

Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira

Claudio Freitas Neves

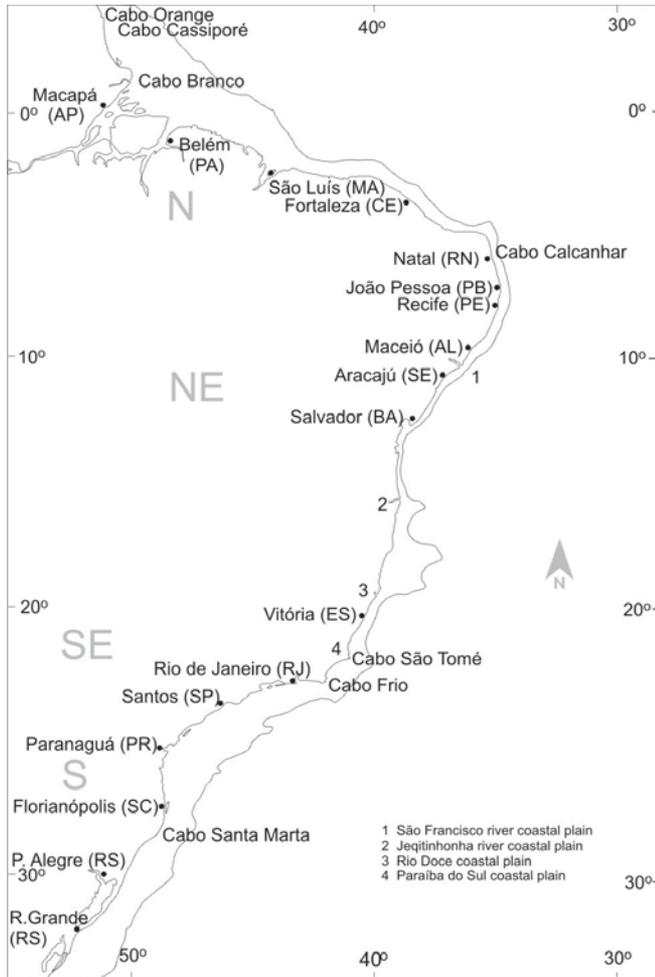
Dieter Muebe

1. APRESENTAÇÃO

O litoral do Brasil se estende da região equatorial do Hemisfério Norte às latitudes subtropicais do Hemisfério Sul, ao longo de mais ou menos 8.000 km banhados pelo Oceano Atlântico ocidental (Figura 1). Como consequência a Zona Costeira atravessa, ao longo de toda essa extensão, diferentes ambientes climáticos, que variam do úmido equatorial e tropical ao semi-árido no Nordeste e ao clima subtropical do Sul, e diferentes ambientes geológicos e geomorfológicos. Para efeitos legais, a Zona Costeira é constituída por uma faixa marítima, com 12 milhas náuticas de largura, e por uma faixa terrestre, com 50 km de largura a partir da linha de costa, correspondendo a uma superfície territorial total de 535.000 km² (VIDIGAL, 2006).

A ocupação do litoral, vista de maneira geral, é relativamente baixa. Os Censos de 1980 e 1991 mostraram que a população residente nos municípios costeiros, banhados diretamente pelo mar ou em regiões estuarinas, permaneceu em torno de 20% da população total do país (MUEHE e NEVES, 1990, 1995). Esse valor era equivalente à população residente nos Estados interiores, o que leva a uma reflexão mais cuidadosa sobre a visão de um país eminentemente costeiro e desabitado no interior. De fato, os Estados da Região Nordeste, o Rio de Janeiro e o Amapá, por diferentes motivos, têm concentrada sua população na zona costeira, enquanto que dois Estados populosos – São Paulo e Paraná –, possuem baixa densidade populacional nos municípios costeiros. A distribuição geográfica da população na zona costeira era (e ainda é) bastante irregular: fortes concentrações ocorrem nas proximidades das capitais, principalmente

Fig.ura 1. O litoral do Brasil: localização de capitais, acidentes geográficos e plataforma continental



nas cidades do Rio de Janeiro, Salvador, Maceió, Recife e Fortaleza, seguido por Vitória e São Luís. Nessas áreas, os problemas da erosão costeira são mais notados e muitas vezes agravados por obras de engenharia diversas que desequilibram o balanço sedimentar, tais como: estabilização de canais de maré, canais de acesso e estruturas de abrigo a portos ou terminais marítimos, construção de espigões. Muitas vezes, no passado, a concepção das obras não considerava o equilíbrio morfológico da costa em sentido mais amplo e as soluções técnicas dos problemas, embora conhecidas, jamais foram implementadas.

As cidades de Belém e Porto Alegre são dois casos particulares de capitais situadas às margens de grandes sistemas estuarinos, onde processos tanto continentais quanto marinhos desempenham papéis às vezes conflitantes. Por esse motivo, são regiões que merecem tratamento diferenciado quando se discutem as mudanças climáticas globais e os efeitos das variações do nível médio do mar.

A fim de caracterizar o grau de ocupação da zona costeira, para cada microrregião do IBGE, contabilizou-se apenas a população residente naqueles municípios costeiros ou em margens de estuários, e definiu-se um parâmetro – população por quilômetro de linha de costa” (PLC) –, que é a razão entre a população e a extensão da linha de costa da microrregião. Obteve-se, assim, um critério objetivo para hierarquizar os trechos de costa onde os impactos de mudanças seriam potencialmente mais danosos, a partir do pressuposto que, quanto maior a concentração populacional, maior a diversidade de atividades econômicas. Identificaram-se quatro categorias de ocupação (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição populacional ao longo da costa brasileira

Densidade de ocupação PLC (população/km)						
Ano	Linha de costa	<1.000	1.000-5.000	5.000-10.000	>10.000	Total
1980	Extensão (km)	3.824	2.683	385	560	7.452
	Porcentagem	51,3%	36,0%	5,2%	7,5%	100%
1991	Extensão (km)	3.328	2.867	512	745	7.452
	Porcentagem	44,7%	38,5%	6,9%	10,0%	100%

Para os segmentos com densidade inferior a 1.000 habitantes por quilômetro de linha de costa, que corresponde a cerca de 40% do litoral, as principais ações direcionam-se a ordenar a ocupação futura, evitar urbanização de áreas naturalmente frágeis (como embocaduras fluviais) e criar zonas de proteção ambiental; o monitoramento dessas áreas deve ser conduzido de modo a servir como teste para comprovação com outras localidades. As áreas críticas são aquelas que apresentam taxas de ocupação entre 1.000 e 10.000 habitantes por quilômetro de linha de costa. Aí são

necessários planos de gerenciamento integrado de recursos costeiros e hídricos, reformulação dos planos de zoneamento (caso existam), ações de educação ambiental direcionadas a professores e alunos em todos os níveis de ensino, monitoramento da evolução costeira e socioeconômica. É necessário rigor no projeto e controle das obras de engenharia e condução de planejamento de longo prazo. Trechos com ocupação superior a dez mil habitantes por quilômetro de linha de costa são aqueles onde ocorre maior diversidade de atividades econômicas e, em conseqüência, os impactos das mudanças climáticas seriam potencialmente mais danosos; por outro lado, nesses locais haveria população em número suficiente para dividir os custos de proteção do estado atual de ocupação.

Nos últimos anos, esforços vêm sendo feitos para identificar as áreas mais vulneráveis para posterior monitoramento e detalhamento das razões dos desequilíbrios observados (MUEHE, 2006). O controle dos órgãos ambientais, a legislação que impõe responsabilidades de monitoramento às atividades econômicas e industriais situadas na costa (por exemplo, Lei 8.630/93), e as próprias ações de educação ambiental e divulgação científica, em conjunto farão com que se desenvolva gradualmente uma nova “mentalidade marítima”¹ e de gerenciamento integrado da zona costeira.

Atualmente, porém, a identificação das causas da erosão costeira tem sido freqüentemente um exercício mais especulativo do que propriamente científico devido à inexistência (ou, pelo menos, dificuldade de acesso) de dados de monitoramento ambiental de longo prazo, o que inclui: comportamento do nível (médio) do mar, dados meteorológicos sobre o oceano e zona costeira, informações diretas sobre ondas, evolução da morfologia da costa e plataforma continental interna (até 50 m). Ao mesmo tempo, fatores diversos, tais como a ocupação territorial desordenada, a exploração indiscriminada de jazidas de areia nos estuários e braços de mar, a construção de obras de proteção costeira sem critérios técnicos de engenharia, muitas vezes têm desencadeado processos erosivos rápidos (por exemplo, Fortaleza (CE), Olinda (PE), Conceição da Barra (ES), Matinhos (PR)). Por essa razão, e em especial pela falta de referências pretéritas, tem sido difícil, e muitas vezes impossível, distinguir se os episódios de erosão

¹ De acordo com Vidigal (2006), denomina-se “mentalidade marítima de um povo a compreensão da essencial dependência do mar para a sua sobrevivência histórica”.

ou progradação da linha de costa resultam das intervenções antrópicas ou indicam alguma tendência de longo prazo.

Este trabalho estrutura-se em três partes. Na primeira, são identificados os agentes físicos que atuam sobre a zona costeira, descrevendo-se os impactos decorrentes, suas escalas espaciais e temporais. Na segunda parte, é feita uma avaliação da vulnerabilidade da zona costeira, exemplificando-se com relatos de casos ao longo do litoral brasileiro. São considerados separadamente os ambientes naturais e as obras de engenharia. Finalmente, a terceira parte apresenta um elenco de ações de mitigação dentro do contexto de mudanças climáticas, que podem ser agrupadas em três categorias – recuo, acomodação ou proteção –, de acordo com a nomenclatura do IPCC (1994). No primeiro caso, os beneficiamentos da orla ou a forma de ocupação corrente são abandonados; no segundo caso, adaptam-se os usos da zona costeira a uma nova situação (i.e. de nível do mar, de salinidade etc.); no terceiro caso, projetam-se obras de engenharia de forma a manter a ocupação corrente.

2. AGENTES FÍSICOS

2.1 ASPECTOS GERAIS

A zona costeira é influenciada por agentes oceânicos, atmosféricos e continentais, motivo pelo qual ela é particularmente sensível a mudanças climáticas. Alterações na intensidade, na distribuição espacial ou na climatologia de ventos afetam os esforços sobre estruturas portuárias, trazem impactos sobre construções urbanas, mobilizam sedimentos de dunas, apenas para citar alguns poucos exemplos de situações críticas ocorridas nos últimos 40 anos no Brasil. Contudo, é sobre os oceanos e os corpos d'água costeiros que os ventos produzem efeitos mais significativos, gerando ondas e induzindo circulações de massas d'água em várias escalas temporais e espaciais. Existem, porém, outras formas de interação entre oceano e atmosfera que trazem conseqüências para o meio biótico e algumas atividades humanas, como por exemplo, vórtices da Corrente do Brasil influenciam localmente a geração e a propagação de ondas, bem como a qualidade das massas d'água na plataforma continental; diferença de temperatura ar-mar, formando névoa, com prejuízos para a operação de aeroportos e navegação costeira; penetração da brisa marinha (maresia), afetando materiais e estruturas na zona costeira.

Os ventos e as condições meteorológicas atuam também sobre o oceano provocando mudanças no nível médio do mar. Reduções de pressão atmosférica produzem elevação do nível do mar, por um efeito conhecido como barômetro invertido, de modo que uma redução de 1 hPa produz uma elevação do nível médio do mar da ordem de 1,0 cm. Além disso, as tensões tangenciais do vento sobre o mar provocam deslocamentos de massa d'água, conhecido como "transporte de Ekman", responsável por fenômenos como a ressurgência em Cabo Frio (RJ), o empilhamento de água junto à costa bloqueando o escoamento de rios, a inundação de lagoas costeiras prejudicando a drenagem pluvial, entre outros efeitos. No caso de conjunção da elevação do nível do mar (maré meteorológica) e ocorrência de ondas mais altas, as ressacas, as praias ficam expostas a mudanças morfológicas que resultam no recuo da linha de costa.

A temperatura tem sido a grandeza ambiental mais facilmente associada às mudanças climáticas através dos meios de comunicação: o fenômeno El Niño, o efeito estufa, o aquecimento global ou uma "nova era glacial" são exemplos que mobilizam a opinião pública. As conseqüências de mudanças de temperatura da atmosfera e dos oceanos, e as respectivas interações, são bem mais complexas e certamente ainda não foram suficientemente estudadas em todas as suas dimensões. O problema não se resume ao simples aumento da massa d'água dos oceanos em decorrência do derretimento das geleiras continentais.

Em primeiro lugar, um aquecimento do oceano, induzido pelo aquecimento atmosférico, provoca a expansão térmica da água, aumentando assim o volume das águas marinhas e acarretando em um aumento do nível médio dos mares. Os oceanos, porém, longe de serem uma massa d'água uniforme, possuem várias massas d'água, cuja salinidade e densidade estão intrinsecamente relacionadas à temperatura (SOLOMON et al., 2007). O padrão termo-halino de circulação planetária, meridional e zonal (por exemplo, D. Evans <<http://www.csus.edu/indiv/e/evansd/geology8/>>), pode ser muito afetado pelo aquecimento ou pela redução da salinidade das águas na região ártica, com reflexos sobre o clima do planeta em todos os continentes, a vida marinha e a produção pesqueira (SOLOMON et al., 2007, p.397).

Mudanças nos padrões de temperatura da superfície do mar (TSM) influenciam o regime de ventos, não apenas as brisas como também a força

dos furacões. Por esse motivo, o sensoriamento remoto da TSM mostra-se uma grandeza de muito interesse para várias atividades humanas, desde a pesca até a defesa civil. Mais ainda, os processos termodinâmicos existentes na interface ar-mar influenciam também o padrão de formação das ondas – e não apenas a intensidade do vento e a extensão da pista de atuação, parâmetros usados para cálculo da previsão de ondas. No entanto, não se dispõe ainda de um monitoramento eficiente, com abrangência planetária, das temperaturas dos oceanos em profundidade, nem das propriedades físico-químicas das águas profundas. Os oceanos continuam sendo uma imensa fronteira desconhecida para o homem, cuja exploração requer tecnologia avançada e esforço cooperativo internacional.

Alterações no regime hidrológico raramente são levadas em consideração em estudos na zona costeira, assim como ações de gerenciamento de recursos hídricos raramente incluem os trechos estuarinos em seu escopo. Isso é um paradoxo. Sabe-se hoje que as águas do Rio da Prata deslocam-se para Norte junto à costa do Rio Grande do Sul, levando consigo minerais e organismos plantônicos, influenciando a qualidade da água costeira. O mesmo se pode dizer do Amazonas, cujo caudal influencia largas porções do mar adjacente, é regido pelas variações sazonais e transporta grandes quantidades de sedimentos. Em bacias hidrográficas com escalas geográficas menores, é possível quantificar e estabelecer relações de causa e efeito entre as intervenções continentais e as respostas da zona costeira. As análises de longo prazo (50 anos) de vazões fluviais diárias no Rio Paraíba do Sul permitiram estabelecer vínculos temporais entre as construções de obras hidráulicas, o aumento da utilização de recursos hídricos na bacia e o acúmulo de sedimentos no Pontal de Atafona (COSTA, 1995). Situação análoga citada na literatura foi a erosão do delta do Nilo após a construção da represa de Assuan e conseqüente regularização da vazão fluvial, que resultou na diminuição do aporte de sedimentos à embocadura do rio e em acelerado processo de erosão num segmento estável de linha de costa (FANOS et al., 1995). Problemas semelhantes são relatados em outras regiões deltaicas, como nos Rios Changjiang (Yangtse), Amarelo, Mekong e Mississipi, entre outros (KAY e MAGOON, 1993). Ou seja, qualquer ação antrópica ou fenômeno natural que venha a alterar a vazão fluvial e sedimentar que chega à embocadura traz conseqüências sobre a morfologia, sobre a qualidade da água e sobre os diversos ciclos de vida e biomas associados aos ambientes estuarinos. Redução de vazões fluviais – não

importando se devido à transposição de bacias ou construção de barragens ou mudança de regime de chuvas – facilita a penetração da água salgada do mar para o interior dos estuários, onde em geral é feita a captação de água doce para diversos fins (por exemplo, abastecimento humano, usos industriais de resfriamento, irrigação, aqüicultura). O balanço entre os volumes de água doce (vazão fluvial) e de água salgada (prisma de maré) pode ser facilmente perturbado em consequência de mudanças climáticas que afetem o nível do mar, os padrões de chuvas ou o consumo de água na bacia hidrográfica, confirmando a vulnerabilidade da população costeira (NICHOLLS et al., 2007, p.326-327).

As próximas seções procuram ajudar a construir uma visão sistêmica da interligação entre os diversos agentes naturais e processos físicos, de modo a identificar como eles atuam sobre a zona costeira.

2.2 REGIME DE VENTOS

As considerações sobre as mudanças de regime de ventos devem levar em conta a abrangência da circulação atmosférica em questão, a intensidade do vento, a distribuição espacial e as frequências temporais. Os ventos afetam a vida do homem localizado na zona costeira de várias maneiras, em diferentes escalas espaciais e temporais. A apresentação a seguir divide os fenômenos em larga escala, mesoescala e escala local; destas, apenas os de larga escala são objeto dos cenários estudados pelo IPCC, o que transmite ao leitor a magnitude das incertezas sobre os impactos na zona costeira.

Larga escala

- *Regime de chuvas*

Ao contrário dos padrões de precipitação continental, a precipitação sobre os oceanos tem sido pouco observada e ainda são largamente desconhecidos os efeitos do regime de chuvas sobre a produção de massas d'água, sobre a estrutura de camada limite ar-mar, sobre trocas térmicas e, em última instância, sobre os organismos vivos. Por exemplo, uma explicação para a fraca validação do modelo global do NCEP/NCAR² para os ventos sobre o Oceano Índico é exatamente a previsão insatisfatória do modelo para a precipitação (GOSWAMI e SNGUPTA, 2003).

²National Centers for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR).

- *Climatologia de ventos*

Em larga escala, sobre os oceanos, o clima de ventos é responsável pelos grandes padrões de circulação oceânica de massas d'água, que por sua vez também influenciam o clima continental. Exemplos característicos são os fenômenos oceânicos (por exemplo, El Niño / La Niña no Oceano Pacífico, a oscilação do Atlântico Norte (NAO) e no Oceano Índico) que influenciam outras regiões do planeta através de teleconexões atmosféricas.

- *Geração de ondas*

A altura e o período das ondas dependem, entre outros parâmetros, da intensidade do vento, da pista de atuação sobre o oceano e da duração ou permanência do vento. Mudanças na distribuição espacial dos grandes sistemas meteorológicos (por exemplo, ciclones extratropicais, tempestades tropicais) podem influir nas propriedades das ondas, especialmente a direção de propagação. Assim como se fala de uma climatologia de ventos, pode-se também falar de uma climatologia de ondas associada aos ventos. Atualmente busca-se aprimorar os modelos de previsão de ondas associando-os a modelos globais de circulação atmosférica, sensoriamento remoto e observações com bóias, de modo a reconstruir (*hindcast*) o clima de ondas.

Mesoescala

- *Geração de ondas*

Neste caso, trata-se da geração de ondas em águas restritas ou em condições de pista limitada pela presença de continente. Essa situação interessa à navegação costeira e possui particular relevância para a navegação de barcaças oceânicas como, por exemplo, vem sendo realizado entre o Sul da Bahia e o Norte do Espírito Santo. É de interesse também para a geração de ondas em corpos d'água mais extensos (por exemplo, Lagoa dos Patos e Mirim, baías de Paranaguá, Ilha Grande, Sepetiba, Guanabara, Todos os Santos e São Marcos)³; merece destaque a interação entre ondas e correntes e suas conseqüências sobre a morfologia de embocaduras fluviais, o transporte de sedimentos de fundo, a movimentação de manchas de óleo e a dispersão de poluentes.

³ O mesmo comentário aplica-se aos grandes reservatórios de usinas hidroelétricas e aos processos erosivos em suas margens.

- *Variações do nível médio do mar*

As tensões tangenciais do vento sobre o mar e sua distribuição espacial não uniforme, combinadas com o efeito de rotação da Terra, produzem o transporte de massas d'água, seja aproximando-as em direção à costa, seja afastando-as da costa. Como consequência, verificam-se na costa Sudeste do Brasil oscilações do nível médio do mar na escala de cinco a nove dias, com amplitudes da ordem de 1 m (por exemplo, CASTRO e LEE, 1995; SILVA, 1992; KALIL, 1997). Relatos em várias partes do mundo indicam que no caso de ciclones, tempestades mais intensas e furacões, tais variações podem chegar a 3 m de altura. A costa Sul e Sudeste brasileira está sujeita a ciclones extratropicais, que numa situação única atingiu força de furacão, o Catarina, que atingiu a costa catarinense em fevereiro de 2004⁴. Uaissone (2004) encontrou altas correlações entre as flutuações no nível médio do mar em Piraquara, baía de Ilha Grande (RJ), e as variações meteorológicas de vento e pressão (ciclones extratropicais) em pontos localizados a 200 km de distância, sobre a plataforma continental, em escalas de tempo que variavam de 5 a 21 dias.

- *Usos de recursos hídricos na zona costeira da bacia hidrográfica*

Na medida em que a circulação atmosférica afeta a precipitação, o balanço hídrico das regiões costeiras é muito sensível a variações climáticas (incluindo os rios e as lagunas bem como as restingas, as dunas, onde fica armazenada água da chuva, e os manguezais). Por ser área de grande valor econômico e de atração populacional, aparece uma pressão maior sobre o uso de recursos hídricos, seja como fontes de água doce, seja como áreas de despejo de resíduos.

Escala local

- *Hidrodinâmica de corpos d'água*

A ocorrência de seiches em recintos costeiros tem sido associada à ação de grupos de ondas, porém estudos efetuados no porto de Rotterdam evidenciaram a relação direta com eventos meteorológicos (JONG, 2004; JONG et al., 2003). Oliveira e Paiva Jr. (1993) relatam a ocorrência de um

⁴ Infelizmente não havia marégrafos em operação na região, o que teria permitido quantificar a elevação do nível do mar. A previsão de 12cm fornecida por alguns modelos numéricos é enormemente subestimada.

acidente devido a ressonância portuária na Marina da Glória (RJ), durante uma ressaca em agosto de 1992. A circulação hidrodinâmica de baías é bastante influenciada pela ação de ventos, podendo alterar o transporte de substâncias passivas que fiquem próximo à superfície (influenciadas pelo arraste de vento) ou no meio da coluna d'água (influenciada pelas correntes induzidas pela maré) (por exemplo, XAVIER, 1996; MIRANDA, 2000; XAVIER, 2002).

- *Transporte de sedimentos*

O regime de ventos associado ao desmatamento de dunas tem sido fator limitante da ocupação urbana em vários pontos do litoral brasileiro (por exemplo, Itaúna (BA), Grussaí, Cabo Frio e Arraial do Cabo (RJ) e vários locais no Nordeste) devido ao transporte eólico de sedimentos. Ao longo da costa do Ceará, essa forma de transporte desempenha um importante papel no equilíbrio morfodinâmico das praias; em alguns locais, o volume de areia transportada pode alcançar até 30% do volume mobilizado pelas ondas na zona de arrebentação segundo Valentini (1994), que também apresenta revisão bibliográfica sobre metodologias para quantificação do transporte eólico. Durante a maré baixa, a areia é retirada pelo vento do estirâncio na face da praia, alimenta as dunas e depois é soprado de volta para a praia, de onde é mobilizado pelas ondas e correntes litorâneas. Mudanças climáticas que afetem o regime local de ventos ou a vegetação fixadora de dunas, na presença de disponibilidade sedimentar na faixa costeira, podem trazer impactos adversos.

- *Ação de ventos sobre estruturas e embarcações*

Normas para dimensionamento de estruturas à ação de ventos na zona costeira ou estão desatualizadas, ou não foram adaptadas a mudanças climáticas. Muitas vezes, a própria metodologia de observação e de classificação dos dados é inadequada. Alguns episódios merecem ser citados como alerta: a passagem do ciclone Catarina em 2004, que apresentou ventos com força de furacão tipo I; a ocorrência, em graus crescentes, de destruições por efeitos de tornados no Sul do Brasil; o abaloamento de um pilar da ponte Rio-Niterói por um navio em janeiro de 1987 (ALCÂNTARA e WASHINGTON, 1989), com ventos persistentes de 70 a 90 km/h; os acidentes com tombamentos de guindastes em vários portos. Esses exemplos alertam para maior vigilância e necessidade de se atualizar os critérios de

projeto de obras ou de aproveitamentos costeiros. Para finalizar, deve-se estar atento a variações do alcance da brisa marinha quanto à ação da maresia sobre materiais e estruturas.

2.3 REGIME DE ONDAS

As ondas que chegam às praias são formadas no meio dos oceanos por ação de ventos, que sopram durante um determinado intervalo de duração e ao longo de uma determinada extensão (denominada “pista do vento”); as diferenças de temperatura e a estrutura de turbulência na camada limite ar-mar também influenciam a altura da onda gerada. Mudanças na climatologia de ventos certamente afetarão a climatologia das ondas. No caso da costa brasileira, distinguem-se três regiões oceânicas distintas: a costa Sul-Sudeste, que sofre ações de ondas geradas em latitudes mais altas por ciclones extratropicais; a costa Leste, que sofre ação das vagas⁵ geradas por ventos do Anticiclone semi-estacionário do Atlântico Sul e dos marulhos de quadrante SO-SE; e a costa Nordeste Setentrional, que está sujeita aos ventos alísios e a eventos de tempestades mais distantes no Atlântico Norte (MELO e ALVES, 1993; MELO *et al.*, 1995).

Ciclones extratropicais vindos de Sul produzem eventos extremos com a geração de ondas e marulhos com alturas significativas da ordem de 15 m e períodos de 17 segundos em mar aberto. Até atingir a costa, essas ondas mais altas sofrem alterações – dissipam energia e são refratadas pela batimetria – podendo a altura chegar a 4 m em alguns locais (REGO, 1992). A caracterização do regime de ondas nesse segmento da costa e em especial na Baía de Campos foi feita por Violante-Carvalho (1998), Pinho (2003), entre outros, seguindo a metodologia proposta por Parente (1999) que permitia caracterizar a evolução temporal conjunta dos espectros de ondas e do regime de ventos. Na zona costeira essa alternância entre tempo bom e tempestade define o clima de ondas e o transporte de sedimentos, mais intensamente do extremo Sul ao Cabo Frio (RJ), diminuindo aos poucos a influência das ondas de Sul em direção a Salvador e Recife. Na costa Leste, por influência dos ventos alísios gerados pelo Anticiclone do Atlântico Sul, as ondas se deslocam de Leste e Sudeste nas áreas próximas ao Equador e giram gradualmente para a direção Nordeste com o aumento da latitude.

⁵ A distinção entre vagas e marulhos (ou ondulações) diz respeito ao estado menos ou mais organizado do mar, correspondendo as vagas ao termo em inglês *sea* e os marulhos ao termo *swell*.

Alturas significativas em mar aberto variam entre 1 m e 2 m com incremento para 1,5 m a 2,5 m no extremo Sul. O período das ondas varia entre 4 e 6 segundos. Ondas geradas por tempestades tropicais no Hemisfério Norte atingem a Região Nordeste (Ceará) na forma de marulho, com períodos de até 18 segundos e importantes efeitos erosivos (MAIA, 2002).

As ondas provocam o transporte de sedimentos e a mudança da morfologia das praias, produzem esforços sobre estruturas e afetam a navegação. As medições no passado se restringiam às especificações de projetos de obras marítimas e portuárias, sem se atentarem para a questão mais ampla do gerenciamento ambiental (HOMSI, 1993). Assim, o Brasil não dispõe de um sistema de monitoramento permanente que seja acessível a toda a sociedade. Os dados atualmente coletados pela Petrobras são de uso exclusivo dessa empresa, não sendo divulgados por motivo de sigilo industrial; os dados pretéritos obtidos pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH/Portobras, hoje vinculado à Cia. Docas do Rio de Janeiro) podem ser acessados, mas não foram digitalizados, não integram o Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação, nem possuem extensão temporal suficiente para caracterizar um clima de ondas. Isso dificulta a elaboração de projetos de engenharia e introduz um grau de incerteza ainda maior em cenários de mudanças climáticas. Em geral, utilizam-se cartas de ondas compiladas (por exemplo, Global Wave Statistics) que não refletem o clima de ondas local e que são baseadas em observações *ship*, ou seja, observações meteorológicas ou oceanográficas feitas por navios em rotas comerciais (por conseguinte, informações nem sempre muito confiáveis); alternativamente, utilizam-se dados pretéritos de algum outro local próximo.

É importante mencionar que observações efetuadas no Mar do Norte na época dos primeiros projetos das plataformas de exploração de petróleo já mostram diferenças em relação às medições atuais da ordem de 25%. Já existe vasto conhecimento acumulado internacionalmente nos últimos 60 anos sobre a evolução do clima de ondas – embora o conhecimento brasileiro sobre o regime de ondas que afeta a nossa costa seja insuficiente, inadequado e limitado a pontos isolados do litoral. Na maioria das vezes, as campanhas de medição são de prazo relativamente curto (inferior a 10 anos) e são motivadas pelo interesse de alguma atividade econômica ou de alguma empresa. A necessidade de um programa abrangente de monitoramento permanente de ondas já era alertada por Homsí (1978) e, desde então, nada

foi implementado. É imperativo que o governo brasileiro, por meio de suas esferas federal, estadual e municipal, assumam a coordenação de um programa amplo e permanente de monitoramento de ondas, com recursos financeiros, materiais e humanos para estabelecer um serviço operacional, a exemplo de outros países.

As evidências de erosão em vários pontos da costa brasileira carecem, em grande parte das vezes, de diagnóstico preciso das causas e de quantificação cientificamente bem fundamentada, na medida em que o principal agente transformador da costa, a onda, não é monitorado. Além disso, se os levantamentos topo-batimétricos não forem efetuados ao largo daqueles locais, os estudos para solução do problema ficam comprometidos. Considerando, por um lado, a cadeia de eventos: mudança climática → aumento de tempestades (*storminess*) → aumento da altura das ondas → mudanças morfológicas costeiras, e considerando, por outro lado, a vulnerabilidade de diversas cidades litorâneas aos efeitos de ressacas, questiona-se por que mais recursos não são diretamente alocados ao monitoramento permanente de ondas e de outros parâmetros meteorológico-oceanográficos de uso em projetos de engenharia.

2.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A incidência oblíqua das ondas sobre a praia produz uma corrente longitudinal limitada pela largura da zona de arrebentação das ondas, que é um dos mecanismos responsáveis pelo transporte de sedimentos na zona costeira. O padrão geral da direção do transporte litorâneo ao longo da costa brasileira é variável e depende do alinhamento da praia e do clima de ondas. Por exemplo, nos trechos que vão do Amapá ao Cabo Calcanhar (RN), ao longo da costa de Pernambuco, e ao sul do Cabo Santa Marta ao Rio Grande do Sul, o transporte residual anual é direcionado para a esquerda de um observador olhando de frente para o mar, enquanto que do sul do Espírito Santo até o cabo de São Tomé, o transporte direciona-se para a direita de um observador de frente para o mar. Do Cabo Calcanhar em direção ao sul até a Paraíba e ao longo do litoral do Rio de Janeiro entre Arraial do Cabo e a Ilha da Marambaia, o transporte residual se aproxima de zero.

A relação entre os amplos depósitos de areias costeiras e a plataforma continental como principal fonte dos sedimentos foi reconhecido por Tricart (1959, 1960). A origem desses sedimentos se encontra na erosão dos

depósitos sedimentares da formação geológica denominada Grupos Barreiras e outros que, ao longo da costa das Regiões Norte, Nordeste e parte do Sudeste, formam depósitos de algumas dezenas de metros acima do nível do mar e emolduram a orla na forma de falésias. Concreções lateríticas formadas na faixa de oscilação do lençol freático no interior dos depósitos sedimentares se encontram dispersos na plataforma continental atestando a amplitude de erosão dos mesmos pelos agentes marinhos. Além da incorporação na plataforma continental dos sedimentos oriundos da erosão dos depósitos do Barreiras, ocorreram fases de intenso entalhamento e alargamento erosivo dos baixos cursos dos vales fluviais que atravessam os citados depósitos, cuja largura não apresenta nenhuma relação com o volume dos atuais cursos fluviais. Também os maciços de rochas cristalinas do embasamento aflorante das regiões Sudeste e Sul mostram, pela amplitude dos vales entalhados, a remoção de importantes volumes de sedimentos cujo depósito final foi a plataforma continental.

O principal sumidouro de sedimentos na costa brasileira é representado pelos campos de dunas resultantes da imensa transferência de sedimentos da praia para o interior, retirando definitivamente sedimentos que fazem parte do equilíbrio no balanço sedimentar do sistema praia-antepraia, implicando, ao longo do tempo, na ruptura desse equilíbrio e resultando em erosão costeira. O campo de dunas de maior expressão é representado pelos Lençóis Maranhenses que se estendem por cerca de 20 km para o interior da planície costeira, ao longo de 50 km de linha de costa. Outros campos de dunas se estendem de forma descontínua até a Bahia, com importantes expressões espaciais nos Estados do Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, onde o clima é seco. A tendência erosiva do litoral do Nordeste entre os Lençóis Maranhenses e o Estado de Alagoas (a Norte do Rio São Francisco), identificada por Dominguez e Bittencourt (1996), é caracterizada pela ocorrência de falésias ativas, ausência de depósitos pleistocênicos e afloramentos de arenitos de praia defronte à linha de costa; ela é certamente decorrência da transferência de areias para os campos de dunas. Nas Regiões Sul e Sudeste os principais sumidouros de sedimentos são representados pelas planícies de cristas de praia e terraços arenosos, cordões litorâneos e campos de dunas, estes com importante expressão no litoral do Rio Grande do Sul. Outro exemplo de sumidouro são os bancos de areia ao largo do cabo de São Tomé, uma importante formação subaquática de acumulação de sedimentos, oriundos das praias a sul e a norte do cabo, e que são transportados para lá por ação das ondas.

2.5 VARIAÇÕES DO NÍVEL DO MAR

Comparativamente a outros países com a mesma extensão de linha de costa ou com a mesma exposição marinha, pouca importância se tem dado às observações do nível do mar no Brasil. Medições sistemáticas têm sido feitas pela Marinha do Brasil, por meio de sua Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e, mais recentemente, pelo Centro Hidrográfico da Marinha (CHM), pelo Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), órgão vinculado à extinta Portobras e atualmente vinculado à Cia. Docas do Rio de Janeiro, pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além dessas entidades, existem esforços, isolados de universidades e empresas ou em rede (como é o caso da Rede do Milênio, coordenada pela Universidade Federal do Paraná; da Rede Maregráfica para Fins Geodésicos (RMPG), coordenada pelo IBGE; e da Rede Maregráfica Fluminense que envolve a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o CHM, o IBGE, a Eletronuclear, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e a Petrobras). Consulta feita ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos da DHN revelou que apenas 20% das informações disponíveis haviam sido coletadas há menos de 15 anos e cerca de 75% dos registros possuíam duração inferior a 40 dias. Não se obteve informações, porém, sobre o controle geodésico das estações cadastradas, o que é indispensável para se determinar tendências confiáveis de longa duração.

Desde 2000 instalou-se o programa Gloss-Brasil (Global Sea Level Observing System-Gloss), por sua vez vinculado a um programa mais amplo da Comissão Oceanográfica Intergovernamental da Unesco denominado Global Ocean Observing System (Goos), e que propõe instalar até 10 estações maregráficas permanentes ao longo da costa brasileira e ilhas oceânicas. Atualmente fazem parte desta rede as estações de Imituba (PR), Cananéia (SP), Ilha Fiscal (RJ), Macaé (RJ), Salvador (RJ), Fortaleza (CE), Santana (AP), Fernando de Noronha (PE) e Trindade (ES).

A falta de informações históricas sobre o nível do mar constitui, no momento, a grande vulnerabilidade do Brasil a mudanças do nível relativo do mar, posto que sequer se pode garantir se a variabilidade observada é um fenômeno local, regional ou global. A medição maregráfica, por sua simplicidade, é comparativamente a mais barata dos monitoramentos oceanográficos e pode fornecer informações úteis para o navegante, para o

administrador portuário, para o planejador urbano, para a comunidade costeira ligada a esportes náuticos etc. A partir desta medição, filtram-se as oscilações de período inferior a 12 horas e a maré astronômica, a qual pode ser prevista de modo extremamente preciso (por exemplo, Franco, 1992). O resíduo após a filtragem é denominado Nível Médio do Mar (NMM), o qual, ao contrário do que se pensava no passado, não é uma referência estática dentro da escala de tempo das sociedades humanas.

As oscilações mais curtas, da ordem de 10^1 a 10^2 minutos, estão associadas a fenômenos meteorológicos ou ação de ondas em eventos de ressaca. Jong (2004) relata a ocorrência de seiches no porto de Rotterdam, causados pela passagem de frentes frias cujo perfil vertical de temperatura favorecia a formação de circulações atmosféricas secundárias. Esse fenômeno é de importância para o projeto de portos, especialmente aqueles destinados a pequenas embarcações, pois induzem a ressonância da água no recinto portuário, produzem fortes correntes e trazem conseqüências desastrosas para as embarcações (por exemplo, rompimento de amarras, colisões).

Em escalas de 10^2 a 10^3 minutos, estão as oscilações de nível do mar associadas à maré astronômica que, no Brasil, possui características semi-diurnas (dois ciclos por dia e seus harmônicos). Acredita-se que este fenômeno não seja influenciado por variações climáticas, a menos que ocorresse uma elevação ou rebaixamento do nível médio do mar de tamanha magnitude que viesse a afetar a propagação da onda de maré nas bacias oceânicas e plataforma continental. A maior parte do litoral, do extremo sul ao Estado de Alagoas é submetido ao regime de micro-maré (amplitude menor que 2m). No Rio Grande do Sul a amplitude da maré de sizígia se reduz a apenas 0,6 m. Amplitudes com mais de 4 m (macro-maré) ocorrem nos Estados do Maranhão, parte do Pará (Salinópolis) e no Sul do Amapá. O restante da costa, incluindo pequenos segmentos como o interior da Baía de Todos os Santos (Bahia) e o terminal portuário em Sergipe, são submetidos a regime de meso-maré (amplitudes entre 2 e 4 m).

Em escalas de 10^4 minutos, porém, começam a ocorrer fenômenos que são diretamente vinculados a efeitos meteorológicos, a chamada “maré meteorológica”. A propagação de ciclones extratropicais de Sul para Norte, ao longo da plataforma continental brasileira, produz empilhamentos de água junto à costa ou excita a formação de ondas de plataforma que se propagam no mesmo sentido. Os efeitos no litoral da Região Sul são

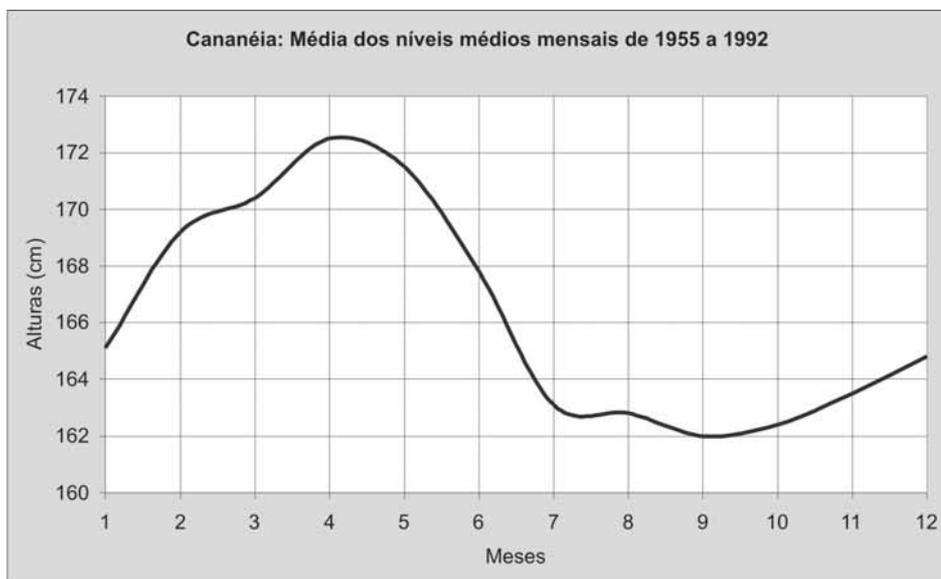
particularmente danosos ao ambiente costeiro, na medida em que elevações do NMM são muitas vezes concomitantes à ocorrência de ressacas. Castro e Lee (1995) relatam estes eventos a partir de observações maregráficas e meteorológicas durante 3 meses, em estações distribuídas desde São Francisco do Sul (SC) até Arraial do Cabo (RJ); Kalil (1997) estabelece correlações entre dados de 5 marégrafos ao longo da costa do Estado do Rio de Janeiro durante o ano de 1996. Uaissone (2004) apresenta uma abrangente revisão bibliográfica sobre estudos de nível médio do mar realizados no Brasil e compara o nível do mar em Piraquara (RJ), com as variáveis atmosféricas (pressão, tensão do vento) fornecidas pelo modelo de reanálise do NCEP/NCAR⁶ sobre a plataforma continental adjacente. Menezes (2007) repetiu análise semelhante para marégrafos em Macaé e na Baía de Guanabara, e constatou que a correlação entre a resposta do nível médio do mar e as variáveis atmosféricas era mais significativa quando utilizava dados ao largo (NCEP/NCAR) em vez de dados observados em aeroportos próximos à costa.

Esforços teóricos no sentido de prever numericamente as variações do nível do mar em consequência de efeitos meteorológicos seguem dois caminhos: o primeiro é o de modelagem numérica direta, acoplando modelos atmosféricos com modelos de circulação oceânica, o segundo é o de aplicação de redes neurais (OLIVEIRA, 2006; OLIVEIRA et al. 2006, 2007). Ambos, porém, exigem o monitoramento extensivo do nível do mar, de alguns parâmetros oceanográficos e das condições atmosféricas sobre o oceano, seja para calibração dos resultados, seja para construção dos “neurônios”.

Em escalas de 10^5 minutos, existem os fenômenos sazonais e intra- anuais, que são igualmente influenciados por fatores climáticos globais. Silva (1992), Kalil (1997) e Uaissone (2004) confirmaram as variações sazonais do NMM, o mesmo sendo observado nos registros de Cananéia (Figura 2). Menezes (2007) verificou variações análogas nos valores de pressão atmosférica; nos períodos de outono, o NMM chega a ser 10 a 15 cm mais alto do que nas demais estações enquanto que as variações de pressão atmosférica eram da ordem de 10 hPa.

⁶ Modelo numérico global elaborado pelos “National Centers for Environmental Prediction e National Center for Atmospheric Research”.

Figura 2. Variação mensal do nível médio do mar em Cananéia.
(janeiro=1 a dezembro=12)

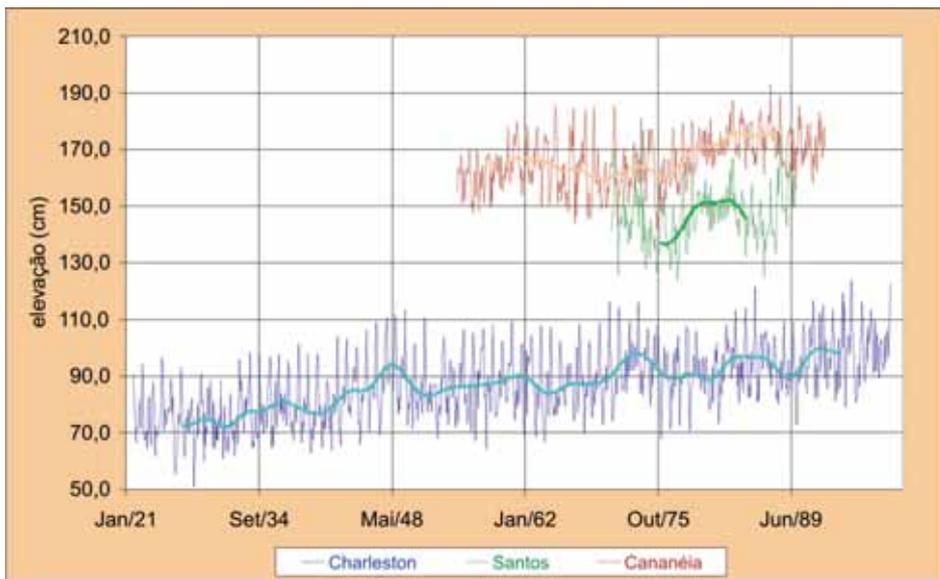


Fonte: Prof. J.Harari, IOUSP.

As escalas maiores ou iguais a 10^6 minutos correspondem à variação de longo prazo. Pirazzoli (1986) estudou as tendências de variação do NMM para 1.178 estações distribuídas em todo o planeta, das quais apenas 259 permitiam determinar uma tendência secular por apresentarem registros contínuos com mais de 30 anos e monitoramento geodésico confiável. Em Galveston, Texas (EUA), a elevação do NMM foi de 70 cm enquanto que em Juneau, Alasca (EUA), observou-se um decréscimo do NMM de 60 cm no mesmo período de 40 anos. Nestes dois exemplos, fatores geológicos explicam tal variação (respectivamente, subsidência de regiões deltaicas e reequilíbrio isostático após o degelo da última Era Glacial). Isso alerta para o fato de que fatores tectônicos e geológicos também contribuem para a percepção do nível médio do mar em relação ao continente. Na escala de vida útil de uma cidade, de um empreendimento industrial importante localizado a beira-mar, ou de um porto, o monitoramento contínuo do nível do mar precisa incluir critérios precisos de controle geodésico, sob a perspectiva de mudanças de longo prazo, a mesma categoria das mudanças climáticas.

Deve ser enfatizado que a mentalidade de monitoramento de longo prazo ainda não existe no Brasil e urge que seja estabelecida. As séries de dados maregráficos mais longas são as das estações de Cananéia (SP), mantida pelo IOUSP desde 1955, e da Ilha Fiscal (RJ), mantida pela DHN desde 1966. No caso do porto de Charleston, Carolina do Sul (EUA), observações contínuas de 1920 a 1990 indicaram uma elevação de 25 cm no nível médio do mar e evidenciam a alta variabilidade interanual (Figura 3).

Figura 3. Variação do nível médio do mar em Santos, Cananéia e Charleston (EUA).



Fonte: J.Harari e B.Kjerve

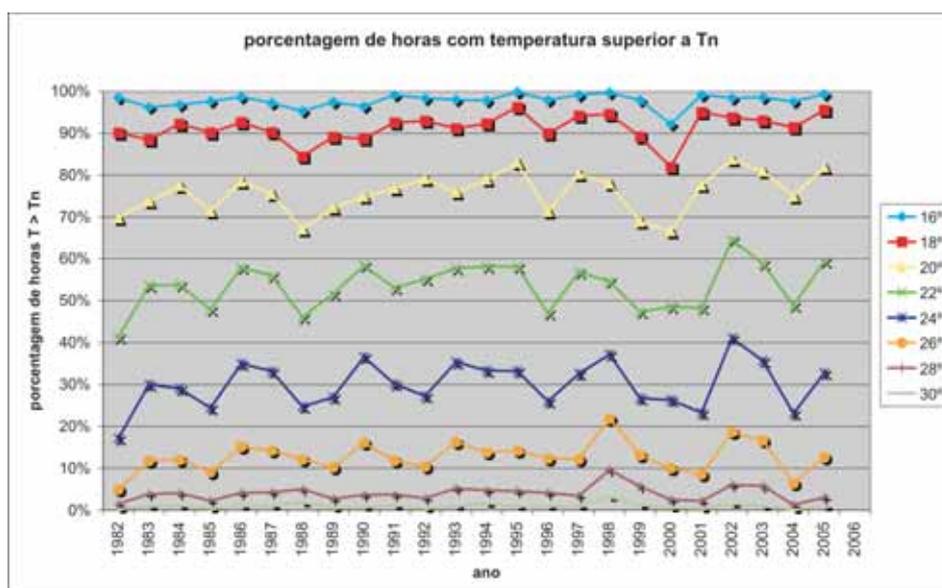
Certamente há estações maregráficas mais antigas no Brasil do que as de Cananéia e de Ilha Fiscal, contudo não se consegue assegurar a qualidade da manutenção da referência altimétrica ao longo dos anos e, por este motivo, tais registros não podem ser utilizados para inferir variações do nível médio relativo do mar.

2.6 TEMPERATURAS

A análise de valores médios, diários ou mensais, de temperatura atmosférica, se for restrita apenas aos últimos 20 ou 30 anos, indica uma

fraca tendência de elevação e possui baixa significância estatística. Alternativamente, propõe-se estudar a variabilidade dos dados, utilizando-se o conceito de “permanência de valores”. Com base em uma série histórica de 24 anos de dados horários de temperatura do ar, medidos em Angra dos Reis e cedidos pela Eletronuclear S.A., foram calculadas, para cada ano, as porcentagens de tempo em que a temperatura permanecia acima de um certo valor. A Figura 4 indica o resultado de tal análise, que permite concluir que os anos de 2000 e 2002, foram mais frios ou mais quentes, respectivamente, tomando como referência uma temperatura de 20 °C. Além disso, para uma determinada faixa de temperatura escolhida, por exemplo entre 20 e 24 °C, verifica-se que existe grande variabilidade da taxa de permanência ao longo dos anos. Outra forma de análise recomendável é avaliar a média e desvio padrão das oscilações de temperatura para as estações do ano⁷.

Figura 4. Variação anual das taxas de permanência de temperatura



Fonte: Eletronuclear S.A.

⁷ Existem divergências entre oceanógrafos e meteorologistas quanto à divisão do ano em estações, alguns escolhendo o período de verão no Hemisfério Sul como de janeiro a março, e outros como de dezembro a fevereiro, respectivamente. Alternativamente, sugere-se adotar períodos de tempo centrados nos solstícios (de inverno e verão) e nos equinócios (de outono e primavera).

Mudanças climáticas que afetam a temperatura dos oceanos podem reverter em alterações térmicas na atmosfera, disparando um processo que se auto-alimenta perigosamente, tendo em vista o balanço térmico entre oceano e atmosfera, a maior capacidade de armazenamento de calor dos oceanos e a sua escala de tempo de resposta relativamente mais lenta do que a da atmosfera. Localmente, as diferenças térmicas entre o oceano e o continente influem no regime de brisas, marinhas e terrestres, com conseqüências sobre o transporte eólico de sedimentos e circulação hidrodinâmica das águas costeiras.

A expansão térmica da água do mar pode ser responsável por algo em torno de 40% da variação do nível médio dos mares, o restante advindo do degelo das geleiras continentais (SOLOMON et al. 2007). O que ainda não se considerou satisfatoriamente foi o efeito desta mudança do padrão de temperaturas sobre a circulação oceânica meridional e zonal, os ciclos de vida da fauna e flora marinhas e a retro-alimentação sobre os climas regionais.

Enquanto a maioria dos pesquisadores considerava uma progressão lenta do degelo na Antártica e na Groenlândia, monitoramentos por satélite das calotas de gelo indicaram desprendimentos súbitos de uma grande porção nestes dois locais. Isto reverte as expectativas anteriores e exige maior aprofundamento. O Brasil, como signatário do Tratado da Antártica e realizador de trabalhos de pesquisa na região, deveria dedicar maior atenção à meteorologia polar e à oceanografia sub-antártica, tendo em vista a influência que os fenômenos nesta região possuem em relação à climatologia da América do Sul e à confluência de massas d'água quente (Corrente do Brasil) e fria (Corrente das Malvinas).

O aquecimento de áreas costeiras traz conseqüências diversas para a circulação hidrodinâmica, bem como para a fauna e flora das águas mais rasas. Isto se faz particularmente mais grave por conta dos parâmetros de dimensionamento dos emissários submarinos de esgoto. Nos casos do Rio de Janeiro, Niterói, Salvador e Camboriú, onde o esgoto é lançado *in natura* (apenas peneiramento), mudanças nas condições de estratificação marinha ou da temperatura da água superficial podem fazer com que a meia-vida bacteriana seja maior do que aquela projetada e águas com grau de contaminação acima do exigido por lei atinjam algumas praias mais distantes (CARVALHO, 2003; FEITOSA, 2003 e 2007).

2.7 PRECIPITAÇÃO

Uma das conseqüências mais estudadas no âmbito das mudanças climáticas é o regime de chuvas, associado preponderantemente à questão agrícola e à desertificação de determinadas áreas. Menos estudados são os efeitos da precipitação sobre os oceanos, o escoamento de vazões fluviais em áreas sujeitas à maré e os impactos do regime hidrológico sobre os sistemas de drenagem de áreas costeiras.

O estudo da precipitação sobre o oceano tem várias conseqüências para o sensoriamento remoto, posto que na região em questão mudam a circulação do vento, a rugosidade da superfície do mar, o balanço térmico ar-mar, a circulação termo-halina da água do mar, e a movimentação plantônica. O monitoramento deste efeito em escala mundial exige a colocação de bóias e tecnologia de transmissão de dados que somente agora começam a ser executados, tendo em vista o desafio de monitoramento de uma área que corresponde a 70% da superfície do planeta!

Mudanças de regime pluviométrico trazem conseqüências bem documentadas na literatura: erosão de encostas, aumento da sedimentação em rios, inundações, necessidade de obras de saneamento geral. Bem menos relatados e estudados no Brasil, contudo, são os efeitos da chegada da onda de cheia à porção estuarina dos rios, as inundações que aí ocorrem, especialmente se o evento for coincidente com marés de sizígia (maiores amplitudes, nas fases da Lua Nova e Cheia) ou se coincidir com efeito de sobrelevação do nível médio do mar por efeito meteorológico (o que é muito comum de acontecer). Devido à ausência de marégrafos nos principais estuários brasileiros, à falta de análise coordenada de dados hidrológicos e hidrográficos, à falta de uma base cartográfica e datum geodésico comum para áreas costeiras oceânicas (cartas náuticas da DHN) e continentais (mapas do IBGE), perde-se a visão sistêmica sobre os fenômenos na zona costeira, sobressaindo as explicações setorizadas. Dois exemplos de muito interesse, onde se está buscando esta visão integrada, são o do rio Itajaí-Açu (SC) e o do Amazonas (PA e AP), ao contrário de outros importantes estuários, como o do Paraíba do Sul (RJ), Doce (ES), São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA) e Parnaíba (PI/MA), cujas dinâmicas não são estudadas.

No outro extremo, não se pode deixar de considerar, nos cenários possíveis de mudanças climáticas, a redução da precipitação sobre as bacias hidrográficas, o que acarretaria a salinização de estuários, o aumento relativo da importância do prisma de maré sobre a vazão fluvial, a redução do transporte de sedimentos fluviais em direção à costa e mudanças na circulação hidrodinâmica induzida pelas ondas. Um programa de monitoramento dos estuários (vazões, maré e sedimentos), integrado ao gerenciamento da bacia hidrográfica, seria a única forma de se caracterizar e quantificar a evolução dos ambientes estuarinos.

O regime hidrológico de áreas costeiras, especialmente a drenagem de áreas urbanas vizinhas a lagunas, é assunto também merecedor de estudos mais aprofundados e prolongados. Em várias cidades de veraneio na Região dos Lagos (RJ) é comum a ocorrência de inundações e transbordamento das lagunas, coincidindo com chuvas (passagens de frentes frias que ocasionam elevação do nível médio do mar). Sendo a rede de esgotos ligada usualmente à rede de drenagem pluvial, esta situação transforma-se em problema de saúde pública. Fenômeno semelhante ocorre na Baixada Fluminense, tendo em vista a pouca capacidade de drenagem dos rios devido ao entulhamento da calha fluvial, mas potencializado por elevações transientes do nível médio do mar (ou da baía de Guanabara) de origem meteorológica.

Nas regiões de restinga, especialmente em áreas mais remotas, a infiltração da água das chuvas nas dunas permite o abastecimento sustentável de uma pequena população. O excesso de captação de água doce, a contaminação do aquífero pelo lançamento de esgotos (fossas), conjugado a mudanças climáticas, que resultem na alteração de regime hidrológico (redução de pluviosidade) ou na elevação do nível médio relativo do mar, podem se tornar impactantes para estas populações devido à salinização dos poços (por exemplo, Arraial do Cabo (RJ), Jaboatão (PE)).

3. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

3.1 EROSION E PROGRADAÇÃO

Inventários sobre erosão e progradação da linha de costa realizados pelos diferentes grupos de pesquisa associados ao Programa de Geologia e Geofísica Marinha em todos os estados costeiros (MUEHE, 2006) indicam

que os relatos sobre erosão são bem mais numerosos do que os de avanço (progradação) da linha de costa. É preciso, porém, levar em conta que a identificação de progradação é difícil de ser feita apenas por observação pontual, sem conhecimento histórico sobre o local, ao contrário da erosão que deixa vestígios claros. Mas também aí há problemas, na medida em que uma indicação de erosão não significa necessariamente uma tendência, o que só se substancia a partir de monitoramento de longo prazo por meio de medições sistemáticas em campo ou de comparação entre imagens de satélites de alta definição. Grosso modo, cerca de 35% da linha de costa do Brasil está sob efeito erosivo. Essa ocorre preferencialmente nas praias e, em menor escala, nas falésias sedimentares e nas proximidades de desembocaduras fluviais e estuarinas. Nessas, os relatos de ocorrências de erosão e progradação mais ou menos se equivalem, caracterizando sua elevada mobilidade morfológica, atestando o risco, já conhecido, de construir nestes ambientes. Sob o ponto de vista da vulnerabilidade a uma elevação do nível do mar e às modificações do regime de ventos e ondas associadas à mudança climática prevista, as áreas com evidências erosivas, mesmo as que não representam uma tendência de retrogradação, passarão a ter sua vulnerabilidade aumentada. Assim sendo, para ter uma idéia mais precisa da vulnerabilidade de acordo com a morfologia do litoral serão analisadas as características de distintos compartimentos geomorfológicos do litoral brasileiro.

3.2 COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS DE MARCANTE INDIVIDUALIDADE MORFODINÂMICA

Uma análise das publicações científicas permite claramente distinguir, pelo menos, nove ambientes geomorfológicos submetidos a processos erosivos:

- o litoral lamoso do Amapá;
- o litoral de dunas do Ceará;
- os cordões litorâneos e ilhas barreira de elevada mobilidade do litoral setentrional do Rio Grande do Norte;
- as falésias sedimentares ativas do Grupo Barreiras do Ceará e Rio Grande do Norte;
- a costa de arrecifes de Paraíba a Alagoas;

- as planícies de cristas de praia da Baía, Alagoas/Sergipe, Espírito Santo e Rio de Janeiro;
- os duplos cordões litorâneos do litoral do Rio de Janeiro;
- o litoral cristalino e das praias de enseada de São Paulo e Santa Catarina;
- as barreiras múltiplas do litoral do Rio Grande do Sul.

A caracterização dos sedimentos da plataforma continental interna em frente a esses compartimentos é importante indicador do potencial de fornecimento de material de empréstimo para obras de aterros e alimentação artificial de praias.

Para concluir essa categorização, não se pode deixar de mencionar os recifes de corais (LEÃO et al. 1994, 1996 e 1999; CASTRO, 1994; KIKUCHI et al., 2002), que se estendem no litoral Nordeste até o sul da Bahia, e os manguezais (HERZ, 1991), que ocupam uma área total de 1 milhão de hectares desde o Amapá até o litoral norte de Santa Catarina. Esses ecossistemas, embora protegidos por várias medidas legais, têm se mostrado muito vulneráveis a acidentes e a ações antrópicas (GONCHOROSKY et al., 1989; MAIA PORTO e TEIXEIRA, 2002, p.40-42). No contexto das mudanças climáticas, eles são vulneráveis a variações de nível do mar, temperatura, salinidade, acidez e turbidez das águas, o que constitui tema de investigação específica em face da cadeia complexa de processos físicos, químicos e geológicos. No caso dos manguezais brasileiros, cuja área representa metade da área ocupada na América do Sul, de acordo com recente estudo da FAO (2007), eles sofreram uma redução de aproximadamente 5% desde 1980 em sua cobertura. Sua expansão é condicionada pela presença humana no entorno, pelas características do substrato geológico, pela variação do nível médio relativo do mar e pelo balanço hídrico entre as contribuições continentais e marinhas.

3.3 O LITORAL LAMOSO DO AMAPÁ

Uma quantidade imensa de sedimentos finos, lamosos, é introduzida na plataforma continental pelo Rio Amazonas e transportada para Noroeste, pela Corrente das Guianas, ao longo do litoral do Amapá em direção às Guianas. A plataforma continental é muito larga e rasa. O fundo lamoso

atenua a altura das ondas e altera a propagação da onda de maré (GABIOUX, 2002). Apesar da abundância de sedimentos ocorre erosão (Figura 5) em longos trechos do litoral (DIAS et al., 1992; NITTROUER et al., 1996).

Figura 5. Erosão no litoral do Amapá – Cabo Norte



(Foto G.T.M. Dias)

A ocupação é praticamente ausente com exceção do litoral estuarino, na margem do canal do norte do Rio Amazonas em Macapá, Fazendinha e Porto Santana, onde o recuo da linha de costa ocorre tanto por causas naturais quanto por efeito de obras, no caso da zona urbana de Macapá (TORRES e EL-ROBRINI, 2006).

O clima é quente e as chuvas são abundantes. Os alísios de sudeste, que sopram paralelamente à linha de costa mudam de direção para nordeste durante os meses de janeiro a março, passando a incidir perpendicularmente à linha de costa. Ganham velocidade e, em vez de provocar erosão, trazem sedimentos finos da plataforma em direção à costa na forma de lama fluida (KINEKE e STERNBERG, 1995).

A amplitude da maré decresce de macro-maré ao sul do Cabo Norte para meso-maré em direção a norte. De acordo com Nittrouer et al. (1996), as fortes correntes de maré, mais freqüentemente direcionadas para o oceano aberto, parecem constituir o principal fator desencadeador da erosão costeira. Acumulação sedimentar ocorre nos cabos Orange e Cassiporé, na extremidade norte do litoral e no flanco nordeste do Cabo Branco até ao norte da Ilha de Maracá, enquanto a erosão predomina ao longo da maior parte da costa entre o limite sul do Parque Nacional do Cabo Orange e as proximidades de Almeriana, e a sul da Reserva Biológica do Lago Piratubo, a partir do Rio Araguari, no flanco leste do Cabo Branco. Taxas de recuo da linha de costa foram relatadas como sendo 0,5 m/ano a 1 m/ano no Cabo Cassiporé e de 5 m/ano a 10 m/ano na Ilha de Maracá (ALLISON 1993 *apud* TORRES e EL-ROBRINI, 2006).

Não obstante a atual tendência erosiva a evolução da costa durante o Holoceno foi, segundo Nittrouer et al. (1996), predominante progradacional, com alternâncias entre erosão e progradação em intervalos de 100 a 1000 anos.

3.4 O LITORAL DE DUNAS DO CEARÁ

A constância dos ventos alísios e a pronunciada estação seca (agosto a dezembro) durante a qual as velocidades do vento atingem os maiores valores (até 8 m/s), assim como uma abundante transferência de areias da plataforma continental para o continente favorecida por larga exposição do estirâncio da praia durante os ciclos de maré baixa, fornecem as condições para um amplo desenvolvimento de dunas ao longo dos 572 km de linha de costa. Taxas médias de migração das dunas são citadas por Maia et al. (1999) como sendo de 17,5 m/ano para dunas barcanas e 10 m/ano para lençóis de areia. O transporte eólico foi estimado como sendo da ordem de 300.000 m³/ano (VALENTINI e ROSMAN, 1993; VALENTINI, 1994). A obliquidade de incidência das ondas é responsável pelas elevadas taxas de transporte litorâneo unidirecional, da ordem de 10⁶ m³/ano, com forte resposta erosiva no caso de interrupção deste fluxo por algum obstáculo. Por exemplo, a construção em 1875 de um quebra-mar destacado em frente à cidade de Fortaleza, com cerca de 430 m de extensão paralelo à costa, com a finalidade de criar condições de abrigo às embarcações, provocou forte deposição de areia (KOMAR, 1976, p.330); posteriormente, construiu-

se um molhe na ponta de Mucuripe para a proteção do novo porto de Fortaleza, que interrompeu o transporte de sedimentos e desencadeou um processo erosivo ao longo de segmento costeiro a sotamar da obra, o que afetou severamente as praias da região urbana e mais além em direção à foz do rio Ceará; Valentini (1994) apresenta histórico detalhado sobre as obras, os impactos e o balanço sedimentar na orla da Região Metropolitana de Fortaleza. A praia de Iracema, a mais importante praia urbana, foi recuperada através de aterro mantido através de dois longos espigões (Figura 6). Uma outra obra, a do porto de Pecém, a noroeste de Fortaleza, também provocou impactos sobre a linha de costa, apesar da concepção do projeto (quebramar destacado) não interromper o transporte longitudinal de sedimentos.

Figura 6. Espigões na praia de Iracema – Fortaleza



Independentemente destes pontos localizados, a maior parte da costa parece estar sendo soterrada pelo imenso volume de areia. A ampla ocorrência de arenitos de praia defronte às praias constitui uma certa proteção contra a erosão. Não obstante, a presença de raízes de mangue no estirâncio da praia é um indicador de que, em muitos segmentos, a linha de costa está recuando. Isto é confirmado pelas observações realizadas por Moraes et al. (2006) que

mapearam 15 pontos de erosão distribuídos ao longo de toda a costa do Estado, envolvendo praias, mesmo com presença de arenitos, e falésias, contra apenas sete pontos com indicação de progradação.

3.5 OS CORDÕES LITORÂNEOS E ILHAS BARREIRA DE ELEVADA MOBILIDADE DO LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE

O setor setentrional do Rio Grande do Norte engloba 100 km de linha de costa orientada para o Norte com forte e constante transporte litorâneo direcionado para oeste. O clima é seco e o aporte de sedimentos continentais praticamente ausente. A compartimentação tectônica influencia a batimetria e, conseqüentemente, a propagação de ondas e os processos costeiros (VITAL et al., 2003).

Um aspecto marcante deste trecho do litoral é a expressiva mobilidade das ilhas barreira e esporões que se estendem a distâncias variáveis da linha de costa (Figura 7).

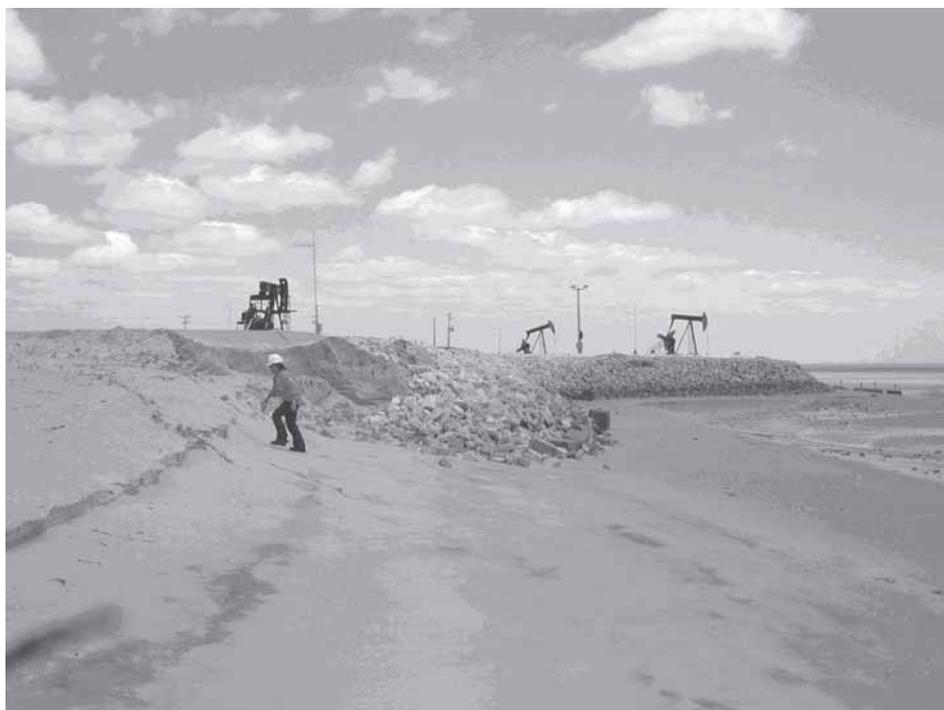
Figura 7. Ilha barreira defronte ao litoral do Rio Grande do Norte.



(Foto E.E.Toldo Jr).

Enquanto nas praias dos cordões litorâneos e ilhas barreira, expostas ao oceano aberto, o transporte litorâneo é direcionado para oeste, na linha de costa da planície costeira, protegida pelas barreiras arenosas, predomina a rápida retrogradação em grande parte decorrente da falta de sedimentos aprisionados nos corpos arenosos das ilhas barreira e pontais (VITAL et al., 2006). Bandeira (1993) descreve as mudanças morfológicas ao longo de um trecho de 27,5 km de costa em Guamaré, na restinga de Galinhos e na Ponta de Tubarão, no período 1982 a 1990. Segundo o autor, mudanças no padrão das correntes de maré seguiram-se à nova conformação das restingas, o que resultou em uma nova conformação da linha de costa no continente. O estudo desse trecho de costa torna-se muito importante em face da presença de estruturas de apoio à exploração de petróleo nos campos de Macau e Ubarana (Figura 8) e do risco de ruptura, por ressonância, dos dutos originalmente enterrados e que ficaram expostos à ação das correntes.

Figura 8. Ampla retrogradação do litoral colocando em risco os poços de petróleo (Ponta do Tubarão).



As causas da erosão são o resultado de uma conjugação de fatores como a falta de aporte sedimentar, transporte unidirecional de sedimentos, hidrodinâmica costeira, transferência de sedimentos para o campo de dunas e neo-tectonismo. Constitui um exemplo importante e emblemático, para outros trechos do litoral, do que poderiam ser as conseqüências de mudanças climáticas.

3.6 AS FALÉSIAS SEDIMENTARES ATIVAS DO GRUPO BARREIRAS DO CEARÁ E RIO GRANDE DO NORTE

Tanto no litoral sudeste do Ceará quanto na costa leste meridional do Rio Grande do Norte a predominância de campos de dunas é interrompida por falésias ativas do Grupo Barreiras. As mesmas não estão restritas a essas áreas pois ocorrem disseminadas em outros Estados e apresentam problemas semelhantes aos descritos abaixo. Morro Branco no Ceará e Pipa no Rio Grande do Norte são locais representativos e são um forte atrativo para turistas devido à beleza da paisagem.

No Rio Grande do Norte, as falésias se estendem ao longo do litoral sul, de Tibau do Sul até o limite com a Paraíba (Figura 9). Conforme Silva et

Figura 9. Falésia ativa. Segmento Tibau do Sul – Pipa



al. (2003) as falésias ativas estão limitadas à porção central deste trecho, onde as ondas atingem a base da falésia durante a preamar provocando seu colapso e gradual retrogradação. A construção freqüente de casas e piscinas nas proximidades imediatas do topo das falésias, com inevitáveis infiltrações, provoca um esforço adicional sobre a estabilidade da escarpa, aumentando o risco de escorregamento.

O gradual colapso das escarpas das falésias sedimentares não representa necessariamente o resultado de uma elevação relativa do nível do mar recente, mas sim um processo de adaptação ao nível do mar, que ainda não atingiu seu equilíbrio. Esse processo naturalmente se intensificará no caso de uma nova elevação do nível do mar ao mesmo tempo em que os sedimentos liberados pela erosão atuam no sentido de retardar a velocidade de recuo da linha de costa. A manutenção de uma faixa de não edificação, a partir do topo das falésias, é uma importante medida a ser adotada, conforme previsto no Projeto Orla do Ministério do Meio Ambiente.

3.7 A COSTA DOS ARRECIFES DE PARAÍBA A ALAGOAS

Afloramentos de arenitos de praia, em forma de alinhamentos paralelos à linha de costa, se tornam mais constantes a partir de João Pessoa (PB) até Coruripe (AL). Na zona submarina, esses arenitos servem de substrato para a instalação de colônias de corais, que crescem em forma de cogumelos denominados de chapeirões (DOMINGUEZ *et al.*, 1990).

A primeira impressão é a de que os arrecifes protegem a praia contra a elevação do nível do mar, mas na verdade eles funcionam como um obstáculo adicional ao equilíbrio do balanço sedimentar. Com a elevação do nível relativo do mar, as ondas transpõem os arrecifes durante uma parcela mais longa do ciclo de maré, modificam a circulação hidrodinâmica a sotamar e mobilizam os sedimentos da praia, que são levados para a região externa dos arrecifes pelas correntes e não conseguem mais retornar à praia. Em consequência, gera-se um déficit permanente de areia (BRAGARD e NEVES, 1995; NEVES e MUEHE, 1995).

A erosão intensa que afetou, em especial, o litoral de Olinda, parece estar originalmente ligado ao déficit de aporte sedimentar devido a dragagens no porto de Recife (NEVES *et al.*, 1991). Tal fato levou à construção de

uma série de espigões e, posteriormente, à construção de quebra-mares isolados sobrepostos aos arrecifes.

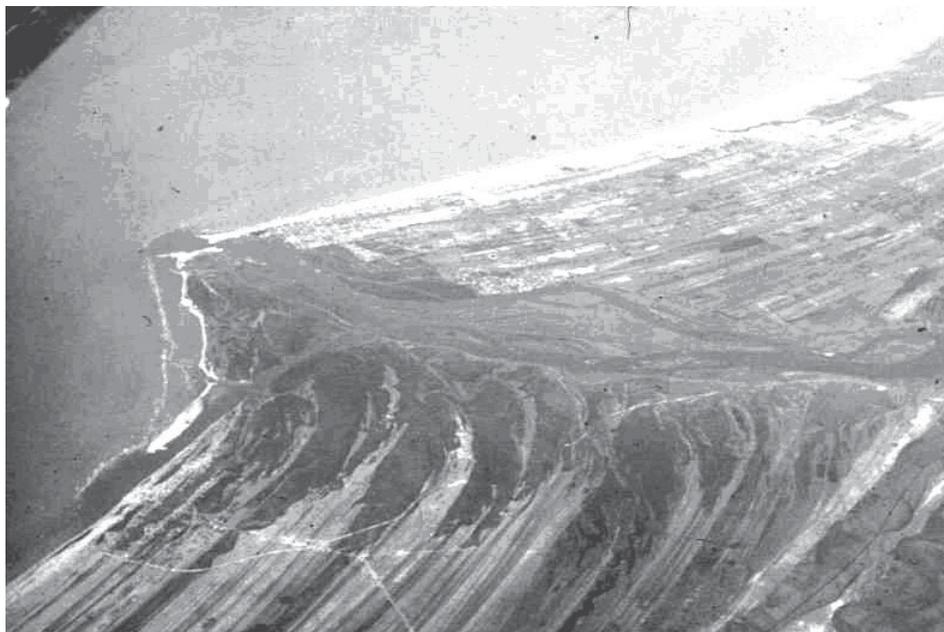
Ao sul da Paraíba, como reflexo da maior precipitação, começa a aumentar a ocorrência de estuários e manguezais associados, como o do Mamanguape, Paraíba, Goiana, Jaguaribe, Capibaribe, Beberibe, Suape e Manguaba. Coutinho (1994) chama a atenção para a completa ausência de deltas no litoral de Pernambuco, refletindo o reduzido aporte de sedimentos fluviais à praia, muitas vezes retidos em lagunas formadas na retaguarda dos arrecifes. Dessa forma, a principal fonte de sedimentos na formação das praias, cordões litorâneos e pontais, é a própria plataforma continental interna. Essa é estreita, com largura em torno de 50 km, e abarca a quase totalidade da plataforma continental. A diferença entre a isobatimétrica de 50 m e a quebra da plataforma continental (profundidade em torno de 200 m) é, freqüentemente, de apenas alguns quilômetros, sendo quase sempre inferior a 10 km. Em conseqüência, a dissipação de energia das ondas no fundo é menor quando comparada a outros trechos costeiros onde a plataforma continental é mais larga.

3.8 AS PLANÍCIES DE CRISTAS DE PRAIA DE ALAGOAS/SERGIPE, BAÍA, ESPÍRITO SANTO E RIO DE JANEIRO

Localizado numa faixa de latitude na qual a direção residual do transporte litorâneo é definida pela dominância entre ondas de nordeste, geradas pelos ventos alísios, e ondas e marulhos provenientes do sul, o alinhamento das cristas de praia que formam as planícies costeiras dos rios São Francisco (AL-SE), Jequitinhonha, (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ) refletem as alterações dessas alternâncias na direção de incidência das ondas (Figura 10), conforme descrito por Dominguez et al. (1993).

Dois mecanismos indutores da direção do transporte litorâneo foram reconhecidos: 1) o espigão hidráulico, que aumenta a progradação sedimentar a montante da desembocadura fluvial resultando numa configuração assimétrica da desembocadura fluvial e a migração da desembocadura na direção jusante durante fases de decréscimo da descarga fluvial; 2) a reversão da direção do transporte litorâneo de acordo com a direção predominante de incidência das ondas. (DOMINGUES et al. 2003).

Figura 10. Planície de cristas de praia do rio Paraíba do Sul. O truncamento de conjunto de cristas pode ser observado na margem direita indicando um deslocamento lateral da paleo-desembocadura. Atualmente a extremidade distal da margem direita se encontra sob erosão severa.



A reconstituição das reversões da direção do transporte litorâneo a partir da orientação e truncamento das cristas de praia, e o crescimento e truncamento da configuração em cúspide da desembocadura fluvial respectivamente associado a períodos de elevada e baixa descarga fluvial, foi apresentada por Dominguez et al. (2003) para a planície costeira do rio Jequitinhonha. Os autores descrevem que, nos últimos 300 anos, se desenvolveram três formas cuspidadas de expressão interrompidas por episódios de erosão severa, tendo o último ocorrido em 1906, seguido de ampla progradação. Essas mudanças foram explicadas tentativamente pelos autores como sendo decorrentes de uma diminuição no avanço das frentes frias com conseqüente redução das precipitações e redução na freqüência de penetração de ondas e marulhos do sul-sudeste.

O importante nesse exemplo é o reconhecimento das múltiplas interações entre clima, descarga fluvial, incidência das ondas e fonte de sedimentos, e a inerente instabilidade das desembocaduras fluviais

(por exemplo, COSTA, 1995). Atualmente as desembocaduras dos Rios São Francisco e Paraíba do Sul apresentam erosão severa nas suas margens Sul, com a completa destruição do vilarejo de Cabeço no primeiro caso e a erosão de uma faixa de 200 m de largura, completamente urbanizada em Atafona, no segundo caso (Figura 11).

Figura 11. Erosão em Atafona desembocadura do rio Paraíba do Sul – RJ



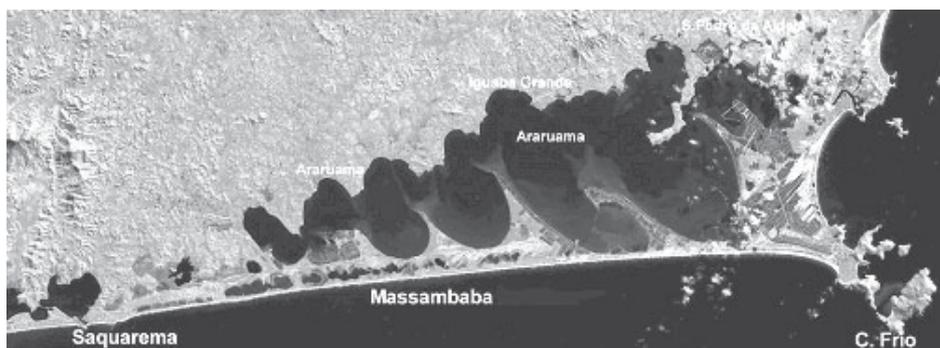
A vulnerabilidade destes sistemas está diretamente associada a um conjunto de variáveis climáticas e oceanográficas que controlam a vazão fluvial e o clima de ondas, o que se reflete na direção do transporte longitudinal, na retenção ou não de sedimentos nas desembocaduras fluviais por efeito de barramento hidráulico, na direção do alinhamento da linha de costa e conseqüentemente nos locais de ocorrência de erosão, estabilidade e progradação.

3.9 OS DUPLOS CORDÕES LITORÂNEOS DO LITORAL DO RIO DE JANEIRO

No Rio de Janeiro, a partir do cabo Frio, seguindo a brusca inflexão da linha de costa para oeste, até à ilha da Marambaia, defronte à baía de Sepetiba, a linha de costa apresenta longos e quase retilíneos segmentos de

praia ligados a cordões litorâneos, freqüentemente barrando lagunas à sua retaguarda (Figura 12). Essas por sua vez captam os sedimentos provenientes dos maciços costeiros próximos, bloqueando por completo a chegada de sedimentos continentais ao mar. O resultado são praias oceânicas com areias bem selecionadas e polidas de alta maturidade e que, por muito tempo, vêm sendo submetidas à ação das ondas, transitando continuamente entre os subsistemas praia, antepraia e plataforma continental interna. Elas formam um sistema fechado cuja ruptura, em caso de elevação do nível do mar ou aumento de intensidade ou freqüência de tempestades, se traduzirá diretamente em erosão costeira por déficit sedimentar. O transporte litorâneo de sedimentos é definido pela incidência das ondas que tendem a um transporte residual nulo devido à orientação leste-oeste da linha de costa e ao caráter bi-modal da direção de incidência das ondas (sudeste e sudoeste).

Figura 12. Segmento de linha de costa do Rio de Janeiro com duplos cordões litorâneos entre Arraial do Cabo e Niterói - RJ



A ocorrência localizada de dunas frontais desempenha um importante papel na estabilização do cordão litorâneo (MUEHE e FERNANDEZ, 1999). Na sua ausência a ocorrência de transposição do cordão pelas ondas de tempestade e as evidências erosivas de sua frente oceânica indicam o caráter transgressivo do mesmo, um processo que se intensificará como decorrência de uma elevação do nível do mar e de aumento de freqüência e intensidade de tempestades.

Mudanças na direção de incidência das ondas resultariam num alinhamento da praia em planta diferente do atual, de modo a ficar perpendicular ao clima de ondas que resultasse em transporte residual nulo.

Por conseguinte, uma extremidade da praia recuará (erosão) enquanto que a outra avançará em direção ao mar (progradação).

Uma tempestade excepcional ocorrida em maio de 2001 (MUEHE et al., 2001) resultou em destruição de casas nos municípios de Maricá e Saquarema, a leste de Niterói (BARROS et al., 2003). Todas as casas e quiosques afetados pela tempestade se localizavam muito próximas do perfil ativo da praia (Figura 13). No entanto, o que poderia ser considerado uma resposta a um evento excepcional isolado representa na realidade uma tendência de retrogradação conforme mostra o recuo gradual em cerca de 11 m do flanco oceânico de um campo de dunas frontais a oeste de Arraial do Cabo na praia da Massambaba, conforme resultado de monitoramento realizado durante os últimos oito anos.

Figura 13. Erosão no trecho urbanizado em Barra de Maricá (RJ) por ação da tempestade de maio de 2001



3.10 O LITORAL CRISTALINO E DAS PRAIAS DE ENSEADA DE SÃO PAULO E SANTA CATARINA

Praias de enseada (*pocket beaches*) são unidades fisiográficas em geral limitadas por pontões rochosos que restringem o transporte longitudinal de

sedimentos para fora desses limites. Em consequência, a linha de praia orienta-se perpendicularmente à direção de incidência das ondas. Face a potenciais mudanças no clima de ondas no Atlântico Sul, dois trechos do litoral brasileiro foram selecionados, onde estas feições são muito encontradas: em São Paulo, onde o alinhamento geral da costa é leste-oeste, e em Santa Catarina, onde o alinhamento é norte-sul.

O segmento de costa que se estende desde a Ilha de Marambaia (RJ) até São Vicente (SP), incluindo a Ilha Grande e a baía do mesmo nome, é caracterizado por um litoral de aspecto afogado, com inúmeras ilhas. As escarpas da Serra do Mar formam a linha de costa, que se apresenta com uma sucessão de pequenas enseadas e planícies costeiras de pequena expressão, o que não impede que a intervenção humana desencadeie processos erosivos (VALENTINI et al., 1995). Fúlfaro e Coimbra (1972), ao estudarem as praias do litoral paulista, identificaram duas áreas morfologicamente distintas. A área norte, desde a divisa do Estado do Rio de Janeiro até a ponta da Boracéia, é caracterizada por praias de enseada com comprimentos entre 2 a 4 km, separadas por pontões do embasamento cristalino. A maior extensão de praia contínua encontra-se na enseada de Caraguatatuba, com mais de 10 km de extensão, tendo a sua retaguarda a única planície costeira de expressão. Ao sul da ponta da Boracéia, as planícies costeiras se tornam mais contínuas, a linha de costa tende a ser mais retilínea, e ocorre uma gradual redução dos depósitos sedimentares costeiros (MARTIN et al., 1979; SUGUIO e MARTIN, 1978; MARTIN e SUGUIO, 1978).

A proximidade do relevo elevado favorece às precipitações orográficas, tornando o clima superúmido, provocando intenso escoamento superficial, aumento repentino das descargas fluviais, movimentos de massa e escorregamentos nas encostas íngremes com consequências ocasionalmente catastróficas.

A plataforma continental interna se alarga progressivamente em direção a sudoeste, distando a isobatimétrica de 50 m cerca de 15 km da ilha Grande e 44 km da ilha de Santo Amaro, enquanto que a de 20 m segue as reentrâncias do litoral. O material de fundo entre 20 e 50 m de profundidade é predominantemente arenoso, com lamas ocorrendo numa área limitada, na porção distal da plataforma continental interna, entre Ubatuba e a ilha de São Sebastião (KOWSMANN e COSTA, 1979). Os sedimentos da

plataforma continental entre Santos e Ilha Grande agrupam-se em dois centros de dispersão (COIMBRA et al., 1980): o principal, a sudeste da ilha Grande, caracteriza-se por sedimentos de granulometria grossa, elevado teor de carbonatos biodetríticos pouco fragmentados e baixo teor de lama; o segundo localiza-se a oeste da área de estudo, também apresentando sedimentos de granulação grossa, porém baixo teor de carbonatos. Nas proximidades do litoral aumenta a ocorrência de areias muito finas e de lamas, depositadas nos ambientes de baixa energia dos embaiamentos, como na região de Ubatuba (MAHIQUES, 1989) e parte da enseada de Caraguatatuba, com exceção da faixa defronte ao canal de São Sebastião, onde ocorrem areias grossas a muito grossas (SOUZA, 1992).

Da ponta do Vigia à extremidade sul da ilha de Santa Catarina, no Estado de Santa Catarina, o litoral também se apresenta recortado, com afloramentos de rochas cristalinas pré-cambrianas interrompendo a continuidade da planície costeira quaternária (GRÉ, 1994). Uma série de enseadas, pouco confinadas, se abrem para o oceano. Inicialmente para nordeste, como as enseadas de Camboriú e Porto Belo; para leste, como a baía das Tijucas, e para leste-sudeste, no litoral da ilha de Santa Catarina. O Itajaí-Açu forma o estuário de maior expressão neste trecho de litoral, frequentemente impactado por inundações, tendo o porto de Itajaí como importante escoadouro da produção do Estado.

A Ilha de Santa Catarina constitui feição alongada, com cerca de 52 km de comprimento e largura média em torno de 10 km, deslocado para leste, em relação ao alinhamento do litoral ao norte da ilha. Entre a ilha e o continente, formaram-se duas baías, a Norte e a Sul, conectadas por um estreito canal, passagem entre dois promontórios, sobre os quais está localizada a cidade de Florianópolis. Predominam rochas pré-cambrianas na constituição do arcabouço da ilha (CARUSO Jr. AWDZIEJ, 1993), enquanto que feições quaternárias, pleistocênicas e holocênicas, na forma de praias, cordões litorâneos e depósitos lagunares, formam uma estreita faixa no litoral norte e leste. No lado oceânico da ilha, destacam-se campos de dunas, ativos e inativos, a exposição de turfas na Praia do Moçambique, o que indica a migração do cordão litorâneo por cima de depósitos lagunares (MUEHE e CARUSO Jr., 1989) e a lagoa da Conceição, que se estende no sentido nortesul, ao longo de 13,5 km e se conecta ao mar por um estreito canal de maré, a norte da ponta da Galheta.

A plataforma continental interna se estreita ao norte da Ilha de Santa Catarina, distando a isóbatimétrica de 50 m não mais que 5 km da linha de costa. Deste ponto, volta a se alargar, em direção ao sul, chegando a 13 km, à medida que a linha de costa segue uma direção ligeiramente oblíqua à direção da isóbatimétrica de 50 m. Uma série de ilhas e alto-fundos, formados por rochas do embasamento, dão um aspecto movimentado à morfologia do fundo marinho. O recobrimento sedimentar da plataforma continental interna, a partir da isóbatimétrica de 40 m em direção a maiores profundidades passa a ser de lamas de origem fluvial e de plataforma (KOWSMANN e COSTA, 1979), voltando a areia a predominar de frente à metade leste da ilha de Santa Catarina para o sul.

Os dois trechos de litoral, por apresentarem enseadas e baías abrigadas, são adequados à implantação de aqüicultura (mariscos, vieiras, ostras). Mudanças nas propriedades físico-químicas das águas e da agitação marinha podem trazer impactos econômicos e morfológicos nas praias, tendo em vista a alta densidade de ocupação das estreitas planícies costeiras. Além disso, mudanças climáticas ou antrópicas que alterem a cobertura vegetal da Serra do Mar e dos maciços costeiros (SC) provocariam o aumento do aporte de sedimentos às enseadas, trazendo assoreamentos indesejados ou aumentando a turbidez das águas de duas regiões com alto atrativo turístico, alto valor para maricultura e muitas marinas.

3.11 AS BARREIRAS MÚLTIPLAS DO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL

Uma praia quase contínua, de direção nordeste-sudoeste, se estende entre Torres e Chuí, ao longo de cerca 640 km, formando a face oceânica da ampla planície costeira do Rio Grande do Sul. Três importantes interrupções na continuidade da linha de costa são as desembocaduras das lagunas de Mampituba e Tramandaí, ao Norte, e da Lagoa dos Patos, no Sul, estabilizadas por estruturas.

Quatro sucessões de cordões litorâneos ou barreiras ampliaram a planície costeira desde o Pleistoceno, cada barreira representando o limite de avanço de cada episódio de elevação do nível do mar (VILLWOCK, 1984; TOMAZELLI e VILLWOCK, 1996). A terceira barreira formou as lagunas dos Patos e Mirim durante o último episódio transgressivo do Pleistoceno, isto é antes do último período glacial, enquanto a quarta e mais

recente barreira se desenvolveu durante o período pós-glacial há cerca de 5.700 anos.

O clima é temperado úmido. Marulho proveniente de sudeste é responsável pelo transporte residual de sedimentos em direção a norte enquanto que ondas provenientes de leste e nordeste assim como ondas de tempestade episódicas de leste e sudeste desencadeiam os processos erosivos e progradação ao longo da costa (TOMAZELLI e VILLWOCK 1992, 1996). A amplitude média da maré astronômica é cerca de 0,5 m, mas as oscilações de maré meteorológica podem atingir 1,0 m.

A ocupação da linha de costa é baixa e se concentra essencialmente em pequenos vilarejos no litoral norte onde a distância para a metrópole é menor (ESTEVEES et al. 2003). Já ao longo da margem oeste da Lagoa dos Patos, há várias cidades e captações de água para irrigação; existe também a conexão hidroviária entre o Porto de Rio Grande e a Região Metropolitana de Porto Alegre.

O mapeamento sistemático da linha de costa, ao longo do estirâncio, por meio de DGPS, indicou forte mobilidade do perfil transversal da praia (ESTEVEES et al. 2002; TOLDO et al. 2006), sem que isto representasse uma tendência de erosão ou progradação conforme mostrado por Esteves (2004, 2006). Segmentos com erosão permanente foram localizados próximo ao farol de Albardão (cerca de 70 km a norte de Rio Grande) e no extremo sul entre o farol de Fronteira Aberta e Arroio Chuí, no limite com o Uruguai, estando associado a pontos de concentração da energia das ondas (CALLIARI et al. 1998; SPERANSKI e CALLIARI, 2000; SPERANSKI e CALLIARI, 2006). Tal mapeamento deveria ser feito também ao longo da orla da Lagoa dos Patos, tendo em vista a mobilidade de sua orla por ação de ondas geradas localmente por ventos.

3.12 VULNERABILIDADE DAS OBRAS COSTEIRAS

As regiões costeiras urbanas, especialmente nas capitais dos Estados, foram densamente ocupadas e transformadas, a tal ponto que é difícil reconhecer as feições originais. A cidade do Rio de Janeiro é um exemplo interessante quando considerada sob a ótica da engenharia costeira e das soluções de ocupação da orla. Muehe e Neves (2007) analisam detalhadamente a vulnerabilidade da cidade às mudanças climáticas, de

acordo com os prognósticos do IPCC, cujos resultados foram apresentados no seminário “Rio – Próximos 100 anos” realizado pelo Instituto Pereira Passos no Rio de Janeiro, em outubro de 2007, abordando aspectos multidisciplinares (geopolítica, população, usos do solo, zona costeira, manguezais, sistemas lagunares, meteorologia, encostas, hidrologia, saneamento, saúde).

Em várias cidades a construção de uma avenida litorânea serve ao propósito de conter a expansão urbana em direção ao mar e garantir o acesso público à praia. Essa não é a única opção de ocupação da orla, como é apresentado por Vallega (2001).

Como resultado da elevação de origem meteorológica e transitória do nível do mar, das ressacas ou da diminuição do aporte de sedimentos, ocorrem mudanças no perfil da praia, eventualmente afetando as estruturas e beneficiamentos urbanos costeiros. Entre as formas de proteção, existem as obras rígidas de fixação (muros ou enrocamento), que freqüentemente dificultam o acesso dos banhistas à praia (por exemplo, Boa Viagem e Candeias (PE), Marataízes (ES), Matinhos (PR)), a alimentação artificial da praia (por exemplo, Copacabana (RJ), Camburi (ES), Camboriú (SC)) e a construção de obras destacadas da costa (por exemplo, Olinda e Pau Amarelo (PE)) Em qualquer caso de proteção costeira, é preciso identificar: a ação dinâmica das ondas, sua sazonalidade, as variações do nível do mar, as características granulométricas da praia e áreas submersas adjacentes, a morfologia da plataforma continental interna adjacente (que determina o padrão de refração e difração das ondas), e as condições de projeto estrutural.

Outra classe de obras costeiras são as de abrigo portuário, como molhes e quebra-mares (por exemplo, Mucuripe e Pecém (CE), Recife (PE), Ilhéus (BA), Portocel, Tubarão e Ubu (ES), Imbituba (SC), entre outros) ou de proteção da costa (como os quebra-mares construídos sobre os arrecifes ao norte de Olinda). A vulnerabilidade dessas obras consiste na ocorrência de ondas com alturas e períodos que excedam as condições de projeto, ou que, por falta de manutenção, venham a ser gradualmente fragilizadas, a ponto de serem danificadas por condições de mar mais brandas do que as de projeto.

Uma terceira classe de obras costeiras são os guia-correntes, estruturas construídas para fixação das embocaduras lagunares e fluviais, ou de canais artificiais, como é o caso dos “molhes” de Rio Grande (RS), de Laguna

(SC), do Rio Itajaí-Açu (SC), do Rio Paraíba do Sul (RJ), da Barra do Furado (RJ), do porto de Luís Correia em um dos braços do delta do Parnaíba (PI), entre outros, de menor dimensão. Construídas em blocos de enrocamento ou artificiais, essas estruturas são igualmente vulneráveis à ação das ondas e à subsidência geológica ao longo dos anos (por exemplo, Rio Grande e Foz do Rio Paraíba do Sul). Seu funcionamento hidráulico é influenciado pela vazão fluvial e pelas correntes de maré: ambas condições podem sofrer variações como resultado das mudanças climáticas, seja por alteração no regime hidrológico, seja pela mudança de aporte de sedimentos em resultado de mudanças da cobertura vegetal da bacia hidrográfica, ou seja ainda pela mudança no prisma de maré (volume d'água que penetra o ambiente estuarino durante o ciclo de maré). Em alguns casos, como na barra do Furado, a construção dos guia-correntes interrompeu o transporte litorâneo de sedimentos de sul para norte, provocando severa erosão da praia a sotamar das estruturas, em direção ao Cabo de São Tomé. Nestes casos, tais estruturas possuem um efeito secundário de fragilizar a praia adjacente, tornando o local mais vulnerável às mudanças climáticas. A solução é a transposição, por meios artificiais, dos sedimentos que foram retidos, de modo a garantir a continuidade do transporte litorâneo, embora este tipo de obra nunca tenha sido realizada no Brasil até o momento.

A quarta classe de obras seriam as estruturas portuárias de acostagem, como cais, *piers*, *dolphins* etc., as pontes de acesso a terminais (por exemplo, Pecém (CE), Terminal Inácio Barbosa (SE), Terminal Salgema (AL)), os piers oceânicos com fins turísticos (Tramandaí (RS)), as ilhas artificiais (por exemplo, terminal de Areia Branca (RN)) e as plataformas fixas para exploração de petróleo. A cota de coroamento dessas estruturas é determinada em função da estimativa de maré, da sobrelevação de nível médio do mar e da ocorrência de ondas, o que determina também sua vulnerabilidade a mudanças climáticas marinhas. A ocorrência simultânea de maré meteorológica associada a ondas pode resultar no galgamento da estrutura pelas ondas e na produção de esforços adicionais que prejudiquem tanto a estabilidade estrutural quanto a sua funcionalidade.

Os emissários submarinos são outro tipo de obras cujo dimensionamento estrutural e funcional dependem das condições do nível do mar, da agitação marinha, das condições geotécnicas e da estratificação do oceano na região do lançamento dos efluentes. As ondas podem provocar esforços estruturais que levem à ruptura da tubulação por fadiga, como

ocorreu no emissário de Ipanema (RJ). Nesta categoria, devem ser incluídos também os oleodutos e gasodutos que atravessam (soterrados) as praias (por exemplo, Guamaré (RN), Cabiúnas e Barra do Furado (RJ)). Como resultado de mudanças do regime de ondas, a praia pode se acomodar a uma posição diferente e, em consequência, expor os dutos à ação das ondas na zona de arrebenção ou das correntes de maré, o que em geral não é considerado no projeto.

Muitas vezes, pela idade da obra, os dados ambientais (regime de ondas, nível do mar, dados geomorfológicos, correntes) que foram utilizados para projeto não são mais disponíveis. Isto torna a avaliação de vulnerabilidade das praias e estruturas costeiras um enigma. Mais sério, porém, é que aquelas informações ambientais não são tampouco monitoradas regularmente. Na hipótese de acontecer algum dano estrutural em consequência de uma ressaca, coloca-se em questão se as condições ocorridas foram excepcionais ou se houve degradação da estrutura. Esta é uma questão relevante para as seguradoras, o que se tornará inevitavelmente mais freqüente no Brasil face a um cenário de mudanças climáticas. Deixar de monitorar o ambiente marinho poderá representar, assim, um custo certamente maior que o próprio programa de monitoramento, considerado hoje demasiadamente caro pelo Estado ou pelos empreendedores. Nesta categoria, deve-se também considerar a necessidade de atualização da cartografia náutica (Exman, 2008), como condição para a realização de vários estudos de engenharia costeira, e a compatibilização cartográfica (datum vertical e horizontal) entre os mapas do IBGE e as cartas náuticas (DHN) com vista à construção de um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a zona costeira.

4. EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De forma generalizada ocorre erosão ao longo de todo o litoral, um fenômeno que se intensificará na ocorrência de uma elevação do nível do mar, de aumento de freqüência ou intensidade de tempestades e de mudanças no clima de ondas. Áreas mais significativamente comprometidas estão em geral restritas a segmentos bem definidos e muitas vezes resultam da intervenção humana no balanço de sedimentos após a construção de estruturas rígidas, que teriam como finalidade proteger a própria costa ou instalações portuárias. Tais construções geralmente desencadearam ou intensificaram o processo erosivo resultando na construção de novas

estruturas de retenção ou proteção como espigões e muros. Os exemplos mais críticos destas intervenções são encontrados na orla das Regiões Metropolitanas de Fortaleza – a oeste de Mucuripe – e de Recife – a norte de Olinda (Figuras 14 e 15).

Figura 14. Espigões em Olinda



Foto: C.F. Neves, novembro de 1995

Figura 15: Erosão de praia ao Norte de Olinda



Foto: C.F. Neves, novembro de 1995

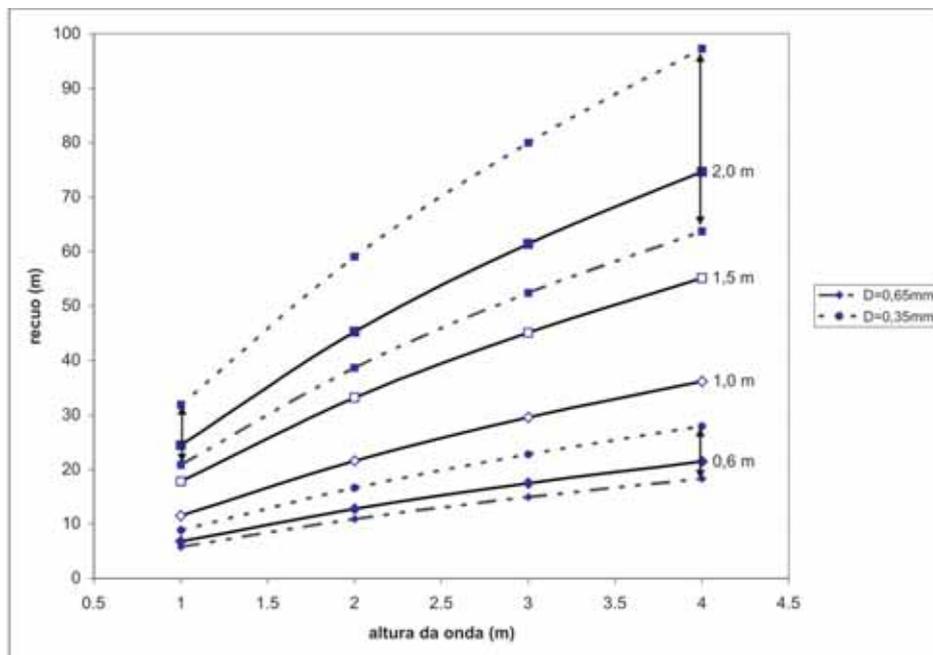
Outros exemplos de segmentos críticos localizam-se na vizinhança de desembocaduras fluviais (por exemplo, Rios São Francisco, Paraíba do Sul, Itapemirim, Jequitinhonha), em parte como resultado da própria morfodinâmica, mas também como resultado de modificações naturais ou induzidas pelo homem no regime de vazão fluvial e na variação do aporte de sedimentos (por exemplo, COSTA, 1995). Essa foi a explicação para os processos erosivos da costa da Califórnia nas décadas de 1950 e 1960, que começam a ser percebidos ao longo da costa brasileira a partir da década de 1990.

Problemas de “avanço do mar” em praias oceânicas sempre surgem, e tenderão a se intensificar, devido à localização de construções que freqüentemente interceptam o perfil de tempestade, dentro do que se convencionou chamar de “parte emersa do perfil dinâmico da praia”. De fato, para uma praia em equilíbrio, seu perfil varia entre condições de máximo recuo, decorrente de ressacas ou ondas de tempestade, e de máximo avanço, quando as ondas de bom tempo alimentam de areia o perfil da praia. O posicionamento de arruamentos e benfeitorias muitas vezes não considera as condições extremas do “perfil de tempestade”, e as construções são planejadas em posição demasiadamente avançada em direção ao mar, tomando como referência o “perfil de bom tempo”. O problema já foi devidamente reconhecido e normas foram elaboradas fixando a largura de uma faixa de não edificação. O gráfico da Figura 16 indica a ordem de magnitude do recuo da linha de costa para diferentes condições de nível do mar e de altura de onda. Entretanto, as normas nem sempre são respeitadas, além de ser difícil remover as construções já existentes. Em muitos países, com tradição mais longa em engenharia costeira, tais procedimentos normativos são severamente fiscalizados e respeitados, inclusive estabelecem-se prêmios diferenciados de seguro contra danos causados pelas inundações de furacões, em função da distância à linha de base.

A ausência de monitoramentos de longo termo da mobilidade da linha de costa, do clima de ondas e do nível do mar torna difícil a distinção entre eventos e tendências. Classificações contraditórias, entre risco elevado e moderado, para o mesmo segmento costeiro, são típicas de interpretações sem apoio em informações mais amplas e confiáveis.

Considerando que, no conjunto, a linha de costa não se apresenta submetida a riscos iminentes de grande amplitude, há, no entanto, aspectos

Figura 16. Estimativa do recuo da linha de praia para três tamanhos de grãos (diâmetro mediano 0,35, 0,50 e 0,65mm) e diferentes valores de elevação do nível do mar (0,6 a 2,0m) em função das alturas de onda. As linhas cheias correspondem a diâmetro mediano igual a 0,50mm



a serem levados em conta. Grandes áreas, especialmente na Região Nordeste, apresentam déficit sedimentar devido à transferência de sedimentos do estirâncio⁸ para o campo de dunas, por ação eólica. Cordões litorâneos ao longo das Regiões Sudeste e Sul recuaram durante as oscilações transgressivas do Holoceno e apresentam atualmente características transgressivas com transposição de ondas e erosão localizada. A declividade da antepraia e plataforma continental interna nas Regiões Norte e Nordeste é muito baixa resultando em amplos recuos da linha de costa no caso de uma elevação do nível do mar (MUEHE, 2001 e 2003). Neste cenário, a exposição de recifes de arenito de praia defronte a longos trechos do litoral do Nordeste paradoxalmente reduz a proteção que essas formações fornecem à praia: em decorrência do aumento da profundidade da água, aumenta a altura das ondas que atingem a face da praia, levando a um reajuste do perfil da praia.

⁸ Região da face da praia que fica exposta em maré baixa e submersa em maré alta, e é varrida intermitentemente pelas ondas.

As falésias sedimentares das Regiões Norte, Nordeste e parte do Sudeste representam uma certa proteção à erosão pois, apesar do aumento da taxa de retrogradação em adaptação a um nível do mar mais elevado, esta taxa continuará a ser muito lenta já que parte do déficit sedimentar é coberto pela incorporação dos sedimentos ao perfil da antepraia, liberados pelo processo erosivo. No entanto, os episódios de desmoronamento, quando ocorrem, se dão de mo abrupto.

Tendências recentes sobre variações do nível do mar para diferentes locais ao longo do litoral brasileiro não são conhecidas. Um registro de 42 anos de duração para o porto de Recife indicou, para o período de 1946 a 1988, uma elevação de 5,6 mm/ano (HARARI e CAMARGO, 1994 *in* NEVES e MUEHE, 1995). Para a estação maregráfica da Ilha Fiscal, a análise de um registro do período de 1965 a 1986 indicou forte elevação de 12,6 mm/ano (SILVA, 1992), embora análises subseqüentes de dados mais recentes feitas pelo mesmo autor mostraram uma tendência de declínio. Uma elevação do nível do mar, a partir do início da década de 1970, foi também relatada para o litoral de São Paulo (Cananéia) por Mesquita e Harari (1983 *in* MUEHE e NEVES, 1995). Essas medições, para serem utilizáveis em estudos prospectivos de impactos de mudanças climáticas, necessitam ser referenciadas geodesicamente.

Outra variável a ser considerada é a mudança dos ventos e suas conseqüências sobre o oceano. Registros de altura de ondas são raros e descontínuos. Somente em anos mais recentes vem sendo instalada uma rede de medição. Um aumento na intensidade das tempestades foi inferido por Neves Filho (1992) a partir da constatação de um aumento nos desvios entre a altura das marés previstas e valores medidos de nível do mar na Ilha Fiscal, interior da Baía de Guanabara, e Cananéia, São Paulo, no período de 1965 e 1986. Isto poderia explicar a erosão nos cordões litorâneos do litoral do Rio de Janeiro, mas seria desejável um estudo comparativo do avanço de frentes frias e de ciclones extra-tropicais no Atlântico Sul. Não se pode esquecer, porém, que tais sistemas meteorológicos produzem ondas e, dependendo de sua localização e movimentação sobre o oceano, resultam em diferentes padrões de ondulação a atingir a costa. Portanto, mudanças climáticas meteorológicas causam mudanças de clima de ondas, que por sua vez provocarão mudanças na forma e posição das praias. Este nível de detalhe ainda não foi possível inferir a partir dos modelos numéricos do IPCC, nem

a partir das escassas e intermitentes medições de ondas ao longo da costa brasileira.

Concluindo, apesar de algumas interpretações contraditórias para a atual mobilidade da linha de costa, assim como a dificuldade de identificar tendências confiáveis para o clima de ondas e elevação do nível do mar, uma fragilidade potencial da linha de costa pode ser identificada. Desse modo, a única maneira de reduzir futuros problemas devido à erosão costeira, é a firme implementação de programas de gerenciamento costeiro em todos os municípios litorâneos de forma a conduzir e controlar a urbanização, estabelecer zonas de não edificação juntamente com o monitoramento de segmentos costeiros assim como a expansão e manutenção de redes para medições contínuas e de longa duração de marés e ondas. Caberá aos Estados, implementar programas de monitoramento de ondas, de nível do mar e parâmetros meteoro-marinhos, e finalmente, em cooperação com a União, sistemas de controle geodésico da costa e dos recursos hídricos, com especial destaque para medições hidro-sedimentológicas nos estuários.

5. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO

As respostas aos impactos na zona costeira em consequência de mudanças climáticas, excluindo aqueles que seriam comuns às áreas continentais (agricultura, clima etc.) são discutidos neste Capítulo. Foram considerados os seguintes impactos:

- erosão e progradação costeira;
- danos a obras de proteção costeira;
- prejuízos estruturais ou operacionais a portos e terminais;
- danos a obras de urbanização de cidades litorâneas;
- danos estruturais ou prejuízos operacionais a obras de saneamento;
- exposição de dutos enterrados ou danos estruturais a dutos expostos;
- intrusão salina em estuários;
- intrusão salina em aquíferos;
- evolução dos manguezais;
- danos a recifes de coral.

Coloca-se o desafio de escolher entre possíveis respostas, seja no sentido de antecipar os danos e tomar medidas de proteção necessárias, seja no sentido de abandonar a estrutura e se acomodar a uma nova situação. Utiliza-se a nomenclatura do IPCC (1994) que classifica as respostas como “recuo”, “acomodação” e “proteção”.

5.1 EROSIÃO E PROGRADAÇÃO

Ao se considerar as mudanças climáticas e seus impactos sobre a zona costeira, deve-se ampliar bastante o horizonte dos fenômenos considerados, como foi visto na seção 2. As imagens de destruição causada pelo mar em decorrência da erosão são auto-explicativas da força do ambiente e dos problemas sociais e econômicos que o acompanham. Menos divulgados, porém, são os problemas de deposição indesejada de sedimentos em portos, marinas e praias, cujos impactos econômicos são invisíveis à população mas que trazem igualmente custos à sociedade na forma de obras de dragagem ou perdas de ecossistemas naturais.

No caso de erosão, a Tabela 2 apresenta algumas possíveis medidas de mitigação, resumindo os impactos esperados. Para todas elas, porém, é necessário conhecer o clima de ondas, as variações do nível do mar (maré astronômica e meteorológica) e as características granulométricas da praia a ser protegida.

No caso de progradação, é necessário avaliar os benefícios da ocupação da praia acrescida ou dos bancos de areia que se formam em baías, lagunas e estuários, bem como determinar se o fenômeno é transitório ou tendência permanente. Neste caso, o “recuo” significaria “nenhuma ação”, eventualmente comprometendo a sobrevivência de ecossistemas complexos (manguezais, brejos salinos, lagunas), com efeitos sobre a cadeia trófica. A ocupação de praias e o avanço da urbanização sobre as novas áreas conquistadas ao mar seria um exemplo de “adaptação”, mas correria o risco de, se fosse transitória a progradação, em outros cenários de nível relativo do mar ou de clima de ondas, o litoral retornasse a situações anteriores, destruindo a ocupação mais recente. Esses ciclos podem levar algumas décadas, enquanto que a ocupação ou urbanização produz-se em alguns (poucos) anos. Este é o caso dos pontais próximos a embocaduras fluviais. A resposta de “proteção” seria aquela que procuraria manter o sistema na situação presente, ou seja, seriam necessárias obras de dragagem. Neste caso,

onde seria despejado o material? Por si só isto já constitui um problema ambiental de importante magnitude.

Tabela 2. Respostas possíveis à erosão costeira

	Tipo	Custo	Impacto
Recuo	Abandono das casas e benfeitorias	nulo	• deterioração urbana
Acomodação	Reconstrução periódica das benfeitorias	baixo, permanente	• deterioração urbana
Proteção	Engordamento de praias	moderado	• benéfico ao aproveitamento turístico • benéfico para alguns organismos marinhos • identificação de área de empréstimo
	Fixação da costa com enrocamento	moderado	• impacto visual muito negativo • dificuldade de acesso para banhistas • acúmulo de lixo favorece crescimento de insetos e ratos
	Construção de muros de proteção	moderado a alto	• impacto visual controlável • facilidade de acesso para banhistas
	Construção de quebra-mares ou estruturas no mar	alto	• impacto paisagístico controlável • qualidade e circulação da água a ser monitorada

5.2 DANOS A OBRAS DE PROTEÇÃO COSTEIRA

As obras de proteção costeira podem se classificar em função de seu posicionamento relativo à linha de costa (aderentes ou destacadas, paralelas ou perpendiculares), ou em função de seu funcionamento estrutural (rígidas ou flexíveis), ou ainda em função do material utilizado. Os parâmetros de dimensionamento de uma obra de proteção são: a faixa de variação do nível do mar (maré astronômica e meteorológica); da altura, do período e do ângulo de incidência da onda na arrebentação; da granulometria dos sedimentos; e da batimetria local.

Tomando como exemplo os quebra-mares construídos sobre os arrecifes ao norte de Olinda, elas são obras destacadas da costa e a eficiência

da proteção consiste exatamente na capacidade de impedir que as ondas ultrapassem as estruturas. Já em Fortaleza, utilizaram-se estruturas perpendiculares à costa (espigões), entre as quais foi efetuado o preenchimento com areia.

Num cenário de mudanças climáticas, outros fatores devem ser considerados, tais como a variação transiente do nível médio do mar (maré meteorológica) e as propriedades das ondas. Considerando que a existência de uma obra de proteção costeira pressupõe alguma utilização da orla, a resposta adequada seria a reconstrução (ou “proteção”), adaptando-a às novas condições oceanográficas e meteorológicas. Eventualmente, deveria ser efetuado estudo econômico para substituir a forma de proteção ou mesmo a remoção de obras que perderam sua funcionalidade. Por exemplo, em Miami Beach (EUA), o U.S. Army Corps of Engineers optou por um engordamento artificial, desta forma “soterrando” as estruturas rígidas (muros, espigões) existentes inicialmente para proteção das propriedades privadas (hotéis e residências). A nova praia que foi criada passou então a ser de uso público, enquanto que a praia original era de uso privativo dos proprietários do terreno fronteiro ao mar.

Um tipo importante de obras costeiras são os guia-correntes, estruturas construídas para fixação das embocaduras, lagunares e fluviais, ou de canais artificiais. Como em todas as demais obras costeiras, recomenda-se a “proteção” da obra, no sentido de manter o funcionamento hidráulico, sem deixar de monitorar o impacto nas praias adjacentes. Obras futuras, porém, necessitam ser cuidadosamente projetadas, levando em conta os regimes hídricos, de agitação marítima e de transporte de sedimentos, tanto presentes, quanto esperados em cenários de mudanças climáticas.

Em alguns casos, como na Barra do Furado (RJ), a construção dos guia-correntes interrompeu o transporte litorâneo de sedimentos de sul para norte, provocando severa erosão da praia a sotamar das estruturas, em direção ao Cabo de São Tomé, numa extensão de 10 km (Figura 17). Nesses casos, tais estruturas possuem um efeito secundário de fragilizar a praia adjacente, tornando o local mais vulnerável às mudanças climáticas. A solução é a transposição, por meios artificiais, dos sedimentos que foram retidos, de modo a garantir a continuidade do transporte litorâneo, embora este tipo de obra nunca tenha sido realizada no Brasil até o momento.

Figura 17. Barra do Furado



Fotos cedidas por Dieter Muehe e Enise Valentini

5.3 PREJUÍZOS ESTRUTURAIS OU OPERACIONAIS A PORTOS E TERMINAIS

As obras de abrigo portuário, por definição, têm por objetivo criar artificialmente uma região protegida das ondas de modo a garantir segurança às operações portuárias e às manobras dos navios. Elas podem ser enraizadas na linha de costa (molhes) ou destacadas da costa (quebra-mares); seguem-se exemplos de portos brasileiros localizados em mar aberto: Luís Correa (PI), Mucuripe e Pecém (CE), Recife e Suape (PE), Terminal Inácio Barbosa (SE), Ilhéus e Cumuruxatiba (BA), Portocel, Praia Mole, Tubarão e Ubu (ES), Barra do Açu (em construção), Imbetiba e Forno (RJ), Imbituba (SC). Nesse caso, pelos investimentos já realizados, a opção é a de “proteção” e duas ações se fazem possíveis: reforçar as estruturas com blocos maiores (enrocamento ou artificiais), elevar a cota de coroamento para evitar galgamento pelas ondas ou alterar a concepção do projeto utilizando, por exemplo, o modelo “quebra-mar de berma”, com blocos de menores dimensões e que se ajustam ao clima de ondas. Em alguns casos pode ser admissível o galgamento (ou seja, a transposição das ondas sobre a estrutura), sem prejuízo da operação portuária.

As estruturas portuárias de acostagem, como cais, piers, dolphins etc., também são afetadas pelo nível do mar, uma vez que, no interior do recinto portuário, espera-se que não exista onda. No Brasil, o porto de Suape é o único exemplo de porto que considerou, em seu projeto de expansão do cais e pátios no início da década de 1990, uma sobrelevação de 25 cm do nível relativo médio do mar. A adaptação das estruturas portuárias de acostagem para novas condições de nível do mar poderá ser obra de grande custo e a “acomodação” consistirá na redução das horas de operação de acordo com

as condições oceanográficas, o que representa custos. No caso das plataformas turísticas ou piers, a experiência tem mostrado que eles são abandonados, progressivamente destruídos pelo mar, trazendo riscos aos banhistas. No caso das ilhas artificiais e das plataformas fixas de petróleo, outros fatores econômicos entram em jogo, inclusive a vida útil das obras e a necessidade de “descomissionamento” (ou desmontagem) no caso de encerramento de atividades, de acordo com a legislação ambiental.

Mudanças meteorológicas (ocorrência de tornados, ou ventos mais fortes, mudanças na climatologia de ventos) teriam efeitos sobre as estruturas de manuseio de cargas e sobre as pilhas de acostagem. Neste caso, eventuais reforços estruturais ou mudanças de arranjo portuário não seriam obras vultosas; forças de vento sobre os navios atracados deveriam ser reavaliadas. O problema mais sério seria o posicionamento em planta do canal de acesso e da bacia de evolução, que depende da direção de incidência das ondas e dos ventos.

Quanto a variações do nível médio do mar e do grau de agitação marítima, merece investigação mais aprofundada a ação físico-química da água do mar sobre as estruturas de concreto, especialmente na região exposta intermitentemente à água do mar, respingos e ar. Entre as variáveis a serem incluídas no monitoramento, as propriedades químicas da água do mar, especialmente a presença de sulfatos, e a resposta do concreto a longo prazo são exemplos a se considerar como efeitos das mudanças climáticas.

5.4 DANOS A OBRAS DE URBANIZAÇÃO DE CIDADES LITORÂNEAS

As regiões costeiras urbanas, especialmente nas capitais dos Estados, foram densamente ocupadas e transformadas, a tal ponto que é difícil reconhecer as feições originais. A cidade do Rio de Janeiro é um exemplo interessante: praticamente toda a orla da baía de Guanabara foi aterrada; a praia de Copacabana é o maior engordamento artificial de praia já realizado no Brasil; as praias de Ipanema e Leblon também receberam alimentação artificial de areia além de terem sido urbanizadas na década de 1950 (com a construção de um muro e aterro para pistas de rolamento); ao longo dos 20 km de extensão da praia da Barra da Tijuca foi construída uma avenida litorânea sobre o cordão de dunas, que poderá ser ameaçada em episódios de ressaca e de elevação transiente do nível do mar, como já ocorre com a urbanização da praia da Macumba e no Pontal de Sernambetiba; ao longo da

orla da baía de Sepetiba as praias possuem muros, altamente refletivos para as pequenas ondas incidentes, com risco de solapamento e colapso; ainda na baixada de Sepetiba, localizam-se as áreas mais extensas com risco de inundação em caso de elevação do nível do mar, embora haja outras áreas na baixada de Jacarepaguá e próximo aos rios Pavuna e Meriti em igual nível de risco (MUEHE e NEVES, 2007).

A idéia prevalente de urbanização da orla em várias cidades costeiras no Brasil é a construção de uma avenida litorânea e de um parque (fins de lazer e contemplativos), que têm o propósito indiscutível de conter a expansão urbana em direção ao mar e garantir o acesso público à praia. Este estilo de ocupação da orla é vista por exemplo, em Balneário Camboriú, Santos, Rio de Janeiro, Vitória e Recife.

Como resultado da elevação de origem meteorológica e transitória do nível do mar, das ressacas ou da diminuição do aporte de sedimentos, ocorrem mudanças no perfil da praia, eventualmente afetando as estruturas e beneficiamentos urbanos costeiros. As prefeituras têm optado, na maioria das vezes, pela construção de obras rígidas de fixação (muros ou enrocamento), que freqüentemente dificultam o acesso dos banhistas à praia e diminui o valor paisagístico da região (por exemplo, Boa Viagem e Candeias (PE), Marataízes (ES), Matinhos (PR)). A alimentação artificial da praia (por exemplo, Copacabana (RJ), Camburi (ES), Camboriú (SC)) é uma solução mais atraente, tanto urbanisticamente quanto tecnicamente em termos de engenharia costeira, mas tem sido relativamente pouco usada.

Em qualquer caso de proteção costeira, é preciso identificar: a ação dinâmica das ondas, sua sazonalidade, as variações do nível do mar, as características granulométricas da praia e áreas submersas adjacentes, a morfologia da plataforma continental interna adjacente (que determina o padrão de refração e difração das ondas), e as condições de projeto estrutural.

5.5 DANOS ESTRUTURAIS OU PREJUÍZOS OPERACIONAIS A OBRAS DE SANEAMENTO

Os emissários submarinos são dimensionados para levar, por gravidade, os esgotos domésticos para uma distância suficientemente afastada da costa. Caso eles não sejam enterrados, podem ficar sujeitos a esforços induzidos por ondas e correntes, à semelhança dos dutos para exploração de petróleo (item 5.6). Neste caso a resposta é o monitoramento estrutural permanente.

Outro aspecto, mais difícil de ser tratado, diz respeito às cotas do sistema de bombeamento ou de lançamento. No caso de elevação do nível do mar (maré meteorológica) pode ocorrer o afogamento do sistema, prejudicando o lançamento. A questão das propriedades físicas (temperatura, estratificação) da água do mar no ponto de lançamento, ou ainda das condições de insolação, constitui um problema que merece ser cuidado com muita atenção. Futuros emissários devem considerar a construção de estações de tratamento prévio antes do lançamento, considerando os elevados custos da extensão de um emissário em funcionamento.

5.6 EXPOSIÇÃO DE DUTOS ENTERRADOS OU DANOS ESTRUTURAIS A DUTOS EXPOSTOS

A exploração de petróleo e gás na plataforma continental exigiu a construção de dutos ligando os campos ao largo a instalações em terra. Em áreas mais profundas ou em baías, em geral essas estruturas repousam no fundo do mar e são expostas a correntes fracas. Problemas ocorrem se as correntes, induzidas por marés ou por ondas, tornam-se mais fortes, produzem vibrações ou transportam sedimentos que se acumulam junto à tubulação produzindo esforços adicionais. O segmento mais crítico, porém, é a travessia da zona de arrebenção no caso de dutos construídos em praias oceânicas expostas. Variações do perfil de praia em eventos de tempestade podem expor a tubulação à ação direta das ondas, deixá-la sem apoio estrutural ou colocá-la em vibração, eventualmente próximo de ressonância. Condições próximas de acidentes ocorreram em praias (por exemplo, Guamaré (RN), Cabiúnas e Barra do Furado (RJ)) e acidentes por fadiga chegaram a ocorrer na baía de Guanabara, em condições abrigadas de ondas mas sujeita a correntes de maré. O monitoramento permanente é a resposta recomendada no caso de mudanças climáticas, embora a previsão de cenários acoplada a modelos de comportamento estrutural seja possível. No cenário até 2100, deve-se porém considerar a outra possibilidade de esgotamento da vida útil da tubulação ou dos campos de petróleo, e neste caso a legislação ambiental prevê a retirada da estrutura. Portanto, uma outra resposta admissível seja a construção de uma nova tubulação e a retirada da antiga.

5.7 INTRUSÃO SALINA EM ESTUÁRIOS

O controle da intrusão salina ou da inundação de áreas costeiras é feito através de barragens e comportas, que são acionadas em resposta à

previsão de elevação do nível médio do mar (por exemplo, rio Tâmis, na Inglaterra, e Projeto Delta, na Holanda). São obras de grande vulto, cuja justificativa se fundamenta no valor do patrimônio a ser preservado. De fato, no mar do norte, os eventos de maré meteorológica podem provocar sobrelevação de 3 m no nível relativo médio do mar. No Brasil ainda não foram registrados eventos de tal magnitude.

Um levantamento detalhado dos aproveitamentos dos recursos hídricos em todos os ambientes estuarinos deveria ser iniciado, a partir dos rios federais, caracterizando-se as vazões fluviais (a montante), o nível do mar (a jusante) e o mapeamento das áreas inundáveis (prisma de maré). No caso das tomadas d'água para abastecimento e irrigação, poderiam ser construídas barragens localizadas (“proteção”) ou poderiam ser estabelecidos procedimentos de operação das bombas em função da vazão fluvial, do nível médio do mar e da propagação da maré (“acomodação”). No caso dos viveiros de carcinicultura e outras formas de aquíicultura, possivelmente as únicas respostas cabíveis seriam a adaptação da cota de coroamento dos diques e os cuidados ambientais nos momentos de despesca (“acomodação”).

5.8 INTRUSÃO SALINA EM AQUÍFEROS

Uma vez que ocorra a intrusão salina nos poços de captação, não existe outra medida a não ser o abandono do poço (“recuo”). O estabelecimento de procedimentos e quotas de captação de água insere-se no contexto mais amplo do gerenciamento integrado dos recursos hídricos e zona costeira.

5.9 EVOLUÇÃO DOS MANGUEZAIS

Enquanto que, no mundo, a área de manguezais foi reduzida em aproximadamente 20% no período entre 1980 e 2005, a mesma tendência não se observou no Brasil, onde a redução foi de apenas 5%. A pressão da urbanização, utilização da área para fazendas de aquíicultura, mudanças no aporte de água doce e de sedimentos continentais, variações no prisma de maré, mudanças de temperatura são os principais agentes impactantes sobre os manguezais (FAO, 2007). Cenários futuros de aquecimento levariam a supor que os manguezais pudessem povoar outras áreas, hoje cobertas por vegetação de brejo salino (como as lagunas em Santa Catarina e Rio Grande do Sul). A elevação do nível do mar, em princípio, favoreceria a expansão

dos manguezais para áreas mais altas, o que freqüentemente é impedido pela presença de ocupação humana. Assim, respostas de “proteção” possivelmente implicariam em remanejamento populacional, o que representa um custo social muitíssimo elevado, especialmente para populações que retiram subsistência daquele ambiente. A redução de áreas de manguezais também traria impacto sobre as aves, inclusive as migratórias, assim como para a ictiofauna local. Possivelmente a opção de “recuo” seria a de ação nula e abandonar o manguezal à sua própria sorte; a opção de “acomodação” seria a conjugação entre aqüicultura e reflorestamento em outras áreas; finalmente, a opção de “proteção” seria a de permitir a expansão ou a manutenção da área florestada, garantindo o equilíbrio halino, hídrico, térmico e sedimentológico do ambiente estuarino.

5.10 DANOS A RECIFES DE CORAIS

A criação de parques marinhos é uma estratégia para preservação e conservação dos recifes de corais, embora há que se controlar o acesso de barcos a esses ecossistemas. O aumento da vigilância sobre a Zona Econômica Exclusiva e Mar Territorial poderá impedir a presença de navios e lançamentos de poluentes. No entanto, o conhecimento científico sobre os recifes encontra-se no estágio “observacional”, de estabelecer relações de causa e efeito aos agentes naturais externos, sobre os quais o homem tem pouco controle. A resposta no momento é o “recuo”, limitando-se a acompanhar a evolução dos recifes.

5.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Tabela 3 resume o tipo de ações de mitigação para os diversos impactos considerados nesta seção. Os sinais (?) na tabela indicam situações para as quais as ações de mitigação são incertas ou de eficácia questionável.

Tabela 3. Opções de mitigação

	Recuo	Acomodação	Proteção
erosão e progradação costeira	☒	☒	☒
obras de proteção costeira	☒		☒
estrutura ou operação de portos			☒
urbanização de cidades		☒	☒
obras de saneamento		☒	☒
duto de petróleo ou outros fins			☒
intrusão salina em estuários	?	☒	☒
intrusão salina em aquíferos	☒		
manguezais	☒	☒	?
recifes de coral	☒	?	?

6. POSSÍVEL PLANO DE AÇÃO

Muitas vezes, pela idade da obra, os dados ambientais (regime de ondas, nível do mar, correntes, dados geomorfológicos) que foram utilizados para projeto não são mais disponíveis. Aliado à falta de monitoramento regular das condições marinhas (ondas, nível do mar, ventos), a avaliação de vulnerabilidade das praias e estruturas costeiras torna-se um enigma. Na hipótese de acontecer algum dano estrutural em consequência de uma ressaca, coloca-se em questão se as condições ocorridas foram excepcionais ou se houve degradação da estrutura. Essa é uma situação que se tornará inevitavelmente mais freqüente no Brasil face a um cenário de mudanças climáticas e uma questão relevante para as seguradoras. Deixar de monitorar o ambiente marinho poderá representar, assim, um custo certamente maior que o próprio programa de monitoramento, considerado hoje demasiadamente caro pelo Estado ou pelos empreendedores. Nesta categoria, deve-se também considerar a necessidade de atualização da cartografia náutica (EXMAN, 2008), como condição para a realização de vários estudos de engenharia costeira, e a compatibilização cartográfica (datum vertical e horizontal) entre os mapas terrestres (IBGE) e as cartas náuticas (DHN). Essa é a condição necessária em vistas a implantar um Modelo Digital de Terreno (MDT) para a zona costeira, ferramenta que se tornará indispensável em futuro próximo.

A Agência Federal Americana para Gestão de Emergências (Fema, 2006) estabeleceu um protocolo de ações, visando dar subsídios às empresas seguradoras quanto à ocorrência de danos ambientais costeiros. As recomendações são as seguintes:

1. monitoramento do nível médio do mar por um período mínimo de 20 anos e aprimoramento dos métodos estatísticos de previsão de extremos e estabelecimento de tendências;
2. avaliação do comportamento, estrutural e funcional, das obras costeiras, de modo a garantir proteção contra 99% das inundações anuais (nível de risco igual a 1%) e estabelecimento de normas para remoção das estruturas destruídas por eventos naturais;
3. desenvolvimento de métodos computacionais, experimentais em laboratório e observacionais para caracterizar a transformação das ondas de tempestade desde o oceano até a costa;
4. caracterização da forma das praias (perfil e em planta) antes e depois das tempestades (combinação de ondas severas e maré meteorológica) a partir de monitoramento topográfico e batimétrico permanente;
5. estabelecimento de modelos para cálculo de espraiamento das ondas (*run up*) baseado nas características das ondas e nível do mar com nível de risco de excedência igual a 2% (anteriormente calculava-se com valores medianos, ou seja, excedência igual a 50%);
6. determinação da influência das ondas na formação do nível médio do mar (*wave set up*), especialmente quando associado a maré meteorológica;
7. aprimoramento dos métodos, numéricos e experimentais, para cálculo do galgamento das estruturas (*wave overtopping*) pelas ondas;
8. aperfeiçoamento dos métodos de previsão de ondas a partir de modelos de circulação atmosférica;
9. mapeamento das zonas de risco de erosão, assoreamento, inundação costeira e ação das ondas e das correntes;
10. mapeamento da evolução das dunas frontais, como formas naturais de conter a ação do mar.

Este conjunto de ações está muito distante de ser factível no Brasil e deve servir de alerta aos diversos órgãos governamentais no âmbito da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM).

Para o planejamento de qualquer ação futura, em primeiro lugar é imperativo que se estabeleça um programa de monitoramento ambiental de longo prazo, envolvendo parâmetros meteorológicos, oceanográficos, geodésicos e geomorfológicos. Tal programa pode ser conduzido de modo eficiente através de redes regionais, que envolvam tanto universidades quanto as empresas e os segmentos da sociedade que são beneficiados diretamente pelas medições. Estabelece-se assim uma cadeia de agentes e eventos: o usuário da informação participa diretamente da coleta, novas metodologias são investigadas, a inovação tecnológica é incentivada e a formação continuada de pessoas está assegurada.

Em segundo lugar deve-se reconhecer o papel dos municípios na ordenação do seu espaço territorial. Talvez visando apenas o recolhimento de taxas municipais ou o embelezamento da orla do município, é permitida a ocupação de áreas frágeis, ou morfologicamente instáveis, sem critérios básicos de engenharia costeira; enquanto estas obras são pagas com recursos municipais, as obras de proteção e de recuperação, mais vultosas, são pagas com recursos estaduais ou federais (por exemplo, obras de “engordamento” de praias em várias cidades litorâneas de porte médio ou grande). As ações do Programa de Gerenciamento Costeiro, em nível federal, dirigem-se necessariamente ao nível estadual, o que muitas vezes mostrou-se incapaz de atingir o nível municipal, como pode ser atestado por vários casos de erosão costeira, de destruição de ecossistemas e de ocupação desordenada da orla.

Isto remete a um terceiro nível de ações, onde o Estado deve incentivar não apenas a preservação ambiental através da criação de reservas ou parques, mas principalmente através da educação no seu sentido mais amplo, em vários níveis, inclusive a educação continuada de técnicos de nível superior. Manter um registro de atividades econômicas na zona costeira não é difícil; a novidade seria ter um registro das condições de projeto ou de operação dessas atividades (por exemplo, Banco de Documentos e de Dados e Informações Costeiras), de modo que, através do monitoramento ambiental permanente, se pudesse planejar antecipadamente as medidas necessárias para preservar, deslocar ou proteger as atividades em pauta.

Em âmbito federal há várias questões legais a serem resolvidas, as mais urgentes sendo a superposição de jurisdições e a incapacidade de colocar em prática as leis vigentes. Um exemplo característico é a legislação que estabelece os terrenos de marinha, cadastrados no Serviço de Patrimônio da União. Estes terrenos não estão demarcados em toda a faixa costeira e são definidos a partir da linha de preamar de 1831. Ora, como estabelecer a posição desta “linha” se, ainda hoje, cerca de 40% da costa brasileira é parcamente povoada? Este é o exemplo de uma legislação que carece de meios de ser implementada e, por falta de atualização, deixa-se de promover o benefício maior que é o de garantir o acesso público e o domínio da União sobre uma faixa de território a ser protegida.

Ações de coordenação entre as diversas esferas seriam desejáveis. Isto exigiria maior descentralização das ações municipais (por exemplo, através de agências ou secretarias de meio ambiente ou de gerenciamento costeiro), maior capacitação técnica nos órgãos ambientais para lidar com assuntos costeiros, um protocolo de comunicação mais ágil entre os atores interessados em aproveitamentos ou na preservação em regiões costeiras e continuidade de ações ao longo do tempo. Estabelecimento de verbas, orçamentárias ou oriundas de Fundos Setoriais, para programas de monitoramento ambiental, para construção e manutenção de bancos de dados e para educação em diversos níveis. Deveria ser analisada a experiência de programas educacionais de outros países com extensão territorial e de interesses marinhos semelhantes ao Brasil.

A comunicação entre programas de gestão de recursos hídricos (comitês de bacias hidrográficas) e os de gerenciamento costeiro, o que se entende como Gerenciamento Costeiro Integrado, deve ser estimulada. A participação dos municípios estuarinos nos comitês de bacias em geral é minoritária e, muitas vezes, desproporcional à importância que a região costeira representa para a bacia como um todo. Não se pode esquecer, também, que o estuário é um ambiente integrador de todas as ações que são tomadas na bacia hidrográfica e, portanto, um ambiente mais vulnerável.

Em quinto lugar coloca-se uma questão ética, técnica e financeira. Seria lícito investir verbas públicas, federais ou estaduais, em regiões que reconhecidamente sofrem processo progressivo de erosão? Isto evidentemente depende daquilo que se deseja preservar. Porém, em áreas ainda desabitadas, deveria ser desencorajada a ocupação territorial ou, pelo

menos, ordenada a partir de estabelecimentos de faixas de proteção costeira. Qualquer obra ou intervenção deveria ser projetada por corpo técnico formado especificamente em engenharia costeira, os estudos de impactos ambientais deveriam necessariamente incluir a vulnerabilidade da obra a mudanças climáticas de acordo com cenários estabelecidos regionalmente (por exemplo, pelos Planos Nacionais de Gerenciamento Costeiro) e o financiamento da obra poderia ser condicionado à satisfação dessas exigências.

Finalmente, chega-se à questão das ações mitigadoras: isto dependerá de cada caso. Recuar, acomodar a uma nova situação ou proteger o patrimônio dependerá dos recursos financeiros disponíveis pela sociedade, da organização dos diversos agentes e dos valores (não apenas financeiros) envolvidos. O que se tem verificado atualmente nas grandes capitais é a solução de proteger a linha de costa, embora, no passado, no caso de Fortaleza e Olinda, preferiu-se abandonar as casas. Nas pequenas comunidades costeiras, dependendo da severidade da ação erosiva do mar, pouco resta a fazer a não ser abandonar as propriedades (por exemplo, Pontal de Atafona, Macaé, Conceição da Barra). Em ambientes estuarinos, a questão da intrusão salina pode ser remediada através da construção de diques e comportas (obras vultosas) ou através da acomodação, substituindo-se a agricultura por formas de aqüicultura.

A situação é bastante complexa e, lamentavelmente, ainda é tênue a “mentalidade marítima” por parte dos órgãos fomentadores de pesquisa, das instituições responsáveis pela formação de recursos humanos e dos condutores de políticas públicas, quando se trata da valorização do mar para o progresso do país (por exemplo, VIDIGAL, 2006). Neste cenário, o desconhecimento sobre o nosso litoral amplifica os problemas eventuais advindos de mudanças climáticas na zona costeira e torna o país vulnerável a agentes externos, sejam eles naturais ou econômicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se falar de impactos das mudanças climáticas nas zonas costeiras, é imprescindível que seja considerada uma cadeia de agentes naturais bem mais ampla do que apenas a elevação termo-eustática do nível do mar. Diferentes ambientes geomorfológicos apresentam (e apresentarão) comportamentos diversos, o que exige a implantação de monitoramentos locais, distribuídos ao longo da costa brasileira.

Os impactos previstos na zona costeira em consequência de mudanças climáticas, excluindo aqueles que seriam comuns às áreas continentais (agricultura, clima etc.) são os seguintes:

- erosão e progradação costeira;
- danos a obras de proteção costeira;
- prejuízos estruturais ou operacionais a portos e terminais;
- danos a obras de urbanização de cidades litorâneas;
- danos estruturais ou prejuízos operacionais a obras de saneamento;
- exposição de dutos enterrados ou danos estruturais a dutos expostos;
- intrusão salina em estuários;
- intrusão salina em aquíferos;
- evolução dos manguezais;
- danos a recifes de coral.

Além desses efeitos, devem ser consideradas as mudanças climáticas associadas à interação oceano-atmosfera e suas consequências sobre as diversas formas de ocupação da zona costeira e da Zona Econômica Exclusiva, inclusive as atividades de exploração mineral na plataforma e talude continentais, e sobre as rotas de navegação no Atlântico Sul, em face do aumento dos riscos para as embarcações.

Os modelos utilizados atualmente para a previsão de cenários permitem a visão de grandes áreas e aplicam-se a uma grade planetária. Por este motivo, eles são inadequados para a previsão de fenômenos em uma faixa tão estreita como a zona costeira (ou seja, uma região representada no mapa como uma linha em vez de uma superfície). O avanço da modelagem poderá ser no sentido de refinar os modelos atuais, o que exigirá computadores cada vez mais robustos, ou, alternativamente, adotar novas estratégias numéricas que permitam o acoplamento dos modelos atuais a regiões lineares extensas.

Prever respostas e antecipar cenários para a zona costeira é uma situação bastante complexa e, lamentavelmente, ainda é tênue a

“mentalidade marítima” por parte dos órgãos fomentadores de pesquisa, das instituições responsáveis pela formação de recursos humanos e dos condutores de políticas públicas, quando se trata da valorização do mar para o progresso do país (por exemplo, VIDIGAL, 2006). Nesse cenário, o desconhecimento sobre o nosso litoral amplifica os problemas eventuais advindos de mudanças climáticas na zona costeira e tornará o país vulnerável a agentes externos, sejam eles naturais ou econômicos.

No momento, a resposta mais recomendável aos efeitos das mudanças climáticas é o estabelecimento de uma estratégia de ações (Gerenciamento Costeiro Integrado) que inclua:

- a condução de monitoramento ambiental permanente (longo prazo);
- a proposição de ordenamentos municipais para ocupação urbana;
- a efetivação de políticas estaduais de gerenciamento costeiro;
- o direcionamento de esforços da ação federal: legislação, educação, monitoramento e coordenação de ações;
- a identificação de fontes de recursos e financiamentos, sua aplicação e as formas de controle;
- o planejamento prévio e a priorização de estudos para as formas clássicas de respostas (recuo, acomodação e proteção).

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, F.; WASHINGTON, D. C. An analytical synoptic-dynamic study about the severe weather event over the city of Rio de Janeiro on January 2, 1987. In: NEVES, C. F.; MAGOON, O. *Coastline of Brazil*. New York: ASCE, 1989.

ALLISON, M. A. *Mechanisms of coastal progradation and muddy strata formation adjacent to the Amazon river*. 1993. Tese (Doutorado)- State University of New York, 1993.

BANDEIRA, J. V. A influência do transporte litorâneo em instalações e obras costeiras relacionadas com a produção de petróleo e gás no litoral do Estado do Rio Grande do Norte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 335-344.

BARROS, F. M. L.; MUEHE, D.; ROSO, R. H. Erosão e danos na orla costeira do município de Maricá, RJ. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., 2003, Recife. *Anais...* Recife: [s.n.], 2003. Cd-Rom.

BRAGARD, A. S.; NEVES, C. F. A influência da transmissão de ondas sobre as praias do Recife. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 427-432.

CALLIARI, L. J.; SPERANSKI N, S.; BOUKAREVA, I. I. Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian coast. *Journal of Coastal Research*, n. 26, p. 19-23, 1998. Special issue. Proceedings of the International Coastal Symposium, Florida.

CARUSO JR.; F.; AWDZIEJ, J. *Mapa geológico da ilha de Santa Catarina: escala 1:100.000.* [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, 1993.

CARVALHO, J. L. B. *Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos.* 2003. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

CASTRO, B. M.; LEE, T. N. Wind-Forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*, v. 100, n. C8, p. 16.045-16.056, 1995.

CASTRO, C. B. Corals of southern Bahia. In: HETZEL, B.; CASTRO, C. B. (Ed.). *Corals of southern Bahia.* Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1994. p. 161-176.

COIMBRA, A. M. et al. Dispersão dos sedimentos de superfície de fundo na plataforma continental interna do Estado de São Paulo - Santos à Ilha Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., 1980. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1980. p. 557-568.

COSTA, G. *Caracterização histórica, geomorfológica e hidráulica do estuário do Rio Paraíba do Sul.* 1995. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1995.

COUTINHO, P. N. Coastal quaternary of Pernambuco, Brazil. In: INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONGRESS, 14., 1994. *Abstracts...* Recife: D-31, 1994.

DIAS, G. T. M. et al. Géomorphologie côtière de l'Amapá – Brésil: considerations sur la dynamique sédimentaire actuelle. In: PROST, M.-T. (Ed.). *Évolution des littoraux*

de Guyane et de la zone Caraïbe méridionale pendant le Quaternaire. Caiena: [s.n.], 1992. p. 151-158.

DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. da S. P.; MARTIN, L. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies litorâneas associadas às desembocaduras dos rios São Francisco (Al-Se), Jequitinhonha (Ba), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 13, n. 2, p. 98-105, 1983.

_____ et al. Geologia do quaternário costeiro do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 20, n. 1-4, p. 208-215, 1990.

_____. Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in Northeastern Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 355-371, 1996.

_____. Episodes of severe erosion in the Jequitinhonha river strandplain caused by changes in river discharge and coastal wave climate. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife. *Anais...* Recife: [s.n.], 2003. Cd-Rom.

ESTEVEVES, L. S. *Variabilidade espaço-temporal dos deslocamentos da linha de costa no Rio Grande do Sul*. 2004. Tese (Doutorado)- UFRGS, 2004.

_____. Rio Grande do Sul: variabilidade espaço-temporal. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 460-467.

_____ et al. Coastal development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 548-556, 2003. Special Issue.

_____ et al. Long- and short-term coastal erosion in Southern Brazil. *International Coastal Symposium*, v. 1, p. 273-282, 2002.

EXMAN, F. Custo do seguro pode subir, diz Syndarma. *Gazeta Mercantil*, p. C4, 29 jan. 2008.

FANOS, A. M. et al. Erosion of Rosetta promontory: the Nile delta. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. p. 470-485.

FEITOSA, R. C. *Modelagem da pluma do emissário submarino da Barra da Tijuca*: RJ com T_{90} variável. 2003. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

_____. *Acoplamento de modelos de campo próximo e campo afastado com cinética de decaimento bacteriano variável: aplicações em emissários submarinos*. 2007. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2007.

FRANCO, A. S. *Marés: fundamentos, análise e previsão*. Rio de Janeiro: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1992.

FÚLFARO, V. J.; COIMBRA, A. M. As praias do litoral paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972. *Resumos...* [S.l.: s.n.], 1972. p. 253-255.

GABIOUX, M. *Influência da lama em suspensão sobre a propagação da maré na plataforma amazônica*. 2002. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2002.

GONCHOROSKY, J.; SALES, G.; OLIVEIRA, M. C. P. Environmental impact of the stranding of a freighter ship in the “Parque Nacional Marinho dos Abrolhos”, Bahia, Brazil. In: NEVES, C. F.; MAGOON, O. (Ed.). *Coastline of Brazil*. New York: ASCE, 1989.

GOSWAMI, B. N.; SENGUPTA, D. A note on the deficiency of NCEP/NCAR reanalysis surface winds over the equatorial Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C4, p. 3124, 2003. Doi: 10.1029/2002JC001497.

GRÉ, J. C. *Diagnóstico ambiental oceânico e costeiro das regiões sul e sudeste do Brasil*. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1994. V. 2.

HARARI, J.; CAMARGO, P. Tides and mean sea level in Recife (PE): 8° 3.3'S 34° 51.9'W: 1946 to 1988. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 1994.

HERZ, R. *Manguezais do Brasil*. São Paulo: Laboratório de Sensoriamento Remoto, Departamento de Oceanografia Física, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, 1991.

HOMSI, A. Wave climate in some zones off the Brazilian coast. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16., 1978, Hamburg. *Proceedings...* [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 1978. p.114-133.

_____. Estudos e desenvolvimentos costeiro-ambientais no INPH. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p.315-324.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Preparing to meet the coastal challenges of the 21st century. In: WORLD COAST CONFERENCE 1993, 1993, Noordwijk, Países Baixos. *Proceedings...* Noordwijk, Países Baixos, 1994. Conference report.

JONG, M. *Origin and prediction of seiches in Rotterdam harbour basins*. [S.l.]: Delft University of Technology, 2004. (Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, n. 04-2).

_____; HOLTHUIJSEN, L. H.; BATTJES, J. A. Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, v. 108, n. C4, p. 3117, 2003. Doi:10.1029/2002JC001422.

KALIL, A. F. D. *Uma contribuição ao estudo do nível médio do mar no estado do Rio de Janeiro*. 1997. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1997.

KAY, R.; MAGOON, O. (Ed.). *Deltas of the world*. New York: American Society of Civil Engineers, 1993.

KIKUCHI, R. K. P. et al. Rapid assessment of the Abrolhos reefs, Eastern Brazil: (part 1: stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*, 2002.

KINEKE, G. G.; STERNBERG, D. A. Distribution of fluid muds on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, n. 125, p. 193-233, 1995.

KOMAR, P. D. *Beach processes and sedimentation*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1976.

KOWSMANN, R. O.; COSTA, M. A. *Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro: Petrobrás, 1979. (Série Projeto REMAC, n. 8).

LEÃO, Z. M. A. N. The coral reefs of southern Bahia. In: HETZEL, B.; CASTRO, C. B. (Ed.). *Corals of southern Bahia*. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 1994. p. 151-159.

_____. The coral reefs of Bahia: morphology, distribution and the major environmental impacts. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 439-452, 1996.

_____ et al. First coral reefs assessment in the southern hemisphere applying the AGRRA rapid protocol (Caramuanas reef, Bahia, Brazil). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENTIFIC ASPECTS OF CORAL REEF ASSESSMENT, MONITORING AND RESTORATION, 1999, Florida, USA. *Abstracts...* [S.l.: s.n.], 1999. p. 122-123.

MAHIQUES, M. M. Características texturais dos sedimentos superficiais da região costeira de Ubatuba (SP). In: SIMPÓSIO SOBRE OCEANOGRAFIA – IOUSP, 1989, São Paulo. *Resumos...* São Paulo: Instituto Oceanográfico da USP, 1989. p. 54.

MAIA, L. P. *Estudo hidrológico-sedimentológico da praia do Meireles*. Ceará: Universidade Federal do Ceará, 2002. 57 p. Technical report.

_____. Dune migration and aelian transport along Ceará (NE Brazil). Downscaling and upscaling aeolian induced processes. *Coastal Sediments*, p. 1220-1232, 1999.

MARTIN, L.; SUGUIO, K. Excursion route along the coastline between the town of Cananéia (State of São Paulo) and Guaratiba outlet (State of R. de Janeiro). In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978. *Proceedings...* São Paulo: [s.n.], 1978. Special publication n. 2.

_____; FLEXOR, J.-M. Le quaternaire marin du littoral brésilien entre Cananéia (SP) et Barra de Guaratiba (RJ). In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978. *Proceedings...* São Paulo: [s.n.], 1979. p. 296-331.

MELO, E.; ALVES, J. H. G. M. Nota sobre a chegada de ondulações longínquas à costa brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p. 362-269.

_____ et al. Instrumental confirmation of the arrival of North Atlantic swell to the Ceara coast. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1996, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1996.

MENEZES, D. C. *Contribuições metodológicas para a análise de flutuações atmosféricas e oceanográficas de alta frequência na costa do Estado do Rio de Janeiro*. 2007. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2007.

MESQUITA, L. R.; HARARI, J. *Tides and tide gauges of Ubatuba and Cananéia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 1983. V. 11. Relatório técnico.

MIRANDA, B. T. *Modelagem de circulação e transporte de contaminantes na região da baía de Aratu – BA, utilizando técnicas de aninhamento de modelos hidrodinâmicos*. 2000. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2000.

MORAES, J. O. et al. Ceará. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 131-154.

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.

_____. Beach morphodynamic research in Brazil: evolution and applicability. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 32-42, 2003. Special issue.

_____. *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

_____; CARUSO JR., F. Batimetria e algumas considerações sobre a evolução geológica da Lagoa da Conceição: ilha de Santa Catarina. *Geosul*, v. 7, n. 32, p. 44-47, 1989.

_____; FERNANDEZ, G. B. O efeito de tempestades como realimentador do estoque de sedimentos de dunas frontais submetidas a vento predominante da terra para o mar. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 7., 1999, Porto Seguro, Ba. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1999. Cd-Rom.

_____; SAVI, D. C. Resposta morfodinâmica de um sistema praia-antepraia a oeste do cabo Frio exposto às tempestades de maio de 2001. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 8., 2001, Mariluz. *Resumos...* [S.l.: s.n.], 2001. p. 63-64.

_____; NEVES, C. F. *Changing climate and the coast, Western Africa, the Americas, the Mediterranean basin, and the rest of Europe*. [S.l.: s.n.], 1990. V. 2. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Miami Conference on Adaptive Responses to Sea Level Rise and Other Impact of Global Climate Change.

_____. The implication of sea level rise on the Brazilian coast: a preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, n. 14, p. 54-78, 1995. Special issue.

_____. *Vulnerabilidades físicas da orla da Cidade do Rio de Janeiro: relatório temático nível C*. [S.l.]: Instituto Pereira Passos, 2007. (Relatório COPPETEC PENO, 7725).

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Potential impact of sea-level rise on the metropolitan region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, n. 14, p. 116-131, 1995. Special issue.

_____; FIALHO, G. O. M. Coastal management and sea-level rise in Recife, Brazil. In: SYMPOSIUM ON COASTAL AND OCEAN MANAGEMENT, COASTAL ZONE 91, 7., 1991. *Proceedings...* [S.l.]: American Society of Civil Engineers, 1991. V. 3, p. 2801-2815.

NEVES FILHO, S.C. *Variação da maré meteorológica no litoral Sudeste do Brasil: 1965-1986*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

NICHOLLS, R. J. et al. Coastal systems and low-lying areas. In: PARRY, M. L. (Ed.). *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 315-356. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

NITTROUER, C. A. The geological record preserved in Amazon shelf sedimentation. *Continental Shelf Research*, v. 16, n. 5/6, p. 817-841, 1996.

OLIVEIRA, M. M. F. *Redes neurais artificiais na predição da maré meteorológica em Paranaguá – PR*. 2006. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2006.

_____ et al. Maré meteorológica utilizando redes neurais artificiais: uma aplicação para a baía de Paranaguá – PR: parte 1: dados na estação de superfície. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 220-231, 2006.

_____ et al. Maré meteorológica utilizando redes neurais artificiais: uma aplicação para a baía de Paranaguá – PR: parte 2: dados meteorológicos de reanálise do NCEP/NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 22, p. 53-62, 2007.

OLIVEIRA, P. A.; PAIVA JR., F. L. Instalações portuárias da marinha do Brasil: seus problemas e soluções correlacionados com a engenharia costeira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 10., 1993. *Anais...* Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1993. p.325-334.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO - FAO. *The world's mangroves: 1980-2005*. Roma, 2007. (FAO Forestry Paper, n. 153).

PARENTE, C. E. *Uma nova técnica espectral para análise direcional de ondas*. 1999. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

PARRY, M. L. et al (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2007. 976 p. Contributions of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

PINHO, U. F. *Caracterização dos estados de mar na Bacia de Campos*. 2003. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2003.

PIRAZZOLI, P. A. Secular trends of relative sea level (RSL) changes indicated by tide-gauge record. *Journal of Coastal Research*, n. 1, p. 1-26, 1986. Special issue.

PORTO, M. Maia; TEIXEIRA, S. G. *Portos e meio ambiente*. São Paulo: Edições Aduaneiras, 2002.

REGO, V. S. *Refração-difração de ondas irregulares: aplicação à praia de Ipanema-Leblon*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

SILVA, G. N. *Variações do nível médio do mar: causas, conseqüências e metodologia de análise*. 1992. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1992.

SILVA, W. de S. et al. Erosão costeira nas falésias Tibau do Sul: litoral leste do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2., 2003, Recife. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2003. Cd-Rom.

SOLOMON, S. (Ed.). *IPCC 2007: climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

SOUZA, C. R. G. Processos sedimentares na enseada de Caraguatatuba, litoral norte de São Paulo. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 3., 1992. *Anais...* [S.l.: s.n.], 1992. p. 123-140.

SPERANSKI, N. S.; CALLIARI, L. J. Bathymetric lens and coastal erosion in southern Brazil. In: INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM 2000, 2000. *Program and abstracts...* [S.l.: s.n.], 2000. p. 81.

_____. Padrões de refração de ondas para a costa do Rio Grande do Sul e sua relação com a erosão costeira. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 446-454.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense. In: 1978 INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COASTAL EVOLUTION IN THE QUATERNARY, 1978, São Paulo. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1978. 55 p. (Special publication, n. 1).

TOLDO JR. et al. Rio grande do Sul: erosão e acresção da zona costeira. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 468-474.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas*, v. 19, n. 1, p. 3-12, 1992.

_____. Quaternary geological evolution of Rio Grande do Sul coastal plain, Southern Brazil. *Anais da Academia brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 355-371, 1996.

TORRES, A. M.; EL-ROBRINI, M. Amapá. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 11-40.

TRICART, J. Problèmes geomorphologiques du littoral oriental du Brésil. *Cahiers de Oceanographie*, v. 11, p. 276-308, 1959.

_____. Problemas geomorfológicos do litoral oriental do Brasil. *Boletim Baiano de Geografia*, v. 1, n. 1, p. 5-39, 1960.

UAISSONE, A. R. J. *Influência das forçantes atmosféricas em mesoescala sobre o nível médio do mar em Piraquara, RJ*. 2004. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2004.

U.S. FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY – FEMA. *Procedure Memorandum n. 37: protocol for Atlantic and Gulf Coast Coastal Flood Insurance Studies in FY05*. [S.l.], 2006.

VALENTINI, E. *Avaliação dos processos litorâneos e consequências para o gerenciamento costeiro no Ceará*. 1994. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1994.

_____; ROSMAN, P. C. C. Erosão costeira em Fortaleza. *Revista Brasileira de Engenharia: Cadernos de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 373-381, 1993.

_____; CASSAR, J. C. M.; GUSMÃO, L. A. B. Man made erosion in the São Brás pocket beach and its restoration. In: COPEDEC IV, INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 4., 1995, Rio de Janeiro. *Proceedings...* Rio de Janeiro: [s.n.], 1995.

VALLEGA, A. Urban waterfront facing integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management*, n. 44, p. 379-410, 2001.

VIDIGAL, A. A. F. (Coord.). *Amazônia azul: o mar que nos pertence*. Rio de Janeiro: Ed. Record. 2006.

VILLWOCK, J. A. Geology of the coastal province of Rio Grande do Sul, Southern Brazil: a synthesis. *Pesquisas*, n. 16, p. 5-49, 1984.

VIOLANTE-CARVALHO, N. *Investigações sobre o clima de ondas na bacia de Campos e correlação com situações meteorológicas associadas*. 1998. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1998.

VITAL, H. et al. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, Dieter (Org.). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p.155-172.

_____. Why does erosion occur on the Northeastern coast of Brazil?: the Caiçara do Norte beach example. *Journal of Coastal Research*, n. 35, p. 525-529, 2003. Special issue.

XAVIER, A.G. *Estudo da circulação hidrodinâmica e do transporte de contaminantes no estudo do rio Iguaçu: Baía de Guanabara*. 1996. Dissertação (Mestrado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 1996.

_____. *Circulação hidrodinâmica na baía de Todos os Santos (BA)*. 2002. Tese (Doutorado)- Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 2002.

Resumo

O que é a zona costeira e qual sua importância? A zona costeira é legalmente definida como uma faixa marítima de 12 milhas náuticas de largura (mar territorial) e uma faixa terrestre com 50 km de largura. Nos municípios banhados pelo mar ou às margens de estuários, habitam aproximadamente 20% da população brasileira, concentrada principalmente na vizinhança das capitais de Estados. Portos, exploração de recursos minerais, turismo, aquíicultura e áreas de conservação ou de proteção ambiental, além de moradia, são as principais atividades econômicas ou tipos de ocupação da zona costeira.

A elevação do nível médio do mar seria a principal e único fator de impacto sobre a zona costeira? A combinação da expansão térmica e do aumento do volume dos mares pelo derretimento das geleiras localizadas nos continentes, resultaria num aumento do nível médio do mar da ordem de 50 cm até 2100. Sabe-se, porém, que fatores meteorológicos podem provocar elevações transientes bem maiores que os valores previstos pelo IPCC. Como a zona costeira é a interface entre continente, atmosfera e oceano, ela se torna vulnerável a mudanças nestes três grandes sistemas. O Capítulo 2 investiga os diversos agentes ambientais presentes na zona costeira: ventos, ondas, sedimentos, nível do mar, temperaturas do ar e do mar, e regime de precipitação. Entende-se que as mudanças do regime de ventos podem influir na formação das ondas, no transporte eólico de sedimentos, nas oscilações

transientes de nível relativo do mar (“maré meteorológica”); é necessário, portanto, que as investigações sejam feitas de forma multidisciplinar, em várias escalas geográficas e temporais.

Quais os impactos advindos das mudanças climáticas sobre a zona costeira? As ondas podem ter seu regime alterado para condições que ainda não foram estudadas pelo IPCC para o Oceano Atlântico Sul, potencialmente esculpindo novas feições morfológicas na costa ou atuando sobre estruturas de maneira diferente daquelas para as quais foram dimensionadas. Variações no transporte de sedimentos por ação das ondas podem erodir ou assorear locais antes estáveis. As variações do nível do mar por efeito meteorológico (por exemplo, devido à passagem de ciclones extratropicais com força de furacão) podem ser até três vezes maiores do que a elevação termo-eustática prevista pelo IPCC, embora hoje em dia já se observem variações da ordem de 90 cm no nível médio relativo do mar. Mudanças da temperatura do oceano costeiro podem influenciar a diluição e a circulação hidrodinâmica nas regiões vizinhas de emissários submarinos. Pode haver também mudanças no padrão de brisas marinhas e terrestres, bem como mudanças nas propriedades termohalinas de baías e áreas estuarinas com conseqüências para a fauna e flora. Finalmente, é indispensável entender as relações entre as bacias hidrográficas e as regiões costeiras, pois mudanças no regime pluvial interferem com o balanço de água doce e salgada nos estuários e com o aporte de sedimentos na zona costeira.

Quais as vulnerabilidades da zona costeira a mudanças climáticas? Os Capítulos 3 e 4 tratam separadamente os ambientes físicos e os tipos de obras usualmente encontradas. Investigam-se separadamente nove compartimentos geomorfológicos distintos, onde a erosão costeira tem sido observada ou onde o risco de prejuízo ambiental é mais acentuado. Alerta-se também para os impactos sobre manguezais e recifes de coral. Apresentam-se diversos tipos de estruturas (urbanização da orla, portos, obras de proteção costeira, sistemas de saneamento, dutos e emissários), caracterizando suas vulnerabilidades.

Quais as respostas recomendadas? O Capítulo 5 aborda as possíveis formas de resposta, de acordo com a nomenclatura do IPCC (“Recuo”, “Acomodação” e “Proteção”), analisando os sistemas naturais e diversos tipos de estruturas.

Qual a estratégia recomendada para enfrentar as mudanças climáticas? Em comparação aos impactos em outros países, bem mais vulneráveis, pode se desenvolver, nos governantes e tomadores de decisão, uma postura paradoxalmente indiferente ou de falsa segurança quanto às questões das mudanças climáticas na zona costeira. A estratégia recomendada baseia-se nos princípios de Gerenciamento Costeiro Integrado, que engloba aspectos de gestão de recursos hídricos,

gerenciamento costeiro, ordenamento espacial e planejamento energético e mineral. As ações propostas dividem-se nos seis aspectos listados a seguir e devem ser iniciadas no prazo mais curto possível: (A) a condução de monitoramento ambiental permanente (longo prazo); (B) a proposição de ordenamentos municipais para ocupação urbana; (C) a efetivação de políticas estaduais de Gerenciamento Costeiro Integrado; (D) o direcionamento de esforços da ação federal: legislação, educação, monitoramento e coordenação de ações; (E) a identificação de fontes de recursos e financiamentos, sua aplicação e as formas de controle; (F) o planejamento prévio e a priorização de estudos para as formas clássicas de respostas (Recuo, Acomodação e Proteção).

Palavras-chave

Zona costeira. Mudanças climáticas globais. Vulnerabilidade. Impactos. Estratégia.

Abstract

For a country with such a long coastline, it should be expected that the impacts on the coastal zone due to global climate changes be an issue of concern. In spite of its advertised beautiful beaches, the economical relevance of the ports for the international trade, and 10 cities with more than 1 million inhabitants on the coast, the population actually living on coastal counties remains around 20% of the total country population, which seems a surprisingly small figure. Large extensions of coastline remain virtually pristine or weakly occupied.

Very few actions on CZ management at local government level have been actually effective. Impacts due to climate changes on “production of commodities” are well perceived by the public opinion rather than on the “infrastructure and logistics”, in spite of the relevance of tourism and ports for Brazilian economy. If the impacts are exclusively restricted to a rise by an amount of 28 to 43 cm on mean sea level by year 2100, this might be perceived as negligible by local government and may result on a false impression of safety, by minimizing the actual impacts.

This work proposes an alternative approach, attempting to call attention upon the coastal environment as a network of physical agents and processes, which must be closely monitored in face of global climate changes.

The paper is divided into three sections. The first one (Chapter 2) describes the most important physical processes and environmental agents which are relevant to understanding the coastal environment, as well as to designing appropriate responses to mitigate the consequences of climate changes. These agents are: wind, waves, sediments, sea level, air and sea temperature, and precipitation.

The second section (Chapters 3 and 4) describes selected types of coastal environment, discussing their vulnerability to coastal erosion. In this section, different types of coastal structures are discussed

regarding their vulnerability to environmental changes, some of them already facing problems at current sea level.

Finally, the third section (Chapters 5 and 6) deals with responses, according to the following aspects:

- *establishment of long term environmental monitoring;*
- *proposal of municipal ordinances for urban settlements;*
- *effective integrated coastal zone management policies at State level;*
- *focusing of efforts at Federal level: legislative, educational, monitoring and coordinating;*
- *identification of financial resources and support, planned application and control mechanisms;*
- *advance planning and choice of priorities for studying mitigation responses (Retreat, Adaptation, Protection).*

Keywords

Coastal zone. Global climate changes. Vulnerability. Impacts. Strategies.

Os autores

CLAUDIO FREITAS NEVES é engenheiro civil e matemático, mestre em Engenharia Oceânica (UFRJ), e doutor pela Universidade da Florida (USA). É professor e pesquisador pela UFRJ na Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Programa de Engenharia Oceânica.

DIETER CARL ERNST HEINO MUEHE é mestre em Geografia (UFRJ) e doutor em Geografia pela Universidade de Kiel (Christian-Albrechts). Atualmente é professor e pesquisador do Instituto de Geociências (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

