

O USO DO SENSORIAMENTO REMOTO E GEOESTATÍSTICA APLICADOS A MODELAGEM DE DADOS DE SALINIDADE DO SISTEMA ESTUARINO DA BAÍA DE GUANABARA

VERA LUCIA NASSER¹
OTTO CORRÊA ROTUNNO FILHO²
MANOEL DE MELLO MAIA NOBRE³

^{1 2} COPPE/UFRJ - Rec. Hídricos – Programa de Engenharia Civil; Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente, Bloco I, Centro de Tecnologia, Ilha do Fundão; CEP: 21945-970; Rio de Janeiro; RJ; Brasil; Tel.: (21) 562-7842; Fax.: (21) 562-7836; {vera, Otto}@hidro.ufrj.br

³Instituto de Geociências/UFAL
Campus A.C., Simões, BR 104 – Norte – km 97, tabuleiro dos Martins – Maceió – Al; CEP: 57072-9709.
maianobre@uol.com.br

Abstract. Remote sensing allows the acquisition of an important set of information with potential application in water quality studies. The present work intends to evaluate the spatial distribution of parameter salinity through satellite imagery.

The methodology analysis provided spatial variability assessments of the parameters salinity and satellite images and their relationship, including a geostatistical framework. One Landsat-TM image was acquired jointly with a campaign for collecting parameters salinity regarding the estuary system of Guanabara bay. The field campaign was delayed between five and seven days when compared to the satellite overpass. Initially, the spatial variability of the parameters and images was evaluated, with special emphasis to the geostatistical approach through the construction of variograms and covariograms. Finally, modeling of the data spatial correlation structure was conducted using the bayesian kriging method.

Keywords: remote sensing, geostatistical analysis, kriging analysis.

INTRODUÇÃO

Dentre os sistemas costeiros, os estuários têm uma importância especial. Os estuários funcionam como pólos de atração da atividade humana. A ocupação populacional no entorno dos estuários é intensa, uma vez que estes constituem zonas de abrigo à navegação e permitem a criação de zonas portuárias com uma grande diversidade de atividades ocasionando significativas alterações morfológicas e diversas formas de poluição. Essa poluição é transportada através do seu campo de velocidade e de suas características de turbulência e representa um risco potencial à saúde pública e ao equilíbrio do meio ambiente aquático.

Neste trabalho, é examinada a variabilidade espacial do parâmetro de qualidade de água salinidade. Mais especificamente, estuda-se o parâmetro salinidade da baía de Guanabara através dos dados obtidos das imagens de satélite Landsat5-TM e dados observados de salinidade. É realizada uma avaliação preliminar da estrutura de correlação espacial presente nas imagens de satélite e nos dados observados através de uma abordagem geoestatística. Essa abordagem inclui a construção de variogramas e covariogramas para a salinidade.

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À QUALIDADE DE ÁGUA

O princípio básico envolvido nos métodos de sensoriamento remoto é que, em diferentes faixas de comprimentos de ondas/frequências, cada tipo de objeto reflete ou emite uma certa intensidade de luz, que é dependente dos atributos físicos ou da composição do objeto em estudo.

Numerosos trabalhos de pesquisa tentam relacionar propriedades óticas da água às propriedades físico-químicas e biológicas dos sistemas aquáticos. Com a disponibilidade de dados do sensor TM, abriram-se novas perspectivas de utilização de dados orbitais em estudos de sistemas aquáticos (Novo,1988).

Por sua vez, Braga e Lacerda (1989) desenvolveram um trabalho, na região da baía de Guanabara e suas adjacências, com o objetivo de identificar os parâmetros de qualidade da água responsáveis pelo comportamento espectral de imagens do sensor Landsat-TM. Em dois dias de passagem do satélite sobre a área de estudo foram medidos a temperatura, a salinidade, a profundidade Secchi, o total de sólidos em suspensão e os teores de ferro e manganês no total de sólidos em suspensão. Esses dados de campo e os dados nas bandas 1, 2, 3, 4 e 6 foram tratados estatisticamente por meio de análises de regressão simples e múltipla.

Com o objetivo de promover uma visão holística da baía de Guanabara, Mayr (1998) complementa o estudo das transformações ambientais ocorridas na região durante 50 anos. A autora gera um mapa de sensibilidade natural quanto à capacidade de renovação de suas águas, usando técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto e geoprocessamento para estudar o comportamento das principais sub-bacias hidrográficas da baía. Os resultados são confrontados com a qualidade das águas da baía obtida a partir de estudos de parâmetros hidrobiológicos por Mayr et al.(1989).

METODOLOGIA

Análise exploratória dos dados

Foram realizadas análises de correlação linear entre conjuntos de valores relativos aos parâmetros medidos na água e dados do satélite Landsat5-TM, além do cálculo da matriz de correlação para os dados observados de salinidade.

Análise geoestatística

Nesse estudo, decidiu-se explorar, de forma preliminar, a presença ou não de uma estrutura de correlação espacial nas imagens de satélite bem como nos dados de salinidade. A abordagem utilizada foi uso de técnicas geoestatísticas (Journel e Huijbregts, 1978), incluindo a construção de variogramas e covariogramas.

Variáveis regionalizadas

Um fenômeno natural pode ser freqüentemente caracterizado pela distribuição espacial de uma ou mais variáveis, chamadas variáveis regionalizadas. A teoria geoestatística é baseada no fato de que a variabilidade de todas as variáveis regionalizadas tem uma estrutura particular. Se $z(x)$ é o valor da variável $Z(x)$ no ponto x , o problema é representar a variabilidade da função $z(x)$ no espaço (quando x varia). Essa representação será usada para resolver alguns problemas como a estimação do valor $z(x_0)$ no ponto x_0 onde não há dados disponíveis, ou estimar a proporção de valores $z(x)$, numa dada área, que são maiores que um determinado limite.

A solução geoestatística consiste em interpretar cada valor $z(x_i)$ como uma realização particular da variável aleatória $Z(x_i)$ no ponto x_i . O conjunto dessas variáveis aleatórias auto-correlacionadas em um domínio D constitui uma função aleatória. O problema de caracterizar as correlações entre as várias variáveis aleatórias $Z(x_i)$, $Z(x_j)$ que constituem a função aleatória $\{Z(x_i), x \in D\}$.

O variograma

Sejam dois valores $z(x)$ e $z(x+h)$, nos pontos x e $x+h$ separados pelo vetor h . A variabilidade entre esses dois valores é caracterizada pela função variograma $2\gamma(x,h)$, que é definida como a esperança da variável aleatória $[Z(x)-Z(x+h)]^2$, isto é:

$$2\gamma(x,h) = E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} \quad (1)$$

O variograma $2\gamma(x,h)$ é função do ponto x e do vetor h . Assim, a estimativa desse variograma requer várias realizações, $[z_k(x)$ e $z_k(x+h)]$, $[z_{k'}(x)$ e $z_{k'}(x+h)]$,..., $[z_{k''}(x)$, $z_{k''}(x+h)]$, do par de variáveis aleatórias $[Z(x), Z(x+h)]$. Na prática, apenas uma única realização $[z(x)$ e $z(x+h)]$ é possível, e essa realização é construída pelo par de valores realmente medidos nos pontos x e $x+h$. Para superar esse problema, é introduzida a hipótese intrínseca de que a função variograma $2\gamma(x,h)$ depende somente do vetor h (módulo e direção) e não da posição x . Essa estimativa é simplesmente a hipótese de estacionariedade de segunda ordem das diferenças $[Z(x)-Z(x+h)]$ (Journel e Huijbregts, 1978).

O estimador clássico do semivariograma baseado em dados amostrais é:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

onde $N(h)$ é o número de pares experimentais $[z(x_i)$ e $z(x_i + h)]$ de dados separados pelo vetor h .

Modelo geoestatístico de krigagem bayesiana

A modelagem conduzida nesta pesquisa adotou o procedimento sugerido por Omre (1987). Essa modelagem agrega os conceitos de krigagem e teorema de Bayes.

ESTUDO DE CASO

O sistema estuarino da baía da Guanabara está localizado entre os paralelos de 22°24' e 22°57' de latitude sul e os meridianos de 42°33' e 43°19' W. Possui uma forma irregular alongando-se no sentido dos meridianos e estreitando-se no sentido dos paralelos.

O complexo hidrográfico que forma a baía de Guanabara, localizado no centro da região metropolitana do Rio de Janeiro, apresenta uma área de 346 km², incluindo 59 km² de ilhas. O volume médio é estimado em 2,2.10³ milhões m³, a profundidade média é de 7,7 m, enquanto o perímetro é de 131 km, formada por 24 sub-bacias. A bacia hidrográfica tributária abrange uma área de 4.600 km² (Figura 1).

Para condução deste estudo, foi adquirida uma imagem Landsat5-TM em 18/04/92, cada uma delas contendo 7 bandas espectrais. Os dados observados da salinidade foram obtidos a partir de uma campanha de campo realizada no período de 23/04/91 a 25/04/91 (JICA,1992) em 38 postos JICA (1994)

Existe uma defasagem de no mínimo 5 dias entre a data de aquisição da imagem e o período de coleta dos dados de campo.

A análise feita com a imagem incluiu a extração dos tons de cinza da imagem no entorno de cada posto de coleta, obtendo-se, então, correlações com os dados observados em cada canal espectral da imagem, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Correlação da salinidade com número digital (ND) de 23/4/92 a 25/04/92

| ND | Banda 1 | Banda 2 | Banda 3 | Banda 4 | Banda 5 | Banda 6 | Banda 7 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parâmetro | | | | | | | |
| Salinidade | -,025 | -0,07 | 0,09 | -0,24 | -0,2 | -0,05 | -0,05 |

Para tanto, percebe-se que a defasagem temporal na aquisição dos dados afetou os valores de correlação. Isso sugere que os dados de parâmetros físicos devem ser coletados no dia da passagem do satélite, representando assim uma situação ideal para aquisição de dados via sensoriamento remoto.

Em seguida, investigou-se a presença de uma estrutura de correlação espacial subjacente aos dados imagens de satélite e os dados observados em campo. Para tanto, adotou-se uma abordagem geoestatística através da construção de semivariogramas. (Figuras 1 e 2) e covariograma (Figura 3) envolvendo a banda 1 da imagem Landsat5-TM e dados de salinidade. O covariograma foi obtido a partir das médias de tons de cinza de blocos (40 píxeis x 40 píxeis) espalhados no sistema estuarino da baía de Guanabara e dados de salinidade correspondentes.

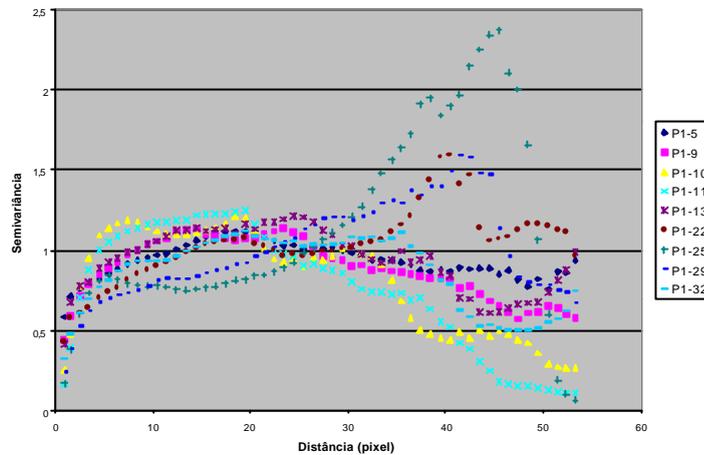


Figura 1 – Variograma adimensional da banda 1 (18/04/92) no entorno de algumas estações.

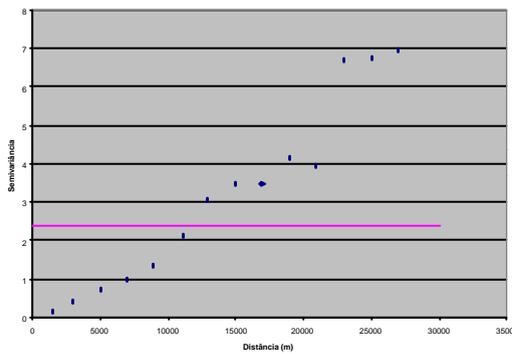


Figura 2 – Variograma empírico da salinidade (23/04/92 a 25/04/92).

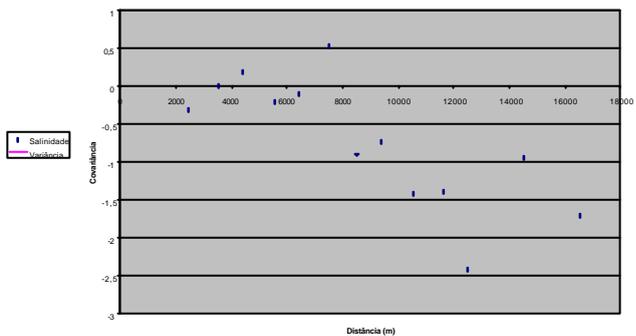


Figura 3 – Covariograma dos tons de cinza da banda 1 (18/04/92) com a salinidade (23/04/92 a 25/04/92).

Resultado do modelo de krigagem bayesiana para a imagem e dados de salinidade

O método de krigagem bayesiana requer a modelagem do variograma adimensional da imagem. Foi construído o variograma adimensional empírico obtido para a banda 1, calculado a partir das médias de tons de cinza de blocos (40 píxeis x 40 píxeis) espalhados no sistema estuarino da baía de Guanabara, revelando efetivamente a presença de uma estrutura de correlação espacial (Figura 4).

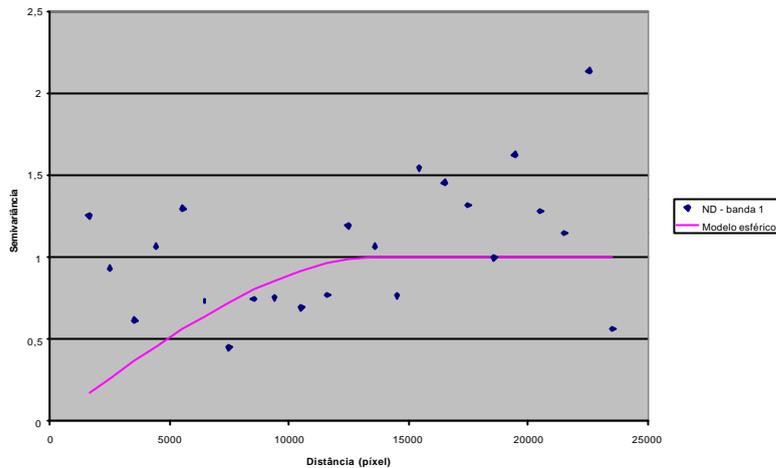


Figura 4 – Variograma adimensional empírico da banda 1 e o modelo ajustado (18/04/92).

O modelo trabalha com informações a priori. Os valores de salinidade e desvio padrão basearam-se na equação de regressão construída entre tons de cinza da banda 1 da imagem e valores de salinidade para 25 estações de calibração, ficando 13 estações para validação dentre os 38 postos de amostragem. As relações dos valores observados pelos postos com os valores da equação de regressão e a estimada pelo modelo de krigagem bayesiana estão demonstradas nos gráficos de dispersão para calibração (Figura 5) e validação (Figura 6). Percebe-se uma melhor performance do método de krigagem bayesiana em comparação com o modelo de regressão estatística.

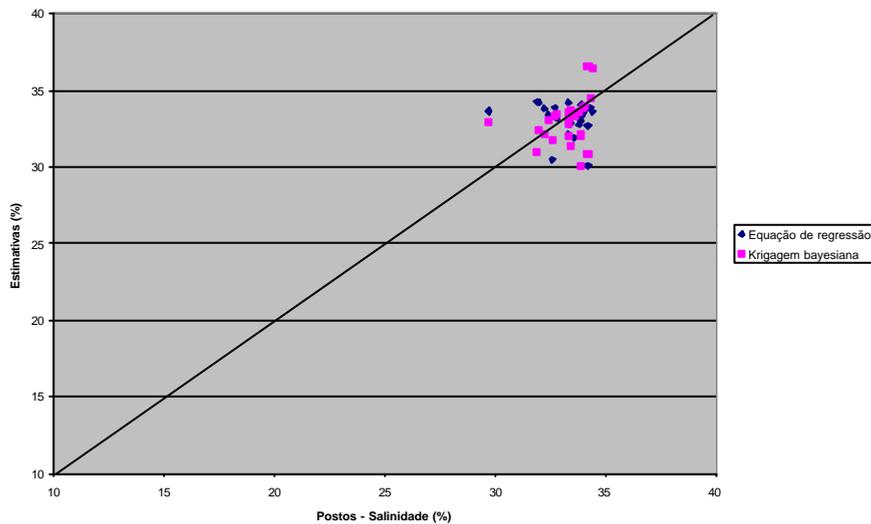


Figura 5 - Estimativas da salinidade para 25 postos pela equação de regressão e krigagem bayesiana - calibração

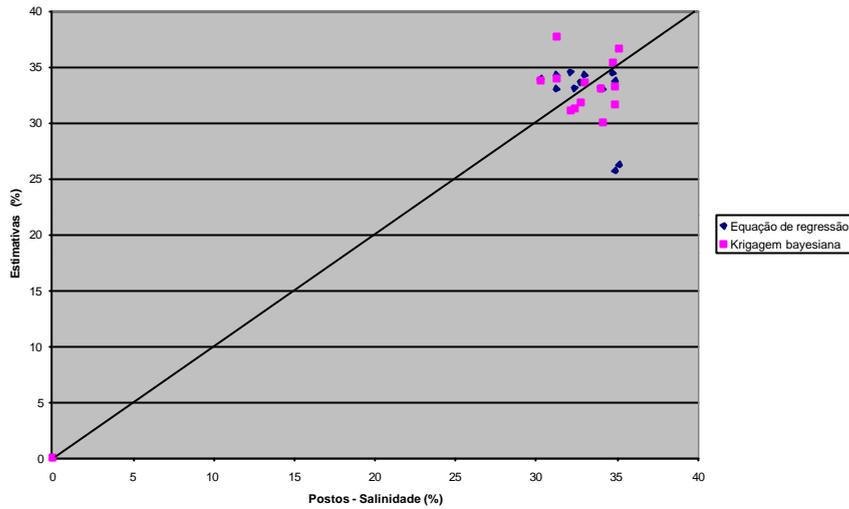


Figura 6 – Estimativas da salinidade para os 13 postos pela equação de regressão e krigagem bayesiana – validação.

Os mapas espaciais de salinidade foram, então, obtidos a partir da equação de regressão (Figura 7) e a partir do modelo de krigagem bayesiana (Figura 8). É importante ressaltar que o modelo de krigagem bayesiana fornece também a variância dos erros de estimativa para cada nó da malha (Figura 9).

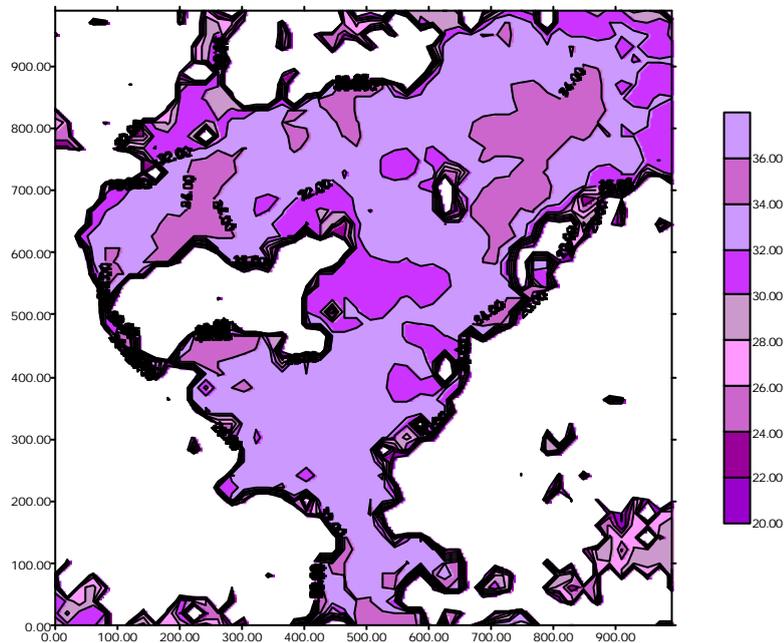


Figura 7 – Distribuição espacial de salinidade para os 25 postos pela equação de regressão

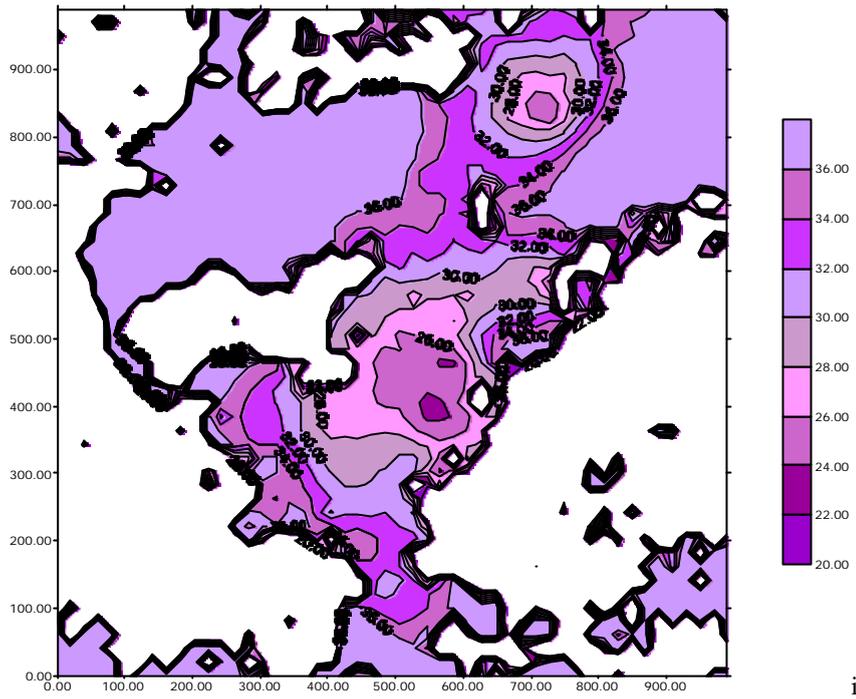


Figura 8 - Distribuição espacial de salinidade para os 25 postos pela krigagem bayesiana (18/04/92).

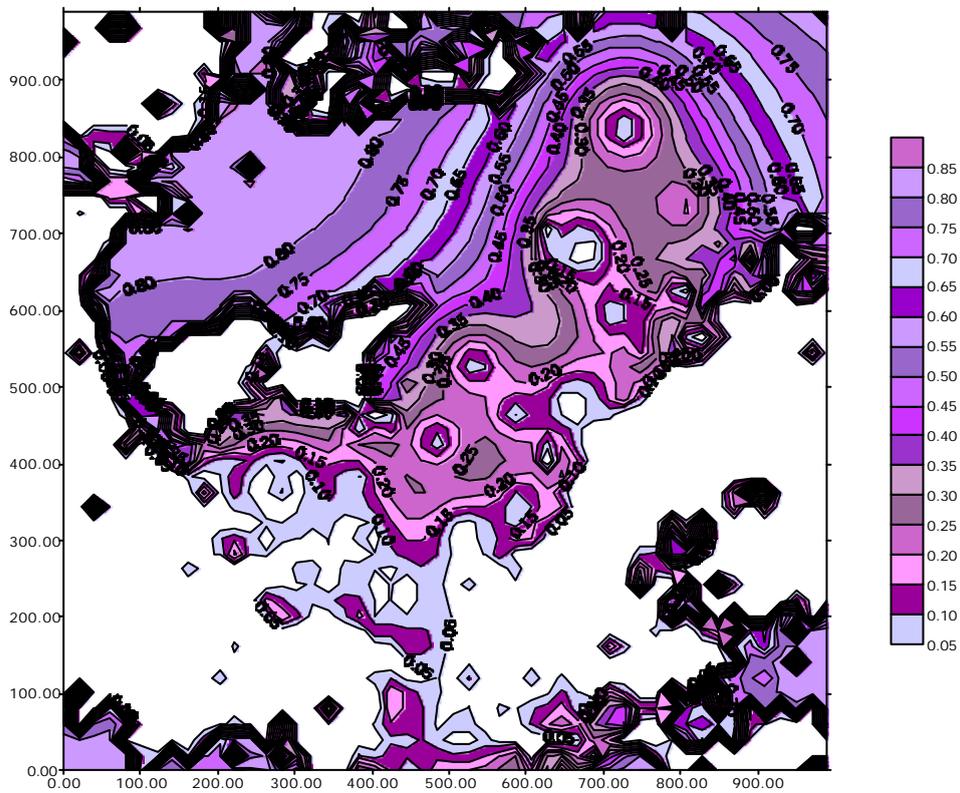


Figura 6.55 - Distribuição espacial da variância estimada de salinidade para os 25 postos pela krigagem bayesiana (18/04/92).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste artigo constituiu-se na análise da variabilidade espacial de salinidade da baía de Guanabara. No sentido de melhor compreender a variabilidade espacial desse parâmetro, conduziu-se uma análise que envolveu os dados observados de salinidade disponíveis (23/04/92 a 25/04/92) e imagem Landsat5-TM adquirida no dia 18/05/92.

Foram investigadas as estruturas de correlação espacial desses dados através de uma metodologia de análise geoestatística, incluindo um modelo de krigagem bayesiana. Os resultados indicaram, através da construção de semivariogramas e covariogramas, a presença de estruturas de correlação espacial tanto nos dados da imagem analisada quanto nos dados coletados em campo.

Finalmente, os resultados apontam a possibilidade de integração entre dados pontuais observados em estações de coleta com informações de natureza espacial fornecidas por imagem de satélite através de um referencial geoestatístico.

AGRADECIMENTO

- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)
- À Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente (FEEMA)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JICA, JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (1994) The study on recuperation of the Guanabara bay ecosystem. Tokyo: Kokusai Kogyo _ Volume 1: Sumary, Volume 2: Main Report, Volume 3: Supporting Report I, Volume 4: Suporting Report II.
- JOURNEL, A.G. AND HUIJBREGTS, CH. J. (1978), Mining Geostatistics, London, Academic Press Inc.
- MAYR, M. L (1998), Avaliação ambiental da baía de Guanabara, Tese de doutorado, COPPE/UFRJ.
- NOVO, E. M. L. M (1988), Sensoriamento remoto princípios e aplicações, São Paulo, S.P., Brasil, Ed. Edgard Blücher LTDA.
- OMRE, H. (1987), "Bayesian kriging - merging observations and qualified guesses in kriging", In: Mathematical Geology, 19, n. 1, pp. 25-39.