

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

**PREVISÃO DOS REGIMES DE IMPACTOS GERADOS POR
TEMPESTADES SOBRE O SISTEMA PRAIAL E A DUNA
FRONTAL**

MICHEL FRANCO VOLPATO PRADO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

Volume I

Porto Alegre - 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

PREVISÃO DOS REGIMES DE IMPACTOS GERADOS POR
TEMPESTADES SOBRE O SISTEMA PRAIAL E A DUNA
FRONTAL

MICHEL FRANCO VOLPATO PRADO

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elírio E. Toldo Jr.

Prof. Dr. Jarbas Bonetti

Prof^ª. Dra. Salette Figueiredo

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título
de Mestre em Geociências

Porto Alegre -2016

*“A mente que se abre para uma nova ideia
Jamais voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

*Para a minha esposa
Pâmela pelo amor e dedicação*

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a minha família que sempre acreditou em mim sem vocês eu não estaria aqui.

Agradeço em especial aos meus orientadores pelo suporte Prof. Dr. Jair Weschenfelder e Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein, por todo o conhecimento passado, além dos conselhos sempre pertinentes.

Ao Fundo Nacional para Mudanças Climáticas (Fundo Clima), Ministério do Meio Ambiente (termo de cooperação N° 010/2011), órgãos financiadores do projeto “Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno”, o qual foi responsável pela aquisição dos dados utilizados nesta dissertação.

Agradeço ao CNPQ (Processos 303550/2012-0 e 385371/2014-4), ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Oceanografia Integrada e Usos Múltiplos da Plataforma Continental e Oceano Adjacente - Centro de Oceanografia Integrada - INCT-Mar COI pela bolsa concedida, .

À Charline por sempre estar pronta para me ajudar sempre que eu preciso e por ser um papel muito importante na preparação do artigo que faz parte desta dissertação. À Paula também pela grande contribuição e correções feitas.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Oceanografia Costeira por toda a ajuda na aquisição dos dados de perfil de praia. Mariela, Rafael, Maiara, Arthur, Diego, Ana Paula, Diogo, Gabriela, Natália, Sheyla, Jhersyka. A companhia e amizade de vocês torna o trabalho algo muito mais fácil e prazeroso.

RESUMO

Este estudo tem como objetivo a previsão de impactos gerados por tempestades sobre os sistemas praias e de dunas frontais nas costas Leste (praias expostas) e Norte (praias abrigadas) da Ilha de Santa Catarina. A área de estudo abrange as praias entre a Barra da Lagoa e a Praia da Daniela. As respostas da costa frente aos eventos de tempestades foram classificadas em quatro diferentes regimes: Espraimento (*Swash*), Colisão (*Collision*), Sobrelavagem (*Overwash*) e Inundação (*Inundation*). A delimitação entre cada regime é baseada na mais alta e mais baixa elevação vertical do nível d'água em relação às características morfológicas da duna frontal (base e crista). Para a Costa Leste, onde as praias são expostas à incidência de ondas, a máxima elevação do nível do mar foi definida pela soma do *wave runup*, maré astronômica e maré meteorológica, calculada para quatro distintos períodos de retornos (5, 10, 25 e 50 anos). A mais baixa elevação do mar foi definida como sendo a elevação na qual a praia é, na maior parte do tempo, continuamente submersa. Enquanto que para a Costa Norte, onde as praias são abrigadas da incidência das ondas, a máxima elevação do nível do mar durante eventos de tempestades foi calculada levando-se em consideração a soma das marés astronômica e meteorológicas para cada período de retorno analisado; enquanto que a mínima elevação foi representada pelo nível mais alto da maré astronômica. Em ambas as costas, foram adicionados os valores de elevação do nível do mar baseados nas previsões de pior caso do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. De acordo com este estudo a elevação do nível médio do mar vem ocorrendo em uma taxa de 4 mm/ano com uma aceleração anual de 0,019 mm/ano². Os resultados mostram que para a maioria das praias expostas não houve mudança de regime entre os períodos de retorno analisados. As exceções foram a porção central da praia dos Ingleses que apresentou passagem do regime de sobrelavagem (5 e 10 anos) para o regime de inundação (25 e 50 anos) e a Praia Brava que foi classificada como sujeita ao regime de colisão para o período de retorno de 5 anos passando a ser classificada como submetida ao regime de sobrelavagem para os demais períodos. O regime de sobrelavagem foi predominante para as praias abrigadas, sendo este o único regime registrado em toda a Costa Norte para o período de 50 anos.

Palavras Chaves: Impactos gerados por tempestades; Duna Frontal; Praia

Abstract

This study aims to forecast the impacts of storms on the beach and foredune system along the East (exposed beaches) and North (sheltered beaches) coast of Santa Catarina Island. The study area covers the beaches between Barra da Lagoa and Daniela Beach. The coastal storm response were classified into four different regimes: Swash, Collision, Overwash and Inundation. The limits between regimes are based on the highest and lowest vertical elevation of the water level in relation to the elevation of geomorphic features of the foredune (base and crest). To the East Coast the maximum rise in sea level was defined as the sum of the wave runup, astronomical tide and storm surge, calculated for four different return periods (5, 10, 25 and 50 years). The lowest elevation of the sea is defined as the elevation at below which the beach is, most of the time, continuously subaqueous. On the North Coast the maximum rise in sea level during storm events was calculated taking into account the sum of astronomical and meteorological tides; the minimum level was defined as the maximum vertical range of astronomical tide for each return period. On both coasts the sea level rise (SLR) based on worst-case of the Climate Change Intergovernmental Panel report predictions was added to the maximum and minimum sea level elevation. According to this study the increase on the mean sea level has been occurring at a rate of 4 mm/year with an annual acceleration of 0.019 mm/ano². The results show that most of the exposed beaches did not change their regimes between the return periods analyzed. The exceptions being the Central-North portion of Ingleses, that went from overwash (RP 5 and 10 years) to inundation (RP 25 and 50 years) and Brava which changed from collision (RP 5 years) to overwash regime (RP 10, 25 and 50 years). Overwash was the predominant regime on sheltered beaches, being the only recorded regime for the 50-year return period.

Key Words: Storm impacts; Foredune; Beach

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudo.	19
Figura 2: Frequência anual de marés de tempestade (1997 – 2010). Fonte Rudorff et al. (2014).	22
Figura 3: Maré de tempestade ocorrida em Bombinhas em 6 de maio de 2001. Fonte: DEDC-SC, 2001 in Rudorff et al. (2014).	23
Figura 4: A- Destruição de casas a beira mar na praia da Armação do Pântano do Sul; B- construção de enrocamento para conter o avanço da erosão; C e D- Destruição de casas e estabelecimentos comerciais na orla da Barra da Lagoa. Fotografias: A – Edu Cavalcanti, Disponível em: https://acaocontexto.wordpress.com/tag/armacao-do-pantano-do-sul/ . B - Disponível em: https://escandiuzzi.wordpress.com/2010/06/04 . C e D – Disponível em: https://escandiuzzi.wordpress.com/2010/05/29	24
Figura 5: Zonação morfológica e hidrodinâmica de uma praia arenosa oceânica (HOEFEL, 1998).	26
Figura 6: Componentes primários envolvidos em morfodinâmica costeira. A retroalimentação (<i>feedback loop</i>) entre morfologia e movimento do fluido (processos) é responsável pela complexidade fundamental em evolução costeira.	28
Figura 7: Duna frontal estabelecida e bem vegetada, localizadas na praia da Lagoinha, Costa Norte da Ilha de Santa Catarina. Fotografia: Michel Franco Volpato Prado.	37
Figura 8: Classificação morfológica de dunas frontais estabelecidas. Adaptado de Hesp (1988).	38
Figure 9: Study area. Image: Esri database.	46
Figure 10: (A) Points from database of SMC-Brasil model selected for wave propagation. Point 1 ~50 m depth and Point 2 ~80 m depth. (B) Directional Hs rose from Point 1 and (C) Directional Hs rose from Point 2. Sources: Gomes da Silva (2014) and Klein et al. (2016b).	48

Figure 11: Sectoring of Barra da Lagoa / Moçambique and Ingleses based on Hs data and slope of the beachface. Crosses indicate the points of wave series used to calculate runup. Photos: Sustainable Development Secretariat of Santa Catarina (SDS, 2010). Source: Gomes da Silva, (2014).....	49
Figure 12: Sketch describing parameters used to distinguish the impact regimes. Adapted from Sallenger (2000).	53
Figure 13: (Left) Example images of beach and foredune. (Right) Representative aerial beach profile of each sector and beach of exposed beaches. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC (Brazilian official vertical datum).	56
Figure 14: Classification of the response of the frontal dune system to storm events in swash system, collision, overwash and inundation.....	58
Figure 15: Example images of beach and foredune. Representative aerial beach profile of each beach of the sheltered area. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC (Brazilian official vertical datum). Photos: Michel F.V. Prado	60
Figure 16: Residences destroyed by the force of the sea in sector 1 of Barra da Lagoa/Moçambique during a series of high-energy events in 2010. Photos: Mariela Muler.	61
Figure 17: Blowouts present in Sector 3 of Ingleses Beach, indicating weak points in the foredune. Image Google Earth.	62
Figure 18: Effects of the collision on Jurerê Beach. Foto: Michel F.V.Prado	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Hipóteses propostas para formação de cristas de praia (dunas frontais) na literatura australiana entre as décadas de 1950 e 1980. Fonte: Hesp, 1984.....	34
--	----

Sumário

CAPÍTULO 1	15
1.1. Introdução.....	16
1.2. Ilha de Santa Catarina	18
1.3. Tempestades	21
1.4. Sistema Praial.....	25
1.5. Zonação Morfológica e Hidrodinâmica.....	25
Zona de arrebentação	26
Zona de surfe	26
Zona de espraiamento.....	26
Antepraia	27
Praia média	27
Face da Praia	27
Berma	27
Pós-praia	27
1.6. Morfodinâmica e Classificação de Praias Arenosas	28
Praias Dissipativas	29
Praias Rítmicas	29
Praias Refletivas.....	29
Banco e Cava Longitudinal (BCL) ($\Omega \approx 5$)	31
Banco e Praia Rítmicos (BPR) ($\Omega \approx 4$)	31
Banco Transversal e Rip (BTR) ($\Omega \approx 3$).....	31
Crista Canal / Terraço de Maré Baixa ($\Omega \approx 2$).....	31
1.7. Dunas Frontais (<i>foredunes</i>)	32
Dunas frontais Incipientes (Incipient foredunes).....	35
Dunas frontais estabelecidas (Established foredunes).....	36

1.8. Sobre a Estrutura desta Dissertação:	39
CAPÍTULO 2	40
2.1. ARTIGO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO	41
Carta de submissão	41
FORECASTING OF STORM IMPACT REGIMES ON THE BEACH AND FOREDUNE SYSTEM	42
Abstract	42
2.2. Introduction	43
2.3. Study Area	44
2.4. Material and methods	46
2.4.1. East Coast (Exposed beaches)	46
2.4.2. North Coast (Sheltered beaches)	51
2.4.3. Geomorphic features	52
2.4.4. Impact Regimes.....	53
2.5. Results.....	55
2.5.1. East Coast (Exposed beaches)	55
Wave Runup and wave setup.....	55
Geomorphic features	55
Forecasting of storm impact regimes.....	57
2.5.2. North Coast (Sheltered beaches)	58
Geomorphic features	58
Forecasting of storm impact regimes.....	60
2.6. Discussion	61
2.6.1. East Coast (Exposed beaches)	61
2.6.2. North Coast (Sheltered beaches)	63
2.7. Conclusion.....	65
Acknowledgments.....	67
LITERATURE CITED	68
CAPÍTULO 3	72

3.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
3.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
REFERÊNCIAS.....	75

CAPÍTULO 1

1.1. Introdução

As zonas costeiras são áreas de dinâmica natural intensa e complexa e, portanto, sensíveis às intervenções antrópicas. Estão constantemente sofrendo alterações resultantes da interação de múltiplos fatores tais como: regime energético (clima de ondas), marés e correntes litorâneas, oscilações climáticas (eventos de tempestades), variações do nível do mar, balanço de sedimentos e arcabouço geológico e geomorfológico (SHORT, 1999; KLEIN, 2004).

A zona costeira representa um ponto focal para muitas economias nacionais, apresentando um grande número de atividades sociais e econômicas concentradas próximas da linha de costa (NGUYEN et al., 2016). Nicholls e Small (2002) observaram que cerca de 23 % da população mundial reside em uma estreita faixa de até 100 km de distância do mar. Projeções mais recentes apontam que até 2030 este número crescerá para mais de 50% (NEUMANN et al., 2015). No Brasil, dados do último censo populacional (IBGE, 2011) apontam que a população residente na zona costeira ultrapassa 26% da população nacional.

A elevada concentração humana próxima à costa está relacionada principalmente à disponibilidade de recursos, fácil acesso e oferta de melhor qualidade vida (STROHAECKER, 2008). No entanto a urbanização principalmente sobre o sistema de dunas frontais e o prisma praial ativo com a implementação de infraestruturas urbanas como avenidas, calçadas e residências pode alterar os processos que constantemente atuam sobre a costa, desencadeando ou agravando os já existentes processos erosivos (CARTER e WOODROFFE, 1994; VILES e SPENCER, 1995; SIMÓ e HORN FILHO, 2004; KLEIN et al., 2006).

Previsões de mudanças climáticas para os próximos 100 anos, apresentadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013), projetam uma subida do nível do mar de 0,26 m a 0,98 m. Números que são corroborados pelo relatório sobre mudanças climáticas elaborado pela *Comisión Económica para América Latina y el Caribe* (CEPAL), o qual estima que uma ampla parcela da população costeira no Brasil será afetada por um subida do nível do mar de um metro (CEPAL, 2011).

Mudanças no nível do mar podem afetar os processos de evolução da zona costeira e sua conformação. Sabe-se que muitas áreas costeiras estão em risco devido a perigos naturais e/ou induzidos (provenientes de ações antrópicas), como retração da linha de costa e grandes enchentes, os quais estão quase sempre associados a eventos de tempestades, déficit sedimentar e aumento do nível do mar (FERREIRA et al., 2006).

Praias estão em constante remodelamento devido à ação de ondas, ventos e marés, no entanto os eventos de tempestades são responsáveis pelas mais drásticas modificações na morfologia costeira (CARTER, 1988). Estudos apontam que o Estado de Santa Catarina vem sofrendo grandes prejuízos devido à ocorrência de eventos de tempestades, estando estes na maior parte dos casos relacionados à ocupação indevida da orla (POLETTE, 1997; MENEZES, 2002; SIMÓ E HORN FILHO, 2004; HORN FILHO, 2006; KLEIN et al., 2006; RUDORFF et al., 2014).

Rudorff et al. (2014) identificaram, entre os anos de 1997 e 2010, a ocorrência de 46 eventos de maré de tempestades (popularmente conhecidas como “ressacas do mar”), os quais causaram significativos prejuízos na costa catarinense. Especialmente entre 2000 e 2010 tais eventos deixaram 13 cidades costeiras em situação de emergência, uma em estado de calamidade pública, 93 desabrigados, 389 desalojados e 17.054 afetados. Somente no ano de 2010 foram registradas 13 ocorrências de tempestades, representando um prejuízo de aproximadamente R\$ 28 milhões, sendo a cidade de Florianópolis a mais afetada com 6 registros.

Dunas frontais são de extrema importância para proteção de áreas costeiras urbanizadas contra elevação do nível do mar e erosão induzidos por tempestades (SALLENGER, 2000). Apesar disso, o papel da duna frontal na proteção às infraestruturas adjacentes e seus benefícios ambientais nem sempre são entendidos ou apreciados por proprietários de imóveis costeiros e pelos usuários das praias, por este motivo muitas vezes a presença das dunas não é levada em consideração em projetos de engenharia costeira (ELKO et al., 2016).

A erosão praial é uma das mais importantes questões e preocupações do ambiente costeiro. O aumento relativo do nível do mar e o crescimento das

atividades antrópicas em muitas praias do mundo têm na maioria das vezes como resposta natural do ambiente a retração da linha de costa, a fim de alcançar um novo estado de equilíbrio. A não preservação das dunas frontais poderá ser muito dispendiosa, devido ao fato do sistema de dunas fornecerem proteção contra eventos de tempestades às benfeitorias costeiras como casas, prédios, avenidas beira-mar, comércio, além de serem importantes áreas de recreação e turismo (BRIDGES, 1995; FERNÁNDEZ, 1999).

O estudo e a previsão de impactos gerados por tempestades sobre praias arenosas, incluindo as dunas frontais, são de extrema relevância para um entendimento aprofundado da dinâmica costeira e da evolução da linha de costa, sendo fundamental na aplicação de um efetivo gerenciamento costeiro (FERREIRA, 2005).

Dentro deste contexto este trabalho tem como objetivo prever os regimes de impactos causados pela sobre-elevação do nível do mar devido a eventos de tempestades sobre a praia e o sistema de dunas frontais para quatro diferentes períodos de retorno (5,10, 25 e 50 anos) nas costas Norte e Leste da Ilha de Santa Catarina, através da adaptação da escala de regimes de impactos gerados por tempestades sobre barreiras arenosas proposta por Sallenger (2000).

É conveniente descrever brevemente a área de estudo, assim como alguns conceitos relacionados ao escopo deste trabalho. A área de estudo está localizada na Ilha de Santa Catarina e compreende 10 praias entre a Barra da Lagoa e a Praia da Daniela (Figura 1).

1.2. Ilha de Santa Catarina

A Ilha de Santa Catarina está localizada no município de Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina (Figura 1).

A geomorfologia nas proximidades da área de estudo tanto na Ilha de Santa Catarina como no continente próximo revela dois grandes compartimentos, o dos maciços com morros costeiros (escarpas, vertentes, rampas e cones detríticos) e o da planície costeira com subcompartimentos

(baixos terraços, cristas praias, dunas, várzeas, manguezais, marismas, banhados, lagoas) (CRUZ, 1998).

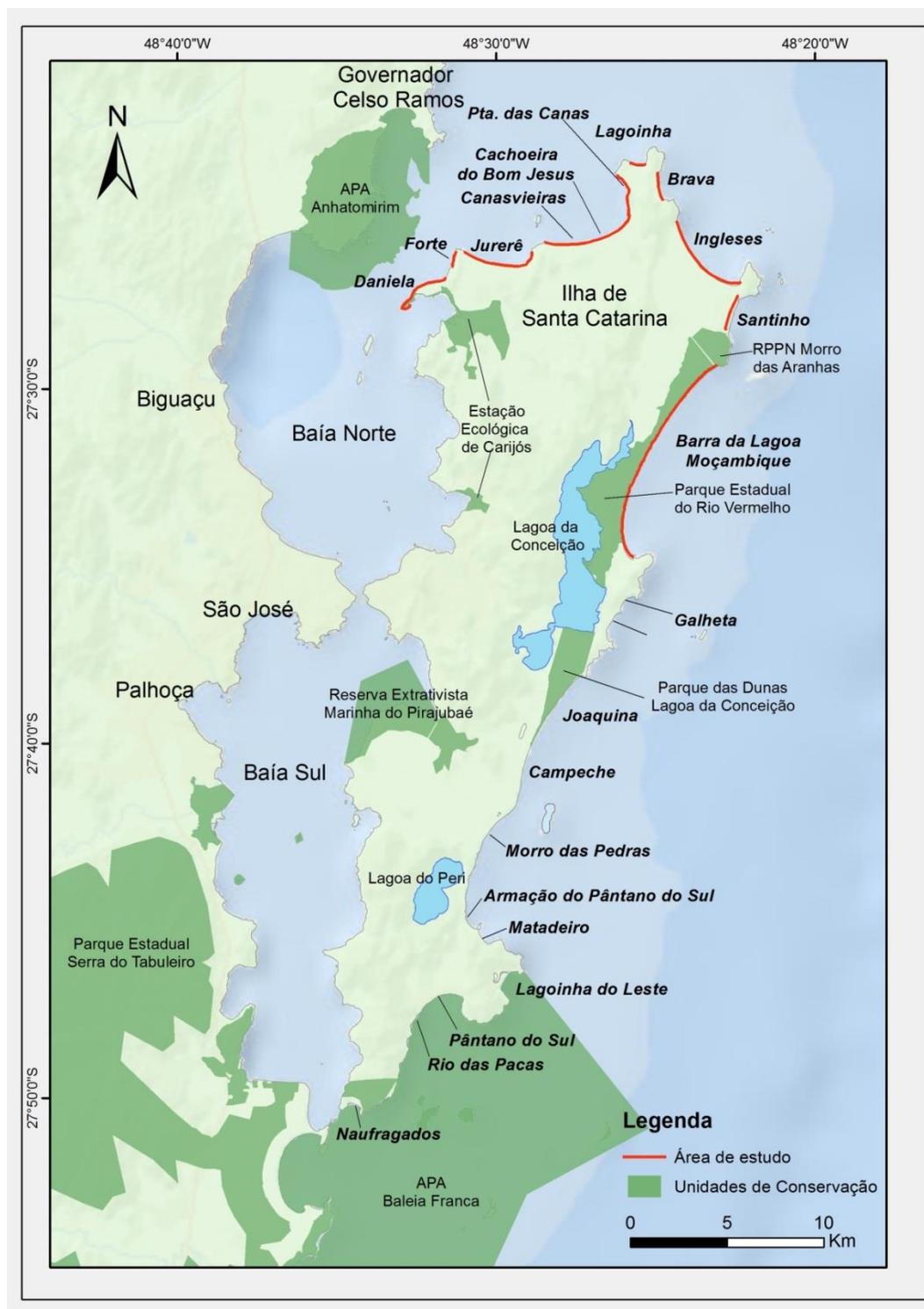


Figura 1: Área de estudo.

Segundo Klein et al. (2016a), a costa da Ilha de Santa Catarina pode ser dividida em dois tipos, uma costa abrigada com orientação para oeste e uma costa exposta à incidência de ondas com praias orientadas para norte e leste. A margem exposta de orientação norte com extensão total de 25 km

compreende as praias entre a Praia da Daniela e a Praia da Lagoinha, sendo estas classificadas como praias abrigadas refletivas (*reflective*) (segundo a classificação de Wright e Short, 1984). A costa exposta leste se estende por 79 km com orientação geralmente de leste-sudeste, sendo suas praias predominantemente classificadas como banco e cava rítmicos (*rhythmic bar & beach*) e banco transversal e corrente (*transverse bar & rip*). No total a costa exposta possui 30 praias com cerca de 62 km de extensão, o que corresponde a 62% da costa, intercaladas por promontórios graníticos.

Segundo Nobre et al.(1986) o clima da região sul do Brasil é gerido pela interação das massas de ar constituídas pelos anticiclones semipermanentes do Atlântico, do Pacífico e Polar, e também pelo centro de baixa pressão semipermanente do Chaco. Com isso, a região sul do Brasil está sujeita a passagem de frentes polares, o que condiciona mudanças bruscas de tempo em qualquer estação do ano.

Araujo et al. (2003) analisando os dados de um ondógrafo fundeado a cerca de 35 km da Ilha de Santa Catarina a uma profundidade de aproximadamente 80 m, descreveram a ocorrência de um espectro bi-modal bem definido, formado por ondas do tipo “vagas” provenientes de Leste, período de 8 s e altura significativa de 1,25 m. E ondulações (*swell*), com período de 12 s, altura significativa variando de 1,25 m no verão até 2 m no inverno, e direção predominante de sul. O autor ressalta que alturas de onda maiores que 4m podem estar presentes em todas as estações do ano.

A maré na costa do Estado de Santa Catarina é do tipo micromaré, com amplitude média de 0,8 m podendo apresentar picos de mais de 1 m acima do nível médio do mar devido à ocorrência de marés meteorológicas durante a passagem de sistemas frontais ciclônicos, ou frentes frias, acompanhadas de fortes tempestades vindas de sul e sudeste, principalmente nos meses de outono e inverno (TRUCCOLO et al., 2006).

A Ilha de Santa Catarina é separada do continente pela Baía de Florianópolis, a qual pode ser dividida em dois corpos d’água confinados, conectados, na porção central do embaiamento por um estreitamento de aproximadamente 400 m de largura (BONETTI et al., 1998). A sua linha de costa inclui a costa abrigada com orientação para oeste da Ilha de Santa

Catarina, bem como a costa abrigada continental que contém 119 e 273 praias, respectivamente. Sendo caracterizadas como praias modificadas pela maré e praias dominadas pela maré (KLEIN et al., 2016a).

Recentemente Klein et al. (2016b), através da determinação da taxa de evolução costeira comparando linhas de costas extraídas a partir de fotografias aéreas verticais (1957 a 2010) e levantamento de campo utilizando GPS-RTK, observaram a existência de significativos processos de retração da linha de costa em várias praias nas costa Leste e Norte da Ilha de Santa Catarina e região continental (municípios de São José, Biguaçu e Governador Celso Ramos). Com taxas de até 1,5 m / ano e 0,8 m / ano ao sul da praia da Barra da Lagoa e praia dos Ingleses, respectivamente. No total os autores indicam que aproximadamente 60% (26.805,5 m) da área estudada está sujeita a processos de retração da linha de costa. Este número pode ainda ser agravado devido ao fato de que cerca de 26% (12.328,6 m) da costa apresentou estar em estabilidade, um frágil estágio que pode ser modificado por intervenções feitas pelo homem e/ou por mudanças climáticas. Apenas 18% (8.540,6 m) da área analisada apresenta-se em processo de progradação.

1.3. Tempestades

Tempestades são distúrbios atmosféricos caracterizados por centros de baixa pressão e ventos intensos (USACE, 2002). A presença de campos de pressão atmosférica e ventos geram a tensão de cisalhamento na superfície dos oceanos, induzindo a geração de ondas e o aumento, em curto prazo, da água em relação ao nível médio do mar (CARTER, 1988). A esta sobre-elevação dá-se o nome na literatura mundial de *storm surge*, e na literatura brasileira vem sendo referida como maré meteorológica (CALLIARI et al., 2010). As marés meteorológicas associadas às ondas de tempestades são chamadas de marés de tempestades (RUDORFF et al., 2014).

Quando eventos intensos de tempestades coincidem com eventos de marés de sizígia local (maré astronômica), a maré de tempestade pode causar danos severos às comunidades costeiras (USACE, 2002). A intensidade da maré de tempestade é maior quanto mais extensa for a pista (extensão da superfície do mar na qual o vento atua), a duração e a intensidade dos ventos.

Outro fator importante é a direção do vento, uma vez que no Hemisfério Sul, o empilhamento da água ocorre à esquerda do sentido do vento devido ao transporte de Ekman (RUDORFF et al., 2014). Portanto ventos incidentes do quadrante sul são responsáveis por maiores níveis de empilhamento da água sobre a costa catarinense, com elevações que podem ultrapassar 1 m acima do nível médio previsto (maré meteorológica) (TRUCCOLO, 1998).

A Região Sul do Brasil está sujeito às frequentes passagens de frentes frias, que são muitas vezes associadas a intensos ciclones extratropicais (OLIVEIRA et al., 2009). Segundo Camargo et al. (2004), as marés de tempestades ocorrem durante a passagem destes sistemas atmosféricos. Rudorff et al. (2014) indica que no estado de Santa Catarina a média anual dos registros de marés meteorológicas que causaram danos significativos entre os anos de 1997 e 2010 é de 3,28. Os autores indicam a presença de dois picos na frequência anual de marés de tempestade entre os anos estudados (Figura 2). O primeiro foi constatado em 2001 e esteve relacionado à ocorrência de um ciclone extratropical muito intenso em condição de maré de sizígia entre os dias 5 e 8 de maio, quando 11 municípios foram atingidos, deixando um município em estado de calamidade pública e outros 6 em estado de emergência, além de prejuízos que ultrapassaram R\$ 11 milhões (Figura 3).

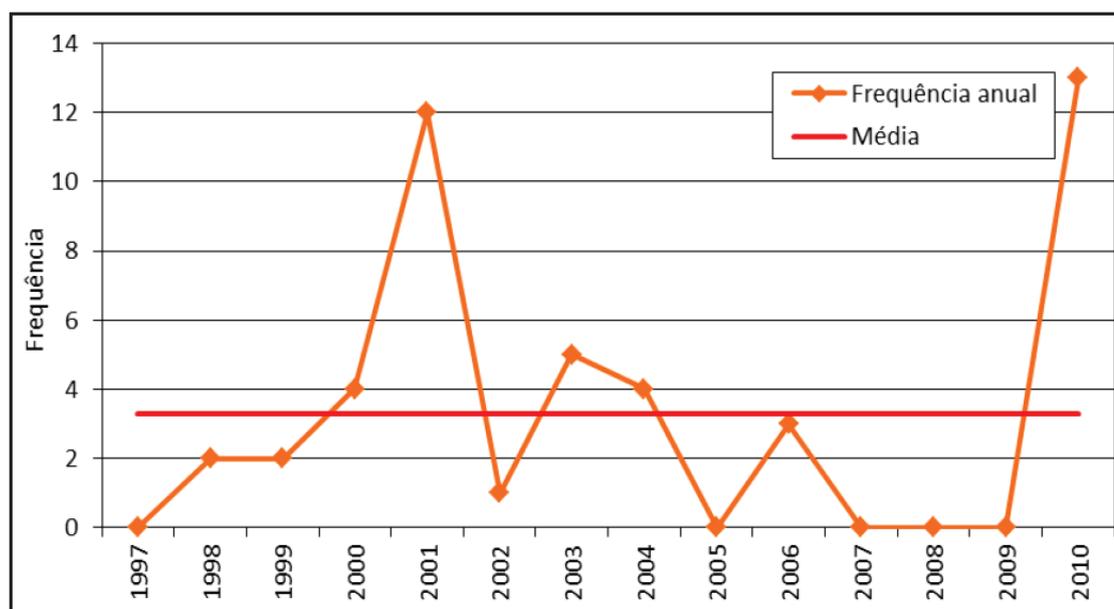


Figura 2: Frequência anual de marés de tempestade (1997 – 2010). Fonte Rudorff et al. (2014).



Figura 3: Maré de tempestade ocorrida em Bombinhas em 6 de maio de 2001. Fonte: DEDC-SC, 2001 in Rudorff et al. (2014).

O segundo pico de ocorrência de eventos de tempestades foi registrado no ano de 2010, sendo que principalmente a Ilha de Santa Catarina foi atingida, ocasionando que residências e construções comerciais fossem destruídas pela ação das ondas. As praias mais atingidas nesta ocasião foram as praias da Barra da Lagoa e Armação do Pântano do Sul (Figura 4). Sendo que na primeira, quatro casas foram destruídas pela força do mar, enquanto que na Praia da Armação do Pântano do Sul foi necessária a execução de obras de contenção, com a construção de enrocamento (Figura 4 B) para conter o avanço da erosão, para tal foram investidos aproximadamente R\$ 3,3 milhões.

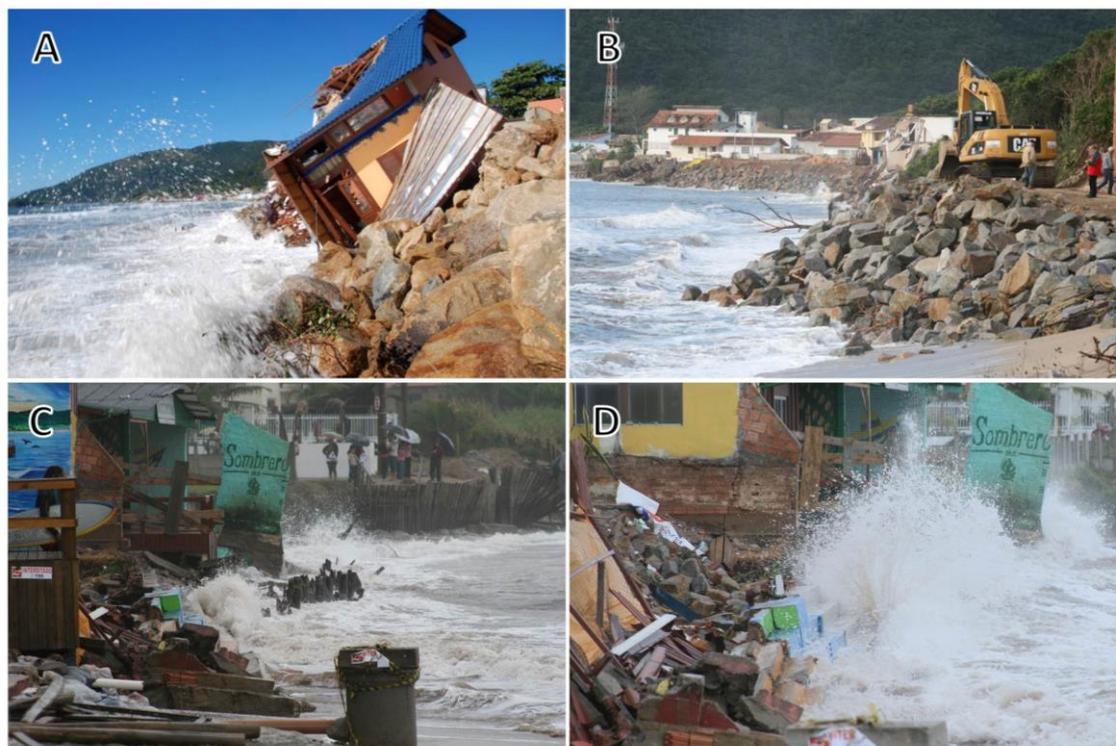


Figura 4: A- Destruição de casas a beira mar na praia da Armação do Pântano do Sul; B- construção de enrocamento para conter o avanço da erosão; C e D- Destruição de casas e estabelecimentos comerciais na orla da Barra da Lagoa. Fotografias: **A** – Edu Cavalcanti, Disponível em: <https://acaocontexto.wordpress.com/tag/armacao-do-pantano-do-sul/>. **B** - Disponível em: <https://escandiuzzi.wordpress.com/2010/06/04>. **C** e **D** – Disponível em: <https://escandiuzzi.wordpress.com/2010/05/29>.

Simó e Horn Filho (2004) através de uma revisão bibliográfica e observação em campo identificaram a ocorrência de 18 episódios de ressacas (maré de tempestades) que causaram destruição e/ou danos a infraestrutura urbana na Ilha de Santa Catarina entre os anos de 1991 e 2001, todos associados à presença ou proximidade de marés de sizígia, formação de sistemas de baixa pressão (ciclone extratropical), influencia de frentes frias e/ou combinação de todos os fatores.

Os autores constataram evidências erosivas associadas a tais eventos em diversas praias da Ilha de Santa Catarina como são os casos das praias da Armação do Pântano do Sul, Barra da Lagoa, Campeche, Canasvieiras Daniela, Solidão, Ingleses, Forte, Joaquina, Jurerê, Moçambique, Morro das Pedras, Naufragados, Pântano do Sul e Santinho. Dentre estas praias seis foram consideradas áreas com alto grau de risco de destruição e/ou danificação, 11 com médio grau de risco e cinco com baixo grau de risco. Destacam-se aqui as praias pertencentes à área de estudo desta dissertação: Barra da Lagoa, Canasvieiras e Ingleses apresentando alto grau de risco;

Santinho, Cachoeira do Bom Jesus (porção norte da praia de Canasvieiras), Ponta das Canas e Forte com médio grau de risco.

1.4. Sistema Praial

As praias arenosas ocupam apenas uma pequena parcela da superfície terrestre, no entanto é necessário levar em consideração a sua ampla ocorrência e utilização ao longo da grande parte das costas tropicais e temperadas do mundo (KOMAR, 1976; HOEFEL 1998).

Komar (1976) define praia como sendo uma acumulação de sedimentos não consolidados de diversos tamanhos, tais como cascalho, areia e seixo. O autor ainda define seus limites como sendo do nível médio da baixa maré, se estendendo em direção à costa até o encontro com alguma alteração fisiográfica como uma falésia, um campo de duna ou até um ponto de fixação permanente da vegetação.

Para Wrigth e Short (1984) as praias são consequência da interação das ondas incidentes com o sedimento disponível no litoral, a qual tem início onde a onda começa a influenciar o sedimento sobre o fundo oceânico desde a zona de arrebentação até a zona de espraçamento.

1.5. Zonação Morfológica e Hidrodinâmica

Hoefel (1998) menciona que independente do conceito utilizado para definir o termo “praia”, fica evidente o caráter não coesivo do sedimento que a compõe e também a dominância de fatores hidrodinâmicos primários como ondas e marés.

Sendo as praias ambientes de grande variabilidade espaço-temporal, qualquer tentativa de delimitar os seus subambientes deve levar em consideração os processos hidrodinâmicos e morfológicos que os dominam, ou seja, os processos hidrodinâmicos atuantes. Para o presente trabalho a nomenclatura utilizada foi baseada na nomenclatura proposta por Short (1999), sendo considerados os termos utilizados em Hoefel (1998).

A Figura 5 ilustra as principais características hidrodinâmicas e morfológicas do sistema praiial.

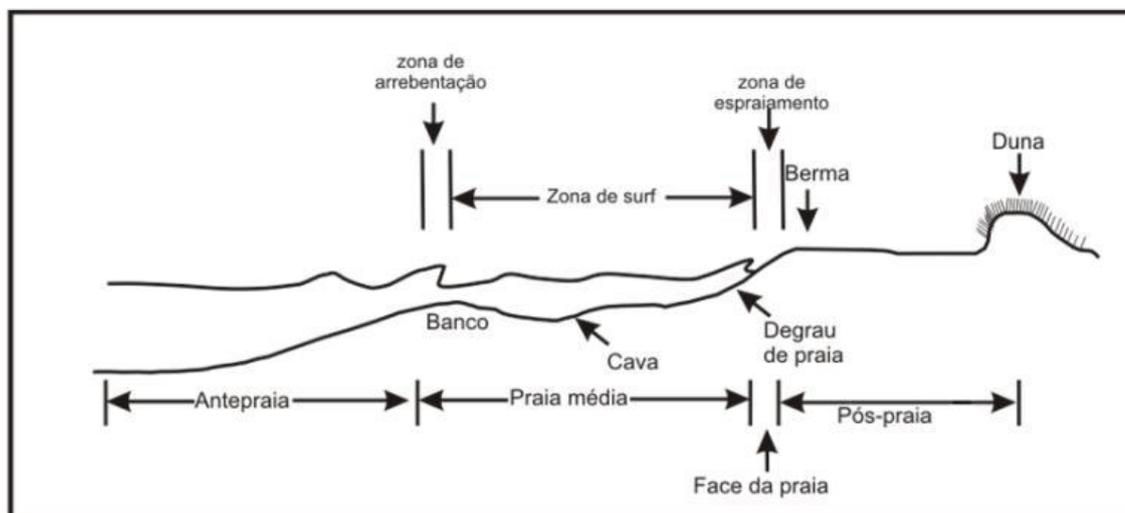


Figura 5: Zonação morfológica e hidrodinâmica de uma praia arenosa oceânica (HOFEL, 1998).

A zonação hidrodinâmica é dividida em:

Zona de arrebentação

Caracterizada pela quebra da onda, esta porção do perfil praiial representa o modo de dissipação da onda sobre a praia.

Zona de surfe

Porção onde ocorre a dissipação da energia das ondas após sua quebra; Short (1999) descreve a zona de surfe como a porção do perfil praiial de maior variabilidade, consistindo de uma grande variabilidade de processos dinâmicos relacionados a quebra da onda e sua transformação em correntes de retorno e correntes de deriva litorânea. Este setor pode variar conforme o tipo de praia, podendo ser muito extenso em praias dissipativas e muito curto em praias reflectivas.

Zona de espraiamento

Porção do perfil praiial delimitada pela máxima e mínima excursão da onda sobre a face da praia. Nesta porção a onda imediatamente após colapsar transforma-se de uma onda espessa numa sucessão de ondas finas que percorrem a face da praia até perder volume, seja através da percolação da água no sedimento da face praiial ou devido às forças da gravidade, então a água remanescente retorna em direção ao mar (SHORT, 1999).

A zonação morfológica pode ser dividida em:

Antepraia

Onde inicia o processo de empolamento das ondas, sendo delimitada entre as profundidades de fechamento externa e interna. Segundo Short (1999), no seu limite em direção ao mar as ondas começam a interagir com o fundo marinho suficientemente para movê-lo em direção a terra. Para Hallermeier (1981) a antepraia caracteriza-se como sendo uma zona de transição onde os efeitos das ondas de superfície não geram influencia fortes, porém não negligenciáveis sobre as formas de fundo.

Praia média

É a porção do perfil praiial sobre o qual os processos da zona de arrebentação e da zona de surfe ocorrem.

Face da Praia

É zona frontal da praia limitada pelas linhas das marés alta e baixa. Caracterizada por ser um setor curto de declividade variável, o qual reflete o tipo de praia, regime de ondas e correntes (HOEFEL, 1998). É a porção onde os processos de espraiamento ocorrem.

Berma

É um terraço formado pela deposição de areia por ação das ondas, composta por uma escarpa inclinada voltada para o mar, uma cresta e um terraço com inclinação variável de plano a côncavo voltado para terra. Bermas podem ser em alguns casos muito pronunciados como em praias intermediarias de micromaré, sutil em outros casos e geralmente ausentes em praias dissipativas (HESP, 2002).

Pós-praia

Estende-se do limite superior do limite do espraiamento até o inicio da duna frontal ou de qualquer outra mudança fisiográfica brusca. De acordo com Hesp (1999) esta é a zona que é episodicamente impactada tanto pelo espraiamento (quando há ocorrência de marés altas excepcionais, ou ondas de tempestades) quanto pelo transporte de sedimento eólico. É considerada como sendo “a praia” pela grande maioria dos usuários de praia.

1.6. Morfodinâmica e Classificação de Praias Arenosas

Morfodinâmica costeira é o ajuste mútuo da topografia e dinâmica do fluido, envolvendo ainda o transporte de sedimento. Este sistema dinâmico apresenta entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de energia e matéria bem definidas, sendo estas controladas pelas condições ambientais (Figura 6) (WRIGHT e THOM, 1977; MASSELINK e HUGHES, 2003).

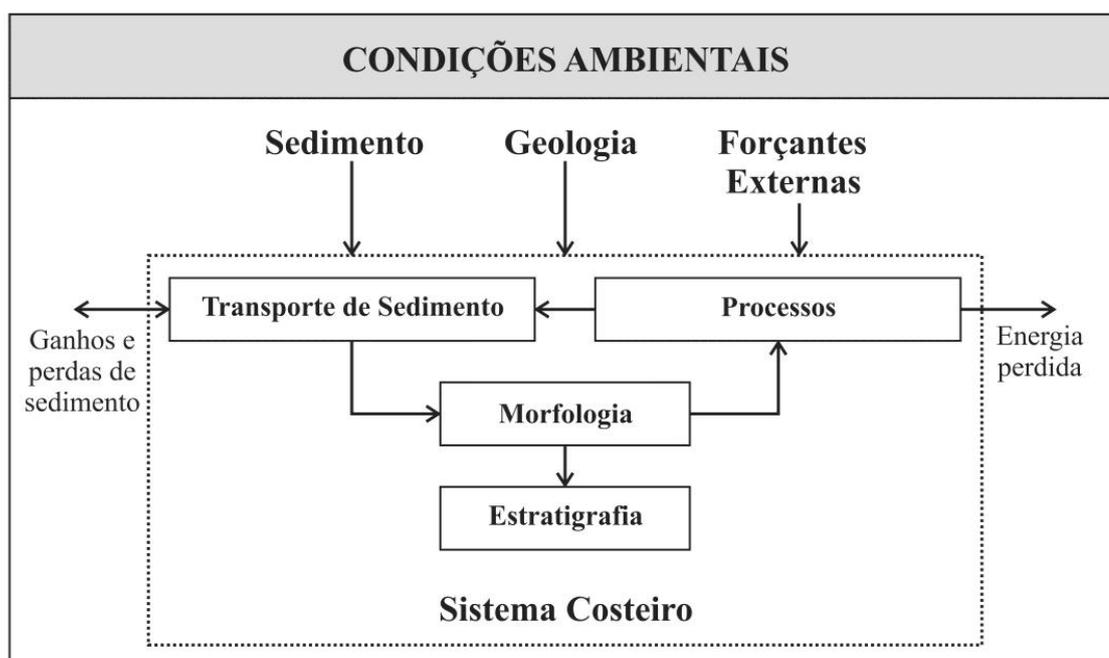


Figura 6: Componentes primários envolvidos em morfodinâmica costeira. A retroalimentação (*feedback loop*) entre morfologia e movimento do fluido (processos) é responsável pela complexidade fundamental em evolução costeira.

Morfodinâmica praias pode ser descrita como sendo o resultado da interação entre ondas incidentes, o sedimento e a morfologia antecedente formando um ciclo fechado e retroalimentado, onde as ondas incidentes agem sobre os sedimentos alterando a morfologia da praia que por sua vez irá influenciar as ondas incidentes (SHORT, 1999).

Segundo Short (1999), as características morfodinâmicas das praias arenosas dependem basicamente da amplitude da maré, regime de ondas, do tamanho do grão e da forma em planta. Em geral quanto maior o tamanho do grão maior será a declividade do perfil praias.

A granulometria, quando em distribuição modal, exerce importante efeito sobre o perfil praias. Sendo que sedimentos finos tendem a se depositar em

perfis de pendente suave, o qual tende a dissipar a energia das ondas incidentes que quebram antes de atingir a face da praia. Enquanto que com o aumento das dimensões do grão sucede no incremento gradual da declividade do perfil e a quebra da onda ocorre diretamente sobre a base da face da praia, não ocorrendo assim zona de surfe (HOEFEL, 1998; SHORT, 1999).

Através da observação da altura modal de arrebentação de ondas em praias de micro marés e de granulometria variando entre areia fina e média, Short (1981) sugeriu uma classificação de praias em três grupos:

Praias Dissipativas

Praias com altura modal de onda maior do que 2,5m, apresentando perfil de declividade suave e armazenagem de sedimentos em formas de bancos lineares submersos. Short (1981) descreve estas praias como sendo as mais estáveis morfologicamente, não sendo afetadas pelo decaimento da energia de ondas, pois o tempo de resposta morfológica (tempo de defasagem) entre variações no regime energético é geralmente suficiente para que os níveis energéticos retornem ao nível normal;

Praias Rítmicas

Com ondas que variam entre 1,0 e 2,5 m são praias caracterizadas pela presença de morfologias especialmente variadas como cúspides, bancos em crescente e bancos transversais. Praias rítmicas em geral são mais instáveis morfologicamente, uma vez que, neste grupo a altura modal da onda tende a variar mais significativamente;

Praias Refletivas

Com altura modal de arrebentação inferior a 1,0 m, possuem alta declividade e a estocagem do sedimento se dá na porção subaérea do perfil. Praias deste grupo têm respostas imediatas às variações na altura das ondas, no entanto sua morfologia é rapidamente recomposta.

Masselink (2004) relata que a classificação de praias em distintos grupos ou tipo pode fornecer um instrumento útil para o entendimento da morfodinâmica e das mudanças na morfologia de praias. Para o autor as praias podem ser distinguidas em função de sua inclinação. Em geral as praias arenosas são divididas em praias com declividade acentuada (Praias Refletivas)

e praias de declividade suave (Praias Dissipativas). No entanto esta classificação pode ser enganosa, pois estes dois tipos de praias representam fundamentalmente regimes extremos de processos morfodinâmicos.

Um importante parâmetro para a determinação da reflexão ou dissipação de praias é o parâmetro dimensionador do surfe:

$$\varepsilon = \frac{4\pi^2 H_b}{gT^2 \tan^2 \beta}, \quad (1)$$

Onde H_b é altura da quebra de onda, g é aceleração da gravidade, T é o período de onda e $\tan\beta$ é o gradiente de praia. Condições refletivas prevalecem quando $\varepsilon < 2,5$ e condições dissipativas ocorrem quando $\varepsilon > 20$. Quando ε está entre 2,5 e 20 ocorre tanto reflexão quanto dissipação e estas condições são denominadas de intermediárias.

Outro parâmetro ambiental amplamente utilizado com a finalidade de classificar os tipos de praia é o parâmetro de velocidade de queda adimensional, popularmente conhecido como número de Dean (DEAN, 1973; WHIGHT E SHORT, 1984; MASSELINK, 2004). O parâmetro é expresso por:

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T}, \quad (2)$$

Onde H_b é altura significativa de onda em águas profundas para altura de quebra em águas rasas, T é o período da onda e W_s é a velocidade de sedimentação do grão. Este parâmetro tem sido utilizado de maneira extensiva como um preditor para a ocorrência e configuração de bancos arenosos.

Este modelo foi empregado por Whight e Short (1984) através de observações em campo, principalmente do sistema de praias australiano, para classificar as praias. Além dos extremos refletivo, que apresenta valores de Ω inferiores a 1,5 ($\Omega < 1,5$) e dissipativo com Ω superior a 5,5 ($\Omega > 5,5$) os autores identificam outros quatro tipos intermediários de praias formados por elementos dos dois extremos. Por abranger processos dissipativos e refletivos a caracterização morfodinâmica dos estágios intermediários torna-se mais complexa e menos estável (HOEFEL, 1998). Considerando uma sequência acresciva, ou seja, com o regime energético em declínio, os estágios

morfodinâmicos intermediários são descritos a seguir segundo a revisão de Hoefel (1998):

Banco e Cava Longitudinal (BCL) ($\Omega \approx 5$)

Neste estágio o relevo banco-cava é bem pronunciado em relação ao estágio dissipativo. A presença do banco faz com as ondas incidentes inicialmente quebrem sobre ele, para em seguida reformarem-se na cava e quebrar novamente sobre a praia de forma abrupta e turbulenta, do tipo mergulhante. Desta maneira, o perfil apresenta uma refletividade localizada sob a segunda quebra, o que não é observada na primeira arrebentação. Cúspides acentuados com dimensões que variam de 100 a 300 m são rotineiramente encontrados na face praial.

Banco e Praia Rítmicos (BPR) ($\Omega \approx 4$)

O diferencial morfológico deste estágio se dá pelo carácter rítmico do banco e da face praial. O campo de velocidade é dominado pelas ondas incidentes sobre a porção distal do perfil, por ondas subharmônicas nas adjacências da face praial e por ondas de infra-gravidade nas proximidades das fracas correntes de retorno. Isto se deve a possível coexistência de oscilações subharmônicas e de infra-gravidade na presença de pronunciadas topografias banco-cava.

Banco Transversal e Rip (BTR) ($\Omega \approx 3$)

Ciclos de acreção fazem com que as protuberâncias em crescentes soldem-se à praia, formando bancos que são interrompidos regularmente por correntes de retorno fortemente desenvolvidas.

Crista Canal / Terraço de Maré Baixa ($\Omega \approx 2$)

Estágio de baixa energia que é caracterizado por um perfil relativamente plano em períodos de baixa maré e por um perfil bastante íngreme na maré alta. Portanto, em maré alta o perfil assume um carácter tipicamente refletivo enquanto que em maré baixa a praia torna-se caracteristicamente dissipativa. Apesar da grande deposição de sedimentos junto ao perfil, podem ser observadas correntes de retorno, mesmo que fracas.

Em estágios morfodinâmicos extremos as variabilidades temporais são baixas. É comum ocorrer em praias refletivas variações na altura da berma e

profundidade do degrau, já em praias dissipativas é normal observar a contração e expansão da zona de surfe em resposta as variações no regime energético de ondas, no entanto sem haver mudanças na posição de linha de costa nem no volume de sedimento do perfil subaéreo em qualquer dos casos. Em estágios intermediários pequenas oscilações na altura da onda de arrebentação são suficientes para alterar os padrões de circulação provocando mudanças no transporte de sedimentos na zona de surfe; isto explica a maior variabilidade espacial característica deste tipo de praias.

1.7. Dunas Frontais (*foredunes*)

Dunas frontais (*foredunes*) são cristas dunares arenosas vegetadas formadas nos setores mais próximos ao mar das faixas de pós-praia. Em geral possuem cristas convexas vegetadas, alinhadas paralelamente a linha de praia, sendo separadas por depressões côncavas. Podem ser formadas em uma gama de ambientes litorâneos, tais como faixa de praia em mar aberto, baías semifechadas, estuários, lagos e lagoas (HESP, 2002) Dunas frontais em formação ocupam a posição mais próxima ao mar em um sistema de dunas, no entanto nem toda duna nesta posição pode ser considerada uma duna frontal. Outros tipos de dunas podem ocupar esta posição em casos de erosão costeira ou em costas onde dunas frontais são incapazes de se desenvolver (HESP, 1999). Dunas frontais ocupam o interior da zona de pós-praia em praias intermediária a refletivas ou da antepraia superior sob morfodinâmica dissipativa (GIANNINI, 2007).

Segundo Hesp (2002) as dunas frontais possuem diversas denominações na literatura além do termo duna frontal, tais como: dunas embrionárias (*embryo dunes*), cristas de retenção (*retention ridges*), cristas de praias (*beach ridges*), cordões de dunas paralelas (*parallel dune ridges*); e dunas transversais (*tranverse dunes*). Giannini (2007) também relata uma variedade de nomenclaturas descritas na literatura brasileira entre elas antedunas, dunas embrionárias, pró dunas (*pro-dunes* (Bigarella et al.,1969) dunas de retenção (a partir da *retention ridges* de Mckee (1979)), dunas barreiras, dunas-cordão e dunas bordejantes.

Hesp et al. (2005) comenta que na literatura frequentemente os termos duna frontal e cristas de praia (*beach ridges*) são referidos como sendo a mesma feição morfológica. Ainda, tanto dunas frontais quanto cordões arenosos independentemente da sua origem genética têm sido denominados de cristas de praia e que o uso do termo cordões arenosos é comumente empregado quando a origem genética da feição é desconhecida.

Entre a década de 1950 e início da década 1980 a gênese e evolução das então chamadas cristas de praia eram associadas a três principais modelos (HESP, 2002) sendo dois deles relacionados à formação de origem marinha (DAVIS, 1957; BIRD, 1969; BIRD 1976) e o terceiro como de origem eólica (MCKENZIE, 1958). Hesp (1984) realizou uma revisão sobre a formação de cristas de praia na literatura australiana, a qual engloba estes três principais modelos. Uma síntese desta revisão é apresentada no Quadro 1, apontando o autor, mecanismo formador da duna frontal e as principais hipóteses formuladas. Apesar de aceitas e empregadas por diversos autores australianos, poucas evidências foram apresentadas para sustentar os modelos teóricos evolutivos propostos (HESP, 1984).

Quadro 1: Propostas para formação de cristas de praia (dunas frontais) na literatura australiana entre as décadas de 1950 e 1980. Fonte: Hesp, 1984.

Autor	Mecanismo	Proposta de formação das cristas de praia (dunas frontais)
Spring (1952)	Variações no nível do mar	<ul style="list-style-type: none"> Pequenas variações do nível do mar podem causar migrações oscilatórias da linha de costa produzindo topografia de cristas e cavas sucessivas. Oscilações periódicas na amplitude de maré causadas por mudanças cíclicas na órbita da lua possibilitando o transporte de sedimentos aos níveis mais altos da praia, que em grandes quantidades formam as cristas praias. A preservação das cristas é resultado da colonização pela vegetação, e o crescimento vertical é devido à deposição eólica de sedimento.
Davis (1957)	Ação das ondas	<ul style="list-style-type: none"> Propôs a teoria do “erosão-deposição” (<i>cut-and-fill process</i>), na qual o clima calmo de ondas constrói a berma (<i>fill</i>). Se não houver erosão subsequente (<i>cut</i>), a berma cresce verticalmente devido a deposição de material acima da marca da maré alta e pela natureza convexa do perfil praias torna-se o núcleo de uma crista de praia. Com o passar do tempo uma nova berma é construída a frente da crista e o processo se repete. A formação das cavas deve-se ao fato de as novas bermas serem inicialmente mais baixa do que a antiga crista de praia, formando assim um novo núcleo onde a areia trazida pelo vento é acumulada. Variações na convexidade da berma e a sua eficiência como núcleo acumulador de sedimentos explica o porquê de algumas cristas desprenderem-se da antiga enquanto outras apresentam a antiga crista inserida na sua formação. As cristas de praia devem seu alinhamento à disposição das bermas, as quais são paralelas à linha de costa.
Mckenzie (1958)	Ação dos ventos	<ul style="list-style-type: none"> A formação de uma duna frontal incipiente se dá quando a vegetação cresce em direção ao mar a partir de uma fonte estável, aprisionando assim as areias transportadas pelo vento.
Bird (1960)	Ação das ondas e dos ventos	<ul style="list-style-type: none"> Concorda com a hipótese de Davis (1958), onde a crista praias é originada a partir da formação da crista da berma, na qual haveria o acúmulo de areias transportadas pelo vento. A não vegetação das cavas é resultado da alta salinização provocada pela águas marinhas em frente a crista da berma.
Thom (1964; 1965)	Ação das ondas, dos ventos e fonte de vegetação estável	<ul style="list-style-type: none"> Apresentou uma combinação das hipóteses de Davies (1957) e Mckenzie (1958), onde após a formação da crista da berma pela ação das ondas a mesma é colonizada pela vegetação descendente de uma fonte mais ao continente. A vegetação avança em direção ao mar até encontrar o ponto no qual é frequentemente alcançado pela linha de maré alta. Ventos vindos do continente depositam areia na zona vegetada formando uma crista. A oscilação na taxa de progradação da praia é um fator importante no controle da posição e formação das cristas e cavas.
Jenkin (1968)	Ação das ondas e dos ventos	<ul style="list-style-type: none"> As cristas praias são originadas pela formação de bermas esculpidas pela ação das ondas. A vegetação não apresenta um fator importante para formação das cristas praias. A preservação das cristas de praias é dependente da rápida ação das ondas e dos ventos, resultantes da formação de uma nova crista em direção ao mar.
Bird (1969; 1976)	Ação das ondas	<ul style="list-style-type: none"> Modificou a teoria de erosão-deposição. A duna frontal formada no topo da berma é escarpada pela ação de ondas de tempestades. Subsequentemente, em condição pós-tempestade, as ondas reconstróem uma nova berma em frente e paralela à duna escarpada, ficando separada desta por um desnível. A nova berma é fixada por vegetação rasteira e a depressão permaneceria não vegetada até a formação de uma nova duna frontal. A separação das dunas em cristas paralelas seria resultado da ação de erosão causada pelas ondas e na ausência da fase de escarpamento, a duna frontal evoluiria até a formação de um amplo terraço litorâneo.

Dunas frontais podem ser classificadas em uma grande variedade de tipos, mas geralmente são classificadas em dois principais tipos básicos

incipientes e estabelecidas, os quais podem ainda ter diferenças variações morfológicas e ecológicas (HESP, 1984; HESP, 1988).

Dunas frontais Incipientes (Incipient foredunes)

São formadas pelo aprisionamento das areias, transportadas pelo vento, entre a vegetação formada por espécies pioneiras. Seu desenvolvimento morfológico depende principalmente da densidade, altura e cobertura da vegetação, velocidade do vento e suprimento de sedimento. O vento sofre desaceleração quando atinge a planta, aceleração local ao redor e separação do fluxo do vento a sotavento da planta. O desenvolvimento morfológico, das dunas frontais incipientes, é dependente também da espécie da vegetação presente, plantas altas e densas tendem a formar dunas mais altas no formato *hummocky* (montículo). Enquanto espécies de plantas mais baixas e menos densas tendem a formar dunas mais baixas e contínuas.

Dunas frontais incipientes podem ser divididas em três tipos morfológicos, segundo Hesp (2002):

- **Duna frontal incipiente do tipo rampa:** são formadas onde mudas germinam em direção ao mar sobre um pós-praia inclinado; quando plantas rizomatosas e/ou estoloníferas crescem em direção ao mar a partir de uma fonte terrestre e gradualmente aprisionam a areia sobre um pós-praia ou berma com declividade acentuadas; e/ou onde plantas pioneiras cresce na base de uma duna frontal escarpada, a qual gradualmente é acrescida.
- **Duna frontal incipiente do tipo terraço:** formam-se onde há um rápido crescimento de plantas sobre todo o pós-praia, especialmente em praia sob processo de rápida acresção; quando o crescimento das plantas pioneiras em direção ao mar é equivalente à taxa de acresção da praia; e/ou quando há o crescimento das plantas pioneiras sobre todo o pós-praia onde a taxa de deposição de areia é baixa, seja pela moderada densidade das plantas ou pela baixa altura da espécie dominante.
- **Duna frontal incipiente do tipo cordões:** ocorrem onde a taxa de acresção é relativamente rápida, com deposição de areia na porção voltada ao mar da copa das plantas; devido à alta densidade e altura das plantas colonizadoras; taxa de crescimento vegetal é menor em relação a

taxa de acreção da praia; e/ou quando a o escarpamento causado pela ação das ondas resulta em mudança de posição da deposição eólica para a base da escarpa e posterior crescimento do cordão com geometria de cristas de relevo ligeiramente sinuosas e paralelas a linha de costa (GIANNINI, 2007).

Dunas frontais estabelecidas (Established foredunes)

Desenvolvem-se a partir de dunas frontais incipientes, se distinguem pelo crescimento de plantas arbustivas e pela maior complexidade morfológica, possuindo maior altura e largura quando comparadas as dunas incipientes. Seu desenvolvimento morfológico está relacionado a um número de fatores condicionantes incluindo suprimento de sedimento, espécies de plantas, cobertura vegetal, taxa de acreção e erosão eólica, clima de ondas e ventos, ocorrência e magnitude de eventos de tempestades, escarpamento e processos de sobrelavagem, balanço sedimentar da praia, além da extensão e intensidade da interferência humana e uso (recreacional, imobiliário, de mineração, entre outros).

Dunas frontais podem ser muito baixas, com alturas menores do 1 m, em locais dominados por processos de sobrelavagem (*wave overwash*) e em áreas de baixo suprimento sedimentar (HESP, 2002; SHORT and HESP, 1982), como no caso das dunas frontais localizadas nas praias da Costa Norte da Ilha de Santa Catarina (Figura 7). Elas podem também se apresentar na forma de grandes e complexos sistemas dunares, que em raros casos apresentam alturas que chegam a 35 m, geralmente associadas a ambientes em processo de erosão e alto grau de intervenção humana, com a construção artificial da duna frontal com intuito de proteger a infraestrutura adjacente.



Figura 7: Duna frontal estabelecida e bem vegetada, localizadas na praia da Lagoinha, Costa Norte da Ilha de Santa Catarina. Fotografia: Michel Franco Volpato Prado.

Devido a sua maior complexidade, dunas estabelecidas podem apresentar variadas formas em uma escala menor que uma dezena de metros. Apresentam ainda uma menor taxa de deposição de sedimentos devido à densa cobertura vegetal, por isso podem ser intensamente remodeladas pelos processos erosivos, principalmente eólicos. Hesp (1988) dividiu as dunas frontais estabelecidas em cinco estágios (1 a 5) de acordo com o grau de modificação da morfologia original (Figura 8).

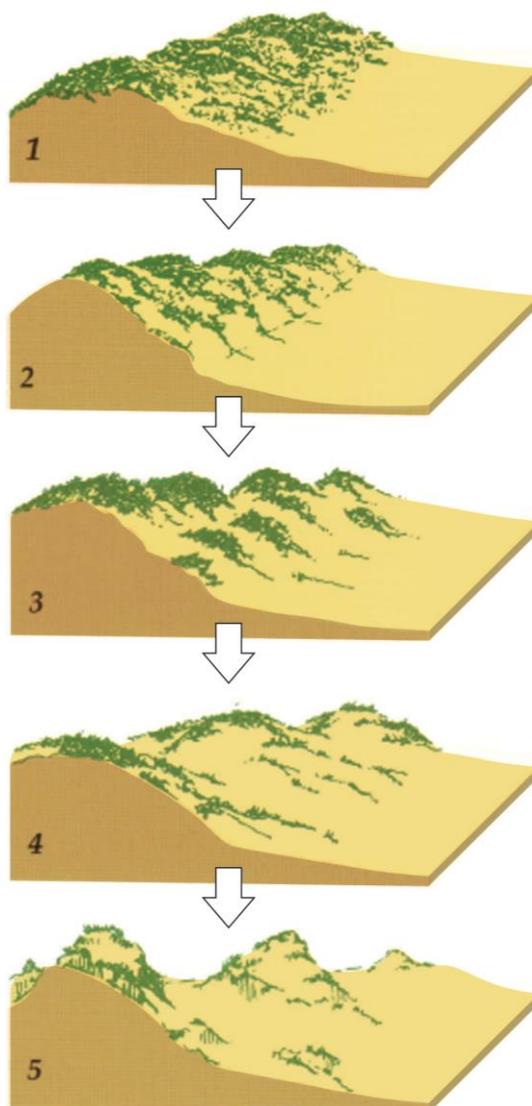


Figura 8: Classificação morfológica de dunas frontais estabelecidas. Adaptado de Hesp (1988).

Giannini, (2007) caracteriza cada estágio como: **Duna Estabelecida estágio 1**: topograficamente contínuas, com cobertura vegetal entre 90% e 100% e suavemente ondulada; **Duna Estabelecida estágio 2**: localmente sem vegetação, com cobertura vegetal entre 75% e 90%. **Duna Estabelecida estágio 3**: Com topografia *hummocky* e vegetação cobrindo entre 45% e 75% da área dunar; **Duna Estabelecida estágio 4**: apresenta alta variabilidade topográfica, amplos espaços sem vegetação, lençóis de areia, crista parcialmente vegetadas e cobertura vegetal total entre 20% e 40%; **Duna Estabelecida estágio 5**: caracterizado pela presença de “morretes” remanescentes de deflação em alta escala e lençóis. Cobertura vegetal entre 5% e 20%.

1.8. Sobre a Estrutura desta Dissertação:

*Esta Dissertação de Mestrado é elaborada de acordo com a Norma 103 do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGGEO/IG/UFRGS), que estabelece que o corpo principal da dissertação seja constituído por um mínimo de um artigo científico relacionado diretamente ao tema central da Dissertação e um texto integrador do trabalho realizado. O artigo científico "FORECASTING OF STORM IMPACT REGIMES ON THE BEACH AND FOREDUNE SYSTEM" foi submetido à revista científica *Ocean & Coastal Management*, constituindo-se o corpo principal do trabalho e apresentado a seguir.*

Esta Dissertação de Mestrado está estruturada em torno de artigos publicados em periódicos ou publicações equivalentes. Conseqüentemente, sua organização compreende as seguintes partes principais:

d) Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado, onde estão sumarizados os objetivos e a filosofia de pesquisa desenvolvidos, o estado da arte sobre o tema de pesquisa.

e) Artigos publicados em periódicos ou submetidos a periódicos com corpo editorial permanente e revisores independentes, ou publicações equivalentes (capítulo de livro de publicação nacional ou internacional com corpo de revisores independentes), escritos pelo autor durante o desenvolvimento de seu Mestrado.

f) Anexos, compreendendo: artigo(s) nos quais o pós-graduando é co-autor, resumo(s) e artigo(s) publicado(s) em eventos, relacionado(s) ao tema central da dissertação, bem como documentação pertinente de natureza numérica (tabelas, cálculos), gráfica (figuras, diagramas, mapas, seções) e fotográfica que, por sua dimensão e/ou natureza não pode ser incluída no(s) artigo(s).

CAPÍTULO 2

2.1. ARTIGO SUBMETIDO À PUBLICAÇÃO

Carta de submissão

17/07/2016

Gmail - A manuscript number has been assigned: OCMA-D-16-00339



Michel Franco Volpato Prado <oc.francoprado@gmail.com>

A manuscript number has been assigned: OCMA-D-16-00339

1 mensagem

Ocean and Coastal Management <v.n.de.jonge@planet.nl>
Para: oc.francoprado@gmail.com

16 de julho de 2016 16:02

Ms. Ref. No.: OCMA-D-16-00339
Title: FORECASTING OF STORM IMPACT REGIMES ON THE BEACH AND FOREDUNE SYSTEM
Ocean & Coastal Management

Dear Mr. Michel Franco Volpato Prado,

Your submission "FORECASTING OF STORM IMPACT REGIMES ON THE BEACH AND FOREDUNE SYSTEM" has been assigned manuscript number OCMA-D-16-00339.

To track the status of your paper, please do the following:

1. Go to this URL: <http://ees.elsevier.com/ocma/>
2. Enter your login details
3. Click [Author Login]
This takes you to the Author Main Menu.
4. Click [Submissions Being Processed]

Thank you for submitting your work to Ocean & Coastal Management.

Kind regards,

Victor N. de Jonge, Dr (PhD), DSc
Editor-in-Chief
Ocean & Coastal Management

Please note that the editorial process varies considerably from journal to journal. To view a sample editorial process, please click here:
http://ees.elsevier.com/eeshelp/sample_editorial_process.pdf

For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.elsevier.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EES via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

FORECASTING OF STORM IMPACT REGIMES ON THE BEACH AND FOREDUNE SYSTEM

Michel Franco Volpato Prado^{a,b,*}, Charline Dalinghaus^b, Paula Gomes da Silva^c, Jair Weschenfelder^a, Antonio Henrique da Fontoura Klein^b

a Federal University of Rio Grande do Sul, Geosciences Institute, Av. Bento Gonçalves, 9500 Bloco I Prédio 43113 - Porto Alegre, RS 91501-970, Brazil

b Federal University of Santa Catarina, Coastal Oceanography Laboratory, Florianópolis, SC 88040-900, Brazil

c Environmental Hydraulics Institute "IH Cantabria", Isabel Torres nº 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabri, 39011, Santander, Spain

* Oc.francoprado@gmail.com

Abstract

This paper has as its main objective the forecasting of storm impacts on the foredune system along the East and North coast of Santa Catarina Island, Brazil. The predicted coastal storm responses were classified into four regimes: Swash, Collision, Overwash and Inundation. The limits between the regimes are based on highest (R_{High}) and lowest (R_{Low}) vertical sea level rise induced by a return period storm relative to the elevation of geomorphic features represented by the foredune crest (D_{High}) and foredune base (D_{Low}). On the East Coast (exposed beaches) R_{High} was defined by the sum of wave runup ($R_{2\%}$), astronomical tide (AT) and storm surge (SS) calculated for four different return periods (RP) (5, 10, 25 and 50 years). R_{Low} represents the elevation below which the beach is, most of the time, continuously subaqueous. On the North Coast (sheltered beaches), R_{High} was calculated using a methodology applied to a low-energy fetch-limited beach, which takes into account the sum of AT and SS. R_{Low} was defined as the maximum vertical range of AT for each return period analyzed. On both coasts the sea level rise (SLR) based on worst-case IPCC predictions was added to R_{High} and R_{Low} . The forecast shows that most of the exposed beaches did not change their regimes when R_{High} and R_{Low} increased, the exceptions being the Central-North portion of Ingleses, that went from overwash (RP 5 and 10 years) to inundation (RP 25 and 50 years) and Brava which changed from collision (RP 5 years) to overwash regime (RP 10, 25 and 50 years). Sectors with intense urban occupancy such as the southern part of Barra da Lagoa/Moçambique and the Central-South of Ingleses were classified as submitting to an inundation regime for all the return periods and beaches with the presence of a well-developed foredune as undergoing the collision regime. Overwash was the predominant regime on sheltered beaches, being the only recorded regime for the 50-year return period.

Keywords: Storm Impacts; Beach; Foredune

2.2. Introduction

The coastal zone currently represents a point of interest in many national economies, with a large number of social and economic activities concentrated near the shoreline, especially in terms of resources for human activities as well as consumption of goods and services (NGUYEN et al, 2016). Nicholls and Small (2002) observed that approximately 23% of the world population lives in a narrow coastal strip (100 km wide). In Brazil about 26% of the population resides in the coastal zone (within 100 km of the sea), where 13 of the 27 state capitals and 16 of the 28 Brazilian metropolises are located (IBGE, 2011; MMA, 2008).

The availability of resources, easy access and the offer of a better quality of life are the main reasons for coastal zones being the areas with the highest occupancy in the world. (STROHAECKER, 2008). However, urban expansion onto the foredune systems, with the construction of seafront avenues and boardwalks on the active beach prism, has put the coastal population at risk due to the dynamic processes that constantly act on and modify coastal features (CARTER and WOODROFFE, 1994; VILES and SPENCER, 1995; KLEIN et al., 2006). Changes in mean sea level, wave regime and other dynamic factor may affect shoreline evolution processes and change the coast's conformation. Many coastal areas are at risk because of natural hazards and/or those induced by human activities, including shoreline retraction and flooding which are frequently associated with storm events, sea level rise or some kind of atmospheric adversity (FERREIRA et al., 2006).

The study and forecasting of storm-generated impacts on sandy beaches are extremely important for a thorough understanding of coastal dynamics and shoreline evolution, being fundamental to the implementation of effective coastal management (FERREIRA, 2005). Usually storms are the main factor determining shoreline movement on the short period. However, there are some cases in which storm events can also completely dominate the large scale erosive pattern of a beach (BIRKEMEIER, 1979; CIAVOLA et al., 2007, CIAVOLA et al, 2015).

According to Sallenger (2000), the storm impact on a coast is not only dependent on the magnitude of storm-forced parameters, but also on the morphology, especially the vertical dimensions of the coast and adjacent land.

When the dune base is exceeded by the combined heights of the astronomical tide, storm surge, and wave runup during a storm event, the system becomes vulnerable to erosion and the landward-lying assets are at risk (PALMSTEN and HOLMAN, 2011; SALLENGER, 2000).

Storm events can result in damage to infrastructure and properties adjacent to the coastal zone (CIAVOLA et al., 2015; MACHADO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2009; PALMSTEN AND HOLMAN, 2011; PARISE et al., 2009; SARAIVA et al., 2003). Between 1997 and 2010, 46 storm events which caused significant damage were registered on the Santa Catarina coast. Specifically between 2000 and 2010 storm events left 13 coastal cities in a state of emergency and one in a situation of public calamity, with a total of 93 people homeless, 389 dislodged and 17.054 in some way affected. In 2010 alone 13 occurrences of storm events were recorded, representing a loss of ~US\$ 16 million, Florianópolis being the city most affected, with 6 events recorded (RUDORFF et al., 2014).

A better understanding of the vulnerability of the beach and foredune system to extreme conditions would, therefore, improve the quality of risk assessment and mitigation in threatened areas (PALMSTEN and HOLMAN, 2011). This paper presents the results of the forecasting of storm impact regimes on the beach and foredune system for return periods of 5, 10, 25 and 50 years on the East Coast (exposed beaches) and the North Coast (sheltered beaches) of Santa Catarina Island, using the scale proposed by Sallenger (2000), on the North Coast, however, applying the methodology for low-energy fetch-limited beaches used by Carrasco et al. (2012).

2.3. Study Area

The study area is located on Santa Catarina Island, municipality of Florianópolis, Santa Catarina State, Southern Brazil. It comprises all the beach systems lying between Barra da Lagoa and Daniela (Figure 9). Klein et al. (2016a) classified the North Coast of Santa Catarina Island, from Lagoinha to Daniela, as consisting of sheltered reflective beaches. The exposed East Coast, that comprises the beaches from Barra da Lagoa to Brava, was classified as predominantly rip-dominated transverse bar and rip to rhythmic bar and beach (TBR-RBB), also including a double bar system on Moçambique.

According to Araújo et al. (2003), the wave regime on Santa Catarina Island is dominated by a swell coming from the South with peak period of 12 s, followed by sea coming from the East with a peak period of 8 s. The most highly energetic conditions come from the South and Southeast, with periods above 11 s and waves exceeding 4 m height in deep water. The average tidal range is around 0.8 m and elevations due to meteorological effects can reach peaks up to 1 m above the sea level (Truccolo et al., 2006). The dominant winds come from the North, while the strongest winds come from the South during the passage of cold-front systems (NOBRE et al., 1986).

Klein et al. (2016b) determined the shoreline evolution rate (SER) by comparing shorelines extracted from vertical aerial photographs (from 1957 to 2010) and a GPS-RTK field survey (2012). The existence of significant erosion processes was observed on several beaches in the study area, with retractions of up to 1.5 m/year and 0.8 m/year, respectively, in the southern part of the Barra da Lagoa and Ingleses beaches. The authors also indicate that approximately 61% (23,609 m) of the study area is undergoing retraction processes. This number may be further compounded by the fact that about 20% (7,600 m) of the coast studied showed shoreline stability, a fragile stage that can be broken by man-made interventions (in constant expansion over the Island) and/or climate changes. Only about 19% (7,452 m) of the coast analyzed was found to be undergoing a progradation process.



Figure 9: Study area. Image: Esri database.

2.4. Material and methods

To forecast the impact of storm events on the beach and foredune system, the methodology proposed by Sallenger (2000) was adapted. The author distinguishes the storm impacts on dune systems as belonging to four distinct regimes: swash, collision, overwash and inundation. With the purpose of forecasting future impacts, it is here proposed to analyze the storm impact regimes based on the values corresponding to four different return periods (RP) (5, 10, 25 and 50 years). In addition, an adjustment based on a methodology carried out on a low-energy fetch-limited beach in southern Portugal (CARRASCO et al., 2012) is proposed for the beaches (on the North Coast) sheltered from wave incidence.

2.4.1. East Coast (Exposed beaches)

For the exposed coast (Barra da Lagoa/Moçambique to Brava), R_{High} was defined as the sum of wave runup ($R_{2\%}$), astronomical tide (AT) and storm surge (SS). The sea level rise (SLR), based on the worst case predictions of the Intergovernmental Panel on Climate Change report (IPCC, 2013), was added to

the values corresponding to each return period. The maximum return period of 50 years was chosen because the hindcast database of waves and tides provided by the SMC-Brazil project (used in wave propagation) counts on a basis of 60 years of data (1948-2008), and thus attained greater reliability in the forecasts.

Therefore, for each return period a R_{High} value was obtained as:

$$R_{High} = R_{2\%} + AT + SS + SLR \quad (1)$$

The runup exceeded by 2% of the waves was calculated using an empirical formulation specific for storm events (using the Iribarren number typical of storm conditions) proposed by Holman (1986), which includes both swash height and wave setup, and is defined as:

$$R_{2\%} = H_s(0.83\xi_0 + 0.2) \quad (2)$$

The Iribarren number is defined by $\xi_0 = \beta / (H_s/L)^{1/2}$, where β is the beach profile slope, H_s is the significant wave height and L is the wave length.

R_{Low} represents the elevation below which the beach is, most of the time, continuously subaqueous and can be described as:

$$R_{Low} = R_{High} - S_{2\%}, \quad (3)$$

Where $S_{2\%}$ is the 2% exceedance swash amplitude proposed by Holman (1986), defined as:

$$S_{2\%} = H_s(0.85\xi_0 + 0.06) \quad (4)$$

To obtain wave values near the coast it was necessary to propagate waves from intermediate to shallow waters. The wave data used in this study were propagated by Gomes da Silva (2014) to Barra da Lagoa and Ingleses and by Klein et al. (2016b) to Brava and Santinho. In both studies the OLUCA-SP (González et al., 2007) wave model (SMC-Brasil) was used. The authors selected this model due to the fact that it has demonstrated good results when representing the behavior of waves in the presence of headlands and islands, quite common structures in the study area. Wave series from two points of the DOW (Downscaled Ocean Waves - SMC Brasil) reanalysis database were selected for wave propagations from intermediate water up to the coast (Figure

10). Point 1 was used to propagate waves up to Ingleses and Brava. While the data from Point 2 were used to propagate waves up to Barra da Lagoa/Moçambique and Santinho.

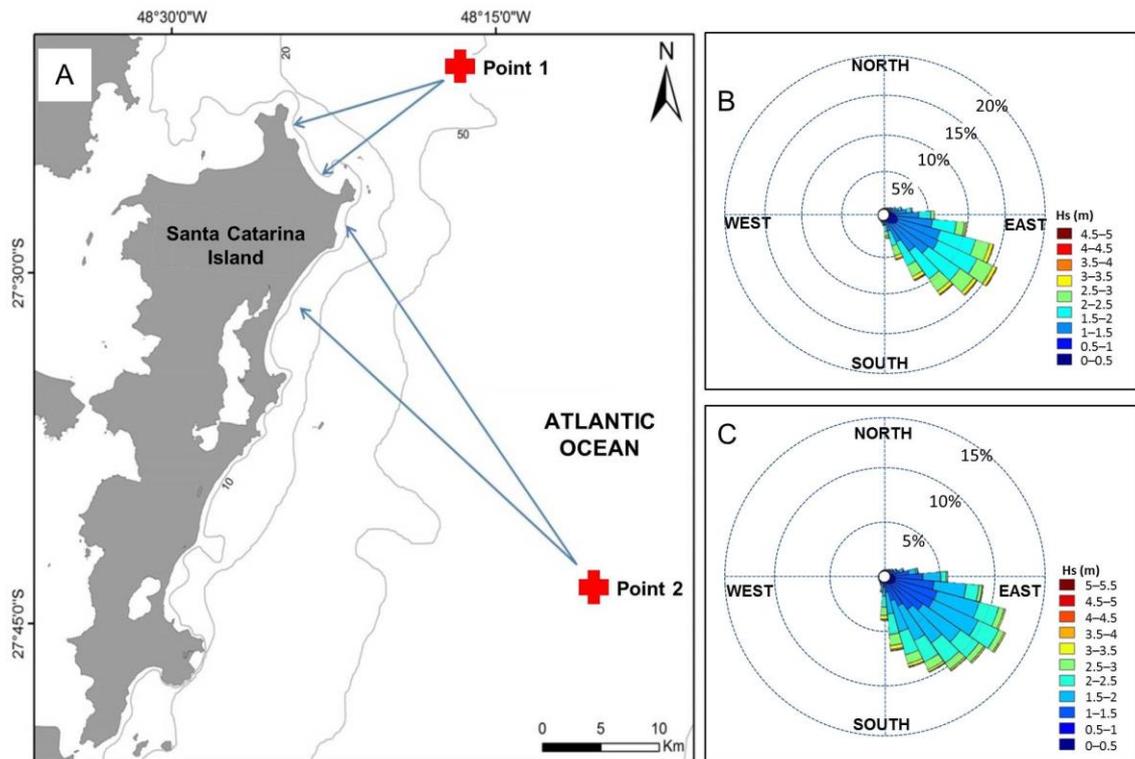


Figure 10: (A) Points from database of SMC-Brazil model selected for wave propagation. Point 1 ~50 m depth and Point 2 ~80 m depth. (B) Directional Hs rose from Point 1 and (C) Directional Hs rose from Point 2. Sources: Gomes da Silva (2014) and Klein et al. (2016b).

The bathymetry data from the SMC-Brazil database were used by the authors in the preparation of the numerical grid. These are digitalized data taken from the nautical charts made available by DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação of the Brazilian Navy).

The bathymetric and topographical data used in this study are not based on the same datum. Bathymetry are referred to the MLWS (Mean Low Water Springs) from DHN while topography is referred to the Imbituba-SC MSL (Official Brazilian datum). According to Klein et al. (2016b), the difference between MLWS and MSL in the Florianópolis – SC region is about 0.61 m. So, to integrate wave data (based on bathymetry) and geomorphic parameters (based on topography) it was necessary to add 0.61 m to the R_{HIGH} and R_{LOW} values.

Considering the fact that runup values are not constant along embayed beaches (BONETTI et al, 2012), it was necessary to calculate such parameter

in different sectors on Barra da Lagoa/Moçambique and Ingleses. The sectoring of these two beaches was undertaken by Gomes da Silva (2014) by clustering wave significant height and beach slope values (variables used to calculate the runup) at many points along coast. The author divided the beaches into four sectors and classified them according to the wave exposure (figure 11). Brava and Santinho were not sectoried since they present small extent and the waves hit the beach almost homogeneously. Figure 11 shows, in "A", the sectoring of Barra da Lagoa/Moçambique and, in "B", of Ingleses, in four sectors: protected, semi-protected, semi-exposed and exposed, as proposed by Gomes da Silva (2014).

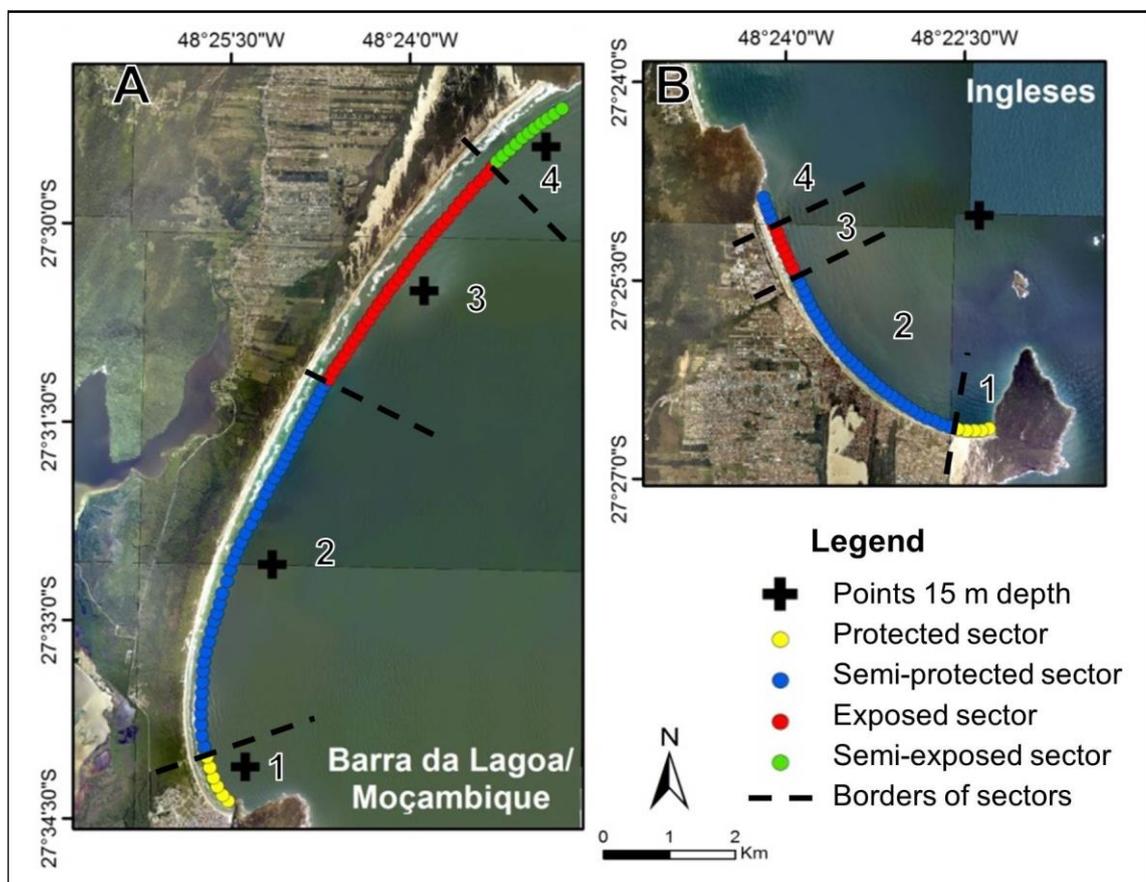


Figure 11: Sectoring of Barra da Lagoa / Moçambique and Ingleses based on H_s data and slope of the beachface. Crosses indicate the points of wave series used to calculate runup. Photos: Sustainable Development Secretariat of Santa Catarina (SDS, 2010). Source: Gomes da Silva, (2014).

The DOW database is composed of hourly time series of different wave parameters from 1948 to 2008 (60 years). These data series cannot be completely propagated since the computational cost would be too high. In view of this, a group of relevant cases representative of all the time series were selected for the propagation. Later, the series were reconstructed at interest

points of 15 m depth by using interpolation techniques. On Ingleses, Brava and Santinho a point out from the bay opposite the central portion of the beach was chosen. In the case of Barra da Lagoa/Moçambique, the 15 m isobath is located within the bay. Thus, the series was reconstructed at a point opposite the central portion of each sector (Figure11-A). The mean values of the wave significant height and peak period (directly related to L) were calculated for use in runup formulas. Table 1 presents the average of the parameters used to calculate 2% exceedance wave runup and swash.

The AT and SS data used in this study have been taken, respectively, from the Global Ocean Tide (GOT) and Global Ocean Surge (GOS) databases. Both are available in the SMC- Brasil model, which gives the level and wave database with time resolution for a period of 60 years (1948 -2008) (REGUERO et al., 2012). These data were obtained from the global and regional reanalysis performed at the Hydraulics Institute of Cantabria and are inserted in the Brazilian version of the SMC 3.0 model for use in wave propagations up to the coast.

Table 1: Average wave parameters used to calculate the runup. Sources: Gomes da Silva (2014) and Klein et al. (2016b). The peak period (\bar{T}_{p12}) is the same as that the external point (intermediate water).

Beach	Sector	\bar{H}_s (m)	\bar{T}_{p12} (s)	β (°)
Barra da Lagoa /Moçambique	1	1.07	8.07	1.84
	2	1.62	8.07	3.29
	3	1.64	8.07	4.00
	4	1.49	8.07	2.96
Santinho	-	1.48	8.07	1.53
Ingleses	1	0.46	7.78	3.57
	2	0.97	7.78	2.71
	3	1.20	7.78	1.97
	4	1.26	7.78	2.06
Brava	-	1.32	7.78	1.88

The values of AT, SS and runup were added up and in order to verify the highest values of R_{High} for each return period proposed in this study, an extreme regime analysis was performed using the Annual Maximums approach. The

R_{High} values for each return period (5, 10, 25 and 50 years) were obtained based on the Maximums Gumbel distribution.

The annual maximums approach takes into account the highest value observed in each year. In this case, the annual maximum value is selected, thus obtaining N values for the N years analyzed (Kamphuis, 2000). The extreme values can then be calculated using the Gumbel distribution given by Equation 5

$$\text{Pr} = \exp \left[-\exp \left(-\frac{H_{S,MA}-M}{C} \right) \right] \quad (5)$$

where: $H_{S,MA}$ is the maximum value attained in the year; M is the location parameter (the dispensing position on the axis H_s); and C is the shape parameter.

The estimated return period in years is then given by:

$$\text{PR} = \frac{1}{\text{Pr}}, \quad (6)$$

The value of sea level rise used was based on the worst case predictions of the Intergovernmental Panel on Climate Change report (IPCC, 2013). According to this study the increase in the sea level average has been occurring at a rate of 4 mm/year with an annual acceleration of 0.019 mm/ano². These rates were used to estimate the sea level values after 5, 10, 25 and 50 years (Table 2).

Table 2: Sea level rise values used to calculate each Return Period.

Return Period	SLR (m)
5 Years	0.02
10 Years	0.04
25 Years	0.1
50 Years	0,2

2.4.2. North Coast (Sheltered beaches)

One of the premises of the OLUCA-SP model is that waves propagate transversely to the contours of the bathymetry and the maximum wave rotation capable of being calculated is of less than 50°. Such a limitation does not allow

wave propagation on the northern beaches of Santa Catarina island: Lagoinha, Ponta das Canas, Cachoeira do Bom Jesus, Canasvieiras, Jurerê, Daniela and Forte (see Figure 9), since the orientation of these beaches is mainly from the North and the waves in SC are mainly from the South and East (ARAÚJO et al., 2003), thus not fulfilling the basic premises of the model.

Thus, the methodology proposed by Sallenger (2000) was adapted for the sheltered beaches and the values of R_{High} were calculated using the methodology applied by Carrasco et al. (2012) to assess flood hazard in a low-energy fetch-limited beach on the Ancão peninsula backbarrier (southern Portugal). Within this framework, every contributory factor - such as AT, SS, river discharge and regional SLR - that changes the water level at a fetch-limited site is taken into account. River discharge was not used in this study, since there are no large rivers in the study area that may influence the sea level.

As for the exposed beaches, the AT and SS data from the GOT and GOS databases were used. Likewise the AT and SS values were added up and the R_{High} values for each return period (5, 10, 25 and 50 years) were obtained based on the Maximums Gumbel distribution. The sea level elevation values for each of the proposed scenarios (5, 10, 25 and 50 years) were added to R_{High} in order to relate the impacts on the foredune system generated by the sea level uplift with the return periods proposed in this study. R_{Low} was defined as the maximum vertical range of AT to each return period analyzed. Thus the impact regimes in the sheltered beaches were classified according to the impacts caused by the SS water level induced.

2.4.3. Geomorphic features

The vertical dimensions of the beach morphology are represented by D_{High} and D_{Low} (Figure 12). D_{High} is the highest elevation of the first "line of defense" of the beach system, such as the foredune crest or, when this is not present, the crest of the berm. On beaches where the foredune is present D_{Low} is represented by foredune base elevation. In its absence $D_{Low} = D_{High}$.

The foredune height values, as well as the beach slope, were obtained in June 2013. The beach profiling survey consisted of 189 transect lines perpendicular to the shoreline, spaced an average of 200 m apart and

encompassing all the beaches studied. This was conducted using a GPS-RTK Trimble R6 from the most onshore to the most offshore position where the antenna was yet safe and dry. The data were real time corrected by a base station set in a known position. Elevations are referred to Imbituba-SC mean sea level (official Brazilian datum).

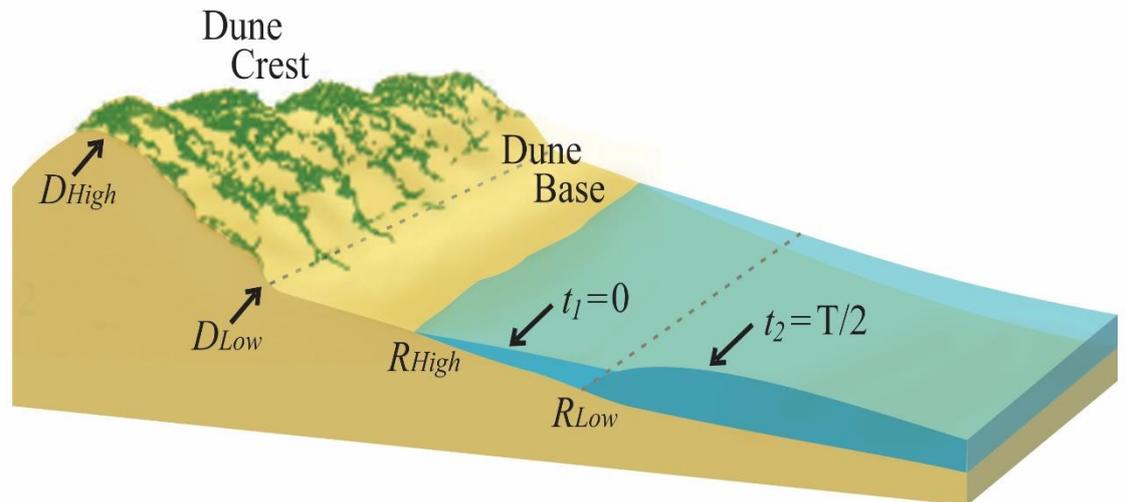
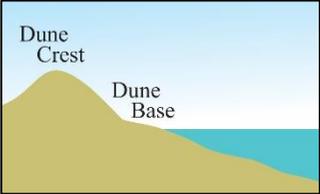
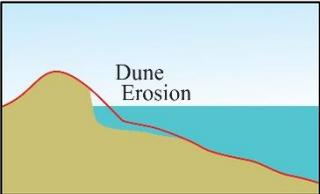
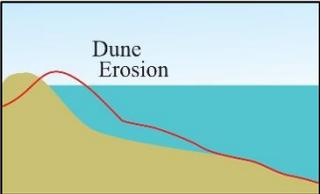
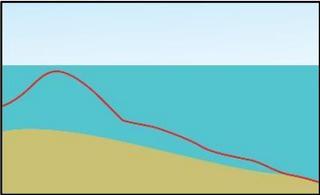


Figure 12: Sketch describing parameters used to distinguish the impact regimes. Adapted from Sallenger (2000).

2.4.4. Impact Regimes

To understand how R_{High} and R_{Low} are related to D_{High} and D_{Low} , Sallenger (2000) proposed four different regimes of impacts generated by storms: Swash, Collision, Overwash and Inundation, which are described in Table 3:

Table 3: Storm impact regimes. Adapted from Sallenger (2000).

Range of R_{High}/D_{High} and R_{Low}/D_{High}	Regimes and forecasts of beach change	Sketch describing each regime
$R_{High}/D_{High} = 0$ to D_{Low}/D_{High}	<p>SWASH REGIME:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sea level during storm events is confined to the foreshore; • The beach foreshore is eroded; • Sediment is transported seawards where it is deposited; • In post-storm conditions sand is transported onshore gradually, over weeks to months; • Beach does not suffer a net change. 	
$R_{High}/D_{High} = D_{Low}/D_{High}$ to 1	<p>COLLISION REGIME*</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sea level during storm events collides with the base of the foredune forcing its erosion; • The sediment resulting from the erosion process is transported seawards and does not return to re-establish the foredune; • Foredune ridge generally is submitted to net erosion. 	
$R_{High}/D_{High} > 1$ and $R_{Low}/D_{High} < 1$	<p>OVERWASH REGIME</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sea level during storm events exceeds the elevation of foredune; • Flow of water and sediment transpose the foredune crest; • Sediment is transported landward in the form of washover; • Sediment does not return to recompose the foredune in post-storm conditions, causing net erosion of the foredune. 	
$R_{High}/D_{High} > 1$ and $R_{Low}/D_{High} > 1$	<p>INUNDATION REGIME</p> <ul style="list-style-type: none"> • Storm induced sea level is high enough to completely submerge the foredune; • R_{Low} exceeds the elevation of the first line of defense (D_{High}); • The entire beach/foredune becomes directly impacted by the processes generated in the surf zone. 	

*If no foredune is present, $D_{Low} = D_{High}$ and there is no Collision Regime. A beach with no foredune will first experience Swash Regime followed in sequence by the Overwash and Inundation Regimes.

2.5. Results

2.5.1. East Coast (Exposed beaches)

Wave Runup and wave setup

Table 4 shows the values of wave runup and wave swash calculated for exposed beaches for each return period. At Barra da Lagoa/Moçambique the runup values present an increase from sector 1 to sector 3, decreasing in sector 4, following the pattern of H_s values (Table 1). While Ingleses showed values of runup decreasing from sector 1 to sector 4, ranging from 1.28 m to 2.20 m at sector 4 (RP 5 years) and sector 1 (RP 50 years), respectively, in an opposite pattern to that of H_s values. Santinho beach presented runup values ranging from 1.20 m to 1.82 m and Brava beach ranging from 1.19 m to 1.38 m between return periods of 5 and 50 years.

Table 4: Values of wave runup and wave setup for exposed beaches.

Beach	Sector	RP05		RP10		RP 25		RP 50	
		R _{2%} (m)	S _{2%} (m)						
Barra da Lagoa / Moçambique	1	0.92	0.67	0.98	0.73	1.04	0.82	1.09	0.91
	2	1.74	1.34	1.83	1.49	1.94	1.65	2.02	1.82
	3	2.12	1.69	2.25	1.9	2.42	2.06	2.55	2.30
	4	1.65	1.23	1.75	1.29	1.88	1.39	1.97	1.46
Santinho	-	1.20	0.79	1.34	0.87	1.58	1.02	1.82	1.15
	1	1.81	1.48	1.93	1.57	2.09	1.68	2.20	1.77
Ingleses	2	1.51	1.16	1.61	1.23	1.74	1.32	1.84	1.38
	3	1.24	0.88	1.32	0.93	1.43	1.00	1.51	1.05
	4	1.28	0.92	1.37	0.98	1.48	1.05	1.56	1.10
Brava	-	1.19	0.85	1.25	0.89	1.32	0.95	1.38	0.99

Geomorphic features

Table 5 shows the average values of vertical dimensions of dune crest (D_{High}) and dune base (D_{Low}) and Figure 13 presents example images, and also a representative aerial beach profile of each beach and sector of exposed beaches. It is possible to observe the lowest elevation in sector 1 (south) of Barra da Lagoa/Moçambique. The foredune on Santinho beach showed average elevations of 4.74 m and 2.40 m above MSL of crest and base dune respectively.

Table 5: Average values of vertical dimensions of dune crest (D_{High}) and dune base (D_{Low}) of exposed beaches. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC (Brazilian official vertical datum).

Beach	Sector	D_{High}	D_{Low}
Barra da Lagoa / Moçambique	1	1.47	1.04
	2	4.51	2.37
	3	6.39	2.78
	4	4.29	1.48
Santinho	-	4.74	2.40
	1	6.42	1.48
Ingleses	2	1.94	1.66
	3	2.54	1.83
	4	4.16	2.19
Brava	-	3.13	2.09

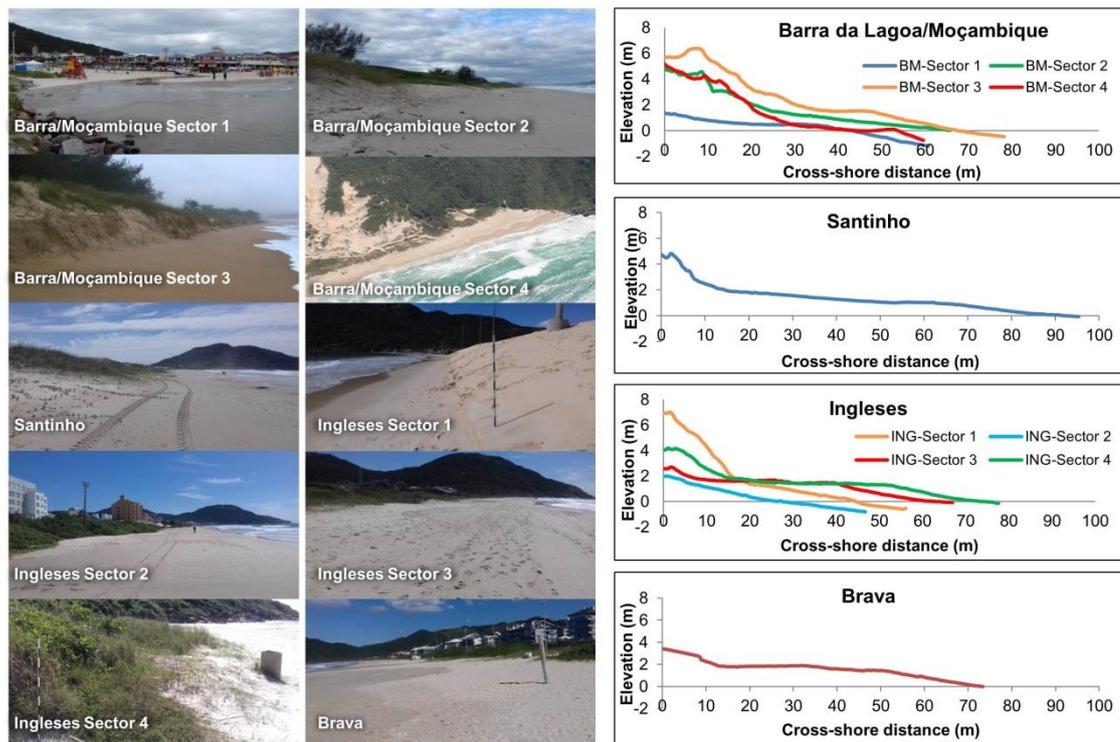


Figure 13: (Left) Example images of beach and foredune. (Right) Representative aerial beach profile of each sector and beach of exposed beaches. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC (Brazilian official vertical datum).

Sector 1 on the southern part of Ingleses showed the highest foredune elevation (6.42 m and 1.48 m above MSL of crest and base dune respectively), these values are related to the presence of the Santinho-Ingleses dunefield. A similar behavior to that of Santinho is to be observed in sector 2 toward sector 4, when the foredune elevation increases (1.66 m - 2.20 m) together with the exposure to wave incidence. Sector 2 has the largest urban occupancy while sectors 3 and 4 have the highest concentration of vegetated dunes. On Brava the respective average elevation value of the dune crest is 3.13 m and that of

the dune base is 2.09 m, with crest dune values ranging from 2.92 m in the south to 4.40 m in the north.

Forecasting of storm impact regimes

The results presented in Table 6 and Figure 14 show that most of the exposed beaches did not present changes in the regime when R_{High} and R_{Low} increased, the exceptions being of sector 3 of Ingleses, where the classification has gone from overwash (RP 5 and 10 years) to inundation (RP 25 and 50 years) and Brava that has changed from collision (RP 5 years) to overwash regime (RP 10, 25 and 50 years).

Table 6: R_{High} and R_{Low} values for each beach/sector and for each return period analyzed, values in meters (m), as well as the classification of exposed beaches.

Beach	Sector		RP (5)	RP (10)	RP (25)	RP (50)	Regime
Barra da Lagoa / Moçambique	1	R_{High}	2.95	3.12	3.36	3.61	Inundation
		R_{Low}	2.28	2.39	2.54	2.70	
	2	R_{High}	3.77	3.97	4.26	4.54	Collision
		R_{Low}	2.43	2.48	2.61	2.39	
Santinho	3	R_{High}	4.15	4.39	4.74	5.07	Collision
		R_{Low}	2.46	2.49	2.68	2.35	
	4	R_{High}	3.68	3.89	4.20	4.49	Collision
		R_{Low}	2.45	2.60	2.81	3.03	
-	R_{High}	3.23	3.48	3.90	4.34	Collision	
	R_{Low}	2.44	2.61	2.88	3.19		
Ingleses	1	R_{High}	3.84	4.07	4.41	4.72	Collision
		R_{Low}	2.36	2.50	2.73	2.95	
	2	R_{High}	3.54	3.75	4.06	4.36	Inundation
		R_{Low}	2.38	2.52	2.74	2.98	
3	R_{High}	3.27	3.46	3.75	4.06	Overwash (RP 5 - 10) Inundation (RP 25 - 50)	
	R_{Low}	2.39	2.53	2.75	3.01		
4	R_{High}	3.31	3.51	3.80	4.08	Collision	
	R_{Low}	2.39	2.53	2.75	2.98		
Brava	-	R_{High}	3.22	3.39	3.64	3.90	Collision (RP 5) Overwash (RP 10, 25 and 50)
		R_{Low}	2.37	2.50	2.69	2.91	

Sector 1 was the most impacted sector of Barra da Lagoa/Moçambique, being classified as submitted to inundation regime for all the return periods. The increment of foredune elevation in sectors 2 to 4, even with higher values of R_{High} and R_{Low} , provides more protection from impacts on the foredune system and so these sectors were classified as collision. Santinho has been classified as undergoing the collision regime for all the return periods. Sectors 1 and 4 of

Ingleses, are classified as submitted to collision regime and sector 2 remains in the inundation regime for all the return periods analyzed.

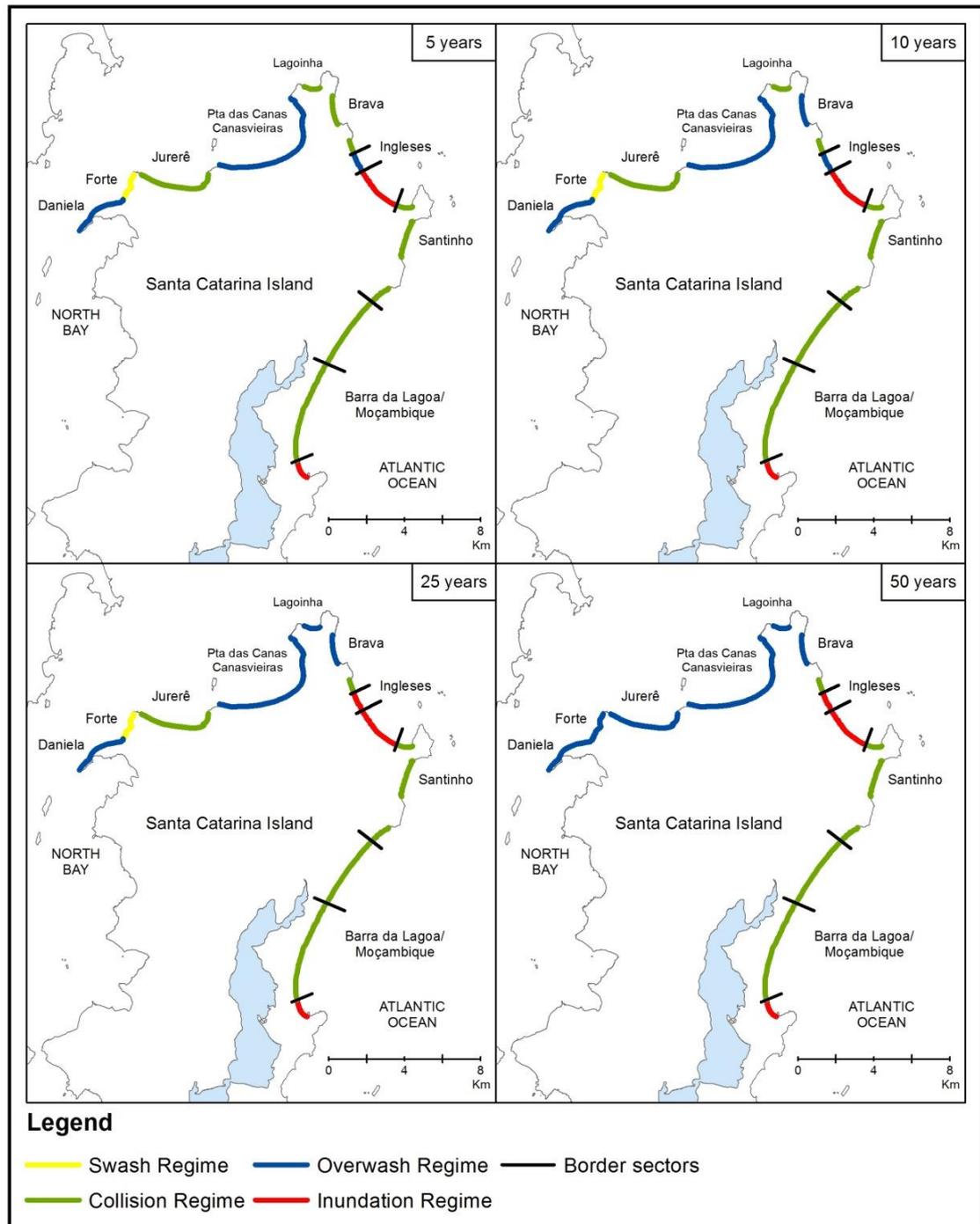


Figure 14: Classification of the response of the frontal dune system to storm events in swash system, collision, overwash and inundation.

2.5.2. North Coast (Sheltered beaches)

Geomorphic features

The foredune elevations of sheltered beaches presented in Table 7 and Figure 15 present lower values than exposed beaches. It may be noted that

foredunes are absent at Ponta da Canas, Canasvieiras and Forte, therefore on these beaches D_{High} and D_{Low} have the same values and represent the average elevations of the first line of defense of the beach system.

Table 7: Average values of vertical dimensions of dune crest (D_{High}) and dune base (D_{Low}) of sheltered beaches. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC Brazilian official vertical datum.

Beach	D_{High} (m)	D_{Low} (m)
Lagoinha	1.98	1.71
Ponta das Canas	1.54	1.54
Canasvieiras	1.35	1.35
Jurerê	2.16	1.41
Forte	2.12	2.12
Daniela	1.43	1.1

The average values at Lagoinha present a low foredune height (D_{High} = 1.98 m and D_{Low} = 1.71 m). Lagoinha presents an established and fairly well preserved foredune system, the exception being the eastern portion of the beach, where traditional pubs and restaurants are located on the foredune system and where the mouth of a small lagoon called Lagoinha do Norte is located.

Jurerê presents a well preserved and vegetated foredune with average values of 2.16 m and 1.41 m of D_{High} and D_{Low} respectively. Daniela's results evidence the presence of a small foredune (D_{High} = 1.43 m and D_{Low} = 1.10 m), although this is an established and vegetated foredune that at some points can exceed 70 m in width. Table 8 shows the results of R_{High} and R_{Low} of sheltered beaches.

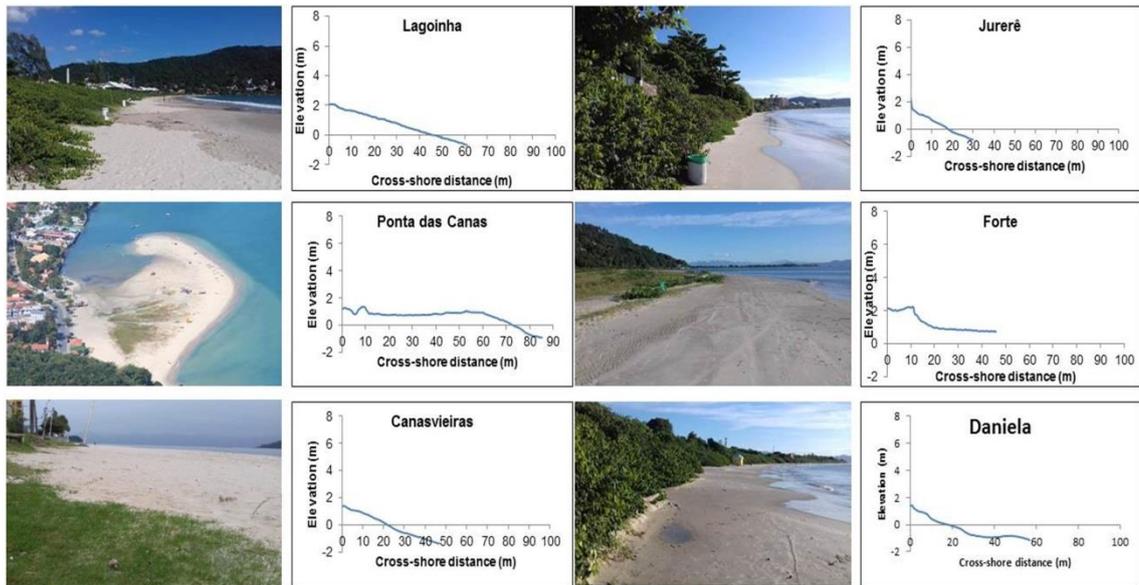


Figure 15: Example images of beach and foredune. Representative aerial beach profile of each beach of the sheltered area. Elevations are referenced to MSL of Imbituba - SC (Brazilian official vertical datum). Photos: Michel F.V. Prado

Table 8: R_{High} and R_{Low} calculated for sheltered beaches from AT and SS data.

	RP (05) (m)	RP (10) (m)	RP (25) (m)	RP (50) (m)
R_{High} (m)	1.79	1.88	2.04	2.22
R_{Low} (m)	1.14	1.17	1.24	1.36

Forecasting of storm impact regimes

The forecasting of storm induced impacts (Figure 14 and Table 9) shows that overwash was the predominant regime on sheltered beaches, this regime being the only one recorded for a return period of 50 years.

Table 9: Classification of sheltered beaches according to the regimes proposed by Sallenger (2000).

Beach	Impact Regime			
	RP (05)	RP (10)	RP (25)	RP (50)
Lagoinha	Collision	Collision	Overwash	Overwash
Ponta das Canas	Overwash	Overwash	Overwash	Overwash
Canasvieiras	Overwash	Overwash	Overwash	Overwash
Jurerê	Collision	Collision	Collision	Overwash
Forte	Swash	Swash	Swash	Overwash
Daniela	Overwash	Overwash	Overwash	Overwash

2.6. Discussion

2.6.1. East Coast (Exposed beaches)

Sector 1 of Barra da Lagoa is submitted to inundation regime. This area of the beach is already suffering the effects of high energy events thus corroborating the results found. Barra da Lagoa was drastically hit by a series of high-energy events in 2010, when four residences were destroyed by the force of the sea (Figure 16), this situation associated with losses which also occurred in Armação do Pântano do Sul (Southern Santa Catarina Island) forced the municipal government of Florianopolis to declare a state of emergency (RUDORFF et al., 2014).

Muler (2012) taking into account morphodynamic variables and urban occupancy classified this sector as at the high to very high level of vulnerability. The author estimates that possible losses caused by storm surges and erosion in this sector can reach ~ US\$ 3.5 million. The presence of a well-conserved and vegetated foredune from sectors 2 to 4 make these sectors less vulnerable to coastal hazards than is sector 1 (MULER, 2012). The creation of the Rio Vermelho State Park in 1962 is the main cause of the maintenance of a no-building zone, which increases the protection and preservation of the hinterland (MUEHE, 2006).



Figure 16: Residences destroyed by the force of the sea in sector 1 of Barra da Lagoa/Moçambique during a series of high-energy events in 2010. Photos: Mariela Muler.

The attenuation of the greatest wave energy from the south and southeast provided by Aranhas Island and the southern headland allied to the high foredune elevation are the main causes for Brava beach's having been classified as submitted to the collision regime. Pinto (2016) identified an input to the foredune of ~6,000 m³/year of sediment, of which ~5,000 m³/year arrive at

the Ingleses beach by overpassing through Santinho-Ingleses dunefield. The positive balance between input and output of sediment indicates the maintenance of the dune system, which ensures hinterland protection either by the permanence of the foredune or by the presence of a no-occupancy zone.

Sector 2, the most urbanized sector of Ingleses, is also subject to inundation regime for all the return periods studied. This shows that urban interventions, when not properly planned, will probably aggravate storm-induced effects. Simó and Horn Filho (2004), through research into areas at risk of destruction and/or storm-induced damage, identified Ingleses beach and sector 1 of Barra da Lagoa/Moçambique as having buildings at high level of risk. The same authors reported the fall of a sea-wall in sector 2 of Ingleses after a storm event in May 1998.

The change in regimes from Overwash (RP05 and RP10) to inundation (RP25 and RP50) in Sector 3 is related to a 5% increase in R_{High} , evidencing the fragility of the foredune system in facing any increase in the sea level during storms. Despite the presence of a large dune system, blowouts are observed throughout this sector (Figure 17), indicating points of disruption in the foredune, which may intensify the overwash effects and make the dune system even more susceptible to erosion processes (FERREIRA, 2005). The presence of the Ingleses-Santinho dunefield and the northern headland in sectors 1 and 4 of Ingleses, respectively, make these sectors less susceptible, which is why they are classified as submitted to collision regime.

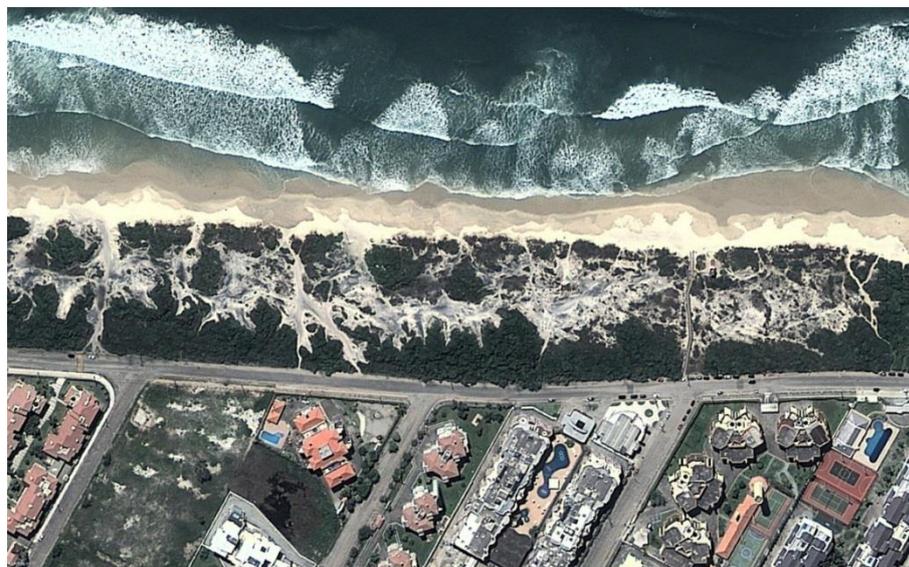


Figure 17: Blowouts present in Sector 3 of Ingleses Beach, indicating weak points in the foredune. Image Google Earth.

The change of regimes on Brava beach occurred at a lower level than that observed in Sector 3 of Ingleses. Even so, the attenuation of H_S in cases of swell from the east and southeast is more evident throughout the length of Ingleses due to the influence of islands and the southern headland (Klein et al., 2016b). Brava is classified as collision for a RP of 5 years, becoming submitted to overwash regime for the RP of 10, 25 and 50 years, which can be explained by the higher foredune elevation found on Brava than in sectors 2 and 3 of Ingleses. According to Hesp (1988), the foredunes represent a protective barrier against erosion and coastal flooding under the action of storm waves.

2.6.2. North Coast (Sheltered beaches)

Foredune elevation values on the North Coast are lower than those on the East Coast, which was to be expected since the influence of beach type is highly important in determining sediment transport. Low wave energy, micro-tidal reflective beaches are characterized by aeolian accretion and may be fetch-limited. In comparison, on micro-tidal intermediate to dissipative beaches the potential sediment supply is larger, therefore the foredune height tends to be greater (SHORT and HESP, 1982).

The absence of runup decreases by more than 40% the R_{High} values on sheltered beaches when compared to the higher values found in the exposed area (Sector 3-Barra da Lagoa / Moçambique). However, despite R_{High} being lower, the sheltered area has a high level of urbanization which, combined with lower foredune elevations makes these areas susceptible to storm surge and sea level rise.

Lagoinha beach presents an established and fairly well preserved foredune system, which provides protection for landward constructions. However, due to sea level rise the 25 and 50 year forecasts changed from collision to overwash regime. The results given by Klein et al. (2016b) show that almost the full extent of the Lagoinha shoreline is in stability, the exception being its western portion, with a negative shoreline evolution rate that reaches 0.35 m/year. The same study reported that an accelerating in sea level rise of 0.019 mm/ano², in a conservative scenario, may cause an additional retraction on the Lagoinha shoreline of up to 0.5 m in 50 years. Knowing that a sea level rise may affect the coastal evolution processes (FERREIRA, 2005), it is

possible to foresee that overwash events associated with a retraction of the shoreline may cause some loss in the protection provided by the foredunes.

The overwash regime on Ponta das Canas reflects the instability of this beach. Vieira da Silva et al. (2016) described Ponta das Canas as the most dynamic portion of the study area with a shoreline variation that attained 330 m between 1957 and 2012. This instability is related to a highly dynamic spit formation, which goes through a cycle of downdrift growth with attachment to the beach, erosion and merging with the downdrift beach. This cyclical pattern associated with the local low hydrodynamic must be responsible for precluding the formation of foredunes (SHORT and HESP, 1982), thus making this portion more susceptible to overwash events.

The classification of Canasvieiras as submitted to overwash regime is related to lack of foredune due to urban occupation. Simó and Horn Filho (2004) highlighted that urban occupation over foredunes on Ponta das Canas and Canasvieiras is responsible for the intensification of erosion, causing a shoreline retreat and consequent advance of the sea into adjacent constructions. Klein et al. (2016b) reported that ~80% of Canasvieiras is undergoing shoreline retreat, with areas of flooding caused by storm surges associated with the spring tide, mainly in the central and western portions.

As shown for Lagoinha beach, the foredunes present on Jurerê provide protection to urban structures, mainly in the western portion. Due to its relatively high foredune elevations Jurerê is classified as under collision regime for 5, 10 and 25 of interesting return period. The effects of the collision can be seen at some points along the beach (Figure 18). With the sea level rise predicted for 50 years, Jurerê is now classified as submitted to overwash regime. Klein et al. (2016b) reports that Jurerê presents a retraction trend all along the shoreline and if this trend continues over the next 50 years the foredune might be drastically affected in the future, thus aggravating the predicted overwash effects.



Figure 18: Effects of the collision on Jurerê Beach. Foto: Michel F.V.Prado

Praia do Forte was the only beach classified as susceptible to swash regime (RP5 - RP25). Similarly to Ponta das Canas, Forte has a highly dynamic spit that undergoes a cyclic pattern of accretion and erosion (VIEIRA DA SILVA et al., 2016) that, associated with a low hydrodynamic, precludes the formation of well-developed foredunes (SHORT and HESP, 1982). In the absence of foredunes, there is no collision regime (SALLENGER, 2000), and with the increase in sea level foreseen for the next 50 years Forte will become classified as overwash regime.

Daniela beach is classified as overwash regime for all the return periods analyzed, this classification being due to low foredune elevations. Klein et al. (2016b) indicated that Daniela's adjacent hinterland is highly susceptible to flooding, mainly in its western portion, with a sandy spit that is growing towards North Bay as the result of net sediment transport from the exposed beaches of the East coast (ALMEIDA et al., 1991; DIEHL, 1997; VIEIRA da SILVA et al., 2016). The results found by Klein et al. (2016b) corroborate the results of this paper, as the authors did not identify any area with an elevation below the sum of storm surge and astronomical tide and thus susceptible to flooding.

2.7. Conclusion

The forecasting of storm induced impacts showed that the majority of exposed beaches did not change its regime when R_{High} and R_{Low} increased, between the return periods analyzed, the exceptions being sector 3 of the Ingleses and Brava beaches. On the first the regime classification it has gone

from overwash (RP 5 and 10 years) to inundation (RP 25 and 50 years) and on Brava beach from collision (RP 5 years) to overwash regime (RP 10, 25 and 50 years). The change occurred with increases in the respective R_{High} values of ~5% and ~8%, evidencing the fragility of these portions in the face of changes in wave energy and sea level.

Inundation regime is foreseen for all the return periods studied in sector 1 of Barra da Lagoa/Moçambique and sector 2 of Ingleses beaches. In both sectors, the inundation regime has been related to intense human occupancy, responsible for erosion problems and damage to infrastructure. On the other hand, it was possible to infer that the presence of well-established and preserved foredunes provides protection against storm effects, as it was possible to observe in sectors 2, 3 and 4 of Barra da Lagoa/Moçambique, sectors 1 and 4 of Ingleses, and Santinho Beach, all of them classified as submitted to collision regime.

The methodology applied to low-energy fetch-limited beaches was adapted for the sheltered beaches in order to calculate R_{High} taking into account the changes in the sea level due to astronomical tide and storm surge. Comparisons with previous researches carried out in the study area demonstrated that the methodology proposed here must be capable of explaining the coastal response pattern in the face of predicted storm events and sea level rise.

The absence of runup was responsible for a reduction of ~40% in the R_{High} values as compared to those of the exposed area. However, the lower elevation of the foredune makes these areas susceptible to storm surge and sea level rise. None of the sheltered beaches was classified as having the regime susceptible to inundation. . Overwash was, however, the predominant regime, being the only one recorded for the return period of 50 years for all the beaches. Thus it was shown that these beaches require special care -in view of the fact that the effects of the overwash regime have been related to the occurrence of extensive damages and losses of properties and reduction of foredune protection.

The present study had as its main intention the making of a contribution to an in-depth knowledge of storm impacts on a sandy coastal system, since the

understanding of the storm induced response of the coast is critical to effective planning and coastal management.

Acknowledgments

The authors would like to express their gratitude for the support provided by the National Fund on Climate Change of the Ministry of the Environment of Brazil (term of cooperation N° 010/2011), CNPQ (Process number 303550/2012-0 and 385371/2014-4), National Institute of Science and Technology - Oceanography Integrated and Uses Multiple Continental Shelf and Ocean Adjacent - Oceanography Center Integrated - INCT-Mar COI and the Environmental Hydraulics Institute "IH Cantabria" of the Universidad de Cantabria.

LITERATURE CITED

- Almeida, E.S. Abreu de Castilhos, J.J. Simon, A.F.; Avila, E.L. Aumond, J.J. Pinto, N.L.C. Dal Santo, N.A. Infante, N. (1991). Observações geomorfológicas na praia do Forte–Ilha da Santa Catarina, município de Florianópolis–SC. *Geosul*, 11(4), 38–54.
- Araújo, C.E.S. Franco, D. Melo Filho, E. Pimenta, F. (2003). Wave regime characteristics of southern Brazilian coast. *Proceedings of the 6^o International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC* (Colombo, Sri Lanka), Paper 97, 15.
- Birkemeier, W. A. (1979). The effects of the 19 December 1977 coastal storm on beaches in North Carolina and New Jersey. *Shore and Beach*, 47. 7-15.
- Bonetti, J., Klein, A.H.F., Muler, M., De Luca, C.B. Silva, G.V., Toldo JR., E.E., González, M. (2012). *Spatial and Numerical Methodologies on Coastal Erosion and Flooding Risk Assessment*. In: Finkl, C. (Editor) Coastal Hazards. Chapter 16. Coastal Research Library Series. Springer, Dordrecht. (ISBN: 978-94-00-5233-7).
- Carter R.W.G. Woodroffe C.D. (1994). *Coastal evolution: Late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press. 514.
- Carrasco, A.R, Ferreira, Ó. Matias, A. Freire, P. (2012). Flood hazard assessment and management of fetch-limited coastal environments. *Ocean & Coastal Management* 65 15-25.
- Ciavola, P. Armaroli, C. Chiggiato, J. (2007). Impact of storms along the coastline of Emilia-Romagna: the morphological signature on the Ravenna coastline (Italy). *Journal of Coastal Research*, SI50. 540-544.
- Ciavola, P. Ferreira, Ó. Van dongeren A. Vries, J.V.T. Armaroll, C. Harley M. (2015). Prediction of storm impacts on beach and dune systems. In *Hydrometeorological Hazards: Interfacing Science and Policy*. 227-251. DOI: 10.1002/9781118629567.
- Diehl, F.L. (1997). *Aspectos Geoevolutivos, Morfodinâmicos e Ambientais do Pontal da Daniela, Ilha de Santa Catarina, Brasil*. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina. Master's thesis, 111.
- Ferreira, O. (2005). Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. *Journal of Coastal research*, SI42. 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.

Gomes da Silva, P. (2014). Exposição à inunda  o costeira nas praias dos Ingleses, Barra da Lagoa e Moçambique, Florianópolis, SC.– Universidade Federal de Santa Catarina. Master's thesis 237.

González, M.; Medina, R.; Gonzalez-Ondina, J; Osorio, A.; Méndez, F.J.; García, E. (2007). An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers and Geosciences*. 33: 916-931.

Hesp, P.A. (1988). Surfzone, beach and foredune interactions on the Australian southeast coast. *Journal of Coastal Research*, SI 3: 15-25.

Holman, R.A. (1986). Extreme value statistics for wave runup for natural beaches. *Coastal Engineering* (9). 527.

IBGE.(2011). *Atlas geográfico das zonas costeiras e oce  nicas do Brasil* / IBGE, Diretoria de Geociências.173p. ISBN: 9788524042195. Rio de Janeiro.

IPCC. (2013). *Climate Change: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kamphuis, J.W. (2000). Introduction to Coastal Engineering and Management. In: *Advanced Series on Ocean Engineering*. Singapura. World Scientific. 437.

Klein, A.H.F., Menezes, J.T., Diehl, F.L.; Abreu, J.G.N., Polette, M., Sperb, R.M., Sperb, R.C. (2006). SANTA CATARINA. In: MUEHE, D. (Org.). *Erosão e prograda  o do litoral brasileiro*, 476 p., Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Brasil. 85-7738-028-9.

Klein, A.H.F., Short, A.D., Bonetti, J. Santa Catarina beach systems. In: Short, A.D and Klein, A.H.F. (eds) (2016a), *Brazilian Beach Systems*. Springer Coastal Research Library.

Klein, A. H. F. Prado, M. F. V. Dalinghaus, C. DE Camargo, J. M. (2016b) *Metodologia para quantifica  o de perigos costeiros e proje  o de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adapta  o das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno*. ISBN: 978-85-7738-266-8. 252.

Machado, A. A. Calliari, L. J. Melo, E. Klein, A. H. da F. (2010). Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and

- their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2), 277–286.
- MMA, Ministerio do Meio Ambiente. (2008). *Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil*. Orgs. Zamboni, A; Nicolodi, J. L. 242p. ISBN 978-85-7738-112-8. Brasília.
- Muehe, D. (2006). *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Brasília. 476. ISBN 85-7738-028-9.
- Muler, M. (2012). *Avaliação da vulnerabilidade de praias da Ilha de Santa Catarina a perigos costeiros através da aplicação de um índice multicritério*. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. Master's thesis 203.
- Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean and Coastal Management*, 123, 18–43. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>
- Nicholls, R. J. Small, C. (2002). Improved estimates of coastal population and exposure to hazards released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*.v. 83, (28). 301-305.
- Nobre, C.A., Cavalcanti, I.F.A., Gan, M.A., Nobre, P.A., Kayano, M.T., Rao, V.B., Bonatti, J.P., Satyamurti, P., Uvo, C.B. and Cohen, J.C. (1986). Aspectos da climatologia dinâmica do Brasil. *Climanálise Special Issue*, 124.
- Oliveira, M. M. F. de, Ebecken, N. F., Oliveira, J. L. de, Santos, I. de A. (2009). Neural Network Model to Predict a Storm Surge. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 48(January), 143–155.
- Parise, C. K. Calliari, L. J. Krusche, N. (2000). Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3), 175–188.
- Palmsten, M. L. Holman, R. A. (2011). Infiltration and instability in dune erosion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(10), 1–18. <http://doi.org/10.1029/2011JC007083>
- Pinto, M. W. (2016). *Evolução morfodinâmica em escala histórica do campo de dunas do Santinho-Ingleses no norte da Ilha de Santa Catarina*; Master's thesis. 169.
- Reguero, B. G.; Menéndez, M.; Méndez, R.; Mínguez, R. Losada, I. J. (2012). A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*. (65), 38-55.
- Rudorff, F. M.; Bonetti Filho, J.; Moreno, D. A.; Oliveira, C. A. F & Murara, P. G.. (2014). Maré de tempestade. In: Herrmann, M. L. P. *Atlas de desastres*

naturais do Estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010. v. 2. Ed. IHGSC/Cadernos Geográficos, Florianópolis. 151-154. ISBN 978-85-67768-00-7.

- Sallenger, A. H. (2000) Storm impact scale for barrier island. *Journal of coastal research*, (16). 890-895.
- Saraiva, J. M. B., Bedran, C., Carneiro, C. (2003). Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS, Brazil. *Journal Of Coastal Research*, 35(Special Issue). 323–331.
- Simó, D. H.; Horn Filho, N. O. (2004). Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Gravel*. (2). 93-103.
- Short, A.D. Hesp, P.A. (1982). Wave, beach and dune interactions in South-eastern Austrália. *Marine Geology*. 48(4): 259-284.
- Strohaecker, T.M. (2008). Dinâmica populacional. In: MMA. *Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.
- Truccolo, E. C. Franco, D., Schettini, A. F. (2006). The Low Frequency Sea Level Oscillations in the Northern Coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 2004(39), 547–552.
- Vieira da Silva, G. Muler, M. Prado, M. F. V. Klein, A. H. F. Toldo Jr. E. E. (2016). Shoreline Change Analysis and Insight into the Sediment Transport Path along Santa Catarina Island North Shore, Brazil. *Journal of Coastal Research*, (1999). <http://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00164.1>
- Viles, H. Spencer, T. (1995). *Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast*. London: Edward Arnold. 352. ISBN: 0340 62540 6.

CAPÍTULO 3

3.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foram apresentadas previsões de impactos causados por tempestades sobre a os sistemas praial e de dunas frontal para as praias das costas leste e Norte da Ilha de Santa Catarina. Quatro regimes de resposta da costa foram propostos: Espraimento (*swash*), Colisão (*Collision*), Sobrelavagem (*Overwash*) e Inundação (*Inundation*). A delimitação entre eles foi baseada na relação entre a mais alta e mais baixa elevação vertical do nível do mar com as elevações da base e da crista da duna frontal.

O principal diferencial deste estudo em relação ao de Sallenger (2000) está na previsão de padrões de impactos futuros gerados por tempestades sobre o sistema praial e de dunas frontais. Sendo assim, o modelo de previsão proposto pode se utilizado como subsidio para estudos de adaptação e gerenciamento da zona costeira frente a eventos de alta energia.

Além disso, uma adaptação metodológica baseada na metodologia aplicada por Carrasco et al. (2012) foi proposta para a verificação dos impactos gerados por tempestades em praias abrigadas da incidência de ondas. Assim nesta nova metodologia foram levados em consideração, para classificação dos regimes de impactos, diferentes fatores que alteram o nível d'água em um ambiente abrigado da incidência de ondas, como maré astronômica, maré meteorológica e aumento do nível do mar local.

A previsão de impactos gerados por tempestades representa um instrumento de grande relevância para um aprofundado conhecimento da dinâmica costeira, sendo fundamental para a aplicação de um efetivo gerenciamento costeiro. Uma vez que tempestades representam o principal fator de controle das mudanças drásticas na conformação do sistema costeiro.

3.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao entendimento aprofundado dos efeitos gerados por tempestades sobre os sistemas praial e de dunas frontais, são apontados alguns fatores que devem dar continuidade:

- Recomendam-se novos estudos de previsão de parâmetros de ondas ao longo da costa analisada, com a utilização de modelos, os quais possam propagar ondas para áreas abrigadas da incidência de ondas;
- A avaliação dos regimes encontrados com medições em campo da morfologia praial em condições pré e pós-tempestades, assim como dos parâmetros de ondas;
- Sugere-se ainda a validação dos regimes de impactos encontrados neste estudo nos anos de 2017 (período de retorno de 5 anos) e 2022 (período de retorno de 10 anos), a partir da medição de parâmetros morfológicos dos sistemas praial e de dunas frontal.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO FILHO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of southern Brazilian coast. **6^oInternational Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC**. Colombo, Sri Lanka, Paper nº97. p.15. 2003.
- BIGARELLA, J.J; BECKER R. D.; DUARTE G. M. Coastal dune structures from Paraná (Brazil). **Marine Geology** 7: 5-55, 1969.
- BIRD, E.C.F. The formation of sand beach ridges. **Aust. J.Sci.** 22. p.349-350. 1960.
- BIRD E.C.F. **Coasts. An introduction to coastal geomorphology**. ANU Press. 2nd ed. p.320. 1976
- BONETTI, J. NUNES, M. G. OLIVEIRA, M. S. C.; GRÉ, J. C. R. N. Caracterização do relevo submerso da Baía Norte-SC com base na aplicação de um modelo digital de terreno. **Anais II Simpósio Nacional de Geomorfologia -GEOSUL**, Florianópolis-SC. p. 211-2171998.
- BRIDGES, M.H. Analysis of the Processes Creating Erosional Hot Spots in Beach Nourishment Projects. **Coastal & Oceanographic Engineering Program**. University of Florida, Gainesville, FL. p. 135. 1995.
- CALLIARI, L. J. GUEDES, R.M.C.; PEREIRA, P.S.; LÉLIS, R.F.; ANTIQUEIRA, J.A. & FIGUEIREDO, S.A. Perigos e riscos associados a processos costeiros no litoral sul do Brasil (Rs): uma síntese. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**. v. 14(1). p. 51-63. 2010.
- CAMARGO, R.; HARARI, J.; DIAS, P. L. S. Storm surge modeling and forecast for the South- Western Atlantic Ocean. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.72, n. 2. 2004.
- CARTER, R. W. G. **Coastal environments: an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines**. London: Academic Press, p 617, 1988.
- CARTER R.W.G., WOODROFFE C.D. **Coastal evolution: Late quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge University Press. p 514. 1994.
- CEPAL. **Efectos del cambio climático em la costa de América Latina y el Caribe: Guía metodológica**. P. 31. Naciones Unidas, Santiago de Chile. 2011.
- CRUZ, O. **A Ilha de Santa Catarina e o continente próximo; um estudo de geomorfologia costeira**. Florianópolis: Ed. UFSC. p. 276.1998.

- DAVIS, J.L., The importance of cut and fill in the development of sand beach ridges. **Aust. J. Sci.** 20, p. 105-111. 1957.
- DEAN, R.G. Heuristic models of sand transport in the surf zone. In: **Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone.** Sydney. p. 208-214. 1973.
- ELKO, N. BRODIE, K. STOCKDON. H. NORDSTROM, K. HOUSER, C.MCKENA, K. MOORE, L. ROSATI, J. RUGGIERO, P. THUMAN, R. WALKER, I. Dune management challenges on developed coasts. **Shore & Beach.** v. 84. N°1.p. 15-28. 2016.
- FERNANDEZ, G.J. **Erosional Hot Spots at Delray Beach, Florida: Mechanisms and Probable Causes.** Tallahassee, Florida: University of Florida, Tallahassee, Master's thesis, p. 84, 1999.
- FERREIRA, O. Storm groups versus extreme single storms: predicted erosion and management consequences. **Journal of Coastal Research**, SI42. p 221-227. 2005.
- FERREIRA, O. GARCIA. T., MATIAS. A., TABORDA, R., ALVEIRINHO, J. D.. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on Sandy shores. **Continental Shelf Research.** v. 26, p.1030-1044. 2006.
- GIANNINI, P.C.F; **Sistemas deposicionais eólicos no quaternário costeiro do Brasil.** Livre docência. p.224. 2007.
- HALLERMEIER, R.J. Seaward limit of significant sediment transport by waves: An annual zonation for seasonal profiles. **CETA 81-2**, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1981.
- HESP, P. A. Foredune formation in southeast Australia. **Coastal Morphology.** p.69-97. 1984.
- HESP, P.A. Surfzone, beach and foredune interactions on the Australian southeast coast. **Journal of Coastal Research**, SI 3: 15-25p. 1988.
- HESP, P.A. The beach backshore and beyond. In: SHORT, A. D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics.** John Wiley & Sons. p. 145-169p. 1999
- HESP, P. Coastal sand dunes: form and function. **CDVN Technical Bulletin N° 4.** p. 30. ISBN 0-478-11006-5. 2000.
- HESP, P.A. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. **Geomorphology.** 48: 245-268. 2002.
- HESP, P . DILLENBURG, S. R. BARBOZA, E. G. TOMAZELLI, L. J. AYUP-ZOUAIN, R. N. ESTEVES, L.S. GRUBER, N. L. S. TOLDO-Jr, E. E. TABAJARA, L. L. C. de A. CLEROT, L. C. P. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to

- Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. ISSN 0001-3765. p. 493-508. 2005.
- HOEFEL, F. G. **Morfodinâmica de Praias Arenosas: Uma Revisão Bibliográfica**. Itajaí, Editora da Univali. p. 90. 1998.
- HORN FILHO, N. Ilha de Santa Catarina In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. Brasil. p 476. ISBN: 85-7738-028-9. 2006
- IBGE. **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil** / IBGE, Diretoria de Geociências. p 173. ISBN: 9788524042195. Rio de Janeiro. 2011.
- IPCC: Climate Change: **The physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.
- KLEIN, A.H.F. **Morphodynamics of Headland Bay Beaches**. Tese de Doutorado–Universidade do Algarve, Faro, Portugal. 450 p. 2004.
- KLEIN, A.H.F., MENEZES, J.T., DIEHL, F.L.; ABREU, J.G.N., POLETTE, M., SPERB, R.M., SPERB, R.C. SANTA CATARINA. In: MUEHE, D. (Org.). - **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Ministério do Meio Ambiente. Brasil. ISBN: 85-7738-028-9. P. 476. Brasília 2006.
- KLEIN, A.H.F., SHORT, A.D., BONETTI, J. Santa Catarina beach systems. In: SHORT, A.D AND KLEIN, A.H.F. (eds), **Brazilian Beach Systems**. Springer Coastal Research Library. 2016a.
- Klein, A. H. F. PRADO, M. F. V. DALINGHAUS, C. DE CAMARGO, J. M. **Metodologia para quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras: litoral norte da Ilha de Santa Catarina e entorno**. ISBN: 978-85-7738-266-8. p. 252. 2016b.
- KOMAR, P.D. **Beach Processes and Sedimentation**. New Jersey: Prentice-Hall Inc. / Englewood Cliffs. p.429, 1976.
- MCKEE, E. D. Sedimentary structures in dunes. In MACKEE, E.D. **A study of global sand seas**. Geol. Surv. Prof. 1052. p. 83-134. 1979.
- MACKENZIE, P. The development of sand beach ridges. **The Australian Journal of Science** 20, p. 213-214. 1958.
- MASSELINK, G.; HUGHES, M. **Introduction to coastal processes and geomorphology**. Arnold. p. 354. 2003.

- MASSELINK, G. Formation and evolution of multiple intertidal bars on macrotidal beaches: application of a morphodynamic model. **Coastal Engineering**.v 51 p. 713–730. 2004.
- MENEZES, J. T. **Caracterização morfológica e sedimentar do segmento praial Navegantes/Gravatá e sua ação sobre os esforços de recomposição da praia**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.
- NEGUYEN, T. T. X. BONETTI, J. ROGERS, K. WOODROFFE, C. D. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability índices. **Ocean & Coastal Management**. v.123, p. 18-43. 2016.
- NEUMANN, B. VAFEIDIS, A.T. ZIMMERMANN, J. NICHOLLS, R.J. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding e a global assessment. **PLoS ONE** 10, e0118571. 2015.
- OLIVEIRA, M. M. F. de, EBECKEN, N. F., OLIVEIRA, J. L. de, & SANTOS, I. de A. Neural Network Model to Predict a Storm Surge. **Journal Of Applied Meteorology And Climatology**. v. 48(January), p. 143–155. 2009.
- NICHOLLS, R. J. SMALL, C. Improved estimates of coastal population and exposure to hazards released. **Eos, Transactions American Geophysical Union**.v. 83, n. 28, p. 301-305, 2002.
- NOBRE, C.A.; CAVALCANTI, I.F.A.; GAN, M.A.; NOBRE, P.A.; KAYANO, M.T.; RAO, V.B.; BONATTI, J.P.; SATYAMURTY, P.; UVO, C.B.; COHEN, J.C. Aspectos da Climatologia Dinâmica do Brasil. Climanálise. Edição especial. 1986.
- POLETTE, M. **Gerenciamento Costeiro Integrado: Proposta metodológica para paisagem litorânea da Microbacia de Mariscal, Município de Bombinhas, (SC), Brasil**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais. P. 499. 1997.
- RUDORFF, F. M.; BONETTI FILHO, J.; MORENO, D. A.; OLIVEIRA, C. A. F & MURARA, P. G.. Maré de tempestade. In: Herrmann, M. L. P. **Atlas de desastres naturais do Estado de Santa Catarina: período de 1980 a 2010**. v. 2. Ed. IHGSC/Cadernos Geográficos, Florianópolis, p. 151-154. ISBN 978-85-67768-00-7.2014.
- SALLENGER, A. H. Storm impact scale for barrier island. **Journal of Coastal Research**, v.16.p ISBN890-895. 2000.
- SHORT, A.D. Beach reponse to variations in breaker height.**proceedings 17th Coastal engineeringConference**, Sydney. ASCE 1016-1035. 1981.
- SHORT, A.D. e HESP, P.A. Wave, beach and dune interactions in South-eastern Austrália. **Marine Geology**, 48(4): 259-284p. 1982.

- SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. New York: John Wiley e Sons. 345 p. 1999.
- SIMÓ, D. H.; HORN FILHO, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Gravel**. n. 2, p.93-103, 2004.
- SPRING, R. C. The geology of South-east province, South Australia with special reference to Quaternary coastline migration and modern beach developments. **S.A Dept of Mines Geol. Surv. Of S.A. Bull. N° 29**. 1952.
- STROHAECKER, T.M. Dinâmica populacional. In: MMA. **Macrodiagnóstico da zona costeira e marinha do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2008.
- THOM, B. G. Origin of sand beach ridges. **Australian Journal of Science**. 26. p. 351. 1964.
- THOM, B. G. Late Quaternary coastal morphology of the Port Stephens_Myall Lakes area, N.S.W. J.Roy. **Soc. N.S.W.** 98. p. 23-36. 1965.
- TRUCCOLO, E. C. **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, p. 100. 1998.
- TRUCCOLO, E. C. FRANCO, D.,SCHETTINI, A. F. The Low Frequency Sea Level Oscillations in the Northern Coast of Santa Catarina, Brazil. *Journal of Coastal Research*,39, 547–552.2006
- USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS), Water levels and long waves. In: USACE. **Coastal Engineering Manual** – Chapter 5, Part II. Vicksburg, Mississippi: E.M. 1110-2-1100. p.76. 2002.
- VILES, H. SPENCER, T. **Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast**. London: Edward Arnold. p 352. ISBN: 0340 62540 6. 1995.
- WRIGHT, L.D.; SHORT, A.D. Morphodynamics Variability of Surf Zones and Beaches: A Synthesis. **Marine Geology**, v.56, p. 93-118, 1984.
- WRIGHT, L. D.; THOM, B. G. Coastal Depositional Landforms: A Morphodynamic Approach. **Progress in Physical Geography**. v.1. p. 412-459. 1977.