

Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste do Brasil a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície

Ricardo de CAMARGO¹ & Joseph HARARI²

¹Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná
(Av. Beira Mar s/n, 83255-000, Pontal do Sul, PR, Brasil)

²Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
(Caixa Postal 66149, 05389-970, São Paulo, SP, Brasil)

- **Abstract:** A three-dimensional, linear, barotropic and meso-scale numerical model is used for the southeastern Brazilian shelf, in order to represent the composition of the main astronomical tidal constituents, superimposed to extreme meteorological effects, for specific periods of interest. However, meteorological data relative to this area are very few and sparse, so that a methodology to provide meteorological conditions to the oceanic circulation model was used, based only on atmospheric pressure charts at the surface. The pressure field was well represented, while the calculated wind speeds were much larger than the observed winds at the coast. The model results indicate that it is possible to associate the predominant high pressure center in the South Atlantic and the correspondent surface elevations parallel to the coastline to an approximately geostrophic oceanic circulation system. On the other hand, the passage of cold fronts in the area induces transient systems that modify the geostrophic pattern, also changing the surface elevation isolines configuration.
- **Resumo:** Um modelo numérico tri-dimensional, linear, barotrópico e de meso-escala, é usado para a plataforma sudeste brasileira, de maneira a representar a composição das principais componentes astronômicas de maré, sobrepostas a efeitos meteorológicos extremos, para períodos específicos de interesse. No entanto, como dados meteorológicos relativos a esta área são muito escassos e esparsos, foi utilizada uma metodologia de fornecimento de condições meteorológicas para o modelo de circulação oceânica, baseada somente em cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície. O campo de pressão foi bem representado, mas as intensidades calculadas para os ventos foram bem maiores do que as observadas na costa. Os resultados do modelo indicam que é possível associar o centro de alta pressão do Atlântico Sul e as correspondentes elevações de superfície paralelas à linha da costa a um sistema geostrófico de circulação oceânica. Por outro lado, a passagem de frentes frias na área induz sistemas transientes que modificam o padrão geostrófico, também mudando a configuração das isolinhas de elevação de superfície.
- **Descriptors:** Storm surges; Tides and currents; Pressure and winds; Hydrodynamical numerical modelling; Southeastern Brazilian shelf.
- **Descritores:** Ressacas; Marés e correntes; Pressão e vento; Modelagem numérica hidrodinâmica; Plataforma sudeste do Brasil.

Introdução

A área de estudo do presente trabalho corresponde à plataforma continental sudeste do Brasil, na região compreendida entre Ponta do Vigia (SC) e Cabo Frio

(RJ), desde a costa até aproximadamente a isóbata de 100 m (Fig. 1).

Foi utilizado o modelo numérico hidrodinâmico desenvolvido para esta região por Harari (1985, 1987), o qual é baseado em Heaps (1972), visando representar processos de interesse nessa área. As forçantes desses processos hidrodinâmicos podem ser de origem astronômica ou meteorológica.

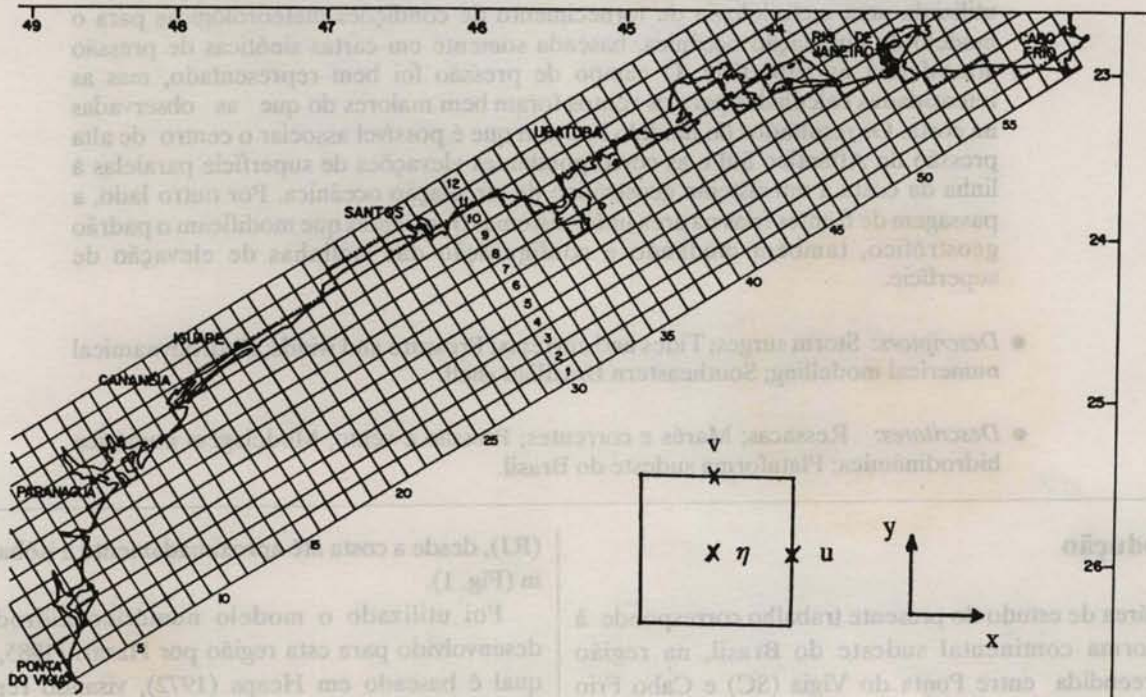
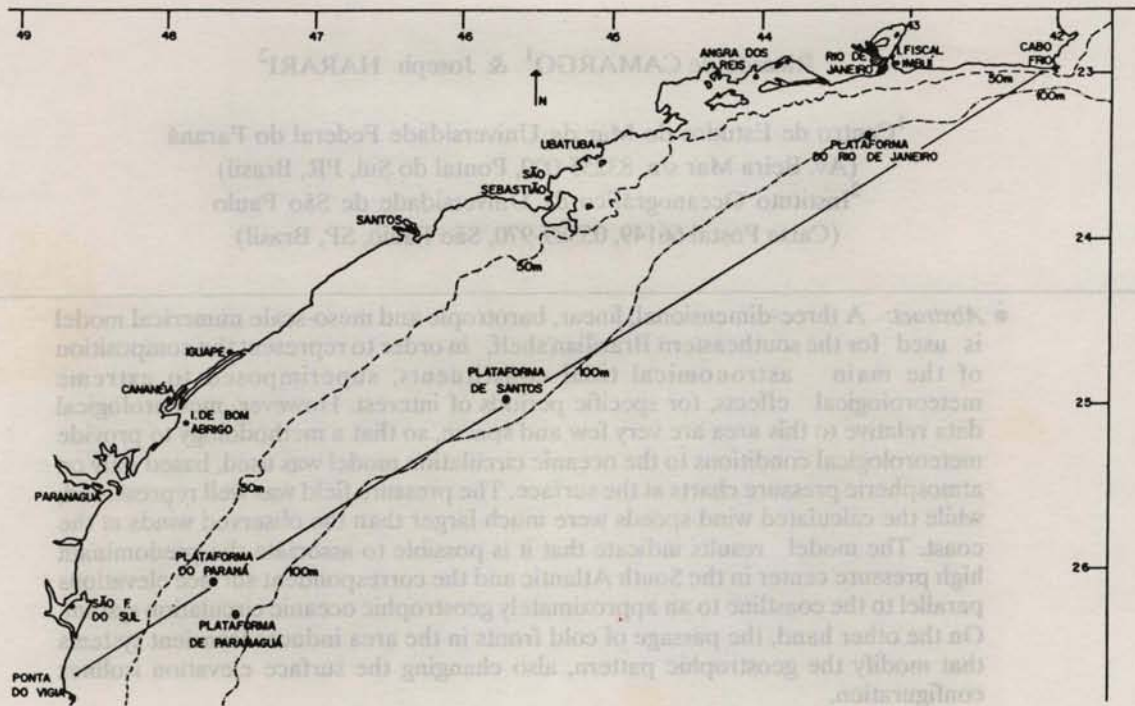


Fig. 1. Mapa geográfico da plataforma sudeste brasileira e grade oceanográfica utilizada no modelo.

O objetivo deste trabalho é estudar a composição das principais componentes astronômicas de maré da região, sobreposta a efeitos meteorológicos extremos, em períodos específicos de interesse, através da aplicação de uma metodologia de especificação de condições meteorológicas ao modelo de circulação marítima; esta metodologia é baseada apenas em mapas da pressão atmosférica na superfície, conforme Hasse & Wagner (1971) e Hasse (1974). A partir de cartas sinóticas diárias, é feita uma redução dos dados de pressão atmosférica para a área de interesse, seguida de interpolações para valores horários; com a estimativa dos gradientes de pressão e através da relação geostrófica, é possível calcular o vento geostrófico; finalmente, com o uso de correções empíricas, obtém-se o vento real aproximado, na superfície.

Varios trabalhos tem sido realizados na modelagem da resposta da plataforma sudeste brasileira a forçantes de origem meteorológica. Castro Filho (1985), após simular numericamente a circulação para condições típicas de inverno nesta área, realizou um experimento com condições de vento real transiente, similar a este trabalho. No entanto, os dados de vento utilizados por Castro Filho eram baseados em resultados de modelo numérico meteorológico de macro escala, com interpolações no espaço e no tempo. Stech (1990) desenvolveu um estudo comparativo da dinâmica da referida plataforma com a South Atlantic Bight (Estados Unidos), simulando a atuação de campos de vento provenientes de modelos conceituais de frentes frias e de dados observados e extraídos de cartas sinóticas. Stech & Lorenzetti (1992) modelaram a resposta da plataforma sudeste brasileira à passagem de frentes frias, com base em modelos conceituais da evolução desses sistemas meteorológicos, que por sua vez foram derivados da análise de dados costeiros de vento e de imagens de satélite. Já no presente estudo, é dada ênfase maior à composição da circulação devida a efeitos meteorológicos com a circulação de maré, visando reproduzir as elevações do nível do mar ao longo das estações costeiras, principalmente em períodos de elevações excepcionais do nível do mar, como em Harari (1985); mas, neste trabalho, foi adicionalmente introduzido o uso da metodologia acima descrita para a imposição de condições de contorno meteorológicas no modelo da circulação marítima de Harari (*op. cit.*).

As componentes de maré consideradas nos processamentos do modelo ora apresentados são: Q_1 , O_1 , P_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 , K_2 e M_3 . Os períodos escolhidos para as simulações são: 27 de maio a 14 de junho de 1983 (19 dias) e 30 de Maio a 11 de junho de 1985 (13 dias). Tais períodos são caracterizados por grandes elevações do nível médio do mar, por influência de sistemas meteorológicos intensos, como mostrado na Figura 2.

Material e métodos

O modelo utilizado nas simulações que serão apresentadas foi desenvolvido por Harari (1985, 1987), baseado em Heaps (1972), sendo tridimensional, linear, barotrópico e de meso-escala. Ele resolve um sistema de equações básicas formado pela equação da continuidade e duas equações do movimento na horizontal. Dessa forma se tem um sistema de três equações a três incógnitas, que são a elevação do nível do mar e as duas componentes horizontais de velocidade. Este sistema é resolvido pela aplicação do Método de Galerkin para a dependência vertical das componentes de corrente, de modo a representar essas variáveis dependentes como uma expansão em funções que possuem uma determinada estrutura vertical, chamadas funções base; os coeficientes das funções base consideram as dependências horizontal e temporal das componentes de corrente. Tal procedimento leva a um conjunto de equações diferenciais para os coeficientes, o qual é resolvido com diferenças finitas no espaço horizontal e no tempo. Para o modelo em questão, foi utilizado o Método Espectral de Galerkin, com funções base ortogonais da forma cosseno. Detalhes sobre as equações do modelo, condições iniciais e de contorno, métodos de discretização, etc são descritos em Harari (1984, 1985).

Os processamentos do modelo requerem a especificação das alturas de maré nos contornos abertos e a definição dos campos de gradiente de pressão e de fricção do vento na superfície.

Para os pontos do contorno aberto, a parcela astronômica da elevação do nível do mar foi definida por previsões harmônicas baseadas em análises de séries temporais de alturas de maré obtidas em três pontos da plataforma pertencentes a este contorno. As constantes harmônicas de amplitude (H_j) e de fase (G_j) das nove principais componentes astronômicas de maré nos três pontos amostrados foram obtidas através da aplicação dos métodos de análise de maré - harmônico e da resposta (Franco, 1988; Munk & Cartwright, 1966). Nos demais pontos da fronteira aberta, os valores de H_j e G_j de cada uma das componentes foram obtidos através de interpolação linear. Nas previsões harmônicas citadas, foram consideradas correções nodais para os períodos de interesse. Como os períodos são relativamente curtos, assumiu-se que essas correções não variam nos períodos de previsão. Dessa maneira, foi possível especificar a altura da maré astronômica (η_A) em todos os pontos do contorno aberto, nos períodos de simulação.

Já a inclusão da parcela de maré meteorológica nos pontos do contorno aberto (η_M) baseou-se em estimativas das oscilações horárias do nível médio do mar na costa, através da aplicação de um filtro de médias móveis às alturas horárias de maré observadas nas estações de Paranaguá, Cananéia, Santos, Ubatuba e Rio de Janeiro. Foi utilizado o filtro S24S24S25 sugerido por Godin (1972), o qual é particularmente útil na eliminação de oscilações diurnas, semi-diurnas etc, com a manutenção das variações de longo período. Como essas estações costeiras não

pertencem ao contorno aberto, foi considerado um fator 0,75 para se obter o correspondente valor de η_M nos pontos da fronteira aberta pertencentes às mesmas colunas da grade oceanográfica do modelo onde se encontram as estações citadas. Alguns testes demonstraram ser este fator o mais indicado para este tipo de consideração, uma vez que as marés meteorológicas são amplificadas ao atingir águas costeiras progressivamente mais rasas. Similarmente às parcelas η_A , foram realizadas interpolações lineares para exprimir o campo de η_M ao longo de todo o contorno aberto.

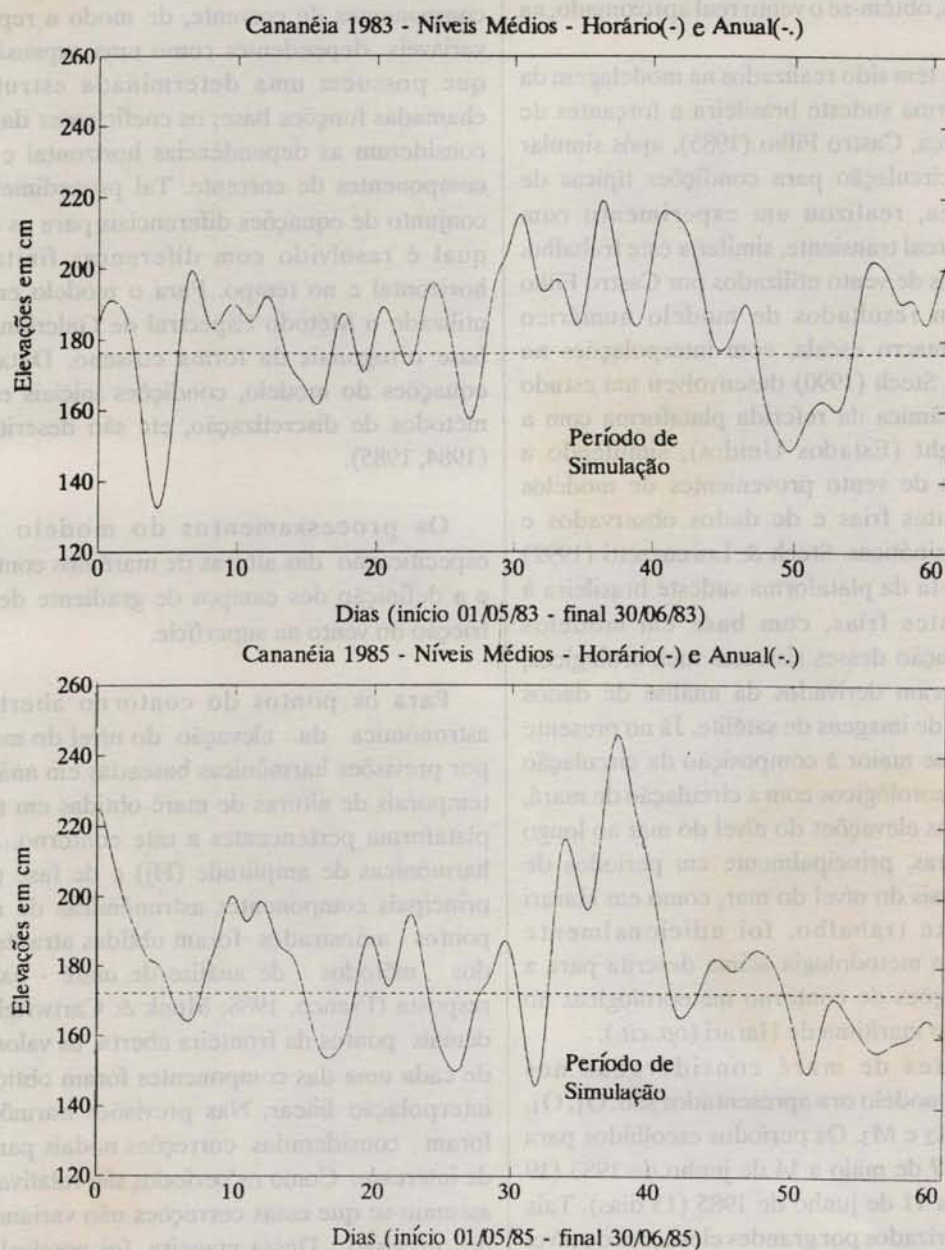


Fig. 2. Níveis médios horários e níveis médios anuais em Cananéia, para 1983 e 1985.

Mais detalhes sobre as especificações para as simulações, tipo de grade oceanográfica e meteorológica, condições de estabilidade, valores de coeficientes, etc são encontrados em Camargo (1991).

Para considerar as influências meteorológicas na região em questão, foram solicitados dados ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura.

Os dados fornecidos pelo INMET, referentes às estações meteorológicas de Paranaguá, Iguape, Santos, Ubatuba e Rio de Janeiro, continham algumas lacunas, algumas de até dois dias, e nem todas as estações possuíam dados de vento nos períodos de interesse. No campo da pressão atmosférica não houve dificuldade em realizar interpolações para o preenchimento das lacunas, tendo em vista a pequena variabilidade desta variável no espaço e no tempo. Por outro lado, dados de vento interpolados contém um elevado grau de incerteza, devido à enorme variabilidade associada a esse campo. Com essas dificuldades, a utilização dos dados observados pelo INMET ficou um pouco comprometida.

A solução para este problema foi a de utilizar uma metodologia alternativa, com a obtenção de variáveis meteorológicas (pressão atmosférica e vento, ambos na superfície do mar) a partir de cartas sinóticas. Com cartas sinóticas diárias de pressão atmosférica na superfície, são realizadas reduções dos dados na área de interesse, seguidas de interpolações lineares no tempo, para ter

esses valores em taxa horária. Através da relação geostrófica (balanço entre a força de Coriolis e a força de gradiente de pressão) é possível calcular o vento geostrófico; finalmente, com correções empíricas (Hasse & Wagner, 1971; Hasse, 1974), se determina o vento real aproximado.

Este procedimento permite obter séries temporais de pressão e de vento já filtradas, ou seja, séries que contém apenas informações sobre variações de baixa frequência, as quais são as principais responsáveis pela circulação de meso escala induzida por efeitos meteorológicos.

A Figura 3 apresenta a grade meteorológica utilizada neste trabalho. A área modelada foi dividida em cinco partes, sendo que quatro delas possuem $n_y = 12$ linhas por $n_x = 12$ colunas da grade oceanográfica e a restante $n_y = 12$ linhas por $n_x = 11$ colunas da mesma grade, totalizando assim a área completa (de 12 linhas por 59 colunas da grade oceanográfica). Em cada um desses cinco "elementos" da grade meteorológica, para cada hora de processamento, foram obtidos os dados meteorológicos de interesse: nos vértices se tem os valores de pressão atmosférica (P_1, P_2, P_3 e P_4); e no centro se tem os valores da intensidade do vento V_a e sua direção D_a , conforme a disposição indicada na Figura 3.

As cartas sinóticas utilizadas foram fornecidas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) do Ministério da Marinha.

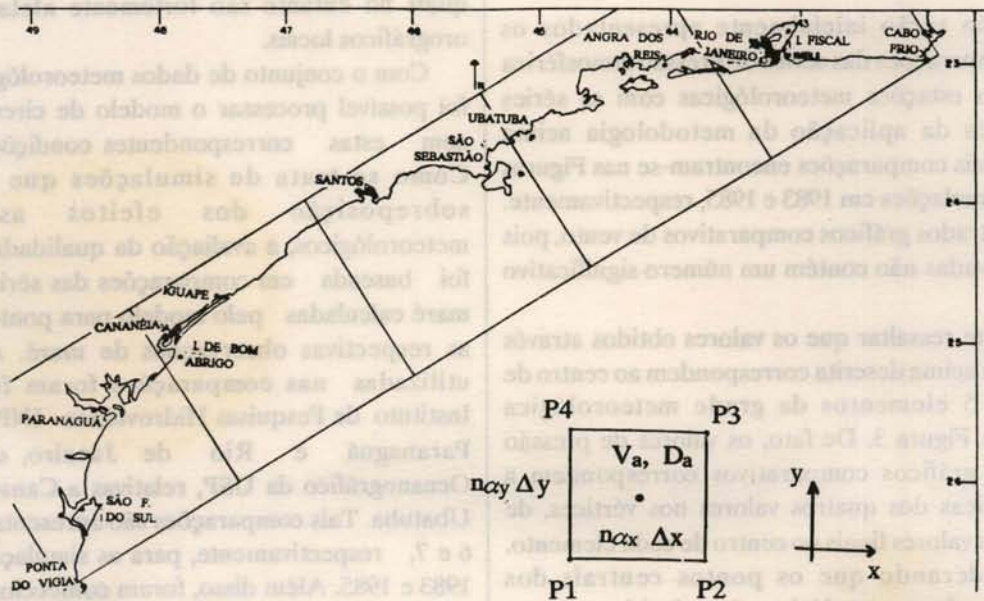


Fig. 3. A grade meteorológica do modelo.

A correção empírica considerada para estimar o vento de superfície V_a em função do vento geostrófico V_{ag} é dada por:

$$V_a = 1.5 + 0.56V_{ag}$$

onde V_a e V_{ag} são em m/s; tendo a direção dos ventos origem no Norte geográfico e sentido positivo horário, a direção do vento de superfície D_a corresponde a uma correção da direção do vento geostrófico D_{ag} da forma:

$$D_a = D_{ag} + 18^\circ$$

Na primeira expressão foi assumida uma condição de coluna de ar estável; na segunda, o termo $+18^\circ$ representa o ângulo médio entre a direção do vento real e a direção do vento geostrófico. O efeito do atrito na superfície do mar diminui a velocidade do vento e portanto diminui a intensidade da força de Coriolis, o que gera a diferença típica de 18° na direção. O sinal positivo indica que, no caso em questão, correspondente ao hemisfério Sul, o vento real está à direita do vento geostrófico, isto é, devido ao atrito, a deflexão do vento provocada pelo efeito de Coriolis se torna menor.

Resultados

Nesta seção serão inicialmente apresentados os gráficos de comparações das séries de pressão atmosférica observadas em estações meteorológicas com as séries obtidas através da aplicação da metodologia acima apresentada. Tais comparações encontram-se nas Figuras 4 e 5, para as simulações em 1983 e 1985, respectivamente. Não serão mostrados gráficos comparativos de vento, pois as séries observadas não contém um número significativo de dados.

É importante ressaltar que os valores obtidos através da metodologia acima descrita correspondem ao centro de cada um dos 5 elementos da grade meteorológica apresentada na Figura 3. De fato, os valores de pressão utilizados nos gráficos comparativos correspondem a médias aritméticas dos quatro valores nos vértices, de modo a obter os valores finais no centro de cada elemento. Mesmo considerando que os pontos centrais dos elementos da grade meteorológica não coincidem com as posições das estações costeiras, as comparações realizadas tem um significado importante. Pode parecer inusitado utilizar os dados observados em estações costeiras para as comparações com os dados reduzidos de cartas sinóticas,

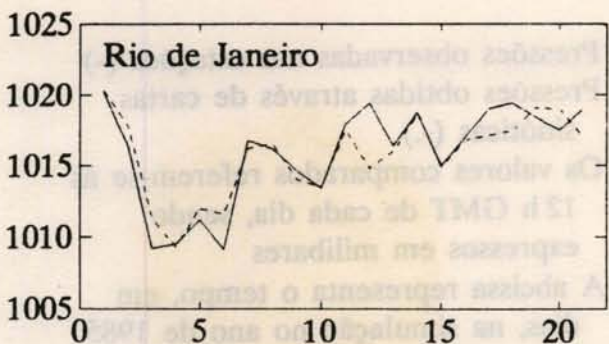
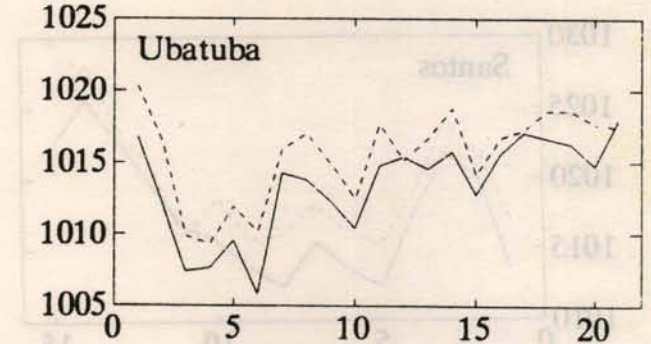
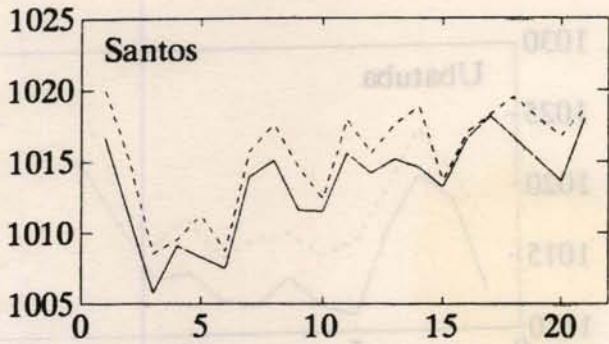
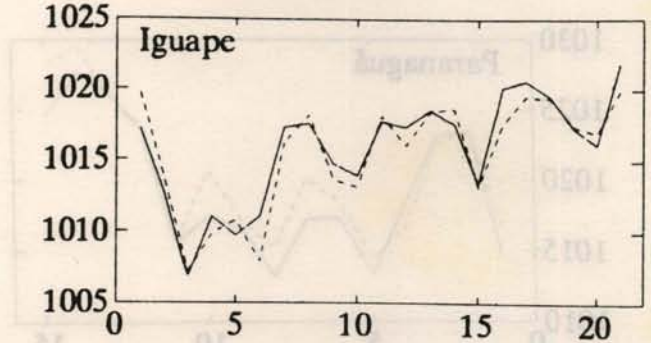
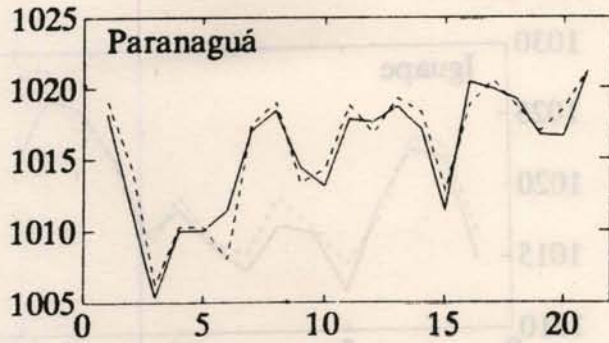
uma vez que as próprias observações foram usadas para a obtenção dessas cartas. Porém, para a confecção de cartas sinóticas, principalmente sobre o oceano, onde as informações são bastante exíguas, um grande nível de subjetividade é introduzido. Portanto, com estes gráficos comparativos busca-se garantir a qualidade dos dados, das cartas e do próprio cálculo efetuado.

Os gráficos mostrados nas Figuras 4 e 5 são portanto relativos às comparações de pressão atmosférica na superfície, sendo os valores expressos em milibares, referentes às 12h GMT dos dias das simulações nos anos de 1983 e 1985. Pode-se observar uma boa concordância entre as séries, principalmente em Paranaguá, Iguape e Rio de Janeiro, enquanto que para Santos e Ubatuba existe uma diferença na referência (a qual pode ter sido causada por um eventual erro na redução ao nível do mar de dados observados em altitudes maiores); entretanto, também nesses casos, o padrão das curvas é similar.

A estatística comparativa das observações de pressão nas estações com as determinações baseadas em cartas sinóticas é fornecida na Tabela 1, a qual apresenta valores de médias e desvios padrão. Na Tabela 2 encontram-se os valores de correlação linear e médias dos módulos das diferenças entre as séries. As correlações são sempre superiores a 0,9, exceção feita a Rio de Janeiro em 1983. Pode-se observar que as médias das séries observadas e das séries obtidas são muito mais concordantes para 1983 do que para 1985. Já os valores dos desvios padrão são bastante concordantes para todos os pontos, nos dois períodos.

Quanto aos ventos calculados, os valores obtidos são aproximadamente o dobro das observações costeiras, as quais no entanto são fortemente afetadas por efeitos orográficos locais.

Com o conjunto de dados meteorológicos calculados, foi possível processar o modelo de circulação marítima com estas correspondentes condições de contorno. Como se trata de simulações que consideram a sobreposição dos efeitos astronômicos e meteorológicos, a avaliação da qualidade dos resultados foi baseada em comparações das séries de alturas de maré calculadas pelo modelo para pontos da costa com as respectivas observações de maré. As observações utilizadas nas comparações foram fornecidas pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias - INPH, referentes a Paranaguá e Rio de Janeiro, e pelo Instituto Oceanográfico da USP, relativas a Cananéia, Santos e Ubatuba. Tais comparações são apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente, para as simulações nos anos de 1983 e 1985. Além disso, foram confeccionados mapas de isolinhas de elevação da superfície e de correntes médias nas colunas, para examinar as correspondentes condições dominantes e transientes dos processos hidrodinâmicos (Figs 8 e 9).



Pressões observadas nas estações (-)
 Pressões obtidas através de cartas
 sinóticas (-.)
 Os valores comparados referem-se às
 12 h GMT de cada dia, sendo
 expressos em milibares
 A abcissa representa o tempo, em
 dias, na simulação no ano de 1983

Fig. 4. Comparação dos valores de pressão atmosférica na superfície observados e utilizados na simulação de 1983.

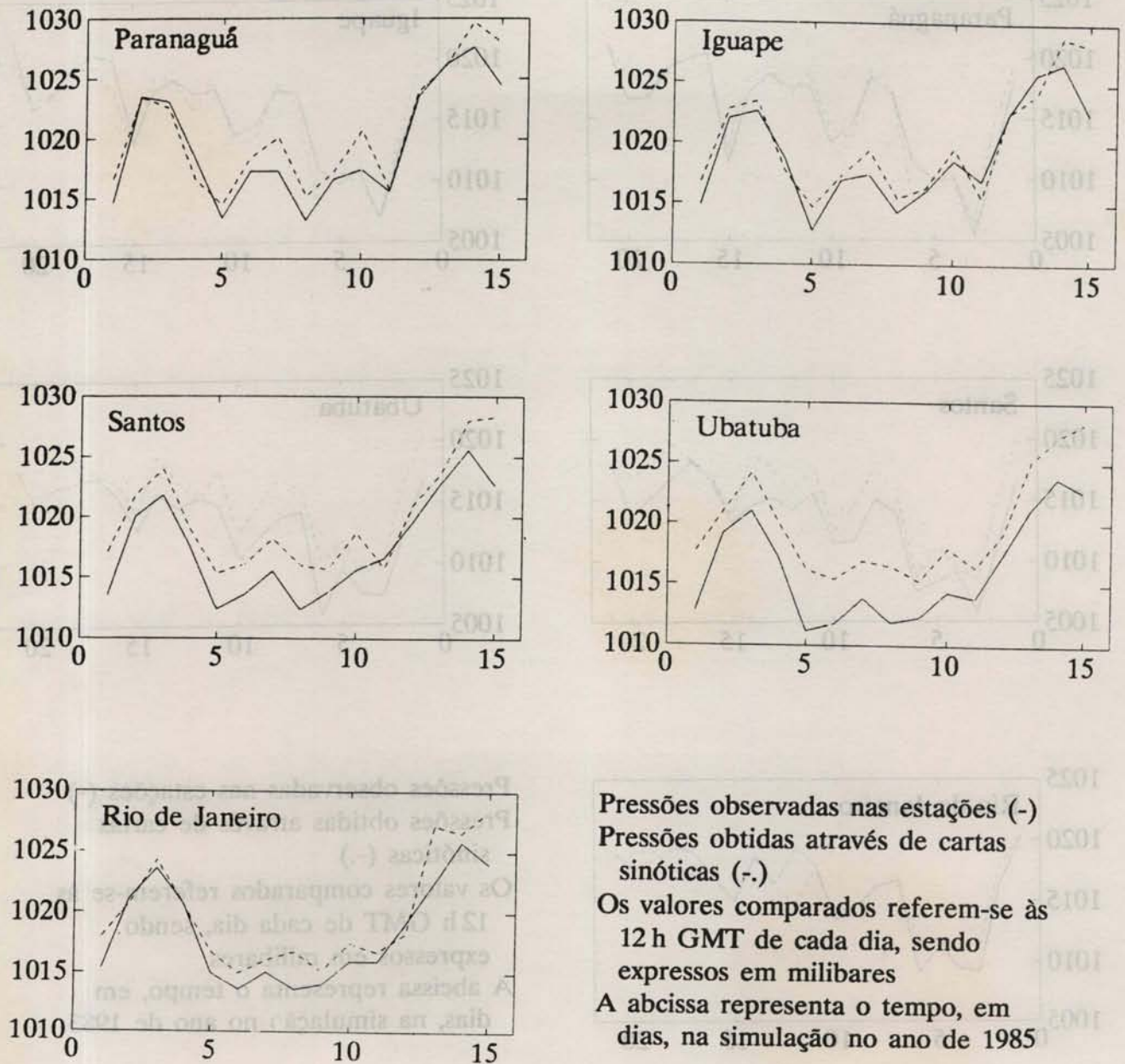


Fig. 5. Comparação dos valores de pressão atmosférica na superfície observados e utilizados na simulação de 1985.

Tabela 1. Valores de médias e desvios padrão das médias das séries de pressão atmosférica na superfície observadas e obtidas através de cartas sinóticas (em mb), nos períodos de interesse, nos anos de 1983 e 1985.

		1983		1985	
		Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Paranaguá	Obs.	1015.5	4.19	1019.5	4.76
	Calc.	1015.9	4.24	1020.6	4.83
Iguape	Obs.	1015.9	3.91	1019.2	4.22
	Calc.	1015.5	3.96	1020.2	4.59
Santos	Obs.	1013.4	3.48	1017.6	4.26
	Calc.	1015.5	3.56	1019.9	4.38
Ubatuba	Obs.	1013.4	3.47	1016.3	4.32
	Calc.	1015.6	3.15	1019.8	4.38
Rio de Janeiro	Obs.	1015.9	3.53	1018.4	4.23
	Calc.	1015.8	2.91	1019.9	4.57

Tabela 2. Valores de correlação linear e média do módulo da diferença entre séries de pressão atmosférica na superfície observadas e obtidas através de cartas sinóticas (em mb), nos períodos de interesse, nos anos de 1983 e 1985.

	1983		1985	
	Corr.Lin.	M.M.Dif.	Corr.Lin.	M.M.Dif
Paranaguá	0.9518	1.03	0.9517	1.43
Iguape	0.9422	1.06	0.9203	1.48
Santos	0.9380	2.08	0.9429	2.45
Ubatuba	0.9292	2.22	0.9654	3.53
Rio de Janeiro	0.8984	1.08	0.9348	1.70

As elevações de maré dadas pelo modelo são relativas a um zero arbitrário, sendo expressas por valores positivos e negativos, representando a variação da altura da superfície do mar a menos de um nível de referência. Então, para que as observações pudessem ser comparadas aos resultados do modelo, foi necessário subtrair delas os níveis de referência, representados pelo nível médio histórico relativo ao zero de cada marégrafo, o qual não é o mesmo para todos os pontos da costa considerados.

Cabe aqui esclarecer algumas diferenças básicas entre os dois períodos de interesse considerados. Sua escolha foi realizada a partir dos processamentos de correção, edição e análise das alturas horárias de maré da Base Sul do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, em Cananéia. Os resultados desses processamentos envolvem o cálculo dos níveis médios diários, mensais e

anuais, e o aspecto mais importante na escolha dos períodos é relativo às médias diárias do nível do mar, no caso em questão, em Cananéia.

O período considerado no ano de 1983 é caracterizado por elevações de até 40 cm acima do nível médio anual, com a manutenção desta grande elevação por cerca de sete dias, durante um período de maré de sizígia. Isto corresponde a cerca de 25% da variação da maré local. Já o período escolhido no ano de 1985 caracteriza-se por elevações ainda maiores, de até 75 cm acima do nível médio deste ano, mas ocorrendo num período de no máximo 2 a 3 dias, com maré de quadratura. Esta elevação, por sua vez, equivale a quase 50% da amplitude da maré em Cananéia. O que se pretende neste estudo é avaliar a qualidade dos resultados do modelo nas diferentes condições consideradas: uma grande elevação numa época de sizígia e que perdurou por um longo período, em contraste com uma excepcional elevação num período de quadratura, que se estendeu por apenas dois a três dias (Fig. 2).

Na Figura 6, relativa ao processamento no ano de 1983, observa-se que os períodos de quadratura não são tão bem representados, principalmente em Paranaguá, Cananéia e Santos. Ao considerar todo o período de simulação, as maiores discrepâncias em amplitude e fase ocorrem em Paranaguá, sendo ao redor de 40 cm e de duas horas, respectivamente, nas máximas elevações. Esta discrepância diminui gradativamente para o Norte e não chega a 10 cm e a uma hora no Rio de Janeiro. De qualquer forma, os resultados obtidos são razoavelmente satisfatórios.

Um outro ponto a considerar nos resultados, quando confrontados com as cartas sinóticas, é que as condições do vento nos dias 4 e 5 de junho de 1983 (entre 193 e 241 horas de processamento) eram principalmente do quadrante sul-sudoeste, o que causou um empilhamento de água na costa (devido ao transporte de Ekman); esse efeito, sobreposto às marés, não permitiu às vazantes abaixar suficientemente o nível do mar; assim, as enchentes consecutivas causaram as grandes elevações do nível do mar observadas na costa. Os valores da direção do vento observado concordam razoavelmente bem com os valores calculados com a metodologia utilizada, embora as intensidades tenham sido superestimadas por esta metodologia em relação às correspondentes observações.

A Figura 7 mostra as comparações entre resultados do modelo e observações, para a simulação do período no ano de 1985. Para tais comparações, não havia observações em Ubatuba, restringindo o conjunto de estações a Paranaguá, Cananéia, Santos e Rio de Janeiro. Nesta figura, nota-se novamente que as quadraturas não são muito bem representadas. Em Paranaguá e Cananéia, a ocorrência de três preamares e três baixamares por dia, bem definidas, não foi reproduzida pelo modelo. Para Santos e Rio de Janeiro se tem resultados progressivamente melhores.

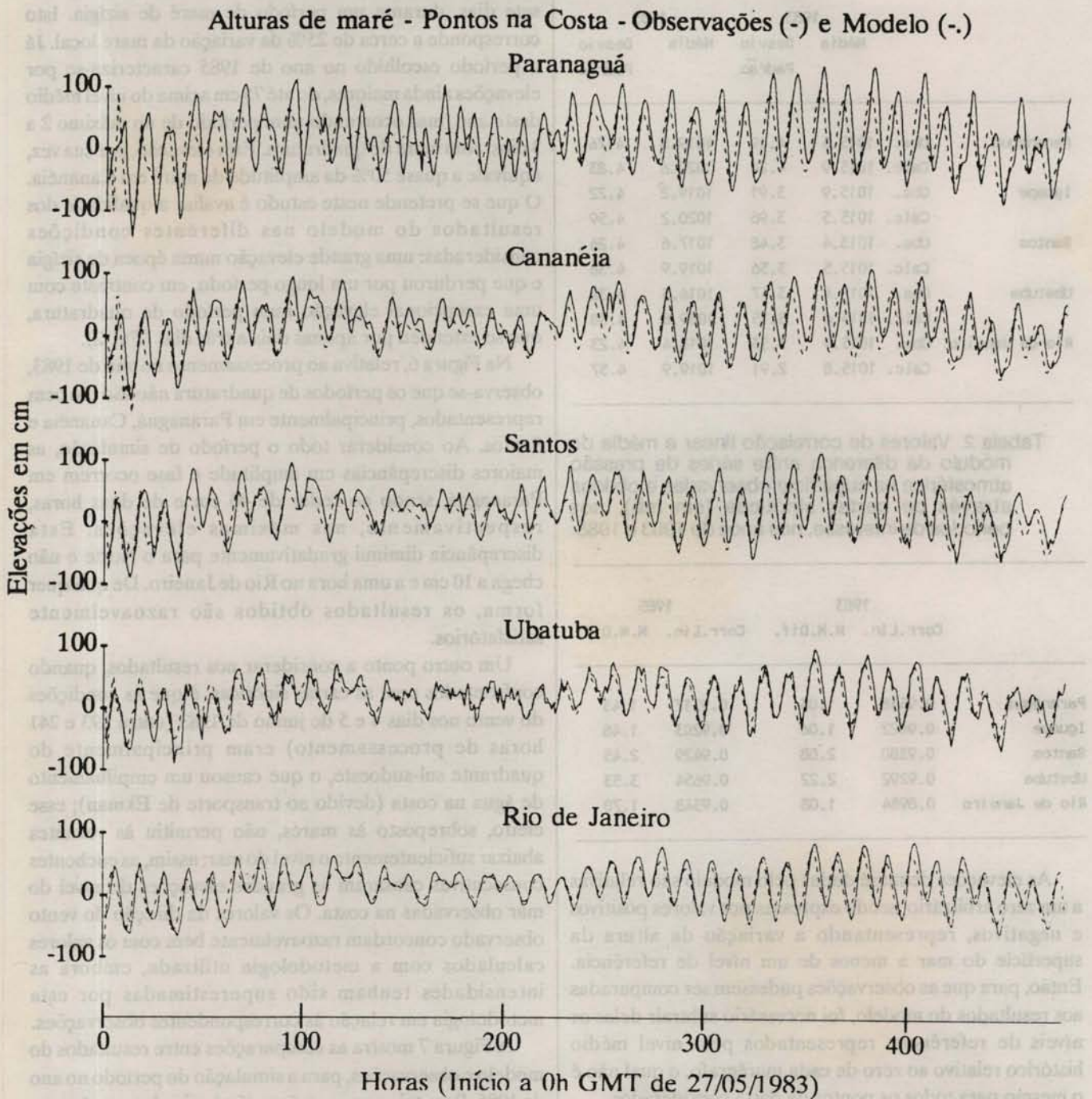


Fig. 6. Comparação das alturas de maré observadas e calculadas pelo modelo na simulação de 1983.

Ainda quanto à Figura 7, é possível notar que os valores das preamaras ocorridas entre 180 e 300 horas de processamento não foram bem simuladas pelo modelo, embora os instantes de ocorrência tanto de preamaras quanto de baixamares, bem como os valores das baixamares, tenham sido bem reproduzidos. Mesmo assim, as simulações não são totalmente satisfatórias, pois em Paranaguá a diferença de fase chegou a duas horas e no Rio de Janeiro a cerca de uma hora.

As cartas sinóticas relativas ao período simulado no ano de 1985 indicam que, desde o dia 5 até o dia 9 de junho (entre 145 e 241 horas de processamento), os ventos foram predominantemente do quadrante Sul-Sudoeste na parte sul da área em estudo; como no caso da simulação anterior, o efeito desses ventos de quadrante Sul causou um acúmulo de água na costa que, adicionado às marés, ocasionou as grandes elevações do nível do mar nos pontos da costa.

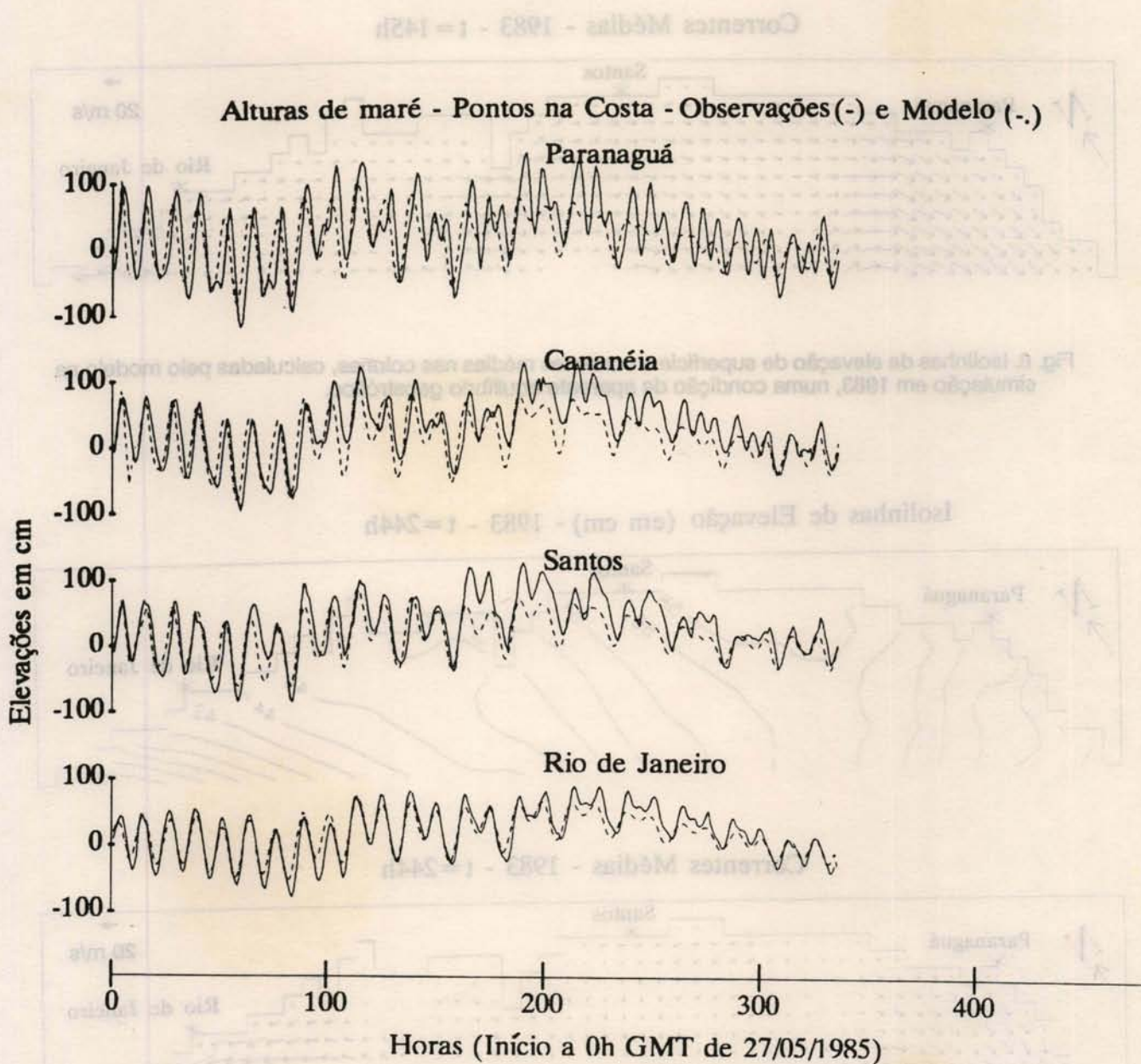
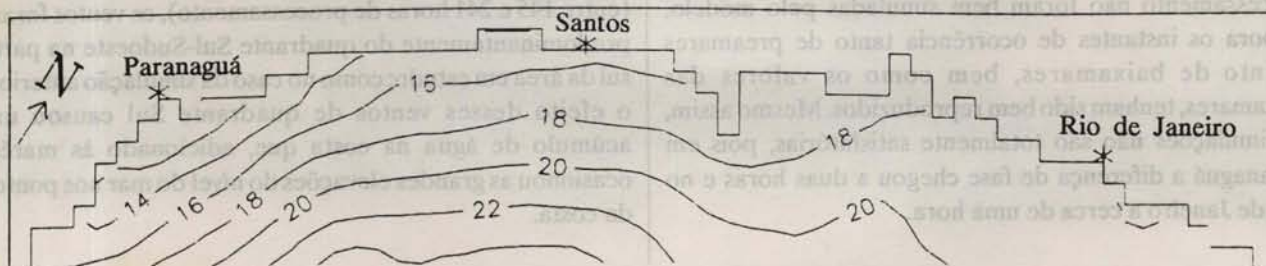


Fig. 7. Comparação das alturas de maré observadas e calculadas pelo modelo na simulação de 1985.

Isolinhas de Elevação (em cm) - 1983 - t = 145 h



Correntes Médias - 1983 - t = 145h

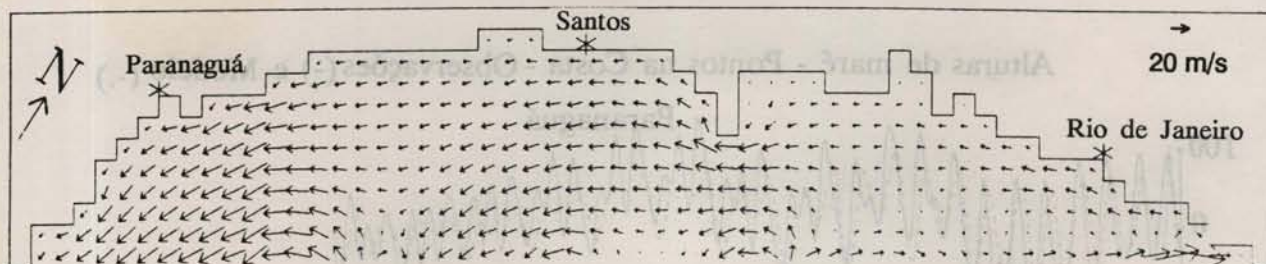
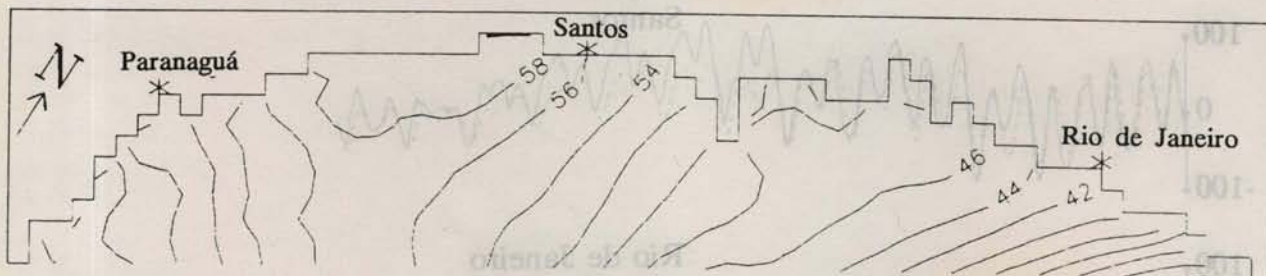


Fig. 8. Isolinhas da elevação de superfície e correntes médias nas colunas, calculadas pelo modelo na simulação em 1983, numa condição de aparente equilíbrio geostrófico.

Isolinhas de Elevação (em cm) - 1983 - t = 244h



Correntes Médias - 1983 - t = 244h

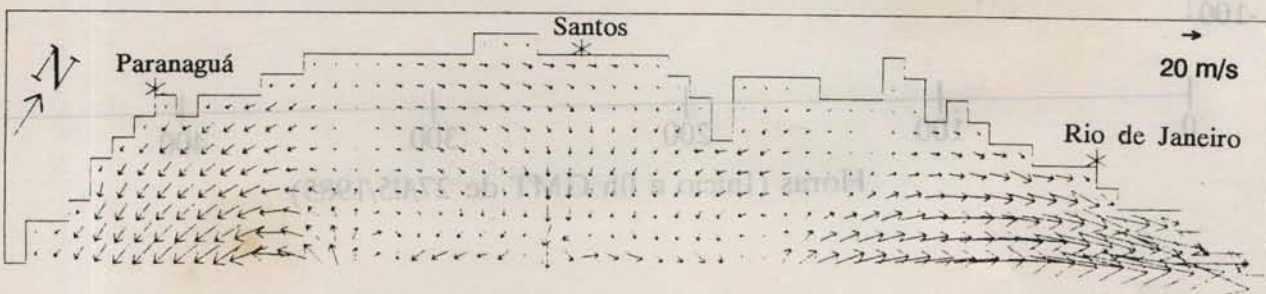


Fig. 9. Isolinhas da elevação de superfície e correntes médias nas colunas, calculadas pelo modelo na simulação em 1983, numa condição transitente induzida pela passagem de frentes frias.

Na Tabela 3 encontram-se os valores das correlações lineares e as médias dos módulos das diferenças entre as séries observadas e calculadas pelo modelo, para os períodos nos anos de 1983 e 1985. De uma maneira geral, os valores das correlações são bastante satisfatórios, estando sempre acima de 0,7, exceto para Paranaguá em ambos os períodos. Isto se deve ao fato da maré em Paranaguá apresentar características não-lineares, com diversas componentes de pequeno fundo não representadas pelo modelo. Já em relação às médias dos módulos das diferenças entre as séries observadas e as resultantes do modelo, esta tabela demonstra que os menores valores são referentes a Rio de Janeiro e os maiores a Paranaguá.

Tabela 3. Valores de correlação linear e média do módulo da diferença entre séries de altura de maré observadas e modeladas (em cm), para pontos da costa, na simulação da circulação total (astronômica + meteorológica) nos períodos de interesse, nos anos de 1983 e 1985

	1983		1985	
	Corr.Lin.	M.M.Dif.	Corr.Lin.	M.M.Dif
Paranaguá	0.5718	35.38	0.5975	35.15
Cananéia	0.7323	23.90	0.7294	28.23
Santos	0.7092	22.82	0.8162	24.40
Ubatuba	0.8183	14.54	-----	-----
Rio de Janeiro	0.8417	13.29	0.8964	13.25

Outra comparação estatística é apresentada na Tabela 4, para 1983 e 1985, mostrando os desvios padrão das médias, tanto das observações como dos resultados do modelo. Estes valores indicam uma atenuação das oscilações por parte do modelo, principalmente em Paranaguá, provavelmente devido à baixa resolução do modelo em áreas costeiras rasas.

Tabela 4. Valores dos desvios padrão das médias das séries de alturas de maré observadas e calculadas pelo modelo (em cm), para pontos da costa, na simulação da circulação total (astronômica + meteorológica) nos períodos de interesse, nos anos de 1983 e 1985

	1983		1985	
	Observações	Modelo	Observações	Modelo
Paranaguá	49.89	32.99	52.17	35.45
Cananéia	38.73	37.46	44.32	36.39
Santos	38.25	30.03	43.09	31.46
Ubatuba	32.12	26.32	-----	-----
Rio de Janeiro	32.52	23.71	37.76	27.35

Discussão

Deve-se observar que componentes de maré de pequeno fundo não foram consideradas no modelo. Entretanto, a sua existência é um indicativo de influências não lineares importantes, que modificam inclusive as componentes principais de maré. Conseqüentemente, o fato de efeitos não lineares influenciarem as marés observadas e de não estarem sendo considerados nas marés modeladas em sua propagação do contorno aberto para a costa, provoca as discrepâncias nas comparações acima citadas. Provavelmente por causa disso as quadraturas não são tão bem reproduzidas pelo modelo, tendo sido notadas significativas diferenças nas máximas elevações, principalmente na simulação no ano de 1985.

Quanto à metodologia de obtenção de dados meteorológicos desenvolvida por Hasse & Wagner (1971) e Hasse (1974), e que foi aqui utilizada, as seguintes considerações podem ser feitas.

As pressões obtidas através da redução dos dados das cartas sinóticas, quando comparadas às observações nas estações, conduzem a bons resultados, conforme pode ser visto nas Figuras 4 e 5, referentes às simulações nos anos de 1983 e 1985, respectivamente.

A partir dos valores diários de pressão na grade meteorológica, foi realizada uma interpolação em base horária; a seguir, também a tentativa de se obter o vento real aproximado, a partir desses valores interpolados e da relação geostrófica com correções, conduziu a valores razoáveis. Contudo, comparações desses cálculos com observações de vento são prejudicadas pela baixa qualidade das medições. Por outro lado, a metodologia utilizada apresenta as vantagens de se ter um caráter filtrado nos campos de pressão e vento e, principalmente, se ter um esquema utilizável em processos de simulação e previsão operacionais.

A estatística básica comparativa demonstra, com efeito, uma concordância significativa entre as pressões calculadas pelas cartas sinóticas e as observadas, com altos valores do coeficiente de correlação (Tab. 1 e 2).

Com este procedimento, obtém-se séries de dados de pressão e vento que, quando incorporados ao modelo como condição de contorno na superfície, permitem a modelagem da correspondente circulação marítima.

Também a adoção de informações da maré meteorológica no contorno, baseadas em proporcionalidade com valores costeiros, conduziu a simulações satisfatórias. Entretanto, este esquema não seria utilizável em previsões operacionais na área. Por outro lado, a especificação desses valores poderia ser realizada a partir dos cálculos de um modelo de macro-escala do Atlântico Sul.

As séries de alturas de maré calculadas pelo modelo e observadas não são totalmente coincidentes na parte sul da região em estudo, devido à geometria e à inclinação do fundo desta porção da plataforma, o que faz com que a interação das componentes da maré astronômica pura e da circulação devida a efeitos meteorológicos seja fortemente não linear e, portanto, não plenamente representável neste modelo linear.

De qualquer forma, as simulações apresentadas neste trabalho constituem uma primeira aproximação dos efeitos meteorológicos extremos observados nos dois períodos simulados. Sob esse aspecto, e levando em consideração a metodologia operacional de introdução de dados meteorológicos, os resultados finais das simulações são bastante satisfatórios.

Castro Filho (1985) utilizou dados de vento na superfície fornecidos pelo National Meteorological Center (NMC) dos Estados Unidos da América, produzidos por modelo atmosférico de macro escala, que foram devidamente interpolados no espaço e no tempo e multiplicados por um fator 2, com base em comparações com observações de navios. Esta simulação foi referente ao período de 29/08 a 08/09/1979 e apresenta conclusões de grande interesse, principalmente através do aninhamento em grades menores, com ênfase ao Canal de São Sebastião. Enquanto que na grade maior as características do fluxo são predominantemente geostróficas, em grades de maior resolução, efeitos ageostróficos são predominantes.

Stech (1990) e Stech & Lorenzetti (1992) pesquisaram a resposta da plataforma sudeste brasileira a frentes frias médias, concluindo que: nos espectros de vento, o principal pico tem periodicidade entre 5 e 6 dias, sendo associado a frentes frias que se deslocam longitudinalmente na direção paralela à costa; com isso, a parte sul do domínio é afetada mais intensamente por estes sistemas meteorológicos; o tempo necessário para que o oceano atinja um estado de equilíbrio é da ordem de 1,5 a 2,5 dias; o balanço de momento normal à costa é geostrófico, o que não ocorre paralelamente à costa; e, finalmente, as anomalias do nível do mar se propagam ao longo da costa, em fase com os sistemas forçantes.

O presente trabalho apresenta algumas similaridades com os de Castro Filho (1985), Stech (1990) e Stech & Lorenzetti (1992), como por exemplo: pesquisas para a implementação de dados meteorológicos em modelos oceânicos; uma razoável reprodução da maré meteorológica em estações costeiras, apenas prejudicada por efeitos de pequena escala e a imposição de condições de contorno não absolutamente exatas; a obtenção de circulações com características geostróficas para ventos típicos; efeitos mais intensos na parte sul da área modelada; e, finalmente, propagação das anomalias do

nível do mar ao longo da costa, em fase com os sistemas forçantes.

Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi o de aplicar uma metodologia de obtenção de dados meteorológicos desenvolvida por Hasse & Wagner (1971) e Hasse (1974), visando considerar as influências dos campos de pressão atmosférica e vento na circulação oceânica de meso-escala nesta plataforma. Para tanto, foi utilizado o modelo numérico hidrodinâmico linear desenvolvido por Harari (1984, 1985) para esta região.

De fato, a metodologia desenvolvida para a obtenção dos dados de pressão atmosférica e vento descreve razoavelmente bem os fenômenos meteorológicos observados nos períodos de interesse. É importante ressaltar que foram utilizadas cartas sinóticas diárias, as quais não contêm informações sobre oscilações de menor período e, portanto, não se tem a variação diurna da pressão e do vento. No entanto, as variações de maior interesse para o presente estudo são as de baixa frequência, com períodos da ordem de alguns dias, e que são as maiores responsáveis pela circulação gerada por efeitos meteorológicos. Desta forma, o caráter filtrado das séries de variáveis meteorológicas obtidas é muito adequado para os processamentos considerados.

Deve-se enfatizar que os dados de pressão observados nas estações do INMET seriam utilizáveis, mas optou-se pelos dados reduzidos de cartas sinóticas, de modo a manter a uniformidade de parâmetros atmosféricos. De qualquer forma, a comparação dos dados de pressão obtidos a partir das cartas com os das estações demonstra sua boa concordância (Fig. 4 e 5 e Tab. 1 e 2). Já a utilização direta dos dados de vento observados em estações costeiras causaria uma série de dificuldades, fornecendo forçantes errôneas e pouco efetivas para a circulação oceânica ao largo. Conseqüentemente, foi utilizada a formulação de Hasse & Wagner (1971) e Hasse (1974), com a estimativa do vento de superfície a partir de cartas sinóticas de pressão, através do cálculo do vento geostrófico e sua correção por expressões empíricas.

As intensidades dos ventos obtidas foram muito maiores do que as dos observados na costa. Entretanto, estes últimos sofrem muita influência da topografia local e contém alto grau de incerteza.

Quanto às elevações do nível do mar nos contornos, a parcela meteorológica foi adotada como sendo proporcional às correspondentes observações costeiras.

A respeito dos resultados obtidos nas simulações hidrodinâmicas, pode-se dizer que quando há um padrão definido de vento, como por exemplo, o associado à condição dominante da Alta do Atlântico Sul, são observadas isolinhas de elevação de superfície que

acompanham a linha da costa, isto é, a linha da costa e as isolinhas de elevação ficam aproximadamente paralelas (Fig. 8).

Por outro lado, quando ocorre uma condição transiente extrema, com a passagem de frentes frias sucessivas (como na simulação do ano de 1983), tem-se grandes mudanças na direção do vento e o modelo sugere que as isolinhas de elevação de superfície se tornam aproximadamente transversais à linha da costa (Fig. 9).

Já na simulação do ano de 1985, não houve esta feição acentuada de isolinhas de elevação transversais à linha da costa como na simulação do ano de 1983; mas, de qualquer forma, nos períodos de vento transiente observou-se uma modificação no padrão paralelo destas isolinhas com a linha da costa.

Em princípio, pode-se associar a predominância da Alta do Atlântico Sul e as isolinhas de elevação paralelas à costa com um sistema aproximadamente geostrófico da circulação oceânica. Por outro lado, a passagem de frentes na área induz sistemas transientes que modificam o padrão geostrófico citado, mudando também a configuração das isolinhas de elevação.

As correlações entre séries observadas e fornecidas pelo modelo, mostradas na Tabela 3, indicam resultados satisfatórios. Em princípio, um aprimoramento do método de obtenção dos parâmetros meteorológicos, como por exemplo, através de cartas sinóticas obtidas em intervalos de 6 horas, tornará possível melhorar bastante a qualidade das simulações.

Para esquemas operacionais de previsão da circulação marítima na plataforma estudada com a metodologia aqui utilizada, espera-se que modelos oceânicos de macro-escala possam fornecer a maré meteorológica no contorno desta área e que modelos atmosféricos possam produzir previsões de grande precisão para o campo de pressão na superfície.

Atualmente, já são realizadas previsões em escala global pelo National Meteorological Center (NMC) dos EUA, com resolução para o Hemisfério Sul de 2,5° em latitude e longitude, a cada 12 horas, para períodos de três dias. Existem também modelos de meso-escala como o Regional Atmospheric Modeling System, que podem ter alta resolução, para estudos de fenômenos atmosféricos locais. O Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), no Brasil, deverá em futuro próximo realizar previsões numéricas das condições meteorológicas na área marítima do presente estudo. Além disso, um modelo de escala oceânica, como o apresentado em Harari (1991), poderá fornecer as alturas de maré meteorológica no contorno aberto. Assim, espera-se no futuro poder aprimorar o trabalho aqui apresentado, de modo a obter resultados cada vez melhores.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr Pedro Leite da Silva Dias, do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, e ao Dr João Antônio Lorenzetti, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela colaboração prestada para a elaboração deste trabalho, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de Bolsa de Mestrado ao primeiro autor. Agradecemos também ao Instituto Oceanográfico da USP e ao Centro de Computação Eletrônica da USP, pelo apoio aos trabalhos realizados.

Referências bibliográficas

- CAMARGO, R. 1991. Modelagem das ondas de maré astronômica e meteorológica na plataforma sudeste brasileira. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 90p.
- CASTRO FILHO, B. M. de 1985. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. Ph.D. Dissertation. University of Miami, RSMAS. 211p.
- FRANCO, A. S. 1988. Tides: fundamentals, analysis and prediction. 2a. Ed., São Paulo, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 249p.
- GODIN, G. 1972. The analysis of tides. Liverpool, Liverpool University Press. 264p.
- HARARI, J. 1984. Modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear da plataforma continental sudeste do Brasil. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico. 203 p.
- _____. 1985. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear, para a simulação e a previsão da circulação na plataforma brasileira entre 23° e 26° S. Bolm Inst. oceanogr., S Paulo, 33(2):159-191.
- _____. 1987. Programa de computador de modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear em meso-escala. Relat. int. Inst. oceanogr. Univ. S Paulo, (15):1-25.
- _____. 1991. Modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear do Oceano Atlântico Sul. Tese de livre-docência. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 2v.

HASSE, L. 1974. On the surface to geostrophic wind relationship at sea and the stability dependence of the resistance law. Beitr. Phys. Atmos., 47:45-55.

& WAGNER, V. 1971. On the relationship between geostrophic and surface wind at sea. Mon. Weath. Rev., 99:255- 260.

HEAPS, N. S. 1972. On the numerical solution of the three dimensional hydrodynamical equations, for tides and storm surges. Mém Soc. r. Sci Liège, ser 6, 2:143-180.

MUNK, W. H. & CARTWRIGHT, D. E. 1966. Tidal spectroscopy and prediction. Phil. Trans. R. Soc., 259(1105):533-581.

STECH, J. L. 1990. Um estudo comparativo da dinâmica da circulação de inverno entre as plataformas continentais das costas sudeste do Brasil e dos Estados Unidos utilizando um modelo numérico. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 224 p.

& LORENZZETTI, J. A. 1992. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime coldfronts. J. Geoph. Res., 97(C6): 9507-9520.

(Manuscrito recebido 4 março 1993; revisto 5 maio 1994; aceito 30 junho 1994)

As condições para a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional são determinadas por fatores locais e globais. Este trabalho apresenta uma análise das condições locais e globais que favorecem a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional. O estudo é baseado em uma análise de dados de observação e em resultados de simulações numéricas. Os resultados mostram que a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional é favorecida por condições locais e globais que favorecem a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional. O estudo é baseado em uma análise de dados de observação e em resultados de simulações numéricas. Os resultados mostram que a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional é favorecida por condições locais e globais que favorecem a ocorrência de fenômenos de circulação de massa de ar em escala regional.

Referências Bibliográficas
CAMARÃO, R. 1991. Modelagem da circulação atmosférica e meteorológica no litoral sul brasileiro. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 90p.
CASTRO FILHO, B. M. de. 1982. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. Ph.D. Dissertation, University of Miami, RSMAS 31p.
FRANCO, A. Z. 1988. Tidal fundamental analysis and prediction. Ed. São Paulo, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. 289p.
GODIN, G. 1972. The tides of the world. Liverpool University Press. 346p.
HARARI, J. 1984. Modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear da plataforma continental sudeste do Brasil. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico e Geológico. 283 p.
1982. Desenvolvimento de um modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear, para a simulação e a previsão da circulação no litoral sul brasileiro. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 129-191.
1987. Programa de computador de modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear em escala regional. Relatório final, Oceanogr. Inst. S. Paulo, (17):1-52.
1991. Modelo numérico hidrodinâmico tridimensional linear do Oceano Atlântico Sul. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. 57.