

ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE UMA DESCARGA DE ÁGUAS RESIDUAIS Geostatistic Analysis of a Sewage Outfall Discharge

MAURICI DEL MONEGO ⁽¹⁾, PATRÍCIA RAMOS ⁽²⁾ & MÁRIO VALENTE-NEVES ⁽³⁾

⁽¹⁾ Aluna de Doutoramento, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, +351 225081860, mdmonego@fe.up.pt

⁽²⁾ Investigadora, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, +351 225081860, patricia@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Adjunto, ISCAP,
Rua Jaime Lopes Amorim, s/n, 4465-00, S. Mamede Infesta, Portugal, patricia@fe.up.pt

⁽³⁾ Professor Associado, FEUP,
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, +351 225081864, mjneves@fe.up.pt

Resumo

A preocupação com as questões relativas ao meio ambiente sugere que sejam realizadas abordagens sistemáticas relacionadas com a monitorização dos impactes ambientais. No que diz respeito aos ecossistemas costeiros, os emissários submarinos são importantes fontes de poluentes que requerem uma monitorização constante para o controlo da qualidade das condições de vida destes sistemas. Neste trabalho foi realizada uma análise geoestatística dos dados obtidos na vizinhança da descarga de um emissário submarino utilizando um Veículo Submarino Autónomo, tendo como objectivos a caracterização da dispersão da pluma e a determinação da sua diluição.

Palavras-chave: Correlação Espacial, Semivariograma, Krigagem Ordinária.

Abstract

The concern with the environment suggests that constant approaches are executed to the monitoring of the environmental impact. Related to the coastal ecosystems the outfalls are pollutant sources that demand a constant monitoring to allow larger quality to the conditions pertaining to the environment. In this work geostatistics was used for the analysis of environmental data obtained with an autonomous underwater vehicle. Data came from a monitoring campaign to a sea outfall aiming to characterize the plume dispersion and its dilution.

Keywords: Spatial Correlation, Semivariogram, Ordinary Kriging.

1. Introdução

Os emissários submarinos são importantes fontes de poluentes para os ecossistemas costeiros. Esta forma de descarga tem vantagens em termos económicos e um impacto relativamente pequeno em termos sociais, mas suscita ao mesmo tempo preocupações acerca da saúde pública e da preservação e qualidade do ecossistema. O oceano oferece uma capacidade de diluição relativamente rápida das substâncias descarregadas, podendo, no entanto, transportar após a estabilização da pluma, partículas que eventualmente poderão conter metais pesados, bactérias, vírus e outras substâncias nocivas. Torna-se assim necessário avaliar de forma regular os reais impactes destas substâncias nas populações urbanas e nos ecossistemas costeiros.

As abordagens que têm sido utilizadas na análise dos dados ambientais recolhidos nas zonas da descarga não têm sido verdadeiramente esclarecedoras dos reais impactes das substâncias referidas.

Os motivos prendem-se com os elevados custos das campanhas de monitorização, que são escassas, e no número insuficiente de dados, obtidos através de métodos de observação ainda pouco sofisticados. A modelação matemática do fenómeno da dispersão, apesar de caracterizar de alguma forma o comportamento do esgoto, ainda não responde de uma forma clara e rigorosa a todas as preocupações ambientais.

Os veículos submarinos autónomos já demonstraram ser uma tecnologia apropriada para varrimentos de elevada resolução, que são determinantes no caso de elementos de pequena dimensão, tais como as plumas de exutores submarinos.

Algumas das vantagens destas plataformas são: uma logística simples, baixo custo por utilização, a possibilidade de uma elevada correlação espaço-temporal dos dados, a possibilidade de uma boa cobertura espacial dos fenómenos e a capacidade de amostragem adaptativa baseada, por exemplo, numa característica.

Os métodos clássicos de análise estatística de dados supõem habitualmente que as realizações das variáveis aleatórias sejam independentes entre si, ou seja, que observações vizinhas não exercem influências umas sobre as outras. Os fenómenos naturais apresentam-se com uma certa estruturação nas variações entre vizinhos. Desta forma pode dizer-se que as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam um certo grau de dependência espacial.

Neste trabalho foram explorados métodos geoestatísticos para a análise de dados ambientais, obtidos na vizinhança da descarga de um emissário submarino, tendo como objectivos a modelação e a caracterização espacial do fenómeno da dispersão. Inicialmente são abordados alguns conceitos básicos da teoria geoestatística.

De seguida apresenta-se a aplicação das diversas etapas do método de krigagem ordinária aos dados em estudo, nomeadamente a análise exploratória, a construção do variograma, modelo e validação, concluindo-se com a apresentação dos resultados obtidos, e as respectivas conclusões.

2. Fundamentos de Geoestatística

A teoria da geoestatística surge na década de 60 quando Georges Matheron, ao analisar dados de concentração de ouro, concluiu que havia vantagem em considerar a localização geográfica e a dependência espacial entre os dados. A partir da década de 80 esta teoria tem sido também aplicada com sucesso em estudos ambientais.

A geoestatística é uma metodologia de interpolação que permite a quantificação da estrutura espacial da variável em estudo e a avaliação da incerteza associada à estimativa dessa variável. Esta metodologia não determinista, mas sim probabilista, apoia-se no facto da variável em estudo (variável regionalizada) possuir propriedades intermédias entre uma variável totalmente aleatória e uma totalmente determinística (estruturada).

No caso em estudo, é impossível prever com exactidão o valor da salinidade num ponto da descarga (aspecto aleatório), mas é provável que valores mais próximos sejam mais semelhantes do que os que estão mais afastados (aspecto estrutural). Esta continuidade espacial das grandezas em estudo, essencial na modelação geoestatística, é uma característica habitualmente encontrada em fenómenos espaciais.

A continuidade espacial entre as medidas da grandeza é quantificada através da semivariância, que é dada por:

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

em que, $Z(x_i) - Z(x_i + h)$ representa o valor da diferença entre um par de medidas $N(h)$ é o número de pares de medidas e $\gamma(h)$ é o valor da semivariância, todos correspondentes a uma distância igual a h .

A função que traduz a semivariância para as várias distâncias entre as observações é designada por variograma experimental.

Dado que medidas mais próximas tendem a ser mais semelhantes do que as que estão mais afastadas, à medida que a distância aumenta, o valor da semivariância tende a aumentar, visto que a diferença entre medidas tende a ser superior. À medida que a distância entre as medidas diminui, o valor da semivariância tende a diminuir, visto que a diferença entre medidas tende a ser inferior.

Após a construção do variograma experimental, é necessário determinar um modelo matemático que melhor se ajuste ao comportamento da dependência espacial da grandeza em causa. Os modelos matemáticos que são habitualmente utilizados nos estudos geoestatísticos são: o modelo esférico, o modelo exponencial, o modelo gaussiano e o modelo de potência (Soares, 2000).

Habitualmente as observações estão localizadas num espaço bidimensional, pelo que na construção do variograma experimental, para além da distância entre as medidas, é necessário também considerar várias direcções. Caso o fenómeno apresente um comportamento distinto conforme a direcção, este designa-se por anisotrópico. Caso contrário, ou seja, o fenómeno apresenta um comportamento semelhante nas várias direcções, este designa-se por isotrópico.

O passo seguinte na análise geoestatística consiste em utilizar o modelo escolhido para estimar os valores da grandeza em causa em pontos não amostrados. O estimador geoestatístico é designado por krigagem. Este estimador pode assumir várias formas sendo a krigagem normal (ou ordinária) a mais habitual. A krigagem normal (ordinária) é um estimador "BLUE" (*best linear unbiased estimator*).

É considerado como linear visto que as suas estimativas são combinações lineares ponderadas das medidas. É considerado como não enviesado pois procura que a média dos erros de estimação seja igual a zero, e é considerado como o melhor porque pretende que a variância dos erros de estimação seja mínima.

3. Metodologia

Neste trabalho foi efectuada uma análise geoestatística de um conjunto de dados de salinidade obtidos numa missão de monitorização a um emissário submarino utilizando o veículo submarino autónomo (VSA) do Laboratório de Sistemas e Tecnologia da Faculdade de Engenharia a Universidade do Porto (www.fe.up.pt/lsts). Esta análise tem como objectivos a caracterização do fenómeno de dispersão e a estimação da diluição da pluma de esgoto.

3.1. Área de Estudo

A Figura 1(a) mostra a área da missão de monitorização ao emissário de S. Jacinto realizada com o veículo submarino autónomo (VSA). O VSA percorreu uma área de aproximadamente 200X100m², iniciando a recolha a uma distância de 20 metros do ponto médio do difusor na direcção perpendicular à direcção da corrente.

A trajectória estabelecida para o veículo consistiu em 6 secções horizontais que foram realizadas aos 2m, 4m, 6m, 8m, 10m e 12m de profundidade.

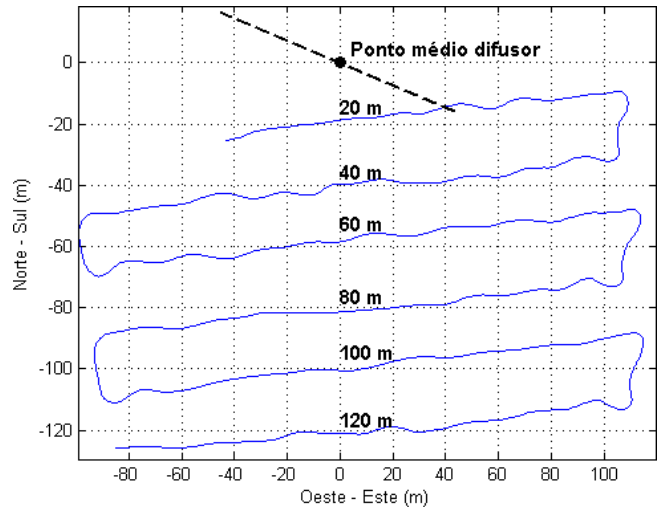


Figura 1. (a) Área de estudo. (b) Trajectória do VSA correspondente à secção horizontal dos 2m de profundidade.

Em cada secção horizontal o veículo realizou uma trajectória constituída por 6 linhas perpendiculares à direcção da corrente, distanciadas de aproximadamente 20m entre si. Neste estudo foram analisados os dados da secção horizontal dos 2m de profundidade (ver Figura 1(b)). Esta secção corresponde à zona de estabilização da pluma.

3.2. Análise Exploratória dos Dados

Antes de se iniciar o processo de modelação geoestatístico, é necessário avaliar o comportamento dos dados disponíveis, realizando uma análise exploratória desses dados (Clark e Harper, 2000).

Na Figura 2 mostram-se os dados de salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade que foram analisados. As linhas dos 20, 40, 60, 80, 100 e 120m correspondem, respectivamente, às cores vermelha, verde, azul, preto, magenta e amarelo. Pode observar-se, como esperado, que o valor da salinidade aumenta do centro da pluma para as extremidades, atenuando-se a diferença de salinidade entre estas duas zonas à medida que nos afastamos do difusor.

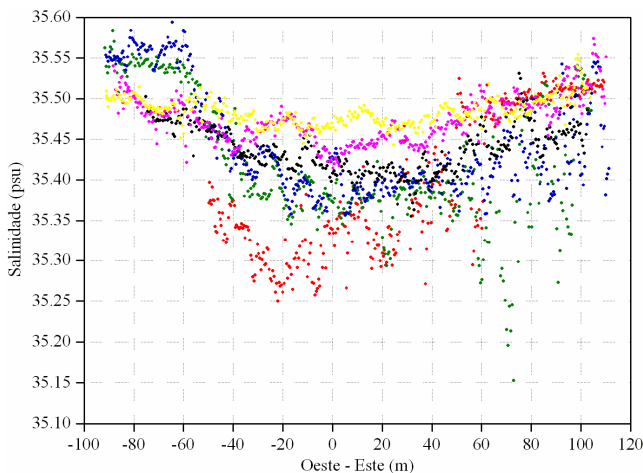


Figura 2. Salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade.

Nesta análise é também verificada a hipótese de estacionariedade da média. Pode considerar-se esta hipótese validada se os dados apresentarem um comportamento homogéneo, característico de um fenómeno estacionário. Quando as medidas aumentam sistematicamente numa determinada direcção, ou quando determinada região relevante concentra medidas relativamente elevadas, os dados apresentam um comportamento não homogéneo, característico de um fenómeno não-estacionário. Neste caso, não é possível utilizar a krigagem ordinária podendo-se optar, por exemplo, pela krigagem simples ou krigagem universal (Soares, 2000).

Para se avaliar o comportamento dos dados foi realizado um histograma, Figura 3. Este permite observar que os dados apresentam um comportamento relativamente homogéneo, não havendo medidas discrepantes de relevância. Este comportamento permite validar a hipótese de estacionariedade da média para estes dados.

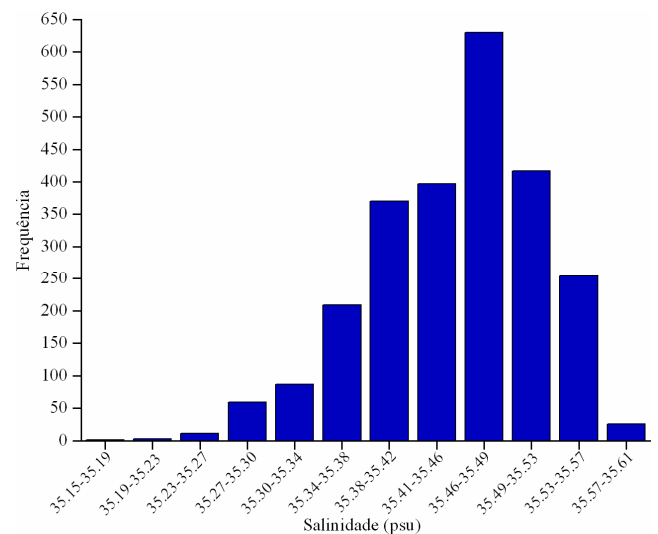


Figura 3. Histograma da salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade.

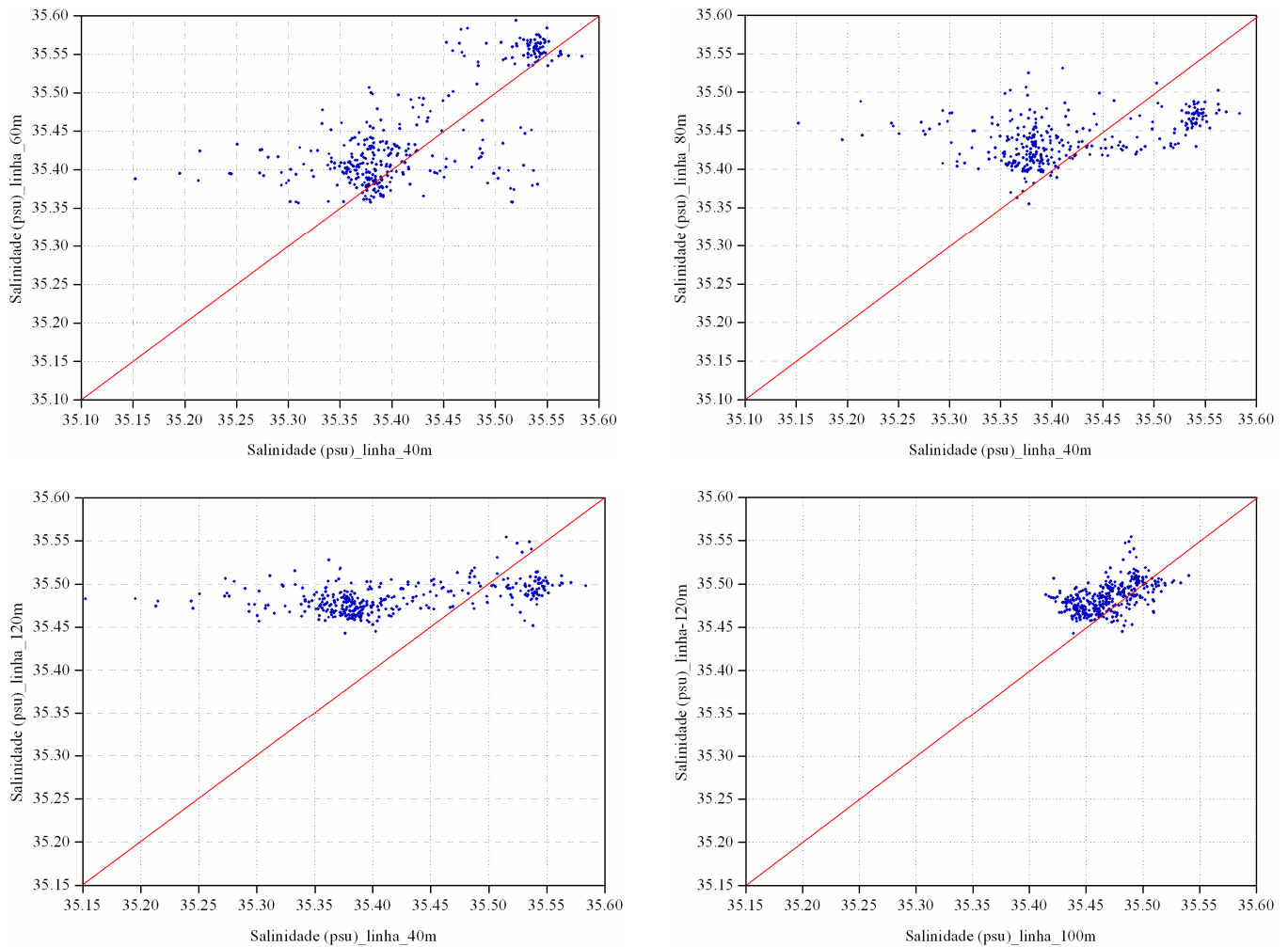


Figura 4. Biplots das linhas da secção horizontal dos 2m de profundidade.

A existência de uma certa continuidade espacial nos dados é um requisito fundamental para o processo de modelação geoestatística, verificando-se, quando as observações que estão mais próximas têm medidas mais semelhantes do que as que estão mais afastadas.

Para verificar este requisito representaram-se os dados em gráficos “biplots”. Neste tipo de gráfico são representados pares de pontos, com base no biponto, para diferentes valores de h , numa determinada direcção (Soares, 2000).

Os gráficos biplots da Figura 4 confrontam, com base no biponto, pares de medidas de salinidade de diferentes linhas, na direcção Norte-Sul. Estes gráficos mostram a existência de uma certa continuidade espacial nos dados.

Quando se confrontam os dados da linha dos 40m com os dados das linhas dos 60m, 80m e 120m, observa-se que as nuvens de pontos em torno da bissectriz tornam-se cada vez mais dispersas à medida que a distância entre os pares de observações aumenta. Este facto revela uma diminuição da correlação espacial dos dados à medida que a distância entre as observações aumenta. O elevado grau de correlação entre os dados da linha dos 100 m com os dados da linha dos 120m revela que a estas distâncias do difusor, praticamente já não se detecta a presença da pluma, sendo os valores de salinidade observados próximos dos do meio.

Este comportamento permite validar a hipótese de estacionaridade do 2.º momento para estes dados.

3.3. Análise Espacial Através do Variograma

O variograma é o instrumento habitualmente utilizado para quantificar a dependência (ou continuidade) espacial dos dados (Cressie, 1993; Kitanidis, 1997; Chilès e Pierre 1999). Uma variável regionalizada pode ser representada por três tipos de variogramas: o variograma experimental, o variograma verdadeiro e o variograma teórico.

O variograma experimental (observado ou empírico) é obtido a partir do conjunto de dados e é o único conhecido; o variograma verdadeiro corresponde à situação real, que é sempre desconhecida; o variograma teórico é o modelo matemático que representa a situação traduzida pelo variograma experimental. A Figura 5 mostra a construção do variograma experimental dos dados de salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade. O variograma teórico escolhido para representar o variograma experimental foi o modelo esférico que é dado por

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \quad h \leq a \quad [3]$$

em que C_0 representa o efeito pepita (ou efeito nugget), C é o patamar (sill), e a é o alcance (range).

Este é um dos modelos mais utilizados nas áreas da geologia e da hidrologia para modelar fenómenos isotrópicos (Stein, 1999).

Se a distância h entre os pares de pontos é pequena, os valores das observações comparadas são semelhantes, pelo que o valor da semivariância é baixo, revelando uma grande correlação entre as medidas. À medida que a distância entre os pares de pontos aumenta, o valor da semivariância aumenta também, estabilizando num determinado valor (patamar - C) a uma dada distância (alcance - a), a partir da qual deixa de haver correlação entre as medidas (Houlding, 2000). C_0 é o valor da semivariância obtido extrapolando o modelo esférico para a distância nula.

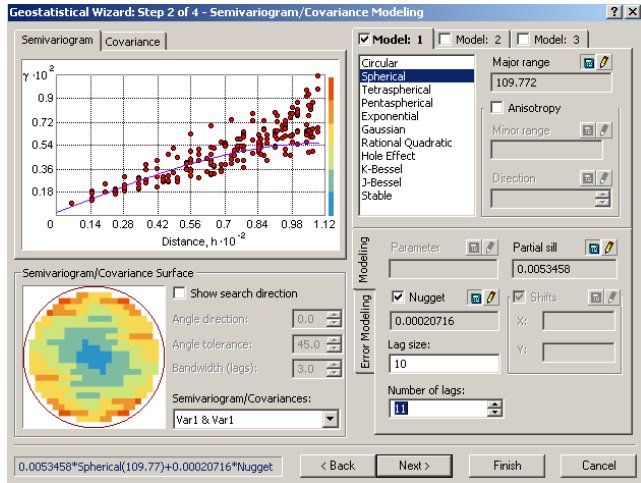


Figura 5. Construção do variograma experimental.

Determinados os valores de C , a e C_0 obteve-se o seguinte modelo para os dados em estudo, Figura 6,

$$\gamma(h) = 0.0002 + 0.0054 \left[1.5 \left(\frac{h}{109.8} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{109.8} \right)^3 \right] \quad [4]$$

Este modelo é utilizado pelo método de interpolação (krigagem ordinária) para a determinação do valor das medidas (de salinidade) em pontos não amostrados.

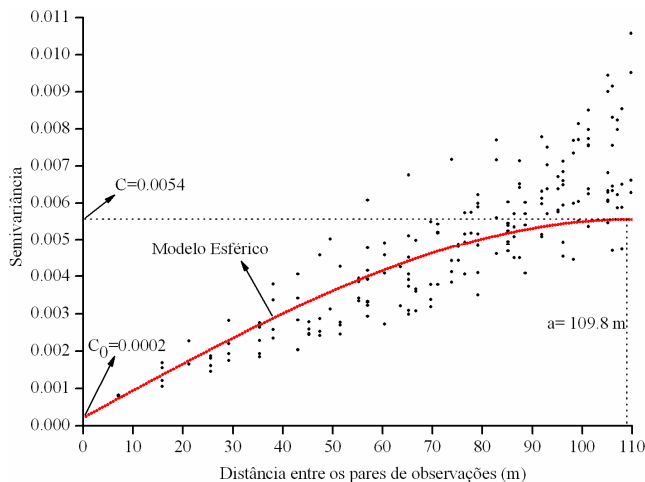


Figura 6. Variograma experimental e modelo esférico.

3.4. Validação

Os métodos de interpolação requerem técnicas que permitam validar o modelo utilizado na determinação das estimativas. Neste trabalho foi utilizada a técnica de validação cruzada para a validação do modelo esférico encontrado (Wackernagel, 2003).

A técnica de validação cruzada consiste em fazer uma comparação entre o valor das observações e o valor das estimativas correspondentes às posições observadas. Em cada iteração, uma observação é suprimida do conjunto e o seu valor é estimado utilizando as restantes. Este procedimento é realizado para todas as observações, obtendo-se pares ordenados constituídos pelos valores reais, e pela estimativa dessa observação.

A Figura 7 mostra um gráfico biplot dos pares de valores de salinidade observados e estimados.

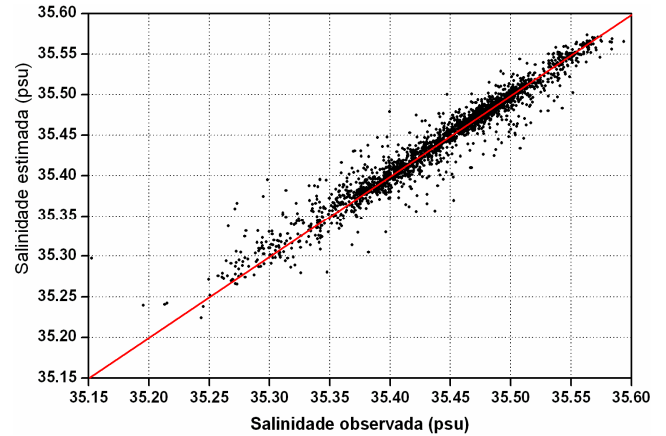


Figura 7. Pares de valores de salinidade observados e estimados.

A nuvem de valores em torno da bissectriz pouco dispersa revela que os valores observados estão próximos dos estimados.

A média dos erros das estimativas (diferença entre o valor observado e o valor estimado) é aproximadamente igual a zero, revelando que o estimador determinado é não enviesado.

A Figura 8 mostra os valores de salinidade observados e os erros das estimativas correspondentes.

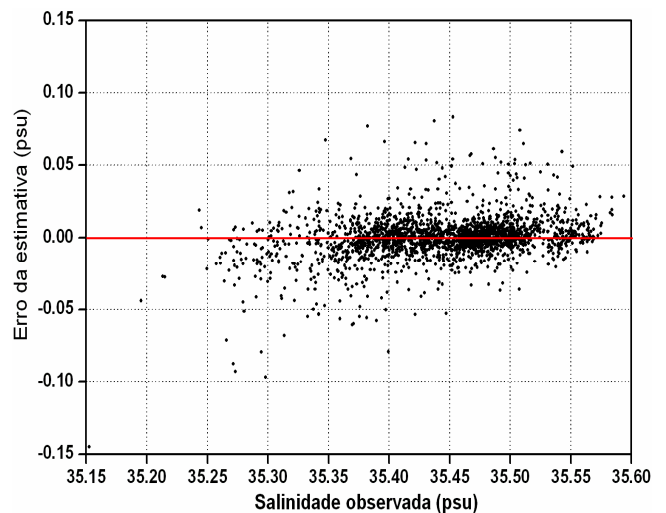


Figura 8. Valores de salinidade observados e erros das estimativas correspondentes.

A nuvem de valores em torno da recta $y=0$ pouco dispersa revela que os erros de estimação são próximos de zero.

A média dos erros quadráticos standardizados é aproximadamente igual a um, revelando um bom desempenho do modelo utilizado.

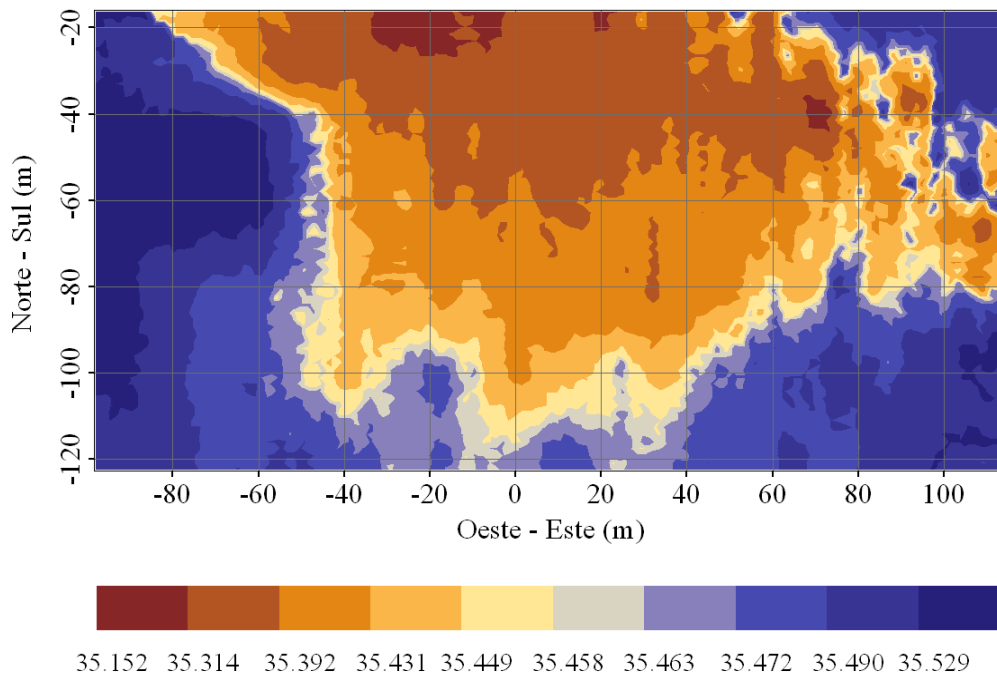


Figura 9. Mapa da salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade.

4. Resultados

A Figura 9 mostra o resultado das previsões de salinidade da secção horizontal dos 2m de profundidade obtidas usando o modelo esférico e a krigagem ordinária. Através deste mapa de salinidade pode visualizar-se a dispersão do efluente ao longo da direcção da corrente.

Como era esperado, os valores de salinidade mais baixos encontram-se na zona central da pluma, aumentando gradualmente para as extremidades. Como consequência do processo de diluição, à medida que a distância ao difusor aumenta, aumentam também os valores de salinidade para valores próximos dos da zona central.

5. Conclusões

Neste trabalho foram analisados dados de uma campanha de monitorização a um emissário submarino obtidos através de um VSA.

Os VSAs constituem uma tecnologia de vanguarda para monitorização ambiental, que permitem a recolha de uma grande quantidade de dados, com uma elevada resolução.

Os resultados obtidos pelo método de krigagem permitem visualizar de forma clara a dispersão da pluma ao longo da direcção da corrente.

A qualidade dos resultados perspectiva a possibilidade da sua comparação com modelos matemáticos de dispersão, tendo como objectivo a avaliação da sua eficiência.

Perspectiva-se, num futuro próximo, a utilização da geoestatística também para a concepção de missões de monitorização ambiental usando VSAs.

Agradecimentos

Agradece-se ao Laboratório de Sistemas e Tecnologia da Faculdade de Engenharia a Universidade do Porto os dados utilizados nesta análise.

Referências

- Chilès, J. P. e Pierre, D. (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. A Wiley Interscience Publication, New York, 695p. ISBN: 0-471-08315-1.
- Clark, I. e Harper, W. (2000). *Practical Geostatistics 2000*, Ecosse North America Llc, USA, 342. ISBN: 0-9703317-0-3.
- Cressie, N. (1993). *Statistics for spatial data*. A Wiley Interscience Publication, New York, 900p. ISBN: 0-471-00255-0.
- Houlding, S. W. (2000). *Practical Geostatistics: Modeling and Spatial Analysis*, Springer, Berlin, 159. ISBN: 3-540-66820-9.
- Kitanidis, P. (1997). *Introduction to geostatistics: Applications in hydrogeology*. Cambridge University Press, New York, 249p. ISBN: 0-521-58747-6.
- Soares, A. (2000). *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*, IST Press, Lisboa, 206. ISBN: 972-8469-10-1.
- Stein, M. (1999). *Interpolation of spatial data: Some theory for kriging*. Springer, New York, 247p.
- Wackernagel, H. (2003). *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*. Springer, Berlin, 291p.