

APLICAÇÕES DE MÉTODOS NUMÉRICOS EM SIMULAÇÕES DA DISPERSÃO DE SUBSTÂNCIAS NA SUPERFÍCIE DO OCEANO

Joseph Harari

Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Oceanografia – IOUSP
joharari@usp.br

Joselene Marques

Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Oceanografia – IOUSP
josemar@io.usp.br

Edvard Luiz da Silva Filho

Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Oceanografia – IOUSP
edvardluiz@io.usp.br

Resumo. Métodos numéricos têm sido usados para análise de processos e visualização de dados em diversas áreas científicas. Na Oceanografia Física, os modelos permitem analisar, simular e até mesmo prever processos como os sistemas de correntes, gerados por ventos de superfície; a circulação de maré, efeitos da transferência de calor na circulação do oceano profundo e a dispersão de óleos e poluentes em áreas costeiras. O exemplo apresentado neste trabalho envolve uma situação hipotética de derramamento de petróleo na superfície do mar. A equação analítica usada é a da advecção – difusão, representando o transporte do poluente pelas correntes e o espalhamento dos mesmos, devido a turbulência oceânica. A equação pode ser resolvida através de um esquema explícito, avançado no tempo e centrado no espaço. Mapas com resultados do modelo foram obtidos a cada hora de simulação. Os resultados demonstram a extensão da área afetada pelo vazamento e a evolução da distribuição das concentrações do poluente no decorrer do tempo. Várias opções de soluções numéricas podem ser consideradas para o problema apresentado, como por exemplo esquemas implícitos ou semi-implícitos. A escolha de um determinado esquema depende da disponibilidade de recursos computacionais e da precisão desejada na solução numérica. Como conclusão final, simulações numéricas são cada vez mais úteis nos mais variados campos da ciência, permitindo a obtenção de soluções de boa precisão e confiabilidade.

Palavras chave: Modelagem numérica; simulações numéricas em Oceanografia Física; métodos de diferenças finitas; dispersão de poluentes no mar; visualização de saídas de modelos.

Abstract. Numerical methods have been frequently used for processes analyzing and data visualization in several scientific subjects. In Physical Oceanography, the models allow to analyze, simulate and even predict processes such as current systems generated by surface winds, the tidal circulation, effects of heat transfer in the deep sea circulation and the dispersion of oils and pollutants in coastal areas. The example shown in this paper refers to a hypothetical oil spill at the sea surface. The analytical equation of advection – diffusion represents the pollutant transport by the currents and the spreading due to the oceanic turbulence. The equation may be solved through an explicit scheme, advanced in time and centered in space. Maps with model results were obtained for each hour of simulation. The results indicate the extension of the area affected by the spill and the evolution of the distribution of pollutant concentrations in time. Several options of numerical solutions may be considered for the problem, such as implicit or semi-implicit schemes. The choice of a particular scheme depends on the available computational resources and the required precision of the numerical solution. As final conclusion, numerical solutions are more and more useful in many scientific fields, allowing the attainment of solutions with good precision and reliability.

Key words: Numerical modeling; numerical simulations in Physical Oceanography; finite difference methods; dispersion of pollutants in the sea; visualization of models outputs.

1. INTRODUÇÃO

Métodos numéricos têm sido usados para análise de processos e visualização de dados em diversas áreas científicas. Na Oceanografia, mais especificamente na Oceanografia Física, esses métodos são muito utilizados na "Modelagem Numérica" de processos hidrodinâmicos, termodinâmicos e de dispersão, para áreas costeiras e do oceano profundo. Os modelos permitem analisar, simular e até mesmo prever processos como os sistemas de correntes gerados por ventos de superfície, a circulação de maré, efeitos da transferência de calor na circulação do oceano profundo e a dispersão de óleos e poluentes em áreas costeiras [1], [2].

Uma boa parte dos trabalhos de Modelagem Numérica é desenvolvida num ambiente computacional com a linguagem MATLAB. Este ambiente é extremamente prático e flexível, permitindo saídas gráficas dos modelos com grande rapidez e eficiência. Permite gráficos uni, bi e tri dimensionais, com dependência no tempo ou não, cuja análise indica se as simulações apresentam qualidade satisfatória ou não.

Atualmente, um dos grandes problemas enfrentados pela ciência oceanográfica envolve a dispersão de substâncias e poluentes na superfície do mar.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

onde c representa a concentração do poluente na superfície do mar, (x, y) é o sistema de coordenadas na superfície (em geral para leste e para norte, respectivamente), t é o tempo, (u, v) são as componentes de correntes segundo os eixos (x, y) e D é o coeficiente de difusão do poluente no oceano. Evidentemente, esta equação deve ser resolvida a partir da imposição de determinadas condições iniciais e de contorno.

A solução numérica envolve a discretização do espaço e do tempo e a substituição das derivadas por

Esses poluentes podem ser despejados no meio marítimo por emissários de esgotos ou acidentes em operações de extração e transporte de óleos e petróleo. Para ajudar na solução desses problemas são desenvolvidos modelos numéricos que permitem realizar simulações ou mesmo previsões da advecção e difusão de tais substâncias no oceano, possibilitando reduzir os impactos, e até mesmo prevenir problemas ambientais [3].

O exemplo apresentado neste trabalho envolve uma situação hipotética de derramamento de petróleo na superfície do mar a uma taxa constante e a reprodução do comportamento à área atingida pelo espalhamento da mancha de poluente. Por ser uma substância que flutua na superfície da água, uma solução bi-dimensional é suficiente.

2. METODOLOGIA

A equação analítica usada é a da advecção – difusão, representando o transporte do poluente pelas correntes e o espalhamento do mesmo, devido a turbulência oceânica:

diferenças finitas [4]. Esta discretização considera a substituição do espaço contínuo (x, y) e do tempo contínuo t por pontos equidistantes de espaçamento h e passos de tempo T , na forma

$$\begin{aligned} x &= j h, \quad j = 1, 2, \dots \\ y &= k h, \quad k = 1, 2, \dots \\ t &= m T, \quad m = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

onde (j, k) são os índices de cada ponto de grade e m é o índice de cada nível de tempo. O gradeamento de uma área marítima pode ser visualizado na Figura 1.

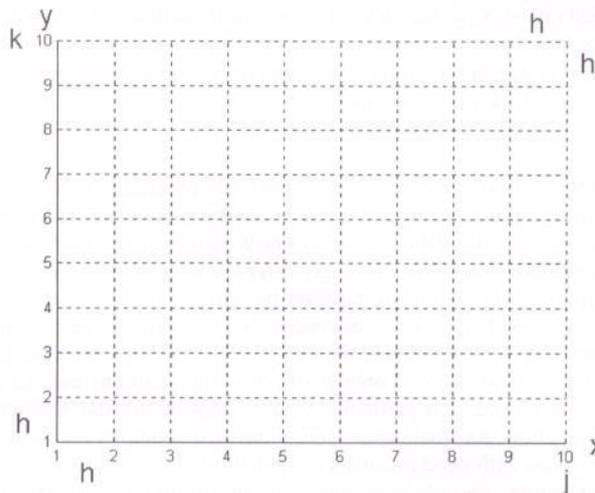


Figura 1 – Gradeamento bi-dimensional de uma área, com índices (j, k) segundo os eixos (x, y) e espaçamentos h entre pontos consecutivos ao longo dos eixos.

Na modelagem numérica, as derivadas das equações analíticas podem ser substituídas por diferenças finitas avançadas, retardadas ou centradas, como na correspondente seqüência abaixo:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_{j+1} - c_j}{h}$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_j - c_{j-1}}{h} \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_{j+1} - c_{j-1}}{2h}$$

As opções de níveis de tempo nas diferenças finitas no espaço possibilitam o uso de esquemas numéricos explícitos, implícitos ou semi-implícitos, como nos respectivos exemplos (com diferenças avançadas no espaço e no tempo):

$$\begin{aligned} \frac{c_{j,k}^{m+1} - c_{j,k}^m}{T} + u \frac{c_{j+1,k}^m - c_{j-1,k}^m}{2h} + v \frac{c_{j,k+1}^m - c_{j,k-1}^m}{2h} = \\ \frac{D}{h^2} (c_{j+1,k}^m + c_{j-1,k}^m + c_{j,k+1}^m + c_{j,k-1}^m - 4c_{j,k}^m) \end{aligned} \quad (5)$$

A expressão (5) permite, portanto renovar no tempo a variável c através de uma simples fórmula de recorrência, o que permite evoluir no tempo o campo de concentrações (em toda a grade).

Na implementação da solução numérica, inicialmente a área "vulnerável" ao vazamento é delimitada e recoberta por uma grade computacional de pontos equidistantes (como na Figura 1). No caso em questão, foi escolhida uma grade regular, com 33 colunas e 11 linhas, e espaçamento $h = 1$ Km, onde o vazamento ocorre na posição de coluna, linha = (8, 6); o passo de tempo T é de 1 hora, sendo que a taxa de vazamento é de 180 unidades de concentração da substância por hora. Foi considerada uma velocidade somente na direção x , com $u = 0.54$ Km/h e, portanto $v = 0.0$; finalmente, foi adotado um coeficiente de difusão $D = 3.6 * 10^{-5}$ Km²/h. Tanto as componentes de velocidade como o coeficiente de difusão foram mantidos uniformes na grade e constantes no tempo.

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = -u \frac{c_{j+1}^m - c_j^m}{h}$$

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = -u \frac{c_{j+1}^{m+1} - c_j^{m+1}}{h} \quad (4)$$

$$\frac{c_j^{m+1} - c_j^m}{T} = -u \frac{c_{j+1}^m - c_j^m}{2h} - u \frac{c_{j+1}^{m+1} - c_j^{m+1}}{2h}$$

Os esquemas explícitos são mais fáceis de implementar, mas são condicionalmente estáveis (estabilidade depende, basicamente, da escolha dos incrementos h e T); já os esquemas implícitos e semi-implícitos são mais difíceis de implementar, mas são incondicionalmente estáveis (para quaisquer valores de incrementos).

A equação que representa a advecção e difusão de substâncias no oceano (1) pode ser resolvida através de um esquema explícito, avançado no tempo e centrado no espaço, representado como:

3. RESULTADOS

Mapas com resultados do modelo foram obtidos a cada hora de simulação, através de programa de computador escrito em MATLAB, indicando os efeitos de transporte da substância pelas correntes (advecção) e espalhamento pela turbulência oceânica (difusão). Exemplos desses resultados são apresentados na Figura 2, para os instantes $t = 12, 24, 36$ e 48 horas de simulação.

Adveccao e Difusao 2D de vazamento continuo - concentracoes em t = 12 horas

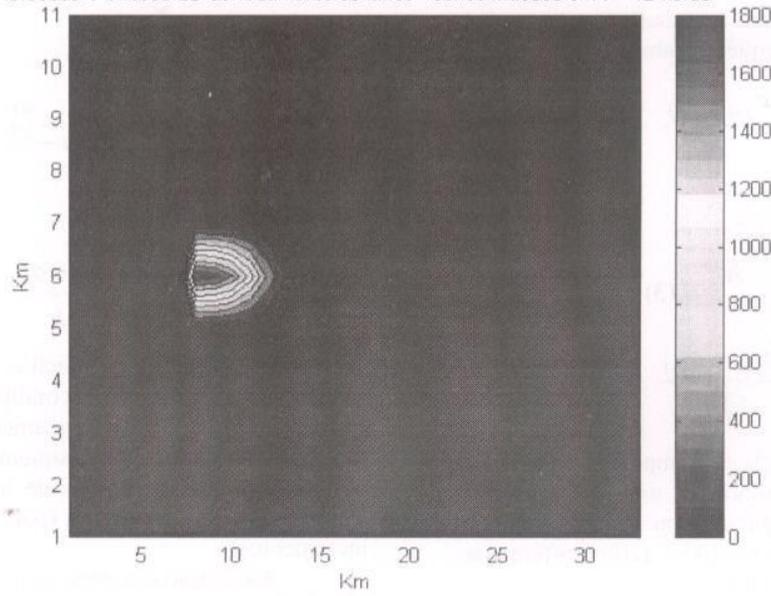


Fig. 2 a.

Adveccao e Difusao 2D de vazamento continuo - concentracoes em t = 24 horas

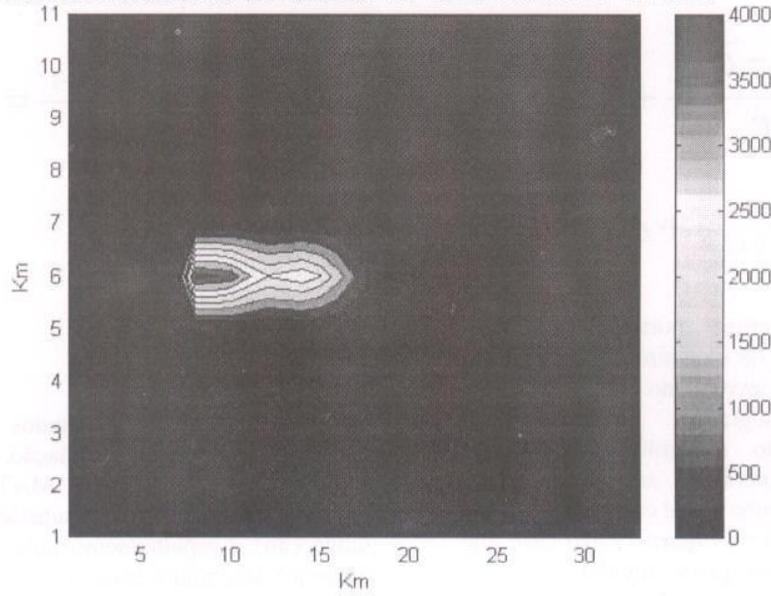


Fig. 2 b.

Adveccao e Difusao 2D de vazamento continuo - concentracoes em t = 36 horas

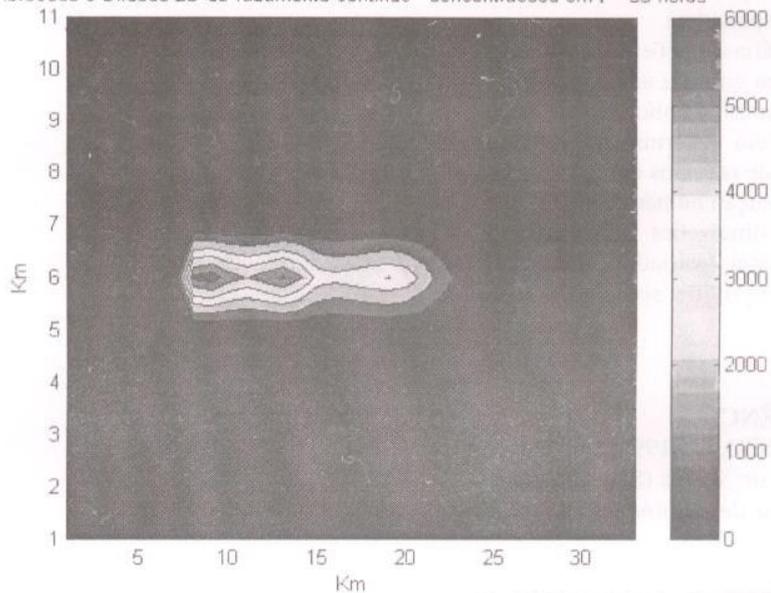


Fig. 2 c.

Adveccao e Difusao 2D de vazamento continuo - concentracoes em t = 48 horas

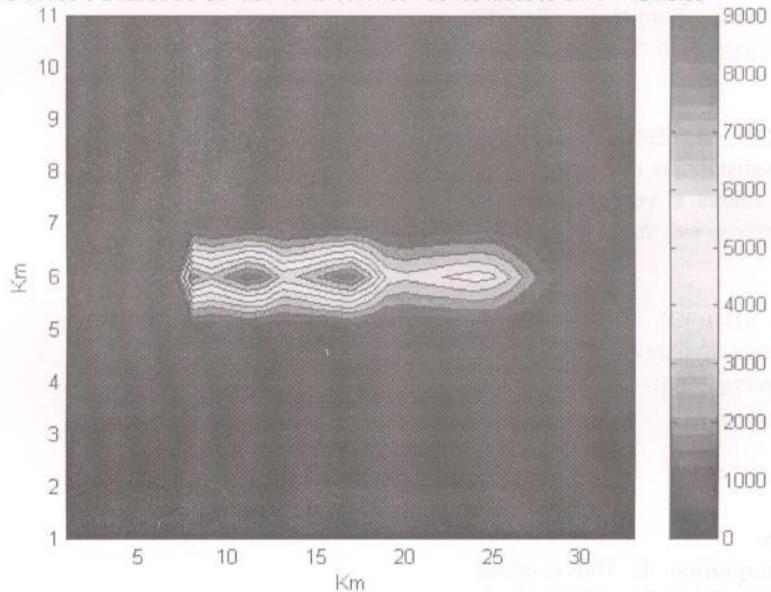


Fig. 2 d.

Fig. 2 – Mapas da concentração de uma substância gerados pelo modelo de advecção – difusão, para os instantes $t = 12$ h (a), 24 h (b), 36 h (c) e 48 h (d) de simulação.

4. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os resultados do modelo demonstram a extensão da área afetada pelo vazamento e a distribuição das concentrações do poluente no decorrer do tempo. Num caso real, a aplicação de um modelo “em tempo real” possibilita a tomada de medidas

mitigadoras dos danos ambientais que podem ser causados por um vazamento ou acidente no mar.

No caso em questão foi considerada uma situação simplificada, com valores de u , v e D uniformes e constantes – mas, o modelo pode considerar velocidade e difusão variáveis no espaço e no tempo. Evidentemente, a modelagem implementada pode ser usada com espaçamentos de grade e passo de tempo bem menores, levando a um nível de precisão

maior (desde que as condições de estabilidade do esquema numérico sejam respeitadas).

Certamente, há várias opções de soluções numéricas para um problema como o acima abordado, como por exemplo esquemas implícitos ou semi-implícitos. A escolha de um determinado esquema depende da disponibilidade de recursos computacionais e da precisão desejada na solução numérica.

Como conclusão, simulações numéricas são cada vez mais úteis nos mais variados campos da ciência, permitindo a obtenção de soluções de boa precisão e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

- [1] HARARI, J. & CAMARGO, R. (1998) Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré - *Revista Brasileira de Oceanografia*, vol 46 (2), pp 135-156.
- [2] HARARI, J. & CAMARGO, R. & CACCIARI, P. L. (2000) Resultados da modelagem numérica hidrodinâmica em simulações tridimensionais das correntes de maré na Baixada Santista - *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 5, nº 2, p. 71 - 87.
- [3] HARARI, J. & GORDON, M. (2001) Simulações numéricas da dispersão de substâncias no Porto e Baía de Santos, sob a ação de marés e ventos - *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 6, nº 4, p. 115 - 131.
- [4] KOWALICK, Z. & MURTY, T. S. (1993) Numerical modeling of ocean dynamics - *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 5. Singapore, World Scientific.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).