

RESULTADOS DA MODELAGEM NUMÉRICA HIDRODINÂMICA EM SIMULAÇÕES TRIDIMENSIONAIS DAS CORRENTES DE MARÉ NA BAIXADA SANTISTA

Joseph Harari¹, Ricardo de Camargo² e Paulo Leão Cacciari¹

¹Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

²Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo

RESUMO

Resultados de simulações de maré para a Baixada Santista, através do Princeton Ocean Model (POM), com resolução horizontal igual a 1 km, são utilizados em quatro grades aninhadas, com resolução horizontal de 75 m, cobrindo 1) o Canal do Porto e as praias de Santos, 2) as Praias do Guarujá, 3) o acesso ao Porto de Santos e 4) a área costeira adjacente à Ilha da Moela. Os resultados gerados pelo modelo nas grades aninhadas foram comparados com previsões harmônicas de maré e observações do nível do mar. Mapas de correntes de maré em diversas profundidades foram produzidos, bem como perfis verticais das correntes em pontos de interesse; esses resultados demonstram características regionais dos fluxos de maré, especialmente o decaimento da intensidade das correntes de maré ao longo da vertical. O modelo implementado pode ser utilizado em previsões operacionais de marés e de correntes de maré, com diversas aplicações em engenharia. A metodologia de aninhamentos pode ser estendida a qualquer outra área de interesse na Baixada Santista pertencente à grade básica de 1 km. Futuramente, contribuições de efeitos meteorológicos e de densidade deverão ser incluídas em adição às marés, de modo a possibilitar simulações e previsões da circulação geral nessa região costeira.

INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de pesquisas sobre a hidrodinâmica da área costeira da Baixada Santista, Harari & Camargo (1998) implementaram o Princeton Ocean Model (POM), com uma grade regular de 120 x 80 células, de resolução horizontal igual a 1 km e 11 níveis sigma na vertical, cobrindo a área de 46° a 47° W e de 23° 40' a 24° 30' S. A região de estudo incluiu os municípios de Peruíbe, Itanhaém, Mongaguá, Praia Grande, São Vicente, Santos, Cubatão, Guarujá e Bertioga, estendendo-se desde a linha da costa até uma profundidade máxima de 53,5 m (Figura 1).

Com o modelo, foram realizados estudos sobre as marés na Baixada Santista, tendo sido obtidos mapas das linhas cotidais e dos parâmetros das elipses das principais componentes de maré e de correntes de maré na área costeira (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2 e M3). Essas componentes são responsáveis por mais de 90% da energia de maré na área modelada, conforme o estudo das séries temporais de observações do nível do mar de Santos, apresentado em Harari & Camargo (1995).

Visando um detalhamento maior dos sistemas de correntes nas regiões interiores rasas, os resultados de Harari & Camargo (1998) foram utilizados em aninhamentos cobrindo quatro sub-regiões de interesse; nessas sub-malhas, foram considerados espaçamentos horizontais de 75 m e mantidos os 11 níveis sigma na vertical (Harari, Camargo & Cacciari, 1999). No presente trabalho, são apresentados diversos resultados de interesse das sub-malhas, os quais demonstram o potencial de utilização da modelagem numérica hidrodinâmica em diversas aplicações de engenharia, como por exemplo no apoio ao tráfego marítimo no Canal do Porto de Santos, em subsídios a obras de construção civil, no monitoramento da poluição, no controle da erosão, na estimativa do transporte de sedimentos, etc.

A próxima etapa de utilização do modelo deverá contemplar a inclusão de forçantes meteorológicas e de densidade, de modo a representar a circulação total na Baixada Santista, aumentando dessa forma a utilidade e as aplicações dos resultados das simulações e previsões.

A metodologia de modelagem

O modelo numérico implementado é o Princeton Ocean Model (POM), desenvolvido por Blumberg & Mellor (1987) e apresentado em detalhes por Mellor (1998). É um modelo tridimensional, não linear, com as equações hidrodinâmicas completas escritas sob as aproximações de Boussinesq e hidrostática. O sistema de equações básicas é composto por: equação da continuidade (1), equações de conservação do momento (2, 3, 4), equações de conservação da temperatura potencial e da salinidade (5, 6), equação de estado da água do mar (7), equação da energia cinética turbulenta (8) e equação da turbulência em macro-escala (9).

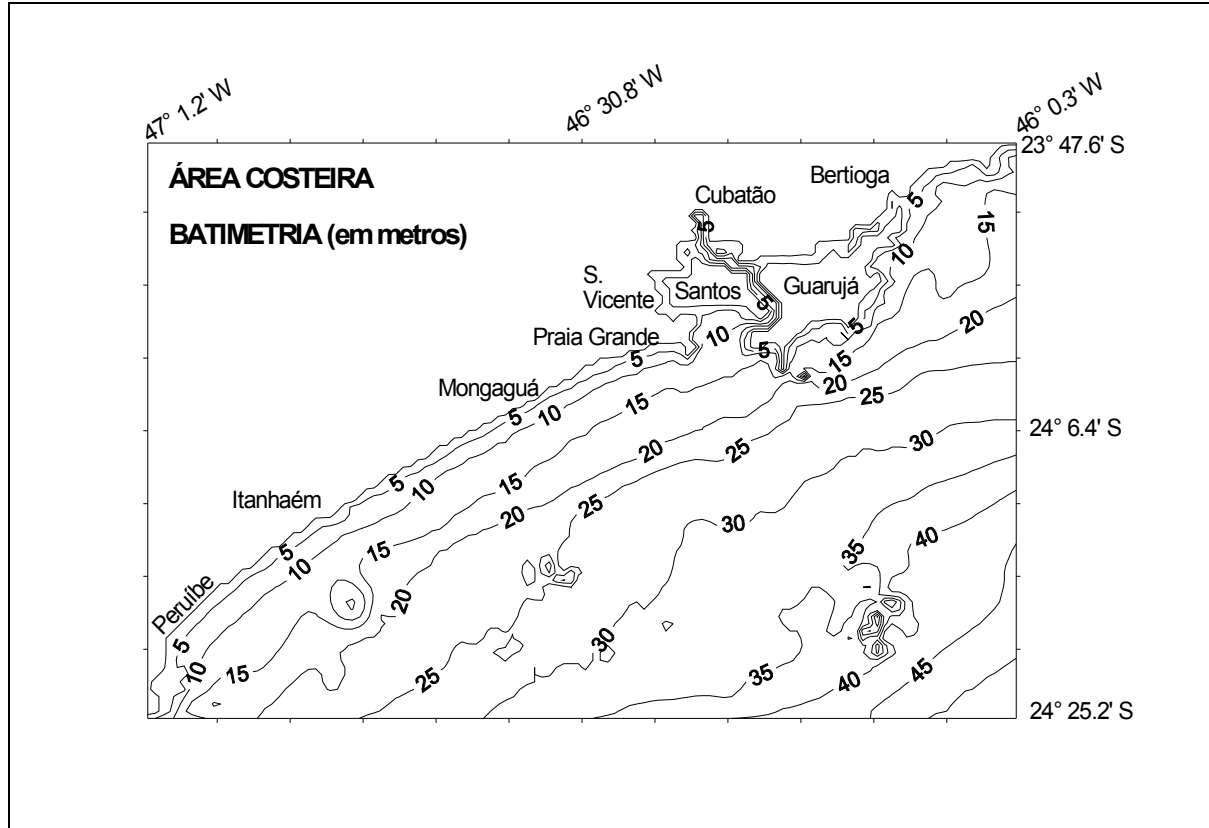


Figura 1. Mapa geográfico da área costeira da Baixada Santista.

Essas equações são apresentadas a seguir, com base na seguinte notação de variáveis: (x^*, y^*, z^*) é o sistema de coordenadas cartesianas; t é o tempo; U, V são as componentes horizontais da velocidade; W é a componente vertical da velocidade; g é a aceleração da gravidade; f é o parâmetro de Coriolis; p é a pressão; ρ_0 é a densidade do estado de referência; ρ é a densidade in situ; K_M é o coeficiente cinemático vertical de viscosidade turbulenta; K_H é o coeficiente cinemático vertical de difusão turbulenta de calor e sal; θ é a temperatura potencial; S é a salinidade; $(F_{x^*}, F_{y^*}, F_{\theta^*}, F_{S^*})$ são as parametrizações de fenômenos de subgrade; $q^2/2$ é a energia cinética turbulenta; l é a escala característica de comprimento para o movimento turbulento; \tilde{W} é a função proximidade do contorno; K_q é o coeficiente cinemático vertical de viscosidade para a energia cinética turbulenta; (B_1, E_1) são constantes empíricas; e F_{q^2, q^2_1} os termos horizontais de mistura para q^2 e q^2_1 .

$$\frac{\partial U}{\partial x^*} + \frac{\partial V}{\partial y^*} + \frac{\partial W}{\partial z^*} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x^*} + V \frac{\partial U}{\partial y^*} + W \frac{\partial U}{\partial z^*} - fV = \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x^*} + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_M \frac{\partial U}{\partial z^*} \right) + F_{x^*} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x^*} + V \frac{\partial V}{\partial y^*} + W \frac{\partial V}{\partial z^*} + fU = \\ = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y^*} + \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_M \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + F_{y^*} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z^*} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + U \frac{\partial \theta}{\partial x^*} + V \frac{\partial \theta}{\partial y^*} + W \frac{\partial \theta}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z^*} \right) + F_{\theta^*} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x^*} + V \frac{\partial S}{\partial y^*} + W \frac{\partial S}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z^*} \right) + F_S^* \quad (6)$$

$$\rho = \rho(S, \Theta, p) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q^2}{\partial t} + U \frac{\partial q^2}{\partial x^*} + V \frac{\partial q^2}{\partial y^*} + W \frac{\partial q^2}{\partial z^*} = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z^*} \right) + \\ + 2K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z^*} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z^*} - \frac{2q^3}{B_1 l} + F_{q^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (q^2 l) + U \frac{\partial}{\partial x^*} (q^2 l) + V \frac{\partial}{\partial y^*} (q^2 l) + W \frac{\partial}{\partial z^*} (q^2 l) = \\ = \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K_q \frac{\partial}{\partial z^*} (q^2 l) \right) + l E_1 K_M \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z^*} \right)^2 \right] + \\ + \frac{l E_1 g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho}{\partial z^*} - \frac{q^3}{B_1} \tilde{W} + F_{q^2 l} \end{aligned} \quad (9)$$

Os dois aspectos peculiares do POM são: 1) a solução na vertical é baseada em coordenadas sigma, que acompanham o relevo; e 2) se considera um fechamento turbulento de 2ª ordem, com a utilização dos resultados das equações para a energia cinética turbulenta (8) e para a escala do comprimento de turbulência (9) no cálculo dos coeficientes cinemáticos verticais de viscosidade e de difusão turbulenta de calor e sal, K_M e K_H (Mellor & Yamada, 1974, 1982). Esses cálculos são efetuados através de várias relações empíricas, que utilizam constantes definidas por experimentos de laboratório e observações de campo.

Dessa forma, no desenvolvimento matemático do modelo, nas nove equações básicas acima listadas, o sistema de coordenadas cartesianas (x^* , y^* , z^*) é substituído por coordenadas sigma (x , y , σ), através de relações que consideram a elevação da superfície livre η (x^* , y^* , t) e a profundidade local D (x^* , y^* , t):

$$x = x^*, y = y^*, \sigma = (z^* - \eta) / D \quad (10)$$

Note-se que a elevação da superfície é obtida a partir da integração vertical da equação da continuidade (1). A seguir, nas equações se tem a separação dos modos externo e internos, subtrain-

do as equações verticalmente integradas das equações tridimensionais completas.

De fato, as equações que descrevem a dinâmica da circulação contemplam movimentos rápidos devidos a ondas de gravidade externas e movimentos lentos causados por ondas de gravidade internas. Visando economizar tempo de computação, o POM separa as equações verticalmente integradas (modo externo) das equações que contêm a estrutura vertical (modos internos); isto permite calcular a elevação da superfície livre através do transporte de massa, separadamente dos cálculos tridimensionais de correntes e propriedades termodinâmicas; desta forma, existem dois intervalos de integração no modelo, um para o modo externo (DTE) e outro para os modos internos (DTI), sendo o segundo múltiplo do primeiro. O esquema de integração empregado considera a interação entre os modos através de um processo do tipo *feedback*. Nesse processo, os modos internos fornecem ao modo externo os valores das forçantes baroclínicas e dos termos advectivos, os quais permanecem constantes durante DTI; o modo externo, por sua vez, é integrado várias vezes a cada DTI e fornece o valor da elevação de superfície a ser utilizada no avanço do modo interno, onde se considera a média das elevações obtidas no intervalo DTI.

O POM utiliza uma grade horizontalmente alternada do tipo C de Arakawa (Mesinger & Arakawa, 1976). A integração numérica das equações é através do esquema *leapfrog*, no espaço horizontal e no tempo, e por esquema implícito, na vertical. O esquema *leapfrog* pode apresentar divergência das soluções obtidas em intervalos de tempo pares e ímpares; a remoção dessa eventual divergência se dá através da aplicação de um filtro no tempo (Asselin, 1972): sendo A uma variável genérica com nível de tempo n , o filtro possui parâmetro α e produz a variável filtrada A_f através da seguinte expressão:

$$A_f = A^n + \alpha (A^{n+1} - 2A^n + A^{n-1}) / 2 \quad (11)$$

Nas equações tridimensionais do movimento, a condição de não escorregamento no fundo é imposta a partir de um perfil logarítmico das velocidades na camada limite do fundo, onde se consideram os parâmetros de velocidade de cisalhamento (u^*) e de espessura da rugosidade. A velocidade de cisalhamento é calculada a partir das correntes determinadas pelo modelo no penúltimo nível sigma de profundidade.

Para os processamentos do modelo, a imposição de condições de contorno laterais foi realizada através da especificação das variações do

nível do mar nas bordas abertas e também nos pontos internos imediatamente vizinhos; essas elevações da superfície foram calculadas através de composições harmônicas, a partir de informações sobre as marés fornecidas pelo modelo de escala maior. Ao especificar apenas as elevações nos contornos abertos, as correntes calculadas pelo modelo nas primeiras linhas e colunas internas das grades aninhadas foram extendidas também para os contornos externos abertos (O'Connor, 1991). Esta solução para a implantação de condições de contorno é muito conveniente, por depender apenas de informações de nível do mar, e não depender de dados de correntes, cujos cálculos, em geral, apresentam severas limitações.

De fato, embora a técnica de aninhamentos seja muito utilizada na forma de velocidades calculadas por uma grade maior definindo condições de contorno para uma grade menor, a aplicação dessa solução numa área rasa, com geometria da linha da costa muito complexa, que afeta bastante os campos de correntes, não produz bons resultados. Além disso, o uso de uma relação de espaçamentos de grade muito grande (no caso, 1000/75) dificulta a interpolação de campos com grande variabilidade espacial (como as correntes), mas não afeta muito os de pequena variabilidade (como as elevações). Por essas razões, optou-se pelo uso das informações de elevação da superfície do mar, para a transferência de informações da grade maior para as menores.

Concluindo, com o desenvolvimento matemático (apresentado acima em suas linhas gerais), o POM permite determinar a evolução temporal dos campos de elevação da superfície do mar, temperatura, salinidade, densidade, correntes e transportes, a partir da especificação da batimetria, condições meteorológicas na superfície e condições oceanográficas nos contornos abertos.

Resultados obtidos com o modelo

No presente trabalho, são apresentados quatro aninhamentos na grade básica de Harari & Camargo (1998), nos quais foram utilizados espaçamentos horizontais de 75 m (Figura 2); informações sobre as quatro grades de alta resolução são fornecidas na Tabela 1.

Note-se que a Figura 2 representa apenas a região de interesse deste trabalho, com as quatro sub-malhas, o que constitui somente a parte estuarina da área costeira apresentada na Figura 1, que por sua vez corresponde à região coberta pela grade de 1 km.

A configuração das grade aninhadas adotadas obedeceu, basicamente, a dois critérios, o de interesse regional e o de capacidade computacional disponível. Ao iniciar as pesquisas, foram implementadas apenas as grades 1 e 2, em função

de sua proximidade da orla; posteriormente, foram agregadas as grades 3 e 4, tendo em vista o interesse no conhecimento da circulação nas áreas marítimas imediatamente adjacentes.

Na realidade, a metodologia de aninhamentos tem sido intensamente utilizada em modelagem numérica hidrodinâmica pela comunidade científica, permitindo o detalhamento de simulações em áreas específicas de interesse; exemplo do uso dessa técnica pode ser encontrado no próprio trabalho de Harari & Camargo (1998), cujas condições de contorno da grade de 1 km são fornecidas pelo modelo de plataforma de Harari & Camargo (1994), de resolução horizontal em torno de 13 km.

Em todos os processamentos efetuados, os campos de temperatura e de salinidade foram mantidos uniformes e as forçantes meteorológicas anuladas. Condições iniciais de repouso foram adotadas em todas as simulações.

Assim, nos processamentos realizados foram consideradas apenas forçantes de maré, embora tenha sido utilizada a formulação completa das equações do POM, com todos os termos presentes nas equações; a exclusão dos efeitos meteorológicos e de densidade foi obtida com a anulação dos campos de vento e com a adoção de campos de temperatura e de salinidade uniformes e invariantes no tempo (de modo a evitar gradientes de densidade). Dessa forma, foram levados em conta praticamente todos os efeitos que podem influenciar as marés, como por exemplo as difusões horizontal e vertical; no entanto, efeitos de magnitude menor, resultantes da interação entre as marés e as circulações geradas por efeitos meteorológicos e de densidade, não foram incluídos nos resultados obtidos.

Como informações complementares dos processamentos das grades aninhadas em relação aos da grade de Harari & Camargo (1998), se tem que:

- foram mantidos os 11 níveis sigma na vertical do modelo de 1 km: 0,000 (superfície); -0,03125; -0,0625; -0,125; -0,250; -0,500; -0,750; -0,875; -0,9375; -0,96875 e -1,000 (fundo);
- mas houve a necessidade de filtragens de alisamento dos valores de batimetria, de modo a evitar instabilidades nos resultados do modelo;
- foram também mantidos os valores dos coeficientes de fricção e de difusão, como apresentados em Harari & Camargo (1998);
- no entanto, foram modificados os seguintes parâmetros, da grade de 1 km para as de

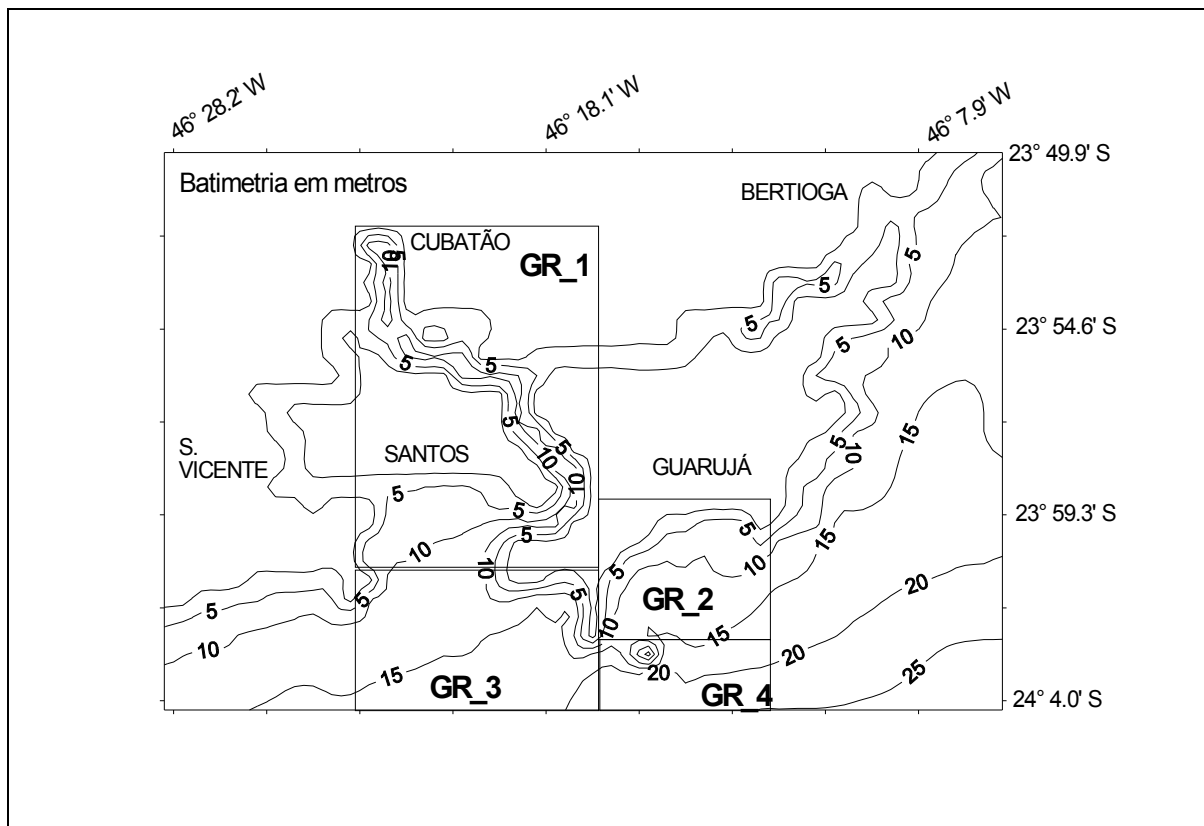


Figura 2. Limites das quatro grades aninhadas.

Tabela 1. Informações gerais sobre as quatro grades aninhadas.

Área	Limites em latitude e longitude	Número de pontos de grade, em EW e NS
1 Canal do Porto e praias de Santos	23°52' - 24°01' S 46°23' - 46°17' W	148 x 218
2 Praias do Guarujá	23°59' - 24°2,5' S 46°17' - 46°11,8' W	129 x 087
3 Área de acesso ao Porto de Santos	24°0,8' - 24°05' S 46°23' - 46°17' W	148 x 104
4 Área marítima contígua à Ilha da Moela	24°2,5' - 24°5' S 46°17' - 46°11,8' W	129 x 058

75 m: os passos de tempo dos modos externo e internos passaram de 300 s e 15 s para 30 s e 1,5 s; e o coeficiente do filtro de três pontos no tempo α passou de 0,1 para 1,0. Essas alterações são necessárias para a manutenção da estabilidade numérica das simulações de resolução maior.

Os modelos foram processados para o período referente ao mês de Fevereiro de 1997, quando observações de maré em vários pontos na

área de interesse eram disponíveis (Cacciari & Harari, 1996); as estações maregráficas consideradas são as seguintes (Figura 2a):

Alamoia em 23° 55,2'S 46° 22,6'W
Ilha Barnabé em 23° 55,5'S 46° 19,5'W
Conceição em 23° 57,5'S 46° 17,8'W

Na realidade, o instante inicial de processamento dos modelos foi a 00:00 GMT de 30 de Janeiro de 1997; no entanto, os resultados dos

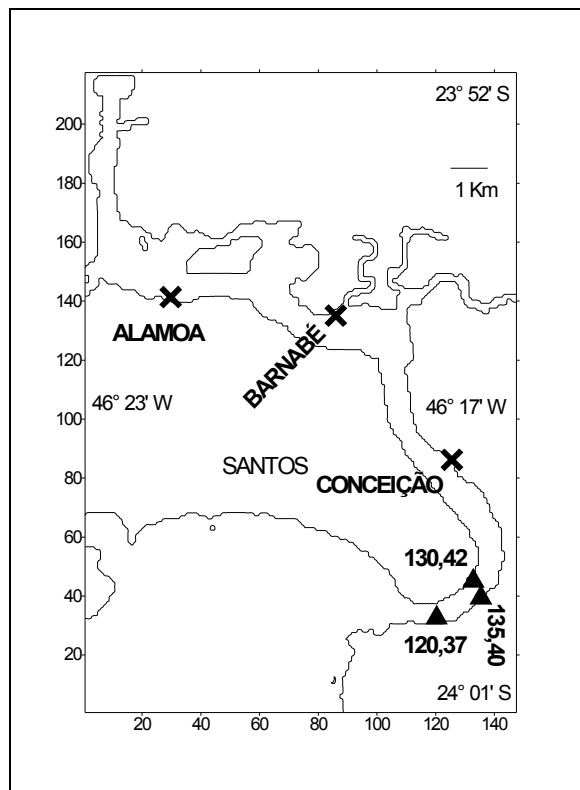


Figura 2a. Localização das estações maregráficas de Alamoia, Barnabé e Conceição e das células da malha com colunas / linhas 135 / 40, 120 / 37 e 130 / 42.

dois primeiros dias de processamento foram excluídos, em virtude de sua contaminação pelas condições iniciais de repouso; entretanto, ao final de quatro ciclos de maré semidiurna, esse efeito é totalmente desprezível.

A Figura 3 mostra as séries temporais de nível do mar nas estações acima citadas, para o mês completo de Fevereiro de 1997, considerando observações, previsões harmônicas e os resultados do modelo (da grade aninhada 1). Nesta grade, as estações citadas correspondem às células da malha com colunas / linhas 31 / 141 (para Alamoia), 87 / 134 (Barnabé) e 126 / 86 (Conceição). As previsões obtidas são baseadas nas análises de maré de registros horários dessas estações, efetuadas através do método harmônico (Franco, 1988; Franco & Harari, 1987).

A seguir é apresentada uma seleção de resultados do modelo, referentes a correntes em vários níveis, na maré de sizígia, a qual é caracterizada por valores de elevações e de correntes bem mais intensos que na fase de quadratura; esses resultados se encontram nas Figuras 4 (para

a grade aninhada 1), 5 (grade 2), 6 (grade 3) e 7 (grade 4). A seleção de resultados foi baseada na Tábua de Marés de Santos, cuja primeira sizígia de Fevereiro de 1997 é reproduzida na Tabela 2 (Harari & Mesquita, 1997). Os mapas de correntes são referentes às profundidades de 0 m (superfície), 6 e 12 m. Para a obtenção de valores de correntes em profundidades de interesse, os resultados do POM em coordenadas sigma foram re-calculados em níveis z^* , através de interpolações com polinômios de baixa ordem.

Portanto, com base nas previsões da Tábua de Marés, foram escolhidos os resultados nos seguintes instantes:

- 22:00 GMT de 07 / Fevereiro / 1997 para as correntes de maré vazantes; e
- 04:00 GMT de 08 / Fevereiro / 1997 para as correntes de maré enchentes.

Em virtude do seu grande número, nas Figuras 4 a 7 não foram plotados todos os vetores calculados, de modo a tornar mais claros os mapas (ver legendas). Entretanto, em algumas sub-áreas limitadas, há interesse em detalhes dos sistemas de correntes; como exemplo desses casos, se tem a Figura 8, referente à entrada do Canal do Porto, na qual foram plotados todos os vetores de correntes na superfície calculados.

Outra amostra de cálculos tridimensionais do modelo se encontra na Figura 9, com perfis verticais de correntes de maré na máxima vazante de sizígia, em três células no Canal do Porto de Santos, correspondentes às colunas / linhas 135 / 40, 120 / 37 e 130 / 42, na grade aninhada 1; ver a localização desses pontos na Figura 2a.

Finalmente, um exemplo do acoplamento dos resultados obtidos nas quatro sub-malhas é apresentado na Figura 10, referente a correntes de sizígia vazantes na superfície.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A Figura 3 mostra a boa correlação entre os resultados do modelo e as previsões harmônicas e observações das estações maregráficas. Deve-se notar que os resultados do modelo consideraram apenas as 9 principais componentes de maré, enquanto que as previsões harmônicas utilizaram por volta de 30 componentes (mais precisamente 31 para a previsão de Alamoia, 29 para Barnabé e 30 para Conceição). A Tabela 3 mostra os erros entre as séries temporais envolvidas (raízes quadradas dos erros quadráticos médios); note-se que as amplitudes de maré na Baixada Santista são da ordem de 90 cm e que a amplitude de variação do nível do mar, em Fevereiro de 1997, foi em torno de 130 cm.

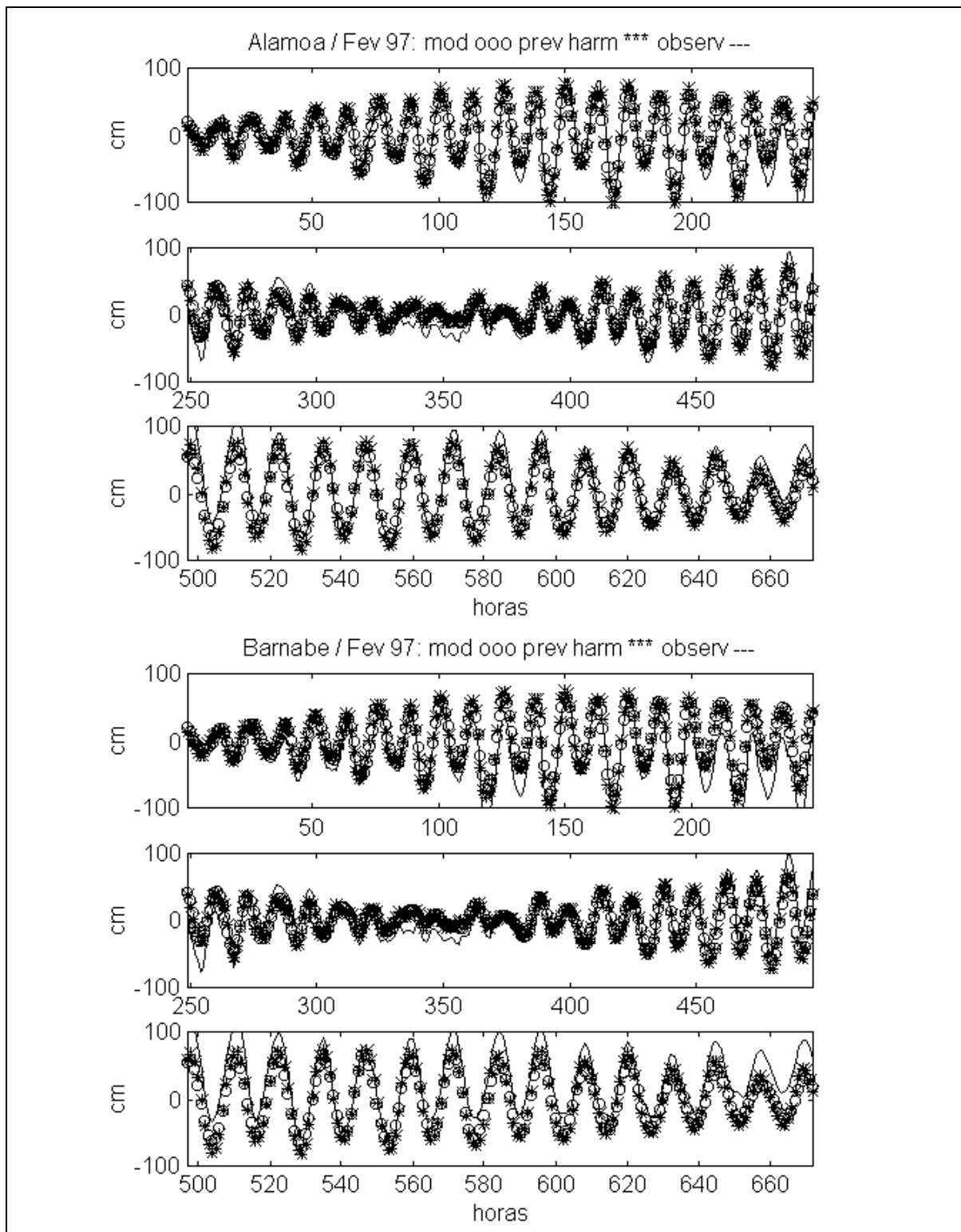


Figura 3a. Séries temporais de nível do mar referentes a resultados do modelo, previsões harmônicas e observações, em Alamoia e Barnabé, em fevereiro de 1997.

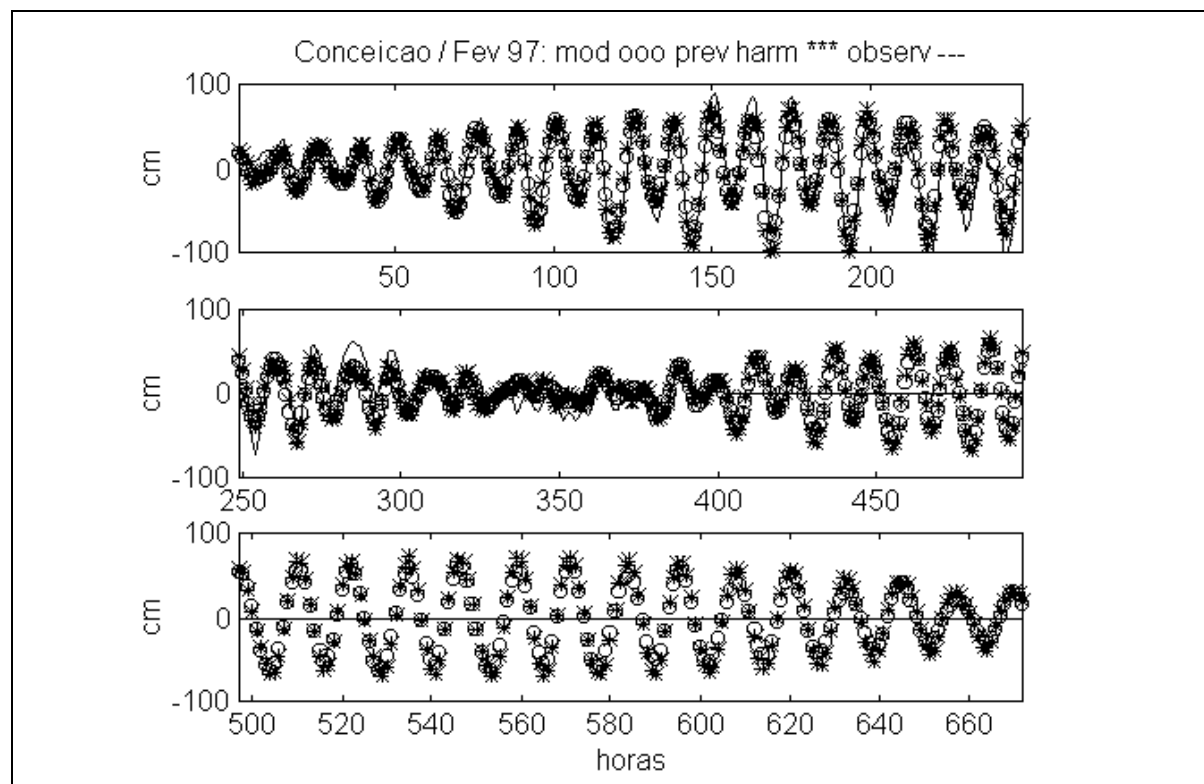


Figura 3b. Séries temporais de nível do mar referentes a resultados do modelo, previsões harmônicas e observações, em Conceição, em fevereiro de 1997.

Tabela 2. Tábua das Marés de Santos, para Fevereiro de 1997 (Harari & Mesquita, 1997).

Dia	Hora (GMT)	Nível do mar (m)
07	06:30	1,5
	12:26	0,3
	18:51	1,4
08	00:08	-0,2
	06:53	1,5
	12:34	0,4
	19:26	1,4
09	00:56	-0,2

No cálculo dos erros, todas as séries possuem 672 pontos horários, com exceção da série de observações em Conceição, que ficou limitada a 403 pontos, devido a problemas com o respectivo marégrafo.

Na realidade, os erros envolvidos nos cálculos do modelo são pequenos, sendo em média 0,33 cm em relação a previsões harmônicas e 0,91 cm em relação a medições. De fato, o modelo reproduz as marés com boa precisão e, na ausência de eventos meteorológicos significativos, seus

resultados podem ser utilizados como uma aproximação da circulação total.

Em trabalho anterior, Harari, Camargo & Cacciari (1999) apresentaram os resultados iniciais desta modelagem de alta resolução, dando ênfase a sequências temporais de mapas de elevação da superfície e de correntes de superfície, mostrando as distribuições dessas variáveis nas preamares, baixamares, correntes enchentes e correntes vazantes - em condições de maré de sizígia. No presente trabalho, os resultados apresentados e analisados são referentes às correntes de maré máximas (na sizígia) para diversos níveis na vertical, especificamente a 0, 6 e 12 m de profundidade (Figuras 4 a 7).

É preciso salientar que, na análise dos mapas obtidos, deve ser levada em conta a escala das correntes de cada um, tendo em vista a enorme variabilidade espacial encontrada.

Os mapas de correntes obtidos apresentam características regionais de grande interesse. Na área do Porto de Santos é importante notar a grande intensificação das correntes (de superfície e a 6 m) na entrada do Canal do Porto, na grade 1, por efeito de continuidade (Figura 4); de fato, a grade referente às praias e Porto de Santos é a que apresenta as maiores variações espaciais das

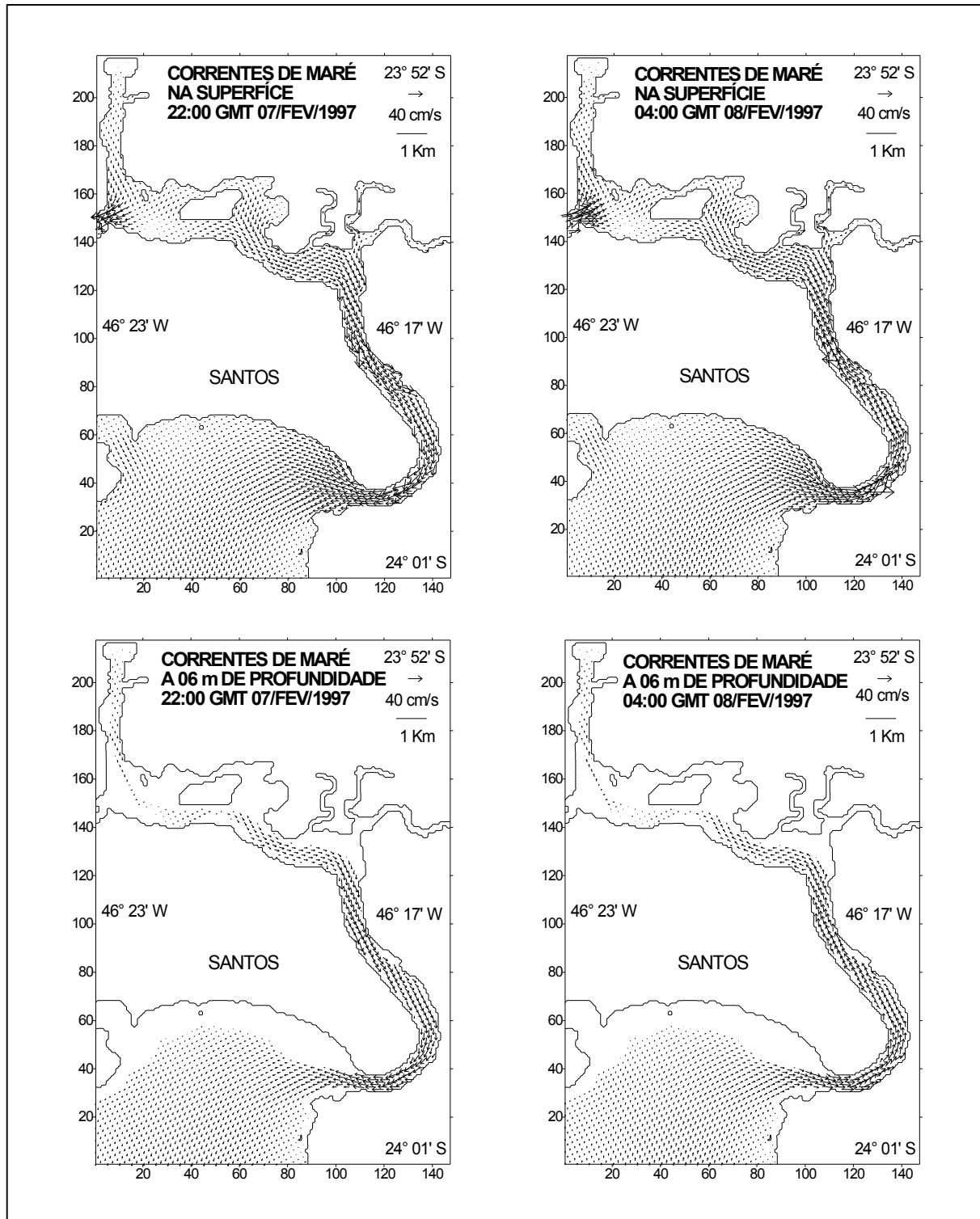


Figura 4a. Resultados do modelo na grade 1: Correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície e a 6 e 12 m de profundidade (plotagem de 1 vetor a cada 4).

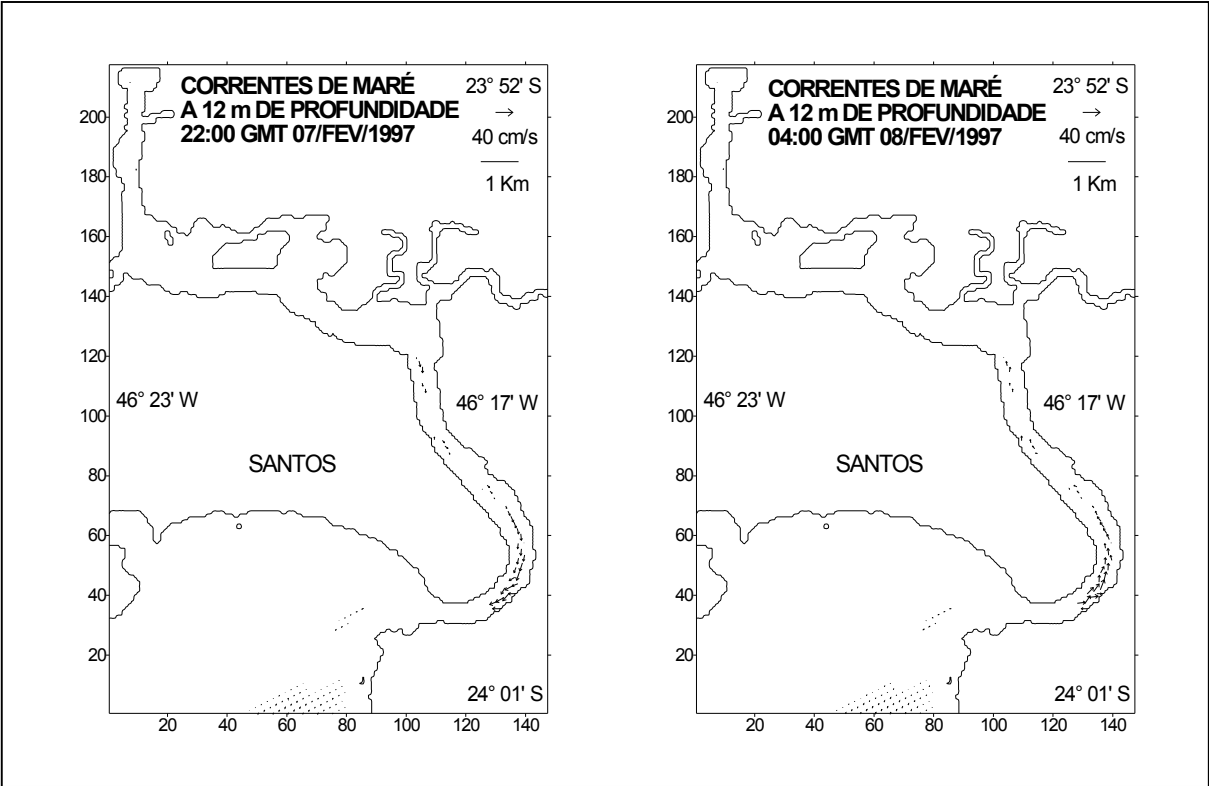


Figura 4b. Resultados do modelo na grade 1: Correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície e a 6 e 12 m de profundidade (plotagem de 1 vetor a cada 4).

Tabela 3. Comparação de resultados do modelo com previsões harmônicas (ΔPH) e observações (ΔOB), para as amplitudes de maré (Am) e do nível do mar observado (Ao), sendo este último referente a Fevereiro de 1997.

Estação maregráfica	Am (cm)	ΔPH (cm)	Ao (cm)	ΔOB (cm)
Alamoia	92,7	0,36	120,7	0,79
Barnabé	90,2	0,32	128,2	1,03
Conceição	87,7	0,30	132,8	0,90

correntes, com valores na superfície desde praticamente zero até acima de 100 cm/s. Comparando os mapas de todas as grades, se observa que as correntes de maré próximo às praias são em geral muito fracas, sendo este aspecto mais notório nos mapas referentes ao Guarujá (Figura 5); na realidade, próximo às praias, os efeitos diretos de ondas e de correntes geradas por ondas são mais importantes. Entretanto, a despeito das fracas in-

tensidades das correntes na grade 2, se tem uma clara condição de convergência / divergência das correntes de maré vazantes / enchentes ao largo das praias do Guarujá, desde a superfície até o fundo (Figura 5); por outro lado, os resultados de correntes nas áreas mais profundas, referentes às grades 3 e 4, são os que apresentam maior uniformidade horizontal e vertical, havendo apenas algumas influências mais significativas de limites terrestres, como é o caso da Ilha da Moela (Figuras 6 e 7). O ponto mais saliente dos mapas de correntes no Canal do Porto se encontra na alta resolução dos resultados, o que permite detectar detalhes dos fluxos, tanto ao longo do canal como também em secções transversais (Figura 8).

Um aspecto importante a analisar nos mapas de correntes obtidos é o decaimento da intensidade das correntes segundo a vertical, por influência da fricção no fundo, apesar do caráter barotrópico das marés.

A Tabela 4 demonstra os máximos valores das correntes de maré nas quatro grades consideradas, segundo os mapas apresentados, ou seja, nas profundidades de 0, 6 e 12 m.

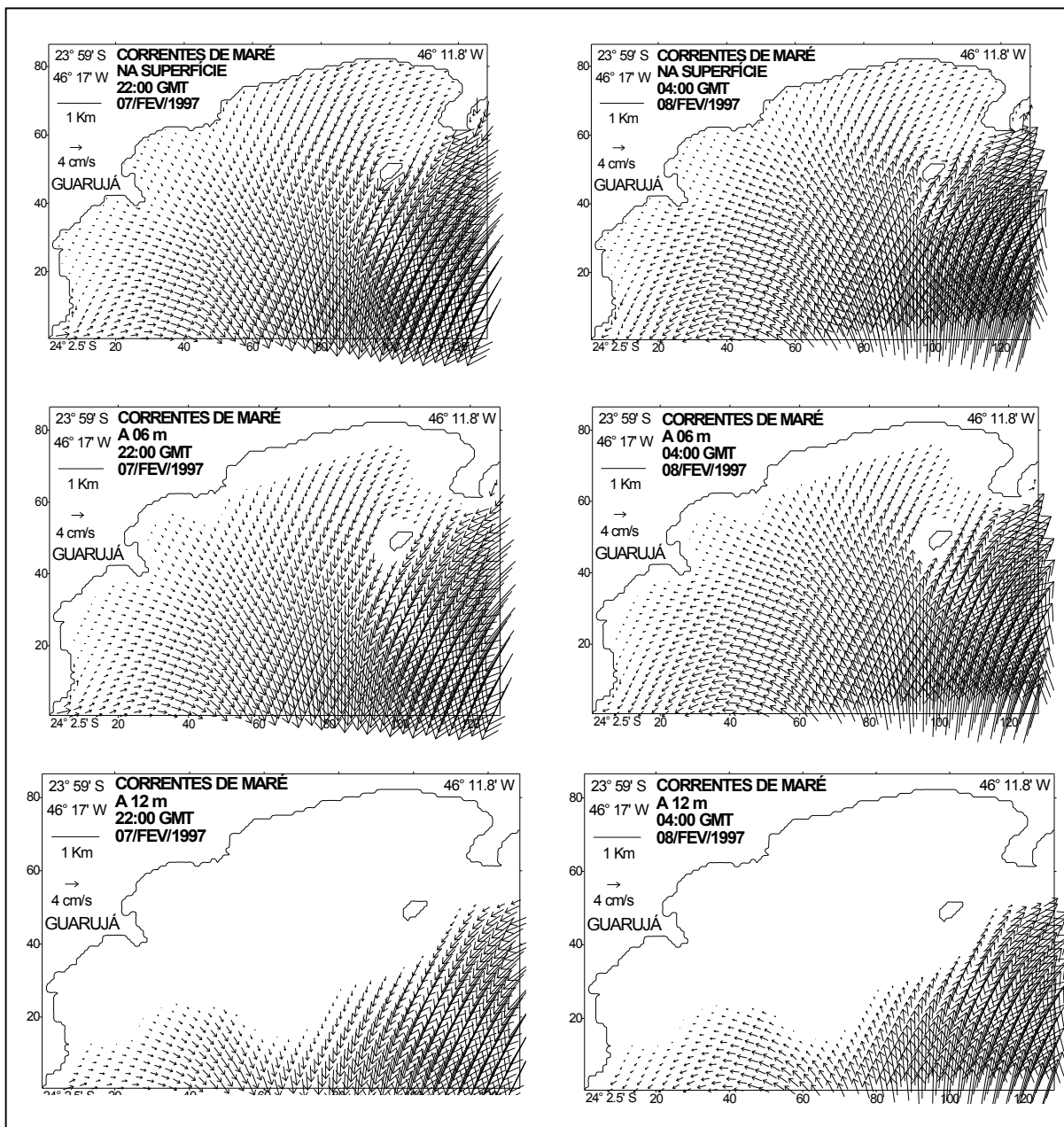


Figura 5. Resultados do modelo na grade 2: Correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície e a 6 e 12 m de profundidade (plotagem de 1 vetor a cada 9).

O maior decaimento das correntes máximas com a profundidade se encontra na grade 1, com valores atingindo 100 cm/s na superfície e apenas 35 cm/s a 12 m de profundidade; e o menor decaimento de máximos ocorre na grade 3, onde se tem os valores de 18,2 cm/s e 15,5 cm/s, para a superfície e o nível de 12 m. Esses resultados de-

monstram a importância da formulação tridimensional na modelagem hidrodinâmica, especialmente no caso de áreas com fortes gradientes batimétricos e contornos terrestres muito variáveis, como é o caso da área do Canal do Porto e das Praias de Santos. Obviamente, na ausência dessas feições, a variação das correntes com a vertical é

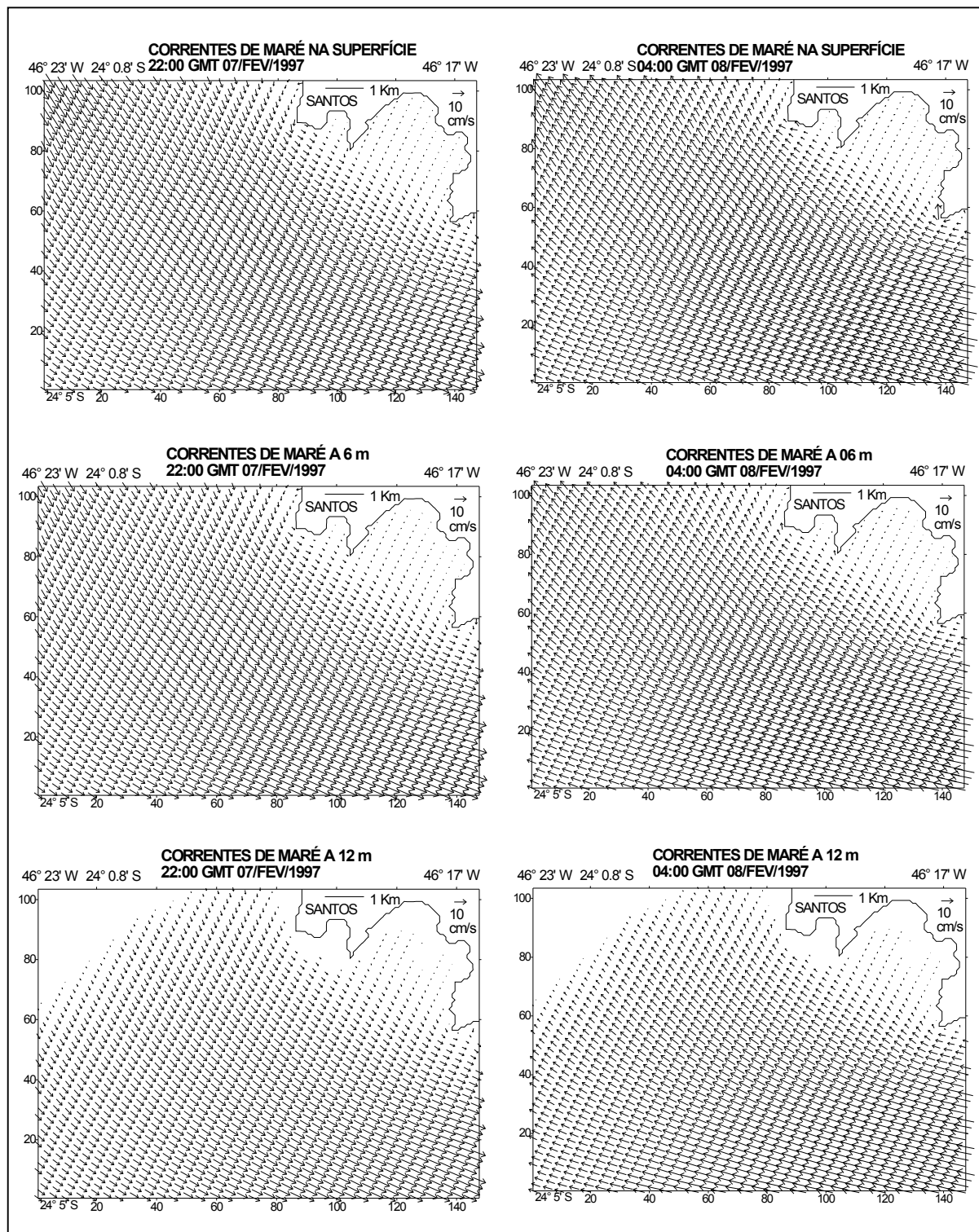


Figura 6. Resultados do modelo na grade 3: Correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície e a 6 e 12 m de profundidade (plotagem de 1 vetor a cada 10).

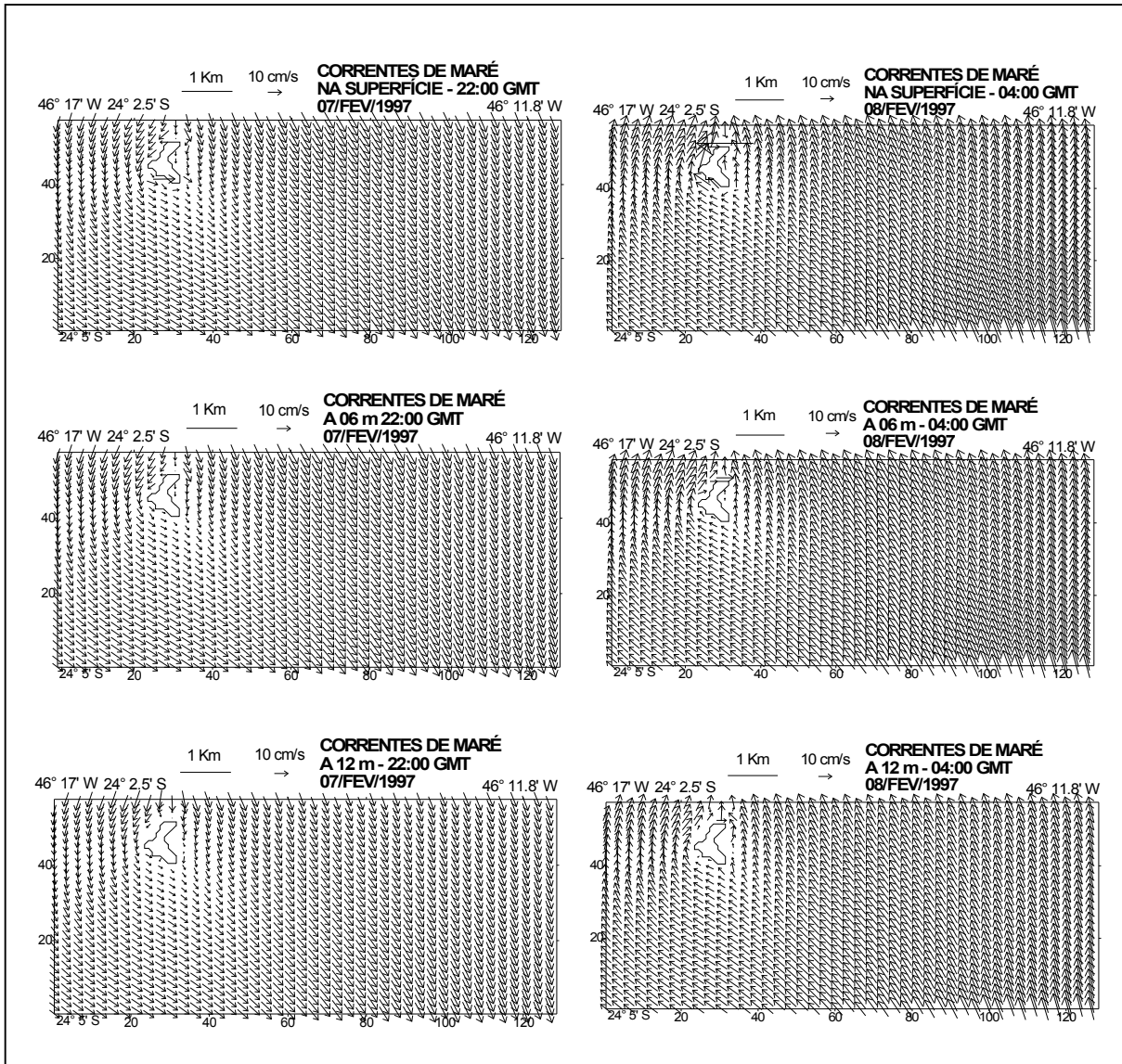


Figura 7. Resultados do modelo na grade 4: Correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície e a 6 e 12 m de profundidade (plotagem de 1 vetor a cada 9).

Tabela 4. Correntes máximas calculadas nas quatro grades, a 0, 6 e 12 m de profundidade.

Prof.	GR_1	GR_2	GR_3	GR_4
(m)	Corr. máx. (cm/s)	Corr. máx. (cm/s)	Corr. máx. (cm/s)	Corr. máx. (cm/s)
00	100,1	23,3	18,2	43,8
06	42,2	20,1	18,1	20,5
12	35,0	15,7	15,5	19,0

muito menor, que é o caso da área de acesso ao Porto de Santos.

A Figura 9 mostra perfis verticais das correntes, nas condições de vazante de sizígia, nas células que apresentaram máximas correntes de superfície, quais sejam, as de colunas, linhas 135 / 40 (com 100,1 cm/s), 120 / 37 (com 79,0 cm/s) e 130 / 42 (com 68,1 cm/s); evidentemente, esses são as células que apresentaram maior decaimento das correntes segundo a vertical.

Os resultados de correntes obtidos nesse trabalho são concordantes com diversas medições

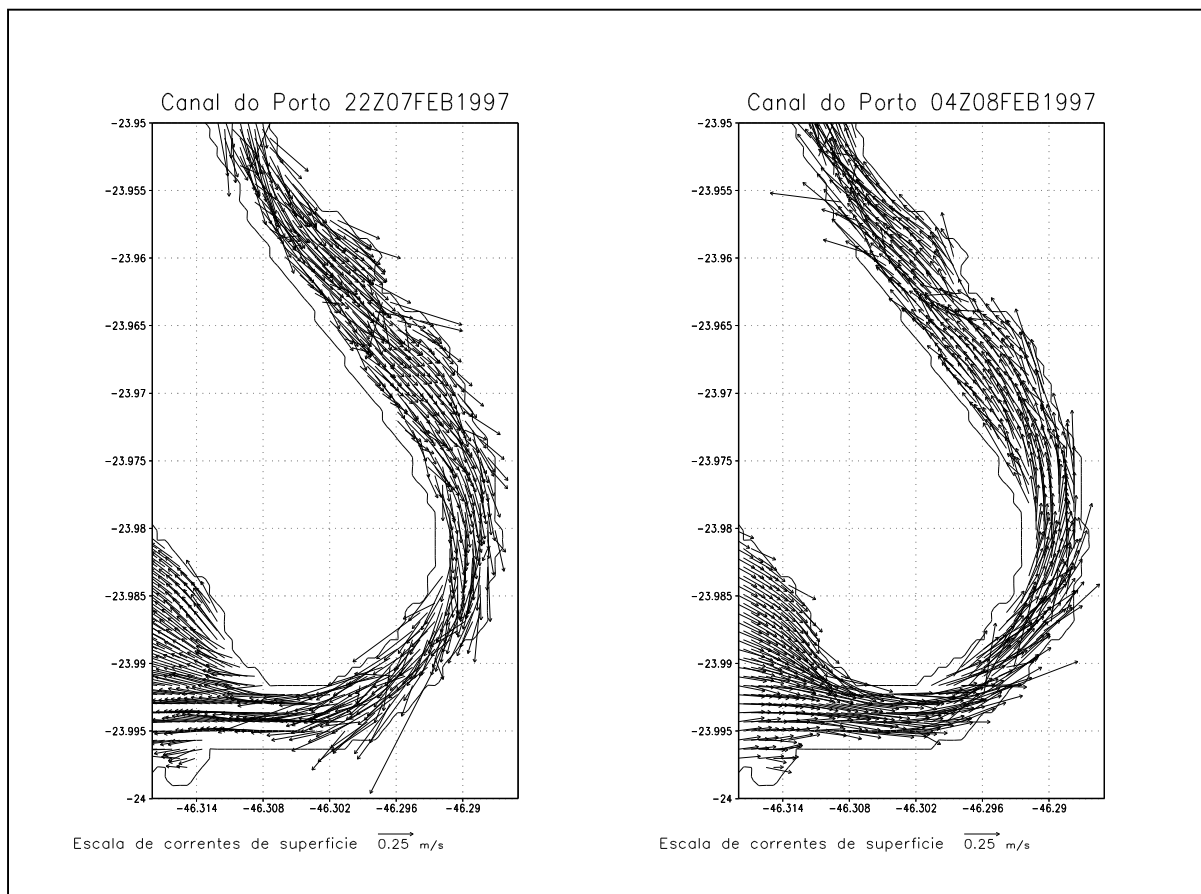


Figura 8. Resultados do modelo no Canal do Porto: correntes de sizígia na vazante (22:00 GMT de 07/Fev/1997) e na enchente (04:00 GMT de 08/Fev/1997), na superfície (plotagem de todos os vetores).

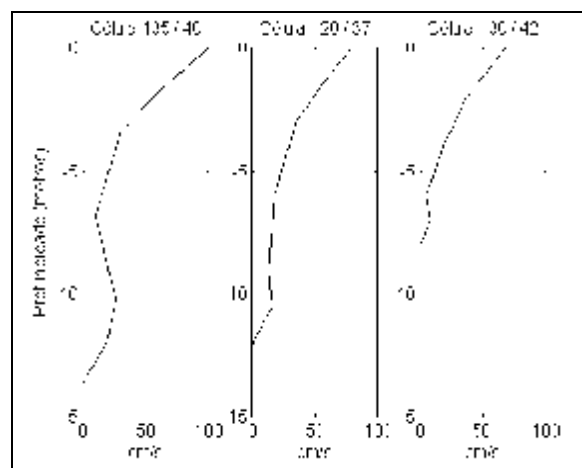
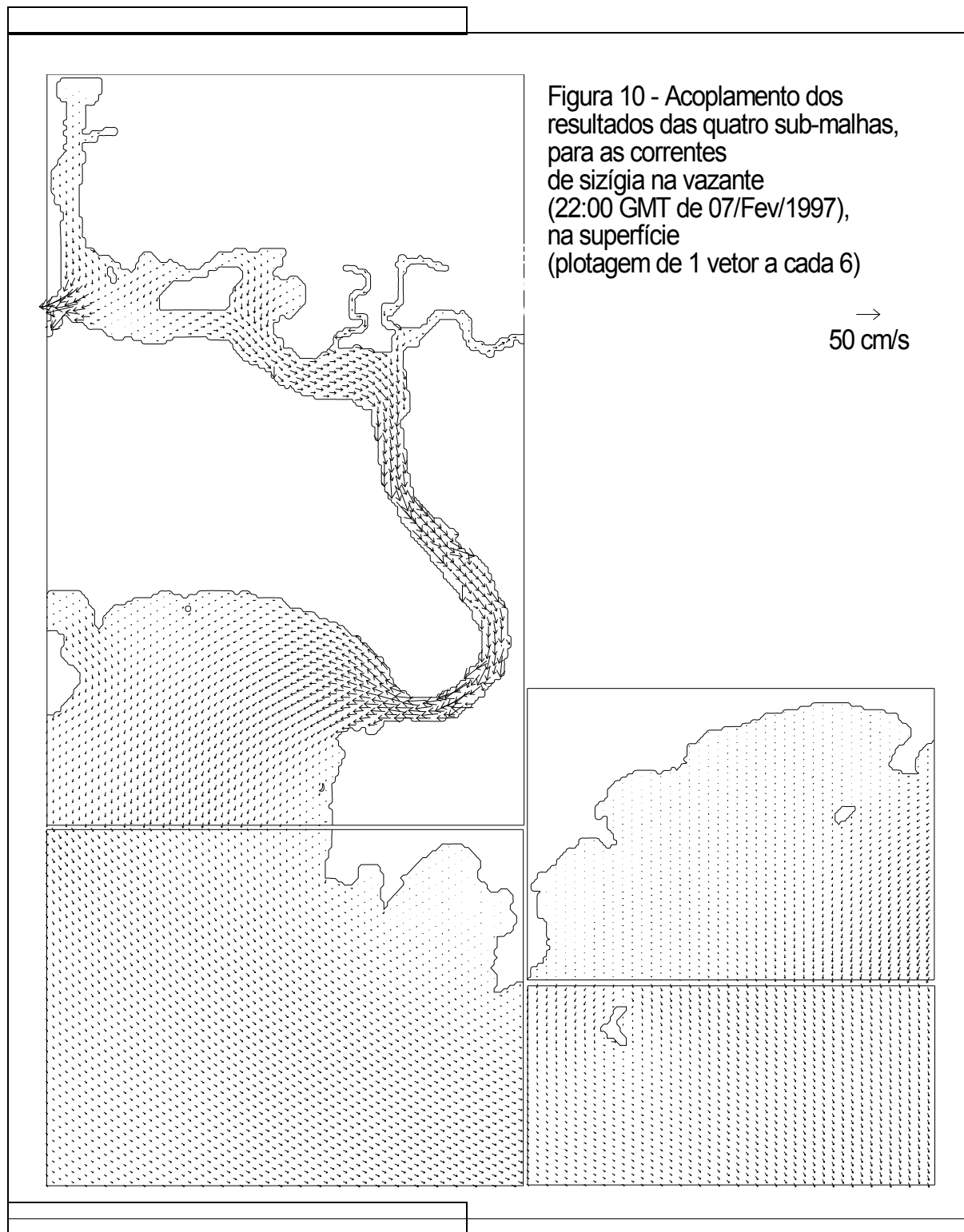


Figura 9. Perfis verticais de correntes na vazante da sizígia, em 22:00 GMT de 07/Fev/1997, nas células de colunas / linhas 135 / 40, 120 / 37 e 130 / 42 (ver localização na Figura 2a).

realizadas na área, especialmente as da FUNDESPA (1996), como discutido em Harari & Camargo (1998). E a metodologia de aninhamento de grades utilizada neste trabalho pode ser aplicada a qualquer sub-região de interesse na Baixada Santista pertencente à grade de 1 km.

Um ponto de interesse a analisar é o ajuste dos resultados obtidos nas fronteiras adjacentes das sub-malhas adotadas. Em geral, a continuidade dos resultados através das fronteiras das grades pode ser considerada satisfatória, como demonstrado na Figura 10, referente à vazante de sizígia na superfície; esta figura constitui uma composição de quatro figuras anteriormente apresentadas (4 a 7). Apenas na área imediatamente a Leste e a Norte da Ilha da Moela (grade 4) o ajuste dos resultados não é totalmente satisfatório, provavelmente devido à influência do contorno continental nessa região, na grade 2, o qual não é levado em conta na grade 4; considerando as dimensões dessas duas sub-malhas, futuramente, o seu processamento como uma única sub-malha deverá eliminar esse problema.



Concluindo, com esta modelagem, foi de fato implementado um sistema de previsão de marés e de correntes de maré, o qual constitui a primeira fase de um sistema de previsão hidrodinâmico mais amplo para a Baixada Santista. Numa próxima etapa, correntes e elevações devidas a efeitos meteorológicos e ao campo de densidade deverão ser incluídas, de modo a possibilitar a previsão da circulação geral da área. Na realidade, previsões de maré são as mais fáceis de implementar, dado o caráter periódico do fenômeno e o conhecimento das marés na plataforma e na área costeira da Baixada Santista (Harari & Camargo, 1994). Por outro lado, previsões envolvendo efeitos meteorológicos deverão utilizar informações de vento, fornecidas por modelos meteorológicos operacionais do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, e dados de maré meteorológica nos contornos, especificados por modelo de escala oceânica (Camargo, Harari & Dias, 1999). Finalmente, previsões considerando os campos de densidade poderão ser realizadas com base em analogias a situações pretéritas típicas.

O sistema de previsão atual, embora restrito à componente de maré da circulação, é muito útil, especialmente por fornecer os instantes de preamares, baixamares, correntes enchentes máximas e correntes vazantes máximas; e, na ausência de eventos meteorológicos significativos, a circulação de maré é uma excelente aproximação da circulação total na área, como pode ser observado nos gráficos de elevação da superfície, apresentados na Figura 3. Entretanto, com o sistema de previsão completo, considerando marés e efeitos meteorológicos e de densidade, se terá disponível um suporte muito útil para diversas aplicações técnico-científicas e de engenharia, como por exemplo no apoio a operações portuárias, em melhorias no controle da poluição, na estimativa de intrusões salinas em aquíferos, no dimensionamento de obras civis, etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem o significativo apoio recebido das seguintes entidades: Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAGUSP), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Laboratório de Computação Avançada do Centro de Computação Eletrônica da Universidade de São Paulo (LCCA -

CCE USP), Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP) e Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas (FUNDESPA).

REFERÊNCIAS

- ASSELIN, R. (1972) "Frequency filter for time integrations" - *Monthly Weather Review*, vol. 100 (6), p. 487 - 490.
- 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, Ed: N. S. Heaps, American Geophysical Union, Washington, D. C., USA, p 1 - 16.
- CAMARGO, R., HARARI, J. & DIAS, P. L. S. (1999) "Modelagem e previsão operacional da maré meteorológica no Atlântico Sudoeste" - Resumos do 3º Seminário sobre Ondas e Marés e do 2º Simpósio sobre Engenharia Oceânica, realizados em Arraial do Cabo (RJ), de 24 a 27 de Maio de 1999, p. 25 dos *Anais*.
- CACCIARI, P. L. & HARARI, J. (1996) "Implementação de um sistema automatizado de coleta de dados ambientais no Porto de Santos (SP)" - *Resumos do III Simpósio sobre Oceanografia* - IOUSP, realizado em São Paulo, SP, Brasil, em Dezembro de 1996, p. 372.
- FRANCO, A. S. (1988) "*Tides - fundamentals, analysis and prediction*" - Public. FCTH Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, Escola Politécnica da USP, 2ª Edição - 249 p.
- FRANCO, A. S. & HARARI, J. (1987) - "*Computer programs for tidal data checking, correction, analysis and prediction by the harmonic method*" - Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, nº 16, p. 1 - 65.
- FUNDESPA (1996) "*Levantamento oceanográfico de parâmetros correntométricos e da estrutura termohalina na área do emissário submarino de Santos - Relatório de coleta de dados*" - Coordenador: P. L. Cacciari - 15 p + Figs.
- 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*, nº 42 (1), p. 35 - 54.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. (1995) "*Tides and mean sea level variabilities in Santos (SP), 1944 to 1989*" - Relatório Interno do Instituto Oceanográfico da USP, nº 36, 15 p.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. (1998) "Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): circulação de maré" - *Revista Brasileira de Oceanografia*, vol. 46 (2), p. 135 - 156.
- HARARI, J. & CAMARGO, R. & CACCIARI, P. L. (1999) "*Implantação de um sistema de previsão de marés e de correntes de maré na Baixada Santista através de modelo numérico tridimensional*" - Relatório

- Interno do Instituto Oceanográfico da USP, n° 45, 21 p.
- HARARI, J. & MESQUITA, A. R. (1997) "Tábuas das marés de Ubatuba, Santos e Cananéia para os anos de 1998 e 1999" - Relatórios Técnicos do Instituto Oceanográfico da USP, n° 42, 28 p.
- MELLOR, G. L. (1998) "User's Guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model" - Princeton University, Internal Report, 40 p.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. (1974) "A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers" - *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 31, p. 1791 - 1806.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. (1982) "Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems" - *Review of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, p. 851 - 875.
- MESINGER, F. & ARAKAWA, A. (1976) "Numerical methods used in atmospheric models" - GARP Publication Series, n° 17, 64 p.
- O'CONNOR, W. P. (1991) "A numerical model of tides and storm surges in the Rio de la Plata Estuary" - *Continental Shelf Research*, vol. 11, n° 12, p. 1491 - 1508.

Results of Hydrodynamic Numerical Modeling in Three-Dimensional Simulations of Tidal Currents in the Baixada Santista

ABSTRACT

Results of tidal simulations for the Baixada Santista, using the Princeton Ocean Model (POM), with a horizontal resolution of 1 Km, are used in four nested grids, with a horizontal resolution of 75 m, covering (1) the Channel of the Port and the beaches of Santos, (2) the Beaches of Guarujá, (3) the access to the Port of Santos and (4) the coastal area off Moela Island. The results generated by the model in the nested grids were compared to tidal harmonic predictions and sea level observations. Maps of tidal currents at several depths were produced, as well as vertical profiles of the currents at points of interest; these results exhibit regional characteristics of the tidal fluxes, especially the decay of the current intensity along the vertical. The model implemented may be used for operational predictions of tides and tidal currents, with several applications in engineering. The nesting methodology may be extended to any other area of interest in the Baixada Santista inserted in the 1 Km basic grid. In future, contributions of meteorological and density effects should be included in addition to the tides, in order to provide simulations and predictions of the general circulation in this coastal region.