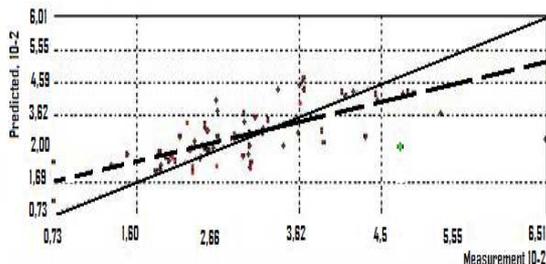


Fig. 8. Gráfico resultante da validação cruzada do modelo usado na figura anterior. A raiz quadrada e a raiz quadrada standardizada do erro são 0,25 e 0,04, respectivamente.

## 8 CONCLUSÃO

A geoestatística permite trabalhar diferentes temas como variáveis climáticas. Retirar conclusões acerca da sua distribuição espacial da pluviosidade na ilha de Santiago revela ser de grande importância para a identificação de futuras zonas agro-climáticas bem como para o dimensionamento do sistema de irrigação das culturas através da construção de novas infra-estruturas hidráulicas [4].

Embora não se tenha utilizado uma segunda variável como a altitude para se obter uma melhor estimação da pluviometria através da CoKrigagem ou Krigagem com deriva externa (duas outras variantes da família de Krigagem), o presente método

usado revelam-se de uma grande viabilidade para o estudo em causa.

Note-se também que o estudo das leis da Mãe Natureza seguem uma filosofia de uma arte para além de ser uma ciência. Efectivamente, estes interpoladores demonstram que revelam diferença de valores estimados de acordo com os parâmetros definidos pelo variogramas experimentais dado este fase requerer um conjunto diverso de parâmetros a ser definidos pelo usuário.

Uma futura linha de orientação a ter em conta neste trabalho seria questionar a correlação linear (ou outro tipo) entre a topografia da Figura 3 e a precipitação calculada da Figura 7. Um estudo conduzido por Sevruc [5] nos Alpes Suíços, por exemplo, mostrou que apenas 25% da variação da precipitação é explicada pela altitude havendo outros factores a ter em conta como o número de árvores da região, estação do ano, a direcção do vento ou outras características topográficas.

## REFERÊNCIAS

- [1] Correia, E. Condições pluviométricas para a cultura do milho na Ilha de Santiago (Cabo Verde). Lisboa, Instituto de Investigação Científica Tropical, 115p, 1988.
- [2] Mello, C. et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas (<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v27n5/v27n5a17.pdf>), 2003.
- [3] Soares, A. Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente. IST Press, 206 p., 2000.
- [4] Costa, F. e Nunes, M. A precipitação como factor de erosão hídrica na bacia da Ribeira Seca, Santiago, Cabo Verde. Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa. Parcerias na Área do Clima e Ambiente, 16p. 2008.
- [5] Sevruc, B. "Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps", *Climate Change*, Springer Netherlands, ISSN 0165-0009, 36 (3-4), pp. 355-369, 2004.