

## VARIABILIDADE HIDRODINÂMICA EM UM ESTUÁRIO RELACIONADA COM MUDANÇAS BATIMÉTRICAS

**Carina S. Böck, Luiz Paulo de F. Assad e Luiz Landau**

*Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia, Programa de Engenharia Civil,  
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I 214. Cidade  
Universitária. Ilha do Fundão. CEP: 21949-900, Rio de Janeiro, Brasil,  
carina\_bock@yahoo.com.br, <http://www.lamce.ufjf.br>*

**Palavras Chave:** Modelagem Numérica, Estuários, Princeton Ocean Model.

**Resumo.** Com o propósito de avaliar as variações da morfologia do fundo apresentadas pela Baía de Guajará (Pará, Brasil) e, posteriormente, determinar a influência destas alterações sobre o padrão de circulação local através da implementação de um modelo hidrodinâmico, foram construídas duas grade numéricas: uma baseada em dados de batimetria obtidos de uma carta náutica de 1962 e outra fundamentada em dados de um levantamento batimétrico realizado na região em 2002. Como as condições hidrodinâmicas na área de estudo sofrem variações ligadas principalmente aos padrões sazonais de precipitação pluviométrica, foram considerados cenários que representassem o período chuvoso e o período de estiagem para as duas grades. O modelo numérico escolhido para a modelagem hidrodinâmica foi o Princeton Ocean Model (POM). O modelo implementado foi do tipo bidimensional e as forçantes consideradas foram a maré astronômica, o vento e a descarga fluvial. A caracterização da hidrodinâmica do estuário foi obtida através da análise comparativa entre os resultados dos cenários de 1962 e 2002. Os resultados indicam que a Baía de Guajará passou por intensas variações de batimetria e morfologia de fundo, apresentando, de modo geral, um aumento das profundidades em 2002. Os cenários de 2002, comparativamente aos cenários de 1962, apresentaram as maiores velocidades de corrente, principalmente durante o período de enchente, e as maiores vazões, sobretudo durante o período de vazante.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo se torna crescente a importância que a região costeira desempenha sob o ponto de vista do desenvolvimento sócio-econômico. A ocupação da costa e seu uso são principalmente relacionados à exploração da indústria portuária, turística e imobiliária, ao desmatamento e à implementação da pecuária ou monocultura, além do uso das condições naturais para infra-estrutura petrolífera e indústrias em geral. Essas alterações, se desenvolvidas de forma inadequada, podem comprometer as características naturais do ambiente trazendo, em decorrência, uma série de impactos ambientais aos seus ecossistemas.

Em função dessa importância, os estuários, um dos mais importantes ecossistemas da zona costeira, vêm sendo alvo de diversos estudos. Dentre eles, o conhecimento a respeito das características hidrodinâmicas se mostra cada vez mais necessário, já que permite uma visão dinâmica dos processos oceanográficos naturais atuantes na região, bem como a avaliação dos impactos associados a ações antrópicas, como navegação, obras costeiras e derrames de poluentes.

A grande variabilidade temporal e espacial observada em regiões estuarinas sugere que um estudo mais detalhado da hidrodinâmica destas regiões, realizado somente com base em estudos de campo, se tornaria de difícil realização, pois para tal seria necessário um grande número de observações, e de alto custo, já que a coleta de dados é uma etapa onerosa.

Dessa forma, modelos numéricos computacionais têm sido amplamente usados em simulações hidrodinâmicas de estuários, podendo ser aplicados na caracterização da circulação e até mesmo no planejamento e gestão de sistemas costeiros. Nas duas últimas décadas uma grande evolução na modelagem hidrodinâmica vem ocorrendo, fazendo com que os modelos apresentem cada vez mais sofisticadas técnicas de interpolação e extrapolação de dados de campo, tanto no domínio espacial quanto temporal.

Exemplo da realidade observada em muitos estuários, a Baía de Guajará, localizada no estado do Pará, vem apresentando alterações em sua hidrodinâmica e morfologia de fundo. Estudos como os de Mendes *et al.* (2004), Miranda e Mendes (2007) e Gregório (2008) acompanharam as dinâmicas batimétrica e morfológica do fundo da Baía de Guajará. Seus resultados confirmam que a baía vem sofrendo um intenso processo de assoreamento ao longo do tempo, causado principalmente pela grande quantidade de sedimento em suspensão nos rios que nela deságuam, associado a uma perda histórica da capacidade de transporte desses sedimentos.

As questões relativas ao entendimento sobre a circulação da Baía de Guajará e de que forma as variações na batimetria apresentadas ao longo do tempo pela baía modificaram o padrão de circulação local, podem ser investigadas através do auxílio de um modelo hidrodinâmico. Considerando as forçantes ambientais específicas da área, como descarga de água doce, o regime de marés e o efeito do vento, e suas variações durante as estações do ano, torna-se possível uma boa interpretação dos processos dominantes na região.

Visando o entendimento do cenário exposto, o presente trabalho objetiva caracterizar a variabilidade hidrodinâmica do sistema estuarino da Baía de Guajará, localizada no estado do Pará, frente às variações da morfologia do fundo observadas através de resultados de levantamentos batimétricos realizados nos anos de 1962 e 2002.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A Zona Costeira Amazônica Brasileira (ZCAB) representa cerca de 35% da costa do país e estende-se por mais de 2.500 km, desde o Cabo Orange, no Amapá, até a Ponta de Tubarão, no Maranhão, abrangendo a costa dos estados do Amapá, Pará e Maranhão.

Dona de características hidrodinâmicas e climatológicas únicas no Brasil, tais como elevada precipitação anual (de até 3.300 mm), altas temperaturas (maiores que 20°C) com baixa variação térmica anual, ampla plataforma continental (cerca de 330 km), regime de macromarés (com valores máximos de 8 m no Maranhão, 6 m no Pará e 12 m no Amapá) e descarga do maior rio do mundo em termos de extensão e volume, o rio Amazonas (Pinheiro, 1987).

De grande beleza natural de seus ambientes e ecossistemas costeiros, a ZCAB possui uma das maiores faixas contínuas de manguezal do mundo, bem como outros ambientes, como: planícies de marés, pântanos, planícies de inundação, estuários, praias, dunas e florestas tropicais.

Na zona central da ZCAB está localizado o estuário do rio Pará, que é fortemente influenciado pelo rio Amazonas através da conexão entre esses rios proporcionada pelo furo de Breves, a sudoeste da Ilha de Marajó (Gregório e Mendes, 2009). Com cerca de 300 km de extensão, o estuário do rio Pará inicia-se na Baía das Bocas, no município de Breves, prosseguindo pelo rio Pará, que recebe toda a massa de água do rio Tocantins.

É neste estuário que a Baía de Guajará está inserida. Situada, aproximadamente, entre os paralelos 1° 22' S e 1° 30' S e os meridianos 48° 25' W e 48° 35' W (Pinheiro, 1987), a Baía de Guajará (Figura 1) possui cerca de 30 Km de extensão e 4 Km de largura e se distancia cerca de 120 Km do Oceano Atlântico.

A margem esquerda da Baía de Guajará é composta de numerosas ilhas e canais, sobressaindo-se as ilhas das Onças, Jararaca, Mirim, Paquetá Açu e Jutubá. Ao longo da margem direita encontra-se a cidade de Belém e mais ao norte, separados pelos furos do Maguari e das Marinhas, as ilhas do Outeiro e do Mosqueiro, respectivamente.

Em sua margem direita, em frente à Ilha das Onças, localiza-se o Porto de Belém, que movimentava cerca de 1.000.000 t de carga por ano, sendo que as principais cargas operadas são: madeira, pimenta, palmito, peixe, camarão, castanha-do-Pará e trigo (Gregório, 2008).

A uma distância de 5 Km do Porto de Belém, está instalado o Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (Miramar), projetado para realizar importação e

distribuição de inflamáveis líquidos e gasosos dentre eles: óleo diesel, gás liquefeito de petróleo, querosene para avião e gasolina comum e também abastecimento de navios com a utilização de balsas tanques (Gregório, 2008).

O Terminal Portuário do Outeiro, a 38 Km do Porto de Belém, movimenta dois tipos de cargas: granéis sólidos, como soja, trigo, cimento e cavacos de madeira, e granéis líquidos, especialmente os derivados de petróleo (Gregório, 2008).

Indústrias e núcleos habitacionais também são encontrados às margens da baía e muitos pontos de lançamento de efluentes domésticos e industriais despejam diariamente grande volume de resíduos sólidos e líquidos diretamente nas águas da baía. Outras fontes poluidoras incluem postos de abastecimento para embarcações, pequenos portos sem controle ambiental e embarcações velhas encalhadas.

Os principais fatores relacionados às características hidrodinâmicas da Baía de Guajará estão descritos nos tópicos seguintes.

## 2.1 Características meteorológicas

O clima da região é quente e úmido, com umidade relativa média do ar de 84 %, pressão atmosférica média anual de 1010 hPa e precipitação pluviométrica total média anual de 2893,1 mm (Gregório, 2008). Para a região de Belém, de acordo com Gregório (2008), a temperatura média do ar apresenta pequena variação sazonal, registrando valores entre 26° C e 26,5° C durante todo o ano.

Não há distribuição regular das chuvas ao longo do ano. Existe uma redução no volume de chuvas entre os meses de junho a novembro, que é a estação "menos chuvosa", chamada regionalmente de verão, e aumento no volume de chuvas entre os meses de dezembro a maio, estação "chuvosa" denominada regionalmente como inverno (Pinheiro, 1987). A partir da comparação entre os resultados apresentados por Brasil Sudam em 1974 (Pinheiro, 1987) e os obtidos na estação meteorológica do Campus da Universidade Federal do Pará, Pinheiro (1987) concluiu que janeiro, fevereiro e março são os meses mais chuvosos, enquanto julho, agosto e setembro são os meses menos chuvosos.

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, na Zona Litorânea Norte-Nordeste, faixa costeira que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas (Amarante *et al.*, 2001). A combinação entre as brisas diurnas e os alísios de leste resulta em ventos médios anuais entre 5 m/s e 7,5 m/s na parte norte dessa região, que abrange os litorais do Amapá e Pará (Amarante *et al.*, 2001).

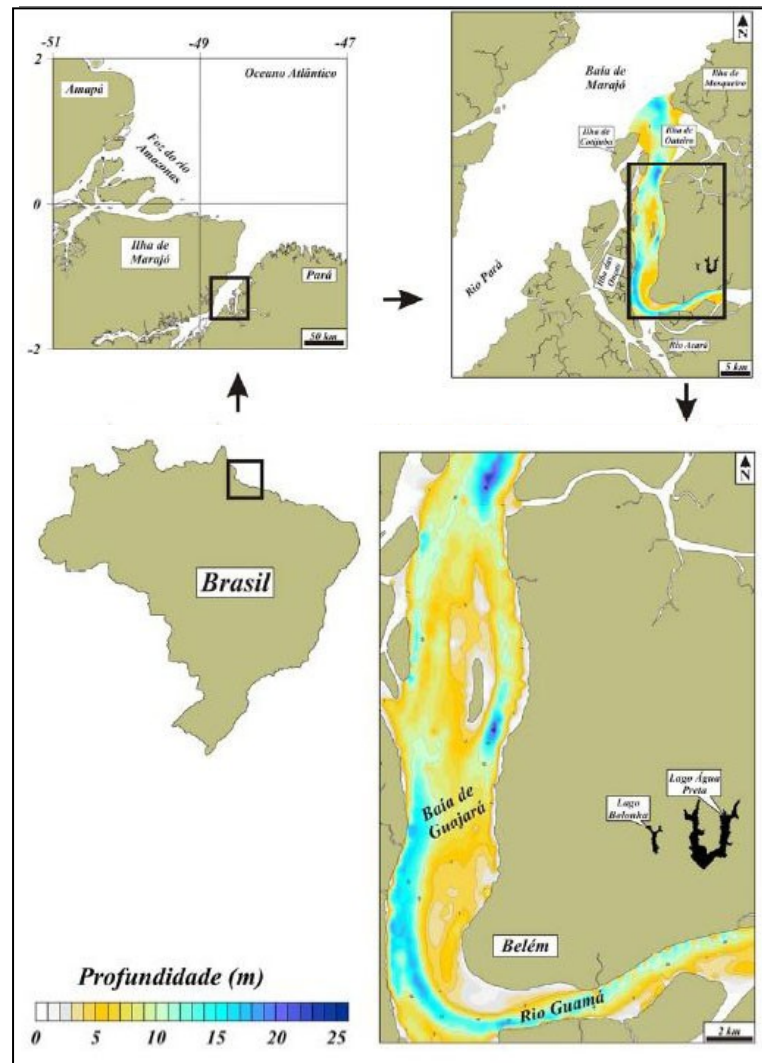


Figura 1. Localização da Baía de Guajará, no Pará.  
Fonte: Gregório (2008).

## 2.2 Características hidrográficas

De acordo com a Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente - SECTAM, os rios Guamá, Moju e Acará, são as principais drenagens da sub-bacia Guamá-Moju (Figura 2), que possui uma área de aproximadamente 87.400 km<sup>2</sup> e corresponde a 7 % da área territorial do estado do Pará (Gregório e Mendes, 2009).

É na confluência entre os rios Guamá e Acará-Moju que ocorre a formação da Baía de Guajará, que se estende até a Ilha do Mosqueiro, onde passa a fazer parte da Baía do Marajó, que tem ligação direta com o Oceano Atlântico. Também recebe contribuição das águas do rio Pará (Gregório, 2008).

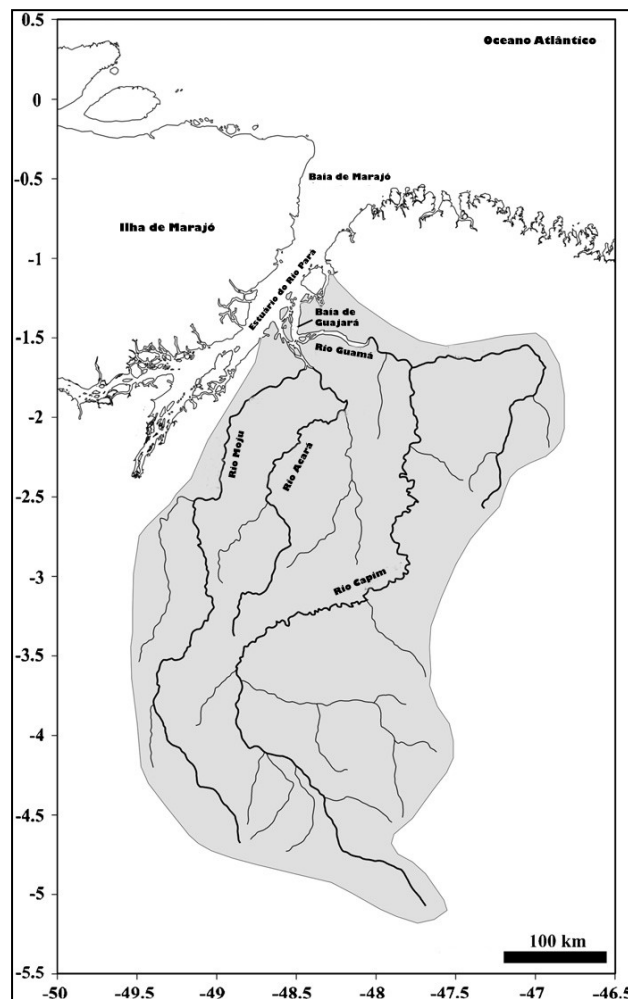


Figura 2. Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais linhas de drenagem.  
Modificado de Gregório e Mendes (2009).

O rio Guamá desempenha forte influência na Baía de Guajará, seja pela descarga hídrica ou sedimentar, e sua contribuição é percebida ao longo de toda a margem direita da baía (Gregório, 2008).

As variações nas vazões dos rios Acará, Guamá e Moju e seus afluentes são significativas durante o ano e estão relacionadas ao regime de chuvas a que a região está sujeita, obedecendo a alternância entre o período chuvoso e o de estiagem (Pinheiro, 1987). Dados obtidos da estação Bom Jardim entre os anos de 1965 e 1975 demonstram que durante este período as vazões máximas ocorreram em março, abril e maio, período final da estação chuvosa (Pinheiro, 1987). As variações obtidas entre as vazões do rio nestes mesmos meses e nos últimos meses da estação de estiagem (onde são encontradas as vazões mínimas) são muito grandes: em muitos anos a vazão máxima foi dez vezes superior à vazão mínima (Pinheiro, 1987).

### 2.3 Morfologia do fundo

Segundo Miranda e Mendes (2007), canais (da Ilha das Onças, do Meio, Oriental e

do rio Guamá), depósitos sedimentares (bancos arenosos denominados Banco da Barra e Barra do Guajará-Açú e os bancos lamosos denominados Banco Sul da Cidade, Banco do Meio e Banco da Cidade, barras e planícies areno-lamosas) e afloramentos rochosos são os três tipos de feições fisiográficas que podem ser encontradas no assoalho da Baía de Guajará (Figura 3).

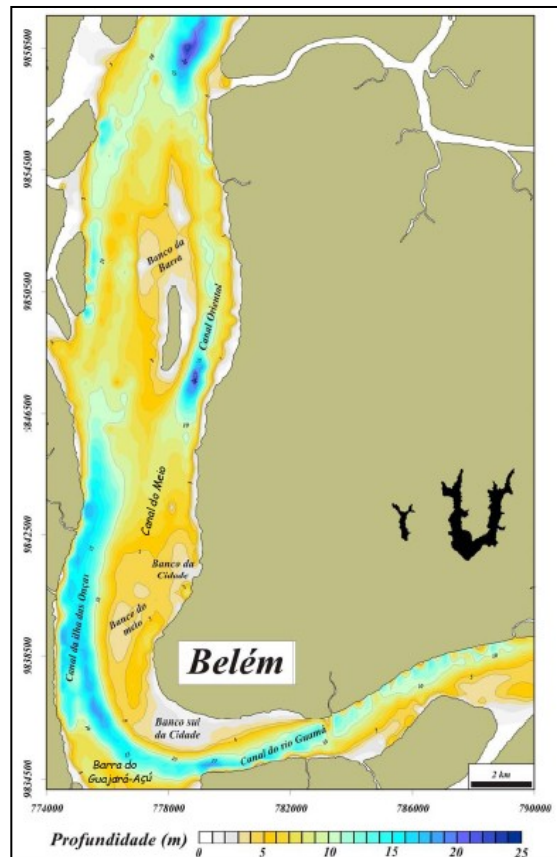


Figura 3. Unidades morfológicas encontradas na Baía de Guajará.

Fonte: Gregório (2008).

Após avaliarem a morfologia de fundo da Baía de Guajará, Pinheiro (1987) e Miranda e Mendes (2007) concluíram que, em pouco mais de um século, canais profundos e extensos foram destruídos e novos depósitos sedimentares foram formados. Atribuíram tais mudanças às alterações ocorridas na hidrodinâmica local (Miranda e Mendes, 2007).

## 2.4 Características oceanográficas

A Baía de Guajará possui zonas rasas, de aproximadamente 5 metros de profundidade, e também canais profundos, com cerca de 25 metros de profundidade (Gregório e Mendes, 2009). A salinidade na região é muito baixa não atingindo sequer valores superiores a 5 na boca do estuário (Paiva *et al.*, 2006). Nos períodos "chuvosos" a salinidade é praticamente nula na baía (Gregório e Mendes, 2009). Suas

águas são ligeiramente ácidas, apresentam temperaturas elevadas em torno de 27,1° C a 33,7° C e baixa transparência (Paiva *et al.*, 2006).

A maré é semi-diurna, com amplitude entre 2,3 m em marés de quadratura e 3,8 m em marés de sizígia (Gregório, 2008). Excepcionalmente, em outros períodos as marés na região podem apresentar amplitudes muito acima destas medidas, como em 1923 quando alcançou 4,47 m (Pinheiro, 1987). A onda de maré pode ser percebida a cerca de 220 Km da Baía de Marajó, dentro dos rios Guamá e Capim, que também apresentam variações semi-diurnas em seus níveis (Pinheiro, 1987).

Durante o período de enchente, que dura cerca de 5 horas (Pinheiro, 1987), as correntes de maré fluem para o sul da Baía de Guajará e no período de vazante, que dura cerca de 7 horas, as correntes de maré fluem para o norte da baía. Segundo Pinheiro (1987), o atrito de fundo no estuário é responsável por esta acentuada assimetria nas curvas de marés.

Apesar da forte imposição das correntes de marés e do fluxo fluvial, as ondas geradas pelo vento representam um importante agente da dinâmica do estuário Guajará, propiciando a mistura das águas e a ressuspensão praticamente constante dos sedimentos de fundo nos bancos e margens.

### 3 METODOLOGIA

Com o propósito de observar as variações da morfologia de fundo sofridas pela Baía de Guajará e, posteriormente, determinar a relevância destas alterações sobre a hidrodinâmica local através da implementação de um modelo hidrodinâmico, foram considerados dois cenários distintos.

O primeiro cenário foi fundamentado em dados de batimetria e margem obtidos a partir da 1ª edição da carta náutica nº 316 (de Mosqueiro a Belém) de 1962 (Figura 4a), publicada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN (Marinha do Brasil, 1962).

O outro considerou os dados provenientes de um levantamento batimétrico realizado em 2002 (Figura 4b), cuja malha de amostragem (cerca de 142 Km<sup>2</sup>) compreendia oitenta linhas transversais à Baía de Guajará e ao rio Guamá, com espaçamento de 500m entre cada uma delas, e três linhas longitudinais paralelas entre si (Gregório, 2008). Os dados relativos à posição e profundidade foram registrados em intervalos de 100 m.

#### 3.1 Construção das malhas numéricas

Para a construção das grades numéricas optou-se pelo uso do *Seagrid*, aplicativo do software *Matlab*, já que permite a construção de grades curvilíneas, ortogonais e com resoluções variáveis, adequadas aos contornos de rios, estuários e regiões costeiras que são, em geral, curvos, não sendo facilmente representados em grades retangulares.

As grades construídas a partir dos dados batimétricos dos anos de 1962 e 2002 possuem 250 linhas e 200 colunas. Buscou-se manter ambas as grades com as



mesmas resoluções espaciais. Na grade dos dados de 1962, a resolução zonal varia entre 25 e 45 m e a resolução meridional entre 80 e 135 m, enquanto na grade referente ao ano de 2002 a resolução zonal varia entre 20 e 45 m e a resolução meridional entre 80 e 150 m.

Durante a construção das malhas buscou-se o aumento de resolução nas áreas da Baía de Guajará que, de acordo com estudos publicados anteriormente, apresentaram as maiores variações em sua morfologia: Furo do Maguarí (próximo ao distrito de Icoaraci) e nos Bancos da Ilha da Barra, do Meio, da Cidade e Sul da Cidade. Dessa forma serão gerados resultados mais precisos nas áreas de interesse.

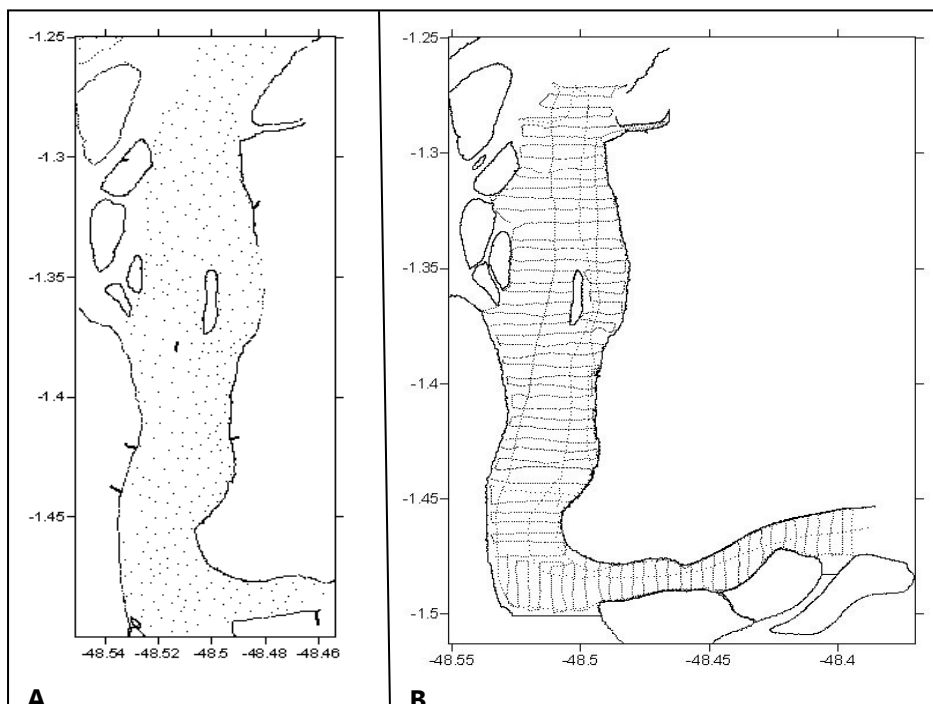


Figura 4. Disposição dos pontos *a)* da carta náutica nº 316 de 1962 e *b)* da malha do levantamento batimétrico realizado em 2002.

Após a interpolação dos dados de batimetria à grade construída, foram gerados arquivos com matrizes referentes às características das grades: espaçamento entre os pontos no eixo das abscissas; espaçamento entre os pontos no eixo das coordenadas; ângulo de inclinação; batimetria, latitude e longitude de cada ponto da grade. Esses dados foram usados para a construção de mapas batimétricos (Figura 5) e para alimentar o modelo numérico.

De posse dos mapas batimétricos gerados, é possível observar que as resoluções usadas na construção das grades permitiram que as principais feições morfológicas da Baía de Guajará fossem representadas. O Canal da Ilha das Onças e o Canal Oriental são claramente visualizados nos dois mapas batimétricos. No mapa de 2002 ainda é possível identificar os bancos do Meio, da Cidade e Sul da Cidade.

Na batimetria de 1962, o ponto mais profundo possui cerca de 47,9 m e a profundidade média é de 5,8 m. O intervalo de profundidades mais freqüente na

batimetria é o que varia de 5 m à 7 m, correspondendo a cerca de 25,3 % do total de pontos. Os intervalos de 3 à 5 m e de 1 m à 3 m são, respectivamente, os segundo e o terceiro intervalos de profundidades mais freqüentes, correspondendo à 23,6 % e à 14,1 % do total de pontos.

Na batimetria de 2002, o ponto mais profundo possui cerca de 27,7 m e a profundidade média é de 7,6 m. O intervalo de profundidades mais freqüente na batimetria é o que varia de 7 m à 9 m, correspondendo a cerca de 21,2 % do total de pontos. Os intervalos de 3 m à 5 m e de 5 m à 7 m são, respectivamente, os segundo e o terceiro intervalos de profundidades mais freqüentes, correspondendo à 17,1 % e à 15,9 % do total de pontos.

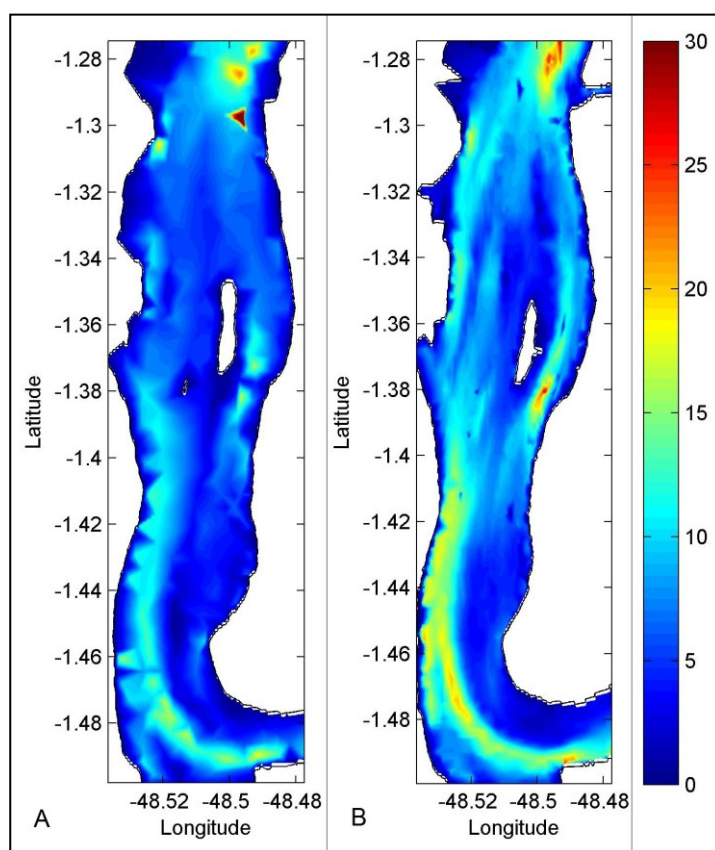


Figura 5. Mapas batimétricos obtidos a partir da interpolação dos dados das grades numéricas de a) 1962 e b) 2002. A escala de cores indica a profundidade (em metros).

Para avaliar as diferenças espaciais entre as profundidades dos anos de 1962 e 2002, as matrizes das batimetrias foram interpoladas para uma grade de latitude e longitude regulares e a diferença entre elas foi determinada. Dessa forma, é possível observar que ao longo da margem esquerda, desde o Canal do Rio Guamá até a parte superior da baía, e também em parte do Canal Oriental e próximo ao distrito de Icoaraci, houve um aumento das profundidades em 2002. Em 2002, diminuição de profundidades foi observada na parte central e inferior da baía, até o canal do rio Guamá, e também em parte da margem direita da região superior da baía. É

importante ressaltar que as linhas de costa dos anos de 1962 e 2002 apresentam grande diferença entre seus contornos.

### 3.2 Implementação do modelo numérico hidrodinâmico

O modelo numérico escolhido para a modelagem hidrodinâmica da Baía de Guajará foi o *Princeton Ocean Model* (POM), modelo de domínio público que foi desenvolvido no *Atmospheric and Oceanic Sciences Program* da Universidade de Princeton e no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) da *National Ocean and Atmosphere Agency* (NOAA).

Elaborado por Alan Blumberg e George Mellor na década de 70, o POM é um modelo numérico tridimensional, não linear, com superfície livre e de equações primitivas resolvidas por diferenças finitas (Blumberg e Mellor, 1987; Mellor, 2003).

As variáveis prognósticas são as componentes zonal ( $u$ ), meridional ( $v$ ) e vertical ( $w$ ) da velocidade, a elevação da superfície livre, a temperatura e a salinidade, e duas quantidades que caracterizam a turbulência (energia de turbulência cinética e turbulência de macroescala). Os efeitos turbulentos são tratados através do modelo de fechamento turbulento de segunda ordem nível 2,5 de Mellor e Yamada (1982), permitindo uma melhor representação das camadas de Ekman de superfície e de fundo, as quais são de fundamental importância em águas costeiras (Blumberg e Mellor, 1987).

O POM permite a realização de simulações bidimensionais e tridimensionais em função da técnica de separação de modos (*mode splitting*). O modo externo é bidimensional, calcula a elevação da superfície e as velocidades barotrópicas e usa um menor passo de tempo, baseado na condição de Courant Friedrichs Lewy (CFL) e na velocidade de ondas longas de superfície. O modo interno calcula as velocidades baroclínicas, a salinidade, a temperatura e os parâmetros de turbulência, usando um passo de tempo mais longo, baseado na condição de CFL e na velocidade de ondas internas (Blumberg e Mellor, 1987; Mellor, 2003). A técnica de separação de modos proporciona uma economia de tempo de processamento ao mesmo tempo que não compromete a estabilidade do modelo, pois permite que sejam utilizados intervalos de tempo diferentes na integração do modelo.

O POM utiliza coordenadas ortogonais curvilíneas na horizontal, o que possibilita a resolução variável de grade e o esquema de diferenciação espacial aplicado é conhecido como grade C de Arakawa (Messinger e Arakawa, 1976). Já na vertical, o POM utiliza a coordenada sigma ( $\sigma$ ), que substitui a coordenada vertical ( $z$ ) e tem como referência o fundo e a superfície livre do mar. Esse tipo de substituição é muito útil em regiões que apresentam grandes variações de topografia, já que a grade numérica apresentará o mesmo número de camadas em qualquer espessura, o que permite boa representação tanto de águas rasas como de águas profundas.

No POM, a discretização do conjunto de equações utilizado pelo modelo no tempo e no espaço horizontal é realizada através de um esquema explícito de 2ª ordem centrado no tempo e no espaço (*Leap-frog*), esquema este capaz de resolver

apropriadamente os processos altamente dependentes do tempo e não-lineares (Blumberg e Mellor, 1987). Para a discretização das equações no espaço vertical, é utilizado um esquema implícito chamado método da inversão de linha (Kowalik e Murty, 1993).

Os tipos de modelos hidrodinâmicos mais adequados para a modelagem de um dado problema em um corpo d'água dependem do tipo de escoamento e das características da estrutura vertical da coluna d'água, sobretudo no que tange as condições de estratificação.

Assim, para a adequação do método computacional ao estudo da hidrodinâmica da Baía de Guajará, devemos analisar suas principais características (Pinheiro, 1987): ausência de estratificação térmica marcante; variações laterais de salinidade; pequenas componentes dos vetores velocidade na direção vertical; mecanismo de circulação dominado por fortes correntes de maré (com amplitudes entre 3,0 m e 2,5 m).

Pinheiro (1987) ressalta que durante os momentos próximos ao início das enchentes e das vazantes são evidenciadas as características da Baía de Guajará como um estuário parcialmente misturado e com variações laterais de salinidade decorrentes da morfologia. Porém, no decorrer das enchentes e das vazantes, o estuário assume características do tipo homogêneas com águas mais diluídas na superfície (Pinheiro, 1987).

Estas análises do comportamento hidrodinâmico da Baía de Guajará indicam que o sistema pode ser considerado homogêneo, comportamento este dominado pelo efeito barotrópico. Desta maneira, o modelo implementado para a Baía de Guajará foi o do tipo bidimensional (modo barotrópico), no modo 2 do POM. O esquema de advecção usado foi o do tipo centrado. Foi estipulado um passo de tempo externo (dte) igual a 0,5 segundos, obedecendo a condição CFL.

Para representar os cenários hidrodinâmicos mais característicos da Baía de Guajará, foram considerados como forçantes na modelagem a maré astronômica, o vento e a descarga fluvial.

Para a introdução da elevação de maré no contorno norte do modelo hidrodinâmico da Baía de Guajará, foram obtidas no Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (Femar, 2000) as constantes harmônicas da estação maregráfica Companhia de Pesca Pina, escolhida em função de sua proximidade com o contorno norte da grade numérica, local de entrada das correntes de maré. A partir das constantes harmônicas  $Q_1$ ,  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $N_2$ ,  $M_2$ ,  $S_2$  e  $K_2$  da estação supracitada, duas séries de marés, uma para o mês de abril de 2007 e outra para o mês de outubro de 2007, foram reconstruídas através do programa de análise e previsão de marés PACMARÉ desenvolvido pelo Vice Almirante Alberto dos Santos Franco (Franco, 1992). A definição do período de simulação (ano de 2007) foi feita em função da disponibilidade de dados de intensidade e direção dos ventos durante este período.

A frequência de ocorrência do vento por direções, para o mês central de cada uma

das estações do ano (janeiro, abril, julho e outubro), no ano de 2007 para a região de Belém foi obtida através de simulações numéricas com o modelo regional *Mesoscale Modeling – Fifth Generation* (MM5) a partir de resultados gerados anteriormente pelo modelo global *Global Forecast System* (GFS) (Piatam-Mar, 2008). Os resultados indicam que a maior frequência, durante todas as estações do ano, é de ventos de leste, que correspondem a mais de 70 % dos ventos em outubro e cerca de 40 % nos outros meses.

A opção do uso do vento constante no espaço foi tomada em função das pequenas dimensões da área modelada. O vento foi também considerado constante no tempo durante as simulações, pois os resultados dos experimentos de cenários com vento e sem vento apresentaram variações não significativas.

Em função da ausência de informações na literatura relativas aos valores de vazões dos rios Guamá, Acará e Moju próximo à confluência entre estes rios e a Baía de Guajará, mas sabendo da grande influência que a descarga fluvial possui sobre a hidrodinâmica local (Pinheiro, 1987; Silveira, 1989; Mendes *et al.*, 2004; Paiva *et al.*, 2006; Miranda e Mendes, 2007; Gregório, 2008; Gregório e Mendes, 2009), foram atribuídas vazões constantes aos rios Guamá e Acará-Moju.

Além disso, foi considerada a grande variação das vazões destes rios ao longo do ano, descrita por Pinheiro (1987) para a estação fluviométrica Bom Jardim, localizada no rio Guamá à cerca de 150 Km de Belém, entre os anos de 1965 e 1975, comportamento este intimamente relacionado às variações do regime de chuvas da região (período chuvoso e de estiagem), conforme mencionado anteriormente.

Como a região de estudo é dominada pelo regime de marés (Pinheiro, 1987) e as condições hidrodinâmicas sofrem variações anuais ligadas principalmente aos padrões sazonais de precipitação (Pinheiro, 1987), que influenciam fortemente as descargas fluviais, os cenários desta modelagem levam em consideração os cenários de influência fluvial (ciclo anual) e os ciclos lunares (sizígia e quadratura). Em função dos resultados apresentados anteriormente, também foi considerado nas simulações hidrodinâmicas vento de leste constante no tempo e no espaço, típico na região durante todo o ano de 2007 (Piatam-Mar, 2008), com velocidade de 6 m/s.

Para as duas grades, de 1962 e 2002, o cenário do período chuvoso envolve as vazões máximas dos rios Guamá e Acará-Moju, que ocorrem normalmente no mês de abril (mês posterior aos meses mais chuvosos do ano, segundo relatado ao longo do trabalho), conforme apresentado por Pinheiro (1987). Foram adotadas vazões, constantes no tempo, de 2200 m<sup>3</sup>/s para o rio Guamá e 2000 m<sup>3</sup>/s para o rio Acará-Moju. Os dados de marés usados foram referentes ao do mês de abril de 2007.

Para as duas grades, de 1962 e 2002, o cenário do período de estiagem envolve as vazões mínimas dos rios Guamá e Acará-Moju, que ocorrem normalmente no mês de outubro (mês posterior aos meses menos chuvosos do ano), conforme apresentado por Pinheiro (1987). Com este intuito, foram adotadas vazões, constantes no tempo, de 1100 m<sup>3</sup>/s para o rio Guamá e 1000 m<sup>3</sup>/s para o rio Acará-Moju, valores de vazões equivalentes a metade dos valores de vazões máximas usados nas simulações do

período chuvoso. A série de maré usada foi a do mês de outubro de 2007.

Estas simulações têm como objetivos principais o conhecimento da hidrodinâmica da Baía de Guajará, bem como avaliar as variações na circulação local relacionadas às variações da batimetria local.

Dessa forma, para a modelagem da Baía de Guajará, foram definidos os cenários para a modelagem, apresentados na Figura 6. Foram simulados no modelo hidrodinâmico períodos de 30 dias, que equivalem à 720 horas, para todos os cenários, a fim de representar os períodos de sizígia e quadratura.

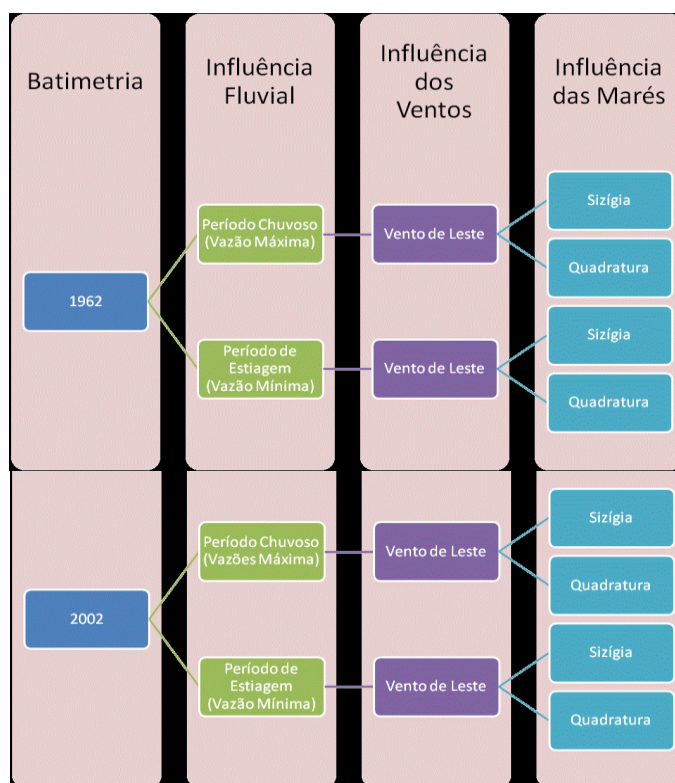


Figura 6. Cenários ambientais considerados para a modelagem hidrodinâmica de Baía de Guajará.

#### 4 RESULTADOS

Tanto durante a sizígia quanto durante a quadratura, as maiores velocidades das correntes em todos os cenários considerados na modelagem são encontradas durante a enchente, concordando com as observações feitas por Pinheiro (1987) e Silveira (1989).

É observado que, nos cenários de 1962, as velocidades máximas de vazante ocorrem primeiramente no Canal da Ilha das Onças e na parte inferior do Canal Oriental. Já nos cenários de 2002, as velocidades máximas de vazante são encontradas primeiramente no Canal da Ilha das Onças e na parte superior da baía, próximo à margem esquerda.

Os resultados do modelo reproduzem de forma satisfatória as feições dinâmicas

descritas por Pinheiro (1987) e Silveira (1989) para os períodos de final de enchente e início de vazante, para marés de sizígia e final de vazante e início de enchente para marés de quadratura.

A Figura 7 representa o mapa da distribuição espacial das correntes, obtida através da modelagem, no período de final da vazante e início de enchente durante a quadratura. É claramente observado um fluxo de vazante próximo a margem esquerda da baía, sobre o Canal da Ilha das Onças, enquanto na margem direita da baía, próximo ao Canal do Meio e ao Canal Oriental, as correntes de enchente já são observadas. Este padrão de dinâmica de correntes apresenta grande semelhança ao padrão descrito por Pinheiro (1987) e Silveira (1989), também apresentado na Figura 7.

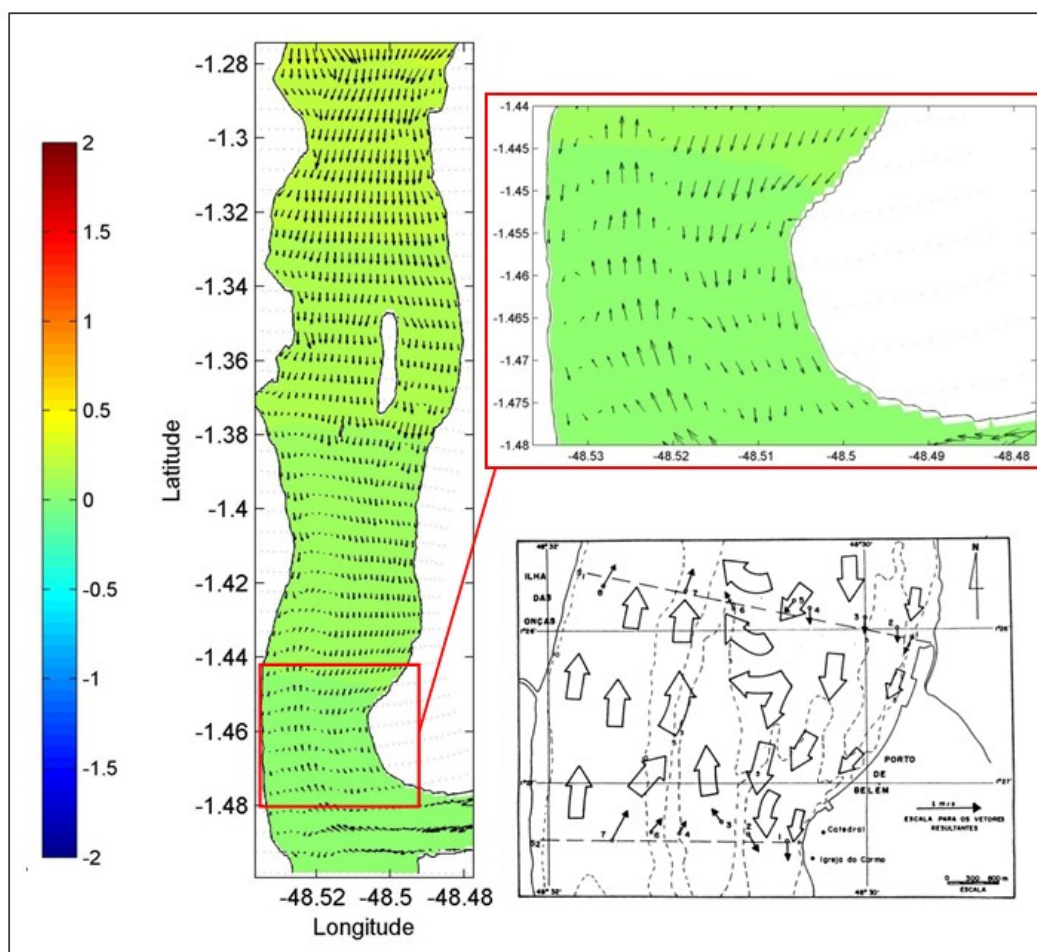


Figura 7. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a quadratura para o momento de início da enchente. Os vetores indicam o sentido e a intensidade das correntes e a escala de cores indica a elevação da superfície em metros. A figura em preto e branco representa o quadro da dinâmica das correntes de marés de quadratura, em superfície, na Baía de Guajará, para o momento de início da enchente apresentado por Pinheiro (1987).

Para avaliar as diferenças entre as magnitudes das correntes entre os cenários, as matrizes das magnitudes de corrente de cada um dos quatro cenários, em um mesmo instante de sizígia, foram interpoladas para uma grade de latitude e longitude



regulares. Foram construídas figuras com a diferença entre as magnitudes nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Figura 8a) e com a diferença entre as magnitudes nos cenários de estiagem 1962 e 2002 (Figura 8b). Nessas figuras, os valores positivos indicam um aumento da magnitude da corrente no cenário de 2002 considerado e os valores negativos indicam uma redução da magnitude da corrente no cenário de 2002. Valores iguais a zero indicam que não houve variação na magnitude das correntes entre os cenários.

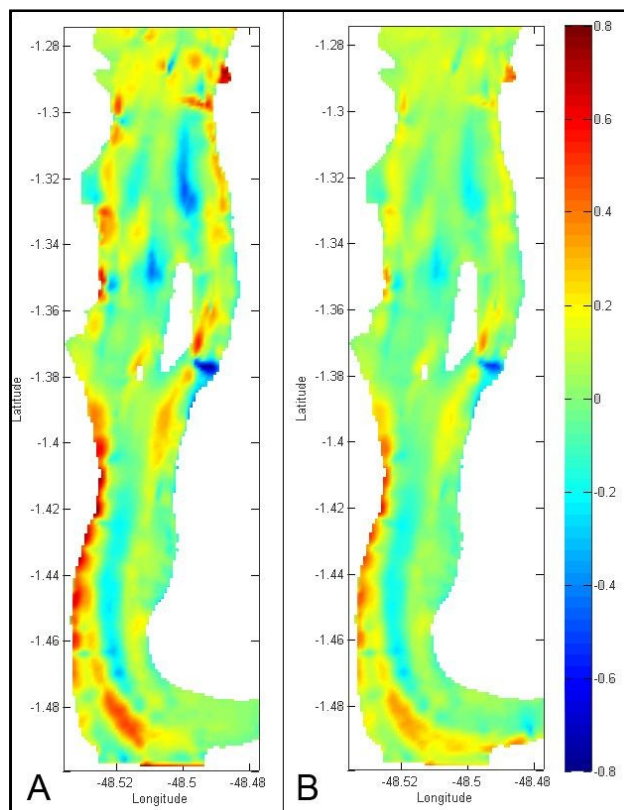


Figura 8. Diferença entre a matriz de magnitude das correntes, em um instante de sizígia, entre a) os cenários chuvosos de 1962 e 2002 e b) entre os cenários de estiagem de 1962 e 2002. A escala de cores indica a diferença entre as magnitudes (em m/s). Os valores positivos indicam aumento da magnitude no cenário de 2002 e os valores negativos indicam redução da magnitude no cenário de 2002.

As maiores diferenças entre as magnitudes das correntes são encontradas entre os cenários chuvosos de 1962 e 2002. Entretanto, em ambos os mapas de diferença, é possível observar um padrão semelhante de variação da magnitude entre os cenários.

Através das figuras é possível observar que ao longo da margem esquerda, desde o Canal do Rio Acará-Moju, passando pelo Canal da Ilha das Onças até a parte superior da baía, e também em parte do Canal Oriental e próximo ao distrito de Icoaraci, houve um aumento das magnitudes das correntes tanto no cenário chuvoso de 2002 quanto no cenário de estiagem de 2002. Nos cenários chuvoso e de estiagem de 2002, uma pequena redução na magnitude das correntes pode ser



observada na parte central e inferior da baía. As maiores reduções da magnitude nos cenários de 2002 são observadas em uma região próxima ao Canal Oriental e na região central superior da baía.

No cenário do período chuvoso de 1962, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,43 m/s no período de sizígia e 1,34 m/s durante o período de quadratura. Já na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,32 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,27 m/s.

No cenário do período chuvoso de 2002, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,89 m/s no período de sizígia e 1,70 m/s durante o período de quadratura. Na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,78 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,63 m/s.

No cenário do período de estiagem de 1962, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,35 m/s no período de sizígia e 1,25 m/s durante o período de quadratura. Durante a vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,22 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,09 m/s.

No cenário do período de estiagem de 2002, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,74 m/s no período de sizígia e 1,62 m/s durante o período de quadratura. Na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,59 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,55 m/s.

Tanto nos cenários de 2002, quanto nos cenários de 1962, as maiores velocidades são encontradas durante as simulações que caracterizam os períodos chuvosos.

Para efeito de comparação entre os resultados obtidos na modelagem dos cenários de 1962 e 2002, foram escolhidos 7 pontos de interesse. A escolha da posição destes pontos foi fundamentada em resultados de trabalhos realizados anteriormente (Figura 9), em áreas da baía que sofreram grandes alterações da morfologia de fundo e batimetria ao longo do tempo.

Os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 apresentaram aumento em suas profundidades entre os anos de 1962 e 2002. Somente a profundidade do ponto 7 demonstrou uma redução dentro do período, diminuindo em cerca de 24,8 %.

Séries de elevação da superfície livre modeladas para os pontos foram analisadas e os valores máximos de elevação da superfície livre foram determinados. As maiores elevações de superfície livre durante a vazante e a enchente em todos os cenários foram encontradas no ponto 1. Entre os períodos chuvosos de 1962 e 2002, a maior variação entre as elevações máximas de superfície livre nos pontos considerados ocorreu durante a enchente de quadratura. Nos períodos de estiagem, as maiores variações entre as elevações máximas de superfície livre nos pontos ocorreram também durante a enchente de quadratura e também durante a enchente de sizígia.

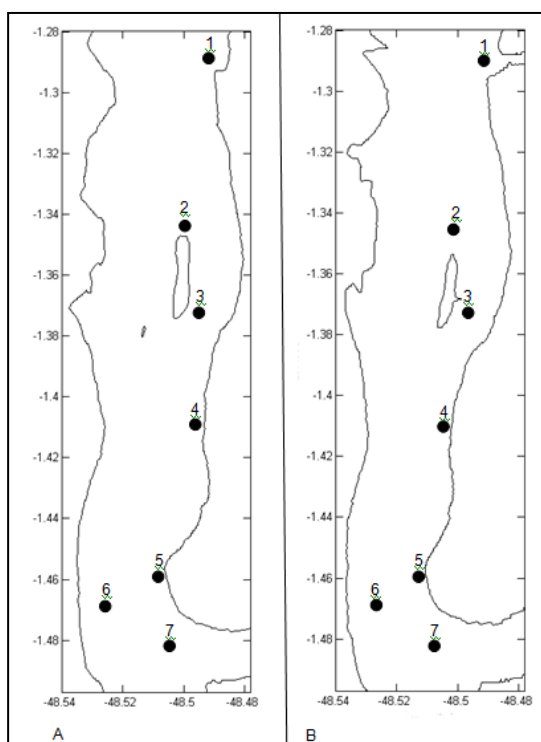


Figura 9. Posicionamento dos 7 pontos escolhidos para a análise da variação das componentes meridional e zonal da velocidade, da elevação da superfície livre e da profundidade entre os anos de 1962 e 2002.

Os pontos mais próximos aos rios Guamá, Acará e Moju, apresentam um tempo maior de vazante do que de enchente nos cenários, que pode ser explicado pela influência fluvial que provoca uma defasagem no tempo de vazante em relação aos pontos localizados à jusante. Além disso, os pontos mais próximos aos rios apresentam séries de elevação de superfície livre com curvas mais assimétricas em função do efeito do encontro no nível da maré com a descarga dos rios, bem como pelo atrito que a onda de maré sofre ao se propagar em direção a montante dos rios. Também pode ser notado uma pequena redução nas amplitudes de maré nos pontos mais próximos aos rios, de maneira geral, durante os períodos chuvosos de 1962 e 2002 quando comparados aos períodos de estiagem.

Nicolite *et al.* (2009) ressaltam que as marés oceânicas podem sofrer distorções em suas amplitudes e modificação na fase durante sua progressão no sentido de águas rasas e ambientes restritos como baías e estuários. Segundo os autores, estas alterações ocorrem em função do atrito com o fundo; à compressão das margens do canal; à configuração da costa que direciona o fluxo de marés, e à profundidade do canal estuarino. Além dessas alterações, perturbações hidrológicas e meteorológicas também são responsáveis por distorções na maré astronômica.

Considerando os resultados dos cenários do período chuvoso de 1962 e 2002, é observado que há um aumento nos valores das velocidades máximas das componentes zonal e meridional no ano de 2002, tanto em sizígia quanto em quadratura, para a maior parte dos pontos.

No cenário chuvoso de 1962, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,46m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,61 m/s. Neste cenário, as maiores velocidades máximas de enchente ocorrem nos pontos 4 e 6, enquanto as maiores velocidades máximas de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

No cenário chuvoso de 2002, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,72m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,62 m/s. As maiores velocidades máximas de enchente e de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

Entre 1962 e 2002 nos cenários dos períodos chuvosos, as maiores variações entre os valores de velocidade meridional máxima na enchente ocorreram no ponto 3, em sizígia e quadratura. Na vazante, as maiores variações foram observadas no ponto 1, na sizígia, e nos pontos 3 e 4 na quadratura.

Considerando os resultados dos cenários do período estiagem de 1962 e 2002, é observado que há um aumento nos valores das velocidades máximas das componentes zonal e meridional no ano de 2002, tanto em sizígia quanto em quadratura, para a maior parte dos pontos.

No cenário de estiagem de 1962, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,43 m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a sizígia e a quadratura, com valor próximo de 0,46 m/s. Neste cenário, as maiores velocidades máximas de enchente ocorrem nos pontos 4, 5 e 6, enquanto as maiores velocidades máximas de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

No cenário de estiagem de 2002, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia e a quadratura, com valor próximo de 0,72 m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,69 m/s. As maiores velocidades máximas de enchente e de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

Entre 1962 e 2002 nos cenários dos períodos de estiagem, as maiores variações entre os valores de velocidade máxima de meridional na enchente ocorreram no ponto 3, em sizígia e quadratura. Na vazante, a maior variação foi observada no ponto 1, na sizígia e na quadratura.

Com o objetivo de melhor entender as variações na hidrodinâmica em todos os cenários decorrentes das alterações na morfologia de fundo e na batimetria da Baía de Guajará, foram estabelecidas 5 seções transversais à baía (seções A, B, C, D e E) e uma transversal ao rio Guamá (seção F), totalizando 6 seções (Figura 10), das quais foram determinados os transportes de volume normais à cada seção na baía, valor este representado pela vazão total para cada seção durante os períodos de enchente e de vazante.

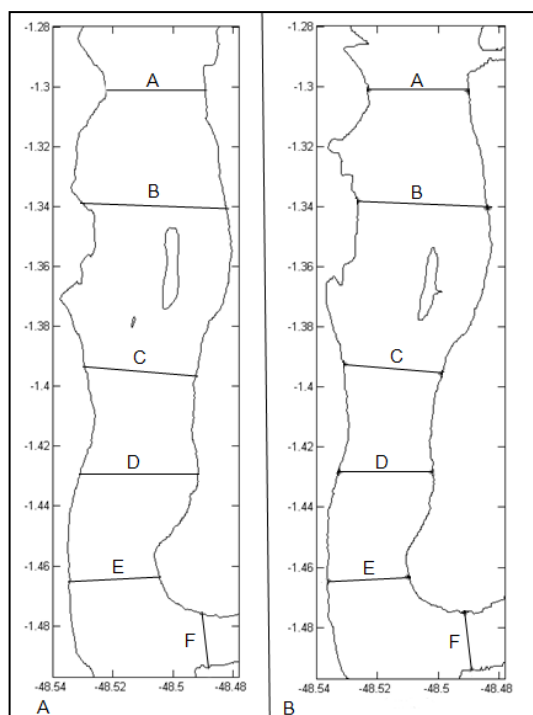


Figura 10. Posicionamiento das seções escolhidas para a análise da variação das vazões entre os anos de 1962 e 2002.

Foram determinadas as vazões, em um determinado instante, de enchente e vazante, em períodos de sizígia e quadratura, para cada um dos cenários considerados.

Para os cálculos das vazões das seções nos cenários chuvosos, foram considerados os seguintes instantes: 380 h, para caracterizar a enchente durante a sizígia; 374 h, para caracterizar a vazante durante a sizígia; 199 h, para caracterizar a enchente durante a quadratura; 193 h, para caracterizar a vazante durante a quadratura.

Para os cálculos das vazões das seções nos cenários de estiagem, foram considerados os seguintes instantes: 601 h, para caracterizar a enchente durante a sizígia; 606 h, para caracterizar a vazante durante a sizígia; 432 h, para caracterizar a enchente durante a quadratura; 430 h, para caracterizar a vazante durante a quadratura.

Os perfis transversais de batimetria das 6 seções no ano de 1962 e de 2002 são apresentados na Figura 11. As variações da morfologia do leito verificadas pela batimetria das seções transversais foram bastante acentuadas ao longo do período e a área total de cada perfil também apresentou grandes mudanças.

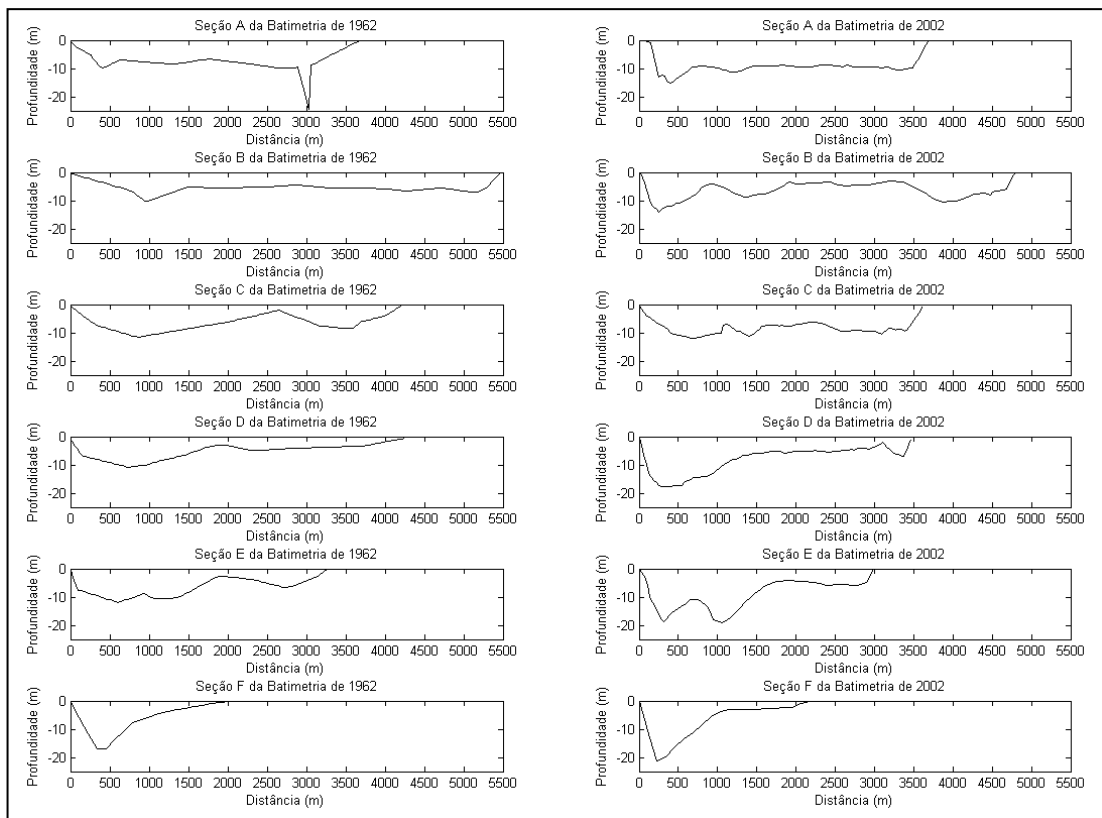


Figura 11. Morfologia do fundo das seções transversais à Baía de Guajará (A, B, C, D e E) e ao rio Guamá (F) nos anos de 1962 e 2002.

Na seção A, a profundidade máxima em 1962 era de 24,4 m e em 2002 a profundidade máxima reduziu para 15,3 m, ou seja, uma redução de cerca de 37,3 %. A largura da seção em 1962 era 3.689 m e em 2002 passou a ser 3.688 m. A área da seção aumentou em 23,1 % entre 1962 e 2002.

Na seção B, a profundidade máxima em 1962 era de 10,2 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 14,2 m, ou seja, um aumento de cerca de 39,2 %. A largura da seção em 1962 era 5.464 m e em 2002 passou a ser 4.795 m. A área da seção aumentou em 3,3 % entre 1962 e 2002.

Na seção C, a profundidade máxima em 1962 era de 11,5 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 12,1 m, ou seja, um aumento de cerca de 5,2 %. A largura da seção em 1962 era 4.223 m e em 2002 passou a ser 3.623 m. A área da seção aumentou em 9,1 % entre 1962 e 2002.

Na seção D, a profundidade máxima em 1962 era de 10,8 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 17,6 m, ou seja, um aumento de cerca de 62,9 %. A largura da seção em 1962 era 4.267 m e em 2002 passou a ser 3.457 m. A área da seção aumentou em 24,9 % entre 1962 e 2002.

Na seção E, a profundidade máxima em 1962 era de 12,0 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 19,8 m, ou seja, um aumento de cerca de 65 %. A largura da seção em 1962 era 3.305 m e em 2002 passou a ser 2.993 m. A área da

seção aumentou em 22,9 % entre 1962 e 2002.

Na seção F, a profundidade máxima em 1962 era de 17,2 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 21,2 m, ou seja, um aumento de cerca de 23,5 %. A largura da seção em 1962 era 2.014 m e em 2002 passou a ser 2.178 m. A área da seção aumentou em 18,6 % entre 1962 e 2002.

Considerando as vazões calculadas ao longo das seções A, B, C, D, E e F para os cenários, os maiores valores de vazão pertencem à seção A no cenário chuvoso de 2002 durante a sizígia. Na enchente, a vazão foi cerca de 15.156 m<sup>3</sup>/s e na vazante a vazão foi de 17.607 m<sup>3</sup>/s.

As menores vazões foram encontradas na seção F no cenário de estiagem de 1962 durante a quadratura. Na enchente, a vazão foi cerca de 1.081 m<sup>3</sup>/s e na vazante a vazão foi de 1.189 m<sup>3</sup>/s.

Considerando os períodos chuvosos, é observado que há um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, nas seções no ano de 2002 quando comparado com os valores de 1962. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 3.329 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 1.440 m<sup>3</sup>/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 3.868 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.357 m<sup>3</sup>/s.

Avaliando os períodos de estiagem, também é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, nas seções no ano de 2002 quando comparado com os valores de 1962. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 2.433 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 421 m<sup>3</sup>/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 2.386 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 3.546 m<sup>3</sup>/s.

Analisando os cenários de 1962, é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, durante o período chuvoso quando comparado com período de estiagem. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 921 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 1.100 m<sup>3</sup>/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 2.232 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 3.275 m<sup>3</sup>/s.

Considerando os cenários de 2002, também é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, durante o período chuvoso quando comparado com período de estiagem. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 2.236 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.700 m<sup>3</sup>/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 3.429 m<sup>3</sup>/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.835 m<sup>3</sup>/s.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o modelo hidrodinâmico implementado constitui-se em um importante método de investigação da circulação na Baía de Guajará. Os resultados obtidos, quando comparados com dados medidos em campo, mostram que a configuração utilizada é capaz de responder aos objetivos deste trabalho, já que foi capaz de representar as principais feições dinâmicas da Baía de Guajará e sua variabilidade em função das variações morfológicas. Tal fato consolida o modelo utilizado como um importante método de gestão ambiental para a região.

A morfologia geral da Baía de Guajará é marcada pela presença de bancos sedimentares e canais profundos, que influenciam fortemente a hidrodinâmica local. As análises comparativas entre as batimetrias da baía de 1962 e 2002 puderam caracterizar as grandes alterações apresentadas pela baía ao longo desses anos, com o aprofundamento de muitas de suas áreas em 2002, principalmente o Canal da Ilha das Onças e a parte inferior do Canal Oriental.

Os resultados obtidos com a implementação do modelo numérico hidrodinâmico da Baía de Guajará indicam que a hidrodinâmica local, em todos os cenários, é fortemente influenciada pela ação das marés e pela descarga fluvial dos rios Guamá e Acará-Moju e que alterações na batimetria implicam em variações significativas no padrão de circulação.

Nos cenários dos períodos chuvosos, as maiores vazões dos rios Guamá e Acará-Moju, consideradas nas simulações em decorrência da elevada precipitação pluviométrica do período chuvoso registrada principalmente no mês de abril para a região, juntamente com o aumento da amplitude de maré apresentada durante este período, foram responsáveis pelo aumento das velocidades e vazões nestes cenários quando comparado as cenários de estiagem.

A influência da descarga fluvial sobre a dinâmica da Baía de Guajará pode ser verificada, já que a alteração da vazão dos rios nos cenários resultou em alterações significativas na circulação. No entanto, as regiões mais próximas à desembocadura dos rios Acará-Moju e Guamá são mais sensíveis às variações de vazão, exibindo períodos de vazante mais longos quando comparados com os períodos de enchente.

De maneira geral, os cenários de 2002, comparativamente aos cenários de 1962, apresentaram as maiores velocidades, principalmente durante o período de enchente, e as maiores vazões, sobretudo durante o período de vazante, padrão este relacionado ao aumento das profundidades em 2002 quando comparadas com as profundidades de 1962.

Cabe ressaltar que quaisquer informações adicionais obtidas a partir de levantamentos de campo podem ser facilmente incorporadas ao modelo existente. Dessa forma, por exemplo, a obtenção de valores reais sobre as vazões dos rios Guamá e Acará-Moju e suas variações sazonais, assim como de batimetria e campo dos ventos, seriam de extrema importância para o aperfeiçoamento do modelo.

A recomendação para estudos futuros inclui a incorporação, ao modelo numérico,

da distribuição sedimentológica da baía. Dessa forma, correlacionado os tipos de sedimentos aos coeficientes de arrasto empregados, a avaliação desta influência sobre a hidrodinâmica também poderá ser avaliada.

## REFERÊNCIAS

- Amarante, O.A.C., Brower, M., Zack, J. e Sá, A.L., *Atlas do potencial eólico brasileiro*. Ministério de Minas e Energia, 2001.
- Blumberg, A.F. e Mellor, G.L., A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: N. S. Heaps (eds.), *Three-dimensional coastal ocean models*, volume 4, American Geophysical Union, Washington D.C., pp.1-16, 1987.
- Femar, *Catálogo de estações maregráficas brasileiras*. Femar, 2000.
- Franco, A.S., *Marés – Programas para previsão e análise (manual do sistema PAC)*. Cotia, 1992.
- Gregório, A.M.S., *Contribuição à gestão ambiental da Baía de Guajará (Belém-Pará-Amazonia) através de estudo batimétrico e sedimentológico*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- Gregório, A.M.S. e Mendes, A.C., Characterization of sedimentary deposits at the confluence of two tributaries of the Pará River Estuary (Guajará Bay, Amazon). *Continental Shelf Research*, 29:609-618, 2009.
- Kowalik, K. e Murty, T.S., *Numerical modeling of ocean dynamics*, volume 5. Advanced Series on Ocean Engineering, 1993.
- Marinha do Brasil, *Carta náutica nº 316 – Brasil - Rio Pará - de Mosqueiro a Belém*. 1 ed., escala 1:49.990, 1962.
- Mellor, G.L., *Users guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model*. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, 2003.
- Mellor, G.L. e Yamada, T., Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 20:851-875, 1982.
- Mendes, A.C., Silva, C.A. e Frazão, E.P., Levantamento batimétrico da Baía de Guajará, Belém/PA, *Anais do III Workshop Técnico-Científico do Projeto Petrorisco*, Belém, Pará, pp.1-3, 2004.
- Messinger, F. e Arakawa, A., Numerical methods used in atmospheric models. *GARP Publication Series - WMO/ICSU Joint Organizing Committee*, 1:01-64, 1976.
- Miranda, A.G. e Mendes, A.C., Evolução batimétrica da Baía de Guajará, Belém/PA, *Anais do XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, Belém, Pará, pp. 1-60, 2007.
- Nicolite, M., Truccolo, E.C., Schettini, C.A.F. e Carvalho, C.E.V., Oscilação do nível de água e a co-oscilação da maré astronômica no baixo estuário do Rio Paraíba do Sul, RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27:225-239, 2009.
- Paiva, R.S., Eskinazi-Leça, E., Passavante, J.Z.O., Silva-Cunha, M.G.G. e Melo, N.F.A.C., Considerações ecológicas sobre o fitoplâncton da Baía de Guajará e foz do Rio Guamá (Pará, Brasil). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais*,



1:133-146, 2006.

Piatam-Mar, *Relatório de andamento das atividades de modelagem computacional do Projeto Piatam – Mar fase 2*. LAMCE, 2008.

Pinheiro, R.V.L., *Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará-Belém (Pará)*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, 1987.

Silveira, O.F.M., *Estudo batimétrico/sonográfico do Estuário Guajará, Belém-PA*, Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Pará, Belém, 1989.