

# **BATIMETRIA E SEDIMENTOLOGIA DA BAÍA DE GUAJARÁ, BELÉM, ESTADO DO PARÁ, BRASIL**

Aderson Manoel da Silva Gregório\*

Amilcar Carvalho Mendes\*\*

## **RESUMO**

A baía de Guajará, localizada na margem direita do estuário do rio Pará (Amazônia), forma-se na confluência dos rios Guamá, Acará e Moju, possuindo extensas zonas de baixa profundidade (~2 m) e canais profundos (~25 m). O canal de vazante localiza-se no setor oeste, onde há intensa erosão da margem. No setor leste, têm-se os canais de enchente e planícies de maré lamosas, que se estendem de sul a norte, ao longo da orla da cidade de Belém do Pará. Ocorrem depósitos sedimentares arenosos (noroeste) e lamosos (leste-sudeste) submersos. Cerca de 70% do substrato da baía de Guajará são cobertos por lamas. A deposição desses sedimentos lamosos e a formação de uma barra em pontal no setor sul (foz do rio Guamá) ocorrem devido à diminuição da intensidade, para sul, das correntes de maré e, para norte, das correntes fluviais. O regime hidrodinâmico é elevado, no entanto, pelos baixos teores de argila nos sedimentos de fundo. Os depósitos arenosos observados no setor noroeste evidenciam as fortes correntes de maré. A grande área (~90 km<sup>2</sup>) do substrato coberta por lama e as planícies de maré lamosa (~150 m de largura) da baía de Guajará sugerem a magnitude da contribuição e do fluxo de sedimentos dos rios Guamá, Acará e Moju (~87.400 km<sup>2</sup> de área total das bacias de drenagem) para o estuário do rio Pará. O regime de chuvas regulares, típico da região Amazônica, mantém as consideráveis descargas desses rios e a elevada turbidez (profundidade Secchi d" 0,5 m) na área de investigação. De maneira geral, a baixa topografia, o grande aporte fluvial e a atuação das correntes de maré são os principais controladores da deposição e da dispersão de sedimentos na baía de Guajará.

**Palavras-chave:** Batimetria-Baía do Guajará-Amazônia. Sedimentologia-Baía do Guajará-Amazônia.

\* Oceanógrafo; Mestre em Geociências e Doutorando pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre/RS. E-mail: aderson.manoel@ufrgs.br

\*\* Geólogo; Mestre em Geologia e Geoquímica; Pesquisador do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). Belém/PA. E-mail: amendes@museu-goeldi.br

# **BATHIMETRY AND SEDIMENTOLOGY OF GUAJARÁ BAY, BELÉM, STATE OF PARÁ, BRAZIL**

## **ABSTRACT**

Baia do Guajará, located at the right margin of the Pará River estuary (Amazon) is formed in the confluence of Guamá, Acará and Moju rivers. It has low-depth zones (~5 m) and deep channels (~25 m). The ebb channel is located in the west section, where there is intense erosion of the margin. The flood channels and tidal mudflats, which stretch out from north to south along the shore of the city of Belém do Pará, are in the east section. There are sandy (northwest) and muddy sedimentary deposits (east- southeast). Some 70% of baia do Guajará bottom are covered by muddy sediments. The deposits of such muddy sediments and the formation of a point barn in the south section (Guamá River mouth) happen due to a decrease in the intensity of tidal currents to the south and of fluvial currents to the north. However, the hydrodynamic regime is high, which is proved by the low clay amounts in the bottom sediments. The sand deposits in the northwest section indicate strong tidal currents. The vast area of the bottom that is covered by mud (~90 km<sup>2</sup>) and the tidal muddy flats (~150 m wide) in baia do Guajará hint the extent of the contribution and sediments flow from Guamá, Acará and Moju rivers (drainage basin total area of ~87,400 km<sup>2</sup>) to the Pará River estuary. The regular rainfall regime, typical of the Amazon region, keeps the considerable discharges of such rivers and their high turbidity (Secchi depth d" 0.5 m) in the investigation area. Overall the low topography, the great fluvial subsidy and the action of tidal currents are the main controlling elements of the deposition and dispersion of sediments in baia do Guajará.

**Key-words:** Amazon. Guajará Bay. Sedimentology. Bathymetry.

## 1 INTRODUÇÃO

Somente a descarga do rio Amazonas equivale a quatro descargas do rio Congo, a segunda maior, e a quatorze do rio Mississipi (DEGENS et al., 1991). Em média, cerca de 3 a 3,5 milhões de toneladas métricas de sedimentos são descarregadas pelo Amazonas (MEADE et al., 1985), o que representa entre 1,1 e 1,3 bilhões de toneladas métricas por ano.

Grande parte desses sedimentos é depositada na plataforma adjacente (NITTROUER; DEMASTER, 1986; FIGUEIREDO; NITTROUER, 1995; ALLISON; LEE, 2004; SOMMERFIELD, 2006). No entanto, cerca de 20% são transportados para oeste pelas correntes Norte Brasileira e das Guianas (KUEHL et al., 1986; EISMA et al., 1991; GEYER; BEARDSLEY, 1995; LENTZ, 1995; NITTROUER; DEMASTER, 1996; FROIDEFOND, 2004).

A Zona Costeira Amazônica (ZCA), que abrange os estados do Pará, Amapá e Maranhão, se medida em linha reta, em escala 1:2.500.000, possui 2.250 km de extensão (SOUZA FILHO, 2005). A porção oriental é extremamente irregular, abrigando pouco mais que duas dezenas de estuários influenciados por macromarés, com extensas planícies de maré arenosas e lamosas, entre outras feições costeiras típicas de latitudes tropicais úmidas. (SOUZA FILHO, 2005).

Na região central da ZCA, localiza-se o rio Pará, cuja descarga, juntamente com a do Amazonas, forma uma larga pluma estuarina na área oceânica adjacente (SANTOS et al., 2008). Os rios unem-se pelo "estreito de Breves", no sudoeste da ilha de Marajó (Figura 1A).

O estuário do rio Pará possui larguras consideráveis (~1 km na cabeceira e ~50 km na desembocadura/baía de Marajó) e vasta contribuição fluvial por ambas as margens. Os principais tributários (rios Tocantins, Guamá, Acará e Moju) localizam-se na margem direita. Devido

à grande descarga de água doce, observa-se significativa redução da salinidade no estuário. A propagação da maré, no entanto, segue por vários quilômetros continente adentro, caracterizando uma larga zona de transição fluvio-marinha sob impacto de marés semidiurnas.

Corrêa (2005), com base nas características batimétricas e sedimentológicas, caracterizou duas áreas (setores oeste e leste) no estuário do rio Pará, com diferenças marcantes na dinâmica sedimentar e de circulação. Ambas as áreas são fortemente modeladas por correntes de maré e fluviais.

O substrato do setor oeste, sob ação de um regime hidrodinâmico de maior energia (CORRÊA, 2005), mostra uma morfologia de bancos e barras arenosas (na baía de Marajó) além de canais profundos. Depósitos de lama fluida a compacta ocorrem junto à desembocadura dos vários tributários localizados na margem oriental da ilha de Marajó e em áreas profundas (~40 m).

No setor leste, no entanto, o substrato apresenta morfologia mais suave, sendo observados canais junto às margens e sedimentação fina (silte grosso a silte muito fino e sedimentos argilosos - em certas áreas -, pobre a muito pobremente selecionados), devido à contribuição dos principais tributários do estuário, localizados neste setor. A deposição de lamas dá-se por floculação ou decantação durante a virada da maré ou na parada das águas (estofa de maré). Na área central do estuário, ocorre um fácies transicional, formado por areia muito fina (CORRÊA, 2005).

Notadamente, as correntes de maré e fluviais desempenham papel fundamental nos processos de sedimentação do estuário do rio Pará, com efeitos consideráveis das diferenças de densidade entre água doce e salgada (que favorece a deposição de lamas) e das ondas (na desembocadura e nas áreas marginais rasas).

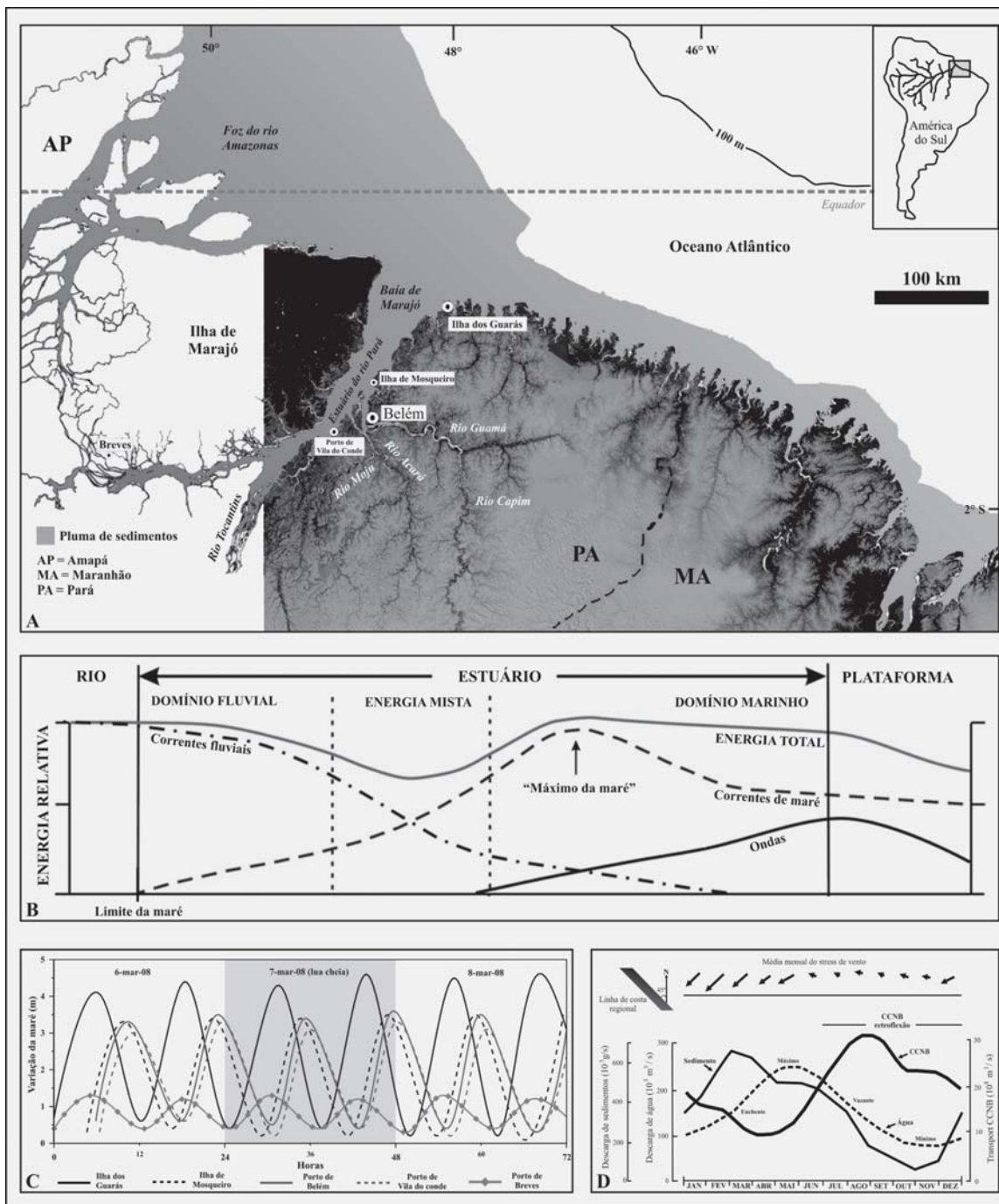


Figura 1 - A) Modelo de elevação (dados SRTM) da Zona Costeira Amazônica, mostrando a distribuição dos platôs costeiros (tons de cinza claro) e terrenos inundáveis (tons escuros). Modificada de Souza Filho et al. (in press). B) Variação longitudinal da intensidade dos três principais processos físicos, correntes fluviais, correntes de maré e ondas, ao longo de um estuário dominado por maré. Modificada de Dalrymple e Choi (2007). C) Variação da maré (a partir da primeira baixa-mar), entre os dias 06 e 08 de março de 2008, em cinco pontos do estuário do rio Pará. Dados de maré obtidos nas tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. D) Variação sazonal de importantes fatores que influenciam nos processos oceânicos na plataforma continental do rio Amazonas (a seta de fevereiro corresponde a  $\sim 1.1 \text{ dyne/cm}^2$ ). Modificada de Nittrouer e DeMaster (1996).

A magnitude da componente fluvial, aliada à proximidade do estuário com a linha do Equador - o que potencializa as marés (PARKER, 2005) e praticamente anula os efeitos da Força de Coriolis (GABIOUX et al., 2005) -, provavelmente contribuem para a expansão da zona de "energia mista" (Figura 1B) desse ambiente.

A rugosidade do substrato, as margens descontínuas (repletas de reentrâncias), a ampla largura do funil estuarino e a grande descarga de água doce auxiliam na dissipação da energia da maré, anulando sua convergência (estuário hiposincrônico; DALRYMPLE; CHOI, 2004) e diminuindo sua influência em direção ao continente (Figura 1C). Por outro lado, a baixa topografia local favorece o alargamento da planície de inundação ao longo da área influenciada pela maré.

Levando-se em conta o descrito por Corrêa (2005) e as considerações de Dalrymple et al. (1992) e de Dalrymple e Choi (2004), em primeira instância, o estuário do rio Pará apresenta características de um "estuário dominado por maré". No entanto, há pronunciada atuação de ondas na desembocadura e nas áreas rasas marginais, devido ao regime de ventos alísios e à larga extensão do *fetch* disponível (respectivamente, ~40, ~75 e ~110 km para ventos de NO/SE, N/S e NE/SO).

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A baía de Guajará está localizada a noroeste da ilha de Marajó, aproximadamente 100 km do Oceano Atlântico, na margem direita do estuário do rio Pará. Na margem leste da baía, localiza-se a cidade de Belém, capital do estado do Pará. A margem oeste é formada por um conjunto insular cuja maioria das ilhas integra a área legal do município de Belém.

Na realidade, o que se observa no estuário do rio Pará é uma larga interação, em muitos aspectos, entre as correntes fluviais, as correntes de maré e o regime de ondas, permitindo-se concluir que se trata de um ambiente altamente dinâmico e de energia mista.

Por outro lado, a sazonalidade extraordinária de variáveis ambientais, como vento, chuva e descarga de água doce e de sedimentos (NITTROUER; DEMASTER, 1996; Figura 1D), torna ainda mais complexa a sedimentação nesse setor da ZCA. Tal sazonalidade e sua influência nos processos sedimentares da região, por serem mapeáveis, também, em escala de tempo de curto e médio período, denotam, mais uma vez, a magnitude da energia local.

A baía de Guajará está inserida nesse cenário costeiro, mais precisamente na confluência dos rios Guamá, Acará e Moju (margem direita do estuário do rio Pará). O objetivo deste estudo é caracterizar os depósitos sedimentares dessa baía. A expectativa é de contribuir para a literatura científica dessa região, particularmente sobre conhecimentos dos processos de sedimentação no estuário do rio Pará e na área adjacente, que compõem o complexo estuarino do rio Amazonas.

Hidrograficamente, a baía de Guajará corresponde à principal conexão entre a sub-bacia Guamá-Moju e o estuário do rio Pará (Figura 2). Com área total aproximada de 87.400 km<sup>2</sup>, essa sub-bacia tem como principais drenagens os rios Guamá, Moju, Acará e Capim. No rio Guamá, a influência da maré é observada até a cidade de São Miguel do Guamá (ver

localização na Fig. 2), há aproximadamente 120 km da baía de Guajará. Na confluência entre os rios Capim e Guamá e Moju e Acará (24 km para sudeste da área de investigação) ocorre o fenômeno da Pororoca (*tidal bores*). Cabe

ressaltar que, nas cidades de Moju e Acará, ambas localizadas às margens dos rios homônimos (Fig. 2), há variação de maré. No entanto, o limite final da propagação nesses rios, assim como no rio Capim, é desconhecido.

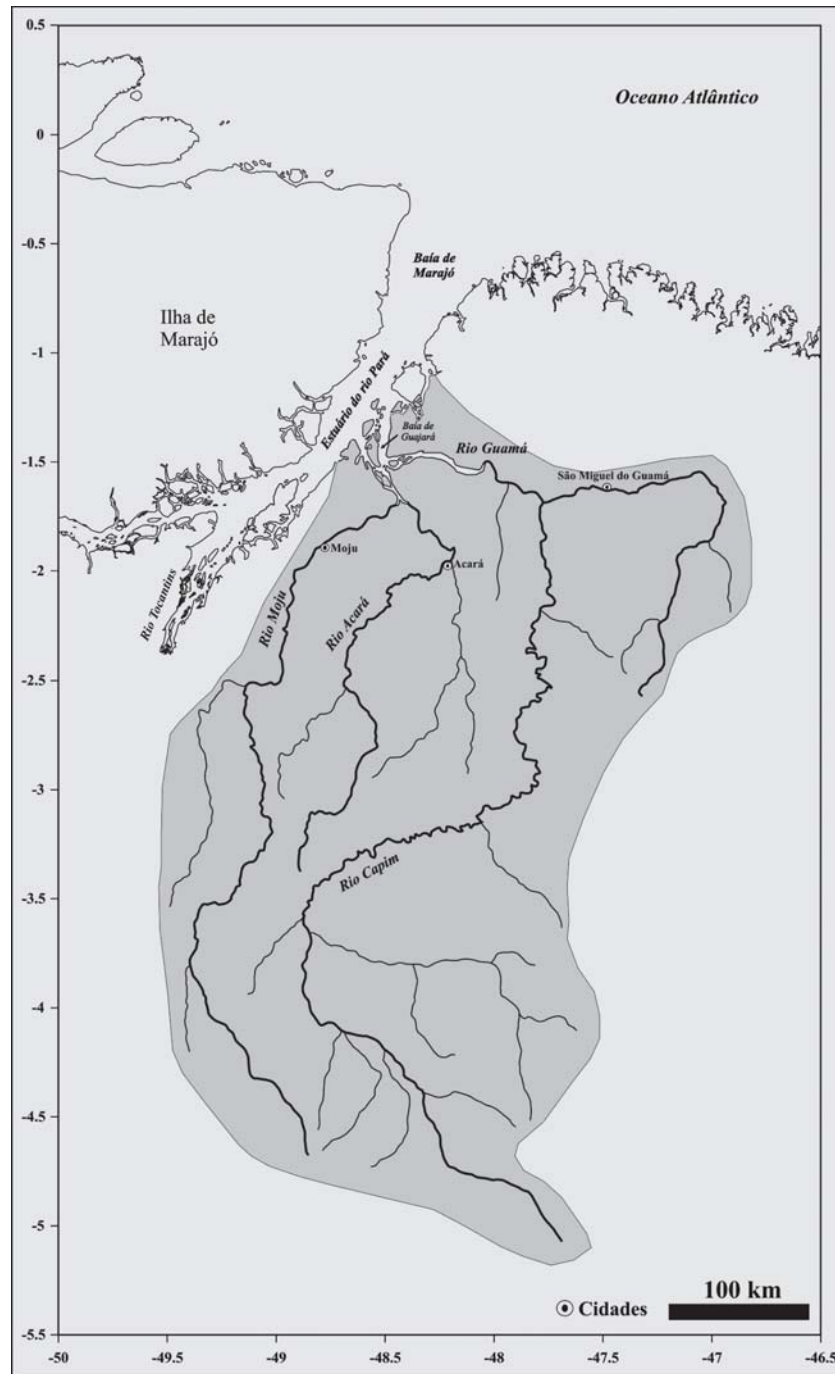


Figura 2 - Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais drenagens cuja principal conexão com o estuário do rio Pará é a baía de Guajará. Fonte: Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas.

Na área de investigação, a variação da maré atinge 3,6 m em condições de sizígia. Por localizar-se em uma área de domínio fluvial sob impacto de marés, a vazante dura mais tempo que a enchente, principalmente nos períodos de sizígia (Figura 3A), e a salinidade é muito baixa (< 1 a 1 m do substrato, durante o período de estiagem). No entanto, em alguns períodos do ano, águas salinas não se aproximam da baía de Guajará.

Ocorre uma redução da precipitação pluviométrica em junho; e, em novembro, essa taxa começa a se elevar (Figura 3B), com média anual de, aproximadamente, 2300 mm (WALTER; LIETH, 1967). O clima é quente e úmido, sem inverno, com baixa variação de temperatura e estação seca mal definida.

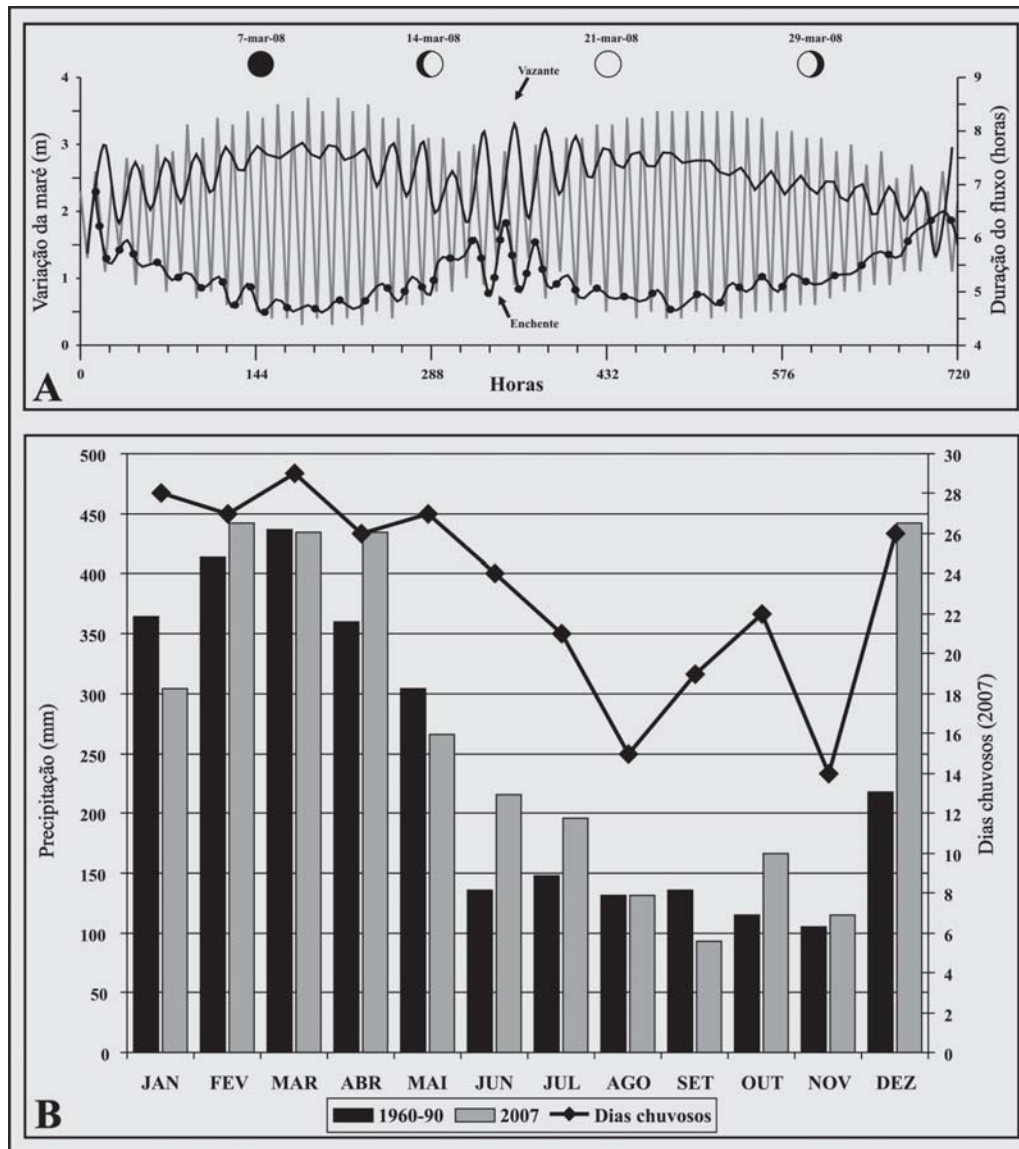


Figura 3 - A) Variação da maré e duração dos fluxos de enchente e de vazante na baía de Guajará, durante 720 horas seguidas (01 a 31 de março de 2008). Fonte: Tábuas de maré da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. B) Precipitação pluviométrica (1960-90 e 2007) e número de dias chuvosos (2007) na cidade de Belém. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia.

A quantidade de material em suspensão varia mais durante um ciclo de maré do que ao longo do ano. No período de chuvas, fica em torno de 115 mg/l, com valor médio de aproximadamente 100 mg/l durante os outros períodos do ano (PINHEIRO, 1987).

A área de estudo é suprida por sedimentos da Formação Barreiras (Mioceno), composta por arenitos, siltitos, argilitos e alguns conglomerados (LEITE et al., 1997; ROSSETTI, 2000, 2001; ROSSETTI; GOÉS, 2001). A vegetação natural terrestre é a típica da Floresta Amazônica (PIRES; PRANCE, 1985), mas muitas áreas foram substituídas por pasto e florestas secundárias. Manguezais ocorrem na ilha de Mosqueiro (GONÇALVES et al., 2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODO

Dados batimétricos foram coletados na baía de Guajará, em dezembro de 2002, correspondendo a uma área de aproximadamente 120 km<sup>2</sup> (Figura 4B). Uma ecossonda Hydrotac e um DGPS Trimble montados em uma embarcação tipo iate amazônico para a obtenção dos dados. A profundidade e a posição registradas em intervalos de 100 m. Com o auxílio dos dados batimétricos, uma malha com 122 estações de amostragem de sedimentos de fundo foi

Na cidade de Belém, na margem leste da baía de Guajará, a rede de drenagem é do tipo dendrítica, sendo o território do município densamente entrecortado por mais de trinta cursos d'água que deságuam, a norte, nas baías do Marajó e do Sol, a oeste na baía do Guajará e, a sul, no rio Guamá (SANTANA, 2006).

O crescimento desordenado levou 35% da população da capital paraense a morar em condições inadequadas. Muitas pessoas habitam os setores topograficamente mais baixos, nas áreas marginais inundáveis, estando submetidas a alagamentos regulares. As altas taxas de precipitação, aliadas ao regime de meso-marés semidiurnas, regem esses alagamentos, potencializados nas marés equinociais.

gerada (Fig. 4B), tendo a coleta ocorrida em fevereiro de 2006. Nas amostras de teor de lama (silte + argila) > 15% do peso total, retirada uma sub-amostra para análise da quantidade de matéria orgânica. Todas as amostras foram lavadas e secas (60° C por 48 horas). As amostras arenosas peneiradas (intervalo de 1 Ø). Por sua vez, as lamosas foram centrifugadas, e a quantidade de matéria orgânica, determinada por perda de massa por calcinação (HAYNES, 1982).



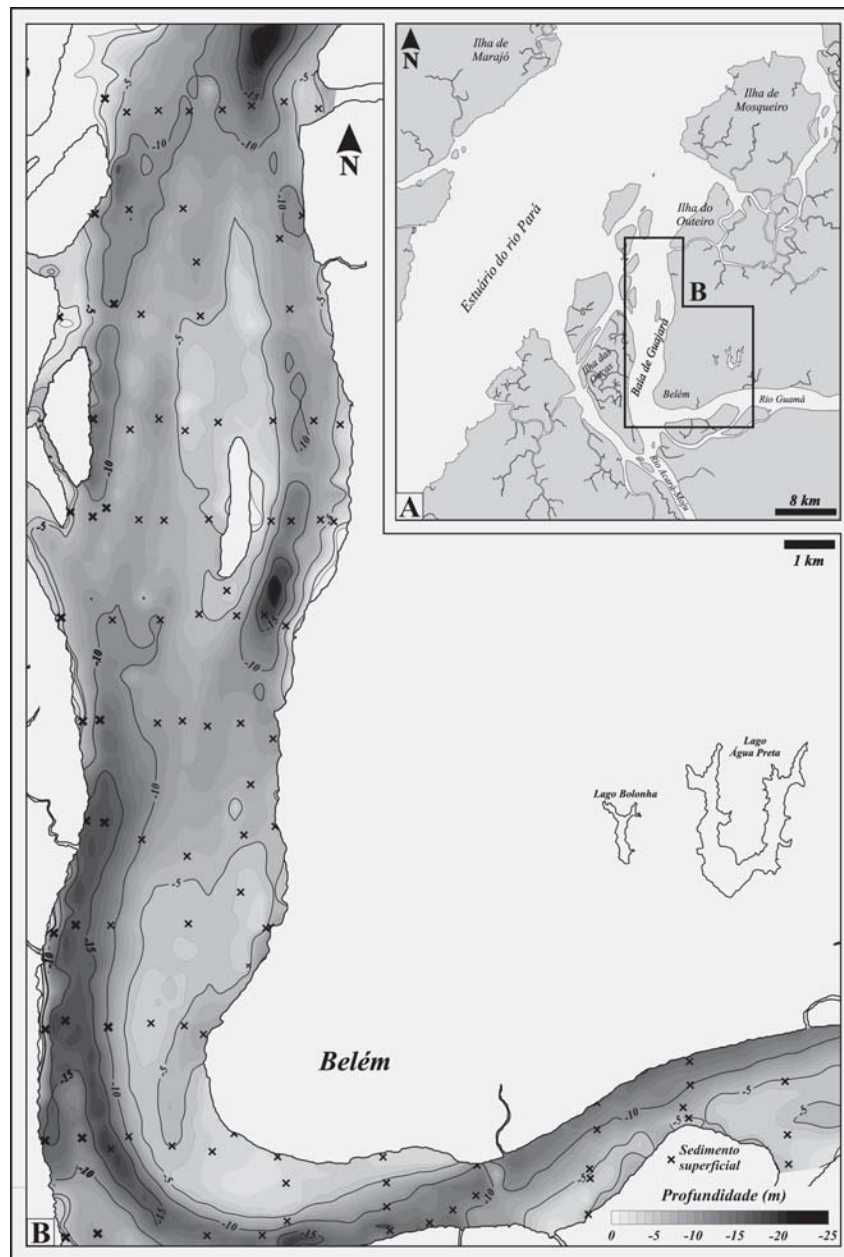


Figura 4 - A) Detalhe do trecho da margem direita do estuário do rio Pará onde se localiza a baía de Guajará. B) Área de investigação, com carta batimétrica e localização das estações de amostragem sedimentológica.

#### 4 RESULTADOS

A geomorfologia da baía de Guajará revela um substrato irregular composto por lama (fluída a compacta) e areia (fina a média), que formam bancos (barras) sedimentares, intensamente modelados pelas correntes de maré e fluviais.

Próximos a ambas as margens, há canais profundos e bem definidos.

Pelo método de Larsonneur (LARSONNEUR, 1977; DIAS; MEDEIROS, 2005;

GREGÓRIO, 2008) foi constatado que 72% do substrato são cobertos por sedimentos do tipo LL1 (25% < teor de lama < 75%; Fig. 5A). As areias geralmente bem selecionadas (Tabela 1), de coloração avermelhada (devido ao capeamento por óxido de ferro) e predominam

no setor noroeste. Já o teor de lama (silte + argila) aproxima-se de 100% ao longo da orla de Belém (setor leste). A concentração de matéria orgânica mostra razoável correlação com os teores de lama, variando entre 0,5 e 15% (Figura 5B).

Tabela 1 - Dados estatísticos das amostras sedimentológicas da baía de Guajará, 2006.

| Província geomofológica         | N <sup>a</sup> | Profundidade (m) | Phi médio <sup>b</sup> | Desvio Padrão    | Assimetria         |
|---------------------------------|----------------|------------------|------------------------|------------------|--------------------|
| Canal de vazante                | 32             | 2-18             | 2.97-5.74 (4.85)       | 0.46-1.36 (0.72) | -0.56-0.33 (-0.03) |
| Canal de enchente               | 21             | 2-19             | 3.79-5.88 (4.86)       | 0.60-0.88 (0.65) | -0.28-0.28 (-0.04) |
| Canal do rio Guamá              | 12             | 4-15             | 1.94-5.51 (4.35)       | 0.39-1.45(0.64)  | -0.25-0.44 (-0.56) |
| Depósitos arenosos de NE        | 19             | 3-10             | 2.19-5.17 (4.19)       | 0.45-1.04 (0.70) | -0.47-0.25 (-0.02) |
| Depósitos lamosos de SE         | 27             | 2-27             | 2.81-5.54 (4.78)       | 0.33-1.83 (0.75) | -0.45-0.40 (-0.10) |
| Depósitos arenosos do rio Guamá | 11             | 3-9              | 2.51-5.44 (4.60)       | 0.50-1.56 (0.65) | -0.69-0.05 (-0.15) |

Fonte: dados da pesquisa.

Notas: (a) número de amostras e (b) valores mínimos e máximos, com a média entre parênteses.

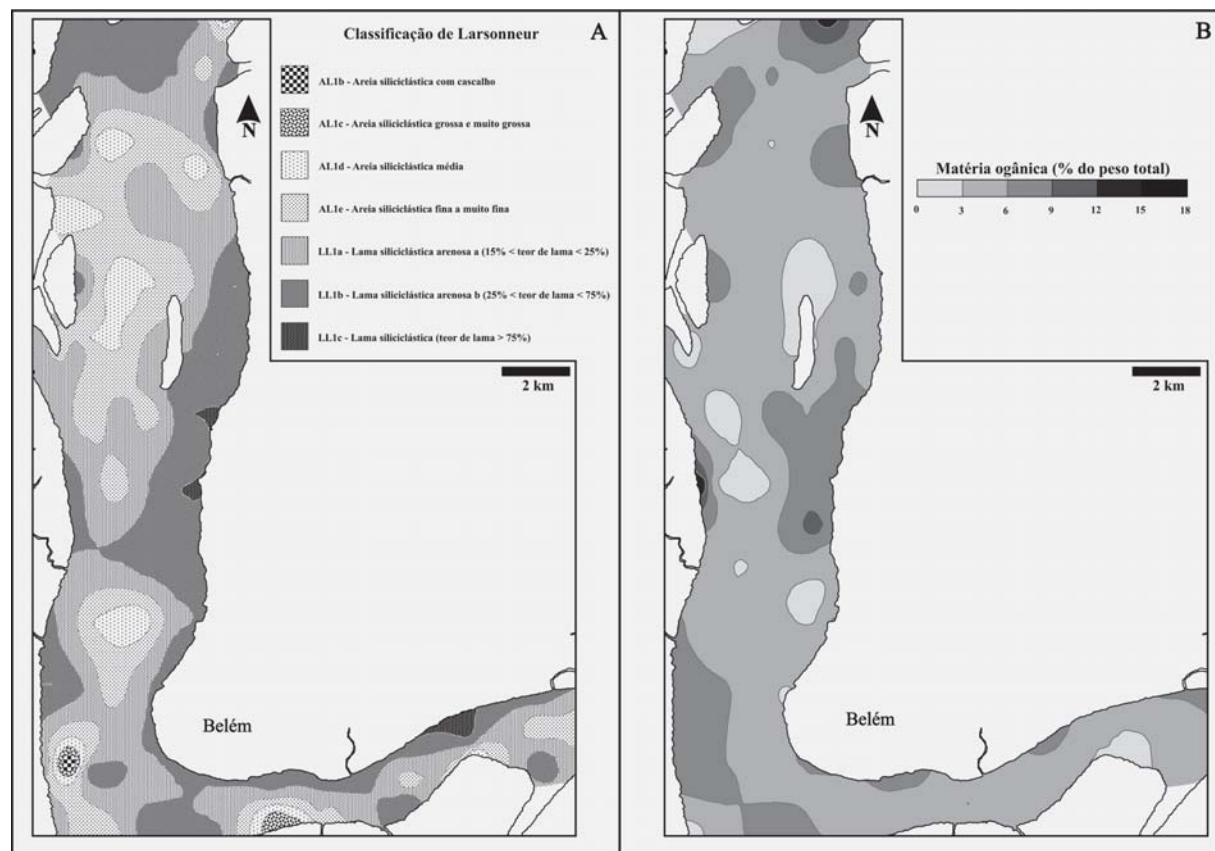


Figura 5 - Mapa da Distribuição de Larssonneur (A) e distribuição da matéria orgânica (B) nos sedimentos da área de investigação.

Depósitos arenosos são observados no setor noroeste, na margem esquerda do rio Guamá e na desembocadura do rio Acará (sul da área de investigação; Figura 6). Ao longo de toda a margem leste (orla da cidade de Belém) observam-se planícies de maré lamosas e, no limite sul dessa margem, uma extensa (~8 km) barra em pontal (Banco Sul da Cidade).

Pelos canais localizados no setor oeste, predominam as correntes de vazante aliadas às

correntes dos rios Guamá e Acará (Figuras 6 e 7), que fluem para norte. Esses canais possuem orientação N-S, largura máxima próxima de 1 km e estendem-se por cerca de 30 km. As correntes de enchente, por sua vez, fluem para sul inicialmente pelo canal do setor leste (com cerca de 800 m de largura e 10 km de comprimento) e pelos canais observados no banco arenoso e na barra em pontal dos setores noroeste e sudeste, respectivamente (Figura 6).

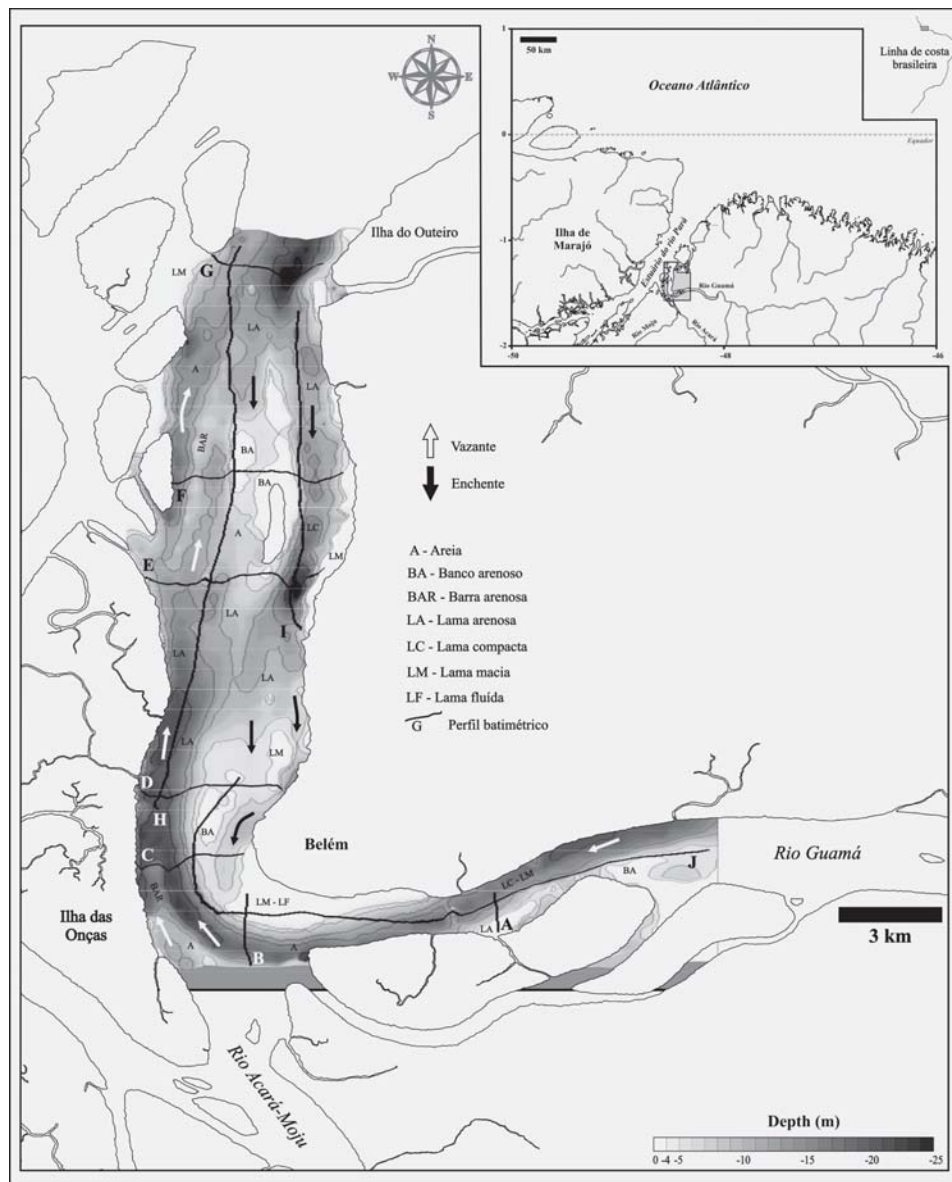


Figura 6 - Visão aérea oblíqua (inclinação de 55°) com bloco diagrama tridimensional do substrato da baía de Guajará e foz do rio Guamá.

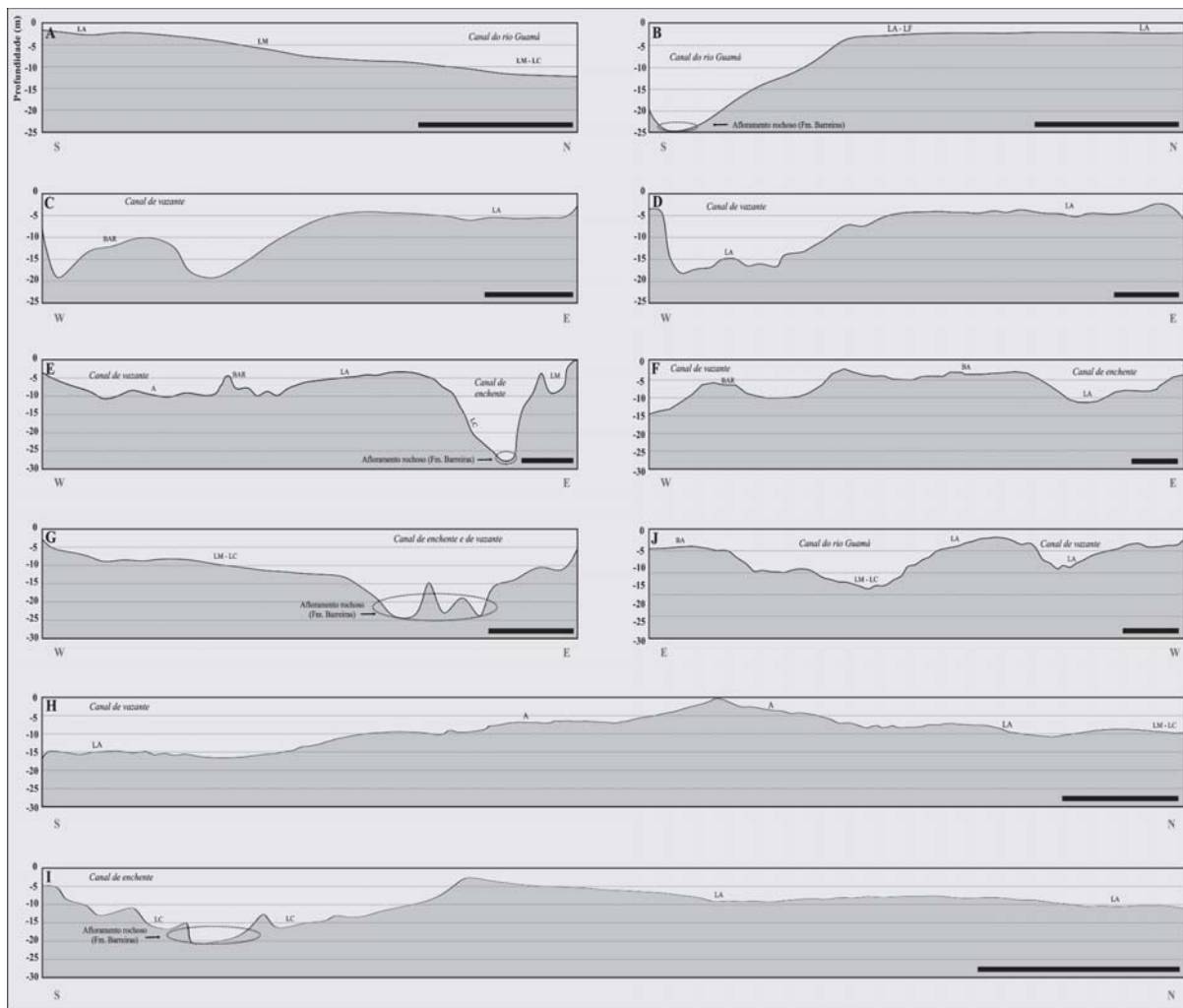


Figura 7 - Perfis batimétricos verticais da baía de Guajará e do trecho estudado do rio Guamá. Ver a localização dos perfis na Fig. 6. As barras de escalas horizontais correspondem a 500 m (perfis A ao G) e 2 km (H ao J).

O rio Guamá possui um canal sinuoso e bem definido, com 12 m de profundidade média e orientação NE-SW. Esse canal, que acompanha e modela a margem sul da cidade de Belém, sofre forte deflexão para norte ao aproximar-se da baía de Guajará, a partir de onde passa a compor o canal de vazante e maior feição geomorfológica da área de investigação.

O banco arenoso localizado no setor noroeste possui cerca de 6 km de comprimento e aproximadamente 2 km de largura (tendo-se com referência a isóbata de 5 m). Parte desse depósito fica exposto na baixa-mar.

A barra em pontal, localizada na margem sudeste da baía, possui cerca de 8 km de extensão, 2 km de largura e profundidade média de 5 m. Na margem leste adjacente a essa barra, localiza-se o setor portuário de Belém. Por conta disso, a dinâmica do substrato nessa área tem merecido atenção nas últimas décadas dada as evidências de assoreamento identificadas por Miranda (2006) e Miranda e Mendes (2007).

Ainda nesse setor, utilizando-se a isóbata de 4 m como referência, é possível diferenciar três outros depósitos, nomeados nas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN),

como Banco da Cidade (BC) e Banco do Meio (BM) e Banco Sul da Cidade (BSC). As duas primeiras formas de fundo possuem aproximadamente 1 km de comprimento e 600 m de largura, ao passo

que o Banco Sul da Cidade possui cerca de 5 km de comprimento, aproximadamente 1,5 km de largura e profundidades de até 2 m na baixa-mar (Figura 8 H).

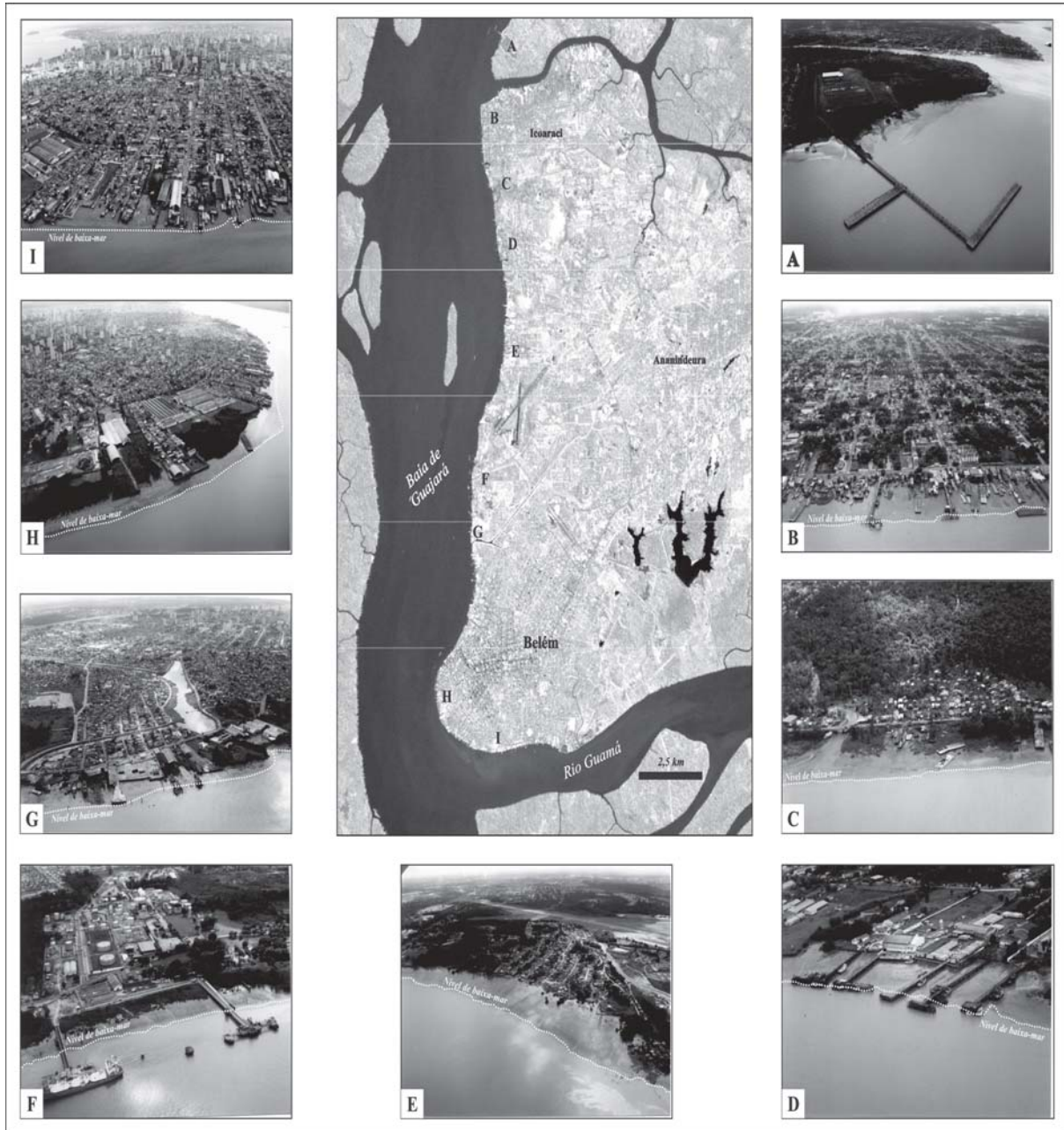


Figura 8 - Imagem Landsat-TM (banda 8) e fotografias aéreas oblíquas da baía de Guajará e orla de Belém. A) Terminal Portuário do Outeiro; B, C e E) Habitações sobre as planícies de maré lamosa; D) Alguns dos portos construídos em madeira localizados ao longo da orla de Belém; F) Terminal Petroquímico de Miramar. G) "Canal do Una", igarapé (riacho que nasce na mata e deságua em rio) que recebe 40% do esgoto urbano *in natura* de Belém. H) A planície de maré lamosa Banco Sul da Cidade durante a maré baixa. I) Orla sul da cidade de Belém.

## 5 DISCUSSÃO

Conforme os comentários apresentados na introdução deste artigo, no estuário do rio Pará não há clara definição do regime energético dominante, devido à larga atuação tanto das correntes de maré e fluviais (no substrato do funil estuarino) quanto das ondas (na desembocadura e nas áreas marginais rasas). A baía de Guajará corresponde à única conexão dos rios Guamá, Acará e Moju com este estuário, que, por essa "passagem", recebe a drenagem de uma área de ~87.400 km<sup>2</sup>.

A morfologia e a cobertura sedimentar do substrato da baía evidenciam a intensidade das correntes de maré e fluviais, corroborando com as descrições de "rios com maré" feitas por Wells (1995). Segundo este autor, "estuários dominados por maré" são todos aqueles onde as correntes de maré desempenham um papel fundamental no destino final dos sedimentos transportados a partir da cabeceira de um rio. Por sua vez, como subambientes dos estuários dominados por maré, os "rios com maré" possuem muitas características morfológicas e sedimentológicas estuarinas, mas ocorrem na porção topográfica mais baixa de rios com desembocadura e descarga fluvial expressiva.

A baía de Guajará, que se localiza há, aproximadamente, 100 km da desembocadura do estuário do rio Pará, recebe grande (e ainda não determinada) descarga dos rios Guamá, Acará e Moju pelos setores sudeste e sul, respectivamente. Pelo setor norte, adentram as correntes de enchente, com o fluxo iniciando-se no setor leste e, aproximadamente 40 minutos depois, no setor oeste. Nas marés de sizígia, a velocidade média das correntes superficiais é de cerca de 1,2 m/s no porto de Belém, com máximas de ~2,6 m/s em frente à ilha de Mosqueiro (BRASIL, 1962).

Na baía de Guajará, apesar do evidente impacto das mesomarés semidiurnas, a dominância dos processos fluviais prevalece. A duração superior do fluxo de vazante em relação à duração do fluxo de enchente - intensificada nos períodos de sizígia (devido ao alargamento do prisma de maré), as profundidades relativamente baixas, o substrato marcado por canais, a baixa salinidade, entre outras características, ajudam a comprovar essa situação energética.

Como se sabe, as ondas atuam diretamente na resuspensão de sedimentos; já as correntes de maré e o vento desempenham papel mais importante na definição do padrão de transporte, no retrabalhamento e na dispersão sedimentar (OGSTON et al., 2005; SOMMERFIELD, 2006). Por outro lado, se o suprimento de sedimentos é alto, a dispersão e a deposição são complexas (ALLEN; DUFFY, 1998; WALSH; NITTRouer, 2004), com a sazonalidade das variáveis ambientais (maré, chuva, descarga de água doce e de sedimentos, etc.) afetando, diretamente, a quantidade de material transportado/depositado (HARRIS et al., 1993; STAUB et al., 2000; DYER et al., 2000; NITTRouer; DEMASTER, 1986).

Nos ambientes dominados por maré, à medida que se aproxima a foz, diminui a intensidade das correntes fluviais e aumenta a das correntes de maré, e vice-versa (DALRYMPLE et al., 1992; DALRYMPLE; CHOI, 2004). Nesse sentido, considerando a orientação praticamente vertical da baía de Guajará, as correntes de maré diminuem de intensidade para sul, e as correntes fluviais, para norte. Os processos de sedimentação e a morfologia do substrato da área central são controlados pela interação entre

essas correntes. A atuação de ondulações ( $H \sim 0,5$  m; PINHEIRO, 1987) geradas por ventos de NE (com cerca de 20 km de *fetch* disponível) é observada na aceleração dos processos erosivos da margem sudoeste e na resuspensão de sedimentos finos nas áreas rasas (planícies de maré lamosa e barra em pontal) das margens leste e sudeste.

Os intensos processos erosivos observados na área de investigação (SILVEIRA, 1992), relacionados diretamente com as correntes fluviais e, secundariamente, com as ondas de N/NE, causam acentuado desmoronamento da margem e sugerem, ainda, a migração, para norte, do canal do rio Guamá e, para oeste, do canal de vazante da baía de Guajará, conforme identificado por Miranda (2006). Na região onde ocorre estreitamento do canal (centro leste e extremo norte), o substrato é erodido pelas fortes correntes de fundo, sendo observados, além de

profundidades de até 25 m, afloramentos das concreções ferruginosas e das argilas compactadas da Formação Barreiras.

Apesar da intensa erosão em alguns setores do substrato e margens da baía, dragagens contínuas são necessárias para manter navegáveis os canais de acesso ao Terminal Petroquímico de Miramar e ao Porto de Belém. A região onde se localizam esses portos (margem leste) apresenta sedimentação lamosa rápida. A deposição de lamas ao longo de toda margem leste e a formação da barra em pontal no setor sul ocorrem devido à diminuição da intensidade das correntes de maré e das correntes fluviais, para sul e para norte, respectivamente, ao longo de vários ciclos de maré. A baía de Guajará apresenta um regime hidrodinâmico elevado, comprovado pelos baixos teores (<20%) de argila presentes nos sedimentos de fundo (Figura 9).

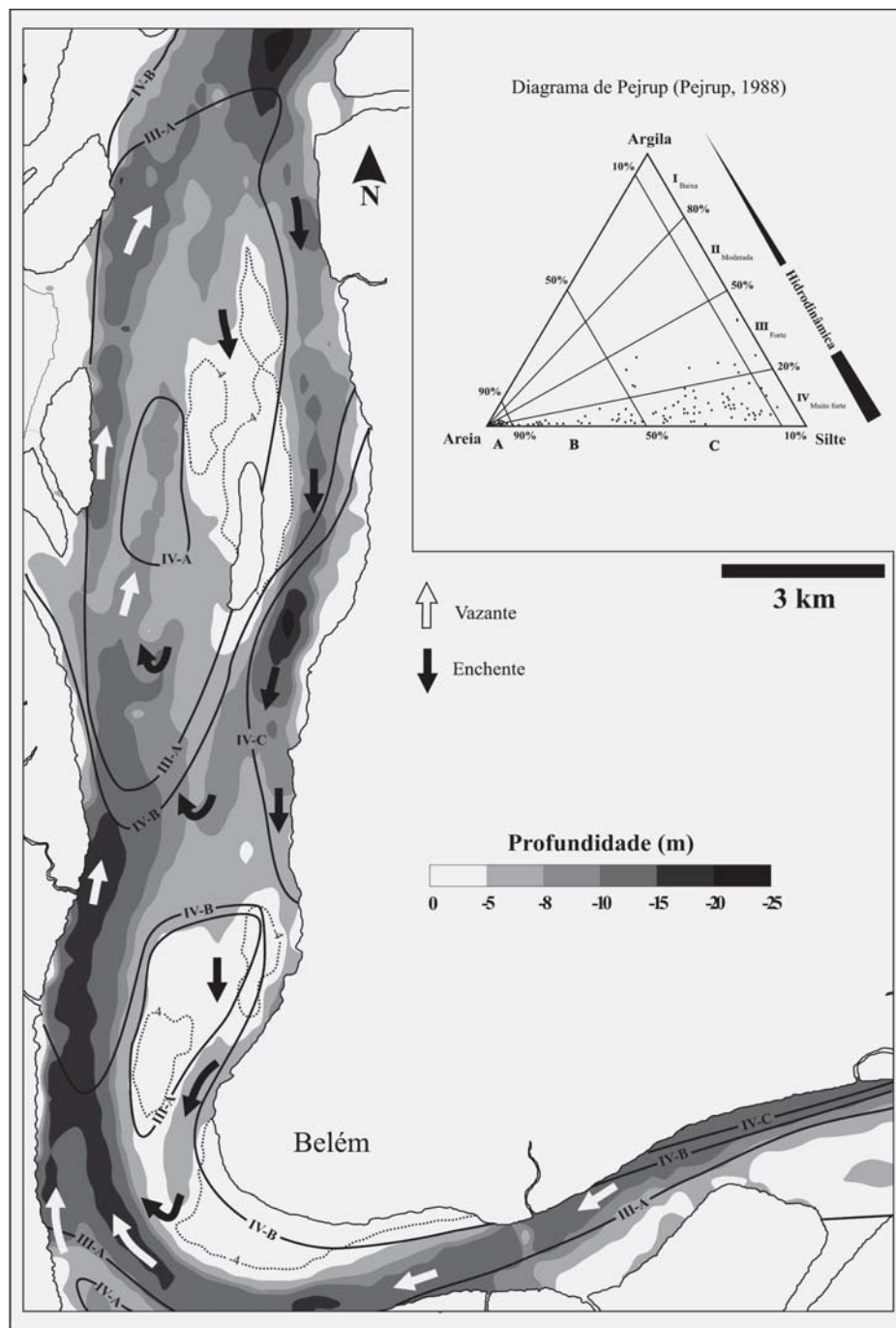


Figura 9 - Regime hidrodinâmico da baía de Guajará através da aplicação do Diagrama de Pejrup (PEJRUP, 1988).

Os sedimentos arenosos da baía de Guajará, de coloração avermelhada devido ao capeamento por óxido de ferro, têm como rocha-fonte o arenito ferruginoso conhecido como "grés-do-Pará" (Formação Barreiras). Em grande

parte das ilhas da baía de Guajará, e ao longo das margens dos rios Guamá e Acará, observam-se falésias ativas dessa formação geológica, sob constante retrabalhamento pela maré. A cobertura arenosa do substrato é mantida graças às fortes



correntes de vazante e, posteriormente, pelas correntes de enchente, que erodem o material fino depositado nos ciclos de maré anteriores.

Os sedimentos lamosos da baía de Guajará, também, podem ter como rocha-fonte a Formação Barreiras, que apresenta, além de arenitos e concreções ferruginosas, silitos e argilitos (LEITE et al., 1997; ROSSETTI, 2000, 2001; ROSSETTI; GOÉS, 2001). A grande área do substrato coberta por lama (90 km<sup>2</sup>) e as planícies de maré lamosa (~150 m de largura) da margem leste sugerem a magnitude do fluxo de sedimentos entre a sub-bacia hidrográfica dos rios Guamá, Acará e Moju e o estuário do rio Pará. O regime de chuvas regulares, típico da região Amazônica, mantém as consideráveis descargas de água doce desses rios e a elevada turbidez (profundidade Secchi d" 0,5 m) na região da baía de Guajará. De modo geral, assim como na região de rios da Coréia do Sul (LEE et al., 2007), a baixa topografia, o grande aporte fluvial e a atuação das correntes de maré são os principais controladores da deposição e da dispersão de sedimentos na área de investigação.

## 6 CONCLUSÕES

A despeito das características estuarinas, a baía de Guajará corresponde a um amplo ambiente fluvial sob expressivo impacto de mesomarés semidiurnas. A pouca presença da fração argila nos sedimentos de fundo sugerem que este corpo hídrico funcione com uma zona de "by passing" de sedimentos. Os canais e os

Os teores de matéria orgânica observados no setor leste estão associados à descarga de esgoto *in natura* da cidade de Belém e dos efluentes de cerca de 40 indústrias de beneficiamento de pescado localizadas principalmente nesse setor. A porção sul do canal de vazante está sob influência da descarga do rio Guamá, que bordejia a margem sul da cidade de Belém e, também, recebe esgoto urbano sem tratamento.

À medida que se reduz o tamanho dos grãos, a área superficial específica, a capacidade de troca de cátions, assim como a de concentração de poluentes aumenta. Na margem leste da baía, onde predominam sedimentos lamosos, localiza-se o Terminal Petroquímico de Miramar, onde há movimentação de cargas como óleo diesel, gás liquefeito de petróleo (GLP - gás de cozinha), querosene para aviação, gasolina comum, mistura MF-380 (combustível marítimo) e outros derivados de petróleo. As zonas topograficamente mais baixas consistem nas principais áreas da orla de Belém afetadas no caso de acidentes ambientais na baía de Guajará.

depósitos sedimentares são distintos, e a hidrodinâmica apresenta nível energético muito significativo, conforme evidenciado no Diagrama de Pejrup aplicado na área de estudo. Sedimentos lamosos predominam (72%), com ocorrência de sedimentos arenosos nas zonas de fortes correntes de maré.

## AGRADECIMENTOS

À Petrobras S.A., pelo suporte financeiro ao projeto PIATAM mar; ao Fundo Setorial de Óleo e Gás (CT-Petro), pelo financiamento do projeto

Petromar; ao Centro de Defesa Ambiental da Amazônia (CDA-Amazônia/Petrobras), pelo grande auxílio na logística de campo.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, J. R. L.; DUFFY, M. J. Temporal and spatial depositional patterns in the Severn Estuary, southwestern Britain: intertidal studies at spring–neap and seasonal scales, 1991-1993. **Marine Geology**, n. 146, p. 147-171, 1998.
- ALLISON, M. A.; LEE, M. T. Sediment exchange between Amazon mudbanks and shore-fringing mangroves in French Guiana. **Marine Geology**, n. 208, p. 169-190, 2004.
- BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Cartas de correntes de maré (rio Pará) de Salinópolis a Belém**. Brasília, DF: Marinha do Brasil, 1962. 30 p.
- CORRÊA, I. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, v. 32, n. 2, p. 109-118, 2005.
- DALRYMPLE, R. W.; CHOI, K. Morphologic and facies trends through the fluvial–marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. **Earth-Science Reviews**, n. 81, p. 135-174, 2004.
- DALRYMPLE, R.W.; ZAITLIN, B.A.; BOYD, R. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. **Journal of Sedimentary Petrology**, Ohana, n. 62, p. 1130-1146, 1992.
- DEGENS, E. T.; KEMPE, S. E; RICHEY, J. E. **Biogeochemistry of major world rivers**. New York: John Wiley and Sons, 1991.
- DYER, K. R.; CHRISTIE, M. C.; WRIGHT, E.W. The classification of intertidal mudflats. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 20, p. 1039-1060, 2000.
- EISMA, D.; AUGUSTINUS, P. G. E. F.; ALEXANDER, C. A. Recent and subrecent changes in the dispersal of Amazon mud. **Netherlands Journal of Sea Research**, Amsterdam, n. 28, p. 181-192, 1991.
- FIGUEIREDO, A. G., NITTRouer, C.A. New insights to high-resolution stratigraphy on the Amazon continental shelf. **Marine Geology**, n. 125, p. 393-399, 1995.
- FROIDEFOND, J. M.; LAHET, F.; HU, C.; DOXARAN, D.; GUIRAL, D.; PROST, M. T.; TERNON, J-F. Mudflats and mud suspension observed from satellite data in French Guiana. **Marine Geology**, n. 208, p. 153-168, 2004.
- GABIOUX, M.; VINZON, S. B.; PAIVA, A. M. Tidal propagation over fluid mud layers on the Amazon shelf. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 25, p. 113-125, 2005.
- GEYER, W. R.; BEARDSLEY, R. C. Introduction to special section on physical oceanography of the Amazon shelf. **Journal of Geophysical Research**, Boulder, n. 100, p. 2281-2282, 1995.
- GONÇALVES, F. D.; SOUZA FILHO, P. W. M; MIRANDA, F. P.; PARADELLA, W. R. Automatic Techniques for generation of environmental sensitivity index map to oil spill in the Guajará Bay, Belém-PA. **Revista Brasileira de Cartografia**, Brasília, DF, v. 58, n. 3, p. 255-262, 2006.
- HARRIS, P.T.; BAKER, E.K.; COLE, A.R.; SHORT, S.A. A preliminary study of sedimentation in the tidally dominated Fly River Delta, Gulf of Papua. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 13, p. 441-472, 1993.

HAYNES, R. **Human ecology**. New York : Chapman Hall. 1982.

KUEHL S. A.; DEMASTER, D. J.; NITTROUER, C. A. Nature of sediment accumulation on the Amazon continental shelf. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 6, p. 209-225, 1986.

LARSONNEUR, C. La cartographie des depots meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. **Journal Recherche Océanographique**, Allahabad, v. 2, n. 2, p. 33-39, 1977.

LEE, S. H.; LEE, L. J.; JO, H. R.; BAHK, J. J., CHU, Y.S. Complex sedimentation of the Holocene mud deposits in a ria-type coastal area, eastern Korea Strait. **Marine Geology**, n. 214, p. 389-409, 2007.

LEITE, F. P. R.; OLIVEIRA, M. E. C. B. ; ARAI, M. ; TRUCKENBRODT, W. Palinoestratigrafia da formação Pirabas e Grupo Barreiras, Mioceno do Nordeste do Estado do Pará, Brasil. **Revista Universidade de Guarulhos (Geociências)**, Guarulhos, n. 2, p. 141-147, 1997.

LENTZ, S. J. The Amazon River plume during AMASSEDS: subtidal current variability and the importance of wind forcing. **Journal of Geophysical Research**, Boulder, v. C2, n. 100, p. 2377- 2390, 1995.

MEADE, R. H.; DUNNC, T.; RICHEY, J. E.; SANTOS, U. de M.; SALATI, E. Storage and remobilization of suspended sediment in the lower Amazon River of Brazil. **Science**, n. 228., p. 488-490, 1985.

MIRANDA, A. G. **Dinâmica batimétrica da Baía de Guajará (Belém/PA)**. 2006. 49 f. Monografia (Bacharelado em Oceanografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

MIRANDA, A. G.; MENDES, A. C.; Santos, C. A. Estimativa da taxa de crescimento das formas de fundo (bancos e canais) da Baía de Guajará (PA) em um intervalo temporal de quatro décadas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 12, Florianópolis, 2007. **Anais...** CD-ROM.

NITTROUER, C. A., DEMASTER, D. J., 1986. Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present and future research. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 6, p. 5-30, 1986.

\_\_\_\_\_. The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river. **Continental Shelf Research**, Victoria, v. 16, n.5/6, p. 553-573, 1996.

OGSTON, A. S.; STERNBERG, R. W.; NITTROUER, C. A. New advances in fine-sediment transport. In: BRINK, K. H.; ROBINSON, A. R. (Ed.). **The Sea, the global coastal ocean, multiscale interdisciplinary processes**. New York: Wiley , p. 101–128, 2005.

PEJRUP, M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In: BOER, P. L.; VAN GELDER, A.; NIO, S. D. (Ed.). **Tide-influenced sedimentary environments and facies**. Dordrecht: D. Reidel, 1988, p. 289-300.

PINHEIRO, R. V. L. **Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará-Belém/PA**. 1987. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1987.

PIRES, J. M.; PRANCE, G. T.; The vegetation types of the Brazilian Amazon. In: PRANCE, G. T.; and LOVEJOY, T. E. (Ed.). **Key Environments Amazonia**. Oxford: Pergamon Press, 1985. p. 109-145.

ROSSETTI, D. F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luis Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, Coimbra, n. 133, p. 101–128, 2000.

ROSSETTI, D. F.; GOÉS, A. M. Imagine upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil applying ground penetrating radar. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 31 n. 2, p. 101–128, 2001.

ROSSETTI, D. F. Sedimentary evolution of the late Cenozoic in the northeast of Pará State: evidences of sea level fluctuations. **Journal of South America Earth Sciences**, n. 14, p. 101–128, 2001.

SANTANA, J. V. **Banco Interamericano de Desenvolvimento e política urbana no município de Belém: tensões e compatibilidades no modelo de gestão de cidades e no discurso da participação social**, 2006. Thesis (Ph.D) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SANTOS, M. L. S.; MEDEIROS, C.; MUNIZ, K; FEITOSA, F. A. N.; SCHWAMBORN, R.; MACÊDO, S. J. Influence of the Amazon and Pará Rivers on water composition and phytoplankton biomass on the adjacent shelf. **Journal of Coastal Research**, Flórida, v. 24, n. 3, p. 585–593, 2008.

SILVEIRA, O. F. M. **Estudo batimétrico/sonográfico do Estuário Guajará, Belém/PA**. 1992. 189 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1992.

SOMMERFIELD, C. K. On sediment accumulation rates and stratigraphic completeness: Lessons from Holocene ocean margins. **Continental Shelf Research**, Victoria, n. 26, p. 2225-2240, 2006.

SOUZA FILHO, P.W. M. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Brazilian Journal of Geophysics**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 427-435, 2005.

\_\_\_\_\_. Tectonic control on the coastal zone geomorphology of the northeastern Pará State. **Revista Brasileira de Geociências**, Curitiba, v. 30, n. 3, p. 523-526, 2000.

SOUZA FILHO, P.W. M.; LESSA, G. C.; COHEN, M. C. L.; COSTA, F. R.; LARA, R. J. Macrotidal transgressive barrier estuarine system of the Eastern Amazon coast, Northern Brazil. In: DILLENBURG, Sérgio F.; HESP, Patrick A (Ed.). **Geology and geomorphology of holocene coastal barriers of Brazil**. New York: Springer-Verlag. 410 p. (Series: Lecture Notes in Earth Sciences, v. 107).

STAUB, J. R.; AMONG, H. L.; GASTALDO, R. A. Seasonal sediment transport and deposition in the Rajang River delta, Sarawak, East Malaysia. **Sedimentary Geology**, Coimbra, n. 133, p. 249–264, 2000.

WALSH, J. P.; NITTRouer, C. A. Mangrove-bank sedimentation in a mesotidal environment with large sediment supply, Gulf of Papua. **Marine Geology**, n. 208, p. 225–248, 2004.

WALTER, H.; LIETH, H. **Klimadiagramm-Weltatlas**. Jena: Pustl. Gustav Fischer, Germany. 1967

WELLS, J. T. Tide-dominated estuaries and tidal rivers. In: PERILLO, G. M. E. (Ed.). **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. New York: Elsevier. Developments in Sedimentology, n. 53, 1995.