

UTILIZAÇÃO DE MÉTODOS ACÚSTICOS EM ESTUDOS DE DINÂMICA COSTEIRA: EXEMPLO NA DESEMBOCADURA LAGUNAR DE CANANÉIA

Fernando S. Paolo¹ e Michel M. Mahiques²

Recebido em 24 maio, 2007 / Aceito em 13 junho, 2008
Received on May 24, 2007 / Accepted on June 13, 2008

ABSTRACT. As a function of their interface conditions between fresh and saline waters, lagunar and estuarine mouths are highly complex and dynamic geomorphological systems. As a consequence of the spatial and temporal variability of tidal flows the bottom responds with a big variability in sediment characteristics and morphology. In this sense it is possible to directly relate the bottom circulation and sedimentary transport with the bedforms generated. Echosounding, sidescan sonar and high resolution seismic profiles, surveyed in the Cananéia lagoonal mouth revealed the existence of an extremely complex bed load dynamics, characterized by ripples marks and sand waves with metric heights. Bigger sand waves, localized in a depression of the lagoonal mouth, show a change of polarity in its asymmetry with a large symmetric form in the inversion point. This morphologic pattern did not present temporal variability in a yearly scale, suggesting the persistence of a pattern of bottom flows. This dynamic also presents constant convergent flows, apparently independent of the flood or ebb tide. The results allowed us to establish a first qualitative model of bottom circulation in the area, with potential uses in navigation and shore protection studies.

Keywords: morphodynamics, sediment transport, bathymetry, sidescan sonar, seismic reflection.

RESUMO. Em função de suas condições de interface entre águas doces e salinas, desembocaduras estuarinas e lagunares constituem sistemas geomorfológicos altamente complexos e dinâmicos. Como consequência da variabilidade espacial e temporal dos fluxos de maré, o leito responde com uma grande variabilidade nas características morfológicas e sedimentares. Neste sentido, é possível relacionar diretamente a circulação de fundo e o transporte sedimentar com as feições submersas geradas. Perfis de ecossondagem, sonar de varredura lateral e sísmica de alta resolução, executados na desembocadura lagunar de Cananéia, revelaram a existência de uma dinâmica de fundo extremamente complexa, caracterizada por marcas onduladas e ondas de areia de alturas métricas. As maiores ondas de areia, localizadas em uma depressão na desembocadura lagunar, apresentam inversão de polaridade em sua assimetria, com a presença de ondas simétricas de grande tamanho no ponto de inversão. Este padrão morfológico não apresenta variação temporal em escala anual, sugerindo a persistência de um padrão de fluxos sobre o leito. Esta dinâmica revela, também, a constância de fluxos convergentes que aparentemente independem das condições de maré enchente ou vazante. Os resultados permitiram o estabelecimento de um primeiro modelo qualitativo de circulação de fundo na área, com aplicações potenciais na navegação e estudos de proteção da costa.

Palavras-chave: morfodinâmica, transporte sedimentar, ecossondagem, sonar de varredura lateral, sísmica de reflexão.

¹Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Rua do Matão, 1226, 05508-900 São Paulo, SP, Brasil. Tel.: (11) 3091-4750 – E-mail: fspaulo@iag.usp.br

²Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, Departamento de Oceanografia Física, Química e Geológica, Praça do Oceanográfico, 191, 05508-120 São Paulo, SP, Brasil. Tel.: (11) 3091-6609; Fax: (11) 3091-6610 – E-mail: mahiques@usp.br

INTRODUÇÃO

A utilização de métodos geofísicos, especialmente métodos acústicos, em áreas submersas, possibilita uma visão mais ampla e contínua da superfície e subsuperfície investigada. Além disso, tratam-se de métodos não destrutivos, sem a necessidade de penetração física no meio investigado (Souza, 2006).

Análises sistemáticas da interação entre a dinâmica e a morfologia de fundo, utilizando, de forma integrada, métodos acústicos como ecobatimetria, sonografia de varredura lateral e perfilagem sísmica rasa, possibilitam o estudo, com alto grau de detalhamento, de feições da topografia submarina e da hidrodinâmica subjacente (Berné et al., 1993; McClennen et al., 1997; Wewetzer & Duck, 1999; Wewetzer et al., 1999; Duck & Wewetzer, 2000; Lobo et al., 2002).

Por outro lado, a maior parte dos trabalhos relativos à morfologia e dinâmica sedimentar de sistemas estuarinos e lagunares, realizados no Brasil, caracteriza-se pela adoção de métodos tradicionais de investigação geológica, ou seja, para áreas emersas, a observação direta dos estratos sedimentares e, para as submersas, a análise de amostras de superfície de fundo, de sedimentos em suspensão ou testemunhos de sondagens rasas.

Estuários são sistemas dominados pelas correntes de maré, onde a direção dos fluxos reverte regularmente e os padrões associados à circulação de enchente e vazante comumente não coincidem (Miranda et al., 2002). Isto caracteriza um sistema com variação espacial onde algumas partes são dominadas pela maré enchente e outras pela vazante. A natureza alternada e turbulenta dos movimentos estuarinos gera a necessidade do conhecimento de um vetor resultante, sob condições estacionárias. Este vetor corresponde ao transporte resultante, após a remoção do movimento oscilatório da maré e que, por representar condições médias, tem grande importância no estudo da dinâmica desses sistemas (Dyer, 1997).

Pequenas feições submersas relacionadas a movimentos de curto período da água sobre o leito, consideradas *feições de pequena escala*, são comumente chamadas de marcas onduladas (*ripple marks*). Feições com comprimento e altura maiores que as marcas onduladas e diretamente relacionadas com a interação entre os fluxos de fundo dominantes e o leito são denominadas *feições de grande escala* e podem ser classificadas como: megaondulações (*megaripples*), ondas de areia (*sand waves*) ou dunas submersas (*subaqueous dunes*).

As *marcas onduladas* são restritas a sedimentos com diâmetro médio inferior a 0,17 mm (2,5 ϕ) e a correntes cuja estrutura de velocidade não se estende consideravelmente além da camada

limite de fundo (Allen, 1968). Estas feições possuem comprimentos de onda menores que 0,6 m e alturas abaixo de 0,1 m. Já as megaondulações caracterizam-se por uma granulometria da ordem de duas ou três ordens de magnitude maior, com comprimentos de onda e alturas características acima de 0,6 m e 0,1 m respectivamente (Allen, 1968). Ondas de areia, por sua vez, são transversais aos fluxos oscilantes relacionados à maré onde, tanto na enchente como na vazante, estes fluxos são efetivos no transporte de material de fundo. Os comprimentos de onda variam entre 25 e 1000 m com alturas entre 1 e 25 m, dependendo das intensidades dos fluxos e profundidades em questão.

OBJETIVO

O objetivo proposto neste trabalho consiste em analisar a aplicabilidade de métodos acústicos submersos e, mais especificamente, de sonografia de varredura lateral e perfilagem sísmica de alta resolução, na classificação da morfologia de fundo e na caracterização da variabilidade temporal das feições submersas de maior escala (ondas de areia), estabelecendo relações com a dinâmica subjacente, na desembocadura lagunar de Cananéia-Iguape (sudeste do Brasil). Assim, visa oferecer subsídios para a compreensão do transporte sedimentar e caracterização da morfodinâmica deste sistema costeiro.

Embora existam relações empíricas (Ernstsen et al., 2006; Noormets et al., 2006) associando velocidades de correntes com transporte sedimentar e tamanho das feições associadas, não foi viável uma abordagem mais quantitativa, devido justamente a não ser possível manter estável uma plataforma para obter tais medições (visto a intensidade dos fluxos em questão). Esta dificuldade justifica o fato de não existirem, na literatura, dados de velocidade de correntes (a menos de alguns pontos isolados) e, portanto, de valores absolutos de transporte sedimentar. O mesmo se aplica ao posicionamento para coleta de amostras, pelo qual se optou trabalhar com valores médios da cobertura sedimentar, ao invés de valores pontuais. Assim, mostra-se de extrema importância para a região a abordagem proposta no presente estudo.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à desembocadura lagunar de Cananéia, uma das três conexões do sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape com o oceano (Fig. 1), localizado no litoral sul do estado de São Paulo, Brasil, entre as latitudes 24°37'S e 25°07'S e longitudes 47°23'W e 48°05'W.

A desembocadura lagunar de Cananéia tem sido estudada

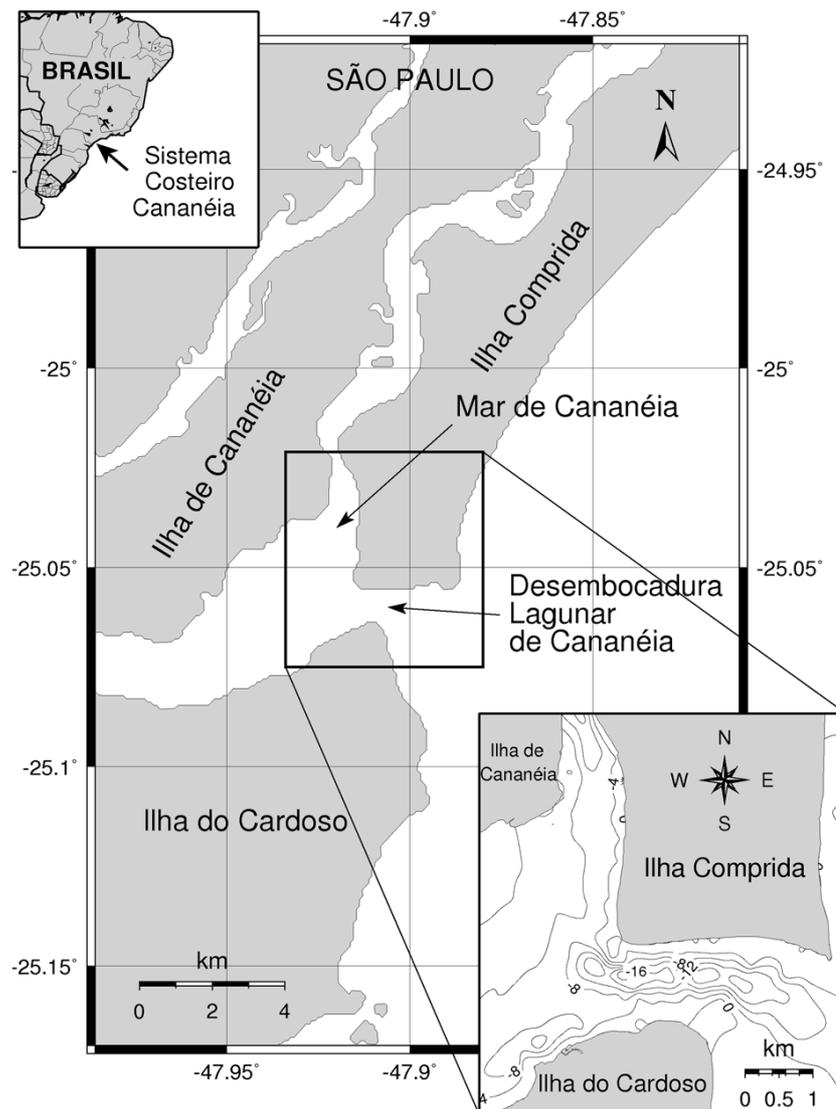


Figura 1 – Localização da desembocadura lagunar de Cananéia, destacando-se o canal central, a parte mais profunda do sistema.

desde meados do século XX, principalmente no que tange às modificações da linha de costa. Poucos trabalhos fazem referência ao transporte sedimentar, sendo mais específicos no que diz respeito à carga em suspensão. A caracterização do transporte de fundo, nesta área, é tremendamente prejudicada em função das velocidades de corrente de fundo, que podem atingir até $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ (Miyao, 1977), trazendo dificuldades de ordem logística (posicionamento da embarcação durante o processo amostral e representatividade do espaço amostral, entre outros).

A topografia da planície costeira adjacente é relativamente plana, com altitudes raramente ultrapassando 10 m. Exceções

se fazem somente nas intrusões alcalinas dos morros de São João, na Ilha de Cananéia, que atinge a altitude de 120 m, e Morrete, localizado na Ilha Comprida e que atinge 40 m de altitude. O embasamento cristalino, ao redor da Planície Costeira Cananéia-Iguape, é de idade pré-cambriana e de origem metamórfica. Compõe-se basicamente de rochas metamórficas do tipo filitos, micaxistos e gnaisses, intrudidos por granitos, adamelitos e granodioritos. Cortando todo esse complexo, afloram rochas alcalinas intrusivas mesozóicas. Ocorrem, também, outros tipos de rochas, como quartzitos, anfíbolitos, diabásios e calcoxistos, ao longo do rio Ribeira de Iguape.

A rede hidrográfica da região é representada por rios cujas

bacias exibem alto gradiente apenas em seu trecho inicial e tornam-se muito suaves na planície. Desta maneira, a influência marinha se estende por vários quilômetros rio acima. As profundidades chegam a atingir 22 metros na desembocadura lagunar de Cananéia, e 7 metros na desembocadura lagunar de Icapara (Tessler, 1982; Tessler & Furtado, 1983). Contudo, na direção das áreas oceânicas adjacentes, as profundidades caem para 2-3 m, fruto da existência de extensos bancos arenosos submersos (Geobrás, 1966).

Segundo Mesquita & Harari (1983) as amplitudes médias das marés situam-se em torno de 1,2 m na sizígia e 0,25 m na quadratura. O padrão de circulação das águas é condicionado basicamente pela entrada de água nas desembocaduras de Icapara ao norte e de Cananéia ao centro, sendo que a desembocadura mais ao sul, denominada de Ararapira, apresenta as menores trocas de água e sedimento com o oceano adjacente. Estudos prévios sobre a circulação do sistema (Miyao, 1977) constataram a predominância de correntes seguindo a direção do eixo longitudinal dos canais estuarino-lagunares, com a ocorrência de fluxos de sentido contrário, em superfície e fundo, no momento de reversão da maré. Verificou-se que a duração da enchente, no fundo, é maior que a vazante. Porém, as velocidades máximas observadas sobre o fundo foram maiores na vazante (0,7 m/s) que na enchente (0,6 m/s). Já em superfície são comuns velocidades acima de 1 m/s.

Sob o ponto de vista da cobertura sedimentar observa-se a predominância de sedimentos arenosos, cuja fonte principal está na ressuspensão a partir do fundo ou erosão das margens, principalmente nas ocasiões de sizígia quando ocorre um incremento na intensidade dos fluxos gerados pela maré (Tessler & Furtado, 1983; Bonetti Filho, 1995). No Mar de Cananéia, propriamente dito, 78,8% das amostras analisadas por Tessler (1982) apresentaram diâmetro médio entre areia fina e silte grosso, com diminuição deste diâmetro a partir da desembocadura lagunar para dentro do sistema. No canal principal, foram encontradas, predominantemente, areias finas, verificando-se a ocorrência de areias muito finas na porção central da desembocadura, finas junto à Ilha do Cardoso e médias no lado da Ilha Comprida, o que reflete a posição do canal principal de circulação.

METODOLOGIA

Aquisição dos dados

Para a execução do presente trabalho foram realizados três levantamentos geofísicos na desembocadura lagunar do sistema Cananéia, nos períodos de novembro/2004, agosto/2005

e janeiro/2006. Estes incluíram: levantamentos sonográficos utilizando-se um sonar de varredura lateral Marine Sonic (300 kHz) acoplado a uma ecossonda Ocean Data Bathy-500MF (50 kHz) e a um sistema DGPS; levantamentos sísmicos de alta resolução utilizando-se os registros de *pinger* (24 kHz) e *boomer* (300 Hz a 1 kHz) através de um sistema de aquisição digital Meridata MD-DSS, também acoplado a um DGPS. Todas as coordenadas geográficas são referidas ao WGS84.

Os levantamentos foram efetuados a bordo da embarcação de pesquisa "Albacora" do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. A navegação durante o levantamento foi mantida a uma velocidade entre 3 e 4 nós, o que permite gerar uma razão de aspecto (escala vertical/escala horizontal) adequada sobre as imagens. Para correção batimétrica, a estimativa da velocidade do som na água foi feita com um CTD Valeport.

Dados de batimetria

Foram confeccionados dois Modelos Digitais de Elevação. Para o primeiro, foram digitalizadas 352 cotas batimétricas (Fig. 3), extraídas da carta náutica N° 1703 (escala 1:27.448), 3ª edição, publicada pela DHN em 1985 (DHN-MM, 1985). Este conjunto de dados permitiu a geração de uma grade regular com resolução de 45 metros. O segundo modelo, referente à área varrida pelo levantamento batimétrico, permitiu a elaboração de uma grade com resolução de 5 metros. Em ambos os casos, para evitar o *aliasing* espacial e eliminar dados redundantes, foi calculada a mediana entre os valores de profundidade, sendo então, interpolados pelo método *spline* (Smith & Wessel, 1990). A linha de costa utilizada, tanto no modelo batimétrico como na maior parte das Figuras, foi introduzida como uma isóbata de valor zero, referente ao levantamento GPS realizado por Freitas (2005).

Sonografia de varredura lateral

Os registros de sonografia foram tratados individualmente (imagem por imagem) com auxílio do *software* Sea Scan PC Review, onde foram aplicados filtros digitais para excluir as frequências referentes ao "ruído" (e.g. eco, reverberação, ruído ambiental, entre outros). Em seguida, aplicou-se em cada imagem padrões de cores que permitiram realçar os contrastes produzidos pelas diferentes amplitudes do sinal de retorno e pelas regiões de sombra acústica. Foram, então, gerados mosaicos com uma resolução de 0.25 m/pixel através de um *software* específico (SonarWeb, Chesapeake Technology, EUA). Sobre os registros sonográficos foram efetuadas medições de comprimento de onda e simetria das marcas onduladas e megaondulações,

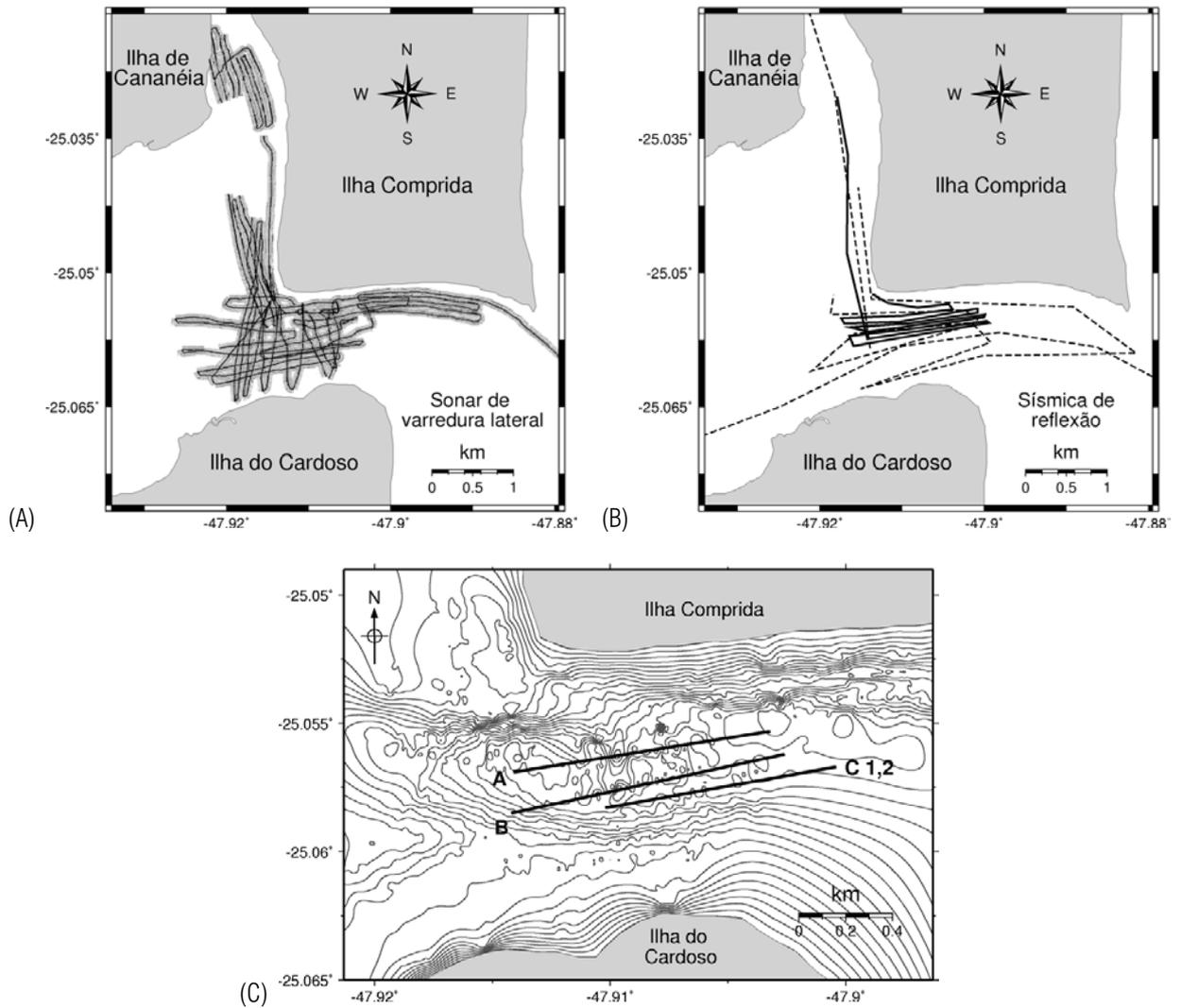


Figura 2 – (A) Perfilagem realizada com o sonar de varredura lateral. (B) Perfilagem sísmica de alta resolução (linha tracejada: primeiro levantamento, linha cheia: segundo levantamento). (C) Detalhe da batimetria do canal com os três perfis sísmicos apresentados na Figura 6.

bem como medidas de altura das feições utilizando a seguinte expressão:

$$H_t = \frac{H_f L_s}{R_s + L_s} \quad (1)$$

onde H_t é a altura da feição, H_f a distância do peixe (fonte-receptor) ao fundo, L_s o comprimento da sombra acústica e R_s a distância do peixe à feição.

Perfilagem sísmica de alta resolução

Para o pós-processamento dos registros sísmicos foram utilizados os *softwares* específicos SVIEW4 para visualização e tratamento e MDPS para interpretação. Em cada registro foram aplicados filtros digitais (passa-alta e passa-baixa), configurou-se,

de maneira individual, o ganho (*gain*), e aumentaram-se as escalas verticais de cada perfil. Através dos registros sísmicos foram obtidas medidas de comprimento das ondas de areia, determinando-se a distância entre dois pontos georreferenciados sobre duas cristas consecutivas (Eq. 2).

$$D_{P1P2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

onde D_{P1P2} é a distância entre os pontos $P1$ e $P2$, e x_i e y_i são as coordenadas (em UTM) associadas a tais pontos. Também foram obtidas medidas de altura e profundidade médias (escala vertical ajustada com a velocidade de propagação do som no meio) e o comprimento da projeção horizontal de cada face da

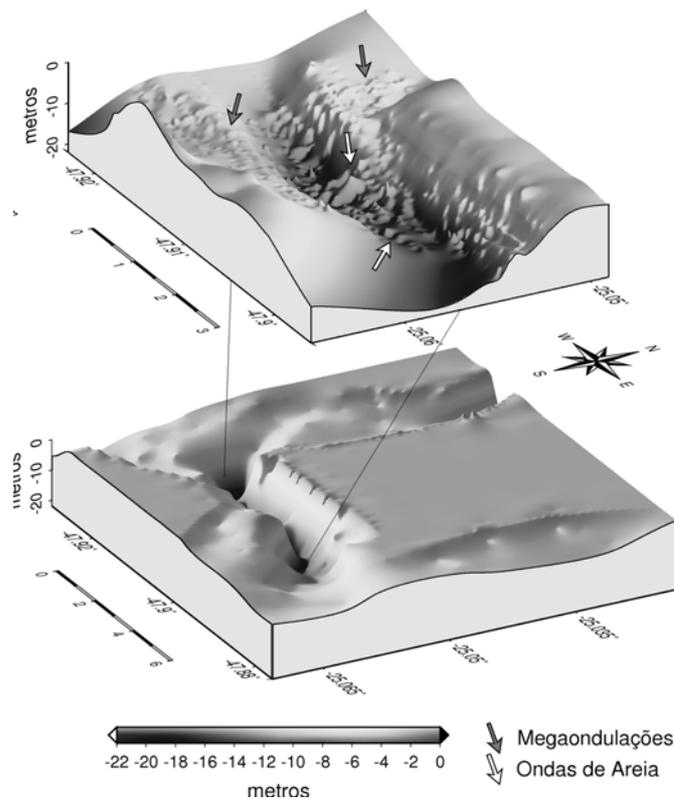


Figura 3 – Modelo digital de elevação da desembocadura lagunar de Cananéia. (Abaixo) Modelo confeccionado a partir da digitalização da carta náutica N° 1703 publicada pela DHN em 1985 (DHN-MM, 1985), onde observa-se o aumento abrupto da profundidade na porção central da desembocadura, atingindo até 22 m. Fora desse canal as profundidades não ultrapassam os 10 m. (Acima) Detalhe do canal. Modelo realizado com levantamento batimétrico de alta resolução, onde observa-se a complexidade do relevo de fundo (*megaripples* e *sand waves*).

feição, com o qual se obteve o índice de simetria (Eqs. 3 e 4).

$$\frac{L_s}{L_l} \tag{3}$$

$$\frac{L_s}{L_l} - 1 \tag{4}$$

onde L_s e L_l são as projeções horizontais de barlar (*stoss side*) e sotamar (*lee side*) respectivamente, sendo o segundo modificado (de -1) para relacionar feições simétricas com valores próximos de zero. Obteve-se, também, a inclinação de cada face mediante uma relação trigonométrica simples (Eq. 5).

$$A_x = \arctan \frac{H}{L_x} \tag{5}$$

onde A_x é o ângulo de inclinação (com relação à horizontal) de cada face, H é a altura da feição e L_x é a projeção horizontal da face em questão, sendo $x = s$ para o *stoss side* e $x = l$ para o *lee side*.

Classificação das feições submersas

Para a geração de feições de grande escala, um ambiente subaquoso deve obedecer a algumas premissas (Dalrymple & Rhodes, 1995):

- devem ser ambientes arenosos modernos;
- devem apresentar profundidades superiores a 1 metro;
- o tamanho das partículas sedimentares deve ser igual ou maior que 0,17 mm ($2,5 \psi$, areia fina) e;
- as velocidades de corrente devem ser superiores a $0,4 \text{ m.s}^{-1}$.

Dentro dessas características, três tipos de ambientes apresentam condições sedimentares e hidrodinâmicas que favorecem a formação dessas feições, a saber:

- rios;
- ambientes costeiros dominados por marés e;
- ambientes marinhos rasos.

Ashley (1990) propôs uma maneira de classificar as feições de grande escala, associando principalmente o tamanho e a forma destas aos processos hidrodinâmicos que as geraram. Para tal, foi estabelecida uma hierarquia dos principais descritores morfológicos das feições submersas de acordo com sua importância:

- de primeira ordem – comprimento de onda, altura e dimensionalidade: 2D ou 3D;
- de segunda ordem – tamanho e orientação das feições superpostas, tipo e granulometria do sedimento constituinte e;
- de terceira ordem – ângulo das faces e simetria do perfil, características do trem de ondas, área do leito coberta pela feição e evolução temporal.

Para considerar o tamanho de uma feição como sendo a relação entre seu comprimento e sua altura, é possível utilizar a razão L/H , denominada índice da forma vertical (Gorsline & Swift, 1977), através da qual os autores subdividem as feições de grande escala da seguinte maneira:

- para $L/H < 20$: *megaondulações* (feições submersas pequenas a médias);
- para $L/H > 20$: ondas de areia (feições submersas grandes a muito grandes).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relevo de fundo

A Figura 3 apresenta os resultados dos dois modelos digitais de elevação elaborados. Os canais lagunares internos possuem largura variável entre 1 e 3 km (Freitas, 2005) e profundidade máxima de 12 m (Fig. 3). De modo geral, a área apresenta grande variabilidade batimétrica com menores profundidades junto à Ilha do Cardoso e maiores junto à Ilha Comprida. Esta assimetria na configuração batimétrica é indicativa da prevalência de condições deposicionais, ao sul, e erosivas, ao norte da desembocadura, sugerindo a migração da mesma para norte.

Um canal profundo, exibindo profundidades de até 22 metros, desenvolve-se ao longo da desembocadura lagunar. Tanto a montante quanto a jusante deste canal, as profundidades decrescem bruscamente, para valores menores que 10 metros.

A observação de cartas náuticas antigas (DHN-MM, 1952) revela que este canal profundo tem se mantido estável em escala de décadas. O modelo de detalhe (Fig. 3B) exibe feições de escala métrica, associáveis a megaondulações e ondas de areia.

Feições submersas

Com base nos descritores morfológicos de primeira, segunda, e terceira ordens, apresentados anteriormente, foram identificados distintos padrões de feições de fundo na área de estudo (Figs. 4 e 5). Desta maneira, as feições foram classificadas em três grupos quanto ao tamanho e dois subgrupos quanto à simetria:

- **padrão A** – *Feições submersas 2D pequenas (megaondulações)*: grupo de dunas submersas, com comprimento de onda entre 0,6-5 m e altura entre 0,25-1,00 m;
- **padrão B** – *Feições submersas 2D médias (megaondulações)*: grupo de dunas submersas com comprimento de onda entre 5-12 m e altura entre 0,50-1,60 m;
- **padrão C** – *Feições submersas 2D grandes e muito grandes (ondas de areia)*: grupo de dunas submersas com comprimento de onda maior que 40 m e altura maior que 1,25 m.

Sendo, por sua vez, subdivididas em:

- *simétricas* e;
- *assimétricas*.

A partir das imagens de sonografia foram interpretadas basicamente as feições submersas pequenas e médias (*megaripples*). As feições de maior tamanho (ondas de areia) não foram registradas adequadamente pelo sonar de varredura lateral dentro da configuração de feixe acústico utilizada (50 m de varredura em cada lado), sendo notadas indiretamente pela variação da coluna d'água (no centro da imagem) nos registros sonográficos (Fig. 4).

A Figura 5A foi gerada interpolando-se, pelo método *spline* (Smith & Wessel, 1990), valores pontuais de amostras sedimentares coletadas por Araujo (2006), tendo estas uma cobertura razoável na região de interesse. Desta forma, gerou-se uma grade regular com a finalidade de se ter uma representação média da cobertura sedimentar. Na Figura 5B observa-se uma variação importante no tamanho e simetria das feições e, portanto, nos padrões do transporte sedimentar de fundo, num curto espaço. Diferentes padrões morfológicos foram encontrados no sistema. A simultaneidade de feições de distintos tamanhos sugere a co-existência de fluxos de distinta intensidade, não havendo, em princípio, uma uniformidade na intensidade do transporte sedimentar (resultante) ao longo da desembocadura. Quanto à simetria é possível identificar uma tendência de feições assimétricas nas proximidades da margem da Ilha Comprida, enquanto as simétricas ocorrem na parte mais interna da desembocadura lagunar.

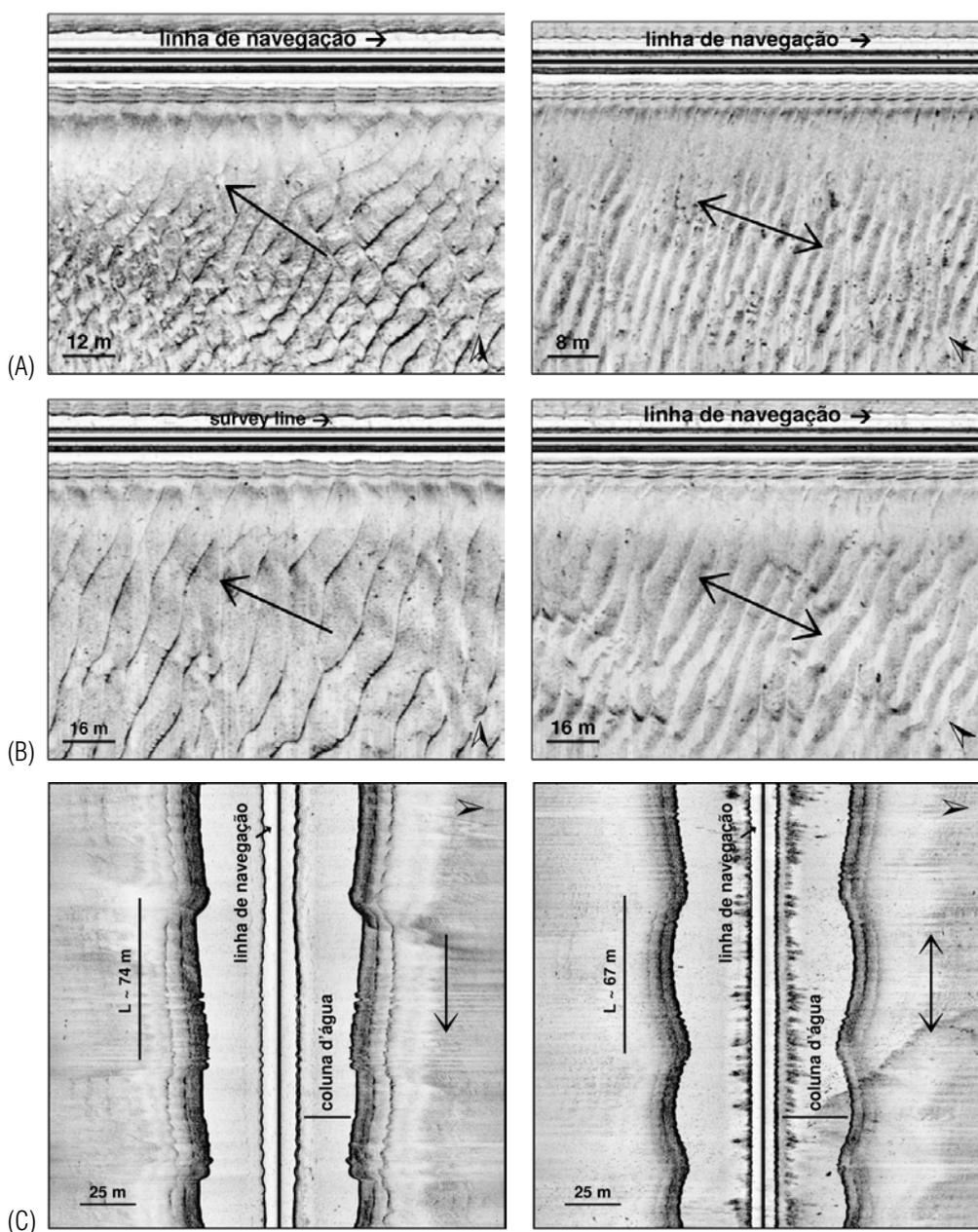


Figura 4 – Registros sonográficos das feições submersas, classificadas em (A) pequenas (megaondulações), (B) médias (megaondulações) e (C) grandes (ondas de areia), onde as setas indicam simetria ou assimetria no transporte.

Em função de seu tamanho, as ondas de areia existentes na porção mais profunda da desembocadura são melhor registradas na perfilagem sísmica, que foi utilizada principalmente para determinar as características geométricas de tais feições. A presença deste padrão morfológico está de acordo com a descrição granulométrica de fundo, apresentada por Tessler (1982), uma vez que ondas de areia não se formam se mais de 10% de lama ou

12% de areia grossa está presente no sedimento (Bokuniewicz et al., 1977). Ao longo deste campo de ondas de areia (Fig. 6) ocorre uma mudança de assimetria, de um extremo a outro, passando por ondas simétricas com as maiores alturas do conjunto (até 7 metros).

Os parâmetros morfológicos (Tab. 1) foram obtidos através de medições realizadas diretamente sobre os perfis sísmicos. Como

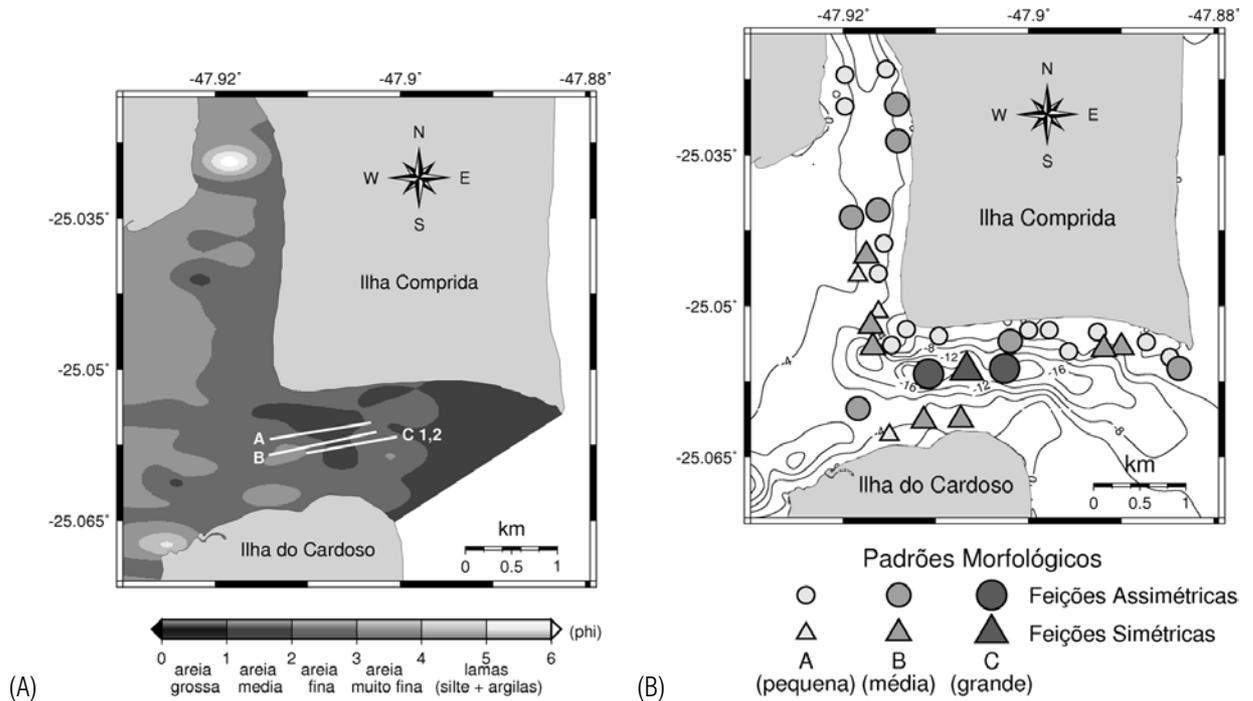


Figura 5 – (A) Cobertura sedimentar (modificado de Araujo, 2006) e localização dos perfis sísmicos da Figura 6. (B) Padrões das feições dunares submersas encontrados no leito da Barra de Cananéia.

Tabela 1 – Parâmetros morfológicos medidos sobre as ondas de areia do canal da desembocadura lagunar de Cananéia. Levantamentos espaçados de aproximadamente um ano.

	H	L	Ls	LI	L/H	Ls/LI	As	AI
Primeiro levantamento								
Média assímét. de vazante	4,4	103,1	68,3	23,3	23,5	3,2	3,7	12,0
Desvio assímét. de vazante	0,4	20,7	9,1	7,6	5,3	0,9	0,3	4,0
Média simétricas	5,0	68,1	35,1	34,0	14,8	1,1	9,1	8,6
Desvio simétricas	1,9	10,8	17,3	18,1	3,2	0,1	2,4	1,9
Média assímét. de enchente	2,6	79,3	43,3	18,3	32,0	2,4	3,4	8,0
Desvio assímét. de enchente	0,4	14,3	7,8	1,5	10,5	0,3	0,6	1,7
Segundo levantamento								
Média assímét. de vazante	4,7	103,0	57,6	17,3	22,8	3,3	4,9	15,0
Desvio assímét. de vazante	1,6	34,9	16,7	2,3	8,7	0,9	1,8	3,8
Média simétricas	4,0	76,6	51,9	37,9	20,3	1,4	4,8	6,6
Desvio simétricas	1,3	15,1	25,2	18,2	5,3	0,1	1,9	2,7
Média assímét. de enchente	2,2	82,0	50,4	29,1	38,4	1,8	3,1	4,3
Desvio assímét. de enchente	0,5	28,8	15,3	11,0	15,6	0,3	1,4	1,7

H = altura (m), L = comprimento (m), Ls e LI = projeções horizontais das faces a barlar (stoss side) e sotamar (lee side) respectivamente (m), L/H = índice da forma vertical, Ls/LI = índice de simetria, As e AI = ângulos de inclinação de cada face (grau).

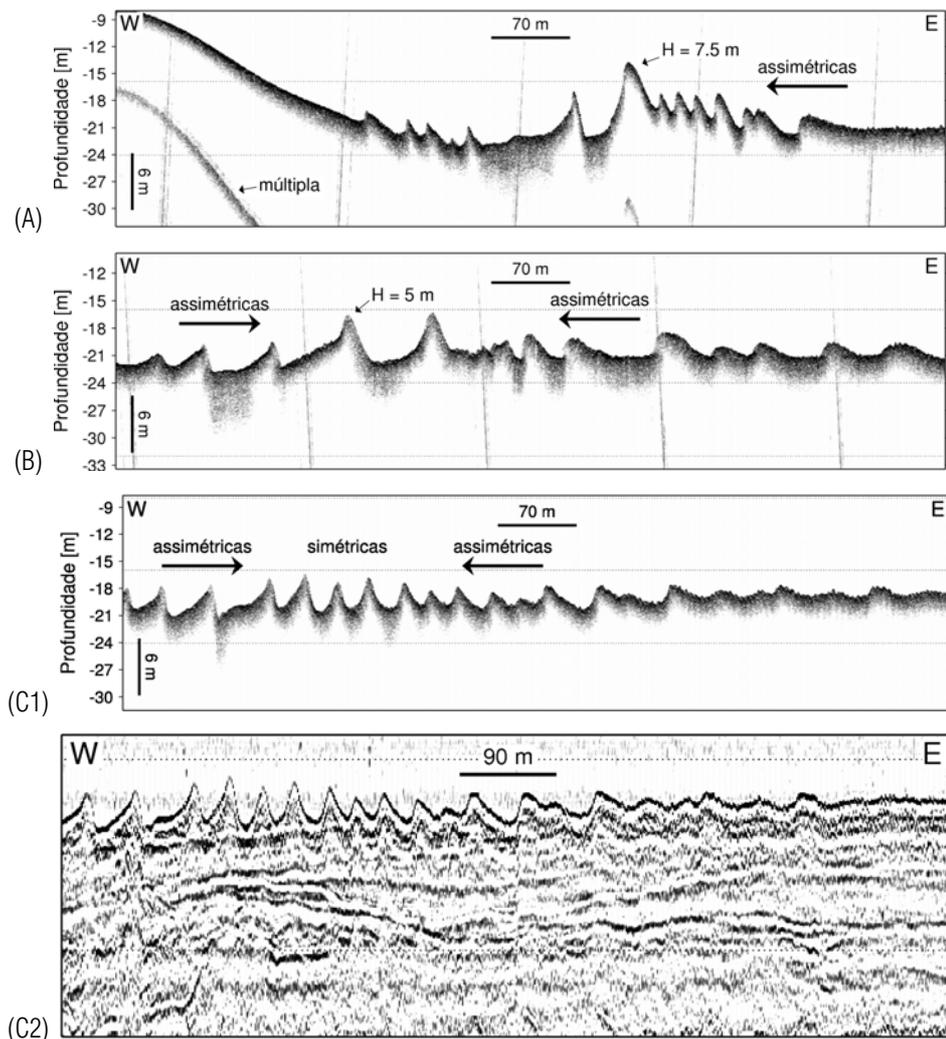


Figura 6 – Perfis sísmicos revelando a estrutura e a morfologia das ondas de areia existentes na parte mais profunda da desembocadura, onde (A), (B), (C1) Pinger, e (C2) Boomer. Note-se a inversão de assimetria.

feições perfeitamente simétricas teriam o índice de simetria igual a 1 (Eq. 3) foram consideradas as feições com índice até 1.5 como sendo simétricas.

As ondas de areia simétricas apresentam altura variável entre 2,8 e 7,0 metros (média de 4,6 metros) e comprimento de onda de 52,9 a 101,3 metros (média de 73,4 metros). As ondas assimétricas indicativas de vazante apresentam maiores alturas (média de 4,6 metros) e comprimentos de onda (média de 103 metros) quando comparadas às assimétricas de enchente (altura média de 2,4 metros e comprimento de onda médio de 80,9 metros), apresentando diferenças significativas, também, em todos os outros parâmetros relacionados. Comparando-se as ondas simétricas com as assimétricas verifica-se que es-

tas últimas possuem cristas mais escarpadas e aparecem como feições de transição entre as grandes feições simétricas e as megaondulações, ajustadas a menores intensidades de fluxo.

Comparando-se os levantamentos sísmicos realizados com intervalo de aproximadamente um ano, notam-se semelhanças na relação “altura x comprimento” de onda (Fig. 7), sugerindo a persistência do padrão morfológico das ondas de areia sobre o fundo.

Observando-se a relação entre a altura (H) das feições e a profundidade local (Fig. 8), nota-se que há uma dispersão considerável entre os valores isolados de cada feição e a relação proposta por Yalin (1964) (Eq. 6). Mesmo considerando-se a média das alturas das feições à mesma profundidade, é possível veri-

ficar a discordância entre as formas de fundo da área de estudo e a proposição teórica. Allen (1970), por sua vez, sugeriu uma relação empírica (Eq. 7) que muito se aproxima da prevista por Yalin (1964).

$$H = \frac{h}{6} \tag{6}$$

$$H = 0.086h^{1.19} \tag{7}$$

onde a primeira é a relação de Yalin (1964) e a segunda a relação de Allen (1970), sendo H a altura da feição e h a profundidade. Estas relações não se mostraram adequadas para a morfologia das ondas de areia da desembocadura lagunar de Cananéia. Esta divergência entre as relações propostas e as observadas também foi encontrada em outros trabalhos, como Bokuniewicz et al. (1977), Rubin & McCulloch (1980) e Berné et al. (1993). Estes últimos obtiveram, inclusive, um coeficiente de inclinação da reta ajustada (taxa do aumento da altura) semelhante ao encontrado no presente trabalho (Fig. 8).

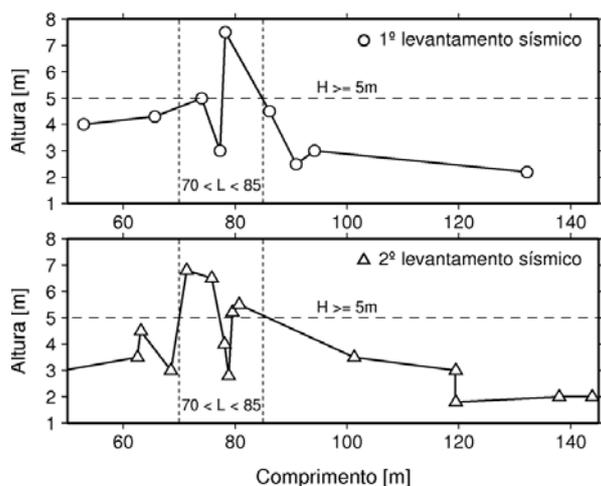


Figura 7 – Padrão referente a “altura × comprimento” encontrado nas ondas de areia nos dois levantamentos sísmicos realizados.

Embora o grande tamanho das feições simétricas esteja relacionado com a intensidade dos fluxos, a simetria indica reversão destes com intensidades de mesma ordem de grandeza em ambos os sentidos, o que implica num transporte de sedimento resultante nulo sobre as cristas das ondas simétricas (McCave, 1971). Segundo Bokuniewicz et al. (1977), estas feições de grande escala não são mensuravelmente afetadas por variações de curto período no fluxo sedimentar e, portanto, podem ser usadas como fonte de informação sobre o transporte de sedimento e a circulação de longo-termo.

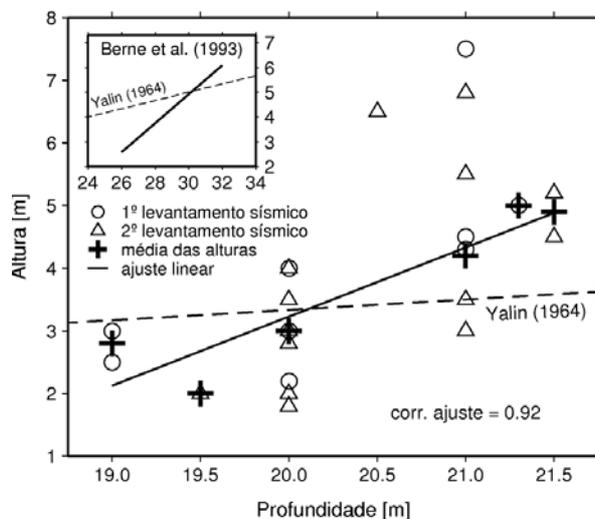


Figura 8 – Relação do aumento da altura com a profundidade encontrada nas ondas de areia do canal da desembocadura lagunar de Cananéia, onde foi efetuado um ajuste linear sobre os valores médios das alturas à mesma profundidade para comparação com as relações previstas por Yalin (1964) e encontradas por Berné et al. (1993).

A existência de um padrão morfológico muito bem definido (ondas assimétricas no sentido da vazante na parte mais interna, passando por ondas simétricas e ocorrendo inversão da assimetria na parte mais externa), bem como a pouca variabilidade temporal, seria um indicativo de que os diferentes padrões de fluxos associados a tais feições coexistem. Isto é, fluxos sobre o fundo no sentido da vazante (na parte mais interna) e fluxos no sentido da enchente (na parte mais externa) ocorrem ao mesmo tempo, independente da maré ser enchente ou vazante. Sobre as ondas simétricas (região de inversão da polaridade), ocorreria o ponto de convergência destes fluxos, que teriam um sentido ascensional na coluna d’água (a possibilidade da direção N-S foi excluída devido ao confinamento do canal). Neste sentido, pode-se advogar que, durante a maré enchente ocorreria um refluxo de água na parte mais interna do canal, condicionando fluxos de sentidos opostos sobre o fundo, ocorrendo o contrário durante a maré vazante. Assim, o padrão geral se manteria relativamente constante em relação à enchente e vazante.

Embora haja uma defasagem temporal entre os levantamentos sonográficos realizados, permitindo uma possível variação nas feições de fundo, foi feita uma caracterização geral combinando-se todos os registros obtidos. Este aspecto é admissível, tendo em vista a perfeita concordância entre a forma das feições submersas (e os domínios inferidos) com as correntes dominantes descritas por Tessler & Souza (1998) (Fig. 9A). Esta concordância pode ser observada na Figura 9A, onde as setas escuras duplas (modelo de Tessler & Souza, 1998) localizam-se exatamente

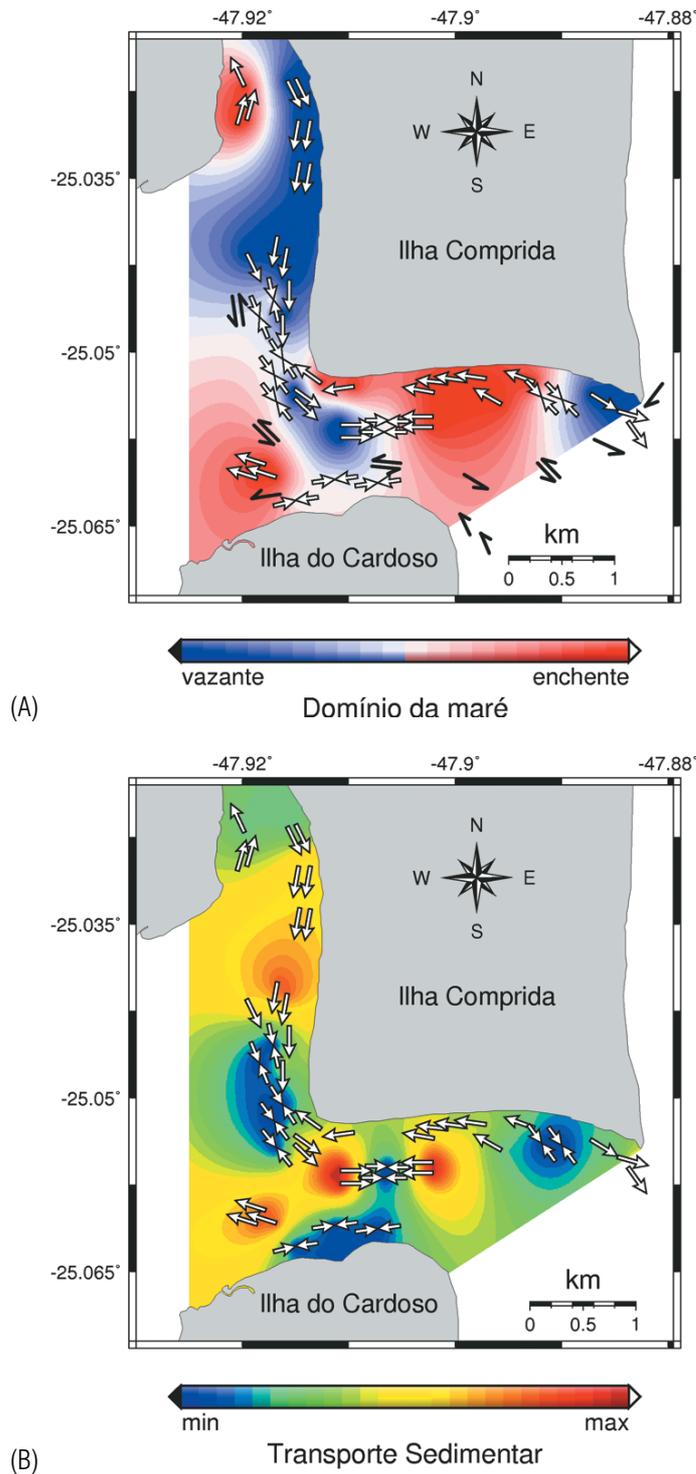


Figura 9 – (A) Escala de cor representando os domínios dos fluxos de maré sobre o fundo inferido a partir da morfologia das feições (setas brancas) e estimado por Tessler & Souza (1998) (setas escuras). Notar as setas duplas (feições simétricas). (B) Resultante do transporte, onde cada vetor representa a direção e o sentido preferencial da circulação de fundo em cima de cada feição identificada. Escala de cor representando qualitativamente a intensidade relativa deste transporte, onde as feições simétricas representam transporte mínimo.

sobre as regiões de cor mais clara (inferência deste trabalho), onde não há o predomínio unidirecional das correntes de maré, evidenciado pela presença de grandes feições simétricas. Os valores médios dos parâmetros morfológicos (Tab. 1) sugerem que, apesar de possíveis variações, as feições de maior tamanho observadas nos levantamentos não sofrem alterações consideráveis em escala anual, sendo representativas da dinâmica dominante em questão.

Transporte sedimentar

Na associação da circulação de fundo, e conseqüente transporte sedimentar, com a forma das feições submersas, admite-se que:

- a direção do fluxo principal é perpendicular à feição gerada, sendo que formas assimétricas sugerem transporte sedimentar residual de fundo numa direção;
- formas simétricas sugerem transporte bidirecional e;
- a intensidade do fluxo é diretamente proporcional ao tamanho das feições em questão (Dalrymple et al., 1978; Allen, 1980; Ashley, 1990; Kostaschuk & Villard, 1996; Wewetzer et al., 1999; Lobo et al., 2002).

Desta maneira, as correntes de maré possuem um domínio (influência no retrabalhamento) sobre as feições de fundo, evidenciado pela assimetria destas. Tal relação encontra-se expressa na Figura 9A, onde a escala de cores foi gerada interpolando-se em uma grade regular os valores referentes à direção (azimute medido nos registros sonográficos) e sentido de assimetria de cada feição identificada (os vetores claros representam a estimativa do transporte de fundo, e os vetores escuros referem-se às correntes dominantes inferidas por Tessler & Souza (1998)). Desta forma foi possível associar as feições em regime estacionário com um domínio preferencial dos fluxos de maré, classificando-as em assimétricas de enchente, assimétricas de vazante e simétricas (sem domínio preferencial).

Por sua vez, também é possível inferir qualitativamente o transporte sedimentar de fundo a partir da forma e tamanho das feições submersas. Esta inferência está expressa na Figura 9B, na qual foi plotado um vetor representando a direção e o sentido preferencial da circulação de fundo em cima de cada feição identificada. Esta estimativa foi feita considerando os parâmetros morfológicos de tais feições. Sob os vetores, foi gerada uma escala de cores representando qualitativamente a intensidade relativa deste transporte. Esta estimativa se baseia no tamanho das feições assimétricas, onde as feições simétricas representam

transporte mínimo. Neste caso interpolou-se numa grade regular valores numa escala de 0 a 100 relacionando o tamanho das feições, sendo que, para feições simétricas, independente do seu tamanho atribuíram-se valores pequenos.

Assim, como esperado, na parte interna do sistema as feições indicam o domínio, sobre o leito, dos fluxos de vazante. Já, na desembocadura propriamente dita, há uma maior concentração de feições que sugerem o domínio, sobre o fundo, da maré enchente. Essas megaondulações estão concentradas junto à margem da Ilha Comprida, já que a corrente, gerada pela onda de maré enchente, atinge a desembocadura no sentido de sul para norte (Fig. 9A) encontrando esta margem de frente e sendo desviada para o interior do sistema (Tessler & Souza, 1998). Portanto, o fluxo de enchente possui maior influência sobre o fundo junto à costa sul da Ilha Comprida. Outro fato, também associado a esse domínio preferencial, diz respeito às profundidades junto à costa da Ilha do Cardoso (Fig. 3), o que reflete o caráter acrescional e, conseqüentemente, de baixa energia dos fluxos desta porção.

CONCLUSÕES

A utilização de métodos acústicos possibilitou o estabelecimento de um modelo qualitativo de transporte de fundo na desembocadura lagunar de Cananéia, permitindo o reconhecimento dos sentidos preferenciais deste transporte em concordância com as correntes relacionadas à maré. As ferramentas utilizadas permitiram verificar a substituição de feições de menor escala por outras de maior escala à medida que os fluxos se intensificam, com destaque para a parte mais profunda do sistema, onde há uma alteração evidente nos padrões morfológicos de fundo relacionado à intensificação da dinâmica subjacente.

Sobre o leito é verificado um comportamento diferenciado quanto ao regime dos fluxos principais, com domínios bem estabelecidos da corrente de maré enchente e vazante.

Através de levantamentos realizados em diferentes condições da maré e com um espaço de tempo de aproximadamente um ano, foi possível verificar que as feições de grande escala não sofrem variações consideráveis em sua morfologia ao longo do ano. Isto permite inferir a relativa estabilidade dessas feições, bem como, dos padrões hidrodinâmicos associados, possibilitando uma série de interpretações sobre o transporte de fundo de longo termo.

Foram encontradas ondas de areia com alturas maiores que 7 metros e comprimentos de onda superiores a 100 metros numa profundidade máxima de 22 m. As relações entre a altura das ondas de areia e a profundidade da água, obtidas neste trabalho, não coincidiram com os modelos teóricos e empíricos existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Prof. Dr. Moysés Gonzalez Tessler, pelas discussões sobre o transporte sedimentar na região, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (processo 04/11181-7) que possibilitou a execução do presente trabalho, e ao Instituto Oceanográfico da USP por disponibilizar a infra-estrutura necessária. Agradecimentos, também, aos revisores da Revista Brasileira de Geofísica, pelas sugestões apresentadas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN JRL. 1968. Current Ripples, Their Relation to Patterns of Water and Sediment Motion. North-Holland, Amsterdam, 433 pp.
- ALLEN JRL. 1970. Physical Processes of Sedimentation. American Elsevier, New York, N.Y., 248 pp.
- ALLEN JRL. 1980. Sand waves: a model of origin and internal structure. *Sedimentary Geology*, 26: 281–328.
- ARAUJO CAS. 2006. Uso de cartografia digital e Sistemas de Informação Geográfica para o mapeamento de aspectos sedimentológicos e geomorfológicos de áreas costeiras: Exemplo do sudoeste do Sistema Cananéia-Iguape, SP. Monografia de Bacharelado, Instituto Oceanográfico da USP. 35 pp.
- ASHLEY G. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60: 160–172.
- BERNÉ S, CASTAING P, LEDREZEN E & LERICOLAIS G. 1993. Morphology, internal structure, and reversal of asymmetry of large subtidal dunes in the entrance of the Gironde Estuary (France). *Journal of Sedimentary Petrology*, 63: 780–793.
- BOKUNIEWICZ HJ, GORDON RB & KASTENS KA. 1977. Form and migration of sand waves in a large estuary, Long Island Sound. *Marine Geology*, 24: 185–199.
- BONETTI FILHO J. 1995. Transporte de sedimentos por suspensão nas proximidades da Barra de Cananéia – SP. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Instituto Oceanográfico da USP, 2 vol, 260 pp.
- DALRYMPLE RW & RHODES RN. 1995. Estuarine dunes and bars. In: PERILLO GME (Ed.). *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Developments in Sedimentology*, 53: 359–422.
- DALRYMPLE RW, KNIGHT RJ & LAMBIASE JJ. 1978. Bedforms and their hydraulic stability relationships in a tidal environment, Bay of Fundy, Canada. *Nature*, 275: 100–104.
- DHN-MM. 1952. Carta Náutica 1702. Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação – Ministério da Marinha.
- DHN-MM. 1985. Carta Náutica 1703. Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação – Ministério da Marinha. 3ª Edição.
- DUCK RW & WEWETZER SFK. 2000. Relationship between current measurements and sonographs of subtidal bedforms in the macrotidal Tay Estuary, Scotland. In: PYE K & ALLEN JRL (Ed.). *Coastal and Estuarine Environments: sedimentology, geomorphology and geoarchaeology*. Geological Society, London, Special Publications, 175: 31–41.
- DYER KR. 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*. 2. ed., Chichester, Wiley. 195 pp.
- FREITAS RC. 2005. Evolução recente das margens dos canais lagunares e topografia do sistema Cananéia-Iguape/SP. Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico da USP. 72pp + Figs. e Tabs.
- ERNSTSEN VB, NOORMETS R, WINTER C, HEBBELN D, BARTHOLMÄ A, FLEMMING BW & BARTHOLDY J. 2006. Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Marine Letters*, 26: 151–163.
- GEOBRÁS. 1966. Complexo Valo Grande – Mar Pequeno – Rio Ribeira de Iguape. Relatório para o Serviço do Vale do Ribeira – DAEE, São Paulo, 2 vols. 250 pp.
- GORSLINE DS & SWIFT DJP. 1977. Continental shelf sediment dynamics: a national overview. In: SWIFT DJP & GORSLINE DS (Ed.). *Report of a Workshop Held in Vail*, 134 pp.
- KOSTASCHUK R & VILLARD P. 1996. Flow and sediment transport over large subaqueous dunes: Fraser River, Canada. *Sedimentology*, 43: 849–863.
- LOBO FJ, GONZÁLEZ R, DIAS JMA, MENDES I & DÍAZ DEL RÍO V. 2002. Influence of estuarine morphology on bedload sediment transport patterns: an example from the Guadiana estuary (SE Portugal). *Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos*, 1: 87–98.
- McCAVE JN. 1971. Sand waves in the North Sea off the coast of Holland. *Marine Geology*, 10: 199–225.
- McCLENNEN CE, AMMERMAN AJ & SCHOCK SG. 1997. Framework stratigraphy for the lagoon of Venice, Italy: Revealed in new seismic-reflection profiles and cores. *Journal of Coastal Research*, 13: 745–759.
- MESQUITA AR & HARARI J. 1983. Tides and tide gauges of Cananéia and Ubatuba – Brazil (Lat. 24). Relatório interno do Instituto Oceanográfico, 11: 1–4.
- MIRANDA LB, CASTRO BM & KJERFVE B. 2002. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 424 pp.
- MIYAO SY. 1977. Contribuição ao estudo da oceanografia física da região de Cananéia (lat. 25°S long. 48°W). Dissertação de Mestrado, Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo, 87 pp.

- NOORMETS R, ERNSTSEN VB, BARTHOLOMÄ A, FLEMMING BW & HEBBELN D. 2006. Implications of bedform dimensions for the prediction of local scour in tidal inlets: a case study from the southern North Sea. *Geo-Mar Lett.*, 26: 165–176.
- RUBIN DM & McCULLOCH DS. 1980. Single and superimposed bed forms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. *Sedimentary Geology*, 26: 207–231.
- SMITH WHF & WESSEL P. 1990. Gridding with continuous curvature splines in tension. *Geophysics*, 55: 293–305.
- SOUZA LAP. 2006. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado, Instituto Oceanográfico da USP, São Paulo – SP, 311 pp.
- TESSLER MG. 1982. Sedimentação Atual na Região Lagunar de Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP, 2 vol. 170 pp.
- TESSLER MG & FURTADO VV. 1983. Dinâmica de sedimentação das feições de assoreamento da região lagunar Cananéia-Iguape, Estado de São Paulo. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 32(2): 117–124.
- TESSLER MG & SOUZA LAP. 1998. Dinâmica sedimentar e feições sedimentares identificadas na superfície de fundo do sistema Cananéia-Iguape, SP. *Rev. Bras. Oceanogr.*, 46(1): 69–83.
- WEWETZER SFK & DUCK RW. 1999. Bedforms of the middle reaches of the Tay Estuary, Scotland. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 28: 33–41.
- WEWETZER SFK, DUCK RW & McMANUS J. 1999. Sidescan sonar mapping of bedforms in the middle Tay Estuary, Scotland. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 511–522.
- YALIN MS. 1964. Geometrical properties of sand waves. *American Society of Civil Engineers, Proceedings. Hydraulics Division Journal*, 90(HY5): 105–119.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Fernando Serrano Paolo. Formado em Oceanografia (2007) pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, atualmente no Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Premiada com o Segundo Lugar das Melhores Monografias de Graduação do Instituto Oceanográfico da USP em 2007.

Michel Michaelovitch de Mahiques. Professor Titular do Instituto Oceanográfico da USP, desenvolve trabalhos em sedimentação em regiões costeiras e plataforma continental. Orientador de Mestrado e Doutorado, é coordenador do Projeto IGCP526 (Risks, Resources, Record of the Past on Continental Shelves).