

VARIAÇÕES DAS FORÇANTES HIDRODINÂMICAS JUNTO A UM CAMPO DE DUNAS SUBAQUÁTICAS NA BAÍA DA GUANABARA – RJ

JOÃO MARCELLO DE RIBEIRO CAMARGO*, JOSEFA VARELA GUERRA *, SORAYA MAIA PATCHINEELAM**

*Universidade do Estado do Rio de Janeiro – IGEO, Departamento de Oceanografia e Hidrologia

icmargocn@hotmail.com, jvguerra@uol.com.br

**Universidade Federal do Paraná – Centro de Estudos do Mar

soraya@cem.ufpr.br

RESUMO

A Baía de Guanabara (RJ) é um sistema costeiro deposicional onde dunas arenosas subaquáticas de grande tamanho ocorrem em resposta às condições hidrodinâmicas predominantes no seu canal central. Séries temporais da velocidade e direção das correntes foram coletadas a 1 metro do fundo entre outubro de 1994 e junho de 1995. As velocidades de cisalhamento junto ao fundo (u_*) foram calculadas e o valor crítico necessário para o transporte de partículas sedimentares com diâmetro médio de 0,25 mm (limite inferior de areias médias), foi ultrapassado durante cerca de 64% do intervalo amostral. Durante a passagem de sistemas frontais, o efeito conjunto dos ventos fortes e ondas de longo período aumenta o potencial de remobilização e transporte sedimentar. Portanto, as correntes de maré podem ser consideradas a força mais importante na dinâmica sedimentar desta porção da Baía de Guanabara.

PALAVRAS-CHAVE: dunas subaquáticas, remobilização de areias, velocidade crítica de cisalhamento, velocidade orbital crítica, baía de Guanabara.

ABSTRACT

Physical forcing mechanisms over a subaqueous dune field in Guanabara Bay - RJ

Guanabara Bay (RJ) is a depositional coastal system where large subaqueous sand dunes occur in response to the hydrodynamic conditions prevailing on its central channel. Current velocity measurements, taken 1 meter above the bottom, allowed the computation of shear stresses during the period comprised between October 1994 and June 1995. Shear stress is expressed in terms of its associated shear velocity (u_*). Assuming that the surface sediment is mainly composed of medium sands, the critical shear velocity for sedimentary particles with mean diameter of 0.25mm (lower limit of medium sands), was calculated and yielded a u_{*cr} equal to 0.91 cm.s^{-1} . It was estimated that the shear velocity exceeded the critical value during 64% of the duration of the measurements. When frontal systems reach the study area, the combined effect of strong winds and long period waves potentially increase sediment mobilization and transport. Thus, tidal currents can be considered the most important forcing mechanism for this portion of Guanabara Bay sediment dynamics.

KEY WORDS: subaquatic dunes, sand remobilization, critical stress velocity, critical orbital velocity, Guanabara Bay.

INTRODUÇÃO

Estudos anteriores sobre a geomorfologia marinha na região da Baía de Guanabara identificaram um campo de dunas subaquáticas a leste do seu canal central (Quaresma 1997, Kjerfve *et al.* 1997). As dunas subaquáticas são formas de fundo de grande escala que respondem às condições hidrodinâmicas do ambiente e localmente podem indicar a direção preferencial do transporte sedimentar (Rubin & McCulloch 1979). O termo dunas subaquáticas é aqui empregado para designar as formas de fundo também conhecidas como *megaripples* e *sand waves*, conforme nomenclatura proposta por Ashley (1990).

Devido às suas dimensões, que podem alcançar dezenas de metros, as dunas subaquáticas exercem um papel importante na dinâmica sedimentar de um estuário e no uso deste pela sociedade moderna (Dalrymple & Rhodes 1995). Segundo Whitehouse *et al.* (2000), a presença de dunas pode impor desafios específicos para projetos de engenharia envolvendo portos, dragagem de canais e estruturas *offshore*. Além disso, o crescimento e migração destas formas de fundo podem representar um perigo à navegação, influenciar a estabilidade de uma estrutura ou expor cabos e tubulações, aumentando o risco de acidentes.

A possível atividade migratória das dunas subaquáticas da Baía de Guanabara ainda não foi devidamente documentada. Com o intuito de avaliar o potencial de mobilização sedimentar na região do campo de dunas subaquáticas da Baía de Guanabara, foi efetuada uma análise da atuação das forças hidrodinâmicas, associadas aos ventos e correntes de maré, durante o período amostral entre outubro de 1994 a junho de 1995. Além disso, para avaliar a importância das ondas na dinâmica sedimentar da região foi elaborado um exercício teórico para três situações

distintas, envolvendo as condições necessárias para a ressuspensão de areias. Portanto, o objetivo principal deste trabalho é a avaliação do potencial de mobilização de areias médias próximo ao campo de dunas citado.

ÁREA DE ESTUDO

A Baía de Guanabara está localizada no litoral sudeste do Brasil, na região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, entre as latitudes 22°40' e 23°00'S e longitudes 43°00' e 43°20'W. A entrada da baía tem 1,6 km de largura entre os Fortes de São João e de Santa Cruz, atingindo cerca de 13 km ao norte do Forte de Gragoatá e Aeroporto Santos Dummont (Catanzaro 2002). Da entrada da baía até o limite norte da figura 1, existe um canal central com profundidade média de 30-40 m (Kjerfve *et al.* 1997). Um campo de dunas subaquáticas com orientação norte-sul ocorre na margem leste deste canal central, entre o Morro do Morcego e o Forte de Gragoatá, e se distribui, aproximadamente, entre as isóbatas de 10 e 26 metros. Nesta região, os sedimentos siliciclásticos são predominantemente constituídos por areias médias (Kjerfve *et al.* 1997, Quaresma 1997, Quaresma *et al.* 2000). O campo de dunas subaquáticas apresenta uma região central com dunas de maior altura e comprimento de onda, respectivamente 2,5 e 100 m, limitada por áreas com dunas com altura de 0,5 m e comprimento de onda de 20 m (Quaresma 1997). Devido à proximidade com o canal central e com o oceano (Fig. 1), o campo de dunas subaquáticas está localizado numa região de hidrodinamismo relativamente intenso, sendo influenciado pela batimetria local, pela onda de maré semidiurna, além de eventuais frentes frias, com ventos e ondas do quadrante sul.

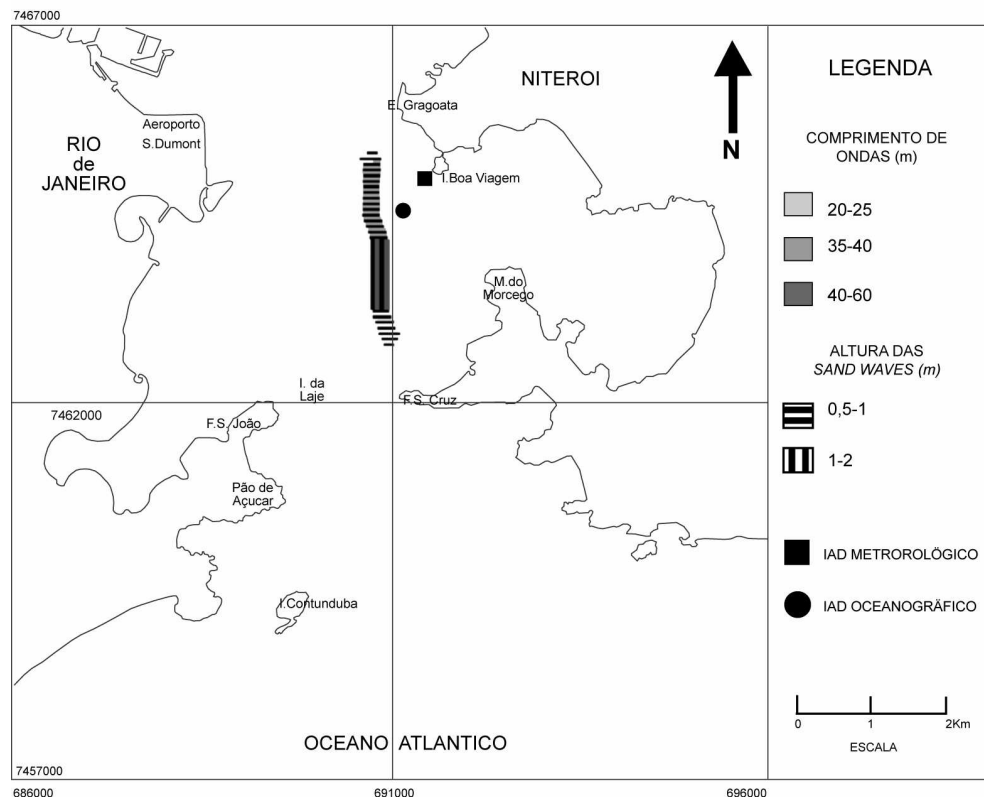


FIGURA 1 – Mapa com a localização do campo de dunas subaquáticas, a variação espacial da altura e comprimento de onda. Os símbolos ■ e ● indicam, respectivamente, a localização dos instrumentos de aquisição de dados (IAD) meteorológicos e oceanográficos. Mapa modificado de Quaresma 1997.

A Baía de Guanabara se caracteriza por apresentar marés mistas, predominantemente semidiurnas. As correntes de maré junto ao campo de dunas são assimétricas, com preamares mais velozes (Kjerfve *et al.* 1997, Quaresma & Dias 1997).

Os ventos mais freqüentes na região da Baía de Guanabara são de NE (21%), S (17%) e N (14%), com uma velocidade média mensal de 3 m.s^{-1} . Os ventos de S predominam sobre os de N em freqüência e intensidade na maior parte do ano e, quando associados às frentes frias, podem atingir velocidades em torno de 10 m.s^{-1} (Belo 1999).

As frentes frias podem ser consideradas eventos que determinam uma entrada considerável de energia no sistema. A passagem destas frentes pode determinar a ocorrência de ventos de SW, intensos e pouco freqüentes. Segundo Filippo (1997), estes sistemas frontais ocorrem o ano todo, numa média de 46 frentes frias por ano, sendo que, durante o inverno, sua freqüência média é de 6 dias. O tempo médio de passagem desses sistemas é de 12 a 24 horas (Kjerfve *et al.* 1997).

Sabe-se que os ventos transferem parte de sua energia para a água, acelerando as correntes de maré. Em condições normais, apenas 11% da variação da maré é devida ao regime de ventos. Em contrapartida, durante a passagem de frentes frias, 98% desta variação passa a estar associada ao padrão de ventos (Filippo 1997), o que caracteriza a denominada maré meteorológica, na qual ventos fortes empilham a água junto à costa, elevando o nível médio do mar além do normal.

Embora informações sobre o clima de ondas na Baía de Guanabara não estejam disponíveis, sabe-se que provavelmente os marulhos do setor Sul-Sudoeste, com grande energia e associadas à passagem de sistemas frontais, atingem a porção leste do canal central e são responsáveis pela ressuspensão de areias no campo de dunas subaquáticas, que são retrabalhadas pelas correntes de maré (Quaresma 1997).

MATERIAL E MÉTODOS

Durante o período de outubro de 1994 a junho de 1995, dados oceanográficos e meteorológicos foram coletados pela DSND CONSUB S/A que, num estudo preliminar para a implementação do emissário submarino de Icaraí, Niterói (RJ), prestou serviço de consultoria técnica à CEDAE (Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro).

Um correntômetro eletromagnético manufaturado pela DSND CONSUB S/A, ancorado a 1 m do fundo, nas coordenadas $22^{\circ}55,07'S$ e $43^{\circ}08,30'W$ (Fig. 1), obteve medidas da magnitude e direção das correntes a cada 15 minutos. Valores de temperatura do ar, pressão atmosférica, direção e velocidade dos ventos foram obtidos a cada hora por instrumentos de aquisição de dados (IAD's) meteorológicos localizados na Ilha da Boa Viagem (Fig. 1). De um total de aproximadamente 4.600 horas de medições foram calculados os valores máximos, médios e mínimos de cada variável. O filtro digital passa-baixa PL64, que elimina flutuações semi-diurnas, diurnas e inerciais (Limeburner 1985) foi utilizado em alguns gráficos com uma freqüência de corte de 1/38 horas.

Através da equação 1 (Sternberg 1968, 1972) pode-se relacionar as velocidades do fluxo medidas a 1m do fundo (u_{100}), ao estresse cisalhante (τ) e ao coeficiente de arrasto (C_{100}),

$$C_{100} = \frac{\tau}{\rho_f (u_{100})^2} \quad (1)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido (g.cm^{-3}). Fazendo-se algumas substituições e assumindo-se um valor fixo para o coeficiente de arrasto igual a $3,1 \times 10^{-3}$ (Komar 1976a), chega-se à equação 2, utilizada para o cálculo das velocidades de cisalhamento (u_{\cdot}), às quais os sedimentos foram expostos durante o período amostral:

$$C_{100} = \left(\frac{u_*}{u_{100}} \right)^2 \Rightarrow u_* = 5.47 \cdot 10^{-2} \cdot u_{100} \quad (2)$$

Com base nos resultados de análises granulométricas realizadas por Quaresma (1997) e Catanzaro (2002), calculou-se a velocidade de cisalhamento crítica (u_{cr}) para areias médias com diâmetro de 0.25 mm, a partir da Equação 3 (Krogel & Flemming 1998 *apud* Flemming 2000):

$$u_{*cr} = \left(0,482 \left[\left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \cdot \nu \cdot g \right]^{0,282} \right) \cdot (0,15 \cdot (w_s)^{0,5}) + 0,61 \quad (3)$$

onde ρ_s é a densidade da partícula ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), ν é a viscosidade cinemática ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$), g é a aceleração devido à gravidade ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$) e w_s é a velocidade de decantação da partícula ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$).

O potencial para a mobilização sedimentar de areias médias foi avaliado, através das frequências com que as velocidades de cisalhamento excederam a velocidade de cisalhamento crítica. Estas frequências também foram representadas em termos de duração, ou seja, horas de mobilização potencial.

A atuação dos ventos como forçante hidrodinâmica para a mobilização dos sedimentos pôde ser avaliada qualitativamente, durante os períodos de passagem de sistemas frontais. Estes eventos foram detectados, através de uma análise visual das intensidades das correntes de preamar, das direções dos ventos, da temperatura do ar e da pressão atmosférica.

Os diâmetros e velocidades orbitais máximas associados à propagação de ondas de gravidade em águas intermediárias ($1/2 < h/L_\infty < 1/20$) foram estimados a partir das equações 4 e 5:

$$d_0 = \frac{H_s}{\sinh\left(\frac{2h\pi}{L}\right)} \quad (4)$$

$$u_m = \frac{\pi \cdot H_s}{T \cdot \sinh\left(\frac{2h\pi}{L}\right)} \quad (5)$$

onde H_s , T e L são, respectivamente, a altura significativa (cm), o período (s) e o comprimento da onda (cm), h é a profundidade local (cm), d_0 é o diâmetro orbital (cm) e u_m é a velocidade orbital máxima ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$).

Green (1999) comparou três das teorias existentes sobre as condições iniciais de mobilização de sedimentos por ondas de gravidade e concluiu que aquela proposta por Komar & Miller (1973, 1975) seria a mais adequada, sob condições reais de intensa turbulência. Por esta razão, a equação 6 (Komar & Miller 1973, 1975) foi utilizada para o cálculo das velocidades orbitais críticas para grãos com 0,25 mm de diâmetro:

$$u_{mcr} = \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)gD}{\rho_f} \cdot 0,21 \left(\frac{d_0}{D} \right)^{0,5}} \quad (6)$$

Em águas rasas e intermediárias, a equação 6 permite a estimativa do potencial de ressuspensão de sedimentos frente ao clima de ondas local (Komar 1976b). Com este intuito, três cenários hipotéticos foram idealizados. Para cada um deles, a atuação de ondas de mar local foi confrontada com a de marulhos (*swell*) de SW: (1) onda de mar local com 6s de período e 0,5m de altura; (2) onda de mar local com 8s de período e 0,5m de altura; (3) marulho com 12s e 1m de altura.

RESULTADOS

As séries temporais registradas durante o monitoramento estão representadas graficamente na figura 2 e cada variável será descrita a seguir.

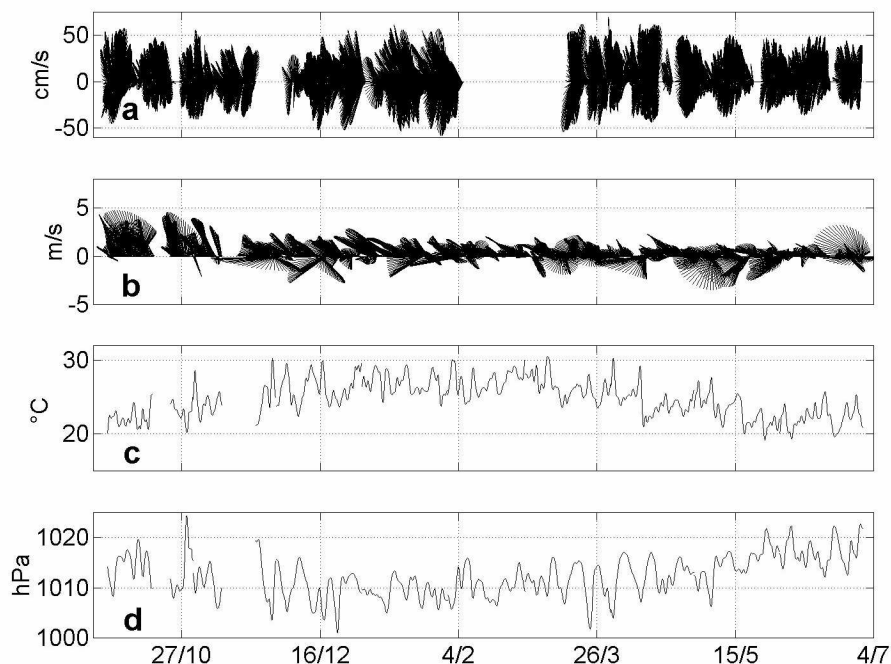


FIGURA 2 – Séries temporais filtradas das correntes de maré (a), ventos (b), temperatura do ar (c) e pressão atmosférica (d) medidos entre outubro de 1994 e julho de 1995. Foi utilizado o filtro digital PL64 (Limeburner, 1985) que elimina as oscilações semi-diurnas, diurnas e inerciais.

1. Correntes de maré

1.1 Correntes de preamar

Durante o monitoramento, as correntes de preamar apresentaram uma velocidade média de 26 cm.s^{-1} . Nos meses de março e abril mostraram-se intensas e acima dessa média. Em abril de 1995 foi observado o valor máximo de velocidade de preamar, $u_{100}=106 \text{ cm.s}^{-1}$, enquanto que no mês de junho as correntes de preamar não ultrapassaram 65 cm.s^{-1} (Tabela 1).

TABELA 1 – Valores mensais das correntes de preamar (cm.s^{-1})

Meses	Mínimo	Máximo	Médio
Outubro/1994	0	86	26
Novembro/1994	0	72	24
Dezembro/1994	0	88	22,4
Janeiro/1995	0	80	26,2
Fevereiro/1995	0	81	25,5
Março/1995	0	84	31,2
Abril/1995	0	106	29,4
Mai/1995	0	72	24,8
Junho/1995	0	65	24,8

1.2 Correntes de baixamar

Durante os períodos de baixamar, as correntes apresentaram uma velocidade média de 20 cm.s^{-1} . Nos meses de janeiro, fevereiro e março de 1995 as velocidades destas correntes mantiveram-se acima da média. Os meses de janeiro

e fevereiro de 1995 apresentaram os valores máximos de velocidade de baixamar, $u_{100}=70$ e 68 cm.s^{-1} , respectivamente. Por outro lado, em outubro de 1994, as correntes de baixamar não ultrapassaram 48 cm.s^{-1} (Tabela 2).

TABELA 2 – Valores mensais das correntes de baixamar (cm.s^{-1})

Meses	Mínimo	Máximo	Médio
Outubro/1994	0	48	18
Novembro/1994	0	57	19
Dezembro/1994	0	68	20
Janeiro/1995	0	70	23
Fevereiro/1995	0	59	24,4
Março/1995	0	56	23,4
Abril/1995	0	55	20
Mai/1995	0	39	16
Junho/1995	0	52	16,1

2. Ventos

Considerando todo o período amostral, os ventos apresentaram uma velocidade média de 3 m.s^{-1} . Os ventos mais intensos foram registrados durante o mês de outubro de 1994, enquanto que os menos intensos foram registrados em janeiro 1995. Na maior parte do tempo, os ventos provenientes do quadrante leste foram os mais intensos, exceto durante o mês outubro 1994 (Tabela 3).

TABELA 3 – Valores mensais das velocidades dos ventos (m.s^{-1}) e direção dos ventos mais intensos

Meses	Mínimo	Máximo/Direção	Médio
Outubro/1994	0	14,9/SE	3,4
Novembro/1994	0	12,8/E	3,4
Dezembro/1994	0	11,3/E	3,1
Janeiro/1995	0	9,8/E	3,4
Fevereiro/1995	0	11,1/E	2,8
Março/1995	0,1	13,8/E	2,9
Abril/1995	0	10,5/E	2,3
Mai/1995	0	11,3/E	2,7
Junho/1995	0	15,1/E	2,6

3. Temperatura do ar

Ao longo do período amostrado, a temperatura do ar apresentou uma amplitude térmica de $20,5^{\circ} \text{C}$, e média de $24,8^{\circ} \text{C}$. O valor mínimo, $16,5^{\circ} \text{C}$, foi medido em junho de 1995, enquanto que o valor máximo, $36,9^{\circ} \text{C}$, foi registrado em novembro de 1994 (Tabela 4).

TABELA 4 – Valores mensais da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

Meses	Mínimo	Máximo	Médio
Outubro/1994	18,5	32,5	22,3
Novembro/1994	18,4	36,9	24,6
Dezembro/1994	21	35,9	26,1
Janeiro/1995	22,5	36	26,8
Fevereiro/1995	22,8	34,9	27
Março/1995	21,2	34,6	26,3
Abril/1995	19,3	34,8	24,4
Mai/1995	18,1	33,5	23
Junho/1995	16,5	31,9	22,2

4. Pressão atmosférica

A pressão atmosférica apresentou uma amplitude total de 25,5 hPa, um mínimo de 1000,4 hPa em dezembro de 1994, um máximo de 1025,9 hPa em outubro de 1994, e uma média de 1012,2 hPa. (Tabela 5).

TABELA 5 – Valores mensais da pressão atmosférica (h Pa)

Meses	Mínimo	Máximo	Médio
Outubro/1994	1006	1025,9	1014
Novembro/1994	1001,9	1020,9	1011,2
Dezembro/1994	1000,4	1017,7	1009,8
Janeiro/1995	1003	1014,5	1009,1
Fevereiro/1995	1003,9	1017,7	1010,3
Março/1995	1001,3	1017,1	1011
Abril/1995	1002,7	1018,6	1012,6
Mai/1995	1005,4	1023,5	1014,8
Junho/1995	1010,4	1024,1	1017,1

5. Velocidade crítica de cisalhamento

Através da utilização da equação 3 e assumindo grãos de quartzo com densidade de $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$, aceleração da gravidade de 980 cm.s^{-2} , velocidade de decantação em água pura de $3,6 \text{ cm.s}^{-1}$ (Julien 1995), num fluido de densidade de $1,025 \text{ g.cm}^{-3}$ e viscosidade cinemática de $1,05 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{s}^{-2}$, calculou-se uma velocidade crítica de cisalhamento (u_{cr}) de $0,91 \text{ cm.s}^{-1}$, a partir da qual os grãos com diâmetro de 0,25 mm seriam mobilizados pelas correntes de maré.

6. Mobilização de sedimentos por ondas: exercício teórico

Embora informações acerca dos períodos e alturas de ondas na Baía de Guanabara não estejam disponíveis, um exercício teórico foi efetuado no sentido de estimar o potencial de ressuspensão de areias com 0,25 mm de diâmetro diante da propagação de ondas de mar local e marulhos (*swell*). Para os três cenários idealizados, foram calculadas as velocidades orbitais máximas (equações 4 e 5) e críticas (equação 6) para a ressuspensão de areias médias entre 10 e 26 m de profundidade (Fig. 3). Observou-se que apenas a propagação do marulho ($T=12\text{s}$ e $H_s=1\text{m}$) é potencialmente capaz de ressuspender areias médias, visto que as velocidades orbitais máximas obtidas ultrapassam os valores críticos representados pela linha c, na fig. 3. A propagação das ondas de mar local ($T=6$ e 8s e $H_s=0,5\text{m}$) determina velocidades orbitais máximas inferiores às velocidades críticas necessárias para a remobilização de areias com diâmetro médio de 0,25mm (Fig. 3, linhas a e b)

DISCUSSÃO

As correntes de maré, quando decompostas vetorialmente, apresentam as componentes do eixo y (N-S) mais intensas do que as do eixo x (L-W), como exemplificado na Fig. 4, que mostra medições realizadas durante o mês de janeiro de 1995. Isto indica uma retilinização do fluxo, que é direcionado em concordância com a orientação N-S do canal central da baía de Guanabara.

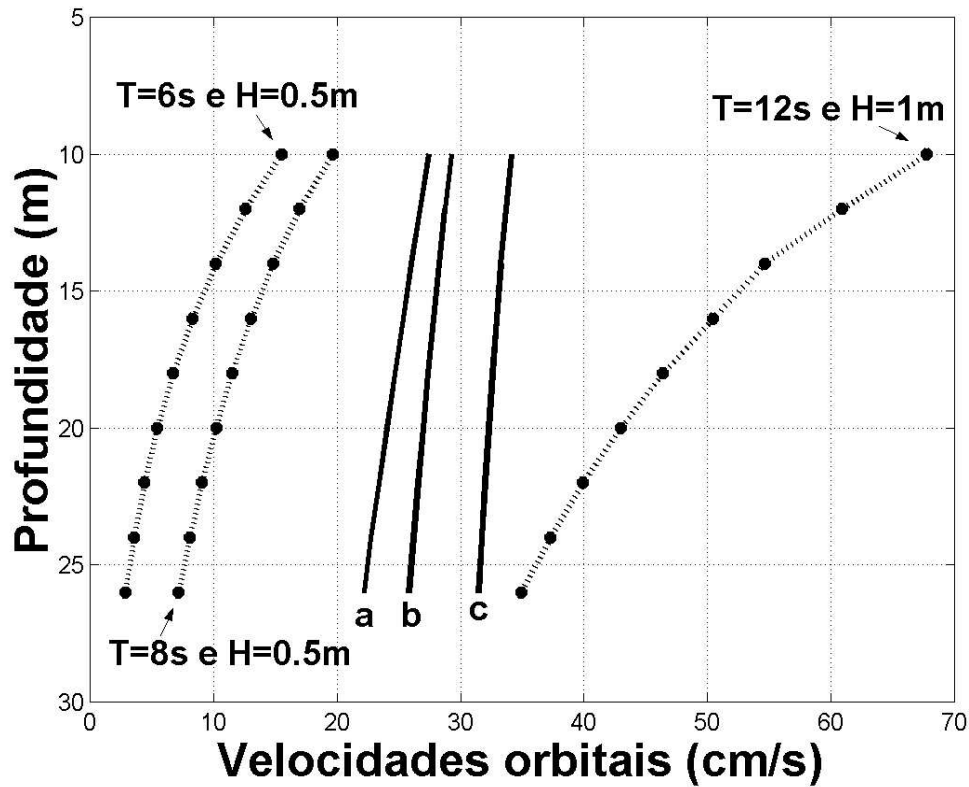


FIGURA 3 – Velocidades orbitais máximas calculadas para cada cenário de onda. As linhas a, b e c indicam, respectivamente, as velocidades críticas para a ressuspensão de areias médias diante da propagação das ondas 1 ($T=6s$ e $H=0.5m$), 2 ($T=8s$ e $H=0.5m$) e 3 ($T=12s$ e $H=1m$), entre 10 e 26 metros de profundidade.

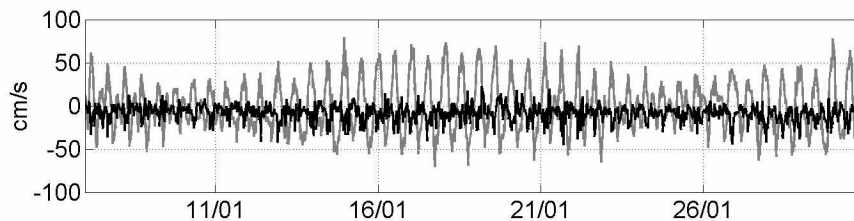


FIGURA 4 – Exemplo de série temporal, não-filtrada, de correntes a 1 m do fundo. Estão representadas as componentes N-S (linha cinza) e L-W (linha preta) das correntes medidas durante janeiro de 1995.

A configuração da entrada da Baía de Guanabara é o fator responsável pelo estrangulamento das correntes que, por sua vez, atingem velocidades capazes de gerar as dunas subaquáticas presentes na margem leste do canal central da baía (Quaresma 1997). A assimetria das correntes de maré com preamares mais intensas (Fig. 5) determina um fluxo resultante direcionado para o interior da baía, refletido na própria assimetria das dunas subaquáticas (Figura 8 de Kjerfve *et al.* 1997).

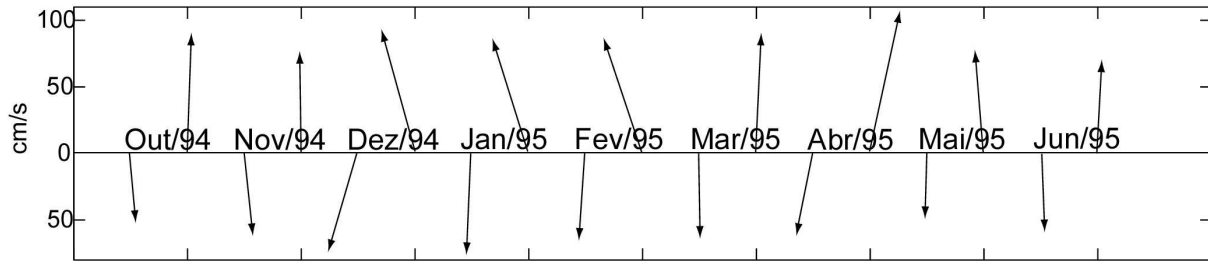


FIGURA 5 – Valores máximos mensais das correntes de preamar (valores positivos) e baixa-mar (valores negativos). Deve-se ressaltar que, todos os meses, as maiores velocidades estão sempre associadas a correntes de preamar, ou seja, em direção ao interior da Baía da Guanabara.

Durante a passagem de sistemas frontais na costa fluminense, marés meteorológicas aceleram as correntes de preamar (Filippo 1997). Entre os dias 24, 25 e 26 de Março de 1995, sob condições de maré de quadratura, as correntes de preamar apresentaram-se aceleradas, com velocidades superiores às médias desta fase do ciclo de maré (Fig. 6a). Esta aceleração foi conseqüência da passagem de um sistema frontal caracterizado por intensos ventos de SE e SW (Fig. 6b), por um valor mínimo de pressão atmosférica (Fig. 6c) e um declínio acentuado da temperatura do ar (6°C em duas horas, Fig. 6d).

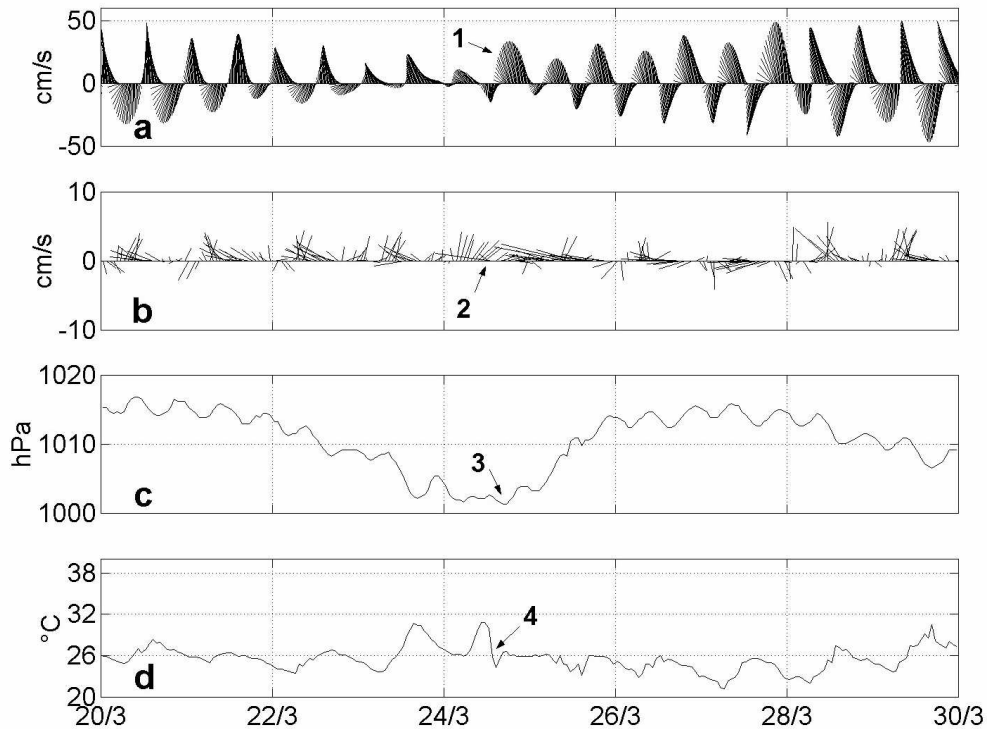


FIGURA 6 – Indicativos da passagem de um sistema frontal: aceleração das preamares (a1), ventos de SW (b2), baixas pressões atmosféricas (c3) e declínio acentuado da temperatura do ar (d4).

A velocidade de cisalhamento (u_{\cdot}) excedeu o valor crítico ($u_{\cdot cr}$) durante 64% do tempo de monitoramento, ou seja, ao longo de 2922 horas. Durante os meses de outubro de 1994, março e abril de 1995 (respectivamente Figs. 7a-c) a velocidade crítica de cisalhamento para ressuspensão de grãos com diâmetro médio de 0,25 mm ($0,91 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$)

foi ultrapassada durante aproximadamente 67% do tempo. Isto foi observado tanto nas marés de vazante quanto nas de enchente, independentemente da ocorrência ou não da passagem de sistemas frontais.

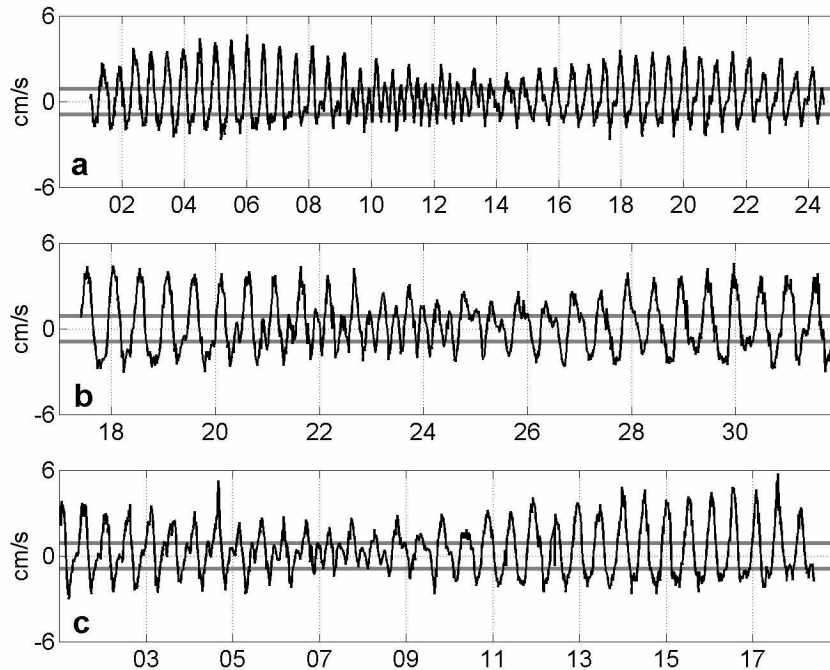


FIGURA 7 – Velocidades de cisalhamento (u_*) estimadas para os meses de Outubro/94 (a), Março/95 (b) e Abril/95 (c). As linhas cinzas paralelas ao eixo x representam a velocidade crítica (u_{*cr}) para a mobilização de areias médias, com diâmetro médio de 0,25 mm.

Para o cálculo das velocidades de cisalhamento foi empregado um valor médio e constante para o coeficiente de arrasto ($C_{100}=3,1 \times 10^{-3}$), estimado por Sternberg (1968, 1972) para condições turbulentas plenamente desenvolvidas. Entretanto, este mesmo autor observou variações do C_{100} entre $2,3 \times 10^{-3}$ e $2,1 \times 10^{-3}$ em fundos arenosos com ondulações de pequena escala (*ripples*), nos quais a carga em suspensão foi negligenciada. As formas de fundo de grande escala que oferecem uma maior resistência ao fluxo, e uma carga em suspensão considerável podem influenciar o coeficiente de arrasto, aumentando-o (Komar 1976a). Ludwick (1973 *apud* Komar 1976a) encontrou uma variação de mais de duas ordens de magnitude para os valores do coeficiente de arrasto em medições realizadas na entrada de Chesapeake Bay (Estados Unidos) e atribuiu uma correlação positiva entre C_{100} e u_* à presença de dunas subaquáticas e bancos arenosos de tamanhos variados. O aumento da carga em suspensão sob altas velocidades de cisalhamento também provocaria, em parte, um aumento de C_{100} (Komar 1976a). Diante disto, é provável que as velocidades de cisalhamento calculadas pela equação 2 tenham sido subestimadas, já que a variabilidade do coeficiente de arrasto foi negligenciada.

CONCLUSÕES

A avaliação do potencial de mobilização sedimentar do campo de dunas subaquáticas da margem leste do canal central da Baía de Guanabara, indicou ser este um ambiente altamente dinâmico com um transporte sedimentar resultante para o interior da baía.

As correntes de maré são as forçantes de atuação mais freqüente, uma vez que a cada ciclo de maré a velocidade crítica para a mobilização de areias médias é ultrapassada durante cerca de 64% do tempo, tanto na maré de enchente como na de vazante. Quanto à ação das ondas na ressuspensão das areias junto ao campo de dunas subaquáticas, observa-se que entre as isóbatas de 10 e 26 m, apenas marulhos ($T=12s$ e $H_s=1m$) gerariam velocidades orbitais máximas acima das velocidades orbitais críticas necessárias para mobilizar sedimentos de 0,25 mm de diâmetro.

Sob condições atmosféricas normais, a atuação dos ventos e ondas pode ser desconsiderada. Entretanto, a passagem de sistemas frontais junto à costa fluminense resulta em condições hidrodinâmicas mais energéticas, nas quais a atuação daquelas forçantes soma-se à das correntes de maré. Logo, situações que envolvam a aceleração das correntes de preamar por ventos de S, SW e SE e a ressuspensão de areias médias por marulhos, produzem um cenário favorável à intensificação do transporte de sedimentos em direção ao interior da Baía de Guanabara.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Prof. José Antonio Baptista Neto e à CONSUB S.A. pelos dados oceanográficos, e ao Prof. Helio Vilhena, a Lindzai Santa Rosa e Vijai Patchineelam pela ajuda na confecção do mapa.

LITERATURA CITADA

- ASHLEY, GM. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J. Sed. Petrol.*, 60(1): 160-172.
- BELO, WC. 1999. Avaliação da dinâmica sedimentar no Baixo Estuário da Guanabara: uma proposta metodológica. Monografia de Bacharelado. Departamento de Oceanografia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 77p.
- CATANZARO, LF. 2000. Distribuição de sedimentos e características de ecocaráter (7,0 kHz) na Baía de Guanabara, RJ-Brasil. Dissertação de Mestrado. Lagamar-UFF. 58p.
- DALRYMPLE, RW & RN RHODES. 1995. Estuarine dunes and bars. In: PERILLO, GME (ed.). *Geomorphology and sedimentology of estuaries. Developments in Sedimentology* 53, Elsevier, Chap. 13: 359-422.
- FILIPPO, AM. 1997. Passagem de frentes frias na Baía de Guanabara: impacto no nível do mar. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geoquímica. Universidade Federal Fluminense. 79 p.
- FLEMMING, BW. 2000. The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes. In: TRENTESAUX, A & TH GARLAN, (eds.). *Proceedings of an International Workshop on Marine Sandwaves Dynamics*, Lille, France, p. 55-60.
- GREEN, MO. 1999. Test of sediment initial-motion theories using irregular-wave field data. *Sedimentology*, 46: 427-441.
- JULIEN, PY. 1995. *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press. 277p.
- KJERFVE, B, CHA RIBEIRO, GTM DIAS, AM FILIPPO, VS QUARESMA. 1997. Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía da Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Cont. Shelf. Res.*, 17(13): 1609-1643.
- KOMAR, PD & MC MILLER. 1973. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *J. Sed. Petrol.*, 43(4): 1101-1110.
- KOMAR, PD & MC MILLER. 1975. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold. *J. Sed. Petrol.*, 45(1): 362-367.
- KOMAR, PD. 1976a. Boundary layer flow under steady unidirectional currents. In: STANLEY, DJ & DJP SWIFT (eds.). *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. John Wiley & Sons. New York, p. 91-106.
- KOMAR, PD. 1976b. The transport of cohesionless sediments on continental shelves. In: STANLEY, DJ & DJP SWIFT (eds.). *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. John Wiley & Sons. New York, p. 107-125.
- LIMEBURNER, R (ed.). 1985. CODE-2: Moored array and large-scale data report, *WHOI Tech. Rep. 85-35, CODE Tech. Rep. 38*, Woods Hole Oceanographic Institut, Woods Hole, 220 p.
- QUARESMA, VS. 1997. Caracterização da dinâmica sedimentar da Baía de Guanabara, RJ. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, LAGEMAR. Universidade Federal Fluminense. 97p.
- QUARESMA, VS & GTM DIAS. 1997. Campo de sand waves na Baía de Guanabara-RJ. *Anais da X Semana Nacional de Oceanografia*, p. 71-73.
- QUARESMA, VS, GTM DIAS & JA BAPTISTA NETO. 2000. Caracterização de padrões de sonar de varredura lateral e 3,5 e 7,0 kHz na porção sul da Baía de Guanabara-RJ. *Revista Brasileira de Geofísica*, 18 (2): 201-214.
- RUBIN, DM & DS McCULLOCH. 1979. The movement and equilibrium of bedforms in Central San Francisco Bay. In: *San Francisco Bay: the urbanized estuary. Proceedings of the 58th annual meeting of the Pacific Academy of Sciences*, San Francisco, p. 97-113.
- STERNBERG, RW. 1968. Friction factors in tidal channels with differing bed roughness. *Mar. Geol.*, 6: 243-260.
- STERNBERG, RW. 1972. Predicting initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environment. In: SWIFT, DJP, DB DUANE & OH PILKEY (eds.). *Shelf Sediment Transport*. Dowden, Hutchinson & Ross, p. 61-82.
- WHITEHOUSE, RJS, JS DAMGAARD & DN LANGHORNE. 2000. Sandwaves and seabed engineering: the application to submarine cables. In: TRENTESAUX, A & TH GARLAN (eds.). *Proceedings of an International Workshop on Marine Sandwaves*, Lille, France, p. 227-234.

Recebido: 3/4/2002

Aceito: 3/1/2004

