



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**Doutorado em Sensoriamento Remoto**  
**Análise Espacial – SER-301-3**  
**Prof. Dr. Antônio Miguel Vieira Monteiro**

ANÁLISE BATIMÉTRICA DO PORTO DO MUCURIBE – CE ATRAVÉS DE  
KRIGAGEM POR INDICAÇÃO.

***Eduardo Guilherme Gentil de Farias***

INPE

São José dos Campos

2008

## 1 - INTRODUÇÃO

Com uma costa de 8,5 mil quilômetros navegáveis, o Brasil possui um setor portuário que movimentava anualmente cerca de 700 milhões de toneladas das mais diversas mercadorias e responde sozinho, por mais de 90% das exportações (SEP, 2008). O modal aquaviário possui um dos menores custos para o transporte de cargas no Brasil, perdendo apenas para o transporte dutoviário e aéreo, de acordo com estudos desenvolvidos pela Coppead (Instituto de Pesquisa e Pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ).

A atividade portuária representa uma importante fonte de geração de renda e divisas, sendo esta considerada como fator primordial para o desenvolvimento sócio-econômico regional (Clark, 1996).

Buscando aliar desenvolvimento, sustentabilidade e segurança, o Brasil desde 25 de maio de 1980 por força do Decreto Legislativo nº 11/80 é regido pela Convenção *Safety of life at sea*-SOLAS e assumiu o compromisso de implementar através desta o Código *International Ship and Port Facility Security*-ISPS, que entrou em vigor em julho de 2004.

O Código ISPS foi elaborado pela Organização Marítima Internacional (IMO), pertencente à Organização das Nações Unidas (ONU) e aprovado pelo Governo Brasileiro em forma de lei visando o estabelecimento de regras que tornam os navios e instalações portuárias mais seguras, considerando como relevantes a delimitação do perímetro portuário, adoção de instalações de segurança e um constante monitoramento de estruturas e vias aquaviárias de acesso aos terminais portuários, visando maximizar as atividades do comércio marítimo internacional que constitui-se num setor altamente competitivo e rentável (IMO, 2008).

No tocante a preservação dos acessos náuticos aos terminais portuários, a dragagem de manutenção representa atualmente a solução mais amplamente difundida e adotada na preservação das profundidades do canal de navegação, bacias de evolução e berços de atracação, em zonas cuja lâmina d'água estiver sendo progressivamente reduzida, devido ao assoreamento (Flemer et al, 1997).

A dragagem de manutenção distingue-se da dragagem de implantação de portos, canais de acesso e bacias de evolução, pelo porte das intervenções realizadas e pelo potencial das alterações ambientais decorrentes, muito menores no caso da dragagem de

manutenção. A dragagem de manutenção, pela sua própria definição, pressupõe a existência prévia de um sistema portuário e de vias de acesso marítimas que requerem manutenção periódica (Winfield & Lee, 1999).

A execução de obras desta natureza representa um grande custo para o Estado. Nesse interesse, os custos convencionais a serem considerados nas operações de dragagem são influenciados por algumas condições, podendo sofrer variações conforme a organização e o sítio de dragagem.

Segundo o ISPS *code*, o contratante fica responsável por fornecer à empreiteira algumas informações que são: tipo de solo, batimetria, dados de vento, correntes e ondas, visibilidade, movimentação de navios e embarcações na área, entre outras.

Dentre as ações que visam à formulação de planos de dragagem, o mapeamento batimétrico é de grande importância para estudos iniciais. Esta técnica pode ser definida como a análise do reconhecimento da morfologia do substrato de um corpo d'água por intermédio de medições da profundidade local. Para isso, é utilizado o equipamento denominado ecobatímetro que mede a profundidade através de transmissão e recepção de ondas sonoras (Filho, 2004).

Essas informações são de grande relevância, visto que a obtenção de um mapa de profundidade subsidia estudos de geologia e navegação da área a ser dragada.

Entretanto, não existem metodologias definidas que visem estabelecer o grau de confiabilidade desses mapeamentos, ou seja, os modelos obtidos por intermédio dos interpoladores geoestatísticos podem ter um alto índice de incerteza associado à coleta e manipulação dos dados o que em última instância poderia invalidar o mapeamento obtido pela ecobatimetria. Nesse interesse, a adoção de métodos de análise espacial, em particular as técnicas de krigagem por indicação, podem identificar as regiões de maior incerteza do levantamento, ressaltando locais aonde o grau de amostragem é insuficiente, definindo assim, a estimativa de precisão do mapeamento obtido.

Partindo dessa premissa, o presente trabalho visa utilizar técnicas de krigagem por indicação nos dados obtidos por ecobatimetria da região do porto do Mucuripe, também chamado porto de Fortaleza, localizado na cidade de Fortaleza, nordeste do Brasil.

## 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Porto de Fortaleza está situado na Enseada do Mucuripe, município de Fortaleza, Estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil, sendo este limitado a norte e a leste pelo Oceano Atlântico, tendo a cidade de Fortaleza a sul e a oeste (Figura 1).

O Porto de Fortaleza é um porto marítimo localizado em ponto privilegiado da costa brasileira por ser dos mais próximos aos grandes portos da América do Norte, fator importante na redução do custo do transporte.

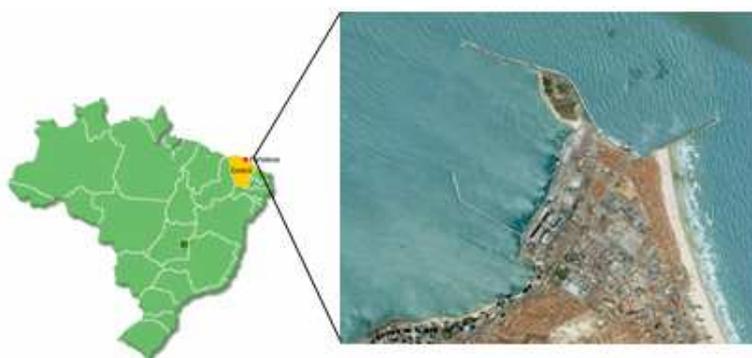


Figura 1 - Mapa de localização.

## 3 – REFERENCIAL TEÓRICO

### 3.1 Dependência espacial e anisotropia

Segundo Isaaks & Srivastava (1989), em alguns conjuntos de dados os valores dos dados são mais contínuos ao longo de certas direções do que em outras, essa variação da continuidade espacial é denominada de anisotropia. Existem dois tipos de anisotropia, a *anisotropia geométrica* e a *anisotropia zonal*. Em um conjunto de variogramas direcionais que mostram a mudança de alcance e patamar com as mudanças de direção, um identifica o eixo de anisotropia. Isto é feito para identificar o alcance máximo e mínimo, no caso da anisotropia geométrica e o patamar máximo e mínimo, no caso da anisotropia zonal.

### 3.2 Krigagem

A krigagem é um conjunto de técnicas de regressão linear generalizadas para minimizar uma variância de estimação a partir de um modelo de covariância definido a priori, Deutsch e Journel (1998). O processo de krigagem estima um valor de um atributo, em uma posição  $u$  não amostrada, a partir de um conjunto de amostras vizinhas  $z(u\alpha)$ ,  $\alpha = 1, \dots, n$ .

O método de krigagem é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, porém na krigagem os pesos dados a cada observação são determinados a partir de uma pré-análise espacial utilizando semivariogramas experimentais. A krigagem reúne diversos tipos de métodos de estimação, como: krigagem simples, ordinária, universal, por indicação, disjunta e cokrigagem. Porém este estudo só tratará da krigagem por indicação.

### 3.3 Krigagem por indicação

A krigagem por indicação é um estimador de krigagem não linear, ou seja, um estimador de krigagem linear aplicado a um conjunto de dados que foram modificados segundo uma transformação gaussiana, lognormal ou outra (Deutsch e Journel, 1998). Na krigagem por indicação é necessária a realização de uma transformação não linear sobre o conjunto de dados amostrais  $Z(u\alpha)$ , a qual é denominada *codificação por indicação*. A principal vantagem da krigagem por indicação é a de ser uma técnica não paramétrica, ou seja, nenhum tipo de distribuição para a variável aleatória (VA) é considerado a priori, o que possibilita uma estimativa da função de distribuição para a VA, permitindo a determinação de incertezas e a inferência de valores do atributo em locais não amostrados.

Essa técnica também possibilita a modelagem de dados com grande variabilidade espacial. A função distribuição acumulada, a fdac,  $F(u; z|(n))$ , modela a incerteza sobre os valores de  $Z(u)$ , em posições  $u$  não amostradas. A krigagem por indicação permite uma aproximação da fdac. Como já foi dito anteriormente, a krigagem por indicação requer que os valores dos atributos sejam modificados segundo uma transformação não linear, a *codificação por indicação*. Um conjunto amostral por indicação  $I(u=u\alpha)$  para um valor de corte  $z_k$  é gerado através da codificação por indicação aplicada a um conjunto de dados  $Z(u=u\alpha)$  segundo a equação abaixo.

$$I(u; z_k) = \begin{cases} 1, & \text{se } Z(u) \leq z_k \\ 0, & \text{se } Z(u) > z_k \end{cases}$$

O processo de codificação por indicação aplicada sobre todo conjunto amostral para o valor de corte  $z_k$ , onde  $k = 1, 2, \dots, k$ , é mostrado na figura 2:

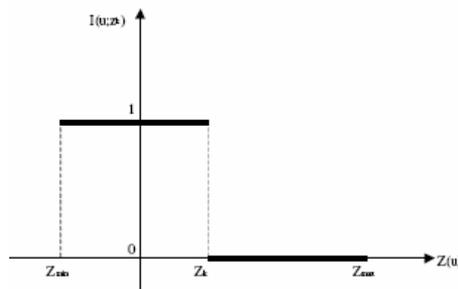


Figura 2 - Codificação por indicação dos dados amostrais para o valor de corte  $z = z_k$  fonte: adaptado de Felgueiras (1999)

O modelo de variografia é obtido através do conjunto amostral codificado com valores 0 e 1, o qual depende da existência mínima de 0's e 1's no conjunto de amostra. O conjunto amostral codificado é utilizado para inferir valores para variáveis aleatórias por indicação  $I(u; z_k)$ , com  $u \in U$ . Segundo Felgueiras (1999), a esperança condicional da VA numérica por indicação  $I(u; z_k)$  é calculada segundo a equação abaixo:

$$\begin{aligned} E\{I(u; z_k | I(n))\} &= 1 \cdot \text{prob}\{I(u; z_k) = 1 | I(n)\} + 0 \cdot \text{prob}\{I(u; z_k) = 0 | I(n)\} \\ &= 1 \cdot \text{prob}\{I(u; z_k) = 1 | I(n)\} = F^*(u; z_k | I(n)) \end{aligned}$$

A formulação acima mostra que a esperança condicional de  $I(u; z_k)$  fornece, para cada valor de corte  $z_k$ , estimativa da função de distribuição acumulada condicionada,  $F^*(u; z_k | I(n))$ , para atributos numéricos. A krigagem por indicação simples é dada pela equação abaixo:

$$F^*_s(u; z_k | I(n)) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{s\alpha}(u; z_k) i(u_\alpha; z_k) + [1 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{s\alpha}(u; z_k)] F^*(z_k)$$

Onde:

-  $F^*(z_k)$  é a média da função aleatória da região estacionária;

-  $I_S(u; z_k)$  são os pesos determinados com o objetivo de minimizar a variância do erro da estimação.

No entanto, considerando que a somatória dos pesos seja igual a 1 têm-se a krigagem por indicação ordinária, a qual possui a seguinte estimação por:

$$F^*_{O}(u; z_k / (n)) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} w_{O\alpha}(u; z_k) i(u_{\alpha}; z_k)$$

Os pesos  $w_{O\alpha}(u; z_k)$  são calculadas resolvendo o sistema de equações dado em:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^{n(u)} w_{O\beta}(u; z_k) C_1(h_{\alpha\beta}; z_k) + \phi(u; z_k) = C_1(h_{\alpha}; z_k) \\ \sum_{\beta=1}^{n(u)} w_{O\beta}(u; z_k) = 1 \end{cases}$$

Onde:

- $f(u; z_k)$  – é o multiplicador de *Lagrange*;
- $h_{\alpha}$  - vetor separação definido pelas posições  $u_{\alpha}$  e  $u$ ;
- $h_{\alpha\beta}$  - vetor definido entre as posições  $u_{\alpha}$  e  $u_{\beta}$ ;
- $CI(h_{\alpha}; z_k)$  – autocovariância dada por  $h_{\alpha}$ ;
- $CI(h_{\alpha\beta}; z_k)$  – autocovariância dada por  $h_{\alpha\beta}$ ;

Ressaltando que as autocovariâncias são dadas pelos modelos variográficos teóricos definidos pelo conjunto I para o valor de corte  $z_k$ . A krigagem por indicação, tanto simples quanto ordinária, fornece estimativas para cada valor de corte  $z_k$ , que é também a melhor estimativa mínima quadrática da esperança condicional da VA  $I(u, z_k)$ , segundo Felgueiras (1999).

Calculando as estimativas para diversos valores de corte da fdac de  $Z(u)$ , tem-se uma aproximação discretizada da fdac real de  $Z(u)$ . Por isso, quanto maior for o número de cortes melhor será a aproximação. O conhecimento da fdac, em uma posição  $u$ , possibilita uma estimativa direta da incerteza, sobre o valor não conhecido  $z(u)$  (Goovaerts, 1997).

Quando se trata de atributos numéricos as incertezas são expressas em função de intervalos de confiança. A incerteza pode ser estimada, também, para intervalos de valores

do atributo. Segundo Felgueiras (1999), a probabilidade de valor  $z(u)$  estar dentro de um intervalo  $(a,b]$  qualquer, denominado *intervalo de probabilidade*, é computado com a diferença entre os valores da fdac para os limiares  $b$  e  $a$ , ou seja, como na equação abaixo:

$$prob\{Z(u) \in (a,b]/(n)\} = F(u;b/(n)) - F(u;a/(n))$$

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Dados de batimetria.

Para a realização do levantamento batimétrico da região, foi utilizada uma ecossonda conjugada a um GPS, modelo GPSMAP 238 *Sounder* GARMIN, transdutor de resolução de 0,01 metros de profundidade e sensor de temperatura, antena externa, recepção para 12 canais e receptor diferencial. A ecossonda implementa um sistema de aquisição de dados de profundidade, hora, e coordenadas, acoplado a um laptop. O taxa de transmissão dos dados é de 1/segundo e estes estão no formato NMEA na versão 2.3.

Os dados eram salvos em um laptop em formato ASCII no padrão NMEA 2.3. As sentenças utilizadas para o processamento foram a GPGLL e SDDBT onde trazem as informações para elaboração de tabelas no formato XYZ, coordenadas e profundidades.

Os dados de profundidade foram corrigidos ao nível reduzido da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil (DHN) com o objetivo de eliminar o efeito da maré, utilizando como base a curva de maré obtida em campo e a tábua de maré do porto de Natal, objetivando dar suporte a correta modelagem do mapa batimétrico.

No SPRING, após a criação do banco de dados “Spring\_Mucuripe” e do projeto “Batimetria\_Mucuripe” foi realizada a importação dos dados XYZ de batimetria em formato \*.SPR (Figura 3).

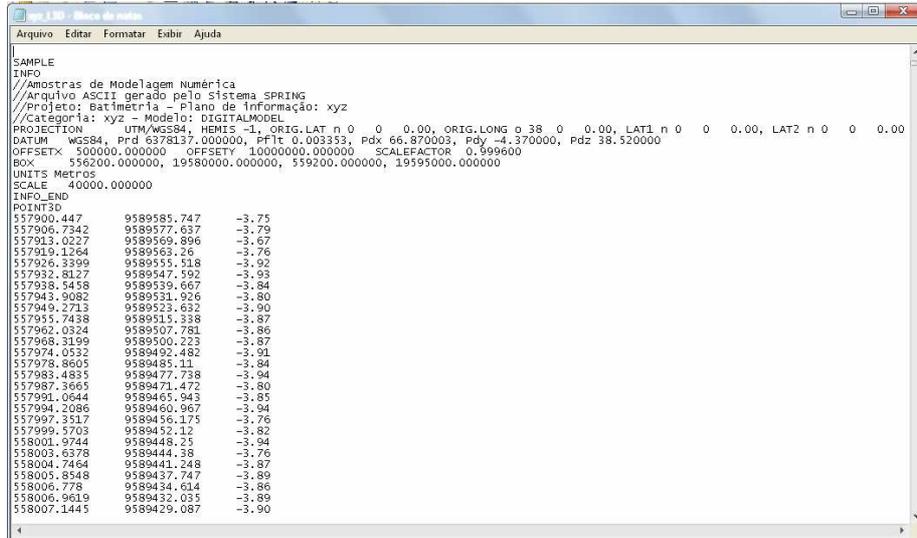


Figura 3 – Dados XYZ de batimetria

A partir do PI de batimetria foi gerada uma grade regular (figura 4) utilizando-se para tanto um interpolador por média ponderada, por quadrante e por cota. A grade numérica foi, então, utilizada no processo de fatiamento.

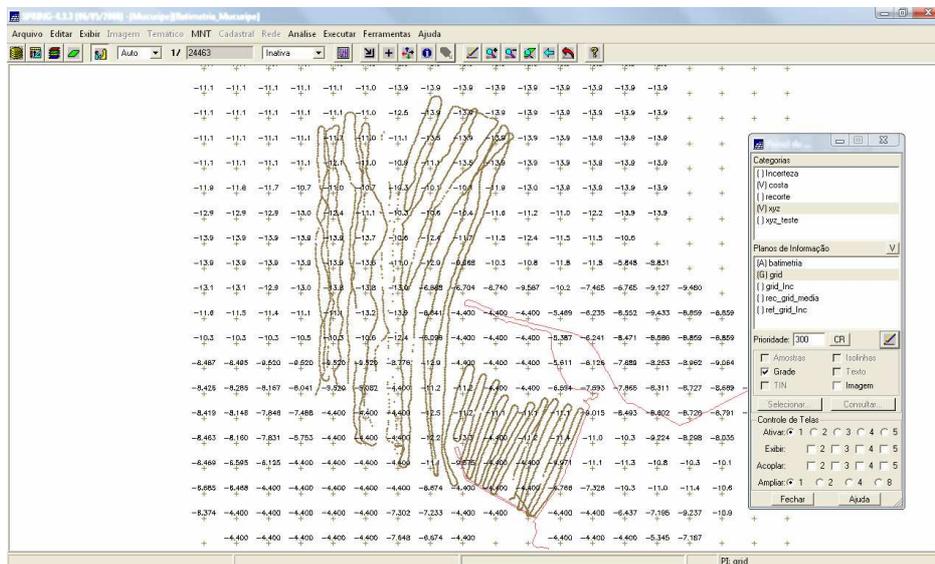


Figura 4 – Caminhamento percorrido pela embarcação.

## 4.2 Ambiente computacional.

Para a realização do presente trabalho foram utilizados os softwares SPRING 4.3.3 e ARCMAP 9.1.

No SPRING, foi criado um banco de dados, o projeto, as categorias e os planos de informação referentes a cada tipo de informação. Enquanto, no software ARCGIS 9.1, foram feitos os layouts finais a partir da exportação de dados em formato shape do SPRING.

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi realizada uma análise exploratória dos dados, onde pode ser observado os parâmetros estatísticos descritivos dos pontos coletados, conforme mostrado abaixo:

E S T A T Í S T I C A S: batimetria	
=> Número de Pontos .....	5030
=> Número de Pontos Válidos ...	5030
=> Média .....	-10.11710934
=> Variância .....	7.58979729
=> Desvio Padrão .....	2.75495867
=> Coeficiente de Variação ...	-0.27230690
=> Coeficiente de Assimetria ..	0.91130061
=> Coeficiente de Curtose .....	3.14557426
=> Valor Mínimo .....	-15.93999958
=> Quartil Inferior .....	-11.85000038
=> Mediana .....	-10.92000008
=> Quartil Superior .....	-8.75000000
=> Valor Máximo .....	-0.05000000

Como a metodologia de krigagem por indicação requer planos de corte, o presente trabalho adotou os valores de quartil inferior, mediana e quartil superior como tais, visando identificar índices de incerteza a partir das mesmas.

Para um maior entendimento dos resultados foi também realizada uma análise do histograma (Figura 5) e de probabilidade normal (Figura 6).

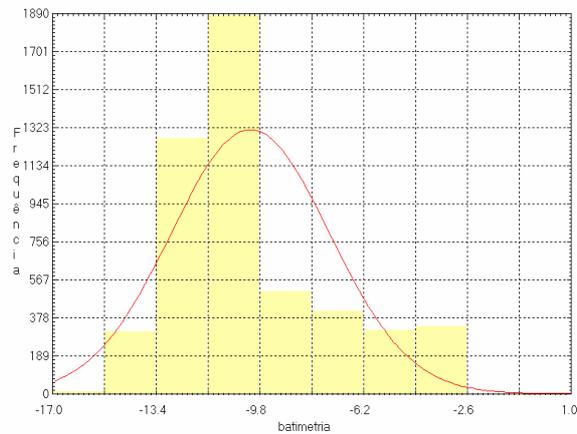


Figura 5 – Histograma dos dados.

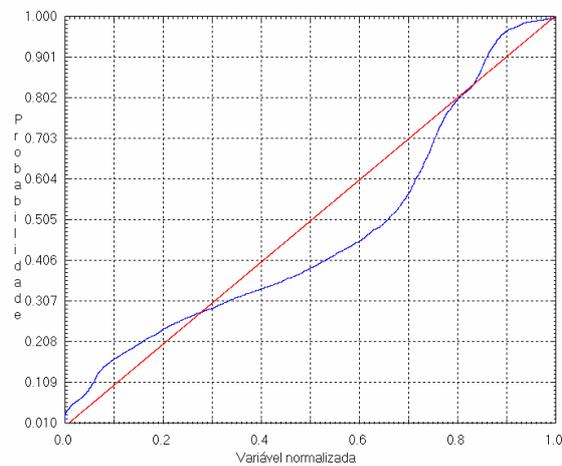


Figura 6 – Distribuição de probabilidade normal dos dados.

A etapa seguinte foi a geração dos semivariogramas para cada uma das linhas de corte, para a análise da distribuição, graus de aleatoriedade e alcance em cada um dos cortes escolhidos. Para tanto, adotou-se uma análise unidirecional e com padrão irregular. Já os valores de incremento, alcance e tolerância foram adotados conforme a adaptabilidade da curva frente os parâmetros de entrada, conforme mostrado na figura 7.

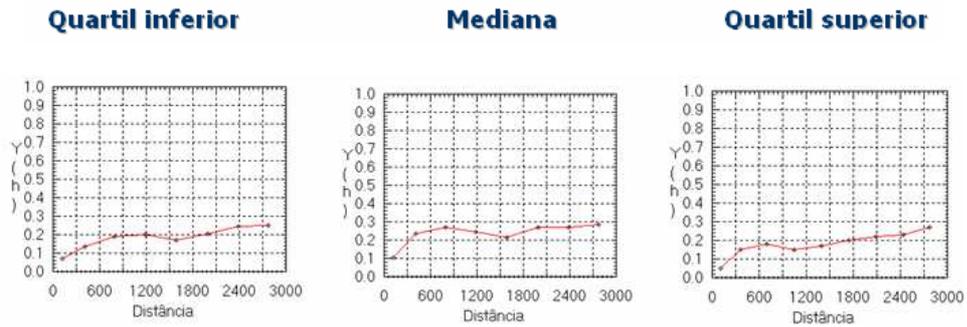


Figura 7 – Geração de semivariogramas.

O ajuste dos semivariogramas obtidos são dados a partir de curvas com o comportamento estatístico conhecido, visando facilitar a modelagem dos dados nas equações já conhecidas. Foram adotados para os três níveis de corte o modelo esférico de distribuição dos pontos.

Pode ser evidenciado um baixo efeito pepita em todas as distribuições e um alcance médio da ordem de 1400 m, o que neste caso mostra uma grande consistência entre os dados utilizados (Figura 8).

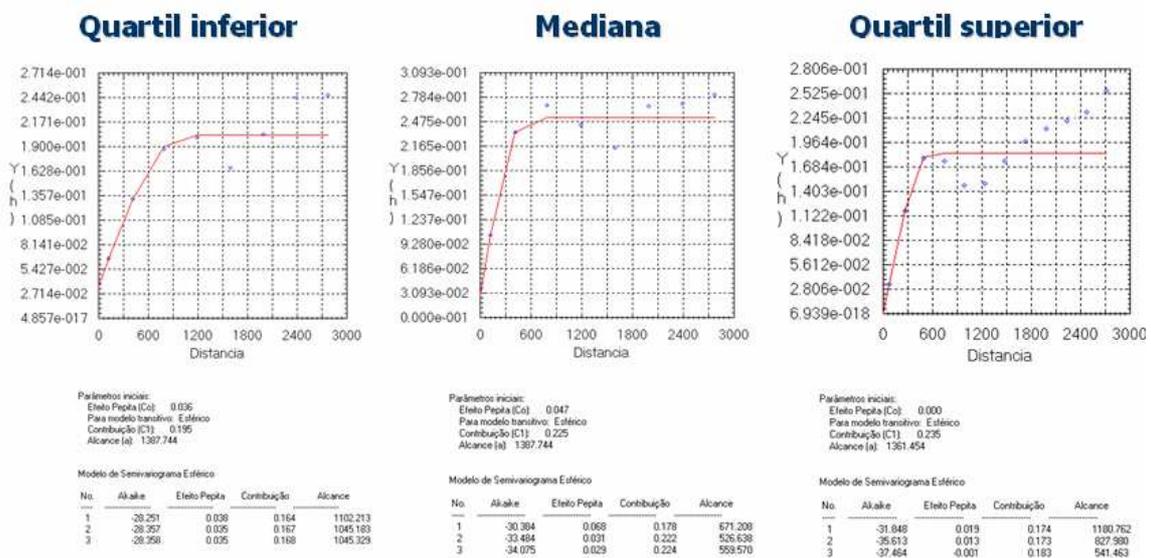


Figura 8 – Ajuste de semivariogramas.

Por fim, é realizada a krigagem por indicação propriamente dita, considerando os parâmetros adotados para o ajuste dos semivariogramas gerados. No presente estudo, foi

utilizada uma krigagem ordinária, considerando como valor a ser interpolado a média e uma incerteza de um desvio padrão sobre a malha amostral interpolada (Figura 9).

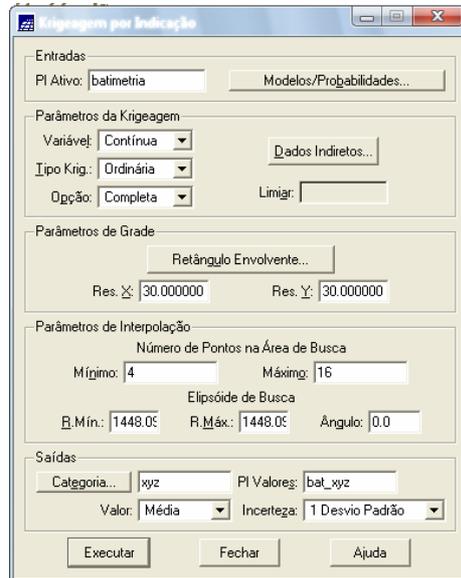


Figura 9 – Parâmetros adotados na krigagem por indicação realizada.

Através da krigagem por indicação foram obtidos dois mapas distintos, um para os valores médios interpolados e outro considerando um nível de incerteza de um desvio padrão.

O mapeamento batimétrico foi realizado a uma velocidade média de 2,5 nós, através de perfis transversais ao longo da área de estudo, sendo coletados aproximadamente 5030 pontos de ecobatimetria.

Os dados de profundidade foram corrigidos ao nível reduzido da Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil (DHN) com o objetivo de eliminar o efeito da maré, utilizando como base à curva de maré obtida em campo e a tábua de maré do porto do Mucuripe, objetivando dar suporte à correta modelagem do mapa batimétrico.

Os resultados do levantamento mostram que a conformação do relevo submerso da região apresentou o canal de navegação bem definido, com cotas médias de -12m. As regiões vizinhas ao canal principal apresentaram elevado gradiente de profundidade, chegando a cotas críticas de até -5m, o que nos mostra uma diferença média de cota isobatimétrica de -7m.

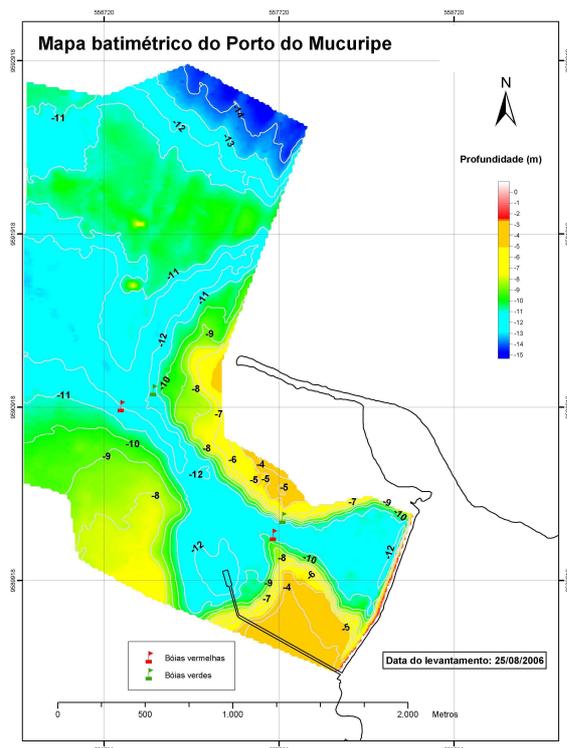


Figura 10 – Mapa batimétrico.

Além disso, foi gerado também um mapa de incerteza da interpolação adotada, conforme mostrado na figura 11.

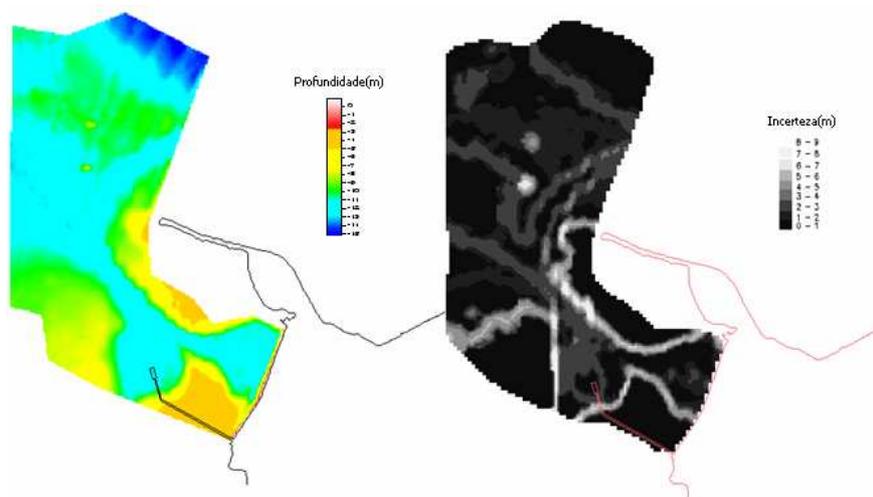


Figura 11 – Mapas de média (à esq.) e incerteza (à dir.) da região referente ao canal de acesso do porto do Mucuripe.

A partir do mapa de incerteza, pode ser evidenciado um alto valor de incerteza nas regiões onde ocorrem grandes gradientes de profundidade. Nas regiões próximas a área de

desembarque do porto puderam ser notados índices de incerteza de até 9m, o que mostra que considerando um interpolador de média como mapa de verdade de campo, trafegar sobre uma área que não seja referente ao canal principal de navegação do porto do Mucuripe pode significar um alto risco de encalhe de embarcações.

## 6 - CONCLUSÕES

- As regiões com altos gradientes apresentaram as maiores incertezas.
- A adoção de técnicas de krigagem por indicação pode representar uma importante ferramenta para gestão portuária.
- Os resultados obtidos não são por si só conclusivos, uma vez que o nível de incerteza obtido está considerando o valor médio interpolado o que possivelmente limita uma alegativa conclusiva para o problema proposto.
- O uso de técnicas de análise espacial apresentam larga aplicabilidade em estudos de batimetria, entretanto diferentes técnicas de interpolação devem ser avaliadas.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clark, J. *Coastal Zone Management Handbook*. Nova York: Lewis Publisher/CRC Press, 1996.

Deutsch, C.V.; Journel, A. G., 1992, GSLIB: Geostatistical Software Library and user's guide. Oxford University Press, New York, 339p.

Felgueiras, C. A., 1999. Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, 169 p.

Filho, H. A. G., 2004. Dragagem e Gestão de Sedimentos. Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 174p.

Flemer, D.A., Ruth, B.F., Bundrick, C.M. e Gaston, G.R. 1997. Macrobenthic community colonization and community development in dredged material disposal habitats off coastal Louisiana. *Environ. Pollut.* 96(2): 141-154.

Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. Organização Marítima Internacional. Disponível em: [www.imo.org/home.asp](http://www.imo.org/home.asp). Acesso em: 03/11/2008.

Isaaks, Edward H.; Srivastava, Mohan R., 1989. Applied Geoestatics, Oxford University Press, Oxford, New York, 560 p.

Secretaria Especial de Portos. Disponível em: <http://www.portosdobrasil.gov.br/sistema-portuario-nacional>. Acesso em 08/11/2008.

Winfield, L.E. and C.R. Lee, 1999. Dredged material characterization tests for the beneficial use suitability. DOER Technical Notes Collection (TN COER-C2). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, Mississippi.