

Revista Brasileira de Geomorfologia - v. 12, nº 2 (2011)

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE FÍSICA DA ORLA COSTEIRA EM NÍVEL LOCAL, TOMANDO COMO EXEMPLO O ARCO PRAIAL ENTRE RIO DAS OSTRAS E O CABO BÚZIOS/RJ

Dieter Muehe

*Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Programa de Pós-graduação em Geografia,
Av. Athos da Silveira Ramos, 274 - Ed. do CCMN - Cidade Universitária Rio de Janeiro - CEP 21.941-916 -
e-mail: dieter.muehe@gmail.com*

Guilherme Borges Fernandez

*Universidade Federal Fluminense (UFF), Laboratório de Geografia Física (LAGEF), Departamento de Geografia,
Instituto de Geociências - CEP 24.210-346 - e-mail: guilhermefernandez@id.uff.br*

Eduardo Manuel Rosa Bulhões

*Universidade Federal Fluminense (UFF), Laboratório de Geografia Física. Rua José do Patrocínio, 71, Centro,
Campos dos Goytacazes/RJ - CEP 28.015-385 - e-mail: eduardomrbulhoes@mac.com*

Isabela Fortes de Azevedo

*Subsea 7 do Brasil - Rua Engenheiro Fábio Goulart, 155 - Ilha da Conceição, Niterói/RJ - CEP 24.050-090 -
e-mail: belafortes@yahoo.com.br*

Resumo

Processos erosivos representam um risco para as áreas urbanizadas próximas à linha de costa. Com a finalidade de avaliar o grau de vulnerabilidade à erosão costeira, considerando um cenário de elevação do nível do mar para os próximos 50 anos (até 2060), um conjunto de técnicas, consistindo de comparação de fotos aéreas, levantamentos batimétricos e de perfis de praia, modelagem computacional de refração de ondas, caracterização morfodinâmica da praia, análise granulométrica da praia e antepraia e determinação do perfil de equilíbrio, foi aplicado num arco praial localizado entre a cidade de Rio das Ostras e a Ponta do Pai Vitório, no litoral do Estado do Rio de Janeiro. O arco praial é segmentado em dois semicírculos devido à presença de um promontório rochoso e a desembocadura de um rio junto à cidade de Barra de São João, sendo caracterizado por variados níveis de urbanização e distintos graus de exposição às ondas e ambientes morfodinamicamente diferenciados. Os resultados indicaram um desequilíbrio morfodinâmico em grande parte do arco praial e da antepraia entre Rio das Ostras e Barra de São João, justamente onde a urbanização se encontra mais próxima da praia. Uma projeção de recuo da costa para os próximos 50 anos, considerando a atual taxa de erosão e de elevação do nível do mar e mais a elevação do nível do mar prevista em função do incremento da taxa atual por efeito climático indicou recuos potenciais da ordem de 10 a 30m, o que representa um risco potencial para muitas das construções da orla costeira.

Palavras-chave: Erosão costeira; perfil de equilíbrio; Rio das Ostras; Barra de São João.

Abstract

Coastal erosion represents a high threat to urbanized areas located close to the shoreline. In order to evaluate the potential vulnerability under a sea level rise scenario for the next fifty years (2060) a set of methods consisting of the comparison of aerial photographs, measurement of bathymetric and beach profiles, wave refraction, morphodynamic beach classification, beach

and shoreface grain size analysis and determination of equilibrium beach profiles were applied at beach arc located between the town of Rio das Ostras and Ponta do Pai Vitório promontory, at the north coast of Rio de Janeiro State. The beach arc, due to a rocky promontory and a river outlet at the town of Barra de São João, is divided into two distinct segments characterized by various degrees of urbanization and distinct degrees of wave exposure and morpho-sedimentary environments. The results indicated morphodynamic disequilibrium of the beach-shoreface system between Rio das Ostras and Barra de São João, the most vulnerable to coastal erosion and also the most urbanized. Considering the present and future sea level rise and erosive trend, the amount of potential shoreline adjustment was evaluated for the next 50 years, of being of the order of 10 to 30 m.

Keywords: Coastal erosion; equilibrium beach profile; Rio das Ostras; Barra de São João.

Introdução

A linha de costa, pela interface entre terras emersas e submersas, se caracteriza pela mobilidade de posição em ajustamento às variações do balanço de sedimentos e das oscilações do nível do mar, em escalas e magnitudes que dependem da intensidade dos processos e do tempo considerado. O contínuo incremento da ocupação da orla e os custos de estabilização e de perdas materiais em segmentos costeiros sujeitos à erosão aumentaram a percepção de risco, ampliados pela perspectiva de uma elevação do nível do mar e de modificação na intensidade e na direção dos processos costeiros associados às mudanças do clima. O estabelecimento de faixas de não edificação, como adotado no Projeto Orla, do Ministério do Meio Ambiente (MUEHE 2001, 2004), representa uma importante medida de precaução, mas não substitui estudos localizados que busquem avaliar, de forma mais precisa, o potencial de vulnerabilidade de segmentos costeiros específicos para fins de implantação de projetos urbanísticos e obras costeiras em geral.

Desta forma, a determinação da vulnerabilidade que a orla apresenta em função do ajuste de posição deve ser um instrumento essencial de apoio sobre as estratégias de ocupação e de proteção de benfeitorias. Tais elementos tendem a ser mais relevantes em áreas fortemente urbanizadas, ou em vias de urbanização, como as decorrentes da expansão do mercado de trabalho associado às atividades relativas à indústria do petróleo e do turismo, como ocorre nas cidades de Rio das Ostras, que apresenta a maior taxa de crescimento populacional do Estado, e em menor grau em Barra de São João. Para determinar a vulnerabilidade física da orla pode-se lançar mão de diversos mecanismos de avaliação, tais como a comparação da evolução costeira por meio de imagens de satélites e fotos aéreas, a realização sistemática de perfis topográficos transversais à praia, determinação do balanço sedimentar e do perfil de equilíbrio do sistema praia-antepraia, assim como a modelagem computacional da propagação de ondas com a indicação dos segmentos mais afetados durante eventos extremos, entre outros. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é a determinação da vulnerabilidade de um segmento costeiro caracterizado por diferentes graus de urbanização e exposição às ondas, por diferentes tipos de recobrimento

sedimentar da antepraia e estados morfodinâmicos praias e consequentemente por níveis diferenciados de vulnerabilidade física e socioeconômica, empregando um conjunto de metodologias, visando a identificar os segmentos sob risco iminente e potencial.

Área de estudo

A área de estudo é a orla costeira localizada entre a cidade de Rio das Ostras e a Ponta do Pai Vitório, parte de um amplo embaçamento entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios, no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro (Fig. 1).

O arco praiial é dividido em dois segmentos morfosedimentares distintos, separados por um promontório rochoso e pela desembocadura do Rio São João, junto à cidade de Barra de São João. O aporte de sedimentos finos, oriundos do Rio São João, recobre as areias relíquias da antepraia entre Barra de São João e a Ponta do Pai Vitório, tornando a declividade da antepraia mais suave à medida que se afasta da área fonte em direção ao sul (FERNANDEZ & MUEHE, 1998). Consequentemente, a praia segue esta característica e vai se tornando dissipativa a ultradissipativa à medida que diminui a granulometria dos sedimentos e a exposição às ondas devido à área abrigada pelo cabo Búzios (op. cit.). Contrastando fortemente, o segmento entre Barra de São João e Rio das Ostras apresenta areias grossas, estágio praiial refletivo e ampla exposição às ondas (op. cit.). Junto à zona urbana de Rio das Ostras, o arco praiial se recurva e apresentou forte erosão com destruição de quiosques, em um evento de tempestade associado à penetração de duas frentes frias, em maio de 2001. Após este evento foi construído um muro de proteção com a intenção de impedir o prosseguimento da erosão. O muro, no entanto, não resistiu, seguindo-se, após sua destruição, uma fase de recuperação espontânea da praia, seguida de nova fase erosiva com perda de residências. Não obstante, a Prefeitura local construiu nas proximidades uma praça, com quiosques, além de projetar a construção de um aquário, a poucos metros de distância da escarpa da pós-praia. A praça, apesar de quase concluída ficou abandonada e a escavação da fundação para o aquário foi imediatamente invadida pela transposição das ondas, sendo os trabalhos interrompidos.

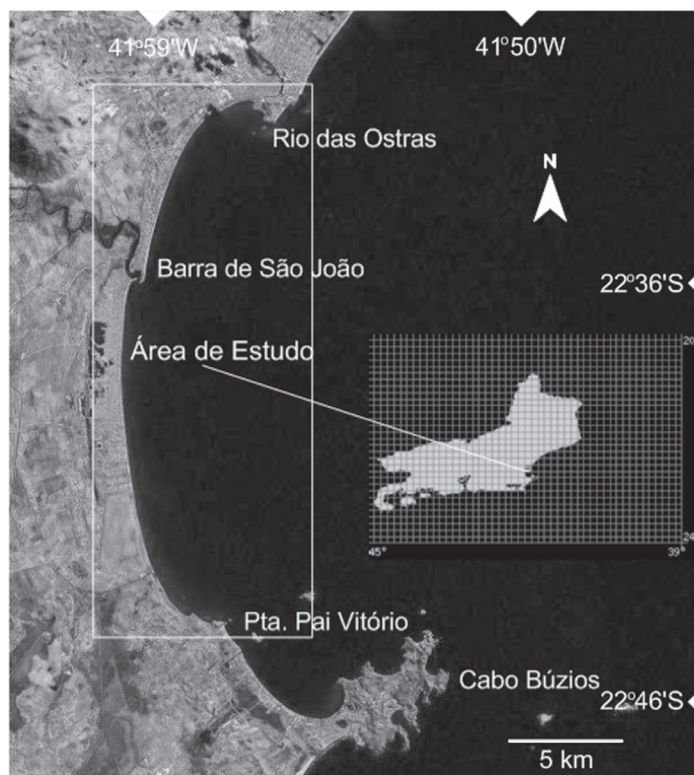


Figura 1 - Localização da área de estudo

A urbanização da orla, entre Rio das Ostras e Barra de São João, ocorre de forma descontínua com residências construídas muito próximas à pequena falésia que em geral representa o limite proximal com a praia e em cuja base é frequente a ocorrência de exposição de arenitos de coloração escura (arenitos de restinga). A partir de Barra de São João, para o sul, novos loteamentos vêm se desenvolvendo, com as construções em geral um pouco mais recuadas em relação à praia que no trecho anterior, até o limite com uma área de mata preservada e sem construções, pertencente à Marinha, que forma o segmento final da área de estudo.

Metodologia

Foram levantados 16 perfis topográficos transversais à praia com inclusão da zona submarina até o limite da visada do nivelamento. Desse modo, foi incorporada a zona de surfe e parte da antepraia média, até profundidades da ordem de 3 m. Todos os perfis foram referenciados ao nível médio do mar, a partir da previsão de maré para Rio das Ostras, adotando metodologia apresentada por MUEHE *et al.* (2003). Estes perfis foram estendidos, para além da profundidade de fechamento

(Fig. 2), por meio de levantamento ecobatimétrico com embarcação de pequeno porte, para fins de comparação com o levantamento batimétrico realizado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), em 1980, na escala de 1:100.000 (Folha de Bordo 1500 - 01/80 do Cabo São Tomé ao Cabo Búzios). A reconstituição da batimetria da área de estudo foi efetuada por meio de digitalização da Folha de Bordo citada. Para a interpolação de isolinhas batimétricas foi utilizado o método de *krigagem*, por meio do programa Surfer (Golden Software Inc.) A comparação da batimetria dos perfis levantados com a Folha de Bordo foi feita por superposição, de modo que para cada ponto batimétrico levantado foi determinada a profundidade correspondente na Folha de Bordo.

Amostras de sedimentos, para análise granulométrica, foram coletadas em cada perfil na berma, na face da praia, na antepraia imediatamente após à zona de arrebentação (*nearshore*) e nas proximidades do final do perfil de nivelamento topográfico, na antepraia média. No total foram coletadas e analisadas 64 amostras. No restante da antepraia e plataforma continental interna foram utilizados os resultados de levantamentos anteriores (SAAVEDRA & MUEHE, 1993; FERNANDEZ & MUEHE, 1995).

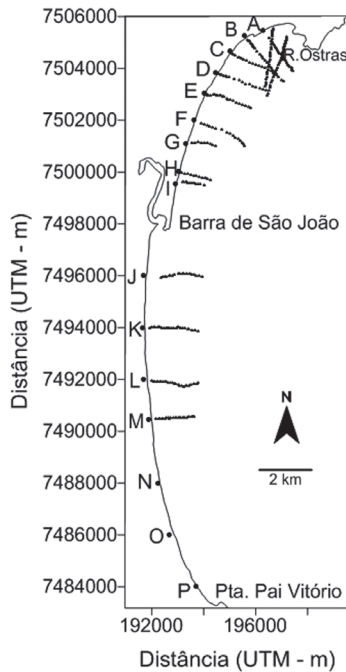


Figura 2 - Localização dos perfis de praia e batimétricos

A determinação do estado morfodinâmico da praia foi avaliado através do parâmetro Delta (Δ) (MUEHE, 1998),

(1)

Sendo:

β - a declividade da face da praia

D - distância de espriamento da onda na face da praia

(m)

H_b - altura da onda na arrebentação (m)

T_{espr} - duração do espriamento da onda na face da praia (s)

T - período das ondas

Os limites propostos, para discriminação dos diferentes estados pelo parâmetro Δ , foram os seguintes:

Estado	Delta (Δ)
Dissipativo	< 0,5
Banco e Calha	0,5 - 0,8
Bancos Transversais	0,8 - 1,0
Terraço de Baixa Mar	1,0 - 2,0
Refletivo	> 2,0

Em cada perfil de praia foram realizadas medições de altura (H_b), período (T) e obliquidade de incidência da onda (α) na arrebentação, assim como a distância e o tempo de espriamento da onda na face da praia.

O cálculo do perfil de equilíbrio foi efetuado empregando a equação proposta por BRUUN (1954, 1962, 1988) e DEAN (1977, 1991).

$$h = Ax^m$$

na qual h é a profundidade da água a uma distância x da linha de costa, A um parâmetro definido a partir do diâmetro mediano dos sedimentos e m um expoente adimensional. Trabalhos realizados por BRUUN (1954, 1988) e DEAN (1977, 1991) chegaram a um valor médio para $m = 2/3$. O parâmetro A , definidor da declividade do perfil submarino, foi relacionado empiricamente à velocidade de decantação ω_s dos sedimentos (DEAN, 1987), sendo

$$A = 0,067\omega_s^{0,44}$$

ω_s variando entre 0,05 e 0,25 em sedimentos arenosos.

A determinação dos perfis de equilíbrio foi realizada considerando o diâmetro granulométrico mediano da face da praia, como previsto no modelo, e ainda dos sedimentos da antepraia média, isto é, pouco além da zona de arrebentação, tendo em vista a ocorrência localizada de sedimentos finos alóctones, depositados sobre o substrato reliquiar. Os cálculos foram efetuados através do programa BMAP (Beach Morphology Analysis Package), da Veri-Tech Inc., no qual as características dos sedimentos são dadas pelo diâmetro granulométrico ou por um parâmetro relacionado à velocidade de decantação. As análises granulométricas dos sedimentos da praia e antepraia foram realizadas por meio de peneiramento a seco. O cálculo dos parâmetros estatísticos das distribuições granulométricas foi realizado segundo o método de FOLK (FOLK, 1968) com as medidas de tendência central expressas em Φ (fi), onde $\Phi = -\log_{10} \text{mm}$.

O perfil de equilíbrio em planta foi calculado por meio de ajuste parabólico (HSU & EVANS, 1989) empregando o programa MEPPE (VARGAS *et al.*, 2002; KLEIN *et al.*, 2003, HSU *et al.*, 2008).

Simulações da refração de ondas, a partir da batimetria digitalizada de Folhas de Bordo para identificação de pontos de convergência de energia (*hot spots*), foram efetuadas através do programa SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), desenvolvido na Coordenação de Pós-graduação em Engenharia (COPPE-UFRJ). Foram consideradas ondas incidentes de Nordeste e Sudeste, ambas em suas condições médias e extremas conforme CARVALHO (1998) e PINHO (2008). Para a simulação de eventos ocorridos em condições muito extremas (tempestade de maio de 2001), foram consideradas as alturas e períodos previstos pelo modelo WAVEWATCH III (TOLMAN, 1991), fornecido pela previsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Uma avaliação da direção de deslocamento da linha de costa foi realizada através da comparação entre fotos aéreas de 1970 com ortofotos georreferenciadas de 2000-2002. O georreferenciamento das fotos do voo de 1970 foi efetuado a partir de pontos de referência comuns aos dois levantamentos, através do programa DIDGER, versão 4.2, da Golden Software Inc. Como a urbanização em 1970 era limitada a algumas poucas áreas, o georreferenciamento das fotos de 1970 teve que ser limitado às proximidades de Rio das Ostras, de Barra de São João e de um segmento no arco praial a sul de Barra de São João.

A determinação da profundidade de fechamento (*depth of closure*) dos perfis da antepraia, como limite da mobilidade vertical significativa do fundo marinho, foi feita a partir da determinação do limite externo da antepraia inferior, isto é, do limite da antepraia com a plataforma continental interna. Para este fim foi calculada a profundidade máxima em que uma dada onda de altura e período conhecido pode mobilizar um grão de sedimento de diâmetro e densidade conhecida. Este representa o limiar a partir do qual se inicia o transporte de sedimentos por ação das ondas. A profundidade foi calculada utilizando um programa apresentado por KOMAR & MILLER (1975). Uma vez conhecida a profundidade em que se inicia o transporte de sedimentos pode se estimar a profundidade de fechamento que, segundo HALLERMEIER (1981), se localiza aproximadamente na metade da profundidade do limite da antepraia.

O recuo da linha de costa a uma dada elevação do nível do mar foi determinado a partir da configuração do prisma praial definido pela profundidade de fechamento (h), altura da feição sedimentar emersa mais elevada (D) (topo da duna frontal, topo do terraço costeiro) e respectiva distância horizontal (L), pela regra de BRUUN, ajustada à taxa atual de elevação do nível do mar e à taxa atual de recuo da linha de costa, conforme proposto por Ferreira *et al.* 2006). Desta forma, a linha de recuo (S), ou *set back line*, é determinada pelo recuo previsto considerando a atual taxa de erosão multiplicada pelo número de anos (Sn) acrescido de um fator de ajustamento da aceleração da elevação do nível do mar (Ra), conforme as seguintes relações:

$$S = S_n + R_a$$

$$R_a = (SLR_a \times L)/(h+D)$$

$$SLR_a = SL_n - SLR_p \times n$$

sendo

SL_n a altura prevista do nível mar para n anos à frente

SLR_p a taxa de elevação atual do nível do mar multiplicado pelo número de anos (n)

Resultados

Batimetria e refração das ondas

A disposição das isóbatas na antepraia e na plataforma continental interna, defronte ao arco praial, mostra declividades mais elevadas entre a linha de costa e a profundidade de 8m, diminuição da declividade, aumento de irregularidade das isóbatas entre 8 e 11m e retorno à regularidade em direção a profundidades maiores (Fig. 3). Morfológicamente a mudança de declividade e a regularização das isóbatas por efeito de maior ação das ondas sobre o fundo é uma indicação da profundidade de fechamento.

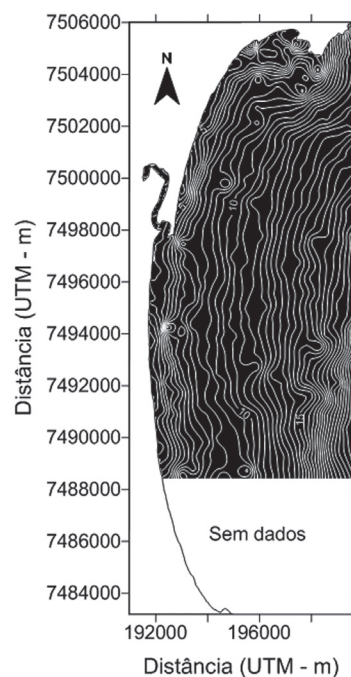


Figura 3 - Disposição das isóbatas em intervalos de 0,5m.

Ainda que grande parte do arco praial sofra, de forma pouco diferenciada, a influência das ondas de Nordeste (60°), mais frequentes, em condições extremas, o segmento de maior convergência de energia (*hot spot*) se localiza pouco ao Norte da desembocadura do Rio São João (Fig. 4). Desta forma, o trecho mais afetado pela erosão fica protegido da ação das ondas deste quadrante pelo promontório de Rio das Ostras. Para ondas vindas de Sudeste, o Cabo Búzios exerce um efeito de sombra sobre a metade sul do arco praial enquanto o segmento entre Barra de São João e Rio das Ostras, amplamente exposto a esta direção de ondas, é afetado pontualmente, com maior ou menor intensidade, de acordo com a posição de convergência de energia das ondas que se desloca de acordo com o ângulo de incidência das mesmas. Esta, quando de SSE (160°), atinge diretamente o segmento mais afetado pela erosão, a extremidade norte do arco praial (Fig. 5).

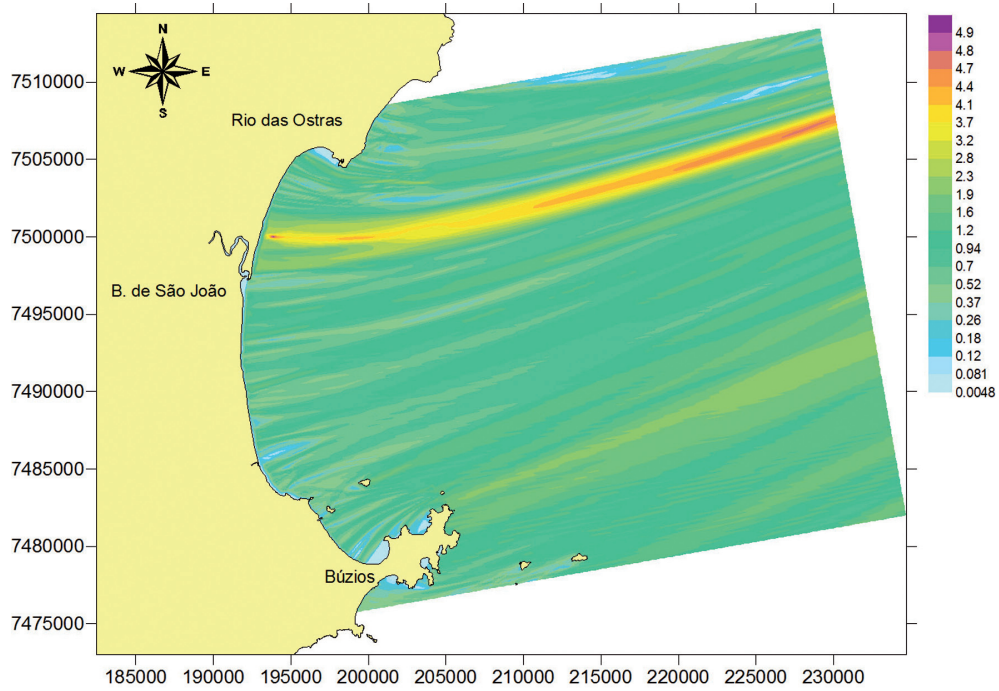


Figura 4 - Propagação de ondas de NE (60°) sob condições extremas ($H=2,2m$; $T=9,5s$).

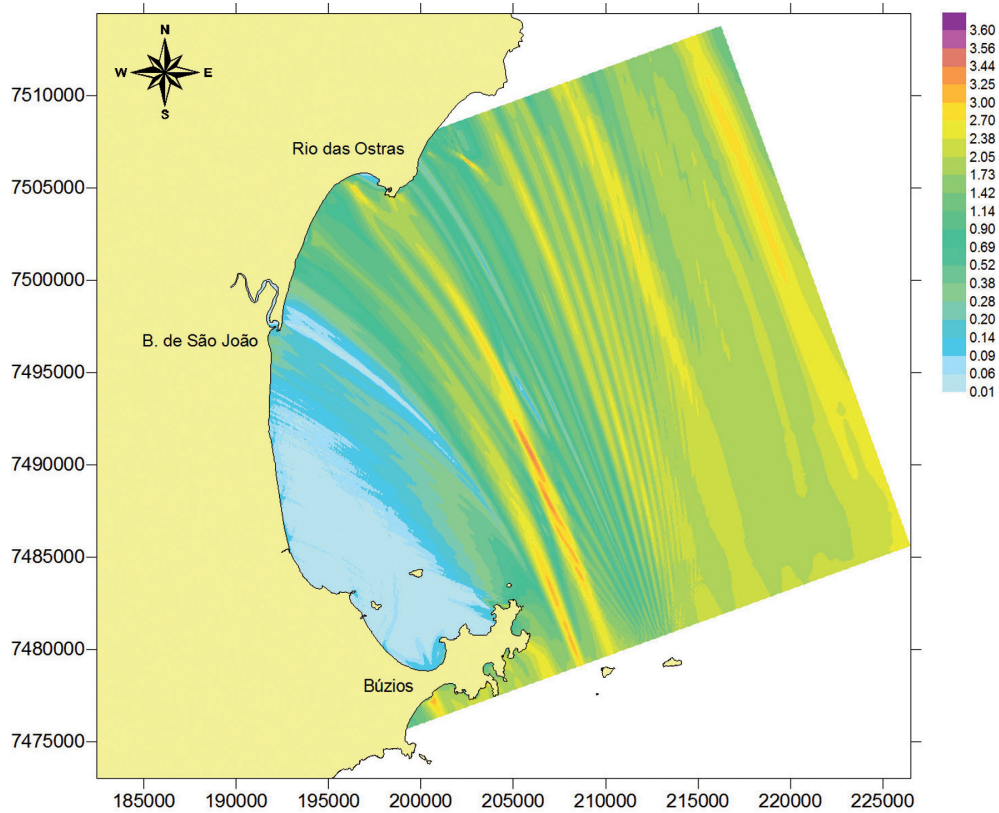


Figura 5 - Propagação de ondas de SSE (160°) sob condições extremas ($H=3m$; $T=10s$).

Praia: caracterização morfodinâmica

O arco praial entre Rio das Ostras e Barra de São João apresenta características refletivas ($\Delta > 2$) em toda sua extensão, caracterizado pela quase ausência de uma zona de surfe, face de praia íngreme e pequena largura da berma, refletindo o reduzido estoque de areia da praia. No segmento ao Sul da Barra de São João a praia vai adquirindo características gradativamente mais dissipativas à medida que diminui a energia das ondas pelo efeito de sombra do Cabo Búzios e aumenta a acumulação de sedimentos finos na antepraia. A superposição de perfis topográficos mostra a ocorrência de três agrupamentos distintos (Fig. 6), apresentando os perfis A a I características refletivas, com a declividade da face da praia se prolongando harmoniosamente para a antepraia, os perfis J a M com uma ruptura do padrão anterior, passando de íngreme no perfil emerso para suave no perfil submerso, e os perfis N a P, com um perfil muito suavizado, tanto no perfil emerso, quanto no submerso.

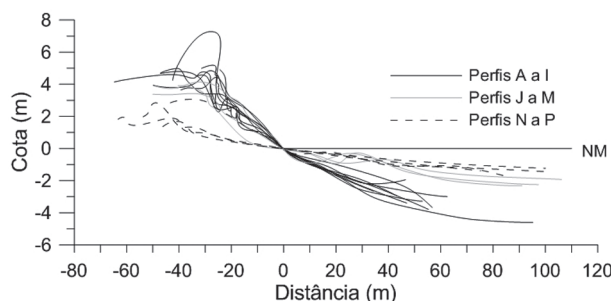


Figura 6 - Superposição dos perfis topográficos mostrando três conjuntos distintos.

O estágio morfodinâmico modal do conjunto dos perfis de transição (perfis J a M), apesar de apresentar tendência modal ao estágio dissipativo, também apresenta estágios intermediários e mesmo refletivos, dependendo das condições da maré. O estágio dissipativo é típico da extremidade sul do arco praial, representado pelos perfis F a H, onde é menor a energia das ondas, menor o diâmetro granulométrico e menor a declividade da antepraia. A redução da exposição em direção ao sul, além dos resultados obtidos nas simulações de propagação, conforme será apresentado mais adiante, é bem demonstrado pela gradual diminuição de altura do topo do cordão litorâneo (Fig. 7).

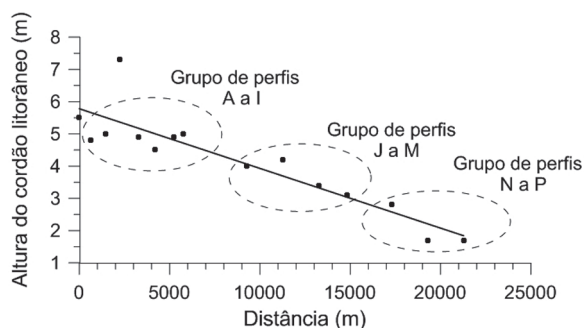


Figura 7 - Correlação entre altura do cordão litorâneo e a distância em direção ao sul, mostrando diminuição da altura em direção ao segmento mais abrigado.

Avaliação do ajuste morfológico de perfis transversais à costa

Os perfis de equilíbrio calculados para o segmento praial entre Rio das Ostras e Barra de São João mostram um nítido desajuste entre o perfil medido e o perfil teórico, independentemente de se considerar o diâmetro granulométrico mediano da face da praia ou da antepraia (Fig. 8, perfis C e E). A partir do perfil E, até Barra de São João, os perfis se apresentam em equilíbrio, considerando a granulometria da face da praia (Fig. 8, perfil H).

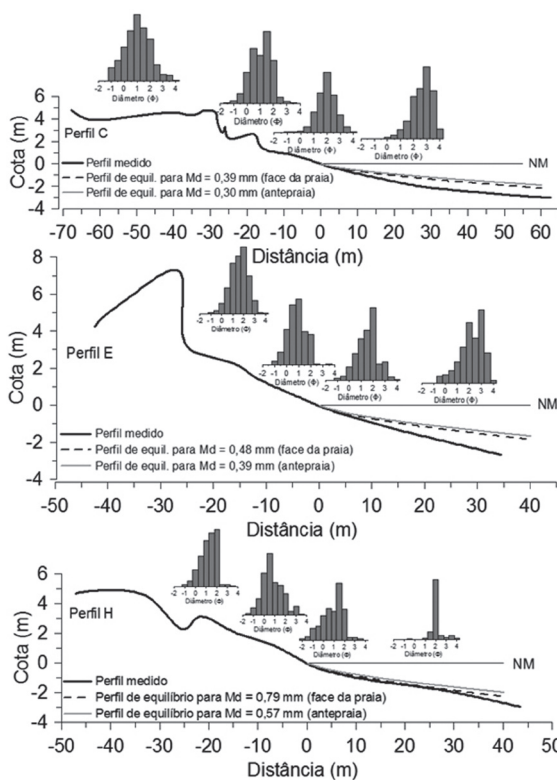


Figura 8 - Comparação entre perfil medido e o perfil de equilíbrio teórico para o segmento praial a norte de Barra de São João.

A característica erosiva do segmento praial até o perfil E é bem demonstrada pelo afloramento de arenitos na base da escarpa da pós-praia e a evolução da erosão, como a comparação entre a situação em abril de 1994 e abril de 2008 (Fig. 9).



Figura 9 - Afloramento de arenitos de restinga na base da escarpa da pós-praia em 1994, foto esquerda, e recuo erosivo em 2008, foto direita. Localização da foto no perfil D. (Foto D. MUEHE).

No segmento ao sul da Barra de São João, o predomínio de sedimentos finos (areia muito fina e silte) fez com que os perfis adquirissem uma declividade muito baixa, em geral ajustados ao perfil de equilíbrio teórico considerando tanto a granulometria da praia quanto a da antepraia. No caso de desajuste entre o perfil teórico e o medido isto ocorre apenas quando considerado a granulometria da praia, como no perfil L (Fig. 10). Neste caso, o perfil medido está acima do perfil de equilíbrio teórico e, portanto, com excesso de sedimentos. A partir do perfil N para o sul os perfis se apresentam bem ajustados ao perfil de equilíbrio. Como o diâmetro granulométrico mediano dos sedimentos da praia e da antepraia são muito próximos, não há diferença entre os perfis de equilíbrio calculados.

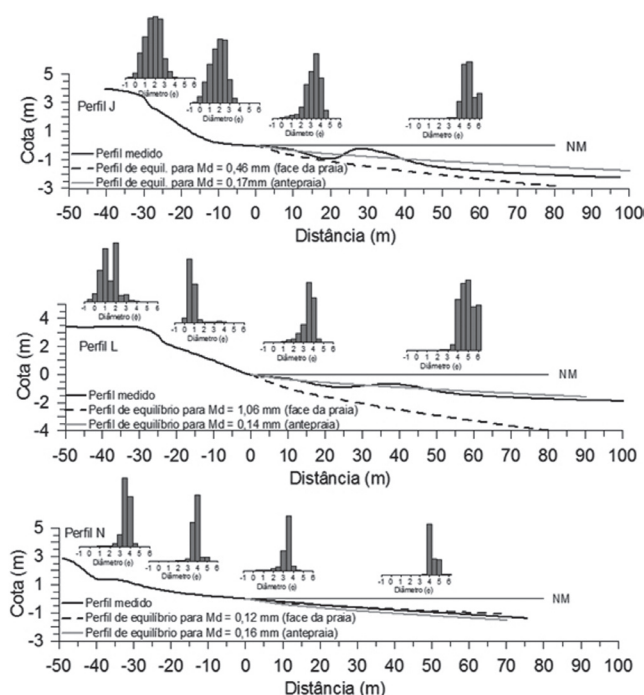


Figura 10 - Comparação entre perfil medido e o perfil de equilíbrio teórico para o segmento praial ao sul de Barra de São João.

Avaliação do ajuste morfológico da linha de costa

A comparação entre fotos aéreas de 1970 com ortofotocartas de 2000 somente pode ser feita para alguns segmentos (Fig. 11), devido à falta de referenciais nas fotos mais antigas para o georeferenciamento. Dos segmentos analisados apenas o de Rio das Ostras (segmento A) mostrou um recuo da linha de costa, sendo este da ordem de 10m, o que representa uma retrogradação média de 0,3m por ano.

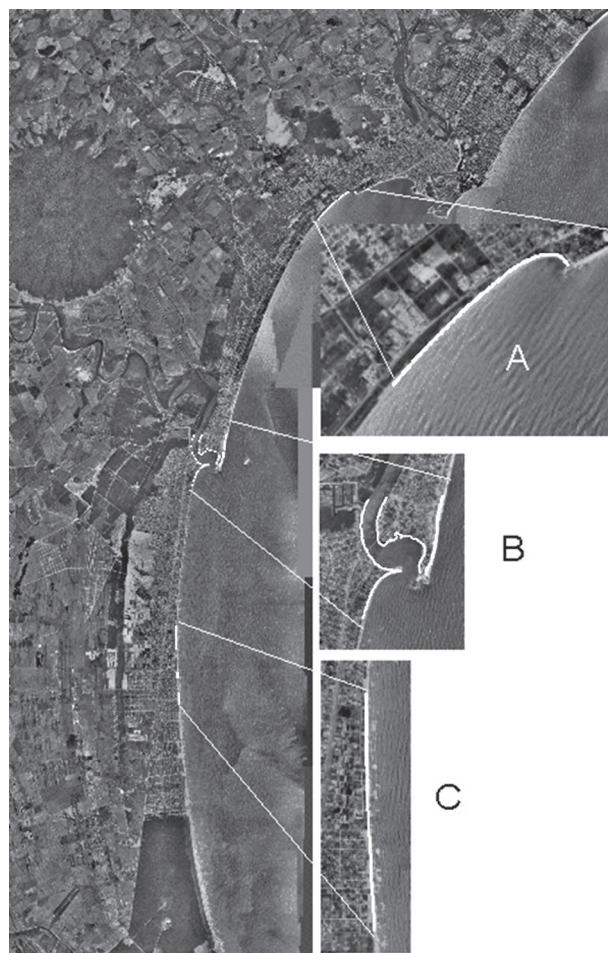
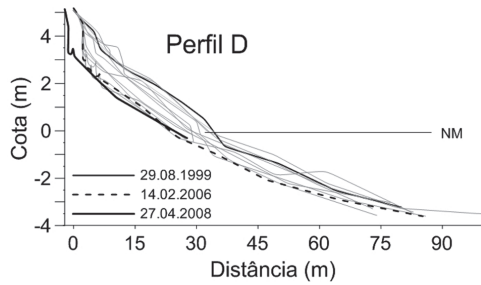


Figura 11 - Comparação entre a posição da linha de costa em 1970 e em 2000 a partir de fotos aéreas. O segmento A apresentou retrogradação da ordem de 10 m enquanto os segmentos B e C se apresentaram estáveis.

A taxa de retrogradação encontrada na comparação com as fotos aéreas (Fig. 11) é coincidentemente a mesma identificada no monitoramento do perfil de praia. Este vinha apresentando evidências de erosão, como a exposição de arenitos na base de falésia em contato com a pós-praia conforme já mencionado (Fig. 12), tornando-se gradativamente mais íngreme, até a ocorrência de um recuo abrupto, de toda a escarpa, de 2,7m, por efeito de uma tempestade. Considerando que não se pode associar o recuo ao efeito apenas de uma tempestade, pois há todo um processo de fragilização antecedente, é razoável considerar todo o período de monitoramento como parte do processo. Este período se iniciou em agosto de 1999, foi mantido com uma recorrência regular até fevereiro de 2006, tendo sido retomado após a tempestade em abril de 2008. Considerando assim o período de 7 anos obtêm-se uma taxa de retrogradação da ordem de 0,3m a 0, 4m por ano, idêntica, portanto, à encontrada na comparação das fotos aéreas.



A avaliação do grau de ajuste ou desajuste do perfil em planta do arco praial na sua extremidade norte, junto a Rio das Ostras, indicou que o perfil se encontra deslocado em relação ao perfil parabólico. Este deslocamento é mais acentuado no segmento de maior curvatura (Fig.13), coincidindo com o segmento de maior intensidade de erosão (Fig. 14).

Figura 12 - Superposição de perfis de praia, na posição do perfil D (Fig. 2), mostrando o gradativo recuo da escarpa no limite proximal da berma seguido de um deslocamento repentino de 2,7m.



Figura 13 - Comparação da linha de costa com o ajuste parabólico teórico mostrando uma situação de desequilíbrio.



Figura 14 - Destruição de casas pela erosão no trecho de maior encurvamento do arco praial. (Foto D. MUEHE).

Comparação entre levantamentos batimétricos (1980 – 2005)

O mapeamento das diferenças batimétricas encontradas entre o levantamento de 1980 e o realizado em 2005 mostra que, a partir de um núcleo relativamente estável, ocorreu o aumento da profundidade entre este núcleo e a praia. Este aumento da profundidade ocorreu principalmente nas proximidades de Rio das Ostras, se estendendo, de forma menos acentuada, até as proximidades de Barra de São João (Fig. 15), confirmando o desequilíbrio dos perfis da antepraia neste segmento. Para o sul de Barra de São João se confirma a tendência de acumulação sedimentar, também identificado nos perfis da antepraia.

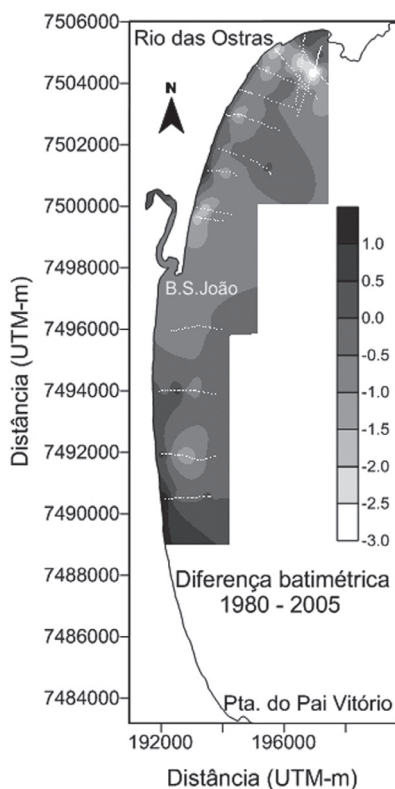


Figura 15 - Distribuição espacial das diferenças batimétricas entre 2005 e 1980.

Determinação da profundidade de fechamento e recuo potencial da linha de costa

A praia e a zona submarina adjacente formam um prisma sedimentar de transição entre a linha de costa e a plataforma continental interna. A porção submarina deste

prisma é denominada de antepraia (*shoreface*) e pode ser subdividida, considerando a intensidade dos processos hidrodinâmicos, em antepraia superior, compreendendo a zona de arrebenção e surfe, a antepraia média, que se estende da zona de arrebenção até à profundidade de fechamento (*depth of closure*), e a antepraia inferior, que se estende da profundidade de fechamento até o contato com a plataforma continental interna. O limite entre os dois segmentos inferiores muitas vezes se expressa por uma mudança, mais ou menos abrupta, no perfil batimétrico, assim como mudança na granulometria e na rugosidade do fundo marinho.

A profundidade de fechamento constitui um limite importante na medida em que representa a profundidade em que a ação das ondas sobre os sedimentos do fundo provoca sua mobilização a ponto de induzir modificações significativas da topografia. Isto ocorre em profundidades de alguns metros a pouco mais de 1 decâmetro, dependendo da energia das ondas. Em termos práticos representa a porção do prisma praial considerado em projetos de engenharia para recuperação de praias por meio de aterro e para avaliação do recuo da linha de costa a uma dada elevação do nível do mar. Várias equações foram estabelecidas para a determinação da profundidade de fechamento (HALLERMEIER, 1981; BIRKEMEIER, 1985). No entanto, como dependem de uma estatística aprimorada do clima de ondas, geralmente não disponível, os resultados frequentemente apresentam profundidades não condizentes com a realidade.

Para o presente estudo foi inicialmente calculada a profundidade em que a velocidade do movimento orbital de uma onda inicia a mobilização de sedimentos de um diâmetro e densidade conhecida. Foram consideradas várias alturas e períodos de onda, atuando sobre um fundo com sedimentos de diâmetro granulométrico mediano de 1Φ (Fig. 16). Esta profundidade foi dividida por dois para a determinação da profundidade de fechamento. Para a onda significativa de 1,8m e períodos de 7 a 8s, esta profundidade seria de 12m, mais profunda, portanto, que os 8m indicados pela batimetria, que por sua vez corresponde a uma onda de 1 a 1,2m (Fig. 17). Ondas de maior altura e período aumentam da profundidade de fechamento. Considerando a redução da altura da onda por efeito da refração, à medida que se aproxima da costa, a profundidade indicada pela mudança de declive parece representar uma aproximação razoável para a profundidade de fechamento.

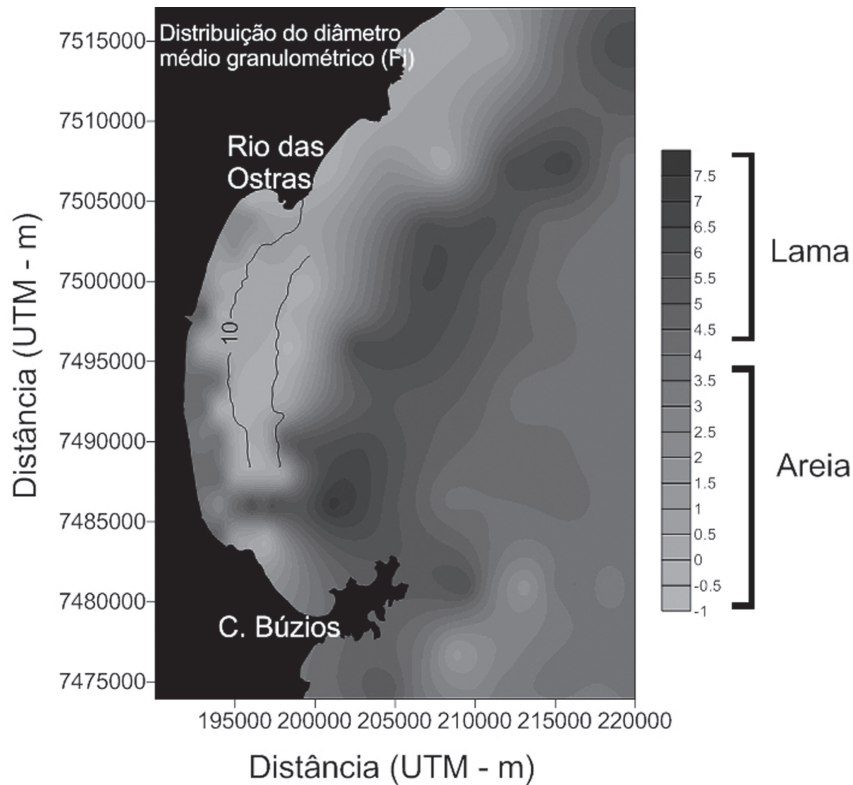


Figura 16 - Distribuição do diâmetro médio granulométrico (fi) da antepraia e da plataforma continental interna entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios, com inserção das isóbatas de 10 e 15m. Notar a concentração de lamas (siltes) defronte à metade sul do arco praial, oriundas do Rio São João, e uma segunda faixa, na plataforma continental interna, oriunda dos rios Paraíba do Sul e Macaé. Fonte: SAAVEDRA e MUEHE (1993); FERNANDEZ e MUEHE (1995); FERNANDEZ (1998).

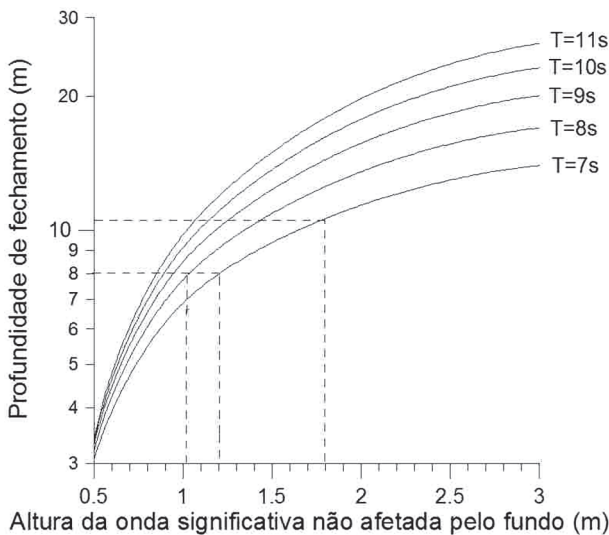


Figura 17 - Profundidade de fechamento para ondas de várias alturas e períodos e diâmetro granulométrico dos sedimentos de 1Φ (0,05cm).

Em vista da observada tendência erosiva do segmento costeiro, principalmente ao Norte de Barra de São João, a avaliação de um cenário, que leve em conta os efeitos de um incremento da taxa de elevação do nível do mar, passa a ser um exercício de precaução já que a detectada instabilidade se acentuará e a linha de costa tenderia a se adaptar por meio de um recuo erosivo. Considerando o significativo aumento da incerteza e consequente dispersão dos valores previstos para o comportamento do nível do mar, a partir da metade do século, a previsão se limitará para os próximos 50 anos adotando um cenário de mudança climática intermediário entre o emprego intensivo de energia fóssil e não fóssil (A1B), conforme projeção do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2007). Para isto foi considerada a profundidade de fechamento de 8m, a altura do terraço marinho e a distância da praia à profundidade de fechamento ao longo dos perfis topo-batimétricos levantados e mais ainda, uma taxa de elevação atual de 0,003m/ano e uma elevação do nível do mar máxima 0,28m até o ano de 2010. Em termos gerais, os recuos previstos, que devem ser

considerados como uma possibilidade potencial e não como uma certeza, são da ordem de 25m para o segmento mais vulnerável, na extremidade norte do arco praial, junto a Rio das Ostras (perfis B a D), onde a erosão já atingiu a área urbanizada, decrescendo para 20m até Barra de São João (perfis E a H) e para cerca de 10m a sul de Barra de São João (Fig. 18). Já a partir da metade sul do semi-arco praial em direção à Ponta do Pai Vitório (perfis N a P), o baixo gradiente de declividade não é adequado para o emprego do método de Bruun por gerar valores exagerados. A baixa energia das ondas assim com a característica deposicional da antepraia, por outro lado, não favorece o desenvolvimento de um processo erosivo agressivo, sendo mais provável a quase estabilidade deste segmento.

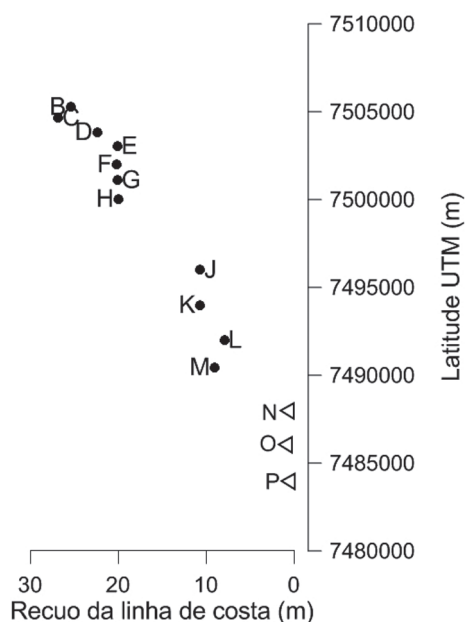


Figura 18 - Recuo potencial da linha de costa em resposta a uma elevação do nível do mar de 0,28m, para os próximos 50 anos (até o ano 2060).

Conclusões

Os levantamentos realizados apontam para um desequilíbrio morfosedimentar, com tendência erosiva principalmente entre Rio das Ostras e Barra de São João, que se acentuará com a elevação do nível do mar. Esta interpretação se baseia no reduzido estoque de areia da praia, no desequilíbrio do perfil transversal submarino em relação ao perfil teórico, no recobrimento localizado do substrato de areias grossas com areias finas, desfavorável à realimentação da praia com as areias de granulometria mais adaptada ao clima de ondas, no processo erosivo da antepraia média e superior e da escarpa erosiva de contato entre a praia e o terraço costeiro.

Para o cenário e horizonte temporal considerado a maior parte das construções mais próximas da praia ainda está fora do limite de risco, mas a estrada que corre junto à praia já será afetada pontualmente. Em vista dos resultados obtidos é fundamental manter, onde é ainda possível, uma faixa de não edificação ao longo da orla. Isto se torna ainda mais premente tendo em vista que outros cenários, mais agressivos, venham a ocorrer, principalmente em direção ao final do século, quando as amplitudes potenciais de recuo da linha de costa podem mais que dobrar os valores encontrados no presente estudo. O estabelecimento de um programa de monitoramento do comportamento da linha de costa é altamente recomendável para um acompanhamento da tendência evolutiva e para a tomada de medidas de proteção ou deslocamento conforme a evolução do risco potencial.

Agradecimentos

O presente trabalho contou com recursos financeiros oriundos do CNPq Proc. 306870/2006-1 e 304165/2009-3. Fotos aéreas foram fornecidas pelo Departamento de Recursos Minerais (DRM). Ortofotos georeferenciados tiveram seu uso autorizado pela empresa Ampla Energia e Serviços através do DRM. Ao Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein expressamos nossos agradecimentos pelas explicações sobre nuances do ajustamento teórico de perfis de praia em planta, através do programa MEPPE.

Referências bibliográficas

- BIRKEMEIER, W. A. Field data on the seaward limit of profile change. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**. V. 111, p. 598-602, 1985.
- BRUUN, P. Coastal erosion and the development of beach profiles. **U.S. Army Beach Erosion Board**, Technical Memorandum, 44p, 1954.
- BRUUN, P. Sea level rise as a cause of shore erosion. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, ASCE. v. 88, p. 117-130, 1962.
- BRUUN, P. The Bruun rule of erosion: A discussion on large-scale two and three dimensional usage. **Journal of Coastal Research**. v. 4, p. 626-648, 1988.
- CARVALHO, N.V. **Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas**. 1998. 186p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DEAN, R.G. Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts. **Ocean Engineering Technical Report**. v. 12., 1977.
- DEAN, R.G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. **Journal of Coastal Research**. v.7, p. 53-84, 1991.

- FERNANDEZ, G. B. **Caracterização morfodinâmica do prisma praiial sob influência de sedimentos fluviais no embaçamento Rio das Ostras - Cabo Búzios (RJ)**. 1988. 92p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ.
- FERNANDEZ, G. B. & MUEHE, D. Cobertura sedimentar recente e batimetria da plataforma continental interna entre Macaé e o Cabo Búzios, RJ. **VI Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada**. Anais. v. 1, p. 196-203, 1995.
- FERNANDEZ, G. B. & MUEHE, D. A influência de sedimentos fluviais na morfologia da praia e antepraia no embaçamento Rio das Ostras - Cabo Búzios - (RJ). **Geosul**. v. 14, n. 27, p. 200-203, 1998.
- FERREIRA, Ó.; GARCIA, T.; MATIAS, A.; TABORDA, J. & DIAS, J.A. An integrated method of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. **Continental Shelf Research**. v. 26, p. 1030-1044, 2006.
- FOLK, R.L. **Petrology of sedimentary rocks**. The University of Texas. Geology, Austin, Texas, 1968, 170p.
- HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**. v. 4, p. 253-277, 1981.
- HSU, J. R.-C.; BENEDET, L.; KLEIN, A. H. F.; RAABE, A. L. A.; TSAI, C.-P. E & HSU, T.-W. Appreciation of static bay beach concept for coastal management and protection. **Journal of Coastal Research**, v. 24, n. 1, p. 198-215, 2008.
- HSU, J. R. C. & EVANS, C. Parabolic bay shapes and applications. **Proc. Inst. Civil Engineers**, Part 2. Thomas Telford, London. v. 87, p. 557-570, 1989.
- IPPC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007) **Fourth Assessment Report: Climate change 2007**. Working Group I: The Physical Science Basis. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-5-1-figure-1.html
- KLEIN, A. H. F.; VARGAS, A.; RAABE, A. L. A. & HSU, J. R. C. (2003). Visual assessment of bayed beach stability with computer software. **Computers & Geosciences**, 29:1249-1257.
- KOMAR, P. D. & MILLER, M. C. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold. **Journal of Sedimentary Petrology**. v. 45, n. 1, p. 361-367, 1975.
- MUEHE, D. Estado morfodinâmico praiial no instante da observação: uma alternativa de identificação. **Revista Brasileira de Oceanografia**. v. 46, n. 2, p. 157-169, 1998.
- MUEHE, D. Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 2, n. 1, p. 35-44, 2001.
- MUEHE, D. Definições de limites e tipologias da orla sob os aspectos morfodinâmico e evolutivo. In: **Projeto Orla – Subsídios para um projeto de gestão – MMA e MPO**, 2004, p. 13-32.
- MUEHE, D.; ROSO, R.H. & SAVI, D.C. Avaliação de método expedito de determinação do nível do mar como datum vertical para amarração de perfis de praia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 4, n. 1, p. 53-57, 2003.
- PINHO, U. F. (2008). **Caracterização dos estados de mar na Baía de Campos (Rio de Janeiro)**. 2003, 123 p. Dissertação de Mestrado. COPPE, Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- SAAVEDRA, L. & MUEHE, D. **Innershelf morphology and sediment distribution in front of Cape-Frio - Cape Buzios embayment**. JOPS-I Workshop. (Brazilian German Victor Hensen Programme Joint Oceanographic Projects, Niterói/RJ. 1993. 29 p.
- VARGAS, A.; RAABE, A. L. A.; KLEIN, A. H. F. Sistema Computacional para Aplicação do Modelo Parabólico de Praias de Enseada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 3, n. 1 p. 11-19, 2002.