

## A GEOESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA DE ESTUDO DA BATIMETRIA NA VERTENTE CONTINENTAL PORTUGUESA

PEDRO BORDALO MACHADO<sup>1</sup>

ANTÓNIO JORGE DE SOUSA<sup>2</sup>

**Resumo** – O interesse crescente das frotas de pesca profissional pelos recursos de águas profundas, nos últimos vinte anos, levou o Instituto Nacional de Investigação das Pescas (actualmente INIAP-IPIMAR) a realizar estudos sobre a batimetria da margem continental portuguesa, com o objectivo de identificar bancos potenciais de pesca para as espécies de água profunda na vertente continental portuguesa. Foi seleccionada, ao largo da Figueira da Foz, uma área com cerca de 665km<sup>2</sup>, na vertente continental portuguesa, para a realização de um estudo geoestatístico de profundidade. A partir de dados de campanhas oceanográficas, foi analisada a continuidade espacial, foram ensaiados métodos de estimação geoestatística e investigada a respectiva incerteza. A *krigagem* dos resíduos apresentou a menor variabilidade do erro de estimação. Contudo, a *krigagem* ordinária foi escolhida como forma de estimar a profundidade, por apresentar uma variabilidade do erro muito próxima da do tipo de *krigagem* anterior e por a sua implementação ser menos complexa e exigir menos requisitos. Os resultados permitiram a construção de uma carta digital da batimetria e de um cartograma de incerteza à prática do arrasto de fundo.

**Palavras-chave:** Estimação da batimetria, pesca, *krigagem*, incerteza.

**Abstract** – GEOSTATISTICS AS A TOOL FOR THE STUDY OF BATHYMETRY ON THE PORTUGUESE CONTINENTAL SLOPE. The increasing interest in deep-water resources by the commercial fishing fleet over the last twenty years has led the Fisheries Research National Institute (currently INIAP-IPIMAR) to conduct seafloor topography studies, aimed at identifying potential fishing grounds for deep-water species in the Portuguese continental slope. The present article lies within the scope of the aforementioned topography studies. The spatial variability of the seafloor depth was researched for a particular area of the Portuguese continental slope, of about 665km<sup>2</sup>, off Figueira da Foz. Geostatistical analysis, comprising spatial continuity, various estimation methods and their respective level of uncertainty, was conducted. The sequential gaussian simulation method was used in order to evaluate

---

<sup>1</sup> Biólogo. Departamento de Recursos Marinhos, Instituto de Investigação Agrária e das Pescas (INIAP) – IPIMAR, Avenida de Brasília, 1449-006 Lisboa, Portugal. E-mail: bmachado@ipimar.pt

<sup>2</sup> Professor Associado. Departamento de Engenharia de Minas e Georrecursos, Instituto Superior Técnico (IST), Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal. E-mail: ajsousa@ist.utl.pt

the degree of uncertainty of the estimated values. Residual kriging yielded the lowest estimation errors. The higher level of uncertainty exhibited by the estimation results obtained by Ordinary Kriging suggests that a non-stationary geostatistic model be adopted for the area under study. However, the implementation of a stationary one is more straightforward since it has fewer requirements. Based on the estimation and simulation results, two digital maps were constructed for the study area, one showing the bathymetry and the other displaying the trawl fishing uncertainty.

**Key words:** Bathymetry estimation, kriging, fisheries, uncertainty.

**Résumé** - LA GÉOSTATISTIQUE COMME OUTIL POUR L'ÉTUDE DE LA BATIMÉTRIE SUR LE TALUS CONTINENTAL PORTUGAIS. L'intérêt croissant des flottes de pêche professionnelle sur les ressources d'eau profonde pendant les vingt dernières années a mené l'Institut National de Recherches de Pêche (actuellement INIAP-IPIMAR) à conduire des études sur la bathymétrie de la marge continentale, ayant pour but l'identification des potentielles banques de pêche pour les espèces d'eau profonde dans la pente continentale portugaise. On a étudié la variabilité spatiale de la profondeur du fond sous-marin dans un secteur particulier du talus continental portugais (Figueira da Foz) avec environ 665 mètres carrés. On a procédé à une analyse géostatistique comportant la continuité spatiale, plusieurs méthodes d'estimation et respectives incertitudes. La méthode de simulation séquentielle gaussienne a été appliquée pour évaluer l'incertitude des valeurs estimées. Le krigeage résiduel a rapporté les plus basses erreurs d'estimation. Les erreurs plus élevées observées dans les résultats de l'évaluation suggèrent que le modèle géostatistique à adopter pour le secteur d'étude devrait être non-stationnaire. Cependant, le krigeage ordinaire est moins exigeant. Basé sur l'estimation et les résultats de simulation, on a construit deux cartes numériques pour le secteur d'étude, une bathymétrique et une autre d'incertitude associée au niveau de pêche au chalut.

**Mots-clés:** Bathymétrie, krigeage, pêche, incertitude.

## I. INTRODUÇÃO

A pesca em águas portuguesas tem sido tradicionalmente realizada a profundidades inferiores a 200m, na plataforma continental. No entanto, nos últimos vinte anos, a crescente preocupação internacional pela sobre-exploração dos recursos marinhos deu origem a restrições desta actividade, em áreas da plataforma onde os recursos estão mais sujeitos ao esforço de pesca. Esta situação levou a frota comercial a procurar outros recursos não convencionais existentes a profundidades superiores a 400m que, até meados dos anos 80, não se revestiam de grande interesse, quer pela dificuldade de acesso dos aparelhos de pesca tradicionais a tais profundidades, quer pela dificuldade de introdução destas espécies no mercado (PIÑEIRO *et al.*, 1998). A exploração destas áreas, ainda pouco conhecidas, não estava isenta de riscos tais como a ocorrência de danos no aparelho de pesca, pelo que o conhecimento da batimetria submarina constituía um factor determinante no rendimento da actividade da pesca.

Reconhecendo a importância crescente que os crustáceos de profundidade, em particular o lagostim (*Nephrops norvegicus*), começaram a ter para a frota comercial de arrasto na década de 80 do século xx, o Instituto Nacional de Investigação das Pescas (actual INIAP-IPIMAR), promoveu, entre 1983 e 1987, um estudo da topografia submarina na vertente continental portuguesa, a profundidades superiores a 400m, destinado a delimitar e identificar os principais pesqueiros de lagostim na margem continental portuguesa (FIGUEIREDO e VIRIATO, 1989). O conhecimento da morfologia dos fundos, para além de possibilitar a identificação e delimitação de potenciais áreas de pesca de recursos de profundidade, pode conduzir à obtenção de informações mais fiáveis sobre a distribuição e abundância dos recursos que vivem junto ao fundo do mar (FIGUEIREDO e VIRIATO, 1989). Estes estudos têm sido prosseguidos pelo INIAP-IPIMAR nas duas últimas décadas e com mais ou menos regularidade, tendo como alvo a detecção de potenciais áreas de pesca, não só de lagostim, mas também de outros recursos de profundidade como o peixe-espada preto (*Aphanopus carbo* – Lowe, 1839).

O presente trabalho insere-se no âmbito dos referidos estudos de topografia dos fundos. O comportamento espacial da profundidade é investigado numa área de aproximadamente 665km<sup>2</sup>, situada na vertente (talude) continental portuguesa, ao largo da Figueira da Foz. Através de informações recolhidas no decurso de campanhas oceanográficas pretende-se estimar a profundidade em locais desconhecidos, utilizando técnicas de interpolação geoestatística, baseadas no estudo da continuidade espacial. A utilização de métodos de interpolação da classe de ferramentas da geoestatística foi já realizada por outros autores no estudo da batimetria (DAVID, 1986; HERZFELD, 1989; KIELLAND and DAGBERT, 1992).

Os resultados da estimação foram usados na construção de uma carta digital da batimetria. Dada a importância da pesca do arrasto de fundo nas campanhas desenvolvidas pelo INIAP-IPIMAR, foi ainda avaliada a incerteza espacial da profundidade com o objectivo de identificar quais as áreas possíveis para a realização deste tipo de pesca na área de estudo.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

A recolha das amostras que serviram de base ao presente estudo decorreu a bordo do Navio de Investigação (N/I) NORUEGA ao longo de actividades de sondagem e de pesca realizadas numa área situada ao largo da Figueira da Foz (fig. 1). Nos anos de 1995, 1997, 2000 e 2001, foram realizados nove percursos de sondagem do fundo do mar e catorze lances de pesca de arrasto de fundo com rede tipo camaroeira de 50m de comprimento total, no âmbito de quatro campanhas oceanográficas dirigidas ao estudo de recursos de profundidade. A informação recolhida em cada ponto de amostragem incluiu a posição geográfica (latitude, longitude), a profundidade (metros), a hora (hh:mm) e a natureza litológica do fundo (A-areia; V-vasa; R-rocha).

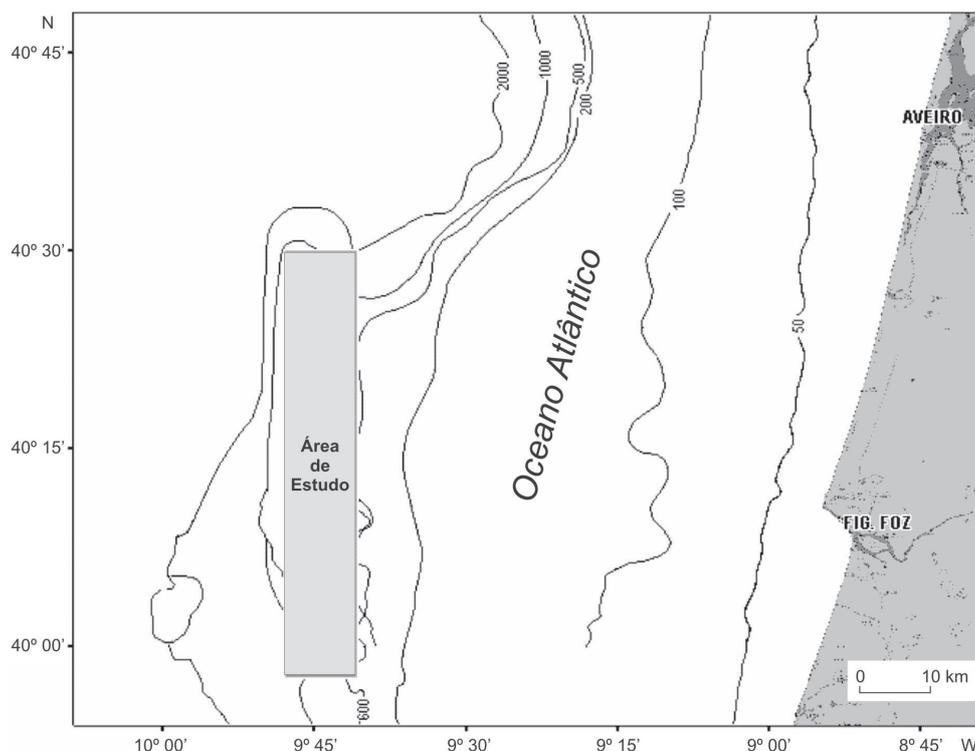


Fig. 1 – Área de estudo situada ao largo da Figueira da Foz. Fonte do Mapa: Cartas digitais ARCS-4-GIS™, construídas com base nas cartas da costa ocidental portuguesa produzidas pelo Instituto Hidrográfico entre 1978/1981 e 1987.

*Fig. 1 – Study area located off Figueira da Foz. Map source: ARCS-4-GIS™ digital charts based on Portuguese west coast charts produced by the Hydrographic Institute between 1978/1981 and 1987.*

As sondagens foram definidas ao longo de transectos, mais ou menos perpendiculares à direcção de maior variabilidade da profundidade, cobrindo distâncias que variaram com o tempo disponível para a sua realização. A velocidade do navio esteve compreendida entre 6,5 e 9 nós e o registo de dados foi efectuado em intervalos de tempo de 5 minutos. Os dados de sondagem recolhidos na campanha de 2001 foram excluídos da amostra a analisar, constituindo uma sub-amostra de teste do modelo de estimação da profundidade adoptado neste estudo. Os lances de pesca tiveram uma duração de cerca de 60 minutos, período em que a velocidade do navio foi mantida à volta de 3 nós  $\approx$  5,4km/h. O posicionamento do navio foi determinado pelo equipamento de navegação por satélite MAGNAVOX-1105/GPS/T-OMEGA que utiliza o sistema de referência wgs84. Este sistema efectua um posicionamento absoluto simples, no qual as posições

são determinadas directamente em relação ao referencial geocêntrico sem recurso a estações de referência e estão sujeitas a um EMQ (Erro Médio Quadrático) de mais ou menos 30m em planimetria. As profundidades foram indicadas pela sonda acústica *SIMRAD EK500*.

De modo a prosseguir com a análise geoestatística, assumiu-se que a profundidade é um fenómeno espacial que pode ser modelado por uma *variável aleatória regionalizada* (VR), distribuindo-se no espaço de um modo não aleatório, mas associada a um certo grau de incerteza. Com o objectivo de avaliar a homogeneidade dos valores da amostra, foi efectuada uma descrição da distribuição univariada dos mesmos, ignorando a sua localização espacial, tendo-se, para além disso, dividido a área de estudo em oito parcelas e calculado para cada uma destas a média e o desvio padrão.

Para analisar a continuidade espacial da profundidade, foi utilizado o variograma  $\gamma(h)$  como medida de dissemelhança entre valores da amostra. Os variogramas experimentais foram calculados em quatro direcções diferentes: N-S ( $0^\circ$ ), E-W ( $90^\circ$ ), SW-NE ( $45^\circ$ ) e NW-SE ( $135^\circ$ ). Com base nos diferentes valores da velocidade do navio e no intervalo de registo de pontos das sondagens foi definida uma distância  $h$  máxima entre pontos de  $0,3^\circ$ . Após a determinação dos valores  $\gamma(h)$ , foram analisadas as estruturas espaciais obtidas, tendo-se construído em função destas e do conhecimento já existente do fenómeno em estudo, modelos de variograma que as sintetizem, integrem e que se ajustem aos variogramas experimentais.

A estimação da profundidade em locais desconhecidos da área de estudo foi realizada com base no(s) modelo(s) de variograma(s) seleccionado(s) utilizando três variantes dos algoritmos de interpolação de *krigagem*: *krigagem ordinária* (KO), *krigagem universal* (KU) e *krigagem dos resíduos* (KR). A KR apresenta como diferenças, relativamente à KU, o facto de se estimar a componente residual do estimador separadamente por KO, ao qual são adicionados, posteriormente, os valores estimados pela regressão linear. A selecção do melhor método de estimação dos valores de profundidade foi realizada com base: (i) nos resultados do teste de validação cruzada; (ii) nas estimativas obtidas para os pontos da sub-amostra de teste e nos coeficientes de correlação entre os valores da amostra e os estimados por *krigagem*, por um lado e pelos valores da sub-amostra de teste e os estimados por *krigagem*. Para a análise da correlação, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson.

A análise da incerteza dos resultados da estimação foi realizada com recurso à simulação estocástica da variável *profundidade*, tendo-se, para o efeito, construído uma grelha regular de 82 180 pontos (distância de 100m). O modelo de simulação utilizado foi o sequencial gaussiano (GOOVAERTS, 1997), tendo sido realizadas 100 simulações em cada ponto da grelha.

Para cada ponto procedeu-se, ainda, ao cálculo dos desvios dos  $x$  valores simulados em relação à média  $\bar{X}$ , através da expressão,

$$| 1 - (x / \bar{X}) | \quad x=1, \dots, 100; \quad (1)$$

tendo-se retirado as dez realizações que apresentavam um maior desvio e calculado a diferença entre os valores que exibiram o máximo e o mínimo desvio, ou seja entre a 90.<sup>a</sup> e a 1.<sup>a</sup> realização, por ordem decrescente dos valores. A partir destes, foram identificadas áreas propícias à realização de arrastos de fundo, considerando para o efeito, que cada lance cobre um percurso de aproximadamente 5,4km, no qual a profundidade tem uma variação máxima de 50m.

O processamento e a análise dos dados foram realizados nos seguintes *softwares*: S-PLUS 2000© PROFESSIONAL RELEASE 2, Módulo S+SPATIALSTATS V. 1.5, GEOIMS e MICROSOFT® EXCEL 2000.

### III. RESULTADOS

No decurso das campanhas oceanográficas realizadas, foram registadas um total de 430 medições da profundidade, das quais 366 constituíram a amostra de base do trabalho e 64 o sub-conjunto de amostras de teste de modelos de estimação (fig. 2). A maioria dos pontos da amostra de base apresentou valores de profundidade superiores a 600m e inferiores a 1 000m. Como se pode ver pelo desvio padrão e coeficiente de variação indicados no Quadro I, os valores amostrados apresentaram elevada variabilidade. Os valores superiores a 1 000m foram menos frequentes; contudo, exibiram uma maior variabilidade indicada

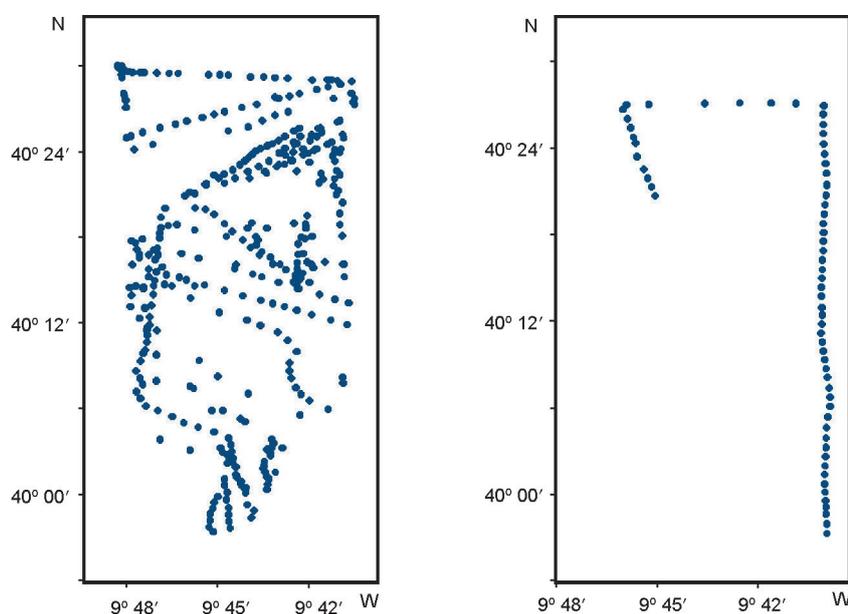


Fig. 2 – Localização dos registos da profundidade efectuados na área de estudo. a) Dados experimentais de base e b) Sub-amostra de teste.

*Fig. 2 – Depth records location in the study area. a) Experimental base data and b) Test sub-sample*

Quadro I – Estatística descritiva do conjunto de pontos da amostra de base.

Table I – Descriptive statistics of the experimental base values.

Média	937,7
1.º Quartil	573,0
Mediana	757,5
3.º Quartil	855,0
Desvio-padrão	608,3
Variância da amostra	370 063,1
Coefficiente variável	0,65
Assimetria	1,91
Mínimo	392
Máximo	2 752
N	366

pela assimetria positiva da amostra (Quadro I). Nas oito parcelas em que foi dividida a amostra, não se observaram indícios de uma tendência marcada na média e no desvio padrão, apesar da existência de alguns valores anómalos na primeira e segunda parcelas. Considerou-se, assim e numa primeira fase, que a variável regionalizada que caracteriza a profundidade apresenta homogeneidade espacial e consequentemente se pode assumir a condição de estacionariedade.

No cálculo dos variogramas experimentais, para as quatro direcções referidas, foram ajustados esquemas esféricos. O esquema gaussiano também foi ajustado, no entanto, produziu piores resultados aferidos pelo teste de validação cruzada. Os variogramas esféricos exibiram diferenças quanto à variabilidade espacial, tendo-se verificado a existência de anisotropias, ou seja, uma continuidade diferencial da variável que está dependente das direcções do espaço. De entre as direcções analisadas, a direcção 90º exibiu o variograma com a amplitude mais reduzida enquanto o da direcção 0º apresentou a maior, denunciando a direcção de maior continuidade espacial da profundidade. Dado que estes dois variogramas convergem para o mesmo patamar, foi definido, a partir destes, um modelo de anisotropia geométrica com base nas suas amplitudes (fig. 3). As expressões que caracterizam este modelo são indicadas de seguida:

$$\left| \begin{array}{ll} \gamma(h) = 369052 \left[ 1,5 \frac{h}{0,2} - 0,5 \frac{h^3}{(0,2)^3} \right] & h < 0,2 \\ \gamma(h) = 369052 & h \geq 0,2 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Direcção } 0^\circ \\ \end{array} \quad (2)$$

$$\left| \begin{array}{ll} \gamma(h) = 369052 \left[ 1,5 \frac{h}{0,09} - 0,5 \frac{h^3}{(0,09)^3} \right] & h < 0,09 \\ \gamma(h) = 369052 & h \geq 0,09 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{Direcção } 90^\circ \\ \end{array} \quad (3)$$

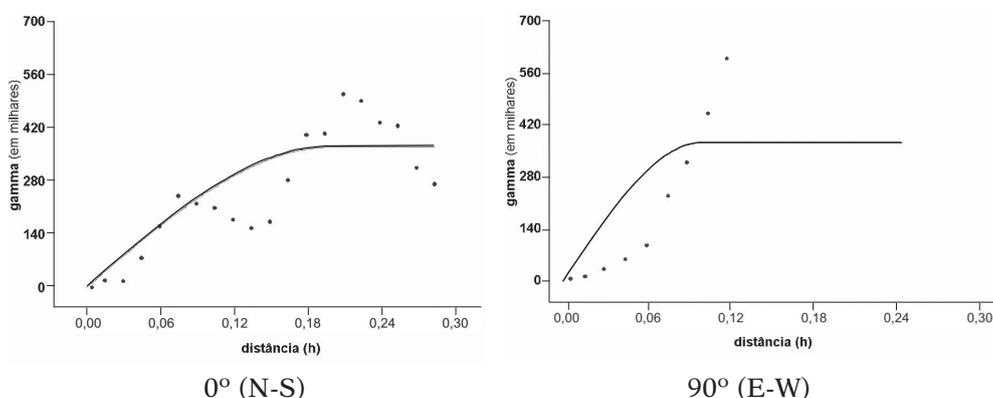


Fig. 3 – Variogramas experimentais do tipo esférico calculados para as direcções  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Estes constituem a base de um modelo de anisotropia geométrica.

*Fig. 3 – Experimental variograms of spherical scheme calculated for the  $0^\circ$  and  $90^\circ$  directions. These provide the basis for a geometric anisotropy model.*

De forma a proceder à estimação da profundidade por KR e KU na área de estudo, foram determinados os resíduos da VR por regressão linear simples de duas funções polinomiais, uma do 1.º e outra do 2.º grau, tendo-se de seguida calculado os variogramas experimentais para as quatro direcções anteriormente estabelecidas. A partir dos resíduos do 1.º grau foi construído um modelo global de isotropia com base nos variogramas de esquema esférico estimados para as direcções  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (amplitude=0,17). Para os valores residuais do 2.º grau foi também construído um modelo global de isotropia e, neste caso com base nos variogramas de esquema esférico estimados para as direcções  $45^\circ$  e  $135^\circ$  (amplitude=0,08).

Os resultados obtidos pelos diferentes interpoladores foram comparados de forma a escolher o que apresentava os valores de erro de estimação mais baixos e com menor variabilidade. Assim, foram aplicados procedimentos de estatística básica aos valores de erro de estimação da amostra de base e da sub-amostra de teste.

No que respeita ao erro de estimação da amostra de base, a KO produziu as melhores estimativas, apresentando o valor mais baixo do desvio padrão, *circa* de 109 (Quadro II). Logo de seguida, situaram-se as KR e KU tendo por base um modelo de isotropia dos resíduos do 1.º grau, que apresentaram um desvio padrão do erro de estimação à volta de 110 e uma média próxima de 1,2. A KU constituiu o interpolador que produziu melhores estimativas do erro de estimação na sub-amostra de teste (Quadro II). Os coeficientes de correlação mais elevados foram obtidos com a KO e a KU. Em face dos resultados, podemos afirmar que os métodos de estimação da profundidade que produziram os melhores resultados foram a KO e a KU (com base no modelo de isotropia dos resíduos do 1.º grau).

Quadro II – Estatísticas básicas do erro de estimação (I) dos valores experimentais da amostra de base e (II) do erro de estimação dos valores da sub-amostra de teste obtidos da *Krigagem* Ordinária, *Krigagem* dos Resíduos e *Krigagem* Universal.

Table II – Estimation error basic statistics of the experimental base values (I) and test sub-sample values (II) obtained by Ordinary Kriging, Residual Kriging and Universal Kriging.

	Krig. Ordinária	Krigagem dos resíduos		Krigagem Universal		
		Res. Polin. 1.º	Res. Polin. 2.º	Res. Polin. 1.º	Res. Polin. 2.º	
I	M	1,711	1,260	1,439	1,141	0,922
	MED	1,447	1,466	1,131	1,479	0,961
	DP	109,537	110,660	110,727	110,714	111,152
II	M	81,442	42,977	152,956	-61,039	-0,714
	MED	79,814	29,027	57,877	-29,911	-2,048
	DP	199,252	196,559	355,811	169,108	186,688
CC	0,9837	0,9834	0,9833	0,9833	0,9832	
C.S.T.	0,9518	0,9476	0,8057	0,9586	0,9505	

M (média); MED (mediana); DP (desvio padrão); CC (coeficiente de correlação entre valores experimentais da amostra de base e respectivas estimativas) e C.S.T. (coeficiente de correlação entre valores experimentais da sub-amostra de teste e respectivas estimativas).

Todavia, após observação dos valores experimentais e estimados em cada um dos métodos de interpolação, foi detectado um valor amostral que apresentava sistematicamente uma diferença elevada em relação ao valor estimado. Assim, optou-se por retirar este valor (profundidade=532m) da amostra de base e refazer o cálculo dos variogramas e posterior estimação. Com base nos novos modelos de variograma foram realizados, mais uma vez, os três tipos de *krigagem*, KO, KR e KU; tendo-se obtido menor variabilidade dos valores do erro de estimação (Quadro III). O método de estimação da KO apresentou, mais uma vez, uma das variabilidades mais baixas do erro de estimação, assim como o método de estimação composto pela KR e o modelo de isotropia dos resíduos do 1.º grau. Os métodos que permitiram obter as melhores estimativas da profundidade na área de estudo são respectivamente: 1) KO e 2) KR em conjunto com o modelo de isotropia definido por um variograma esférico dos resíduos do polinómio de 1.º grau. A escolha do método para a estimação da profundidade recaiu na KO, uma vez que este interpolador de *krigagem* é de aplicação mais simples do que a KR, cuja implementação requer a definição de uma função de deriva dos valores da amostra. Através deste método de estimação foi construído um cartograma digital da batimetria para a área de estudo (fig. 4). Nesta representação geográfica é visível o efeito da anisotropia do modelo, sendo a distribuição dos valores de profundidade nas direcções N-S e E-W muito diferente. Por exemplo, as manchas com valores de profundidade inferiores a 900m, apresentam-se ao longo da direcção (N-S) evidenciando uma continuidade espa-

Quadro III – Estatísticas básicas do erro de estimação (I) dos valores experimentais da amostra de base e (II) do erro de estimação dos valores da sub-amostra de teste obtidos da *krigagem* ordinária, *krigagem* dos resíduos e *krigagem* universal com base nos novos modelos de variograma calculados.

Table III – Estimation error basic statistics of the experimental base values (I) and test sub-sample values (II) obtained by Ordinary kriging, Residuals Kriging and Universal kriging using the new calculated variogram models.

	Krig. Ordinária	Krigagem dos resíduos		Krigagem Universal		
		Res. Polin. 1.º	Res. Polin. 2.º	Res. Polin. 1.º	Res. Polin. 2.º	
I	M	1,503	-0,030	-0,692	1,268	1,236
	MED	1,217	1,248	-1,581	1,742	1,138
	DP	66,47	65,142	65,995	65,311	66,662
II	M	56,719	37,022	174,238	-60,527	16,265
	MED	56,942	21,420	88,313	-27,798	0,952
	DP	192,465	197,302	365,068	161,478	209,333
CC	0,9940	0,9943	0,9941	0,9942	0,9940	
C.S.T.	0,9529	0,9468	0,7954	0,9626	0,9358	

M (média); MED (mediana); DP (desvio padrão); CC (coeficiente de correlação entre valores experimentais da amostra de base e respectivas estimativas) e C.S.T. (coeficiente de correlação entre valores experimentais da sub-amostra de teste e respectivas estimativas).

cial maior do que na direcção perpendicular. No limite Norte da área de estudo pode, ainda, observar-se um aumento elevado dos valores da profundidade, denunciando a existência de uma vertente bastante abrupta.

Após a realização das cem simulações verificou-se que, para cada ponto da grelha, a maioria das diferenças obtidas entre o nonagésimo maior e o mínimo valores simulados se situava acima dos 150m (Quadro IV). Isto reflecte uma incerteza elevada relativamente à existência de zonas adequadas para o arrasto

Quadro IV – Diferenças entre o nonagésimo maior e o mínimo valores de profundidade de entre cem simulações realizadas para cada ponto da grelha regular.

Table IV – Differences between the 90<sup>th</sup> highest and minimum depth values within the 100 simulations carried out in each grid point.

Diferença (m) Máx. (90) – Mín.	N.º de pontos
0	364
0-500	9 476
50-100	17 795
100-150	11 121
> 150	43 424
Total	<b>82 180</b>

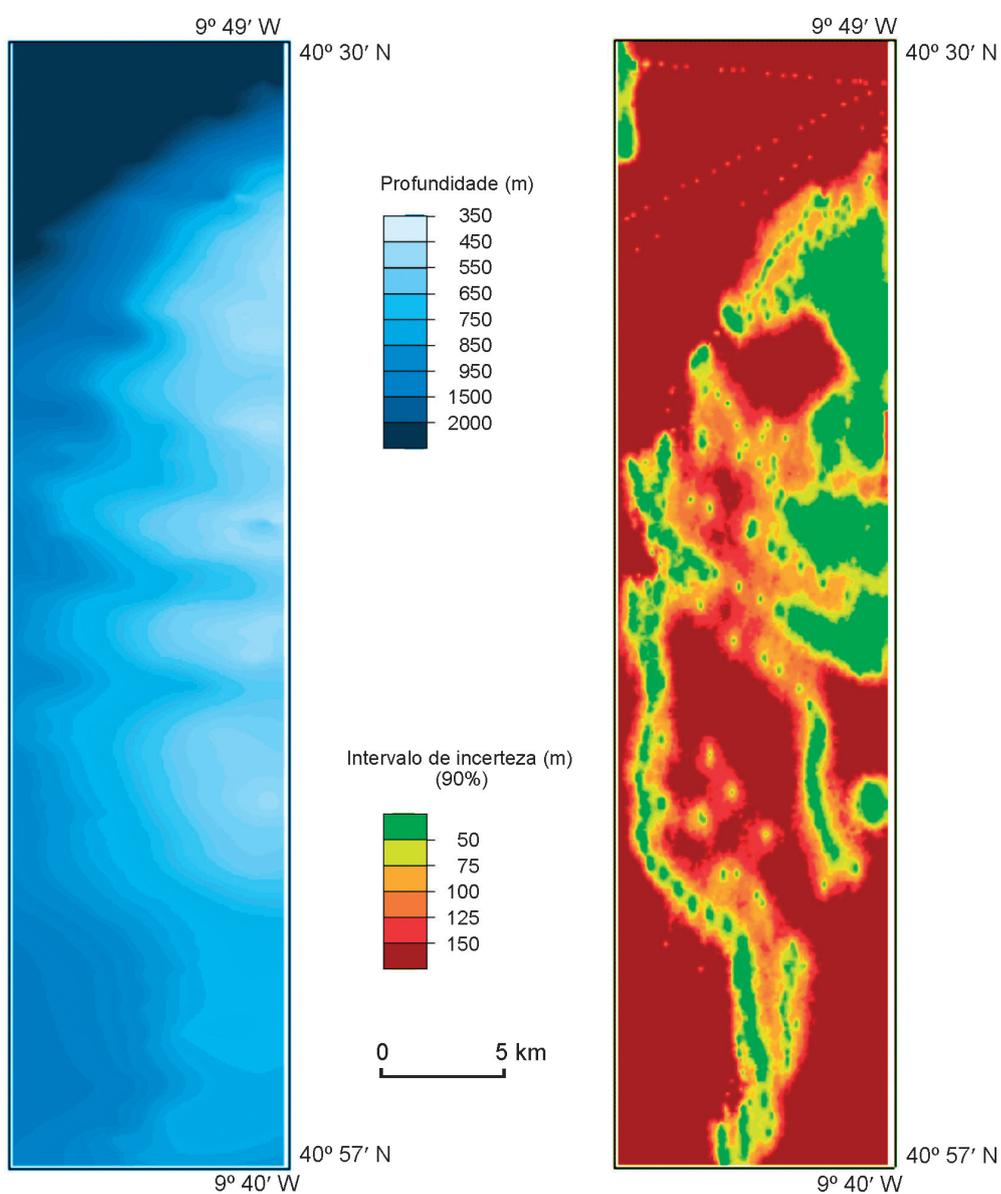


Fig. 4 – Cartograma da profundidade para a área de estudo construído com base na KO.

*Fig. 4 – Bathymetry map for the study area showing ordinary kriging depth estimates.*

Fig. 5 – Cartograma de incerteza das estimativas de profundidade na área de estudo.

*Fig. 5 – Depth estimates uncertainty map for the study area.*

de fundo, segundo as condições já referidas. Importa, no entanto, referir que foram também encontrados 9 840 pontos válidos para a prática do arrasto de fundo, ou seja com diferenças iguais ou inferiores a 50m. Tendo por base as diferenças de valores simulados em cada ponto da grelha, foi construído um cartograma de incerteza (fig. 5). As zonas de menor confiança situaram-se na direcção N-NW da área de estudo, onde se verificou maior variabilidade dos valores experimentais, e junto dos locais onde se dispunha de uma malha pouco densa de pontos. As zonas que oferecem menor incerteza à prática do arrasto de fundo ocorrem, no geral, a profundidades entre os 465 e os 770m.

#### IV. DISCUSSÃO

A partir da análise de uma malha irregular de pontos de sondagem, foi realizada uma descrição das principais particularidades do relevo de uma área ao largo da costa continental portuguesa. As ferramentas de geoestatística revelaram-se bastante úteis, uma vez que permitiram, quer um conhecimento das tendências de variação da profundidade na área de estudo, quer a avaliação da incerteza associada às estimativas realizadas por interpoladores não enviesados.

Neste estudo, assumiu-se a homogeneidade das diferentes regiões em que foi dividida a amostra com o objectivo de se construir um modelo geoestatístico geral para toda a área em análise. Refere-se, contudo, que sub-áreas exibindo maior variabilidade de valores poderão denunciar a existência de populações (no sentido estatístico) distintas com estatísticas significativamente diferentes (GOOVAERTS, 1997). Nestes casos, a amostra é dividida em sub-amostras e procede-se a modelações geoestatísticas independentes. A profundidade como um fenómeno espacial não-estacionário foi já sugerida por HERZFELD (1989), num estudo sobre batimetria realizado na Antárctida, no qual o autor salientou que a maioria dos fundos marinhos exhibe uma deriva bem identificada. Estas evidências levaram a que também se admitisse a hipótese de não-estacionariedade da profundidade na presente análise.

Os modelos de variograma global obtidos revelaram um comportamento espacial da profundidade, na área de estudo, dependente da direcção. Ao longo da direcção N-S, verificou-se uma continuidade dos valores mais elevada do que na direcção perpendicular, que registou maior variabilidade. Estes resultados estão de acordo com estudos já realizados sobre a batimetria para a mesma área de estudo (FIGUEIREDO e VIRIATO, 1989; VIRIATO *et al.*, 1996).

A remoção de um dos pontos da amostra levou à obtenção de melhores resultados do teste de validação cruzada para os diferentes interpoladores utilizados. Dado que a sua posição geográfica se situa junto a um vale escarpado onde existe uma predominância de valores superiores a 1 000m, é de esperar que o valor retirado da análise constitua um erro de registo de sondagem.

A incerteza verificada nos resultados de simulação leva a supor, por um lado, que o modelo geoestatístico da profundidade na área de estudo é não-esta-

cionário e, por outro, que o tamanho da amostra de base ( $n=365$ ) é insuficiente e deverá ser aumentado de modo a melhorar as estimativas da profundidade. Para além disto, importa ainda referir que a amostra de base possui uma distribuição irregular de pontos, de forma que as estimativas produzidas pela *krigagem* para áreas com uma pequena concentração de pontos amostrais poderão sofrer uma forte influência do modelo escolhido, resultando numa atenuação das estimativas (GOOVAERTS, 1997; SOARES, 2000). O cartograma de incerteza gerado constitui uma medida de confiança sobre as zonas de arrasto na área de estudo, funcionando como uma ferramenta de análise de risco da actividade de pesca. Dado que esta superfície de risco não foi construída com as probabilidades das diferenças dos valores simulados, permite ao navegador, tal como referem KIELLAND e TUBMAN (1995), visualizar rapidamente quais as implicações da incerteza da informação disponível em cada zona.

## BIBLIOGRAFIA

- DAVID, M. (1986) – *Using kriging to map the ocean floor*. Proc. of 18th Annual Offshore Technology Conference. Houston: 433-439.
- FIGUEIREDO, M. J. e VIRIATO, A. (1989) – Localização e reconhecimento da topografia submarina dos principais pesqueiros de lagostins ao longo da costa portuguesa, efectuados a bordo dos N/I NORUEGA e MESTRE COSTEIRO em 1983/1987. *Relat. Téc. Cient. INIP* 4. Lisboa.
- GOOVAERTS, P. (1997) – *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, Oxford.
- HERZFELD, U. C. (1989) – Geostatistical methods for evaluation of seabeam bathymetric surveys: case studies of Wegener Canyon. *Antarctica. Marine Geology*, 88: 83-95.
- KIELLAND, P. and DAGBERT, M. (1992) - The use of spatial statistics in hydrography. *International Hydrographic Review*, LXIX (1): 71-92.
- KIELLAND, P. and TUBMAN, T. (1995) – On estimating map model errors and GPS position errors: applying more science to the art of navigation. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 41(4): 479-499.
- PIÑEIRO, C. G.; CASAS, M. and BAÑON, R. (1998) – *Current situation of the Deep-water fisheries exploited by Spanish fleets in the north and northeast Atlantic: A review*. ICES CM 1998/O:10.
- SOARES, A. (2000) – *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. Colecção Ensino da Ciência e da Tecnologia, IST Press, Lisboa: 206.
- VIRIATO, A.; FIGUEIREDO, M. J.; FIGUEIREDO, I. e CORREIA, J. (1996) – *Atlas de apoio à pesca de arrasto de profundidade*. Instituto de Investigação das Pescas e do Mar, Lisboa: 32.