

QUANTIFICAÇÃO DE PERIGOS COSTEIROS E PROJEÇÃO DE LINHAS DE COSTA FUTURAS PARA A ENSEADA DO ITAPOCORÓI – SC

FREITAS, D.*; ARAUJO, R.S.; KLEIN, A.H.F. & MENEZES, J.T.

Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar - CTTMar, Universidade do Vale do Itajaí - UNIVALI, Cx. Postal 360, Itajaí, SC, CEP 88302-202, Brasil.

*Corresponding author: dominicio@univali.br

ABSTRACT

Freitas, D.; Araujo, R.S.; Klein, A.H.F. & Menezes, J.T. Quantification of coastal hazards and future shoreline position for ITAPOCORÓI Bay – SC. 2010. Braz. J. Aquat. Sci. Technol. 14(1): 39-49. ISSN 1808-7035. This work has applied an integrated method for defining set-back lines associated with coastal hazards on sandy shores for a 50-year period of interest. This method is based on the shoreline evolutionary trend being the basis for the first set-back line determination. Afterwards the set-back line were adjusted by incorporating changes associated with the acceleration of sea-level rise and the evaluation of the consequences (instantaneous shoreline retreat and potential flood zone) of an extreme storm. The study area was Itapocorói Bay, in northern coast of Santa Catarina State, southern Brazil. The determined set-back lines were plotted over rectified aerial photographs, allowing for a straight-forward interpretation of results. The segments northward of Piçarras river mouth and right before the Itajuba headland were the most susceptible zones due coastal hazard mentioned. The integrated method showed to be an important tool for coastal management since it adopts a worst-case scenario approach.

Keywords: Coastal hazards mapping; Shoreline evolution; Sea-level rise; Extreme storms; Itapocorói Bay, Santa Catarina – Brazil

INTRODUÇÃO

Mudanças no nível médio relativo do mar podem afetar processos de evolução da linha de costa e alterar sua conformação. Sabe-se também que muitas áreas costeiras estão em risco devido aos perigos naturais e/ou induzidos (proveniente de ações antrópicas). Esses perigos, como retração da linha de costa e inundações costeiras, são ocasionados por alterações no balanço sedimentar, grandes tempestades, aumento do nível médio relativo do mar e, em casos extremos, tsunamis (Ferreira *et al.*, 2006).

Muehe (2001) afirma que o litoral brasileiro vem se caracterizando por profunda alteração e deterioração da paisagem, acarretando prejuízos ambientais e econômicos. Na costa catarinense, foi noticiada a ocorrência de 18 eventos extremos de ressacas, no período de 1991 a 2001 (Simó & Horn Filho, 2004), e em muitos deles houve sérios prejuízos econômicos. Inserido neste contexto, o Balneário Piçarras possui um retrospecto de inúmeras ressacas que assolaram sua orla. Entre 1983 e 1998 houve retração de 50 metros da faixa de areia devido a um acentuado processo erosivo que provocou severos prejuízos ao setor econômico local, dependente do turismo de veraneio (Klein *et al.*, 2005, Reid *et al.* 2005, Araujo *et al.*, 2008).

Atualmente, notícias nos jornais regionais são freqüentes sobre a destruição do balneário por ressacas, como a reportada pelo Jornal “A Notícia”, em setembro de 2004, com a seguinte manchete: “Ressaca

traz más lembranças à Piçarras”, referindo-se ao receio dos moradores e comerciantes locais de que o balneário deixe, mais uma vez, de ser atrativo aos turistas devido aos agudos processos erosivos ainda enfrentados. Portanto, como motivação, o principal foco deste estudo foi aplicar o método de análise integrada de perigos costeiros para a Enseada do Itapocorói. Esta metodologia foi desenvolvida por Ferreira *et al.* (2006) e baseia-se em projetar linhas de costa futuras (*set-back lines*) em cartas temáticas de vulnerabilidade a perigos costeiros, tais como: (1) taxa de evolução costeira (i.e. taxa de retração da linha de costa), (2) aumento do nível médio do mar com conseqüente perda de área emersa e, (3) impactos por grandes tempestades.

ÁREA DE ESTUDO

A Enseada do Itapocorói está localizada no centro-norte de Santa Catarina e delimita-se ao norte pelo promontório de Itajubá e ao sul pela Ponta de Penha (Figura 1). O arco praiial dessa enseada possui uma extensão de 9,8 km. A porção setentrional, junto ao promontório de Itajubá, tem orientação retilínea N-S. O segmento meridional configura-se como recurvado e típico de praia de enseada (Hoefel, 1998).

A Enseada do Itapocorói, de maneira geral, apresenta um pós-praia que culmina, em direção ao continente, no Sistema Depositional Laguna-Barreira III cuja formação arenosa se deu durante a transgressão mari-

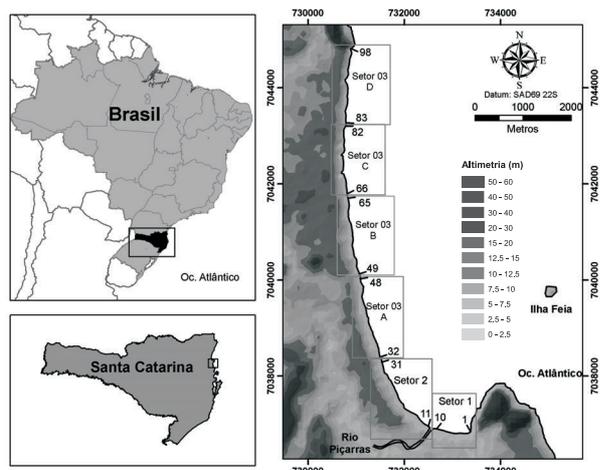


Figura 1. Localização da área de estudo. Setores da área de estudo com um total de 98 perfis perpendiculares à costa, dispostos de Sul para Norte. Altimetria disponibilizada pela mapoteca digital da EPAGRI (<http://www.epagri.rct-sc.br/>). Último acesso 11/08/2008. Coordenadas UTM Datum SAD-69.

nha do Pleistoceno superior há 120.000 anos (Carujo Jr., 1995). Os depósitos correlacionáveis à Barreira III se estendem da desembocadura do Rio Piçarras ao Promontório de Itajuba, com cotas altimétricas variando em média 8-10m (Figura 1).

O estágio morfodinâmico foi definido por Klein & Menezes (2001), Araujo (2008) e Klein *et al.* (no prelo), como refletivo com grau de exposição às ondulações provenientes dos quadrantes sul e sudeste, variando de semi-exposta na porção junto à foz do rio Piçarras, a exposta na parte central e norte. A Praia Alegre, delimitada entre as desembocaduras do rio Piçarras, a Oeste, e do rio Iriri, a Este, junto ao promontório da Ponta da Penha, apresenta uma baixa dinâmica e assume características de ambiente dissipativo (Klein e Menezes, 2001). Um regime de micro-maré mista com predominância semi-diurna é descrito para a região (Klein, 2004), sendo a média da maré astronômica em torno de 0,8 m, com os níveis mais elevados chegando a 1 m. A maré meteorológica pode incrementar em até 1,2m a maré astronômica (Truccolo, 1998).

METODOLOGIA

O método de Ferreira *et al.* (2006) fundamenta-se em obter a taxa de evolução costeira (TEC) pela análise da variação da linha de costa através de fotografias aéreas e considerar que o padrão de movimentação da linha de costa (LC) não se modificará em 50 anos e, assim, projetar a LC futura (L_{50}), assumindo a mesma taxa de variação do passado. A partir de L_{50} projetar outra LC futura (L_{50c}) incluindo a erosão devido a uma elevação adicional no nível médio do mar predita

no último relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) considerando um pior cenário. Essa metodologia também visa computar impactos por eventos extremos, como grandes tempestades e, para isso, faz-se uso do modelo de Kriebel e Dean (1993) que determina a máxima retração provocada por uma tempestade com tempo de recorrência de 50 anos. Tal retração é adicionada à LC futura L_{50c} , gerando uma terceira LC futura de tempestade (L_{50T}). Por fim, como forma de indicar zona potenciais de inundação costeira, calcula-se os níveis máximos verticais do mar alcançados na costa, durante uma tempestade, e compara-se com as cotas altimétricas do terreno determinando as zonas potenciais de inundação, sem, contudo, dimensionar a extensão da inundação. As linhas de costa futuras são projetadas em cartas temáticas a fim de espacializar e integrar as zonas de perigos.

Evolução da Linha de Costa e Futura Posição Padronização e Correção Geométrica das Imagens

Para análise da evolução da linha de costa, empregaram-se fotografias aéreas referentes aos levantamentos aerofotogramétricos de três diferentes anos, 1957, 1978 e 1995. Como forma de incluir o comportamento migratório recente da linha de costa, utilizou-se uma imagem orbital do ano de 2005, obtida pelo sensor "QuickBird" através do software GoogleEarth®. Tanto para as ortofotografias quanto para as imagens de satélite, manteve-se uma representação máxima do pixel de 1 metro, ou seja, cada pixel da fotografia representa 1 metro no terreno (Tabela 1). Isso se deu pela divisão da distância horizontal real, que a fotografia/imagem representa no terreno (através da escala da foto), pelo número de pixels presente no mesmo eixo desta (através da resolução da imagem digitalizada).

O georreferenciamento foi efetuado por meio do Sistema de Informação Geográfica ArcGis®9.2. A base cartográfica utilizada foi disponibilizada pela Secretaria do Patrimônio da União (SPU), em meio digital na escala de 1:2.000, e serviu tanto para a fixação dos pontos de controle (PCs), necessários ao processo de correção, como para obtenção das cotas altimétricas. Os PCs foram distribuídos ao longo de toda a enseada e concentraram-se na faixa correspondente à primeira quadra adjacente à praia.

A fim de mensurar imprecisões decorrentes do processo fotogramétrico, como variações na altitude do vôo, inclinação da câmara, distância focal, erros de paralaxe (distorções em função da velocidade da aeronave) inclusive de retificação geográfica das imagens, adotou-se neste trabalho o padrão de posicionamento geoespacial de imagens proposto pelo Comitê Norte-Americano de Dados Geográficos (FGDC-STD, 1998). Isso significa que 95% da imagem retificada tem uma

Tabela 1. Dados referentes às fotografias aéreas utilizadas para definir a evolução da LC.

Ano	Escala/Altitude	Resolução	Representação do pixel no terreno	Fonte
1957	1/25.000	600dpi	1 metro	SEP/SC
1978	1/25.000	600dpi	1 metro	SEP/SC
1995	1/12.500	600dpi	1/2 metro	LabGEO/CTTMar-UNIVALI
2005	4.800 m	4800x2800 pixels	1 metro	Imagem satélite QuickBird

precisão igual ou menor que o erro reportado em relação à base cartográfica.

Extração e Evolução da LC

Dada a complexidade da detecção da LC, associada a certo grau de subjetividade, a extração desta foi efetuada através do indicador mais discernível e constante nas imagens, que foi a máxima linha d'água observada na fotografia pela mudança de reflexão do sedimento, pois a areia seca tem maior refletância que a molhada, o que gera uma diferença na tonalidade da superfície da praia. Boak e Turner (2005), em uma revisão sobre LC, afirmam que a interface areia molhada/areia seca mostra-se consistente em avaliações de longa escala.

A extensão DSAS 3.2 (*"Digital Shoreline Analyses System"*) (Thieler *et al.*, 2005), foi utilizada para o cálculo de variação da LC entre os diferentes anos. Em ambientes SIG, essa ferramenta utiliza o método do EPR (*"End Point Rate"*) para calcular a taxa de variação linear entre duas LC, com espaçamentos determinados ao longo da costa. O princípio é obter a distância de movimentação da LC entre dois períodos distintos e dividi-la pelo tempo transcorrido, fornecendo, assim, a taxa anual de migração em metros (*TEC*).

Todo arco praiado da Enseada do Itapocoróí (9,8 km) foi segmentado em 98 perfis transversais distribuídos do Sul para o Norte a cada 100 m a partir da praia Alegre, e calculado a taxa de variação (m/ano) da LC para cada perfil. Para o cálculo de *TEC*, fez-se para cada perfil a média móvel de ordem 3, isto significa que cada resultado é a média entre o próprio perfil e dos dois outros adjacentes a este, suavizando discordâncias nos resultados.

Para facilitar a análise, a área de estudo foi dividida em 3 grandes setores. Setor 01, Setor 02 e Setor 03 (Figura 1). O Setor 03 foi subdividido em A, B, C e D, para facilitar a visualização dos resultados. Tanto o Setor 1 como o Setor 2 receberam aterros hidráulicos entre 1998 e 1999. Desta forma, tais obras de engenharia impossibilitaram afirmações seguras a respeito da migração da LC de 1995 a 2005. Para esses dois setores foi, então, considerado apenas variações no período de

1978 a 1995, descartou-se também fotografias de 1957, pois o Rio Piçarras ainda não estava estabilizado nessa data, o que poderia alterar o padrão de migração da LC adjacente à desembocadura. Para o Setor 3, analisaram-se todas as variações desde 1957 até 2005.

Linha de Costa em 50 anos (L_{50})

Caso a LC tenha, em média, migrado em direção ao mar (*TEC* positivo), a metodologia assume que essa tendência de progradação, em 50 anos, vai cessar e a migração da LC se estabilizará. Então, nesta situação adota-se que a LC atual é a mesma para daqui a 50 anos ($L_0 = L_{50}$). Para uma costa em condição de retração, a projeção da linha de costa futura (L_{50}), considerando a escala de tempo acima, foi determinada pela Equação 1:

$$L_{50} = L_0 + TEC \times 50 \text{ anos} \quad (1)$$

Nesta etapa, a LC atual (L_{50}) é projetada em direção à retroterra, ponderando que sua taxa de migração (*TEC*) não se alterará. Ao se fazer isso, contabilizam-se impactos gerados por processos erosivos decorrentes de tempestades em longo prazo, visto que a *TEC* atual já sofre essas influências e, por conseguinte, é função destas. Da mesma maneira que as atuais taxas de elevação do nível do mar e processos erosivos, devido à déficit sedimentar, já estão inclusos nesta projeção.

Ajuste de L_{50} devido a uma elevação adicional no nível do mar

A subida atual do nível do mar na costa brasileira é em torno de 4mm/ano, segundo Mesquita (2003). Assumindo esse cenário como verdadeiro, daqui a 50 anos o nível do mar estará 20 cm mais alto. Essa taxa já está embutida no cálculo da linha L_{50} . Porém, piores cenários foram propostos pelo IPCC (Bindoff *et al.*, 2007), que em seu relatório cogita uma subida de aproximadamente 30 cm. Portanto, há um possível impacto de 10 cm adicionais na elevação do nível médio do mar que não foi contabilizado na linha L_{50} (Ferreira, *et al.*, 2006).

A quantificação deste risco adicional foi executada segundo a Regra de Brunn (1962), na qual a avaliação da retração horizontal adicional (R_a), proveniente dessa elevação adicional no nível médio do mar (E_a), é expressa pela Equação 2.

$$R_a = (E_a \times L') / (h_f + B) \quad (2)$$

Onde, L' é a largura do perfil, h_f é a profundidade de fechamento e B é a altura da berma. Com o valor de R_a , pôde-se, então, projetar a linha L_{50c} referente a retrações por uma elevação adicional do mar usando a Equação 3.

$$L_{50c} = L_{50} + R_a \quad (3)$$

Avaliação de impactos por tempestades extremas

Embora as estimativas acima (L_{50} e L_{50c}) contabilizem possíveis impactos de tempestades em longo prazo, esse estudo visou, também, pontuar danos contíguos a tais eventos extremos e que acarretam alterações muitas vezes drásticas na configuração da costa (Ferreira *et al.*, 2006). Portanto, foi considerado que a enseada sofrerá uma tempestade extrema com período de retorno de 50 anos. A retração estimada dessa tempestade foi somada à LC mais ao interior, pressupondo que a tempestade ocorrerá sobre essa LC mais interna.

Kriebel e Dean (1993) desenvolveram o Modelo de Convolução para estimar os impactos decorrentes das grandes tempestades. O modelo assume que a retração da face da praia não é apenas função das características da tempestade (ondas, sobrelevação do mar, duração do evento), mas também função da morfologia da praia. O perfil de praia indicará qual o potencial máximo de retração possível (R_∞) decorrente de uma determinada sobrelevação do mar. O potencial máximo de retração (R_∞) pode ser obtido assumindo que o volume erodido na face da praia é o mesmo depositado na parte submersa, segundo Brunn (1954), dado pela Equação 4.

$$R_\infty = \frac{Sx_b}{B + h_b - \frac{S}{2}} \quad (4)$$

Onde:

S = sobrelevação do mar;

x_b = distância da profundidade de quebra da onda até a costa = $(h_b/A)^{3/2}$;

B = altura da berma (m);

h_b = profundidade de quebra de onda;

H_b = altura de quebra de onda;

A = parâmetro de sedimentação do grão (Dean, 1977);

No entanto, o potencial máximo de retração (R_∞) dificilmente será alcançado, pois a praia tem uma capacidade de resposta lenta à sobrelevação do mar – escala de tempo-resposta (T_s) – que está principalmente ligada ao tamanho de onda de tempestade na costa e ao parâmetro de sedimentação do grão (Dean, 1977) presente na praia (Equação 5).

$$T_s = \frac{320 \times H_b^{3/2}}{(A^3 g^{1/2})(1 + \frac{h_b}{B} + \frac{mx_b}{h_b})} \quad (5)$$

Onde:

H_b = altura de quebra de onda (m);

A = parâmetro de sedimentação do grão (Dean, 1977);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

h_b = profundidade de quebra de onda (m);

B = altura da berma (m);

m = declividade do perfil praial dado por $Tan \beta$;

A escala de tempo-resposta (T_s) de uma praia a um dado evento e a duração total (T_D) deste determinação, percentualmente, quanto de será alcançado. Essa será a retração estimada (R_t). A duração total (T_D) é o intervalo de tempo desde o início até o fim da sobrelevação do mar (S). Neste estudo, para a sobrelevação foi considerada a maré meteorológica adicionada à sobrelevação no nível do mar provocado pela quebra da onda na zona de surfe (*wave set-up*), que foi considerado 20% da altura de onda de tempestade em águas profundas, como proposto por Masselink e Hughes (2003). Os dois parâmetros (T_s e T_D) se relacionam para gerar a taxa de retração adimensional de uma tempestade (β), onde:

$$\beta = 2\pi \frac{T_s}{T_D} \quad (6)$$

A partir de β , Kriebel e Dean (1993) propuseram a Equação 7 para se estimar a retração provocada por uma tempestade (R_t):

$$\frac{R(t)}{R_\infty} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta^2}{1 + \beta^2} \exp\left(-\frac{2\sigma t}{\beta}\right) - \frac{1}{1 + \beta} [\cos(2\sigma t) + \beta \operatorname{sen}(2\sigma t)] \right\} \quad (7)$$

Onde: $\sigma = \pi / T_D$

A função acima expressa a proporção de retração que $R(t)$ alcança a partir de R_{∞} , que é o potencial máximo de retração, e tudo em função de uma única variável, β . Quando essa variável for igual à zero, ocorre a máxima retração, e a medida que β aumenta, menor a retração. O modelo possibilita ainda que o R_{∞} assuma valores considerando diferentes tipos de perfil praial. A Equação 4 refere-se ao perfil denominado "square berm" e reflete o potencial máximo erosivo de uma praia mais refletiva, com curto pós-praia. Há ainda outras equações para R_{∞} , uma para praias mais dissipativas com extenso pós-praia (Equação 22 de Kriebel e Dean, 1993 pg. 216) e mais duas equações para praias com dunas e sem pós-praia (Equação 25 de Kriebel e Dean, 1993 pg. 219) e praias com dunas e extenso pós-praia (Equação 26 de Kriebel e Dean, 1993 pg. 219).

Os resultados da aplicação deste modelo mostraram-se bastante coerentes na costa dos Estados Unidos (Kriebel e Dean, 1993), da mesma forma, Ferreira (2005) e Ferreira *et al.* (2006) afirmam que esse modelo é um dos mais verificados atualmente e alcançou bons resultados na costa portuguesa. Assim, as retrações estimadas (R_t) pelo modelo foram adicionadas à linha L_{50c} , delineando L_{50r} (Equação 8).

$$L_{50r} = L_{50c} + R_t \quad (8)$$

Para estabelecer as zonas de inundações costeiras, utilizou-se a Equação 9 formulada por Batjjes (1971):

$$R_{m\acute{a}x} = (H_{SO} L_o')^{0,5} \times \tan \beta \quad (9)$$

Onde, H_{SO} e L_o' corresponde a altura e o comprimento de onda significativa em águas profundas e $\tan \beta$ é a declividade da face da praia, respectivamente. $L_o' = 1,56T^2$, é o período de pico associado à altura de onda significativa. Na equação 7 reflete também a influência do processo de *set-up* na costa (Masselink e Hughes, 2003).

A Equação 9 permitiu avaliar o "run-up" da onda - máxima excursão vertical da onda na face da praia ($R_{m\acute{a}x}$) - que somado com a máxima sobrelevação da maré ("storm surge") mais a maré astronômica, forneceram os níveis máximos verticais que a tempestade pode atingir, e quando comparado com as cotas altimétricas da linha L_{50r} sobre o terreno, apontam para as áreas de potenciais inundações costeiras. As cotas altimétricas do terreno obtidas a partir da base cartográfica do SPU. Assim, as cotas altimétricas da linha de tempestade foram comparadas com o nível máximo vertical causado por uma tempestade, obtendo-se as zonas potenciais de inundação. Avaliar a extensão das inundações não fez parte do escopo deste trabalho, apenas definir os segmentos mais suscetíveis a tais perigos, essas zonas foram identificadas com áreas achuradas logo após a linha L_{50r} .

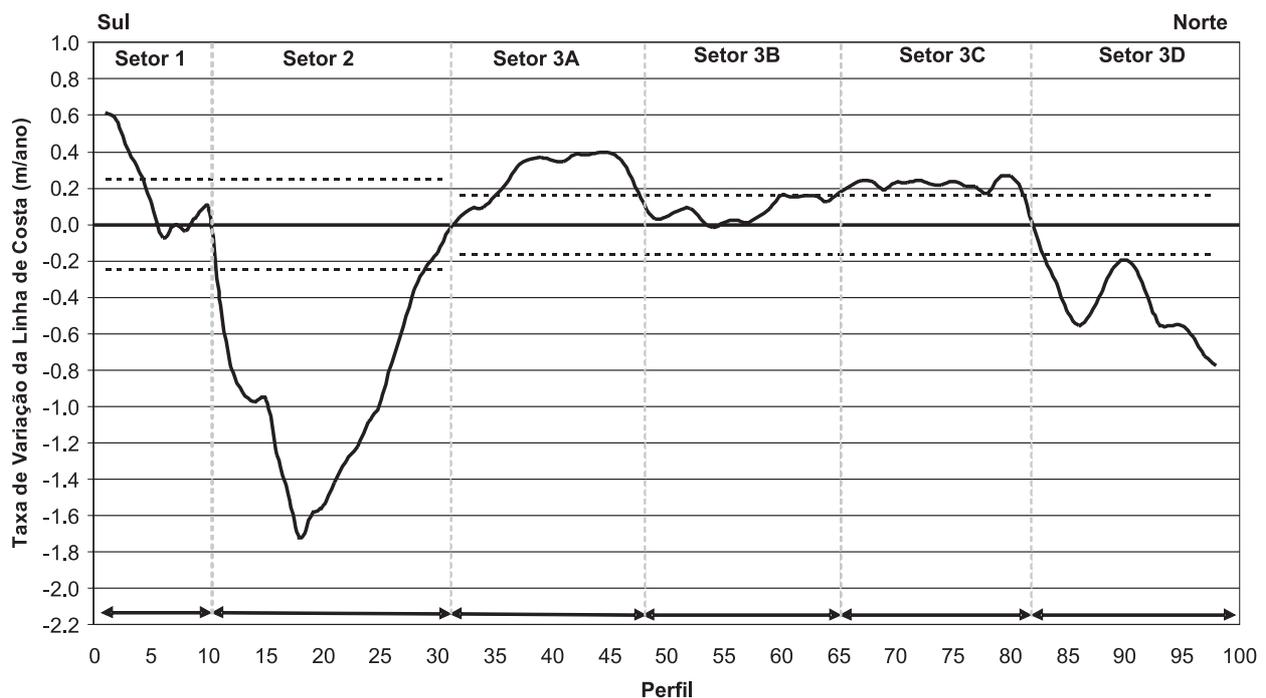


Figura 2. Taxa de evolução da linha de costa (TEC), as linhas tracejadas representam o erro incluso nas comparações entre as LC de 1978 e1995 (Setor 1 e 2) e entre as LC de 1957 e 2005 (Setor 3), ambos expressos em metros por ano.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para calcular a retração devido a subida adicional no nível do mar (E_a) e a conseqüente retração (R_a).

Características	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Fonte
E_a	0,10	0,10	0,10	IPCC (Bindoff <i>et al.</i> , 2007)
B (m)	2,00	2,90	4,00	Araujo (2008)
h_f (m)	1,78	2,47	3,76	Van Den Heuvel et al. (em preparação.)
A	0,1	0,12	0,12	Araujo (2008)
L (m)	117	131	205	$L = (h_f/A)^{3/2} + B$
Retração (m)	3,1	2,5	2,6	Brunn (1962)

RESULTADOS

Evolução da linha de costa e futura posição

Para o Setor 01 e 02 foram utilizadas as fotografias de 1978 e 1995, o erro incluso na comparação das LC desses anos foi de 4,4 metros (0,26 m/ano) e para o Setor 03 empregou-se as fotografias de 1957 e 2005 cujo o erro foi de 7,7 metros (0,16 m/ano). Portanto, variações das linhas de costa abaixo do erro encontrado para cada comparação foram desconsideradas e o nível de confiança adotado foi de 95%.

Os Perfis 1-4 do Setor 01 apresentaram taxas de progradação de $0,6 \pm 0,26$ m/ano a $0,2 \pm 0,26$ m/ano, os Perfis 5-10 variaram em média $0,05 \pm 0,26$ m/ano. O Setor 02 (Perfis 11-32) evidenciou em geral altas taxas de retração com média de $-0,95 \pm 0,26$ m/ano (Figura 2). Em quase todo o Setor 3A houve progradação onde a média foi cerca de $0,27 \pm 0,16$ m/ano. No Setor 3B percebeu-se uma estabilidade cujas variações não foram superiores ao erro 0,16 m/ano. O Setor 3C foi o mais homogêneo com progradação média de $0,21 \pm 0,16$ m/ano. Outro segmento que também demonstrou caráter erosivo foi o Setor 3D, com retrações de $-0,2 \pm 0,16$ a $-0,8 \pm 0,16$ m/ano e média de $-0,45 \pm 0,16$ m/ano.

Após efetuada a média móvel, os valores de E_a em cada perfil foram utilizados na Equação 1 para a projeção da linha de costa de 2055, a qual foi sobreposta na fotografia aérea mais recente (2005). Onde os valores de R_a foram positivos ou menores que o erro reportado, considerou-se que a linha de costa em 50 anos (L_{50}) será a mesma que a atual (L_0).

Com base nesses resultados percebe-se que há dois setores que enfrentam marcante perda de área emersa, o Setor 2 e Setor 3D. Em contrapartida, os Setores 3A e 3C demonstram progradação ao longo do tempo, o Setor 1 apresentou acentuada progradação na porção meridional (Perfil 1-4) e não houve variações significantes no resto do setor (Perfil 5-10). O Setor 3B caracterizou-se por estabilidade (a variação média da LC foi menor que o erro incluso na comparação).

Ajuste de L_{50} devido a uma elevação adicional no nível do mar

Toda a Enseada mostrou-se pouco suscetível a uma elevação adicional (E_a) do nível médio do mar, os valores de retração (R_a) foram em torno de 2,5 a 3 metros (Tabela 2). As medidas da altura da berma (B), do parâmetro de sedimentação do grão (A) e largura do perfil (L), de cada Setor, foram retirados a partir do tra-

Tabela 3. Características da tempestade considerada para o Modelo de Kriebel e Dean (1993). Altura de quebra de onda de quebra de onda (H_b), duração da tempestade (T_D), parâmetro de sedimentação do grão (A), sobreelvação do mar (S), declividade do perfil de praia (m), altura da berma (B) e profundidade de quebra da onda (h_b). A partir desses parâmetros, determinou-se o potencial máximo de retração (R_∞), escala de tempo-resposta (T_S), a taxa de retração (b), e a retração estimada da tempestade (R_t).

Características	Setor 01	Setor 02	Setor 03	Fonte
H_b (m)	0,5	1,82	3,75	Araujo Filho (2008)
T_D (horas)	96	96	96	Estimado
A	0,1	0,12	0,12	Araujo (2008)
S (m)	2	2	2	Maré meteorológica de 1,2 m (Truccolo, 1998) somado a 20% da altura de onda de tempestade em águas profundas, proposto por Masselink e Hughes (2003)
$m = \tan \beta$	0,05	0,09	0,06	Araujo (2008)
B (m)	2	2,9	4	Araujo (2008)
h_b (m)	0,5	1,82	3,75	$h_b = H_b$ para praias refletivas segundo Kriebel e Dean (1993)
R_∞ (m)	14,9	31,75	51,76	Equação 4
T_S (seg)	23,9	8,9	25,2	Equação 5
β	0,2	0,58	1,65	Equação 6
R_t (m)	14	29	40	Equação 7

Tabela 4. Valores de entrada para a equação de Batjjes (1971), Altura, período e comprimento de onda em profundidade (H_o , T e L_o) e declividade da face da praia ($Tan\beta$). Nível máximo da tempestade que corresponde à soma do Run-up máximo com a Maré Astronômica e Meteorológica.

Características	setor 01	setor 02	setor 03	Fonte
H_o (m)	4,1	4,1	4,1	Araújo <i>et al.</i> (2003)
T (s)	9	9	9	Araújo <i>et al.</i> (2003)
L_o (m)	126,36	126,36	126,36	$L_o' = 1,56 T^2$
$Tan\beta$	0,08	0,1	0,09	Araujo (2008)
$R_{m\acute{a}x}$ (m)	1,8	2,3	2,0	Equação 9, Batjjes (1971)
Maré Meteorológica (m)	1,2	1,2	1,2	Truccolo (1998)
Maré Astronômica (m)	0,8	0,8	0,8	Truccolo (1998)
Nível Máx. da Tempestade (m)	3,8	4,3	4,0	1+2+3

balho realizado por Araujo (2008). A profundidade de fechamento teórica (H_f) foi obtida por de Van Den Heuvel *et al.* (em preparação) de acordo com a equação de Birkemeier (1985). Os valores desses parâmetros foram inseridos na Equação 2 para a obtenção dos resultados supracitados e através da Equação 3, gerou-se a linha L_{50c} .

Avaliação de impactos por tempestades extremas

Os resultados do Método de Convolução utilizado para estimar a máxima retração (R_r) induzida por uma tempestade com período de retorno de 50 anos demonstraram que a área mais abrigada (Setor 1) foi menos suscetível a retrações por eventos extremos, tendo uma retração estimada de 14 metros (Tabela 3). Para o Setor 2, o modelo determinou uma retração de 29 metros e para Setor 3, mais exposto, a retração máxima foi de 40 metros.

Os níveis máximos do mar na costa durante um evento de tempestades para os Setores 1, 2 e 3 foram de 3,8 m, 4,3 m e 4,0 m, respectivamente (Tabela 4).

Representação das linhas de costa futuras em cartas temáticas

Os valores das linhas de costa futuras (L_{50T} , L_{50c} e L_{50T}) projetadas em direção a retroterra associadas à taxa de evolução da costa (TEC), a retrações por uma elevação adicional do mar (E_a) e a impactos por tempestades (R_r) estão dispostos na Tabela 5. A partir destes resultados foi possível gerar as cartas temáticas (Figura 3).

DISCUSSÃO

Ferreira *et al.* (2006) desenvolveram essa metodologia para a Península do Ancão, em Algarve – Portugal – cuja fisiografia de ilha barreira possibilita assumir que caso a barreira sofra retrações por uma

elevação do nível do mar, esta mantém o perfil como o atual, a barreira apenas migra em direção à retroterra (*Rollover*), assumindo forma estática para a barreira. Galgano e Leatherman (2005) colocam que apesar de existir muita especulação, muitos autores prevêem que a escala de resposta à uma subida do nível do mar é extremamente rápida, da ordem de 50-100 anos. Isso reforça aplicabilidade do método de Ferreira *et al.* (2006) para um ambiente de ilha barreira, pois assume uma escala de tempo de mesma ordem.

Contudo, a Enseada do Itapocorói não tem uma capacidade de resposta tão ampla como uma ilha barreira, pois a enseada abriga o Sistema Depocisional Laguna-Barreira III pleistocênica (Caruso Jr., 1995). Esse tipo de formação possui geralmente os sedimentos bastante compactados, o que torna o lapso de resposta do processo erosivo muito longo, segundo Muehe (2001). Portanto, caso a Barreira entre em contato com o mar – como indica o prognóstico de 50 anos para o Setor 2 e 3D – a resposta dessa feição a processos erosivos não será a mesma como têm sido do perfil praiado nos últimos 50 anos. Muehe (2001) afirma que, numa situação dessa, o ideal é analisar o processo considerando a posição de testemunhos deixados pela retrogradação e iniciando, sempre que possível, um monitoramento das falésias ativas para determinar na prática a taxa de retração.

Outras considerações estão relacionadas às áreas de inundações costeiras, no trabalho de Ferreira *et al.* (2006) essas zonas de inundação foram denominadas zonas de galgamentos oceânicos (i.e. transposição de ondas sobre uma barreira arenosa ou dunas frontais caracterizando o processo de *overwash*), porém pela ausência destas feições, empregou-se o termo inundações costeiras para definir cotas altimétricas que podem, em eventos extremos, ser atingidas pelo nível máximo do mar na costa. Contudo, os valores obtidos de *run-up* podem estar superestimados para os segmentos mais abrigados (Setor 1 e 2), uma vez que os parâmetros de entrada para o cálculo do *run-up*

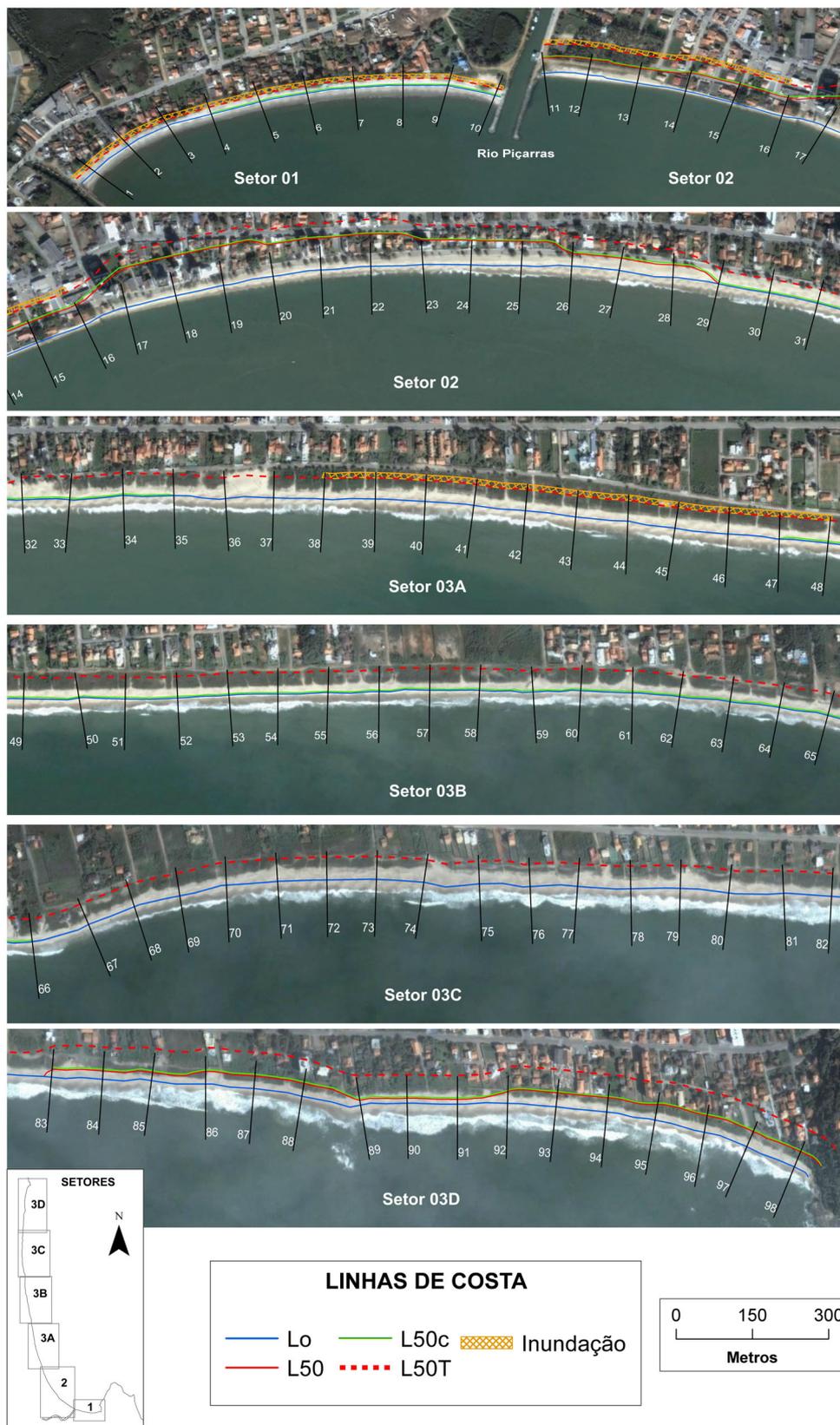


Figura 3. Carta temática representando os perigos integrados para a Enseada do Itapororó. (L_0) linha de costa atual; (L_{50}) linha da costa devido à TEC; (L_{50c}) linha devido a uma aceleração na subida do nível do mar; E mais ao interior, (L_{50T}) são linhas de tempestades e, em hachurado, áreas potenciais de inundações.

Tabela 5. Valores das linhas de costa futuras (L_{50} , L_{50c} e L_{50T}) projetadas em direção a retroterra.

Perfil	Perfil	Setor	L50 (m)	L50c (m)	L50T (m)	Perfil	Setor	L50 (m)	L50c (m)
1	1	Setor 1	0	0	14	50	Setor 3B	0	3
2	2	Setor 1	0	0	14	51	Setor 3B	0	3
3	3	Setor 1	0	0	14	52	Setor 3B	0	3
4	4	Setor 1	0	0	14	53	Setor 3B	0	3
5	5	Setor 1	0	3	17	54	Setor 3B	0	3
6	6	Setor 1	0	3	17	55	Setor 3B	0	3
7	7	Setor 1	0	3	17	56	Setor 3B	0	3
8	8	Setor 1	0	3	17	57	Setor 3B	0	3
9	9	Setor 1	0	3	17	58	Setor 3B	0	3
10	10	Setor 1	0	3	17	59	Setor 3B	0	3
11	11	Setor 2	22	24	53	60	Setor 3B	0	3
12	12	Setor 2	39	42	71	61	Setor 3B	0	3
13	13	Setor 2	46	48	77	62	Setor 3B	0	3
14	14	Setor 2	49	51	80	63	Setor 3B	0	3
15	15	Setor 2	48	50	79	64	Setor 3B	0	3
16	16	Setor 2	63	66	95	65	Setor 3B	0	3
17	17	Setor 2	74	77	106	66	Setor 3C	11	0
18	18	Setor 2	86	89	118	67	Setor 3C	12	0
19	19	Setor 2	80	82	111	68	Setor 3C	12	0
20	20	Setor 2	78	80	109	69	Setor 3C	10	0
21	21	Setor 2	71	73	102	70	Setor 3C	12	0
22	22	Setor 2	65	67	96	71	Setor 3C	12	0
23	23	Setor 2	61	63	92	72	Setor 3C	12	0
24	24	Setor 2	54	57	86	73	Setor 3C	11	0
25	25	Setor 2	49	52	81	74	Setor 3C	11	0
26	26	Setor 2	38	40	69	75	Setor 3C	12	0
27	27	Setor 2	28	30	59	76	Setor 3C	11	0
28	28	Setor 2	18	20	49	77	Setor 3C	11	0
29	29	Setor 2	12	14	43	78	Setor 3C	9	0
30	30	Setor 2	8	10	39	79	Setor 3C	13	0
31	31	Setor 2	0	2	31	80	Setor 3C	13	0
32	32	Setor 3A	0	3	43	81	Setor 3C	10	0
33	33	Setor 3A	0	3	43	82	Setor 3C	0	3
34	34	Setor 3A	0	3	43	83	Setor 3D	9	12
35	35	Setor 3A	8	0	40	84	Setor 3D	16	19
36	36	Setor 3A	11	0	40	85	Setor 3D	24	26
37	37	Setor 3A	16	0	40	86	Setor 3D	28	30
38	38	Setor 3A	18	0	40	87	Setor 3D	25	27
39	39	Setor 3A	19	0	40	88	Setor 3D	18	21
40	40	Setor 3A	18	0	40	89	Setor 3D	12	15
41	41	Setor 3A	17	0	40	90	Setor 3D	10	12
42	42	Setor 3A	19	0	40	91	Setor 3D	12	15
43	43	Setor 3A	19	0	40	92	Setor 3D	20	23
44	44	Setor 3A	20	0	40	93	Setor 3D	27	30
45	45	Setor 3A	20	0	40	94	Setor 3D	28	30
46	46	Setor 3A	18	0	40	95	Setor 3D	28	30
47	47	Setor 3A	12	0	40	96	Setor 3D	31	34
48	48	Setor 3A	0	3	43	97	Setor 3D	36	39
49	49	Setor 3B	0	3	43	98	Setor 3D	39	41

estão em função da declividade do perfil e das características de ondas em águas profundas (altura, comprimento e período), e a equação não leva em conta processos de refração e difração que atenuam a energia de onda, típico de praias abrigadas à semi-expostas.

CONCLUSÃO

As cartas temáticas geradas demonstraram que o Setor 2 e 3D foram os mais suscetíveis devido ao padrão de movimentação da LC, que apresentou sensível retração nos últimos anos. Percebe-se também que danos por tempestades são mais preocupantes para a enseada do que possíveis retrações causadas apenas

pelo aumento do nível do mar, em função da sua maior declividade.

Essa forma de visualizar os perigos, prevendo qual tem maior poder de destruição, é válida, pois não se delimita apenas os perigos individuais, mas os integra com a finalidade de ter uma visão ampla das áreas mais suscetíveis e qual o perigo que contribui mais na perda de terra por invasão do mar. Dessa forma, a metodologia de Ferreira *et al.*, (2006), aplicada para a Enseada do Itapocorói, forneceu boa indicação do que poderia acontecer sob um pior cenário com a posição da linha costa para o ano de 2055, considerando a taxa de evolução costeira e impactos por tempestades. É interessante ressaltar que retrações por eventos extremos podem ocorrer antes do período estimado e mais

de uma vez, conseqüentemente, é importante manter artificialmente o estoque de areia em frente aos segmentos mais suscetíveis (2 e 3D), visto que esses apresentam caráter erosivo com perda significativa de área emersa cuja função de proteção é imprescindível durante eventos agudos.

As linhas de costa futuras, que delimitam zonas de perigos, não devem ser interpretadas como projeções certas, mas sim, como apontamento para áreas mais problemáticas de uma costa. É importante salientar que esse modelo deve ser reavaliado, se possível, a intervalos de tempo de 5-10 anos, para melhor ajuste à dinâmica das praias, visto que estes ambientes estão em constantes transformações. Além disso, o modelo mostrou ser uma importante ferramenta de gerenciamento costeiro, haja vista o caráter conservativo deste quando assume piores cenários (Ferreira *et al.*, 2006).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo, R.S. 2008. Morfologia do Perfil Praia, Sedimentologia e Evolução da Linha de Costa das Praias da Enseada do Itapocorói - SC. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Departamento de Centro de Ciências Tecnológica da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2008.
- Araujo, R.S.; Silva, G.V.; Freitas, D.; Klein, A.H.F. 2008. Georreferenciamento de Fotografias Aéreas e Análise da Variação da Linha de Costa. In: Alcântara-Carrió, J. (ed). Metodologías en Teledetección aplicada a la Prevención de Amenazas Naturales en el Litoral. Universidad Católica de Valencia, Espanha.
- Battjes, J. 1971. Run-up distributions of waves breaking on slopes. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*. 97, 91-114.
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Birkemeier, W. 1985. Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, v. 88, 33-74p.
- Boak, E.H. & Turner, I.L. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, v.21, n. 4, p. 688-703. 2005.
- Bruun, P. 1954. Coast erosion and the development of beach profiles. Beach Erosion Board, Tech. Memo, Washington, D.C. 44.
- Bruun, P. 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*. 88, 117-130.
- Caruso Jr., F. 1995. Mapa geológico e recursos minerais do sudeste de Santa Catarina (Escala = 1:100.000). Texto explicativo e mapa. DNPM, Brasília, 52p.
- Dean, R.G., 1977. Equilibrium beach Profiles: U.S. Atlantic and the Gulf Coasts. Dep. Civil Eng., Ocean Eng. Rep., Univ. Delaware, Newark, Del. 12p.
- Federal Geographic Data Committee (FGDC-STD-007.3). 1998. Geospatial Positioning Accuracy Standards (part 3): National Standard for Spatial Data Accuracy. Washington, DC, Federal Geographic Data Committee, 25p.
- Ferreira, O. 2005. Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal Research*. 42, 221-227.
- Ferreira, O.; Garcia. T.; Matias. A.; Taborda, R.; Alveirinho, J. D. 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*. 26, 1030-1044.
- Galgano, F. A. & Leatherman, S.P. 2006. Modes and Patterns of Shoreline Change. In: Schwartz, M. L. (ed.) *Encyclopédia of Coastal Science*. Department of Geology, Western Washington University, WA, USA. 651-656pp.
- Hoefel, F. G. 1998. Diagnostico da Erosão Costeira na Praia de Piçarras, Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 86p.
- Klein, A.H.F. & Menezes, J.T. 2001. Beach Morphodynamics and Profile Sequence for a Headland Bay Coast. *Journal of Coastal Research*, 17 (4), 812-835.
- Klein, A.H.F. 2004. Morphodynamics of Headland Bay Beaches. Tese (Doutorado) – Universidade do Algarve, Faro, Portugal. 450p.
- Klein, A. H. F.; Diehl, F. L. & Benedet, L. 2005. The paradigm between beach protection and beach restoration: case studies in Santa Catarina State, SE-Brazil. In: *ICCCM'05 Book of Abstracts*. 327-329.
- Klein, A.H.F.; Araujo, R.S.; Polette, M.; Sperb, R.M.; Freitas, D.; Camargo, J.M.; Sprovieri, F.C.; Pinto,

- F.T. (no prelo). Ameliorative Strategies at Balneário Piçarras Beach – Brazil. In: Williams, A.T. and Micallef, A. Beach Management Guidelines: Principles and Practice. Earthscan Publisher, London, UK.
- Kriebel, D.L. & Dean, R.G. 1993. Convolution method for time dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. 119, 204–226.
- Masselink, G. & Hughes, M. 2003. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*, Arnold, London, 354 p.
- Mesquita, A.R. 2003. Sea-Level Variations Along The Brazilian Coast: A Short Review. *Journal of Coastal Research*. Special Issue, 35, 21-31.
- Muehe, D. 2001. Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para fins de Gerenciamento. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2(1), 35-44.
- Reid, J.; Santana, G. G.; Klein, A. H. F. & Diehl, F. L. 2005. Perceived and realized social and economic impacts of sand nourishment at Piçarras beach, Santa Catarina, Brazil. *Shore Beach*, Fort Myers, Florida. 73 (4): 14-18p.
- Simó, D.H. & Horn Filho, N.O. 2004. Caracterização e distribuição das “ressacas” e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Gravel*. Porto Alegre. 2, 93-103.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., & Miller, T.L., 2005, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304.
- Truccolo, E. C. 1998. *Maré Meteorológica e Forçantes Atmosféricas Locais em São Francisco do Sul, SC*. Dissertação Mestrado, Engenharia Ambiental, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis, 100p.
- Van Den Heuvel, S.; Hoekstra, R.; De Zeeuw, R.; Zoon, A. Coastal Erosion Problems of Piçarras Beach – Brazil. Projectgroup CF81, TUDelft, The Netherlands. (em preparação).

Submetido: Outubro/2008
Revisado: Novembro/2008
Aceito: Novembro/2008