

ARTIGO DE REVISÃO

EVENTOS DE ALTA ENERGIA E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA ZONA COSTEIRA DO MUNICÍPIO DE AQUIRAZ, ESTADO DO CEARÁ

High-energy events and their effects on the coastal zone of Aquiraz county, Ceará State

Glacianne Oliveira Maia¹, Lidriana de Souza Pinheiro²

RESUMO

O artigo teve como objetivo realizar um levantamento teórico-metodológico dos mecanismos que envolvem eventos de alta energia associados a erosão, vulnerabilidade e impactos nas dunas frontais e faixa de praia do Município de Aquiraz, Ceará. Alguns desses fenômenos estão cada vez mais frequentes na zona costeira e, nesta pesquisa, tiveram destaque as tempestades e os galgamentos associadas às ondas swell, e elevação do nível das águas do Oceano Atlântico. Vários métodos têm evoluído de enfoques individuais e estão corroborando para a classificação de áreas mais vulneráveis da zona costeira, e identificando os principais riscos costeiros e possíveis previsões de novos eventos. Eventos de ressaca seguidos de galgamento ocorrem sazonalmente no litoral cearense, onde predomina a presença de praias em estágio inicial de degradação. Esses problemas têm aumentado, bem como a frequência de ressacas por todo litoral. Na área de estudo, os registros datam da década de 1950 e, portanto, urge buscar meios eficientes para evitar a chegada desses eventos ao litoral do Ceará e seus consequentes transtornos. A previsão e a prevenção devem ser definidas por meio de um estudo mais aprofundado conjuntamente com a interpretação dos parâmetros oceanográficos e sedimentológicos. O resultado esperado é identificação das principais causas que estão interferindo na dinâmica costeira do Município de Aquiraz.

Palavras-chaves: galgamento, erosão, onda swell, tempestade, duna frontal, zona costeira, Estado do Ceará.

ABSTRACT

This article aims to make a methodological survey of such mechanisms as will be useful for understanding the underlying conditions that relate high-energy events to the occurrence of erosion risks, vulnerability and impacts in the frontal dunes and beach strip in natural and semi-urban areas of Aquiraz county, Ceará State. Some of those phenomena are increasingly frequent in the coastal zone, namely tropical cyclones, tsunamis, earthquakes, seaquakes, apart from the relative rise in sea level. This research highlights storm surges and overtopping associated to swell waves, and rising ocean waters of the Atlantic. Several articles, theses and technical reports have been written about these processes. Undertow events followed by overwash occur seasonally off the Ceará state's coast, leaving marks in beaches already in early stages of degradation. These problems have increased as well as the frequency of undertows throughout the coast. In the study area dating back to the 1950s, so that it is urgent to seek efficient means to stop such from reaching the coastal zone. In this case, the forecast and prevention should be defined by a medium-range survey together a fuller interpretation of oceanographic parameters. The expected outcome could likely be the identification of the main factors that are supposed to be interfering with the coastal dynamics of Aquiraz county.

Keywords: overwash, erosion, swell wave, storm surge, frontal dune, coastal zone, Ceará State.

¹ Instituto de Ciências do Mar, Programa PPGCMT, Universidade Federal do Ceará, Av. da Abolição, 3207. E-mail: glacianne@gmail.com

² Professora Adjunta no Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Av. da Abolição, 3207. E-mail: lidriana.lgco@gmail.com

INTRODUÇÃO

Modelos do clima global mostram um aumento substancial dos impactos antropogênicos no clima e nos processos oceanográficos, levando à previsão de que os eventos de alta energia devem aumentar com o tempo (Kerry, 2005; Bender *et al.*, 2010). Além da elevação do nível médio do mar há mudança de muitas outras variáveis climáticas expressas principalmente como um aumento na frequência ou a probabilidade de eventos extremos. (Nicholls & Tol, 2006; Hunter, 2011). Como consequência, a ocorrência de inundações da zona costeira e erosão da linha de costa (Titus, 1998; Larson *et al.*, 2004a, b).

Embora alguma atenção tenha sido dada ao fenômeno de aumento do nível médio do mar, o papel crítico que esta elevação tem em associação com tempestades costeiras e ressacas na geração de desastres costeiros, foi muito pouco explorado (Belém, 2007). A duração anual acumulada de tempestades no Atlântico Norte e oeste do Pacífico Norte tem apresentado um aumento de aproximadamente 60% desde 1949, embora isto possa refletir apenas mudanças parciais nas práticas da comunicação científica (Kerry, 2005).

O aumento das temperaturas da superfície do mar (TSM) e um possível aumento das atividades de furacões na bacia do Atlântico desde 1950 têm despertado o interesse e vêm repercutindo nos fóruns mundiais. Algumas análises estatísticas sugerem uma ligação entre temperaturas da superfície do Mar - TSM no Atlântico com o aumento de furacões, embora outros estudos afirmem que a mudança na estrutura espacial da TSM pode ser um controle mais importante na frequência e intensidade dos ciclones tropicais. (Bender *et al.*, 2010).

Os eventos de alta energia são eventos instantâneos e que promovem mudanças acentuadas na morfologia, sedimentologia e danos à infraestrutura urbana instaladas na zona costeira, precisamente no sistema praia-duna. A pós-praia e as dunas frontais (*foredunes*) são importantes para a proteção da orla costeira, porque elas agem como uma defesa natural aos eventos de alta energia para as áreas de terras altas. (Park & Edge, 2010). O sistema praia-duna é caracterizado pela interação de duas áreas distintas: a área submersa, controlada pela hidrodinâmica marinha e a área emersa, controlado pela dinâmica dos ventos. Pequenas mudanças podem-se definir o equilíbrio natural cada uma destas áreas. (Roig-Munar *et al.*, 2012).

Embora exista uma forte discussão sobre as taxas de elevação do mar ou de sua aceleração, o fato

de estar subindo é inquestionável, e deve estar causando impactos como a erosão de praias, inundações em áreas baixas, intrusão de águas salinas em aquíferos e aumento da incidência de ressacas, podendo-se citar as elevações de 10 cm, 8 cm e 5 cm nos litorais de Rio Grande, Salvador e Fortaleza nos últimos 14 anos (Belém, 2007).

As taxas de recuo da linha de costa constituem um dos melhores índices de erosão costeira quando esta atinge estágios avançados. Na maior parte dos casos, este índice é mais explícito e, frequentemente, mais confiável do que a avaliação da área perdida ou do volume erodido (Dias *et al.*, 2005). Neste contexto ganha destaque a importância de se estabelecer o índice de vulnerabilidade a inundações de áreas urbanizadas e não urbanizadas, esta última bastante demandada, principalmente no Nordeste Brasileiro, pela especulação imobiliária voltada ao turismo. Os índices de vulnerabilidade, além de dimensionar o meio físico, devem considerar também o sistema socioeconômico e político, sem os quais quaisquer iniciativas de gestão integrada seriam inviabilizadas. A todo instante são construídos hotéis, casas e vias próximos ao mar sem considerar o cenário que se desenha com as mudanças climáticas globais. Qual a melhor forma de adaptação e proteção aos eventos de alta energia? A caracterização dos impactos dos eventos extremos sobre a morfologia costeira e as estruturas urbanas não é fácil sendo, por vezes, inconclusiva (Paula, 2012). A principal limitação é a disponibilidade de séries históricas de ondas e marés que permitam definir, com precisão, os limites para ocorrência desses impactos e a falta de dados e/ou trabalhos anteriores sobre o assunto (Paula *et al.*, 2011). A repercussão desses eventos instantâneos ganha destaque na mídia, quando o seu impacto em costas urbanizadas é verificado, porém não são considerados ainda nos planos diretores de cidades costeiras para fins de ordenamento territorial.

O objetivo deste artigo é primeiramente sumarizar os principais eventos de curta e longa duração que transformam a zona costeira, discutir as variáveis que diferenciam os eventos de alta energia, discutir o conceito de vulnerabilidade costeira, a evolução de sua utilização e os principais eventos e impactos registrados na costa do Estado do Ceará. Conhecer e entender os processos que atuam em um determinado setor é uma contribuição importante e fundamental para as discussões sobre as formas de adaptação dos mais diferentes tipos de costa a esses processos.

EVENTOS DE ALTA ENERGIA

Alguns fenômenos estão cada vez mais frequentes e, em particular na zona costeira, como as tempestades, ciclones extratropicais, tsunamis, terremotos, maremotos, tornados, além da elevação relativa do nível do mar. Nesse contexto merecem destaque as tempestades (*storm surges*), galgamentos (*overwashes*) associadas às ondas *swell* e elevação do nível das águas oceânicas do Atlântico.

A comunidade científica brasileira tem utilizado o termo ressaca com diferentes definições, mas para o litoral do Ceará refere-se principalmente à entrada de ondas de longo período (*swell*), que provocam elevação do nível do mar e erosão costeira associada a inundações gerada pela ação de tempestades (Paula *et al.*, 2011). Esse fenômeno, definido como *storm surge*, representa a diferença de nível entre as marés prevista (astronômica) e observada, e vem sendo referida na literatura nacional como maré meteorológica. (Calliari *et al.*, 2010)

Intrinsecamente ligadas à ocupação humana por sua relação de causa e efeito, as características geomorfológicas da costa, associadas à dinâmica climática e oceanográfica, conferem relevância ímpar às questões relacionadas a inundações. Assim, a consequente perda de espaço físico para desenvolvimento das atividades econômicas e sociais que lhe são inerentes se destaca a partir de uma análise prioritária dos riscos de desastres naturais a que estariam submetidos esses espaços de transição dos domínios

continental e marinho. (Tessler, *in* Ministério do Meio Ambiente, 2006). Preocupado com essa problemática, esse mesmo autor realizou um levantamento utilizando o banco de dados internacional sobre desastres naturais (*International Disaster Database - OFDA/CRED*), segundo o qual 55% dos eventos com causas naturais que atingiram o Brasil entre 1948 e 2006 estiveram relacionados com inundações fluviais e/ou avanços do mar (Figura 1).

Overwash é definido como o transporte ou intrusão de água do mar e sedimentos ao longo da duna frontal ou pós-praia pela sobrelevação da onda e/ou do nível do mar (Leatherman, 1976; Park & Edge, 2010) o que, por sua vez, não retorna diretamente para o corpo d'água (oceano, mar, baía, lago ou, futuramente, para o mar) onde ele se originou. Os processos complementares fazem parte das ações correlacionadas entre o *continuum* de onda *swash*, dos quais água e sedimento são movidos para o continente sobre a crista da barreira, ou duna frontal (Orford & Carter, 1982). A capacidade de prever a ocorrência e as consequências dos danos provocados são de suma importância na proteção dos litorais, uma vez que desempenham papel importante nos processos sedimentares e costeiros, bem como nos registros sedimentares e nas obras de engenharia costeira; Donnelly *et al.*, 2006a; Park & Edge, 2010).

O *overtopping*, em sistemas naturais, pode ser considerado um processo de acresção vertical realizada pelo *swash* da onda sobre a crista de praia, da duna ou da berma, com rápida percolação.

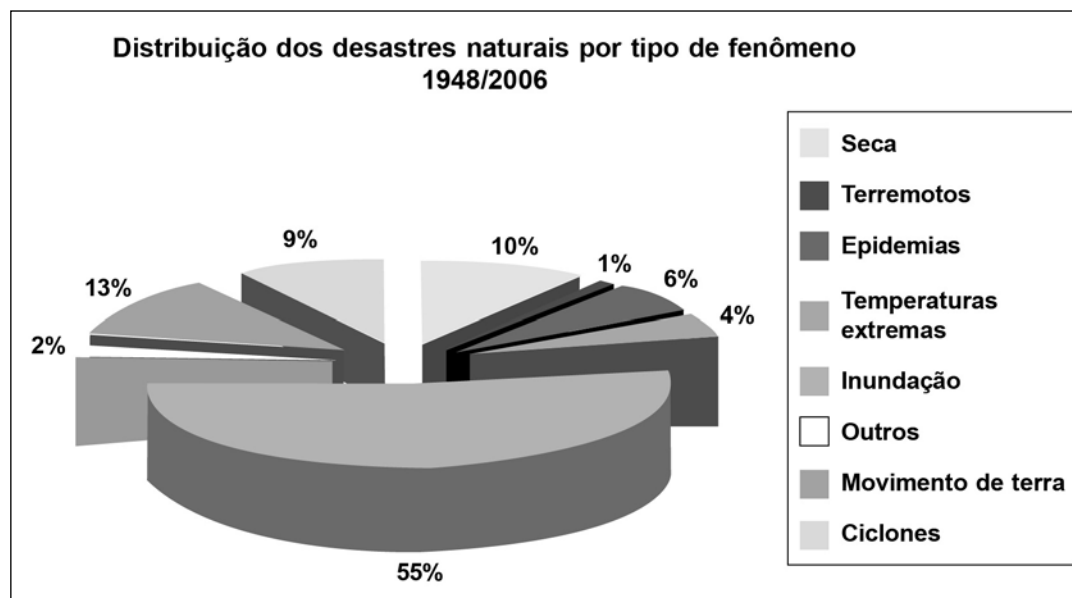


Figura 1 - Distribuição dos desastres naturais por tipo de fenômeno no Brasil (1948 - 2006) (fonte: Tessler, *apud* Ministério do Meio Ambiente, 2006).

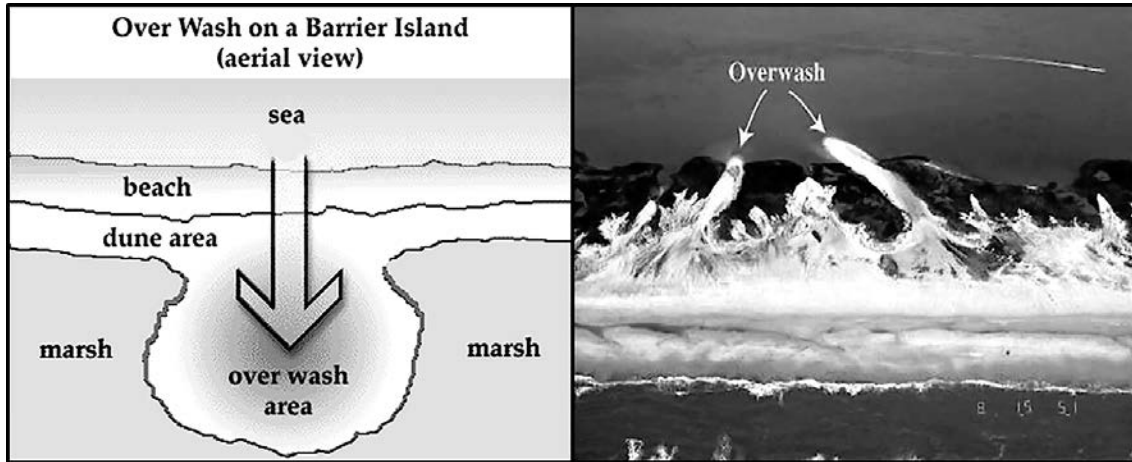


Figura 2 - À esquerda, exemplifica-se através do esquema o processo do *overwash* em uma típica ilha barreira; à direita, a transferência de sedimentos pelo processo *overtopping* (fonte: Donnelly *et al.*, 2006b).

Overwashing pode ser considerado uma extensão de *overtopping*, quando, exige um maior volume de *swash* capaz de gerar competência, fluxo unidirecional pouco afetada por percolação. (Figura 2). Ambos os processos podem ocorrer no mesmo lugar (crista da barreira) sob condições de aumento ou diminuição da altura das ondas, da subida e descida durante as fases da maré ou das marés meteorológicas (Orford & Carter 1982; Park & Edge, 2010).

Na realidade, esse fenômeno pode vir associado a vários fatores: como as condições marinhas e da praia (Fisher *et al.*, 1974; Donnelly *et al.*, 2006b), ventos, precipitação, tempestades (Sallenger, 2000; Todd & Walton, 2005; Houser, 2012) ondas (Callaghan & Wainwright, 2013), topografia da praia (Donnelly *et al.*, 2005). Experimentos de laboratório são úteis para minimizar variáveis e para encontrar os fatores dominantes que expliquem da melhor maneira o mecanismo de *overwash* e desenvolver equações empíricas (Park & Edge, 2010).

Assim, Shepard (1973) e Donnelly *et al.* (2006a) analisaram que o *overwash* ocorre se qualquer nível

runup da onda ou tempestade (nível de água em excesso de maré prevista) excede altura da crista praia ou da berma. Se a tempestade coincide com a maré alta, o nível das águas aumenta e, portanto, o potencial para ocorrer *overwash* é maior. Para tempestades moderadas, é possível para a *overwash* iniciar na maré alta e parar durante os estágios mais baixos da maré, o que vai depender da intensidade da tempestade e da inclinação e largura da praia.

Em áreas desenvolvidas (com ocupação), o *overwash* pode ser um alerta, porque a erosão da face da praia permite que áreas mais altas e estáveis possam tornar-se vulneráveis a danos causados por inundações. Se as dunas forem reduzidas ou destruídas, a função de proteção da praia é comprometida (Donnelly *et al.*, 2006a), daí a preocupação com praias mais planas ou com baixa declividade por não haver obstáculos naturais para conter essa energia e evitar a destruição de dunas e estruturas feitas pelo homem nas ilhas barreiras (Tinh, 2006, ver Figura 3).

Washover é, por sua vez, um processo costeiro que ocorre quando atípicas elevações do nível da

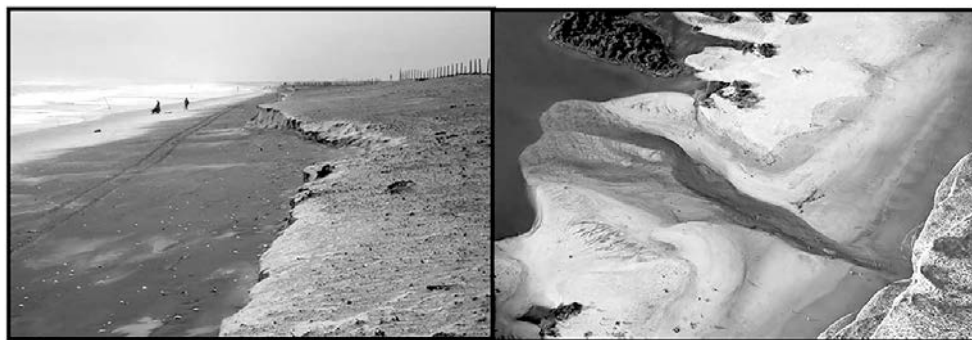


Figura 3 - À esquerda, escavações ocasionadas pelas fortes ondas associadas com passagem do furacão Irene na Ilha Assateague, Virginia em 2011; à direita, a abertura de um canal através da ilha despejando sedimentos e água para o outro lado da barreira (fonte: Irene Hinke-Sacilotto).

água e das ondas do oceano, lagoas, estuários, excedem às elevações das superfícies continentais adjacentes. Depósitos de *washover* são geralmente uma das respostas deposicionais mais observadas em eventos de tempestades extremas (Morton & Sallenger, 2003) e, portanto, trata-se de um fenômeno relacionado com tempestades (Schwartz, 1982; Bathes & Jackson, 1987).

Vale ressaltar que o resultado do depósito não se submete ao retrabalhamento durante as condições de calmaria (*non-storm*) (Leatherman, 1976). Vários tipos de morfologias podem ser nomeados na literatura, dos quais seguem algumas como terraço de *washover* (Ritchie & Penland, 1988; Bray & Carter, 1992), leque de *washover* (Kochel & Wampfler, 1989), planície de *washover* (Ritchie & Penland, 1988). A outra característica é definida como lateralmente confinado que corta o campo de dunas em locais específicos (*washoverlobe*), nomeada de feições de *overwash* (Armon & McCann 1979) morfologia de terraço da duna (Ritchie & Penland, 1988) e *washover* individual (Bray & Carter, 1992).

Na área não ocorre o galgamento propriamente dito, mas fortes ondas alcançam as dunas frontais removendo sedimentos e formando escarpas atingindo altura maior que 1,5 m (Figura 4). Características como a descrita tem semelhança aos ambientes costeiros tratados por Donnelly *et al.* (2005) ao mostrar que a redução da duna implica pouca ou nenhuma mudança na posição da crista da duna, mas uma perda de altitude da crista. A sotamar da duna e da barreira significa que a forma da duna ou barreira é mais ou menos conservada, mas todo o sistema se move em direção à terra. Quando o nível da água está abaixo da crista da duna, as ondas

atacam a praia e a duna frontal causando remoção de sedimentos na direção *offshore*. Assim, a duna / barreira pode estar ficando menor até que haja suficiente energia das ondas e do nível da água para mover a maioria dos sedimentos.

O registro da ocorrência dos depósitos sedimentares tem sido interpretado como uma ocorrência de tempestades. No entanto, *overwash* sem tempestades (*non-storm conditions*), causado por níveis de marés extremas ou seiches em lagoas que excedem a crista praial (Schwartz, 1975 *apud* Houser, 2012; Morton *et al.*, 2000) podem também resultar de outras situações: altas marés em áreas de baixa altitude, *déficit* sedimentar e marés equinociais. Esse evento tem sido pouco estudado provavelmente devido a sua dependência com as condições geomorfológicas e pela sua relativa característica transicional. Pode-se afirmar também que o *overwash* em tempestades não tem efeitos na mídia como ocorre com os furacões, devido ser um processo com maior repercussão. (Matias, 2006; Matias *et al.*, 2010).

Casos excepcionais ocorrem no Brasil, onde as tempestades são originadas do Hemisfério Norte ou, no caso do sul do país, devido às frentes frias que podem ou não estar associadas aos ciclones tropicais e extratropicais do sul dos EUA. No litoral nordestino, os eventos de alta energia são promovidos pela chegada das ondas *swell* também originadas do Hemisfério Norte e que viajam com grandes velocidade e comprimento de onda, alcançando o litoral frontalmente.

Assim, Nicolodi *et al.* (2003) caracterizam esse fenômeno na costa sul quando correntes longitudinais se apresentam excepcionalmente intensas e submetidas a tempestades associadas à passagem



Figura 4 - À esquerda, o *swell* de dezembro ultrapassa a ilha barreira entre o oceano e a lagoa Catú; à direita, o *swell* de fevereiro alcança a base da duna frontal formando escarpas na praia do Japão (foto do autor -2011/2012).

de frentes frias, das quais, frequentemente atingem a costa nos meses de outono e inverno. Esses eventos geralmente acumulam água na costa resultando em marés meteorológicas de aproximadamente 1,5 m de altura, que combinadas à alta energia das ondas, são responsáveis por intensos processos de erosão costeira e transporte de sedimentos. Siegle & Calliari (2008) ao analisarem o impacto de temporais na costa Sul do Brasil observaram uma sobrelevação de 47 cm, oriunda da passagem de uma frente fria, quando a baixa de pressão atmosférica teria sido induzida pela formação de um sistema de baixa pressão atmosférica.

Na Região Metropolitana de Fortaleza, estudos mostram que a chamada “estação de ressacas” no Nordeste setentrional começa sempre no final de dezembro (Aloísio dos Santos - INPH, *com. pessoal*; Viana, 2000) e estende-se até abril com entrada de ondas *swell*. As ressacas do mar, [termo local utilizado para os eventos de alta energia] ao longo do litoral do Ceará têm consequência direta na erosão das praias e das dunas e acarretam a inundação da zona costeira (Paula *et al.* 2011; Lima, 2012). A veracidade dessas informações é compatível com as de Ritchie & Penland (1988), de que o *overwash* é causado por frentes frias e são mais frequentes entre outubro e maio, e as tempestades tropicais e furacões são mais frequentes entre junho e setembro.

Existe um pequeno intervalo nesse espectro, entre 3 e 15 dias, que combina variações de pressão atmosférica e vento que afetam o nível do mar. Esta influência meteorológica produz fluxos de baixa oscilação no nível do mar, conhecidos como marés meteorológicas, que podem se propagar ao longo ou em direção à linha de costa (Truccolo, 2006). Estes distúrbios ocorrem basicamente em duas formas: a ocorrência de variações no nível médio do mar (conhecida como “maré meteorológica”) e a geração de ondas de superfície (ressacas); ambos os efeitos podem acarretar sérias implicações para as atividades humanas na orla marítima (Camargo *et al.*, 2002) e morfologias como as restingas (Silva *et al.*, 2008). Este fenômeno pode implicar em intrusão de água do mar em local onde isso normalmente não ocorre, causando as grandes inundações; ou então, pode acarretar níveis extremamente baixos, impedindo a navegação nos canais de acesso a portos.

A combinação da maré meteorológica positiva com o *setup* de onda pode resultar em valores extremos de *runup* de onda (máxima excursão vertical do *swash* na face da praia), o que pode resultar em galgamento do cordão dunar e também de obras de defesa costeira, principalmente quando essas tem-

pestades coincidem com marés astronômicas de sizígia e, desta forma, erosão e inundações podem ocorrer em áreas onde normalmente não ocorrem (Benavente *et al.*, 2006).

O nível da água vai depende da maré astronômica prevista e de processos oceanográficos e atmosféricos que alteram seu nível relativo; além disso, há um aumento produzido por ondas, incluindo o *setup*, do qual se eleva na posição significativa da linha de costa, e o *runup* de ondas individuais além do nível médio do mar. (Nicholls & Tol, 2006; Hunter, 2011). Dessa forma, produz-se uma série de impactos na zona costeira com possíveis respostas para cada impacto, sendo que todas as análises existentes consideram apenas aspectos desses impactos-respostas devido a dados e limitações do modelo (Ruggiero *et al.*, 2001).

O registro geológico mostra que o nível do mar, motivado por fatores climáticos naturais, tem sido muito variável, da ordem de 6 a 8 m maior do que o presente durante o último período interglacial, e 130 m mais baixo durante o último período glacial (Suguio, 2003a). O nível do mar era bastante estável ao longo dos últimos 3.000 anos até cerca de meados do século XIX (Massad *et al.*, 1996 *apud* Suguio, 2003a), mas a uma taxa média global de 1,7 mm/ano durante o século XX e 3,1 mm/ano ao longo das últimas duas décadas (IPCC, 2007). Muitas regiões estão experimentando taxas de crescimento ainda maiores devido à geofísica local (*e.g.*, Louisiana, Chesapeake Bay) e forças oceanográficas nas costas do Atlântico Médio (Shepard & Curray, 1967; Houston & Dean, 2013). Outros trabalhos no Brasil também seguiram essa mesma temática, tais como: erosão da linha de costa associada a tempestades (Calliari *et al.*, 1998), maré meteorológica (Camargo *et al.*, 2002; Siegle & Calliari, 2008); marés de tempestade (Martins *et al.*, 2004); graus de vulnerabilidade devido às tempestades (Lins-de-Barros, 2005); leques de arrombamento (Silva *et al.*, 2008); passagens de tempestades e riscos costeiros (Calliari *et al.*, 2010); incidência de ondas de tempestades (Mussi, 2011); ressaca do mar (Ciavola *et al.*, 2007; Freitas *et al.*, 2010; Paula *et al.*, 2011); frequência de eventos naturais extremos (Pavan, 2012); eventos de alta energia (Lima, 2012; Aquino, 2013).

Os estudos que relatam a influência das ressacas do mar sobre a evolução costeira e morfológica são recentes e escassos no Brasil, em especial no Nordeste brasileiro. Para quantificar esse impacto é preciso definir previamente as suas características, o que é raro, pois não existe um sistema de monitorização por meio de boias ondógrafos, com exceção de

algumas poucas áreas no Brasil. Com relação às praias do Ceará, as ressacas do mar que atingem o município de Fortaleza são resultantes de uma sobrelevação dinâmica, que tem os ventos e as ondas como principais agentes indutores do empilhamento de água junto à costa (Paula, 2012).

O que se pode observar é que os eventos de alta energia, de um modo geral, possuem suas particularidades e, isso vai variar de zona costeira para zona costeira e até mesmo entre uma praia e outra, pois a morfologia e topografia tanto na parte aérea quanto subaérea, parâmetros oceanográficos, inclinação da praia, tipo de sedimento e fatores atmosféricos associados às marés (meteorológicas e astrológicas) irão implicar na formação, intensidade e incidência dessas ondas. A partir desse conhecimento é que se podem aplicar medidas preventivas satisfatórias das consequências danosas que podem causar ao ambiente costeiro para os próximos anos.

VULNERABILIDADES E RISCOS NA ZONA COSTEIRA

A vulnerabilidade, especificamente na zona costeira, vai depender do tipo de costa e de suas características geológicas, geomorfológicas e sedimentológicas, que são mais ou menos resistentes a determinado evento de ordem natural ou antrópica. O risco, assim como a vulnerabilidade, são termos amplos e envolvem variáveis que indicarão um perigo prestes a acontecer. No caso do litoral cearense, boa parte está em risco à erosão costeira e, conforme o tipo de ambiente perpassa por notáveis vulnerabilidades (Morais *et al.*, 2006).

As estruturas de engenharia costeira, a ocupação humana e outras atividades socioeconômicas aumentaram a vulnerabilidade da costa aos processos oceânicos (por exemplo, ondas de ressaca) e potencializaram o risco de erosão costeira e de galgamentos oceânicos, às vezes causando fortes danos físicos, econômicos, sociais e patrimoniais (Paula, 2012). Estimativas recentes mostram que 1,2 bilhão de pessoas vivem nos primeiros 100 km de distância da linha de costa e nas altitudes inferiores a 100 m, onde a densidade populacional é cerca de três vezes maior do que a média global (Small & Nicholls, 2003).

Além disso, os impactos da mudança climática incluirão possíveis aumentos nas temperaturas da superfície do mar, a variabilidade dos padrões de precipitação e escoamento superficial, as mudanças na frequência, intensidade e duração das tempestades e as mudanças nos padrões no clima de onda, são esperadas para um aumento dos riscos de erosão

e das inundações na maioria das regiões costeiras (Nicholls *et al.*, 2007; Di Paola *et al.*, 2011). A vulnerabilidade da costa é um tema de interesse para o planejamento futuro por esta área proporcionar grande renda para as comunidades costeiras e de toda a região (Ciavola *et al.*, 2007).

Mudanças no padrão e extensão da erosão costeira e das inundações são ainda mais preocupantes porque uma porção significativa da população mundial reside na zona costeira (Small & Nicholls, 2003). Para avaliar o risco potencial de eventos naturais ao longo a costa, é importante identificar e avaliar os elementos que contribuem para isso, ou seja, risco e vulnerabilidade. (Boruff *et al.*, 2005).

As consequências potenciais destas tempestades implicam na necessidade de ferramentas que reconheçam zonas vulneráveis ao risco de inundações. Este fator tem sido modelado e as informações resultantes constituem a base para mapeamentos de riscos costeiros (Benavente *et al.*, 2006). Em áreas costeiras onde há ocupação urbana é prudente tomar precauções contra súbitas e frequentes subidas do nível do mar potencialmente perigosas (Ferreira *et al.*, 2006).

Nesse sentido, poder-se-á definir vulnerabilidade ambiental como a capacidade de resposta numa situação de catástrofe. Quanto maior for a capacidade de resposta menor é a vulnerabilidade ambiental, assim como, os danos causados. A avaliação do risco inclui também a caracterização das incertezas inerentes ao processo de inferir o risco (Alves *et al.*, 1999). Risco ambiental, por sua vez, é definido como a caracterização dos potenciais efeitos adversos resultantes da exposição a perigos ambientais (Alves *et al.*, 1999; Coelho & Veloso-Gomes, 2005; Esteves, 2011). À luz desses fatos, a costa é considerada como uma das áreas mais vulneráveis do planeta e, por conseguinte, a comunidade científica tem significativamente investido esforços no desenvolvimento de técnicas para avaliar seus fatores causais (Di Paola *et al.*, 2011).

Berger & Iams (1996) determinaram que geoindicadores são medidas (magnitudes, frequências, taxas e tendências) de processos geológicos e fenômenos ocorrendo na superfície ou próximo dela, e sujeitos a alterações que são significativas no entendimento das mudanças ambientais ao longo de períodos médios de 100 anos. Tais processos são de natureza física (geológico-geomorfológico, climático, hidrológico), química (salinidade, pedogênese, floculação, deposição, absorção, adsorção, etc.) e biológica (produção, estocagem, consumo, estrutura das comunidades) (Tagliani, 1997 *apud* Buroff & Bonetti, 2010).

Os geoindicadores constituem uma ferramenta de gestão para avaliação rápida de risco de desastres naturais potencial, como por exemplo, perigos costeiros, quer como um suplemento para a auditoria ambiental de longo prazo e de monitorização, ou para avaliação costeira inicial como em países em desenvolvimento (Bush *et al.*, 1999). No caso da zona costeira, destacam-se os seguintes: retirada da vegetação nativa da duna, erosão, redução da faixa de praia, descontinuidade de dunas ou rebaixamento por inundação, recuo de falésias, exposição de *beachrocks*, os quais possuem classificações de risco podem assumir níveis de baixa, moderada ou alta intensidade.

Berger (1997) também concorda que os geoindicadores podem fornecer aos gestores uma ferramenta simples e qualitativa para a rápida identificação do potencial de risco, além de atualizações rápidas e planos de mitigação. Vulnerabilidade ao risco muda com frequência no ambiente costeiro, sendo as comunidades costeiras sujeitas aos processos naturais e humanos que alteram a estabilidade ambiental. O uso de geoindicadores pode favorecer Integração dos impactos da elevação do nível do mar para as práticas de gestão da zona costeira

são realizados através de avaliações da vulnerabilidade costeira.

Um modelo proposto mostrou que vulnerabilidade de diferentes ambientes costeiros para o aumento do nível do mar pode ser quantificada usando informações básicas, que incluem geomorfologia costeira, a taxa de nível do mar e a evolução da costa, fatores que se encontram enumerados no Quadro 1, segundo Özyurt & Ergin (2010). Vários métodos têm progressivamente evoluído de enfoques individuais (*e.g.*, a regra de Bruun, 1962) no sentido de incluir técnicas de interesse para a pesquisa proposta, corroborando na classificação de áreas mais vulneráveis da zona costeira, bem como identificando os principais riscos costeiros e possíveis previsões de novos eventos (*e.g.*, Berger, 1997; Bush *et al.*, 1999; Boruff *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2006; Calliari *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2011; Di Paola *et al.*, 2011).

IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DO OVERWASH

Vários artigos, teses e relatórios técnicos têm abordado o processo de *overwash* e dinâmica do de-

Quadro 1 - Fatores que contribuem com os riscos costeiros

	Definição	Causas	Consequências
Erosão costeira	É o processo pelo qual há maior retirada do material arenoso (areias), no caso das praias arenosas, que sua deposição	<ul style="list-style-type: none"> a) Falta de sedimentos (barragens + exploração de areias) b) Subida do nível médio do mar (aquecimento global ou ações locais) c) Ações antrópicas (obras costeiras, molhes, paredões, etc) 	<ul style="list-style-type: none"> a) Recuo da linha de costa b) Perda de território e de propriedade c) Redução da proteção promovida pelas dunas d) Danos em edifícios e infraestruturas
Ação das tempestades	Fenômenos atmosféricos que podem desencadear a sobrelevação do nível das águas dos oceanos alcançando as dunas frontais ou barreira arenosas, podendo estender-se continente adentro.	<ul style="list-style-type: none"> a) Mudanças Climáticas b) Sistema Atmosférico favorável à sua ocorrência devido a localização 	<ul style="list-style-type: none"> a) Induzem erosão costeira pontual (não - permanente) b) Podem induzir recuo permanente da linha de costa em locais com falta sedimentar c) Destruição e perda de propriedade
Galgamento oceânico	Quando o espraio da onda passa a linha da crista dunar ou a crista de uma ilha barreira. Depende da morfologia, batimetria, as características da onda e elevação do mar (maré + sobrelevação)	<ul style="list-style-type: none"> a) Causada por aquecimento global ou ações pontuais (isostasia local; subsidência) exploração de petróleo ou de lençóis 	<ul style="list-style-type: none"> a) Induz erosão e acumulação simultaneamente b) Importantes alterações na costa em curto período c) Pode provocar inundação de áreas economicamente importantes d) Pode levar à abertura de barras de maré

(fonte: Ferreira - riscos costeiros: identificação e prevenção).

pósito *washover*. No entanto, há ainda “espaços vazios” no entendimento que esta pesquisa/estudo pretende investigar, notadamente, quando se trata de escassez na produção científica no Brasil. Uma das principais lacunas no estudo do *overwash* é o número limitado de levantamentos na área. Além do principal fenômeno, a *tempestade*, que não ocorre de maneira contundente no Nordeste brasileiro, os estudos ficaram concentrados no Sudeste e Sul do país, onde as frentes frias e ciclones extratropicais são mais presentes. As dunas frontais são também uma das feições mais atingidas pelos eventos naturais devido à intensificação do fluxo migratório em direção ao litoral. Partindo dessa premissa e tendo em vista os prejuízos ocasionados pela incidência das ondas de tempestade, o conhecimento e a previsão desse fenômeno são imprescindíveis à gestão costeira e planejamento urbano.

A importância desse estudo está materializada nos inúmeros artigos e teses publicados desde o século XX (Figura 5) com grande expansão para os dias atuais, na medida em que, são temas fascinantes nas diversas áreas ligadas ao meio ambiente. Ao mesmo tempo é necessário o aprofundamento dos referidos temas, envolvendo os mecanismos e especificidades da sua origem, devido às repercussões frequentemente catastróficas. Assim, o estudo das praias envolve uma série temporal que em conjunto torna-se possível o acompanhamento de para-

digmas. Estes podem se agrupados dentro de quatro áreas, a geológica, geomorfológica, oceanográfica e da sedimentológica, das quais serão descritas abaixo.

Até o primeiro semestre de 2013, em torno de 108 artigos foram publicados em revistas internacionais contendo algum assunto que tivesse correlação com eventos de alta energia (*overwash*), sem contar com as teses, notas científicas, congressos internacionais que aqui não foram contabilizados, mas que pode ser resumidamente visualizado na Tabela I. Destes, 36% têm o *overwash* como objeto de estudo, 37% como foco as tempestades, eventos de alta energia, “ressaca do mar” (*storm surge*), 27% têm o aumento do nível do mar como fator dos eventos de alta energia, 14% destacam o *overtopping* como mecanismo importante na deposição de sedimentos no pós-praia e 3,8% usam o termo *washover* como a morfologia do depósito do *overwash*.

No Brasil, o esforço editorial ainda é modesto, tanto pela insuficiência dados, quanto pela natureza dos assuntos investigados, que ainda estão sendo adaptados à realidade das condições oceanográficas, atmosféricas e continentais, notadamente no Nordeste, onde a incidência de tempestades e ciclones não é formada no local. Assim, o maior número de trabalhos concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, principalmente, pela ocorrência de frentes frias e ventos de baixa pressão.

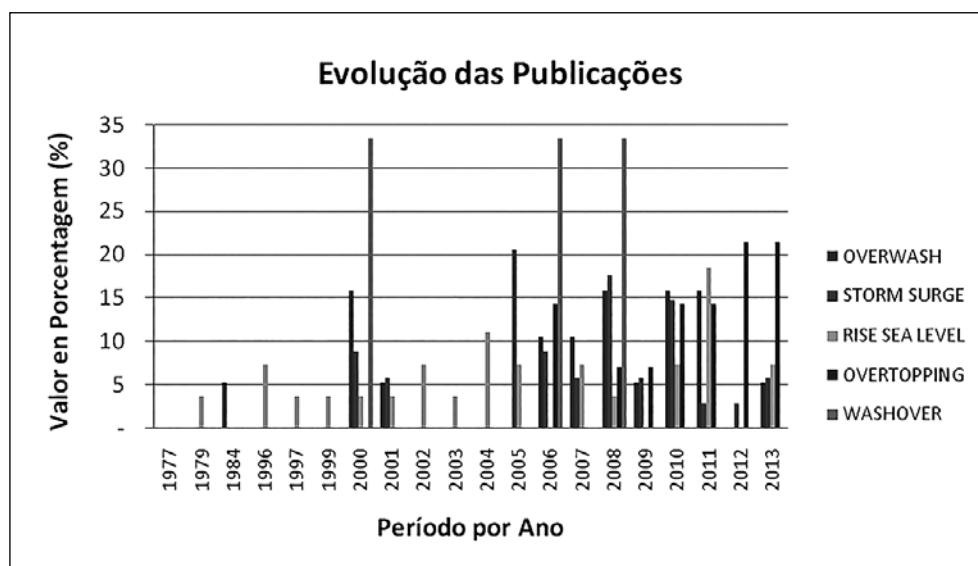


Figura 5 - Variação temporal anual do número de publicações sobre diversos assuntos relacionados com a dinâmica costeira, no período 1970 - 2013.

Tabela I - Paradigmas do Estudo das Praias aos Eventos de Alta Energia (adaptado de Short, 1999).

Paradigma	Escala	Características	Principais Artigos	Principais Conferências Internacionais
Tempestades <i>Storm Surge</i>	Eventos Instantâneos	Ciclones Extratropicais/ Frentes Frias	Donnelly <i>et al</i> , 2005 Calliari <i>et al</i> , 2010 Todd & Walton, 2005; Houser, 2012	- <i>Seventh European Conference on Severe Storms, Finland (2013)</i> - <i>12th International Storm Surges, Congress Risk and Management of current and future Storm Surges. Germany. (2010)</i>
Galgamentos <i>Overtopping</i>	Eventos Instantâneos	Relação entre o <i>continuum</i> de onda /acresção vertical do <i>swash</i>	Sallenger <i>et al</i> , 2000 Orford e Carter, 1982 Park & Edge, 2010	- <i>3rd International Conference on Physical Coastal Processes, Management and Engineering, Spain (2013). Discussed about Wave modelling</i>
<i>Overwash</i>	Eventos Instantâneos	Sobreelevação do nível do mar acima da maré normal/ extensão do <i>overtopping</i>	Donnelly <i>et al</i> , 2001 Ritchie & Penland, 1988 Matias <i>et al</i> , 2010	- <i>Coastal Symposium - ICS2013. Coastal hazards and extreme storms, UK.</i>
<i>Washover</i>	Anos - Décadas	Resposta deposicional pelo <i>overwash</i>	Leatherman, 1976 Hochel and Wampfler, 1989 Bray and Carter, 1992	- <i>8th IAG International Conference on Geomorphology. Paris (2013)</i>
Aumento do Nível do mar <i>Rise Sea Level</i>	Eventos Climáticos e Geológicos	Elevação da temperatura da superfície do mar/ interglaciação	Nicholls & Tol, 2006; Hunter, 2011 Houston & Dean, 2013	- <i>International Conference on Climate, New York (2008/2012)</i> - <i>Marine Science Symposium, Lisbon (2013)</i>
Risco E Vulnerabilidade	Eventos Instantâneos/ Anos - Décadas	Erosão Costeira/ Inundações/ Ação antrópica	Nicholls <i>et al</i> , 2007 Ciavola <i>et al</i> , 2007 Boruff <i>et al</i> , 2005	<i>III International Congress II Luso-Brazilian and I Ibero-American RISKS, Brazil (2014)</i>

EVENTOS DE ALTA ENERGIA NO LITORAL DO CEARÁ

Eventos de ressaca seguidos de *overwash* ocorrem sazonalmente nos 573 km do litoral cearense como consequência da sobrelevação dos níveis da água do mar. Viana (2000) descreve uma sequência de ressacas na costa setentrional do Nordeste, bem como nas ilhas oceânicas brasileiras, iniciada em 23 de outubro de 1999, e terminada em março de 2000, como resultado de uma coincidência entre marés muito altas e ondas longas (marulhos) vindas do quadrante norte, geralmente entre os meses de dezembro e março, causados por furacões extratropicais.

Na última década, grande parte do litoral cearense teve sua área reduzida, tornando praias mais estreitas, com granulometria de média a muito grossa e dunas frontais reduzidas de altura ou com alguns canais entre dunas por onde passaram as ondas de ressaca. Esse evento de alta energia tem sido observado na área de estudo com efeitos danosas sobre estruturas construídas na pós-praia,

como restaurantes, barracas e casas de veraneio, conforme divulgação feita por noticiários e entrevistas com moradores (Oliveira, 2009).

Os ciclones extratropicais impactam a região costeira do Ceará, como é o caso da ressaca provocada em março de 2001, resultando em prejuízo econômico em alguns setores da orla de Fortaleza (Silva *et al.*, 2011). As consequências desses eventos de alta energia são temas constantes na imprensa local (ver textos abaixo), principalmente os ocasionados pela coincidência das maiores amplitudes das marés (~3,2 m) associadas a maior frequência das ondas *swell* com períodos superiores a 10 s.

“A força das ondas chegou a arremessar pedras, destruir bancos e até paredes. Parte do asfalto foi tomada pela areia. No calçadão, as marcas da ressaca ficaram nos montes, que cobriam alguns trechos. Pela manhã, ônibus e vários carros ficaram atolados. Um deles passou mais de quatro horas com os pneus enterados à beira do asfalto. À tarde, a situação voltou a se repetir. “Havia muita água e areia na pista quando passamos por aqui. O motorista encostou o carro

para os passageiros descenderem e não conseguiu mais sair”, conta o cobrador Francisco Tenório Ferreira. “Quanto mais ele tentava tirar o ônibus, mais se atolava na areia molhada”. **Ressaca do Mar Causa Transtornos na Orla (26-10-99), Felipe Abud/ Antônio Carlos Vieira.**

“Por meio metro as águas não voltaram a ultrapassar o espigão da Praia de Iracema ontem pela manhã. **CICLONE** - As ondas altas registradas no litoral norte brasileiro são decorrentes de um ciclone extratropical que está sendo observado há alguns dias no Atlântico Norte. O fenômeno está acompanhado de ventos com intensidade superior a 16m/s, sendo registrada no litoral dos Estados Unidos, fronteira com o Canadá devido à intensidade do ciclone, muitas ondas estão se propagando para o hemisfério sul e atingindo o litoral norte do Brasil. **Cid Barbosa Ondas Fortes e Maré Alta Preocupam os Institutos e Defesa Civil (03/2001)**”.

“O clima do Atlântico Norte está gerando ondas tipo “swell” que devem chegar com força ao litoral, especialmente no período de novembro a abril. As ondas terão alturas máximas entre 2,5 e três metros, com

períodos máximos de 12 a 16 segundos. Quem explica a previsão é o técnico em hidrografia Aloísio Araújo, do Instituto Nacional de Pesquisas Hidrográficas (INPH). O Centro de Hidrografia da Marinha, através do Serviço Meteorológico Marinho, alertou para o mau tempo, o que significa ventos fortes, com rajadas de vento, ressaca atingindo a costa, ondas grandes e visibilidade restrita em alto mar. De acordo com o gerente do Departamento de Meteorologia da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), Davi Ferraz, as ondas esperadas até o dia 21 podem não ocasionar destruição na orla. Isso porque as tábuas de marés não devem apontar registros muito altos, devido à fase da lua, que, no período, não estará cheia ou nova. **LITORAL CEARENSE: Ondas altas causam riscos aos banhistas. Contribuição de www.diariodo-nordeste.com.br 17 de janeiro de 2009.**”

“Com a ressaca do mar no litoral de Fortaleza, a maré alta encheu as ruas da Avenida Beira Mar de areia da praia e atola veículos na via. Os carros passam no trecho com dificuldade, e alguns precisam ser empurrados para sair da areia. **Portal.G1-Ceará, em 12 de março de 2013, as 18h35.**

Quadro 2 - Exemplos de algumas ressacas com destruição noticiadas em jornal e trabalhos científicos no período 2005 - 2011 (fontes: Oliveira, 2009; Lima, 2012; Aquino, 2013).

Localização	Data	Danos
Fortaleza	10/2005	Destruição de barracas
	01/2009	Destruição do calçadão
Aquiraz	08/2007	Destruição de barracas, restaurantes e dunas/ galgamento
	10/2007	Destruição em parte da Duna no Iguape
	09/2007	Destruição de barracas, restaurantes e dunas/ galgamento
Caucaia	2008	Escarpa dunares, destruição de barracas e restaurantes
	03/2008	Destruição de dunas e faixa de praia
Caponga	03/2013	Galgamento e destruição da obra de contenção
	03/2008	Destruição de dunas e faixa de praia
Icapui	02/2011	Erosão das dunas frontais/ galgamento*
	06/2012	Erosão da praia e dunas frontais / galgamento**
	09/2011	Erosão das dunas frontais/ máximo <i>rumup</i> *
	01/2009	Destruição de dunas e faixa de praia, restaurantes
Fleixeiros	01/2009	Destruição de dunas e faixa de praia, restaurantes
Mundaú	01/2009	Destruição de dunas e faixa de praia, restaurantes
Alagoinha	01/2009	Destruição de dunas e faixa de praia, restaurantes
Icapui	01/2009	Destruição de dunas e faixa de praia, restaurantes
	01/2011	Escarpa nas falésias e erosão na pós-praia***

Nos últimos 57 anos, foram registrados 162 eventos de ressaca, isto é, cerca de três episódios de ressacas por ano em Fortaleza (Paula *et al.*, 2011). Vale ressaltar também, que a maior contribuição do trabalho foi a partir da década de 1980, quando as ressacas foram uma ameaça para as estruturas urbanas. No caso de Aquiraz, município da RMF, há situações em que estas atingem as dunas frontais e cristas praias e noutra situação, as ondas chegam próximo às construções (*e.g.*, Porto das Dunas/Beach Park). Na desembocadura do Pacoti ocorre o galgamento propriamente dito. (Figura 6)

O setor com dunas frontais na Praia da Caponga é vulnerável ao regime de galgamento e colisão durante os períodos de ressaca do mar, responsáveis pelo recuo da linha de costa e no tipo de sedimentos da praia (Lima, 2012). No mês de março de 2013, a ressaca do mar provocou o transporte de areia para a avenida e inundação da orla urbana da Praia dos Diários, em Fortaleza. Por outro lado, inundações e erosão provocadas por ressacas do mar em uma duna não ocupada não tem aspectos de drama social e conseqüentemente não são normalmente divulgadas pelos órgãos de comunicação social, ou seja, o registro das ressacas do mar em jor-

nais ocorre em função do nível de ocupação do litoral. Percebe-se que poucos trechos do litoral cearense ainda encontram-se preservados ou em estágio inicial de recuo da linha de costa e erosão costeira (*e.g.*, Maia *et al.*, 1998; Pinheiro *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2005; Moraes *et al.*, 2006; Rocha *et al.*, 2011; Paula *et al.*, 2013; Aguiar *et al.*, 2013) e, mesmo em praias adjacentes, estas mudanças não são uniformes em toda a extensão da linha de costa.

Os eventos de alta energia podem vir de duas maneiras: (1) através de ciclones e tempestades tropicais e extratropicais do Hemisfério Norte e chegam ao Nordeste brasileiro na forma de *swell* e, portanto, associados à ocorrência de ressacas; (2) em associação com ventos locais (*nons-torms*), como é o caso do litoral do Ceará. No segundo semestre, precisamente de agosto a outubro, ventos alísios de SE são capazes de transferir energia para as ondas e, se formadas durante as marés de sizígia, provocam o empilhamento das águas próximo à costa que, dependendo da topografia da praia, o espraçamento máximo (*runup*) pode alcançar a crista da duna frontal ou alguma estrutura urbana resultando em possíveis galgamentos e/ou inundações. (Figura 7).



Figura 6 - Galgamento do *spit* arenoso na desembocadura do estuário do Rio Pacoti, em abril de 2012 (*fonte*: Lidriana Pinheiro).



Figura 7 - À esquerda, na Praia de Aquiraz destaca-se o ângulo que se forma entre o estirâncio e a pós-praia (escarpa); à direita, no Porto das Dunas, formação de escarpas próximas à estrutura do Beach Park Resort (*fonte*: autor, em agosto de 2011).

Morais *et al.* (2009) alertam que para os próximos 100 anos, havendo aumento do nível do mar, como previsto, haverá aumento no volume de água dos estuários associado ao *deficit* sedimentar e conseqüente ocorrência de inundações causada pela fragilidade do ambiente costeiro. Vizinho ao município de Aquiraz, o estuário do rio Malcozinhado, em Águas Belas, desde a década de 1950 é impactado pela diminuição da vazão fluvial e migração do canal, resultando em erosões na desembocadura e redução no fornecimento de sedimentos às praias adjacentes (Pinheiro *et al.*, 2006).

O grau de consolidação urbana é um fator importante no índice de vulnerabilidade. As praias da Prainha, Japão e Porto das Dunas, no Município de Aquiraz, monitoradas ao longo de uma extensão de 11 km, são na seqüência: semi-urbanizada, natural com alguma ocupação e densamente ocupada. A infraestrutura é voltada predominantemente para o turismo e o lazer. Obviamente as respostas serão diferentes quanto aos eventos de alta energia, bem como, na determinação dos riscos costeiros e graus de vulnerabilidades.

A praia Prainha de Aquiraz possui extenso campo de dunas móveis, área em que cristas praias também são encontradas, ora recobertas por alguma vegetação gramínea, ora retrabalhadas pela ação dos ventos e das ondas. Esta praia é ocupada, majoritariamente, por barracas de praia localizadas no pós-praia, onde as ondas alcançam as estruturas e, durante as marés de sizígia, arrastam materiais (coqueiros artificiais, pedaços de madeira, suporte dos guarda-sóis) para o estirâncio (Figuras 8 e 9); mais este é ocupado por pousadas, hotéis e casas de veraneio. Seguindo a faixa de praia sentido longitudinal, escarpas nas

dunas podem ser vistas medindo mais de 1,50 m e linhas de preamar que ultrapassam essa escarpa. No pós-praia são encontradas conchas e alguns cascalhos esparsos formando uma linha que identifica até onde foi o máximo alcance do espreamento.

A Praia do Japão é ainda considerada natural, pois as construções, apesar de consideráveis em área e extensão, ainda não foram fatores decisivos para degradação da praia, uma vez que os processos erosivos demandam mais tempo. Por outro lado, o desmonte de dunas para ocupação e passagem de carros é preocupante considerando a sua importância no balanço sedimentar. Anterior a isto, o extenso campo de dunas do tipo frontal, durante as marés de sizígia no primeiro semestre, formam escarpas nas dunas com 1,60 m de altura. Indicadores desses eventos são também os sedimentos mais grossos e conchas na base da duna há mais de 20 m de estirâncio. Nenhum registro visual de canais de possível *overwash*, mas em análise sedimentológica predominam sedimentos grossos a sotamar da duna para o período de ressaca (Figura 9) O intrigante desse



Figura 8 - À esquerda, ocupação de barracas-de-praia e estruturas na faixa de praia e pós-praia; à direita, linhas de preamar e escarpas indicam a atuação e o alcance das ondas na Prainha de Aquiraz (fonte: autor, em 2012).

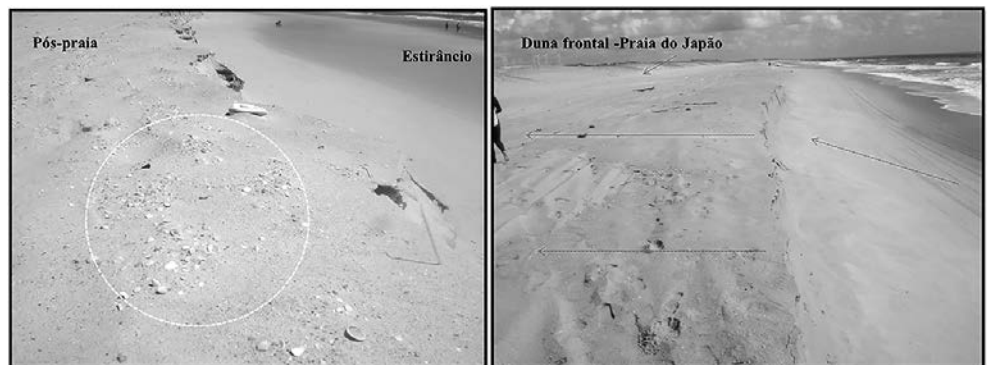


Figura 9 - Sedimentos mais grossos encontrados na pós-praia da Praia do Japão e formações de escarpas praias (fonte: autor, em 2011).

setor é o nível de erosão em relação às praias vizinhas que são expressivamente mais ocupadas.

Diferente das demais, a praia do Porto das Dunas sempre foi conhecida pelos inúmeros *resorts* e o parque aquático Beach Park. A urbanização é densa e conseqüentemente, a modificação na paisagem é notória, pois não são vistas dunas e faixa de praia mais estreita comparada às outras praias de Aquiraz. As ondas chegam muito próximas às instalações dos *resorts* e casas de veraneio, o que a torna pouco transitável para visitantes durante a maré alta (Figura 10).

Dentro desse contexto, há muito que se avançar no conhecimento dos eventos de alta energia e suas implicações na costa do Ceará, principalmente quando se fala no aumento da sua frequência e intensidade decorrentes de mudanças climáticas globais. Urge buscar meios eficientes que possibilitem a convivência com eventos dessa natureza para evitar tantos transtornos ao litoral, que são observados desde a destruição da infraestrutura urbana até a salinização de aquíferos costeiros. A implantação de um sistema de previsão e recuperação, com participação efetiva dos órgãos de governo e de equipes multidisciplinares, é imprescindível para a compatibilização dos processos naturais, o crescimento das cidades e a gestão integrada da zona costeira.

Agradecimentos - Ao projeto Vulnerabilidade de Zonas Costeiras Naturais e Urbanas a Eventos de Tempestade: o Caso do Litoral de Fortaleza- Edital Universal-CNPq. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado através do INCT - TMCOcean. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Ao Laboratório de Oceanografia Geológica do Instituto de Ciências do Mar/UFC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, P.F.; El-Robrini, M.; Freire, G.S.S. & Carvalho, R.G. Morfodinâmica das praias dominadas por mesomares nas planícies arenosas de Almofala, NW, Ceará (Brasil). *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v.40, n.1, p.61-73, 2013.
- Alves, F.; Pinto, F.T. & Ferreira, J.C. A análise da vulnerabilidade e do risco na zona costeira como contributo para a tomada de decisão, p.559-566, in *III Congresso de Geografia Portuguesa*, Porto, 1999
- Aquino, M.C. *Evolução e dinâmica sócio-ambiental na Praia da Coppinga, Cascavel, Ceará, Brasil*. Dissertação de Mestrado em Geografia, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2012.
- Armon, J.W. & Mccann, S.B. Longshore variations shoreline erosion, malpeque barrier system, Prince Edward Island. *The Canadian Geographer*, v. 23, p.18-31, 1979.
- Bates, R.L. & Jackson, J.A. *Glossary of Geology*. American Geological Institute, 3rd edition, 788 p., Alexandria, 1987.
- Belém, A.L. *Impacto das mudanças climáticas globais no risco de Inundações em zonas costeiras*. Jornadas Internacionales sobre Gestión del Riesgo de Inundaciones y Deslizamientos de Laderas, 2007.
- Benavente, J.; Del Río, L.; Gracia, F.J. & Martínez-Del-Pozo, J.A. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay, Natural Park, SW Spain). *Cont. Shelf Res.*, v. 26, p.1061-1076, 2006.
- Bender, M.A. & T.R. Knutson, R.E. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*, v.327, p. 454-458, 2010.



Figura 10 - A maciça ocupação da praia do Porto das Dunas e alcance das ondas próximas às estruturas durante a maré cheia (fonte: autor, em 2011-2012).

- Berger, A.R. & Iams, W.J. *Geoindicators: assessing rapid environmental changes in earth systems*. A.A. Balkema, 466 p., Rotterdam, 1996.
- Berger, A.R. Assessing rapid environmental change using geoindicators. *Environ. Geol.*, v.32,n.1, p.36-44, 1997.
- BRASIL *Monitoramento ambiental integrado e avaliação dos processos de erosão costeira nos municípios de Paulista, Olinda, Recife e Jaboatão dos Guararapes*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2010.
- Bray Jr.,T.F. & Carter, C.H. Physical processes and sedimentary record of a modern, transgressive, lacustrine barrier island. *Mar. Geol.*, v.105, p.155-168, 1992.
- Boruff, B.J.; Emrich, C. & Cutter, S.L. Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *J. Coast. Res.*, v.21, n.5, p.932-942, 2005.
- Bruun, P. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division*, v.88, p.117-130, 1962.
- Buroff, F.M. & Bonetti, J. Avaliação da suscetibilidade à erosão costeira de praias da Ilha de Santa Catarina. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol*, v.14, n.1, p.9-20 2010.
- Bush, D.M.; Neal, J.W.; Young, R.S. & Pilkey, O.H. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal hazard risk and mitigation. *Ocean Coast. Manag.*, v.42, p.647-670, 1999.
- Callaghan, D. P. & Wainwright, D. The impact of various methods of wave transfers from deep water to nearshore when determining extreme beach erosion. *Coastal Engineering*, v.74, p.50-58, 2013.
- Calliari, L.J.; Tozzi, H.A.M. & Klein, A.H.F. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in southern Brazil- Rio Grande to Chuí, RS. *An. Acad. Bras. Ciên.* Rio de Janeiro, v.70. n.2, p.231-247, 1998.
- Calliari, L.J.; Guedes, R.M.C.; Pereira, P.S.; Lélis, R.F.; Antikeira, J.A. & Figueiredo, S.A. (2010). Hazards and risks associated to coastal processes along the southern Brazilian coastline: a synthesis. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, v.14, n.1, p.51-63, 2010.
- Camargo, R.; Harari, J.; Biscaro, T.S. & Biazeto, B. Avaliação das previsões de maré meteorológicas realizadas com o Princeton Ocean Model no Laboratório Master/USP, in *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Foz do Iguaçu, 2000.
- Ciavola, C.P.; Armaroli, J.; Chiggiato, A.; Valentini, M.; Deserti, L.; Perini & Luciani, P..Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy), in *Proceedings of the 9th International Coastal Symposium*, 2007.
- Coelho, C.E. & Veloso-Gomes, F. Classificação de vulnerabilidades e riscos como contributo no planeamento das zonas costeiras, in *III Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras de Países de Expressão Portuguesa*, Maputo, 2005.
- Dias, J.A.; Ferreira, Ó. & Pereira, A.R. *Estudo sintético de diagnóstico da geomorfologia e da dinâmica sedimentar dos troços costeiros entre Espinho e Nazaré*. Edição Electrónica. <http://www.w3.ualg.pt/~jdiad/JAD/ebooks> 2005.
- Di Paola, G.; Iglesias, J.; Rodríguez, G., Benassai, G.; Aucelli, P; & Pappone, G. Estimating coastal vulnerability in a meso-tidal beach by means of quantitative and semi-quantitative methodologies. *J. Coast. Res.*, n.61, p.303-308, 2010.
- Donnelly, C.; Kraus, N. & Larson, M. State of knowledge on measurement and modeling of coastal overwash. *J. Coast. Res.*, v.22, n.4, p.965-991, 2006a.
- Donnelly, C.; Wamsley, V.; Kraus, N. C.; Larson, M. & Hans H. Morphologic classification of coastal overwash. *Coastal Engineering*, p.2805-2817, 2006b.
- Donnelly, J.P.; Bryant, S.S.; Buther, J.; Dowling, J.; Fan, L.; Hausmman, N.; Newby, P.; Shuman, B.; Stern, J.; Westover, K. & Webb, T. A 700-year sedimentary record of intense hurricane landfalls in southern New England. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, v.113, p.714-727, 2001a.
- Donnelly, J.P.; Rolls, S.; Wengren, M.; Buther, J.; Lederer, R. & Webb, T. Sedimentary evidence of intense hurricane strikes from New Jersey: *Geology*, v.29, p.615-618, 2001b.
- Esteves, C.J.O. Risco e vulnerabilidade socioambiental: aspectos conceituais. *Caderno IPARDES*, Curitiba, v.1, n.2, p.62-79, 2011.
- Ferreira, O.; Garcia, T; Matias, A; Taborda, R & Dias, A. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Research*, n.26, p.1030-1044, 2006.
- Fisher, J.S.; Leatherman, S.P. & Perry, F.C. Overwash processes on Assateague Island, p1194-1211, in *Proceedings 14th Coastal Engineering Conference*, Copenhagen, 1974.
- Freitas, D.; Araujo, R.S.; Klein, A.H.F. & Meneses, J.T. Quantification of coastal hazards and future shoreline position for Itapocoró Bay - SC. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol*, v.14, n.1, p.39-49, 2010.
- Houser, C. Feedback between ridge and swale bathymetry and barrier island storm res-

- ponse and transgression. *Geomorphology*, v.173/174, p.1-16, 2012.
- Houston, J.R. & Dean, R.G. Effects of sea-level decadal variability on acceleration and trend difference. *J. Coast. Res.*, 2013.
- Hunter, J. A simple technique for estimating an allowance for uncertain sea-level rise. *Climatic Change*, 2011.
- Kerry, E. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, v. 436, 2005.
- Kochel, C.R. & Wampfler, L.A. Relative role of overwash and aeolian processes on washover fans, Assateague Island, Virginia-Maryland. *J. Coastal Res.*, v.5, p.453-475, 1989.
- Larson, M.; Wise, R.A. & Kraus, N.C. *Coastal overwash, part 2: upgrade to SBEACH*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Technical Note, Vicksburg, 2004a.
- Larson, M.; Erikson, L. & Hanson, H. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, v.51, p.675-696, 2004b.
- Leatherman, S.P. Barrier island dynamics: Overwash processes and aeolian transport, p.1958-1974, in *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 1976.
- Lima, R.S. *Vulnerabilidade da linha de costa a eventos de alta energia na Praia da Caponga - Cascavel, Ceará*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 94 p., Fortaleza, 2012.
- Lins-de-Barros, F.M. *Risco e vulnerabilidade à erosão costeira no Município de Maricá*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 147 p., Rio de Janeiro, 2005.
- Maia, L.P.; Jimenez, J.A.; Morais, J.O. The coastline of Fortaleza city: a product of environmental impacts caused by the Mucuripe harbor. *Arq. Ciên. Mar*, v.31, p.93-100, 1988.
- Matias, A. *Overwash sedimentary dynamics in the Ria Formosa barrier islands*. Ph.D. Thesis, Universidade do Algarve, Faro, 2006.
- Matias, A. *et al.* Short-term morphodynamics of non-storm overwash. *Rev. Mar. Geol.*, n.274, p.69-84, 2010.
- Martins, L.R.; Tabajara, L.L. & Ferreira, E.R. Linha de costa: problemas e estudo. *Revista Gravel*, Porto Alegre, n.2, p.40-56, 2004.
- Morais, J.O.; Irion, G.F.; Pinheiro, L.S. & Kasbohm, J. Preliminary results on Holocene sea-level changes on Ceara coast/Brazil. *J. Coast. Res.*, v.56, p.646-649, 2009.
- Morais, J.O.; Pinheiro, L.S.; Medeiros, C. & Pitombeira, E.S. Erosive processes monitoring linked to the estuarine evolution systems nearby Águas Belas, Cascavel, Ceará, Brazil. *J. Coast. Res.*, v.39, n.1, p.1403-1406, 2006.
- Morton, R.A.; Gonzalez, J.L.; Lopez, G.I. & Correa, I.D. Frequent non-storm washover of Barrier Islands, Pacific Coast of Colombia. *J. Coast. Res.*, v.16, n.1, p.82-87, 2000.
- Morton, R.A. & Sallenger Jr., A.H. Morphological impacts of extreme storms on sandy beaches and barriers. *J. Coast. Res.*, West Palm Beach, v.19, p.560-573, 2003.
- Mussi, C.S. *Avaliação da sensibilidade ambiental costeira e de risco à elevação média dos oceanos e incidência de ondas de tempestades: um estudo de caso para a Ilha de Santa Catarina, SC*. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, 2011.
- Nicolodi, J.L.; Toldo Jr., E.E. & Almeida, L.E.S.B. Correntes costeiras induzidas por eventos de tempestades no litoral médio do Rio Grande do Sul, in *II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 2003.
- Nicholls, R.J. & Tol, R.S.J. Impacts and responses to sea-level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, v.364, p.1073-1095, 2006.
- Nicholls, R.J.; Tol, R.S.J. & Hall, J.W. Assessing impacts and responses to global mean sea-level rise, p.119-123, in Schlesinger, M.E. *et al.* (eds.), *Human-induced climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- Oliveira, G.G. *Análise integrada da linha de costa situada entre o riacho Barro Preto e rio Catu, Aquiraz, Ceará*. Dissertação de Mestrado em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- Oliveira, G.G.; Pinheiro, L.S. & Morais, J.O. *Erosive processes and economic valoration impacts at Caucaia littoral, northeastern Brazil*. International Conference on Integrated Coastal Zone Management, 2005.
- Orford, J.D. & Carter, R.W.G. Crestal overtop and washover sedimentation on a fringing sandy gravel barrier coast, Carnsore Point, southeast Ireland. *J. Sediment. Petrol.*, v.52, p.265-278, 1982.
- Özyurt, G. & Ergin, A. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. *J. Coast. Res.*, v.26, n.2, p.265-273, 2010.
- Park, Y.H. & Edge, B.L. An empirical model to estimate overwash. *J. Coast. Res.*, v.26, n.6, p.115-116, 2010.

- Paula, D.P. *Análise dos riscos de erosão costeira no litoral de Fortaleza em função da vulnerabilidade aos processos geogênicos e antropogênicos*. Tese de Doutorado em Ciências do Mar, Universidade do Algarve, 364 p., 2012.
- Paula, D.P.; Dias, J.M.A.; Ferreira, O.; Almeida, L.P.M. & Morais, J.O. Impactos costeiros induzidos por ressacas do mar ao longo do litoral norte de Fortaleza-CE (Brasil). *Simpósio Internacional de Climatologia*, 2011.
- Paula, D.P.; Dias, J.M.A.; Souza, M.A.L.; Farrapeira, C.A. & Barros, E.L. Monitorização de curto prazo da Praia do Icaraí (Caucaia, Ceará, Brasil) após a construção da estrutura rígida do tipo bagwall para controle da erosão, in *VI Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Maputo, 2013.
- Pavan, R.A. *Avaliação da sensibilidade ambiental costeira e de risco sócio ambiental do litoral centro-sul catarinense a eventos naturais extremos e a elevação do nível médio dos oceanos*. Dissertação de Mestrado, Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade do Vale do Itajaí, 2012.
- Pinheiro, L.S.; Morais, J.O. & Medeiros, C. Mudanças da linha de praia e feições morfológicas em Cascavel-Estado do Ceará. *Arq. Ciên. Mar, Fortaleza*, v.34, p.117-130, 2001.
- Pinheiro, L.S.; Medeiros, C. & Morais, J.O. Erosive processes monitoring linked to the estuarine evolution systems nearby Águas Belas, Cascavel-CE, Brazil, p.1403-1406, in *Proceedings of the 8th International Coastal Symposium*, Itajaí, 2006.
- Ritchie, W. & Penland, S. Rapid dune changes associated with overwash processes on the deltaic coast of South Louisiana. *Mar. Geol.*, v.81, p.97-122, 1988.
- Rocha, G.C. & Diniz, M.T.M. Implicações da erosão costeira em atividades econômicas na Praia da Caponga - Cascavel - Ceará. *Scientia Plena*, v.7, 2011.
- Roig-Munar, F.X.; Matín-Prieto, J.A.; Rodríguez-Perea, A.; Pons, G.X.; Gelabert, B. & Mir-Gual, M. Risk assessment of beach-dune system erosion: beach management impacts on the Balearic Islands. *J. Coast. Res.*, v.28, n.6, p.1488-1499, 2012.
- Ruggiero, P.; Gelfenbaum, G.; Thompson, D. & Kaminsky, G.M. Exploring the relationship between nearshore morphology and shoreline change, p.627-636, in *Proceedings of Coastal Dynamics '01*, ASCE, 2001.
- Sallenger, A.H. Storm impact scale for barrier islands. *J. Coast. Res.*, v.16, n.3, p.890-895, 2000.
- Schwartz, R.K. Bedform and stratification characteristics of some modern small-scale washover sand bodies. *Sedimentology*, v.29, p.835-849, 1982.
- Shepard, F.P. & Curray, J.R. Carbon-14 determination of sea level changes in stable areas. *Progress in Oceanography*, v.4, n.2, p.283-291, 1964.
- Shepard, F.P. *Submarine geology*. Harper and Row Publishers, 517 p., New York, 1973.
- Siegle, E. & Calliari, L.J. High-energy events and short-term changes in superficial beach sediments. *Braz. J. Oceanogr.*, São Paulo, v.56, n.2, p. 149-152, 2008.
- Silva, A.L.C.; Silva, M.A.M.; Santos, C.L.; Ribeiro, G.P.; Santos, R.A. & Vasconcelos, S.C. Retrogradação da barreira arenosa e formação de leques de arrombamento na Praia de Itaipuaçu (oeste de Maricá, RJ). *Rev. Bras. Geomorfol.*, v.9, n.2, 2008.
- Silva, A.C.; Façanha, P.; Bezerra, C.; Araujo, A. & Pitombeiras, E. Características das ondas "sea" e "swell" observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. *Trop. Oceanogr.*, Recife, v.39, n.2. p.17-26, 2011.
- Small, C. & Nicholls, R.J. A global analysis of human settlement in coastal zones. *J. Coast. Res.*, v.19, n.3, p.584-599, 2003.
- Souza, P.H.G.O.; Siegle, E. & Tessler, M.G. Environmental and anthropogenic indicators for coastal risk assessment at Massaguaçu Beach (SP), Brazil, in *Proceedings of the 11th International Coastal Symposium*, Szczecin, 2011.
- Suguio, K. Tópicos de Geociências para o desenvolvimento sustentável: as regiões litorâneas. *Geologia, ser. Didática*, São Paulo, v.2, n.1, 2003.
- Tinh, N.X. *Modelling of coastal overwash*. Ph.D. Thesis, Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, 82 p., 2006.
- Titus, J.G. Rising seas, coastal erosion and the taking clause: how to save wetlands and beaches without hurting property owners. *Maryland Law Review*, v 57, n.4, 1998.
- Todd, L. & Walton, Jr. Short-term storm surge forecasting. *J. Coast. Res.*, v.21, n.3, p.421- 429, 2005.
- Truccolo, E.C.; Franco, D. & Schettini, C.A.F. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. *J. Coast. Res.*, v. 39, p.547-552, 2006.
- Viana, M.L. Ressacas na costa norte do Nordeste causadas por furacões extratropicais, in *IX Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, 2000.