

ANÁLISE ESPACIAL DA DESCARGA DE ÁGUAS RESIDUAIS DO EXUTOR SUBMARINO DA FOZ DO ARELHO USANDO GEOESTATÍSTICA

Spatial Analysis of a Sewage Foz do Arelho Outfall using Geostatistical

PATRÍCIA RAMOS ⁽¹⁾, MAURICI MONEGO ⁽²⁾ & MÁRIO V. NEVES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Investigadora, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, +351.22.5081860, patricia@fe.up.pt

⁽²⁾ Professor Adjunto, ISCAP,
Rua Jaime Lopes Amorim, s/n, 4465-004, S. M. Infesta, Portugal, patricia@fe.up.pt

⁽³⁾ Aluna de PhD, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, +351.22.5081860, mdmonego@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, +351.22.5081860, mjneves@fe.up.pt

Resumo

O principal objectivo deste estudo foi analisar a aplicabilidade da modelação geoestatística para obter informação sobre o impacto ambiental de descargas de águas residuais. O conjunto de dados utilizado foi obtido em uma campanha de monitorização, utilizando um veículo submarino autónomo (VSA). O estimador clássico de Matheron foi utilizado para o cálculo do semivariograma experimental, que foi ajustado aos modelos teóricos: esférico, exponencial e gaussiano. O processo de validação cruzada sugeriu o melhor modelo de semivariograma e a krigagem ordinária foi utilizada para obter as estimativas da salinidade e da temperatura em locais não amostrados. Os mapas gerados mostram claramente a dispersão da pluma na área estudada. Este estudo sugere que uma estratégia de amostragem para o VSA otimizada, sob o ponto de vista da geoestatística, poderá proporcionar melhores estimativas, e, portanto, quantificar com mais precisão a diluição. Além disso, uma vez que medidas precisas de diluição de plumas são raras esses estudos podem ser muito úteis no futuro para validação de modelos dispersão.

Palavras-chave: Krigagem Ordinária, Dispersão da Pluma, Veículo Submarino Autónomo.

Abstract

The main purpose of this study was to examine the applicability of geostatistical modeling to obtain valuable information for assessing the environmental impact of sewage outfall discharges. The data set used was obtained in a monitoring campaign to Foz do Arelho outfall, using an autonomous underwater vehicle (AUV). The Matheron's classical estimator was used to compute the experimental semivariogram which was fitted to three theoretical models: spherical, exponential and gaussian. The cross-validation procedure suggested the best semivariogram model and ordinary kriging was used to obtain the predictions of salinity and temperature at unknown locations. The generated maps show clearly the plume dispersion in the studied area. Our study suggests that an optimal design for the AUV sampling trajectory from a geostatistical prediction point of view, can help to compute more precise predictions and hence to quantify more accurately dilution. Moreover, since accurate measurements of plume's dilution are rare, these studies might be very helpful in the future for validation of dispersion models.

Keywords: Ordinary Kriging, Plume Dispersion, Autonomous Underwater Vehicles.

1. Introdução

Os exutores submarinos permitem, de um modo geral, a descarga de águas residuais com impacto ambiental mínimo. Este facto é devido a uma mistura inicial vigorosa que é promovida pelo meio receptor. Normalmente, o processo de mistura resulta na mortalidade das bactérias e na rápida redução do teor dos contaminantes e organismos presentes nas águas residuais. Contudo, torna-se necessário avaliar regularmente o impacto destas substâncias visto que podem modificar os ecossistemas costeiros e causar danos às populações urbanas. A dispersão do efluente é ainda um

problema de difícil estudo *in situ*, e os motivos são devidos aos custos elevados das campanhas de monitorização, e ao baixo volume de dados que são habitualmente obtidos através de métodos pouco sofisticados.

Os veículos submarinos autónomos (VSAs), pela relativa facilidade de operação e capacidade de recolha de grandes quantidades de dados, de natureza muito diversa, a diferentes profundidades e com grande rapidez, constituem uma tecnologia de vanguarda para monitorização ambiental e em particular podem ser utilizados com elevado sucesso na avaliação das condições de funcionamento dos exutores submarinos (Ramos, 2005).

Este trabalho diz respeito a uma missão de monitorização ambiental ao exutor submarino da Foz do Arelho, utilizando um VSA, levada a cabo pelo Ocean Systems Group da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

A modelação geoestatística tem sido utilizada com sucesso na análise e caracterização da variabilidade espacial de propriedades do solo (Saby et al., 2006; Wei et al., 2007), para a obtenção de informações para a avaliação de recursos hídricos e de energia eólica (Shoji, 2006; Shoji e Kitaura, 2006), para a concepção de estratégias de amostragem de sedimentos em estuários (Caeiro et al., 2003), para a análise da contaminação de sedimentos localizados das proximidades de descargas de águas residuais (Murray et al., 2002; Poon et al., 2000), entre outros.

Nesta publicação, começamos por fazer uma breve descrição do VSA utilizado. Depois, apresentamos um estudo geoestatístico das medidas de salinidade e temperatura obtidas usando krigagem ordinária para o processo de interpolação. Numa primeira etapa a estrutura espacial das medidas de salinidade e temperatura foi analisada através de uma análise estatística descritiva. Depois, o grau de correlação espacial das medidas em função da distância e direcção foi expresso em termos de semivariograma. Finalmente, a krigagem ordinária foi utilizada para estimar a salinidade e a temperatura em pontos de uma grelha, tendo sido gerado um mapa da distribuição da salinidade e temperatura da área em estudo. Os indicadores da validação cruzada e os parâmetros dos modelos determinaram a escolha do modelo mais apropriado.

2. VSA MARES

O MARES (*Modular Autonomous Robot for Environment Sampling*) é um veículo submarino autónomo altamente modular que pertence ao *Ocean Systems Group* da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (<http://oceansys.fe.up.pt/index.php>). O MARES tem um diâmetro de 20 cm, aproximadamente 1.5 m de comprimento, pesando cerca de 32 kg no ar, e tendo uma autonomia aproximada de 10 horas (ver Figura 1).

Este VSA possui uma estrutura mecânica altamente modular, com um casco central e várias secções adicionais, a maioria das secções são feitas de copolímero de acetato. Uma vez, que estas secções são extensões, podem ser facilmente trocadas, sendo muito simples a inserção de novas secções. A propulsão e direcção é controlados por dois impulsores horizontais independentes. Um conjunto de impulsores, na direcção vertical, controla a velocidade vertical e o ângulo de inclinação. Os impulsores permitem muitas operações em áreas restritas com movimentos horizontais e verticais independentes e velocidade iniciando em 0 m/s.

Os circuitos eletrónicos estão localizados no casco central. A energia é fornecida por baterias Li-Ion, com um total de energia de 600 Wh. Dependendo da velocidade do veículo,

essas baterias podem durar até 10 horas, correspondendo a cerca de 40 km.

O computador principal é um PC-104 com bateria suplementar, uma CPU, uma placa de comunicação e um disco de estado sólido. O sistema de navegação é baseado numa rede acustica LBL, com 2 NIBs sendo posicionado na área de operação.

O VSA MARES tem pouco espaço para acomodar carga útil, mas é simples para incluir outros sectores e o casco principal tem vários conectores excedentes para fornecer energia e comunicações. As missões são programadas usando um GUI software (interface gráfica do utilizador), onde todos os segmentos da missão estão detalhados (coordenadas, velocidade, profundidade, etc).

Durante a missão, as bóias transmitem os dados de localização do veículo para uma embarcação de apoio, de modo que a trajectória do VSA pode ser seguida em tempo real. No final, o veículo inicia a sua própria transmissão da posição por rádio, quando na superfície. Para esta missão foi instalado no VSA MARES um CTD (condutividade, temperatura, profundidade) Sea-Bird 49 FastCAT. Durante a missão (~ 1 hora), enquanto navegava a uma velocidade constante de aproximadamente 2 nós (~ 1 m/s), o veículo recolheu e guardou no computador de bordo, dados de CTD a uma taxa de 16 Hz.



Figura 1. VSA MARES (*Modular Automonus Robot*).

3. Métodos Geoestatísticos

O conjunto de dados utilizado nesta análise foi obtido numa campanha de monitorização, realizada em Novembro 2008, ao exutor submarino da Foz do Arelho. Este exutor está localizado na região de Óbidos, na costa oeste de Portugal (ver Figura 2 (b)).

Durante a missão de recolha de dados o veículo percorreu uma área de 170x150 m² a 1.5 m e a 3.0 m de profundidade. A Figura 2 (a) apresenta a trajectória realizada pelo VSA a 1.5 m de profundidade.

A Figura 3 mostra as medidas de temperatura e de salinidade (calculadas a partir da condutividade, temperatura e profundidade) que foram recolhidas pelo VSA a 1.5 m de profundidade. De acordo com as previsões obtidos usando um modelo matemático de dispersão, a pluma encontrava-se estabilizada à superfície, sendo assim natural a sua observação a 1.5 de profundidade. A direcção

da corrente à superfície era aproximadamente 120° . Estes dados foram rodados -50° devido às condições de interpolação.

3.1 Análise Exploratória dos Dados

A Tabela 1 apresenta o sumário estatístico do conjunto de dados de salinidade e temperatura (17612 medidas). O valor da salinidade variou entre 35.9567 psu e 36.0028 psu. O valor médio da salinidade foi 35.9905 psu, próximo do valor da mediana que foi 35.9915 psu. O valor da temperatura variou entre 15.359°C e 15.5671°C . O valor médio da temperatura foi 15.4623°C sendo próximo do valor da mediana que foi 15.4654°C .

Os valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de salinidade indicam uma distribuição enviesada negativamente, enquanto que, os valores dos coeficientes de assimetria e curtose para os dados de temperatura, próximos de 0 e 3, respectivamente, indicam uma distribuição aproximadamente normal destes dados.

Para a aplicação da metodologia geoestatística é desejável para a variável em estudo tenha uma distribuição aproximadamente normal (Wackernagel, 2003).

Tabela 1. Sumário estatístico do conjunto de dados das medidas de salinidade e de temperatura.

Parâmetro	Salinidade	Temperatura
Mínimo	35.9567 psu	15.3595°C
Média	35.9905 psu	15.4623°C
Mediana	35.9915 psu	15.4654°C
Máximo	36.0028 psu	15.5671°C
Variância	0.00006	0.0011
Desvio Padrão	0.0079	0.0327
Assimetria	-0.6418	-0.2629
Curtose	3.3303	2.7747

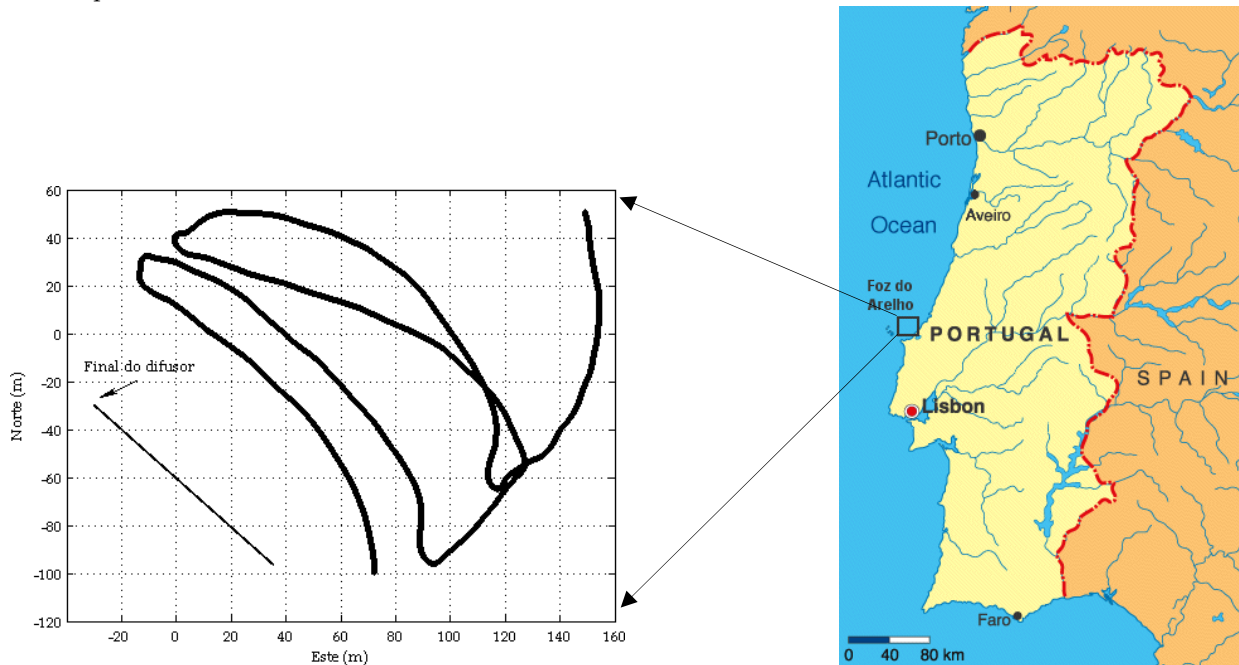
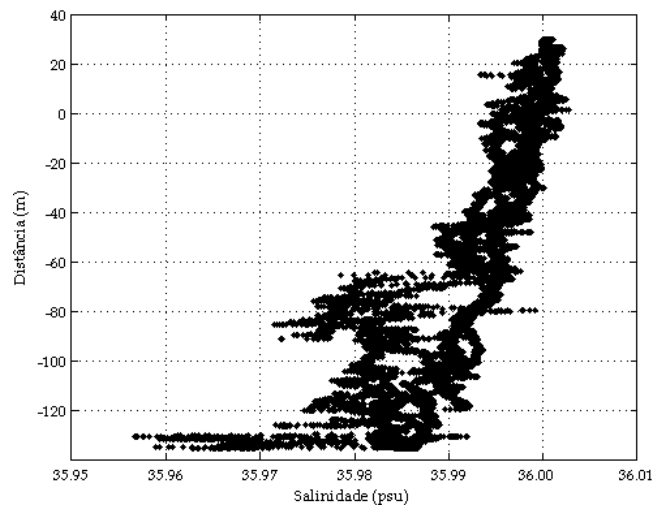
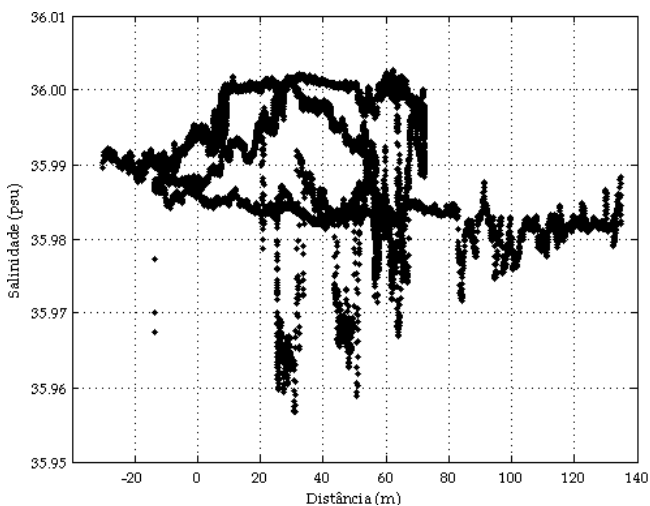


Figura 2. Trajectória do VSA aos 1.5 m de profundidade; (b) Área de estudo na região de Óbidos na costa oeste de Portugal.



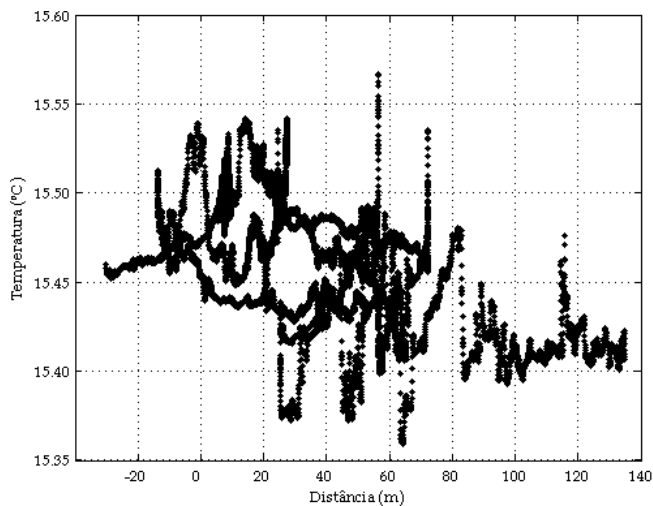
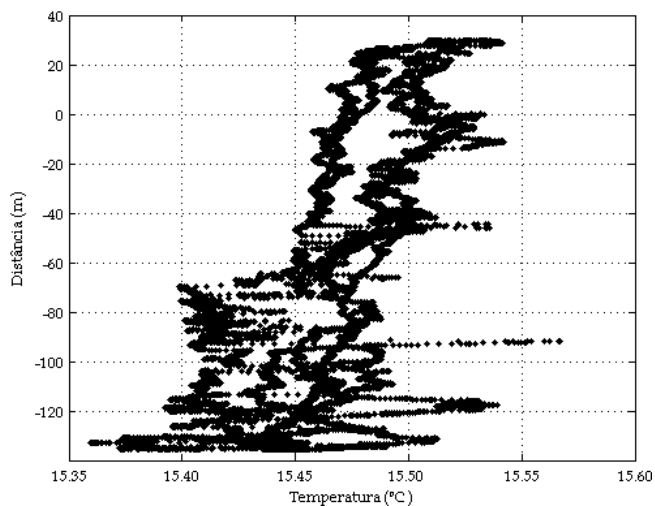


Figura 3. Medidas de salinidade e temperatura, recolhidas pelo VSA aos 1.5 m de profundidade.

A Figura 4 mostra o histograma do conjunto de dados de salinidade. A cauda à esquerda do histograma indica uma distribuição levemente enviesada negativamente, que está de acordo com o valor negativo do coeficiente de assimetria obtido (ver Tabela 1).

Este facto pode ser justificado pela estratégia adotada para a amostragem, que não foi completamente bem sucedida.

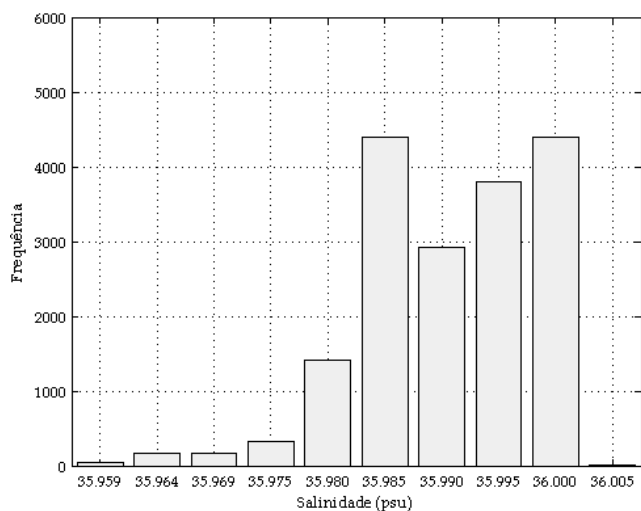


Figura 4. Histograma do conjunto de dados de salinidade.

A Figura 5 mostra o histograma do conjunto de dados de temperatura que tem uma distribuição aproximadamente normal, como esperado.

O baixo valor do coeficiente de assimetria (ver Tabela 1) está em conformidade com o pequeno enviesamento à esquerda da distribuição.

3.2 Semivariograma

A metodologia geoestatística utiliza o semivariograma para quantificar a variação espacial da variável em estudo (Cressie, 1993; Isaaks e Srivastava, 1989). O semivariograma quantifica a variabilidade média entre duas variáveis em função da distância entre elas, independente da sua localização. Para este estudo foi utilizado o estimador clássico de Matheron no cálculo do semivariograma (Matheron, 1965):

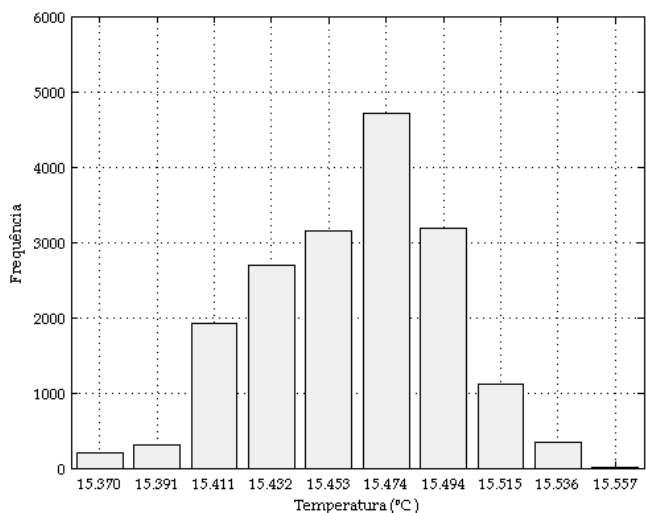


Figura 5. Histograma do conjunto de dados de temperatura.

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

onde $\gamma(h)$ é o semivariograma, $Z(x_i)$ é o valor da medida da salinidade/temperatura na localização x_i , h é a distância ("lag") entre as duas medidas e $N(h)$ é o número de pares de medidas distanciadas de h entre si. O semivariograma experimental é calculado para vários "lags". A anisotropia pode ser investigada através do cálculo do semivariograma experimental em várias direcções.

O semivariograma experimental do conjunto de dados de salinidade e temperatura foi calculado para as direcções 0° , 45° , 90° e 135° , utilizando um "lag" de ~ 25 m e um alcance de ~ 200 m.

A Figura 6 (a) mostra o semivariograma experimental direccional dos dados de salinidade, e a Figura 7 (a) mostra o semivariograma experimental direccional dos dados de temperatura. Em ambos os semivariogramas o fenómeno apresenta um comportamento semelhante nas quatro direcções estudadas, mostrando-se ser isotrópico.

Os modelos teóricos mais utilizados são o esférico, o exponencial e o gaussiano (Kitanidis, 1997).

Uma vez calculado o semivariograma experimental, o passo seguinte consiste em ajustá-lo a um modelo teórico que traduza o comportamento espacial dos dados. Para além de fornecer informação sobre o comportamento espacial dos dados, este modelo dá os valores de determinados parâmetros que são utilizados posteriormente no cálculo das semivariâncias, na estimação por krigagem. Ambos os semivariogramas experimentais, da salinidade e da temperatura, foram ajustados utilizando os modelos esférico, exponencial e gaussiano.

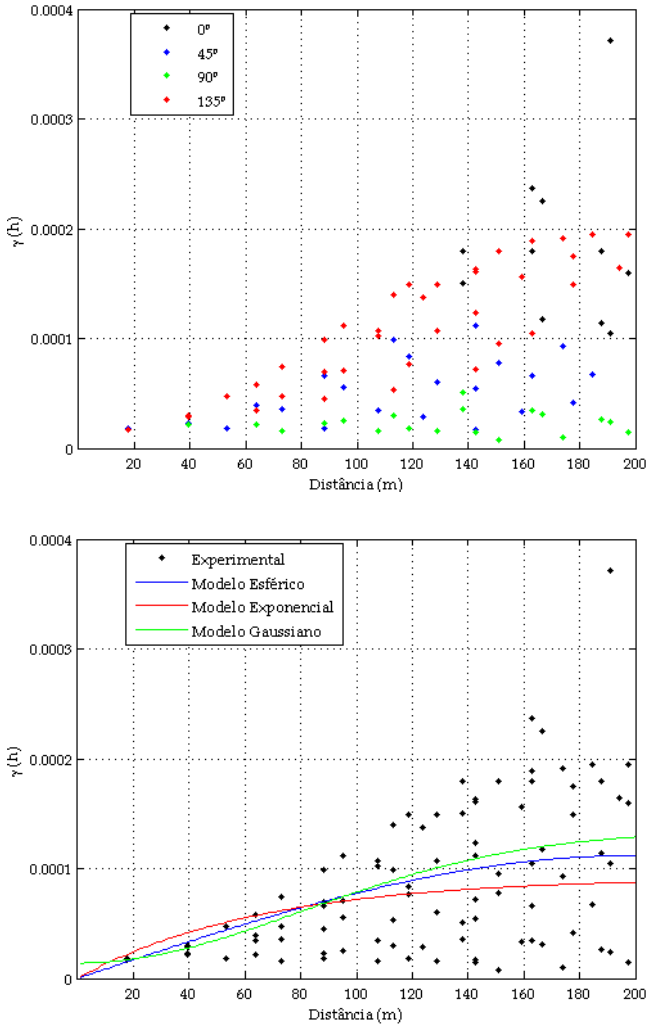


Figura 6. (a) Semivariograma experimental direccional da salinidade; (b) Semivariograma experimental omnidireccional da salinidade e modelos ajustados.

A Figura 6 (b) mostra o semivariograma experimental omnidireccional da salinidade e os modelos esférico, exponencial e gaussiano ajustados.

A Figura 7 (b) mostra o semivariograma experimental omnidireccional da temperatura e os modelos esférico, exponencial e gaussiano ajustados.

Os parâmetros “nugget”, “sill” e “range” dos três modelos ajustados para o semivariograma da salinidade são apresentados na Tabela 2.

Os parâmetros “nugget”, “sill” e “range” dos três modelos ajustados para o semivariograma da temperatura são apresentados na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados para o semivariograma da salinidade.

Parâmetros	Esférico	Exponencial	Gaussiano
<i>Nugget</i>	0	0	0.0000140
<i>Partial Sill</i>	0.000112	0.000092	0.000120
<i>Sill</i>	0.000112	0.000087	0.000128
<i>Range</i>	197.642	197.642	197.642
<i>Nugget/Sill</i>	0%	0%	10.91%

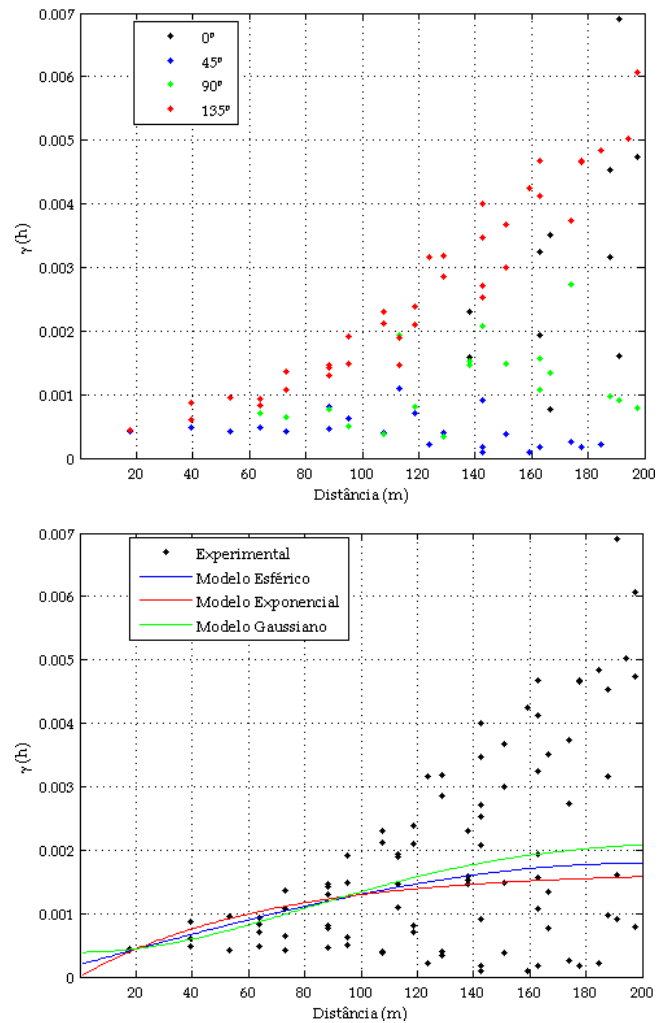


Figura 7. (a) Semivariograma experimental direccional da temperatura; (b) Semivariograma experimental omnidireccional da temperatura e modelos ajustados.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos ajustados para o semivariograma da temperatura.

Parâmetros	Esférico	Exponencial	Gaussiano
<i>Nugget</i>	0.000193	0	0.000388
<i>Partial Sill</i>	0.001597	0.001659	0.001779
<i>Sill</i>	0.001789	0.001577	0.002078
<i>Range</i>	197.642	197.642	197.642
<i>Nugget/Sill</i>	10.77%	0%	18.66%

As semivariâncias utilizadas na estimativa da salinidade através da krigagem são calculadas de acordo com as Eq [2], Eq [3] ou Eq [4], respectivamente referentes aos modelos esférico, exponencial ou o gaussiano.

$$\begin{cases} \gamma(h) = 0 + 0.000112 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\|h\|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\|h\|}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) = 0.000112, & h > a \end{cases} \quad [2]$$

$$\gamma(h) = 0 + 0.000092 \left[1 - \exp \left(-\frac{3\|h\|}{a} \right) \right], \quad h \geq 0 \quad [3]$$

$$\gamma(h) = 0.0000140 + 0.000120 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{\|h\|}{a} \right)^2 \right) \right], \quad h \geq 0 \quad [4]$$

As semivariâncias utilizadas na estimativa da temperatura através da krigagem são calculadas de acordo com as Eq [5], Eq [6] ou Eq [7], respectivamente referentes aos modelos esférico, exponencial ou o gaussiano.

$$\begin{cases} \gamma(h) = 0.000193 + 0.001597 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\|h\|}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\|h\|}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) = 0.001789, & h > a \end{cases} \quad [5]$$

$$\gamma(h) = 0 + 0.001659 \left[1 - \exp \left(-\frac{3\|h\|}{a} \right) \right], \quad h \geq 0 \quad [6]$$

$$\gamma(h) = 0.000388 + 0.001779 \left[1 - \exp \left(-3 \left(\frac{\|h\|}{a} \right)^2 \right) \right], \quad h \geq 0 \quad [7]$$

De acordo com Wei et. Al. (2007), o grau de dependência espacial da variável em estudo pode ser verificado através da razão *Nugget/Sill*. Um valor desta razão inferior a 25% sugere que a variável possui uma forte dependência espacial; um valor desta razão entre 25% e 75% sugere que a variável possui uma moderada dependência espacial; e um valor desta razão superior a 75% sugere que a variável possui uma fraca dependência espacial.

Como pode ser observado na Tabela 2 e na Tabela 3, a razão *Nugget/Sill* para todos os modelos, tanto para os dados de salinidade como para os dados de temperatura, é baixa e inferior a 25%, sugerindo que, (1) ambas as medidas possuem uma forte dependência espacial e que (2) as variações locais, como era esperado, puderam ser capturadas.

3.3 Validação Cruzada

O processo de validação cruzada foi utilizado para comparar o desempenho dos três modelos de semivariogramas ajustados.

No procedimento de validação cruzada, cada medida é eliminada, sendo as restantes usadas para a determinação (usando krigagem) da respectiva estimativa. A avaliação da diferença entre os valores observados e os valores estimados é habitualmente efectuada através do cálculo do erro médio (EM); da raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM); da raiz quadrada da variância de krigagem média (RVKM); do erro standardizado médio (ESM) e da raiz quadrada do erro standardizado quadrático médio

(RESQM), respectivamente, dados pelas seguintes equações:

$$EM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)] \quad [8]$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)]^2} \quad [9]$$

$$RVKM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma^2(x_i)} \quad [10]$$

$$ESM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^2(x_i)} \right] \quad [11]$$

$$RESQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{\hat{Z}(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^2(x_i)} \right]^2} \quad [12]$$

onde $\hat{Z}(x_i)$ é o valor estimado e $Z(x_i)$ é o valor observado na posição x_i ; N é o número de observações do conjunto de dados; e σ^2 é a variância da krigagem na posição x_i .

A Tabela 4 mostra estes indicadores relativos aos modelos esférico, exponencial e gaussiano para os dados de salinidade.

A Tabela 5 mostra estes indicadores relativos aos modelos esférico, exponencial e gaussiano para os dados de temperatura.

Preferencialmente, o EM deverá ser próximo de zero, indicando que o estimador é não enviesado; e o REQM deve ser o menor possível, indicando que os valores das estimativas são próximos aos valores medidos. O valor de RVKM deve ser naturalmente o menor possível. Se as variâncias de krigagem forem precisas, o valor de RESQM será próximo de 1 (Wackernagel, 2003). Se o valor de RESQM é elevado significa que a krigagem é demasiado optimista acerca da variabilidade das estimativas.

Tabela 4. Parâmetros da validação cruzada relativos aos modelos ajustados para os dados de salinidade.

Parâmetros	Esférico	Exponencial	Gaussiano
EM	0.0000001686	0.000000169	-0.0001952
REQM	0.0001863	0.0001863	0.002621
RVKM	0.0002058	0.0002642	0.004125
ESM	0.0008716	0.0006802	-0.04765
RESQM	1.109	0.8641	0.6486

Tabela 5. Parâmetros da validação cruzada relativos aos modelos ajustados para os dados de temperatura.

Parâmetros	Esférico	Exponencial	Gaussiano
EM	-0.0001517	-0.0000093	-0.0000429
REQM	0.008131	-0.0000093	0.01375
RVKM	0.01609	0.001122	0.02157
ESM	-0.1003	-0.0009009	-0.00436
RESQM	0.5189	0.8232	0.6465

Os resultados destes parâmetros para os dados de salinidade e temperatura indicam que, em ambos casos, o modelo exponencial é o mais adequado.

3.4 krigagem Ordinária

A etapa seguinte na análise geoestatística consiste em utilizar o modelo de semivariograma escolhido (que traduz a variabilidade espacial da grandeza em estudo), e aplicar a krigagem para estimar os valores da grandeza em locais não amostrados.

O método de krigagem pertence à família dos estimadores não enviesados, sendo considerado o melhor estimador (*best linear unbiased estimator - BLUE*). Este estimador é dito linear visto que cada estimativa é dada por uma combinação linear de medidas, ou seja:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^M \alpha_i Z(x_i), \quad [13]$$

onde $\hat{Z}(x_0)$ é o valor estimado da grandeza na posição x_0 ; M é o número de observações vizinhas a x_0 utilizadas no cálculo da estimativa, e α_i são os pesos.

A krigagem ordinária é utilizada quando a média dos valores da variável em estudo não é conhecida. Neste caso, para o estimador ser não-enviesado, é necessário que

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1.$$

O valor estimado é obtido minimizando a variância da krigagem, usando os multiplicados de Lagrange para impor a condição de não-enviesado (Cressie, 1993; Kitanidis, 1997).

4. Resultados

Os mapas de distribuição da salinidade e da temperatura, na zona de descarga do exutor submarino da Foz do Arelho, obtidos utilizando o modelo de semivariograma exponencial, mostram-se, respectivamente, nas Figuras 8 e 9.

Ambos os mapas evidenciam a variabilidade espacial da salinidade e da temperatura na área em estudo. Através destes é possível identificar a pluma e sua dispersão segundo a direcção ESE (Este-Sudeste). Esta direcção está em concordância com a direcção da corrente medida à superfície, que foi $\sim 120^\circ$. A pluma evidencia-se como uma região de salinidade inferior ao das águas do meio circundante à mesma profundidade. A posição da pluma praticamente à superfície é sobretudo devida à baixa estratificação da densidade, normalmente encontrada nesta época do ano. Pode dizer-se que a elevada resolução espacial das medições permitiu uma visualização da posição da pluma e uma caracterização da sua dispersão. Mas, estamos convictos de que, melhores resultados poderão ser alcançados se uma estratégia de amostragem mais eficaz for adoptada.

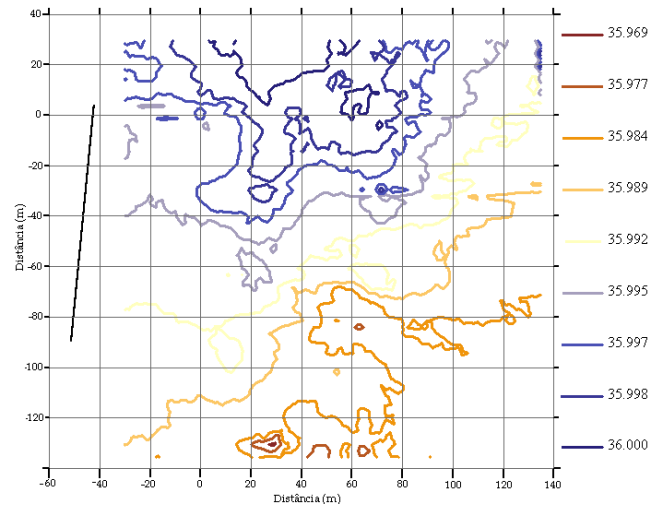


Figura 8. Mapa de distribuição da salinidade na zona de descarga do exutor submarino da Foz do Arelho.

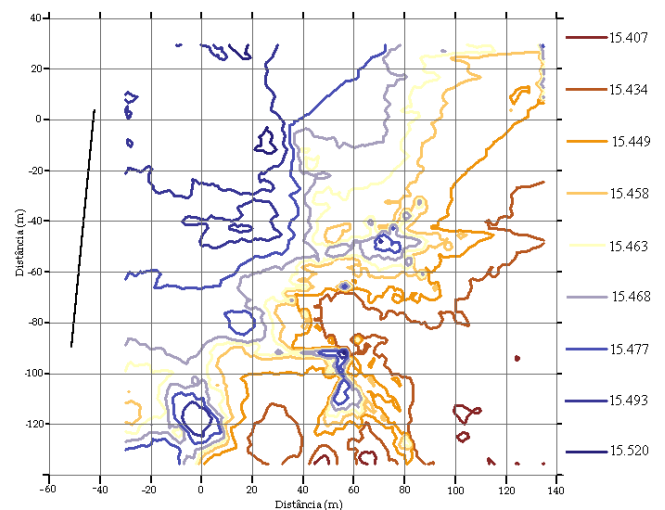


Figura 9. Mapa de distribuição da temperatura na zona de descarga do exutor submarino da Foz do Arelho.

5. Conclusões

A análise geoestatística de dados de salinidade e temperatura, obtidos através de um vsa numa campanha de monitorização à descarga de águas residuais de um exutor submarino, permitiu obter um mapa da dispersão da pluma de efluente na área estudada.

A variabilidade espacial do conjunto de observações foi analisada previamente calculando-se os indicadores estatísticos clássicos. Os resultados indicaram uma distribuição aproximadamente normal para o conjunto de dados de temperatura e uma distribuição levemente enviesada negativamente para o conjunto de dados de salinidade.

O estimador clássico de Matheron foi utilizado para o cálculo do semivariograma experimental sob diferentes direcções, não tendo sido detectada variabilidade em nenhuma direcção específica, mostrando-se o fenómeno ser isotrópico.

O semivariograma experimental foi ajustado a três modelos teóricos: esférico, exponencial e gaussiano. Os indicadores

de validação cruzada sugeriram o modelo exponencial como sendo o modelo de semivariograma mais adequado, entre os candidatos.

Através dos mapas de distribuição da salinidade e da temperatura na vizinhança da descarga do exutor submarino de Foz do Arelho, é possível identificar a posição da pluma e a sua dispersão. A pluma foi detectada à profundidade de 1.5 m dispersando segundo a direcção Este-Sudeste. A elevada resolução das medições recolhidas permitiu assim caracterizar a dispersão da pluma ao longo da direcção da corrente.

Este estudo mostra que a geoestatística pode ser utilizada com sucesso para a caracterização da dispersão de efluentes e avaliação do seu impacte ambiental no meio, podendo contribuir para uma melhor gestão da descarga de águas residuais. Para além disso, como medições precisas de diluição são raras, estes estudos poderão ainda ser úteis para a validação de modelos de dispersão.

Referências

- Caeiro, S., Painho, M., Goovaerts, P., Costa, H., S. Sousa, S., (2003). *Spatial sampling design for sediment quality assessment in estuaries*, Environmental Modelling & Software, 18, pp. 853-859.
- Cressie, N., (1993). *Statistics for spatial data*, A Wiley Interscience Publication, New York, 900p. ISBN: 0-471-00255-0.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R. M., (1989). *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York, 561p.
- Kitanidis, P., (1997). *Introduction to geostatistics: Applications in hydrogeology*, New York (USA), Cambridge University Press, 249p.
- Matheron, G., (1965). *Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*, Paris. France: Masson; 305p.
- Murray, C. J., Leeb, H. J., Hampton, M. A., (2002). *Geostatistical mapping of effluent-affected sediment distribution on the Palos Verdes shelf*, Continental Shelf Research, 22, pp. 881-897.
- Poon, K. F., Wong, R. W. H., Lam, M. H. W., Yeung, H. Y., Chiu, T. K. T., (2000). *Geostatistical modelling of the spatial distribution of sewage pollution in coastal sediments*, Water Research, 34, pp. 99-108.
- Ramos, P. (2005). *Advanced Mathematical Modeling for Outfall Plume Tracking and Management using Autonomous Underwater Vehicles based Systems*, PhD Thesis, 2005, Faculty of Engineer, University of Porto.
- Saby, N., Arrouays, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Pochot, A., (2006). *Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France*, Science of the Total Environment, 367, pp. 212-221.
- Shoji, T., (2006). *Statistical and geostatistical analysis of wind. A case study of direction statistics*, Computers & Geosciences, 32, pp 1025-1039.
- Shoji, T., Kitaura, H., (2006). *Statistical and geostatistical analysis of rainfall in central Japan*, Computers & Geosciences, 32, pp. 1007-1024.
- Wackernagel, H., (2003). *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*, Berlin, Springer, 291p.
- Wei, H., Dai, L., Wang, L., (2007). *Spatial distribution and risk assessment of radionuclides in soils around a coal-fired power plant: A case study from the city of Baoji, China*, Environmental Research, 104, pp. 201-208.