



Por: Áurea Sousa  
Professora Auxiliar do Departamento de Matemática  
e Estatística da Faculdade de Ciências e Tecnologia  
da Universidade dos Açores  
aurea.st.sousa@uac.pt

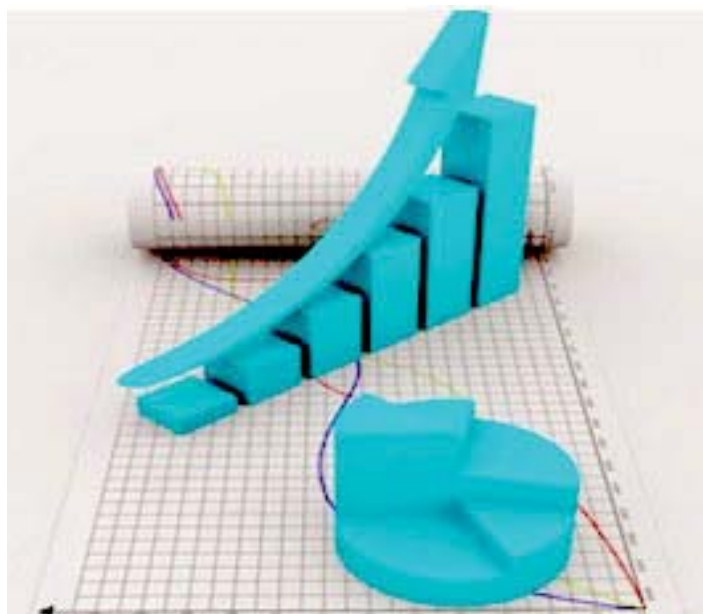
# Estatística aplicada ao estudo de fenómenos naturais: O caso da Geoestatística

A Estatística aplica-se nas mais diversas áreas científicas, entre as quais se encontra a área das Ciências da Terra e do Ambiente. O termo Geoestatística, ou Estatística Espacial, é considerado como um tópico especial da Estatística Aplicada que visa dar resposta a problemas referentes a variáveis que apresentam estrutura espacial (e.g., concentração de poluentes, concentrações químicas de amostras de solos ou águas, valores referentes à temperatura e à pluviosidade de uma região, dimensões de árvores, índices de vitalidade de determinadas espécies florestais), as quais caracterizam alguns fenómenos naturais. Mais concretamente, a Geoestatística refere-se ao estudo, caracterização e modelação de variáveis que apresentam estrutura espacial. Na génese da Geoestatística esteve a necessidade da modelização de recursos geológicos, com vista à caracterização da dispersão espacial da concentração de metais em jazigos minerais e ao estudo da qualidade de águas subterrâneas.

Em algumas ciências (principalmente nas da Terra e do Ambiente), algumas variáveis podem não apresentar um padrão de distribuição como o requerido pela Estatística clássica (e.g., normalidade e independência dos dados). O estudo de fenómenos espaciais estruturados (e.g., florestas, recursos ecológicos, geológicos, solos e aquíferos contaminados, pluvimetria de uma região) é efetuado com base em algumas amostras ou observações, com vista ao registo de valores da(s) variável(eis) de interesse. Os fenómenos desta natureza têm geralmente as seguintes características: i) distribuem-se no espaço com uma certa estrutura, ou seja, de um modo não aleatório; ii) as informações (amostras, observações) relativas a este tipo de fenómenos são, muitas vezes, parcelares, discretas e escassas, pelo que há sempre um certo grau de incerteza inerente ao seu conhecimento global.

Os fenómenos espaciais têm especificidades próprias: o acentuado grau de incerteza ligado ao seu conhecimento e o facto de ser impossível a repetição da amostra ou observação num dado espaço ou momento. É importante salientar que os valores registados, nesse âmbito, não são em geral realizações de uma variável aleatória, pois são correlacionados. De facto, a maioria das variáveis oriundas de fenómenos naturais apresentam características intermediárias entre as realmente aleatórias e as totalmente determinísticas, pelo que é imprescindível a admissão de alguma incerteza no que respeita ao comportamento destes fenómenos entre duas posições espaciais da amostragem. No entanto, as funções aleatórias são utilizadas frequentemente para representar essa incerteza.

Os principais objetivos da Geoestatística são a descrição do comportamento espacial



dos dados; a estimação do valor médio de uma variável numa determinada área; a estimação de valores das variáveis numa dada localização; a quantificação da incerteza associada à estimação; a utilização dos valores conhecidos de uma variável para estimar os valores de outra variável, e a estimação da distribuição de valores de uma variável numa determinada área. Nesse âmbito, deve ser dada uma atenção especial à avaliação de medidas de incerteza, tendo em atenção a variabilidade do fenómeno espacial (dispersão espacial e espaço-temporal), à qualidade das amostras e observações, ao tipo de modelo selecionado e ao grau de conhecimento acerca do fenómeno em estudo.

Na verdade, os procedimentos de análise e inferência dos fenómenos espaciais, no âmbito da Geoestatística, ajudam a compreender uma aparente aleatoriedade desses dados, uma vez que há algumas irregularidades e alguma variação imprevisível de um ponto para outro, aliada a uma eventual estruturação espacial (e.g., é impossível prever com exatidão o teor do minério num determinado ponto da jazida (aspecto aleatório), mas é muito provável que haja minério rico perto de minério (aspecto estrutural)). Neste contexto, determina-se (por tentativas) uma função matemática que descreva de um modo contínuo a variabilidade ou correlação espacial existente nos dados, a qual representa a base da quantificação da variabilidade espacial no âmbito desta ciência. Assim, a Geoestatística tem sido aplicada, desde a década de 60, em diversas áreas das Ciências da Terra e do Ambiente (e.g., Avaliação Mineral, Hidrogeologia, Cartogra-

fia, Geologia Ambiental e Geotecnia) a nível da modelização de fenómenos espaciais.

Considerando que a(s) variável(eis) de interesse se distribui(em) continuamente na região em estudo, os dados geoestatísticos poderiam, em princípio, ser medidos em qualquer região. No entanto, estes resultam geralmente de medições em um número limitado de locais de observação, dando-se uma especial ênfase à inferência de valores da variável relativos a locais em que não foram efetuadas medições (locais onde não foi realizada a amostragem). No entanto, a obtenção dessas estimativas requer o recurso a uma função matemática ou modelo do comportamento do fenómeno que originou os valores das variáveis em estudo que se ajuste satisfatoriamente aos pontos do variograma (representação gráfica) e seja capaz de reproduzir pontos em distâncias onde não exista nenhum. A ideia subjacente é a de que o valor de uma variável numa determinada localização está relacionado com os valores obtidos a partir de outras localizações situadas a certa distância, sendo expectável que a influência seja tanto maior quanto menor for a distância entre estas.

A nível metodológico a Geoestatística recorre, nomeadamente, a: i) procedimentos estatísticos que permitem quantificar a continuidade espacial da(s) variável(eis) em estudo; ii) modelos de interpolação espacial, tendo em consideração a sua variabilidade estrutural; e iii) modelos de simulação estocástica que visam a quantificação da incerteza inerente ao fenómeno espacial em estudo. Algumas atividades no âmbito da Geoestatística

são o cálculo e modelação de variogramas experimentais, estimativas geoestatísticas e simulação estocástica.

A utilização de técnicas geoestatísticas pressupõe os seguintes passos: i) Análise exploratória dos dados, de forma a se conhecer as principais características da amostra de dados observados (e.g., simetria ou assimétrica das distribuições; presença ou não de valores discrepantes, também designados por outliers; agrupamentos de dados no espaço; tendências e correlações); ii) Análise estrutural (modelação do variograma, a qual constitui um passo extremamente importante); iii) Validação que analisa a performance referente à estimação por Krigagem relativa à utilização de um determinado modelo de variograma, selecionado e entre os vários possíveis; e iv) Realização de inferências (Krigagem ou Simulação).

A associação da Geoestatística aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) e, por conseguinte, às técnicas de análise espacial implementadas nesses sistemas, é cada vez mais importante para a aplicação de procedimentos de modelação espacial, uma vez que acrescenta aos resultados obtidos medidas de incerteza decorrente dos procedimentos inferenciais, o que constitui um progresso a nível da automatização e da análise da informação espacial. De facto, a crescente integração de modelos, sejam eles determinísticos ou estocásticos, nos SIG's é uma consequência natural da evolução dos SIG's a nível da implementação de representações espaciais que se aproximam mais do contínuo dos fenómenos ambientais. No caso em que os dados são recolhidos segundo um plano de amostragem com coordenadas definidas, é importante, aquando da sua análise, ter em atenção a configuração geométrica referente a esses dados, pelo que os resultados são frequentemente apresentados sob a forma de mapas geológicos. Nesse contexto, a Geoestatística é muitas vezes utilizada a nível da elaboração de mapas de contornos, os quais contêm linhas que representam medidas interpoladas com iguais valores, os quais apresentam variabilidade espacial.

Algumas ferramentas da simulação permitem infinitas realizações de mapas, a que correspondem sensivelmente o mesmo semi-variograma e a mesma variância que caracterizam os dados originais, sendo expectável que a média de um grande número de mapas simulados origine resultados mais realistas e, por conseguinte, mais fidedignos para a realização de previsões.

Enfim, mesmo perante a especificidade dos dados com estrutura espacial e a existência de software disponível para a análise de dados desta natureza, é necessário não esquecer que estes métodos têm por base conhecimentos de Matemática e de Estatística!