

Resultados de modelagem numérica hidrodinâmica no complexo estuarino de Paranaguá (PR)

Ricardo de Camargo¹ & Joseph Harari²

1 Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

2 Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

ricamarg@model.iag.usp.br & joharari@usp.br

Resumo ? A circulação marítima no complexo estuarino de Paranaguá (PR) foi estudada através de modelagem numérica tri-dimensional, com uma grade regular de 70 x 90 pontos e 11 níveis sigma na vertical. Foram consideradas forçantes de maré e meteorológicas, isoladamente ou combinadas. Resultados do modelo referentes a simulações em períodos de 29 dias foram analisados, através de mapas instantâneos e análises de maré, com grande intensificação nos canais interiores, e determinam características da propagação das ondas de maré na área de interesse.

Palavras-chave ? Modelagem numérica hidrodinâmica, circulação de maré, correntes geradas pelo vento, mapas cotidais, Baía de Paranaguá (PR).

I. INTRODUÇÃO

O complexo estuarino de Paranaguá, localizado em 25°30'S 048°30'W (Fig 1), possui dois portos e um terminal de óleo associados a intensa atividade econômica, bem como um rico ecossistema manguezal e várias pequenas comunidades. O estuário é parcialmente misturado e lateralmente homogêneo, com superfície líquida de 443km² e área de drenagem com mais de 3000km²; sua profundidade média é de 3 metros, mas os canais de navegação atingem 12 a 15 m, mantidos através de dragagens periódicas. O range da maré astronômica é de cerca 1.7m in na boca, mas atinge 2.7 m nas áreas mais interiores, correspondendo a um prisma de maré de 1.3km³; a taxa de precipitação na área tem valor médio anual de 1988mm/ano, com estações secas e úmidas distintas, de Janeiro a Março e de Junho a Agosto, respectivamente. A descarga de água doce na parte oeste do estuário varia entre 70 e 200m³/s (havendo poucas medidas em outras áreas). Finalmente, os ventos são controlados principalmente pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (com ventos de ENE e E) e pela passagem de sistemas sinóticos e sub-sinóticos (com ventos de ESE e SE); a intensidade média dos ventos é de 4 m/s (Camargo & Marone, 1995) e as células de brisa possuem amplitude de cerca 2 m/s, de Novembro a Março (Camargo, Marone & Silva Dias, 1996).

O presente trabalho contém resultados de estudos recentes sobre a circulação marítima na baía (Camargo, 1998), considerando efeitos de maré e meteorológicos, obtidos com a utilização de modelagem numérica

hidrodinâmica tri-dimensional (Blumberg & Mellor, 1983, 1987).

II. METODOLOGIA

Foi empregada a versão POM96 do modelo numérico de circulação oceânica descrito em Blumberg & Mellor (1983, 1987); é um modelo tri-dimensional que utiliza coordenada vertical sigma, separação dos modos e fechamento turbulento de segunda ordem; detalhes do modelo se encontram em Galperin & Mellor (1990a, b).

A grade básica do modelo possui 70 x 90 pontos, resolução horizontal constante de 926 m, orientação dos eixos ao longo e perpendicular à costa, distribuições termo-halinas constantes e 11 níveis sigma na vertical, posicionados nas frações da profundidade local de 0, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 0.875, 0.9375, 0.96875 e 1.0. O modo externo possui passo de tempo de 15 s e os internos de 300 s.

As oscilações de maré na borda foram especificadas a partir do modelo de plataforma de Harari & Camargo (1994), para as componentes de maré Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2 e M3 (e considerando interpolações lineares para as bordas do domínio da Baía de Paranaguá); além dessas componentes, foram também incluídas MN4, M4 e MS4, de grande importância nessa área costeira, e cujos valores de amplitude e fase foram estimados a partir de medições de maré no estuário e na plataforma adjacente. Seguindo O'Connor (1991), as informações de maré foram especificadas nos contornos externos e também nos imediatamente internos da grade; este procedimento é necessário tendo em vista a ausência de informações sobre os fluxos nos contornos da grade; ele é suficiente em simulações que consideram exclusivamente a forçante de maré; no caso da inclusão de efeitos meteorológicos, foi utilizada uma condição de relaxação parcial das elevações, como apresentado em Chapman (1985) e em Blumberg & Kantha (1985); nesta solução, o sinal de maré é sobreposto a um termo restaurador adicionado a condições radiacionais. Em relação a condições de contorno para as correntes verticalmente integradas (modo externo) foram consideradas condições puramente radiacionais, aplicadas somente às bordas mais externas; para os modos internos de velocidade, condições de não gradiente foram adotadas.

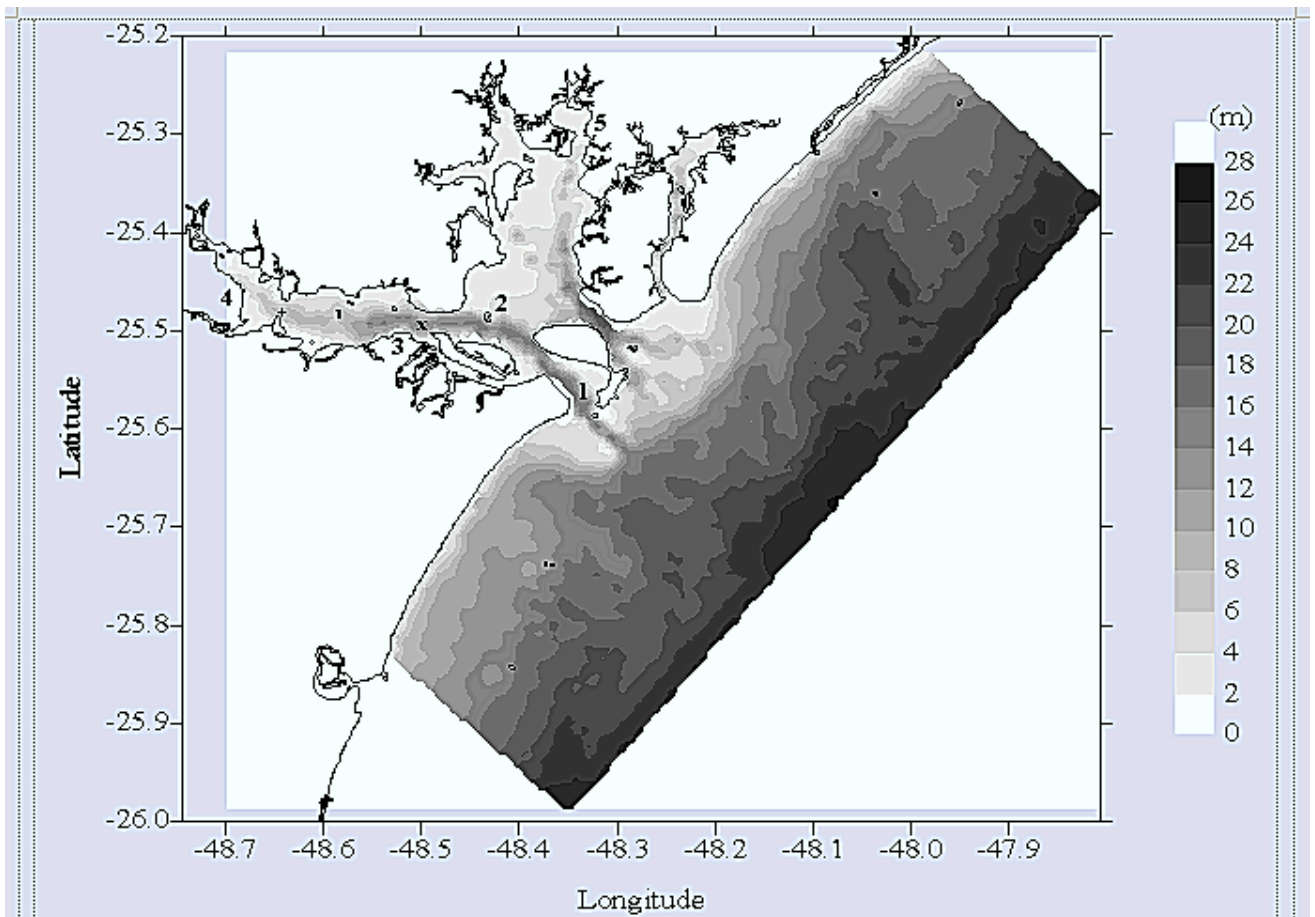


Fig. 1 – Mapa geográfico e batimetria da Baía de Paranaguá, com as posições: 1 Ponta do Caraguatá, 2 Ilha das Cobras, 3 Porto de Paranaguá, 4 Porto de Antonina, 5 Guaraqueçaba. Pontos marcados com '+' e 'x' representam M01 e M02 respectivamente, posições com fundeios de correntômetros.

III. RESULTADOS

O modelo foi processado por períodos de 31 dias, a partir do repouso, forçado por i) maré exclusivamente e ii) maré e vento conjuntamente; em todos os processamentos foi considerado um arquivamento horário de resultados. O período de tempo necessário para o modelo atingir equilíbrio hidrodinâmico foi de 30 horas, de modo que foram aproveitados para análise as 696 horas subsequentes de resultados (29 dias), com ênfase nas elevações da superfície e nas correntes de superfície. As séries temporais de resultados em cada ponto de grade obtidas com processamentos tipo (i) foram analisadas pelo método harmônico de análise de maré (Franco, 1988), para a obtenção das distribuições espaciais das características das ondas de maré na região de interesse. Os resultados dos processamentos tipo (ii) foram comparados com observações do nível do mar em várias estações costeiras e com medições de correntes em dois pontos no interior da baía (ver posições na Fig. 1). Subtrações de resultados de processamentos do tipo (i) e (ii) fornecem as circulações geradas por efeitos meteorológicos (exclusivamente).

A seguir são apresentados exemplos das saídas do modelo, na forma de mapas das correntes de superfície instantâneas, relativas ao efeito exclusivo da maré (Fig. 2) e ao efeito exclusivo do vento (Fig. 3). Estas figuras demonstram a grande variabilidade das correntes na área modelada e sua intensificação nas regiões dos canais interiores, com valores de intensidade ultrapassando 100 cm/s para situações típicas de maré de sizígia (Fig. 2), bem como valores superiores a 10 cm/s para o efeito exclusivo do vento local, o qual é importante tanto na região costeira adjacente quanto no interior do estuário (Fig. 3).

A Figura 4 apresenta séries temporais do nível do mar no Porto de Paranaguá, considerando observações e resultados do modelo (para maré e vento agindo conjuntamente). Pode-se observar a boa concordância do modelo com medições, indicando uma boa calibração das simulações. É importante ressaltar a limitação da modelagem na representação de variações de longo período do nível médio do mar, as quais são geradas pela atuação do vento (remoto) sobre a plataforma continental; esta limitação se deve à pequena escala espacial do domínio em questão. Em termos de nível médio, pode-se afirmar que o vento local é responsável por menos de 10% da variação total observada.

Resultados das análises harmônicas de maré das séries temporais de elevação e correntes na superfície se encontram na Figura 5, referentes a amplitudes e fases da componente M2 de elevação e a eixos de elipses das correspondentemente correntes de superfície. Os mapas cotidianos obtidos indicam as regiões de amplificação e atenuação das elevações de maré, bem como os fluxos associados.

Os resultados obtidos demonstram a confiabilidade no uso do modelo para previsões da circulação marítima, tanto na contribuição das marés como também nos efeitos

meteorológicos locais (desde que se tenha previsões atmosféricas de boa qualidade).

Futuras pesquisas deverão considerar a inclusão de distribuições de temperatura e salinidade como variáveis prognósticas do modelo, o aninhamento de grades de alta resolução para sub-áreas específicas e a utilização de resultados hidrodinâmicos em modelos de dispersão (aplicados a propriedades e substâncias, como por exemplo óleos poluentes).

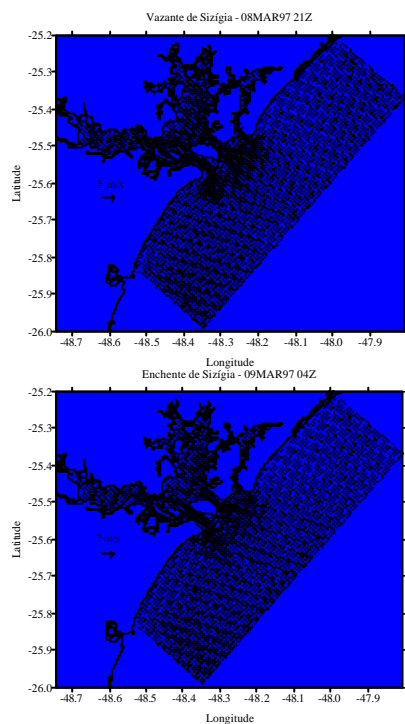


Fig. 2 – Configurações instantâneas em condições de maré de sizígia. Parte superior: correntes na superfície máximas durante a vazante. Parte inferior: correntes de superfície máximas durante a enchente.

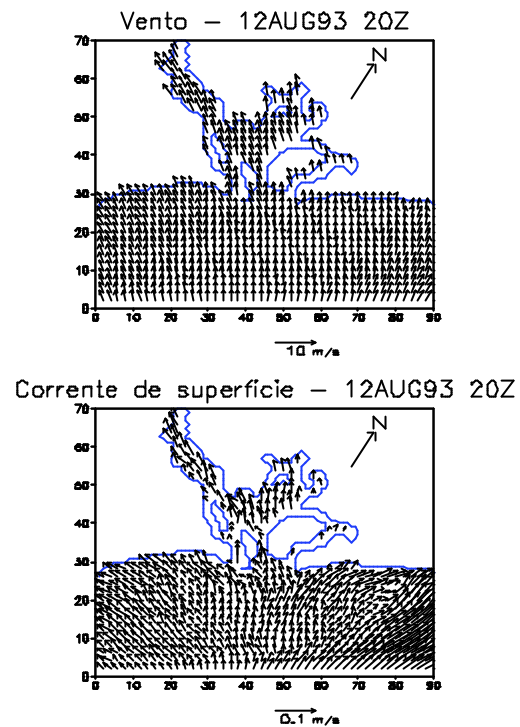


Fig. 3 – Configurações instantâneas do escoamento atmosférico e da correspondente corrente de superfície. Os vetores foram plotados a cada dois pontos de grade para não sobrecarregar a figura.

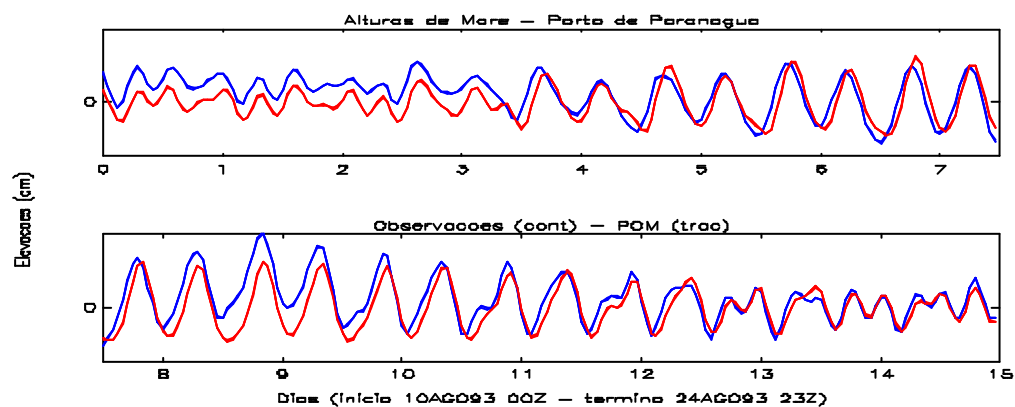


Fig. 4 – Comparação entre as séries temporais de alturas de maré observadas e calculadas pelo modelo, para o Porto de Paranaguá, no período de 10 a 24 de Agosto de 1993. A escala vertical varia entre - 140 cm e 190 cm, em torno do nível de referência local.

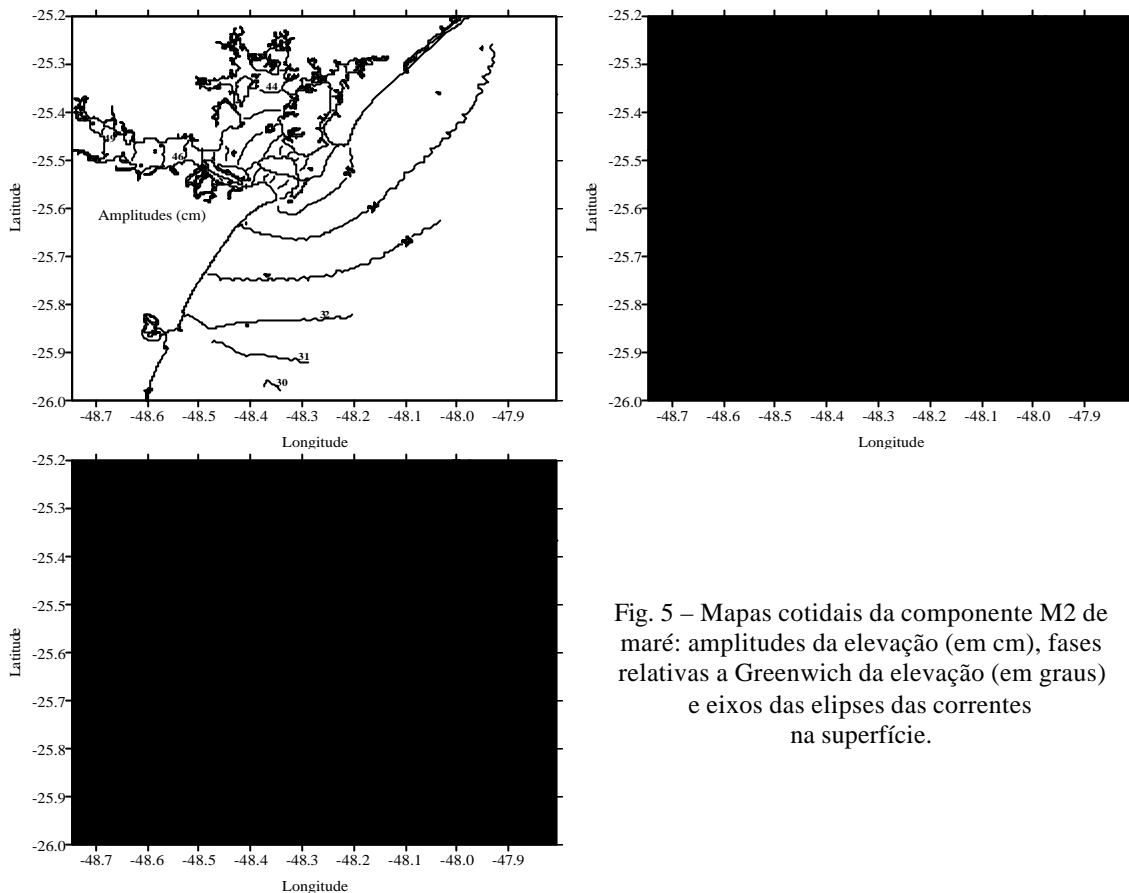


Fig. 5 – Mapas cotidianos da componente M2 de maré: amplitudes da elevação (em cm), fases relativas a Greenwich da elevação (em graus) e eixos das elipses das correntes na superfície.

REFERÊNCIAS

- BLUMBERG, A.F. & KANTHA, L.H., 1985 Open boundary conditions for circulation models. *J. Hydr. Engin.*, **111**(2), 237-255
- BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L. 1983. Diagnostic and prognostic numerical circulation studies of the South Atlantic Bight. *J. Geophys. Res.*, **88**, 4579-4582
- BLUMBERG, A.F. & MELLOR, G.L. 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, Vol. 4, American Geophysical Union, Washington D.C., 208p
- CAMARGO, R. 1998. Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá, Tese de Doutorado, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 181p.
- CAMARGO, R. & MARONE, E. 1995. Comportamento do vento de superfície em Pontal do Sul (PR, Brasil) - Análise preliminar. VI COLACMAR, Outubro de 1995, Mar del Plata, p.63
- CAMARGO, R., MARONE, E. & SILVA DIAS, P.L. 1996. Detecção do sinal de brisa no registro de vento de Pontal do Sul (PR). Anais do IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1036-1040
- CHAPMAN, D.C., 1985. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean model. *J.Phys.Oceanogr.*, **15**, 1060-1075
- FRANCO, A.S., 1988. *Tides: fundamentals, analysis and prediction*. 2ª ed., São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 232p
- GALPERIN, B. & MELLOR, G.L., 1990a. A Time-dependent, Three-dimensional Model of the Delaware Bay and River System. Part 1: Description of the Model and Tidal Analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **31**, 231-253
- GALPERIN, B. & MELLOR, G.L., 1990b. A Time-dependent, Three-dimensional Model of the Delaware Bay and River System. Part 2: Three-dimensional Flow Fields and Residual Circulation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **31**, 255-281
- HARARI, J. & CAMARGO, R. - 1994 - "Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico" - Boletim do Instituto Oceanográfico da USP, n° 42 (1), p. 35 - 54.
- O'CONNOR, W.P., 1991. A numerical model of tides and storm surges in the Rio de la Plata Estuary. *Continental Shelf Research*, **11**(12), 1491-1508.