

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

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DAS CAUSAS DA VARIABILIDADE DA
LINHA DE COSTA E EROSÃO NA PRAIA DO HERMENEGILDO, RS**

MIGUEL DA GUIA ALBUQUERQUE

ORIENTADOR – Prof. Dr. Iran Carlos Stalliviere Corrêa

CO-ORIENTADOR – Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari

Porto Alegre - 2013

CIP - Catalogação na Publicação

Albuquerque, Miguel da Guia

Análise espaço-temporal das causas da variabilidade da linha de costa e erosão na praia do Hermenegildo, RS / Miguel da Guia Albuquerque. -- 2013.

126 f.

Orientador: Iran Carlos Stalliviere Corrêa.

Coorientador: Lauro Júlio Calliari.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2013.

1. Erosão costeira. 2. Geomorfologia costeira. 3. Eventos extremos. 4. Manejo costeiro. I. Corrêa, Iran Carlos Stalliviere, orient. II. Calliari, Lauro Júlio, coorient. III. Título.

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

**ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DAS CAUSAS DA VARIABILIDADE DA
LINHA DE COSTA E EROÇÃO NA PRAIA DO HERMENEGILDO, RS**

MIGUEL DA GUIA ALBUQUERQUE

ORIENTADOR: Prof. Dr. Iran Carlos Stalliviere Corrêa

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Lauro Júlio Calliari

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Guilherme Borges Fernandez - Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Jader Onofre de Moraes - Departamento de Geociências, Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. João Luiz Nicolodi - Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande

Tese de Doutorado apresentada
como requisito parcial para obtenção
do Título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre - 2013

“Uma grande jornada começa com um pequeno passo, mas
cuidado com este passo: é o mais importante.”

(Mort Walker)

“É na família que nasce o primeiro passo de
uma grande caminhada.”

(Douglas)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter iluminado meu caminho, dando condições para que eu chegasse ao fim de mais uma caminhada. Ao longo de minha vida acadêmica se passaram 10 longos anos de muito esforço e estudo. Por tudo isso, eu sou grato a ti Senhor!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado.

Um muito obrigado aos meus amigos do LOG-FURG: Fernando, Elaine, Arthur, Salette, Manoel, Gilberto (Milico), Elisa, Glória, Clabisnei, Débora, Priscila, Rosani e Karl; Aos amigos do CECO – UFRGS: Roberto (secretaria), Zé, Rogério, Luana, Heitor, Júlio, Michel, Thunder, Claudinha, Gabi Jung, Felipe Caron, João Neto, Lorival, Guilherme, Luciano Zazo, Dominicio, Venisse, Katia; Aos amigos do LGCO-UECE: Mailton, Renan, Maciel, Raquel, Judária, Glaciane, João Sergio; Aos amigos do IO-USP: Ana Paula Krelling, Paulo Henrique e Janaina; A Michelle Rigo da UERJ; Ao Felipe Sprovieri da *Coastal Planning*; Aos amigos do IFRS: Jefferson Santos, Tiago Gandra, Mauricio Ortiz, Daniel Zanotta, Helen Cabral, Fabi Galarz, Betânia Vargas, Fernando Rosito, João Augusto, Cristian Gonçalves e todos os demais colegas, alunos e orientados, pelos momentos de descontração, sugestões e críticas sobre o trabalho e contribuições para minha formação como profissional e pessoa.

Um agradecimento especial aos professores: Carlos Tagliani, João Nicolodi, Glauber Acunha, José Fontoura, Eloi Melo, Marco Romeu, Paulo Teixeira, Carlos Garcia, Mauricio Mata e Carlos Hartman da FURG; Jair Weschenfelder, Nelson Gruber, Eduardo Barboza, Elirio Toldo Jr. e Sérgio Dillenburg da UFRGS; Antonio Klein da UFSC; Moyses Tessler da USP; Rafael Sangoi e João Thadeu da UNIVALI; Guilherme Fernandez e Eduardo Bulhões da UFF; Maria Ozilea e Lidriana Pinheiro da UFC; e Jader Onofre da UECE, por todo conhecimento transmitido, sugestões, críticas, considerações e dicas para a elaboração desse trabalho.

Um agradecimento especial aos amigos Jean Espinoza e Christian Serpa. Sem vocês esse trabalho não seria possível. Ao meu grande amigo Davis Pereira pelas suas colocações sempre construtivas e pela sua amizade. Ao José Antiquiera e ao Paulo Salati por todo apoio no início de minha carreira como docente na FURG, e na coleta de dados desse trabalho.

Ao professor Iran Corrêa, meu orientador, por ter acreditado na proposta de trabalho, pela confiança e por toda ajuda prestada ao longo da execução desse trabalho. Foi um enorme prazer trabalhar com você!

Ao professor Lauro Calliari, meu co-orientador, amigo e quase pai Riograndino. Obrigado por sempre confiar no meu trabalho, pelos incentivos, críticas construtivas e pelas palavras de motivação. Um dos maiores orgulhos da minha vida foi ter trabalhado ao seu lado!

A minha namorada Carine Popiolek, obrigado por estar sempre junto, tendo paciência nos meus momentos de mau humor, correrias, trabalhos de campo excessivos e por me puxar as orelhas quando eu sempre estou querendo abraçar o mundo. Mesmo afastados, durante um determinado período, você foi fundamental nessa jornada. Te amo!

A minha família: Fernando Luiz, Luiza Gabriela, João Henrique, Neide, Monica, Sabrina e Fernando Filho; e finalmente aos meus pais João e Nair, por sempre acreditarem no meu potencial. Agradeço toda a educação transmitida a mim, as palavras de incentivo, os conselhos, críticas e por estarem sempre presentes nos momentos mais importantes de minha vida. Amo vocês!

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vi |
| LISTA DE TABELAS..... | ix |
| LISTA DE EQUAÇÕES..... | x |
| LISTA DE ABREVIATURAS..... | xi |
| RESUMO..... | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVO GERAL..... | 6 |
| 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 6 |
| 3. HIPÓTESE LEVANTADA..... | 7 |
| 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO..... | 7 |
| 5. ESTADO DA ARTE..... | 11 |
| 5.1 A PROBLEMATICA DA EROÇÃO COSTEIRA NOS ESTADOS UNIDOS..... | 12 |
| 5.2 A EROÇÃO COSTEIRA NO CONTINENTE EUROPEU..... | 16 |
| 5.3 O LITORAL BRASILEIRO E A PROBLEMATICA DA EROÇÃO..... | 18 |
| 5.4 EROÇÃO E VULNERABILIDADE COSTEIRA..... | 24 |
| 5.5 MÉTODOS PARA MAPEAMENTO E EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA..... | 29 |
| 5.6 METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO..... | 36 |
| 6. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 39 |
| 6.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CARTOGRÁFICA E PREPARAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA..... | 39 |
| 6.2 GEORREFERENCIAMENTO E REGISTRO DO BANCO DE DADOS..... | 40 |
| 6.3 VETORIZAÇÃO DAS IMAGENS E COLETA DE DADOS DE CAMPO COM GPS..... | 42 |
| 6.4 ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO..... | 43 |
| 6.5 PERFIS TOPOGRÁFICOS..... | 44 |
| 6.6 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOIDAL LOCAL..... | 45 |
| 6.7 OBTENÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO MAR..... | 47 |
| 6.8 OBTENÇÃO DOS DADOS DE VENTO E PRESSÃO..... | 47 |
| 6.9 OBTENÇÃO DOS DADOS DE ONDAS E NÍVEL..... | 48 |
| 6.10 OBTENÇÃO DAS TAXAS DE RECUO DA LINHA DE COSTA..... | 48 |
| 6.11 TESTE ESTATÍSTICO PARA CORRELAÇÃO DOS DADOS DE DESLOCAMENTO DA LINHA DE COSTA..... | 54 |
| 6.12 TESTE DE TENDÊNCIA ESTATÍSTICA PARA SÉRIES DE DADOS DE TSM.... | 55 |
| 6.13 APLICAÇÃO DE FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS (EOF)..... | 56 |
| 6.14 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA FUTURA..... | 58 |
| 6.15 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS SUSCEPTÍVEIS AO PROCESSO EROSIVO..... | 59 |
| 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 61 |
| 7.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DO POLÍGONO DE MUDANÇA..... | 61 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 7.2 | VARIAÇÕES DA LINHA DE COSTA EM MESOESCALA..... | 63 |
| 7.3 | ANÁLISE DOS DADOS DE TSM VERSUS INTENSIDADE DE EL NIÑO..... | 68 |
| 7.4 | COMPORTAMENTO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE VENTO E TSM..... | 73 |
| 7.5 | CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS SAZONAIS..... | 76 |
| 7.6 | VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA EM MICROESCALA..... | 78 |
| 7.7 | CARACTERIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA FUTURA..... | 83 |
| 8. | CONCLUSÕES..... | 90 |
| 9. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 94 |
| 10. | ANEXOS..... | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 01: | Estimativas de elevação do nível do mar segundo IPCC. | 01 |
| Figura 02: | Anomalias da TSM ocorridas na região da CBM..... | 02 |
| Figura 03: | Localização da área de estudo..... | 08 |
| Figura 04: | Ocupação ocorrida sobre o campo de dunas da praia do Hermenegildo..... | 09 |
| Figura 05: | Afloramento de turfas na face de praia..... | 10 |
| Figura 06: | Escalas espaço-temporais envolvidas no estudo de praias e processos relativos à erosão costeira. Fonte: modificado de Short (2000); extraído de Lins de Barros (2005)..... | 12 |
| Figura 07: | Localidades abrangidas pelo Projeto Micore..... | 18 |
| Figura 08: | Casas atingidas pelas tempestades, na praia do Hermenegildo..... | 21 |
| Figura 09: | Esquema do empilhamento de água na costa resultando em maré meteorológica. AP: centro de alta pressão; BP: centro de baixa pressão; TE: transporte de Eckman..... | 23 |
| Figure 10: | (a) Esquema destacando as relações de colinearidade entre as coordenadas da câmera, imagem, mundo real e ângulos de rotação, utilizados nas transformações fotogramétricas. (b) Mosaico obtido a partir de retificação das imagens <i>Timex</i> , geradas pelo sistema ARGUS..... | 34 |
| Figura 11: | Croqui do método DSAS para diferentes tipos de costa..... | 37 |
| Figura 12: | Caracterização do método do polígono de mudança..... | 38 |
| Figura 13: | GPS geodésico posicionado sobre o marco do IBGE..... | 41 |
| Figura 14: | Coleta de pontos realizada na linha de estruturas e nas escarpas..... | 43 |
| Figura 15: | Malha de pontos utilizada na geração do modelo digital do terreno (DEM)..... | 44 |
| Figura 16: | Estação total e prisma utilizado nos levantamentos de perfis..... | 45 |
| Figura 17: | Rede gravimétrica do sistema geodésico brasileiro..... | 46 |
| Figura 18: | Representação das superfícies da Terra..... | 47 |
| Figura 19: | (A e B) Esboço do Método do Polígono de Mudança para diferentes datas, a partir de uma linha base; (C) Sobreposição dos polígonos para realização do processo de subtração; (D) Polígono gerado a partir das linhas de interesse..... | 50 |
| Figura 20: | Modelo elaborado no <i>software Erdas-Image 9.3</i> para o cálculo de erosão e acreção..... | 51 |
| Figura 21: | Modelo elaborado no <i>software Erdas-Image 9.3</i> para binarização da imagem..... | 52 |
| Figura 22: | Imagem binária obtida a partir do modelo <i>Erdas-Image</i> [®] 9.3..... | 52 |
| Figura 23: | Leitura da área erodida no <i>software Multispec</i> | 53 |
| Figura 24: | Resumo da metodologia para o cálculo das taxas de erosão..... | 54 |
| Figura 25: | Representação da tabela Saaty..... | 59 |
| Figura 26: | Correlação entre a erosão costeira e o período monitorado, através do método do polígono de mudança..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: Correlação entre a erosão costeira e o período monitorado, através do método DSAS..... | 62 |
| Figura 28: Taxas de recuo da linha de costa entre 1947 e 2012..... | 64 |
| Figura 29: Subdivisão do balneário Hermenegildo em setores..... | 65 |
| Figura 30: Recuo da linha de costa por setores, entre 1947 e 2012..... | 66 |
| Figura 31: Destruição ocasionada na parte central do balneário, após a passagem de um evento extremo em fevereiro de 2010..... | 68 |
| Figura 32: Correlação entre anomalias térmicas, El Niño e ventos em períodos de alta e baixa retração costeira, respectivamente..... | 69 |
| Figura 33: Correlação entre a TSM e as taxas de erosão entre 1947 e 2011..... | 70 |
| Figura 34: Caracterização dos percentuais de significância para cada componente da EOF..... | 71 |
| Figura 35: Tendência do aumento da temperatura de superfície do mar para o oceano Atlântico Sul..... | 72 |
| Figura 36: Caracterização da direção e intensidade dos ventos em 65 anos. (b) Gráfico de tendência da direção dos ventos, na costa sul do RS..... | 74 |
| Figura 37: Correlação entre a TSM e o nível, no período monitorado..... | 75 |
| Figura 38: Variações da linha de costa entre 30/09/2011 e 30/06/2012 obtidas com GPS geodésico..... | 76 |
| Figura 39: Perfil topográfico realizado entre 09/10/2011 e 29/10/2011..... | 77 |
| Figura 40: Perfil topográfico realizado entre 06/11/2011 e 27/11/2011..... | 79 |
| Figura 41: Perfil topográfico realizado entre 03/12/2011 e 27/12/2011..... | 79 |
| Figura 42: Perfil topográfico realizado entre 04/01/2012 e 30/01/2012..... | 80 |
| Figura 43: Perfil topográfico realizado entre 03/02/2012 e 03/03/2012..... | 81 |
| Figura 44: Comportamento dos perfis sazonais realizados entre 07/2010 e 04/2012..... | 82 |
| Figura 45: Mapa de distribuição de sedimentos da antepraia, na proximidade da praia do Hermenegildo..... | 82 |
| Figura 46: Tendência do processo erosivo entre 1947 e 2012..... | 83 |
| Figura 47: Posições das linhas de costa futuras em 2022, 2032 e 2100, obtidas a partir do método dos mínimos quadrados..... | 84 |
| Figura 48: Resultados da simulação da previsão da linha de costa (cel. 1), para os anos de 2030 e 2100, na região compreendida entre o Chuí e a metade sul da Lagoa Mangueira..... | 85 |
| Figura 49: Diferentes tipos de estruturas utilizadas para a proteção da linha de costa..... | 86 |
| Figura 50: Área de expansão urbana e risco socioambiental proposto no Plano de | |

| | |
|---|----|
| Manejo de Dunas de Santa Vitória do Palmar..... | 87 |
| Figura 51: Mapa de probabilidades a erosão gerado a partir do método AHP Geométrico..... | 88 |
| Figura 52: Processo de erosão ocorrido no extremo norte do balneário Hermenegildo entre o período de 2009 e 2011..... | 88 |
| Figura 53: Mosaico de fotos de diferentes trechos da orla do balneário Hermenegildo dia 28 de agosto de 2009..... | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 01: | Principais causas da erosão costeira..... | 04 |
| Tabela 02: | Histórico do mapeamento da linha de costa nos EUA..... | 15 |
| Tabela 03: | Principais elementos de política de combate à erosão do projeto <i>Conscience</i> | 17 |
| Tabela 04: | Geoindicadores utilizados para caracterização do processo erosivo..... | 19 |
| Tabela 05: | Escalas de digitalização e resolução espacial de fotografias aéreas..... | 40 |
| Tabela 06: | Erro médio quadrático atribuído a cada fonte de dados..... | 42 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | | |
|-------------|---|----|
| Equação 01: | Cálculo da ondulação geoidal..... | 47 |
| Equação 02: | Álgebra de polígonos..... | 49 |
| Equação 03: | Cálculo do deslocamento entre as linhas de costa no método do polígono de mudança..... | 53 |
| Equação 04: | Taxa de deslocamento por ano no método do polígono de mudança..... | 53 |
| Equação 05: | Equação para determinação do cálculo da linha de costa futura..... | 54 |
| Equação 06: | Cálculo da soma do número de termos da série de dados..... | 55 |
| Equação 07: | Cálculo da distribuição total, com média, na série de dados..... | 55 |
| Equação 08: | Cálculo da variância..... | 55 |
| Equação 09: | Teste bilateral para determinação da significância estatística..... | 56 |
| Equação 10: | Cálculo de probabilidade da série..... | 56 |
| Equação 11: | Variabilidade espacial da EOF..... | 56 |
| Equação 12: | Cálculo das anomalias da TSM..... | 57 |
| Equação 13: | Cálculo da matriz de covariância..... | 57 |
| Equação 14: | Determinação dos autovalores e autovetores da matriz de covariância.... | 58 |
| Equação 15: | Cálculo das componentes principais da matriz EOF..... | 58 |
| Equação 16: | Cálculo da estimativa da posição da linha de costa futura..... | 59 |
| Equação 17: | Cálculo da constante de suavização de cada critério utilizado no método AHP..... | 60 |
| Equação 18: | Cálculo da distribuição de probabilidades segundo o peso de cada critério estabelecido no método AHP..... | 60 |

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP – *Analitic Hierarchy Process*

APM – Anticiclone Polar Migratório

ATAS – Anticilone Tropical Semifixo do Atlântico Sul

CBM – Confluência Brasil Malvinas

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil

DSAS – *Digital Shoreline Analysis System*

ENOS – El Niño de Oscilação Sul

EOF – Funções Ortogonais Empíricas

FEMA – *Federal Emergency Management Agency*

GCPs – Pontos de controle

GPS – Sistema de Posicionamento por Satélite

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IUGS – União Internacional de Ciências Geológicas

LIDAR – *Light Detection and Ranging*

LPM – Linha de Preamar

NCEP – National Centers Environmental Prediction

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NODC – National Oceanographic Data center

PC – Matriz de Pesos de Contribuição

RMS – Erro Médio Quadrático

RN – Referencial de Nível

SIG – Sistemas de Informações Geográficas

TSM – Temperatura de Superfície do Mar

UFPel – Universidade Federal de Pelotas

USGS – Centro de Pesquisa em Geologia dos Estados Unidos

WW3 – Modelo *Wave Watch III*

RESUMO

Na atual discussão do processo de mudanças climáticas, e seus efeitos nas zonas costeiras, o presente estudo tem como objetivo ampliar o entendimento dos fatores responsáveis pelo processo erosivo estabelecido na praia do Hermenegildo, entre os anos de 1947 e 2012, através da associação de dados oceanográficos que levam a intensificação desse processo, e dados geomorfológicos tradicionais. A partir de dados de linha de costa, obtidos através de imagens de satélite, fotografias aéreas, de diferentes épocas, e dados de GPS RTK coletados *in situ*, foi possível caracterizar o comportamento da linha de costa da praia do Hermenegildo em micro e mesoescala. Dados de TSM, direção e intensidade dos ventos e altura de ondas, obtidos da NOAA, também foram incorporados no estudo. Ao longo de 65 anos, a taxa de retração média da linha de costa foi de 1,68 m/ano, com os maiores picos erosivos registrados entre os anos de 1996 a 2000 (6,29 m/ano) e 2005 a 2006 (5,25 m/ano). Os intervalos com as maiores taxas de recuo são coincidentes com os períodos de ocorrência de forte El Niño e anomalias na TSM. Em anos onde esses eventos são coincidentes, em mesma intensidade, foram registradas as maiores perdas por erosão. Um comparativo feito entre os dados de TSM e retração média da linha de costa apresentaram uma correlação de 80%, num cenário onde os ventos provenientes do quadrante SW são os mais significativos. Quando comparados os dados de TSM e nível médio do mar local (obtidos por modelagem), esses não apresentam correlação significativa. Contudo, quando analisados e comparados separadamente, os dados variam coincidentemente para o mesmo intervalo temporal de forma que, quando se identificou variações na TSM, observou-se também uma variação no nível. O conhecimento do comportamento da linha de costa é fundamental para fins de planejamento e ordenamento do litoral. Dessa forma, a partir do conjunto de dados, foi efetuada uma previsão da posição futura da linha de costa para os anos de 2022, 2032 e 2100, tendo como base o ano de 2012. Estas apresentaram um recuo de 8,18 m, 22,29 m e 151,57 m, respectivamente. De posse dessas informações, um mapa de probabilidades ao processo erosivo foi gerado destacando que, o setor norte do balneário é o mais suscetível à erosão. O produto cartográfico obtido, o qual contempla informações de diferentes escalas, poderá servir como uma ferramenta importante aos gestores costeiros municipais. No que diz respeito ao estabelecimento de possíveis soluções para amenizar ou mitigar a problemática da erosão, o mapa de probabilidades à erosão dará suporte ao processo de expansão do balneário, à medida que os gestores terão mapeadas as áreas de maior e menor probabilidade ao processo erosivo.

Palavras – chave: Erosão, eventos extremos e manejo costeiro.

ABSTRACT

In the context of the current discussion of climate change and its effects along the coastal zones, this study aims to broaden the understanding about the responsible factors for the well established coastal erosion at Hermenegildo beach, between the years 1947 and 2012, throughout the association of oceanographic data that may have lead to its intensification, and conventional geomorphological data. Using shoreline position data, through satellite imagery, air photographs of various periods combined with GPS RTK data collected *in situ*, it was possible to characterize shoreline behavior at micro and medium scale. TSM, wind strength and direction as well as wave height data from NOAA, have also been incorporated to this study. Along 65 years, mean shoreline recession has been of 1.68 m/yr, with highest erosion rates registered between 1996 and 2000 (6.29 m/yr) and between 2005 and 2006 (5.25 m/yr). The highest shoreline recession values coincide with El Niño periods and with TSM anomalies. Throughout the years when these events coincided and had the same intensity, the highest erosion rates were registered. A comparison between TSM data and mean shoreline recession demonstrated a positive correlation of 80%, in a scenario where SW winds predominate. Conversely, when TSM and mean local sea level (modeled), no significant correlation was observed. Nonetheless, when compared and analyzed separately, data varied coincidentally for the same time interval, that is when variations in TSM occurred, mean sea level also varied. Understanding shoreline behavior is essential for coastal planning and development. This way, using the available data it was possible to predict future shoreline position for the years 2022, 2032 and 2100, using the 2012 shoreline position as a starting point. Resulting future shoreline positions are 8.18 m, 22.29 m and 151.57 m, respectively. Based on this information, a probabilistic map of erosion risk was prepared highlighting that the northern sector of Hermenegildo is more susceptible to erosion. The resulting cartographic product, which comprises information at various scales, may be used as an important tool for local coastal managers. Regarding the establishment of possible solutions in order to mitigate the erosion problem, the erosion probability map will give support to broaden urbanization along the beach, since the coastal managers will know which area are at higher or lower risk of erosion.

Key words: Erosion, extreme events, coastal management

1. INTRODUÇÃO

No contexto das atuais discussões sobre mudanças do clima, observações compiladas ao longo das últimas décadas e, uma crescente literatura científica sugere que, provavelmente, tenha havido um aumento na intensidade de certos riscos costeiros, sejam eles em micro ou mesoescala (Forbes *et al.*, 2004). O risco é o somatório entre os tipos de perigos existentes e o número de pessoas no ambiente praial. Dal Cin & Simeoni (1994) e Dolan & Walker (2004) consideram o risco como sendo a maior ou menor exposição das estruturas ou da população a eventos que podem causar danos. Dessa forma, estes dependem diretamente do perigo, pois consideram a presença de valores humanos e materiais ligados a ele (Beribilli *et al.*, 2007). Dentre as categorias de risco existentes têm-se a questão da elevação do nível médio dos mares.

Segundo estudos realizados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC, até o final da década de 2050 o nível do mar estará cerca de 0,30 cm mais alto do que o atual (Fig. 01) e no final do século, o prognóstico é em torno de 0,59 cm (IPCC, 2007). O IPCC destaca ainda que, o número anual de vítimas atingidas pela erosão e inundação poderá chegar a 158.000 em 2020.

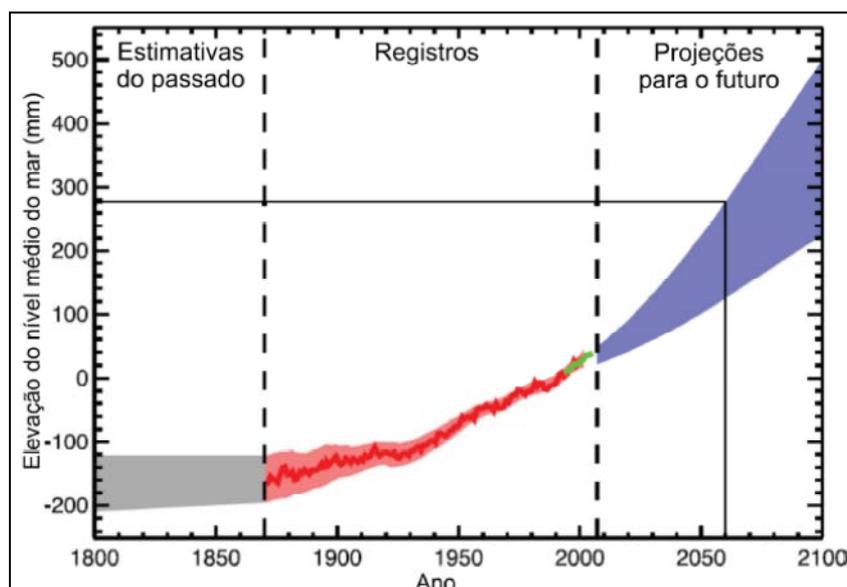


Figura 01: Estimativas de elevação do nível do mar segundo IPCC. Fonte: IPCC (2007).

Inserido nos cenários apresentados pelo IPCC temos as zonas costeiras, as quais estão permanentemente se modificando e se adaptando às mudanças oceanográficas, meteorológicas e mudanças no balanço sedimentar, buscando manter um equilíbrio dinâmico. Dentre essas mudanças, Webster *et al.* (2005) têm catalogado, para as regiões dos oceanos Pacífico Norte, Pacífico Sudoeste e Índico, um aumento na intensidade de eventos extremos incidentes nas zonas costeiras. Esse aumento, segundo Webster *et al.* (*op. cit.*), tem sido associado a condições de anomalias positivas registradas nas medições de temperatura da superfície do mar (TSM), nos últimos 30 anos.

Para a região sul do continente sul-americano, tendo como base dados obtidos por satélite ao longo de 13 anos, Lentini *et al.* (2001) têm observado anomalias de 3°C na TSM, as quais têm se mostrado superiores a média climatológica da região. A ocorrência dessas anomalias, segundo Lentini *et al.* (*op. cit.*), se mostrou coincidente com os períodos de ocorrência do fenômeno El Niño de Oscilação Sul (ENOS). As maiores amplitudes, quando catalogada a ocorrência entre os dois eventos, foram registradas por Cataldi *et al.* (2010) na região da Confluência Brasil Malvinas (CBM), a qual compreende a localidade entre o Rio da Prata e a Lagoa dos Patos (Fig. 02).

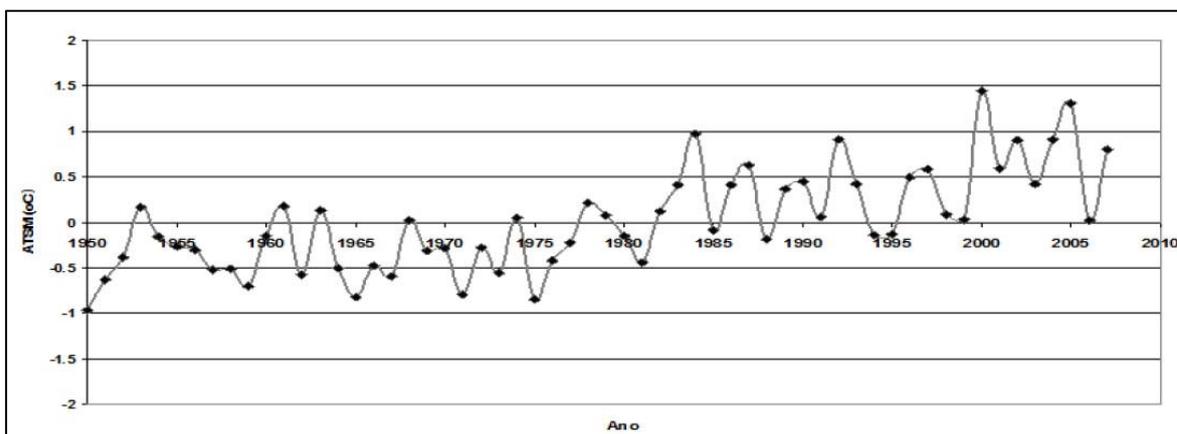


Figura 02: Anomalias da TSM ocorridas na região da CBM. Fonte: Cataldi *et al.* (2010).

Vulnerabilidade é definida pelo IPCC (2007) como sendo a incapacidade de uma nação em lidar com as consequências da acelerada subida do nível do mar, e outros impactos costeiros devido à mudança climática global. Dessa

forma, um possível aumento da intensidade dos eventos extremos incidentes sobre municípios costeiros pode ocasionar grandes prejuízos econômicos, principalmente em virtude da diminuição da faixa de praia, o que acarretaria sérios problemas para a atividade turística e para a sociedade no geral, em detrimento dos riscos geológicos que implica a proximidade e a vulnerabilidade com o mar (Fóntan *et al.*, 2009). Atualmente as zonas costeiras abrigam 60% da população mundial, com perspectiva de aumento para 75% em 2025 (Tagliani *et al.*, 2000) de modo que, dezesseis, dentre as 23 megacidades do mundo, encontram-se em uma faixa de 60 km da linha de costa (Cambers, 1997). No Brasil esta tendência se repete, sendo que os 512 municípios costeiros abrigam $\frac{1}{4}$ da população nacional (Busman *et al.*, 2005).

No litoral brasileiro, o turismo, o comércio e outras atividades relacionadas às praias e a outros ambientes costeiros são o suporte econômico de um número crescente de comunidades. Esse desenvolvimento econômico, alavancado pelo setor turístico, tem proporcionado uma ocupação muito rápida da costa sem os devidos cuidados. O turismo é responsável por intensificar o desenvolvimento urbano, pois há uma necessidade de infraestrutura urbana para suprir as necessidades criadas pela atividade. A construção de avenidas a beira-mar e a implantação de calçadões em partes da praia aonde as ondas chegam, normalmente em períodos de tempestades, tem resultado em episódios erosivos em muitos municípios costeiros.

Erosão, segundo van Rijn (2011), pode ser definida como sendo a perda permanente do material arenoso do sistema praia-duna, tendo como consequência um recuo da linha de costa em direção ao continente. Os fatores determinantes, para o estabelecimento do processo erosivo, estão associados a uma complexa interação de processos físicos, tais como: circulação da água induzida pelas ondas, marés, tempestades, correntes próximas à costa e fluxos sedimentares (Muehe & Neves, 2005). O resultado dessas interações é um déficit de sedimentos nas zonas costeiras. Dentre os fatores associados aos processos erosivos temos que, os impactos ocasionados por atividades antrópicas, tais como construção de estruturas artificiais, mineração de areia praial, dragagens em zona *offshore*, construção de barragens em rios que desembocam no mar, entre outros, estão entre os mais significativos (Tab. 01).

Tabela 01: Principais causas da erosão costeira.

| Principais Causas da Erosão Costeira | |
|---|--|
| 1. Submersão e aumento do ataque das ondas | 12. Aumento de tempestades |
| 2. Redução do suprimento de sedimentos fluviais | 13. Atrito de material de praia |
| 3. Redução do suprimento de sedimentos rochosos | 14. Intemperismo praial |
| 4. Redução do suprimento de sedimentos do interior das dunas | 15. Aumento da reflexão das ondas em virtude de um enrocamento |
| 5. Redução do suprimento de sedimentos do fundo do mar | 16. Migração de lobos praias |
| 6. Extração de areia e cascalho da praia | 17. Elevação do lençol freático da praia |
| 7. Aumento da energia de onda | 18. Remoção de material da praia por escoamento |
| 8. Interrupção do fornecimento de sedimentos por deriva litorânea | 19. Diminuição da faixa de maré |
| 9. Mudança no ângulo de incidência das ondas | 20. Abrasão por material de deriva |
| 10. Intensificação do ataque oblíquo das ondas | 21. Remoção de uma franja de gelo do mar |
| 11. Aumento da perda de sedimentos da praia para o pós-praia | |

Fonte: Adaptado de Bird (2008).

Dentre os inúmeros indicadores estabelecidos para quantificar as taxas de erosão de uma determinada região temos a linha de costa, que é caracterizada como sendo a representação das bordas de um corpo d'água (Dolan *et al.*, 1980). A posição da linha de costa é estabelecida pelas

interações morfodinâmicas, as quais são controladas por ondulações geradas pelos sistemas meteorológicos, pelo balanço hídrico e sedimentar, resultante do aporte continental e marinho (Lélis, 2003). Por ser uma feição geomorfológica, a linha de costa apresenta alta dinâmica espacial, decorrente de respostas a processos costeiros de diferentes magnitudes e frequências (Mazzer & Dillenburg, 2009). O desconhecimento das flutuações da linha de costa em diferentes escalas temporais e/ou espaciais, ou a interpretação falha desses dados, conduz gestores e engenheiros costeiros a tomarem decisões equivocadas (Stive *et al.*, 2002). Dessa forma, o conhecimento de seu padrão de evolução, bem como dos processos físicos controladores do equilíbrio morfodinâmico são subsídios importantes para o planejamento do uso e ocupação das zonas costeiras.

A posição da linha de costa e sua confiabilidade, como medida para estimar tendências erosivas ao longo do tempo, dependem da variabilidade do indicador escolhido e da metodologia empregada, frente às condições dinâmicas naturais e antrópicas. Para as quantificações das variações históricas da linha de costa, os métodos mais utilizados são as fotografias aéreas e as imagens de satélites. Com o avanço das geotecnologias e a evolução dos sistemas de posicionamento por satélites (GPS), os levantamentos se tornaram mais precisos de forma a proporcionar uma maior acurácia na delimitação da linha de costa.

Esteves *et al.* (2003) destacam que a identificação precisa da linha de costa, através de uma feição física e seu movimento através do tempo, possibilita uma análise mais consistente da extensão desses impactos naturais, sendo essa informação útil para o órgão gestor do município, no que diz respeito à tomada de decisões. A partir do exposto, o presente estudo visa caracterizar o processo de erosão estabelecido na praia do Hermenegildo, costa sul do Rio Grande do Sul (RS), entre os anos de 1947 e 2012, estabelecendo as áreas com maior e menor vulnerabilidade ao processo erosivo.

2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o de ampliar o entendimento dos fatores responsáveis pelo processo erosivo estabelecido na praia do Hermenegildo, entre os anos de 1947 e 2012, através da associação de dados oceanográficos que levam a intensificação desse processo, e dados geomorfológicos tradicionais.

2.1. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Caracterizar as relações existentes entre o processo erosivo, as tempestades, os períodos de ocorrência de El Niño, a direção e intensidade dos ventos, com anomalias térmicas positivas da TSM ocorridas no oceano Atlântico Sul.
- Estabelecer as taxas de recuo médio da linha de costa para a praia do Hermenegildo, para os anos de 1947, 1964, 1975, 1996, 2000, 2005, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011 e 2012;
- Estabelecer o comportamento do pacote sedimentar e as taxas de retração ou progradação da linha de costa, através de levantamentos topográficos de alta frequência;
- Estimar as posições futuras da linha de costa para os anos de 2022, 2032 e 2100, a partir das taxas de recuo estabelecidas ao longo dos últimos 65 anos.
- Identificar, ao longo do segmento costeiro, as áreas de maior e menor susceptibilidade ao processo erosivo.

O ineditismo do estudo está no fato de não existirem, para as praias do extremo sul do RS, estudos detalhados que caracterizem os processos erosivos dentro de um intervalo de 65 anos. Dentro do contexto das mudanças climáticas, um aumento dos valores de TSM para o extremo sul do Brasil e sua correlação com eventos de El Niño, na intensificação de eventos extremos no litoral sul gaúcho, fazem desse estudo um elemento chave no planejamento e estabelecimento de faixas de proteção e manejo da linha de costa. Nos municípios afetados pelo processo erosivo, esse estudo possibilitaria aos

gestores prever em que períodos as tempestades seriam mais intensas. A partir de uma extensa base de dados, composta por fotografias aéreas, imagens de satélite e dados de campo, correlacionados a série de dados de anomalias da TSM e os períodos de ocorrência de El Niño, seria possível ter um melhor entendimento da dinâmica da linha de costa além de apresentar estimativas do comportamento das mesmas para o presente e próximas décadas.

3. HIPOTESE LEVANTADA

A partir do que foi exposto, levanta-se o questionamento: Será que os maiores episódios erosivos registrados nas praias do extremo sul do RS estão associados a períodos de ocorrência de anomalias na TSM do oceano Atlântico Sul? O presente estudo defende que a partir de anomalias da TSM, em associação a períodos de ocorrência do evento El Niño, ambos ocorrendo em mesma intensidade e associados a outros processos costeiros, tem-se o registro dos maiores picos erosivos nas praias do extremo sul do Rio Grande do Sul.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A costa Gaúcha é caracterizada por um regime de maré semidiurna, com altura média de 0,30 m, sendo que a maré meteorológica ou ressaca pode alcançar 1,20 m (Calliari *et al.*, 1996; 1998). Os períodos de ressaca têm sido registrados, com mais frequência, nos meses de abril e maio, associados à passagem de frentes frias (Tozzi, 1997; Barletta, 2000; Nicolodi *et al.*, 2001). O balneário Hermenegildo, localizado a 16 km ao norte da Barra do Chuí, apresenta uma faixa costeira urbanizada com 2,3 km de comprimento (Fig. 03).

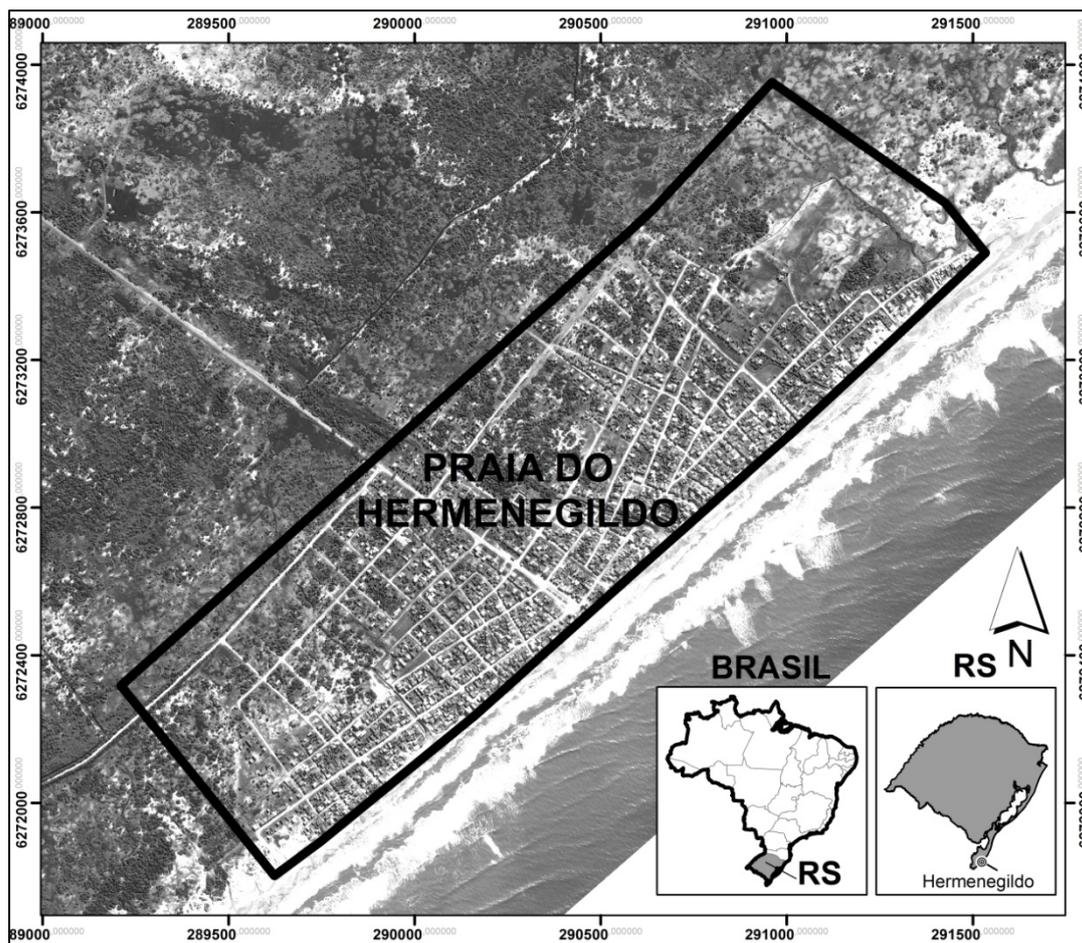


Figura 03: Localização da área de estudo. Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O processo de ocupação na localidade se iniciou em 1964, com a primeira faixa de ocupação localizada no campo de dunas (Maia, 2011). Atualmente as residências ali instaladas sofrem constantemente com a ação das ondas em virtude do encurtamento do perfil praiar. Nos últimos anos, o problema tem se agravado devido ao conflito entre a atuação dos eventos extremos, o que tem gerado um recuo da linha de costa. Soma-se também a atividade humana, com a construção de casas sobre as dunas frontais (Fig. 04) e estruturas de proteção próximas à costa.



Figura 04: Ocupação ocorrida sobre o campo de dunas da praia do Hermenegildo. Fonte: Arquivo pessoal.

No contexto climatológico, o balneário Hermenegildo está sob influência do Anticiclone Tropical Semifixo do Atlântico Sul (ATAS) e do Anticiclone Polar Migratório (APM). Estes sistemas quando ocorrem de forma alternada, favorecem a predominância de ventos provenientes do quadrante NE, entre os meses de setembro a março, e de SW de abril a agosto (Godolphin, 1976). O ATAS é um sistema de alta pressão que atua de forma mais intensa no verão. O APM é estável e possui baixas temperaturas e umidade (Saraiva *et al.*, 2003). Ele se propaga em direção às baixas latitudes, apresentando alta mobilidade e transporte de massa de ar de origem polar.

Quando ocorre a chegada de sistemas frontais, estes podem causar uma mudança de até 180° na direção do vento, o que acaba gerando uma grande pista de vento (Calliari *et al.*, 1998). Essa mudança, combinada aos centros de baixa pressão no oceano e centros de alta pressão no continente proporcionam o empilhamento de água na costa (fenômeno conhecido como transporte de Eckman).

No contexto geológico, a praia do Hermenegildo, segundo Lima (2008), é caracterizada pela presença de barreiras costeiras pleistocênicas e

holocênicas, ocorrendo em sequências estratigráficas transgressivas alternantes, preservando depósitos lagunares (Fig. 05) sob depósitos eólicos/praias. Tomazelli *et al.* (1998) sugerem que a erosão ocorrida em grande parte da linha de costa pode ser explicada a partir de evidências da ocorrência de tempestades extratropicais em combinação com estas fases transgressivas.



Figura 05: Afloramento de turfas na face de praia. Fonte: Arquivo pessoal.

5. ESTADO DA ARTE

As observações compiladas ao longo das últimas décadas com respeito à evolução da orla costeira, associada a uma crescente literatura científica sobre mudanças climáticas, sugerem que há, provavelmente, um aumento na intensidade de certos riscos costeiros em curto e médio prazo (Lozano *et al.*, 2004; Forbes *et al.*, 2004; Bernatchez *et al.*, 2011). Diversos estudos têm se voltado para as consequências da elevação do nível do mar e da intensificação dos eventos extremos nas várias regiões costeiras do mundo (De La Veja-Leinert & Nicholls, 2008). Os impactos ocasionados por esses eventos têm causado perdas sociais, agrícolas e industriais em diferentes municípios costeiros.

Iniciativas como as da Comissão Oceanográfica Intergovernamental, têm disponibilizado recentemente, diretrizes de apoio à conscientização dos perigos costeiros e a mitigação dos mesmos (IOC, 2009 *apud* Ciavola *et al.*, 2011). Essas iniciativas têm levado as autoridades de diversos governos a criarem e implementarem planos de gerenciamento costeiro para conter os efeitos devastadores dos processos erosivos em zonas costeiras. Esses planos foram desenvolvidos a partir do conhecimento dos processos envolvidos nas mudanças morfológicas das praias em diferentes escalas espaço temporais (Short, 2000).

Dentre os diversos conceitos existentes, erosão costeira pode ser entendida como sendo a retirada de sedimentos da costa, podendo ser causada pela variação do nível do mar, variação da fonte de sedimentos, modificação no regime das ondas ou resposta morfodinâmica às atividades antrópicas como espigões, quebra marés e portos (Muehe, 2006). Os processos envolvidos no estabelecimento de um cenário erosivo podem ser divididos, na escala de tempo, em processos erosivos de longo prazo e erosão de curto prazo.

Um processo erosivo de longo prazo (Fig. 06) é caracterizado como sendo a permanente mudança na posição do litoral, devido a eventos relacionados com o aumento do nível do mar. Em contrapartida, o processo erosivo de curto prazo pode ser causado por marés meteorológicas e

tempestades, de forma que esses eventos não causem alterações permanentes na posição do litoral. No entanto, a erosão em um período de curto prazo traz enorme destruição às zonas costeiras. No contexto dos municípios litorâneos, as variações de linha de costa estimadas para uma escala inferior a 100 anos, são as mais importantes.

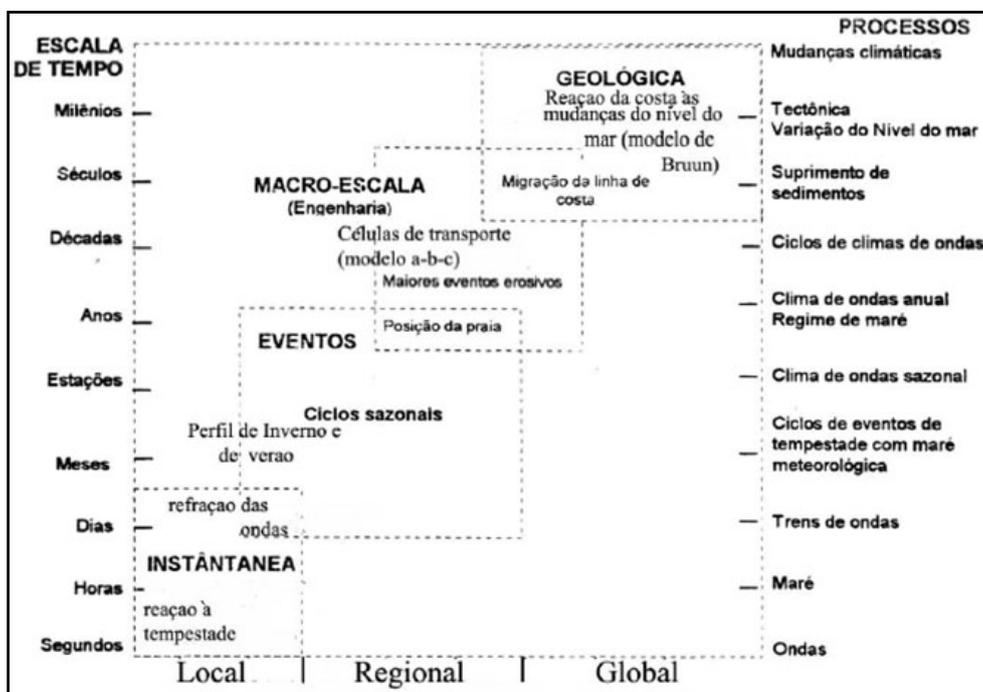


Figura 06: Escalas espaço-temporais envolvidas no estudo de praias e processos relativos à erosão costeira. Fonte: Modificado de Short, 2000; Extraído de Lins-de-Barros, 2005.

Por ser uma problemática mundial (Bird, 1985) a temática erosão costeira tem sido amplamente estudada e discutida, principalmente, por pesquisadores dos Estados Unidos e, recentemente, por alguns países da União Europeia, os quais deram uma maior ênfase a estudos relacionados aos problemas da erosão e da inundação nos municípios litorâneos.

5.1 A PROBLEMATICA DA EROSIÃO COSTEIRA NOS ESTADOS UNIDOS

Nos Estados Unidos (EUA), inicialmente, o governo iniciou sua participação ativa, na diminuição de danos causados por enchentes nos municípios litorâneos, em 1890 quando foi estabelecido ao estado, através do

Serviço Nacional de Meteorologia, a responsabilidade no que diz respeito à previsão e a advertência quanto aos perigos relacionados às inundações (Crowell *et al.*, 1999). Esse enfoque tem se estabelecido em virtude das inundações serem considerada uma das principais causas de perdas econômicas para a nação Norte Americana, se comparada a outros tipos de riscos.

Desde o início de 1900 até a década de 1960, com a expansão da população sobre a planície costeira, a intervenção, por parte da esfera governamental federal, na redução dos eventos considerados perigosos, tem sido cada vez mais efetiva de forma a delegar ao Corpo de Engenheiros da Marinha dos Estados Unidos, projetos que autorizem o controle estrutural de problemas relacionados a enchentes (Mrazik and Kinberg, 1989).

Em 1968, com a passagem do furacão Agnes, as perdas relacionadas a esse evento foram cobertas pelo governo norte-americano de modo que, foram contempladas apenas as causas relacionadas, diretamente, a problemas de inundação (Crowell *et al.*, 1999). Na prática, reivindicações relacionadas à problemática da erosão foram pagas tomando por base que o fenômeno da erosão também proporcionava perdas. Na década de 1960, problemas relacionados à erosão eram considerados apenas como um contexto retrospectivo em que, após um período de anos, a problemática deveria ser reestudada ou remapeada. Dessa forma, na legislação americana, áreas de risco à erosão eram aquelas definidas como sendo as localidades onde o processo erosivo era susceptível de resultar em danos ou perdas de edifícios e infraestruturas, dentro de um período de 60 anos (Crowell *et al.*, 1999).

A partir da reestruturação da legislação norte-americana, estudos realizados pela *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) e pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* NOAA têm considerado os riscos físicos (erosão) e a exposição econômica (valor do desenvolvimento) dos municípios, aos problemas iminentes ao processo erosivo. Depois de inúmeras sugestões, uma lista final de 27 municípios foi compilada de forma a ser considerada uma amostra estatística válida, a qual reflete em tendências

naturais na erosão costeira e no desenvolvimento da zona costeira (Dolan *et al.*, 1997);

Taxas de erosão costeira foram estipuladas por vários gestores de projetos, em diferentes localidades monitoradas, (Tab. 02) de forma que foi estabelecida, como indicador representativo da linha de costa, a linha de preamar sobre um espaço de tempo específico. Os dados foram obtidos por medições locais de duas ou mais linhas de costa, a partir de mapas de mudanças históricas da mesma. Esses mapas foram produzidos pela digitalização das feições de referência para mudança do segmento costeiro para várias amostras sendo que, posteriormente foi combinando um *overlay* de linhas de costa sobre um mapa base. Taxas de erosão foram calculadas através dos mapas, a partir de uma linha perpendicular, de forma que medições da quantidade de movimento da linha de costa sobre um período de tempo definido foram obtidas.

Tabela 02: Histórico do mapeamento da linha de costa nos EUA.

| | |
|---|---|
| Lucke (1934) | Produziu mapas cartográficos históricos de mudança da linha de costa, os quais mostravam mudanças temporais ocorridas no <i>inlet</i> de Barnegat, New Jersey. |
| Plusquellec (1966) | Produziu mapas de mudança da linha de costa compilados a partir de fotografias aéreas, para uma área entre Brigantine e <i>Beach Haven</i> . |
| Stafford (1971); Stafford and Langfelder (1971) | A partir de pontos medidos em fotografias aéreas, Stafford (1971) demonstrou que o limite entre areia seca e areia molhada era um bom indicador para mapeamentos da linha de costa. |
| Morton (diversas publicações entre 1972-1977) | Produziu mapas históricos de mudanças da linha de costa para toda costa do Texas, através de mosaicos de fotografias aéreas. |
| Dolan <i>et al.</i> (1978) | Desenvolveu um sistema de armazenamento e recuperação computacional, que incorpora manualmente fotografias aéreas retificadas em estudos de erosão. |
| Leatherman (1982, 1983) | Desenvolveu um programa que foi usado para geração de mapas históricos de mudança da linha de costa para amplas seções dos estados do Atlântico médio e norte. |
| Everts <i>et al.</i> (1983) | Usaram da cartografia e das técnicas de mapeamento computacional para compilar mapas de mudança de linhas de costa históricas, para uma larga faixa dos estados costeiros do Atlântico médio e sul. |
| Morton <i>et al.</i> (1993); Byrnes and Hiland (1993); French and Leatherman (1994) | Uso do GPS em análises e no mapeamento histórico das mudanças na linha de costa. |

Fonte: Adaptado de Crowell *et al.* (1999).

5.2 A EROSÃO COSTEIRA NO CONTINENTE EUROPEU

Na Europa, uma crescente preocupação com os desastres naturais é atualmente de interesse ambiental prioritário dentro das políticas da União Europeia (EU) de forma que, problemas relacionados à erosão costeira têm causado significantes perdas econômicas, danos ecológicos e problemas sociais (Marchand *et al.*, 2011). O custo anual com medidas mitigatórias é estimado em cerca de 3 bilhões de euros (Projeto *Eurosion*, 2004). Dados da Comissão Europeia (2004) estimam que 20.000 km da costa europeia (cerca de 20%) esteja enfrentando sérios problemas decorrentes da erosão costeira.

Em virtude dos gastos demandados com as questões relacionadas à erosão, a União Europeia lançou no ano de 2004 o projeto *Eurosion*. As metas do projeto eram lidar com a erosão costeira de forma a restaurar o equilíbrio geral dos sedimentos em áreas afetadas pelo processo erosivo, na escala de células costeiras. Para van Rijn (2011), células costeiras seriam definidas como compartimentos que contém um ciclo completo de erosão, deposição, fontes de sedimentos e caminhos do transporte envolvido.

Em 2007 foi colocado em prática o Projeto *Conscience*, o qual tinha como objetivo desenvolver e testar conceitos, diretrizes e ferramentas para uma gestão sustentável da erosão ao longo do litoral europeu, com base em conceitos científicos e experiências práticas existentes (Marchand *et al.*, 2011). O projeto teve a participação de oito instituições de pesquisa e universidades, e suas bases foram estabelecidas a partir das recomendações do Projeto *Eurosion*.

No mesmo ano de implantação do projeto *Conscience* nascia, também em 2007, o Protocolo sobre a Gestão Integrada da Zona Costeira do Mediterrâneo (Marchand *et al.*, 2011), o qual tinha por finalidade prevenir e mitigar os impactos negativos da erosão costeira de forma mais eficaz (Tab. 03). Jimenez *et al.* (2011) destacam que esse protocolo assumia um comprometimento em adotar medidas necessárias para manter ou restabelecer a capacidade natural da costa em se adaptar às mudanças, incluindo aquelas causadas pela elevação do nível dos mares. Esse protocolo também está fundamentado nos resultados do projeto *Eurosion*, o qual foi financiado pela

União Europeia, e tinha por objetivo fornecer evidências quantitativas de que o continente europeu também experimentava processos relacionados à erosão.

Tabela 03: Principais elementos de política de combate à erosão do projeto *Conscience*.

Elementos da Política de Combate a Erosão Costeira

1. Aumento da resiliência costeira, restaurando o balanço de sedimentos e proporcionando espaço para processos costeiros.
2. Incorporação dos custos da erosão costeira e riscos existentes no planejamento e nos instrumentos de política.
3. Dar uma resposta aos responsáveis pela erosão costeira.
4. Reforço da base de conhecimento do gerenciamento costeiro e planejamento.

Fonte: Adaptado de Marchand *et al.* (2011).

O projeto *Micore* (Fig. 07), estabelecido no ano de 2008 e com duração de 40 meses, tinha como metas proporcionar, *on-line*, previsões de perigos físicos (relacionados à hidrodinâmica e a morfodinâmica) relacionados a tempestades, através de previsões confiáveis do impacto morfológico das mesmas, de forma a estabelecer estratégias de mitigação e proteção civil (Ciavola *et al.*, 2011). Além das previsões, o projeto em sua primeira fase também tinha como meta mapear os riscos de tempestades relacionados a regiões sensíveis da Europa levando em conta a intensidade, extensão espacial, duração e interação dos efeitos.

Em um segundo momento, o projeto *Micore* se concentrou em melhorar a compreensão atual dos impactos de tempestades em ambientes costeiros, com objetivo de projetar sistemas de alerta eficazes (Esteves *et al.*, 2011). Durante todo o estudo, a abordagem teórica para a obtenção dos limiares críticos de tempestades se baseou em dados das últimas décadas referentes à morfologia, os quais incluíam fontes históricas, topografia, batimetria, fotografias aéreas, relatórios, entre outras fontes de dados.

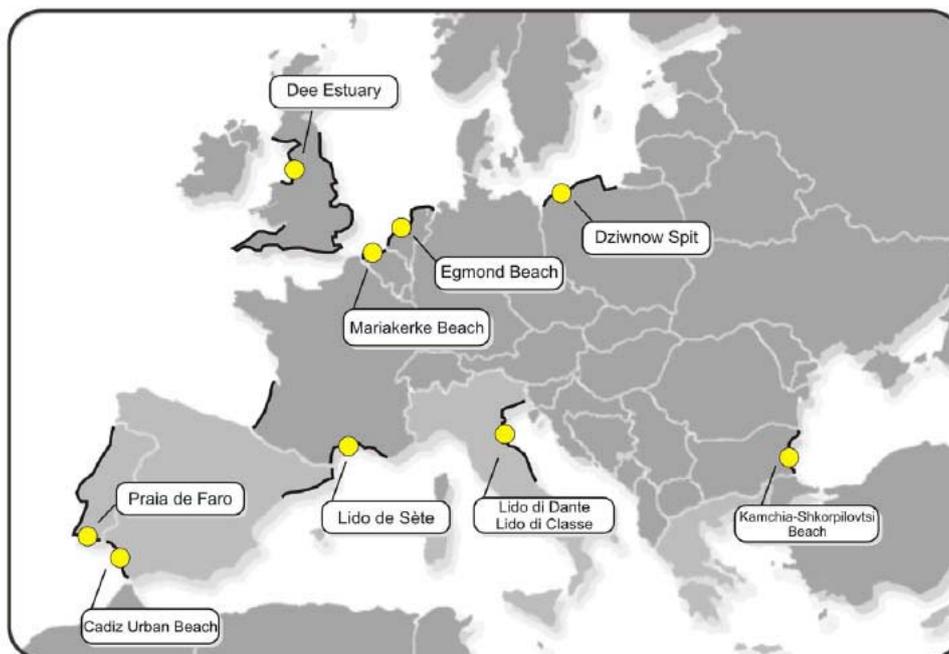


Figura 07: Localidades abrangidas pelo Projeto Micore. Fonte: Ciavola *et al.* (2011).

Em fevereiro de 2010 iniciava-se o projeto *ConHaz*, o qual tinha como diretrizes realizar um estudo dos métodos normalmente utilizados para avaliar o impacto dos perigos das tempestades considerando os custos diretos associados, os custos devido a interrupção dos processos de produção, os custos indiretos, custos intangíveis, e custos de medidas de adaptação e mitigação (Ciavola *et al.*, 2011).

5.3 O LITORAL BRASILEIRO E A PROBLEMÁTICA DA EROSÃO

No Brasil, extensos trechos do litoral são caracterizados por grandes depósitos de areia, na forma de cordões litorâneos, pontais e planícies de cristas de praia. Nesse contexto, os estudos sobre erosão costeira são relativamente recentes, ganhando grande expressão a partir da década de 1990 (Souza *et al.*, 2005), com destaque para os trabalhos pioneiros dos pesquisadores Afrânio Mesquita e J. Leite. Com base em análise de dados obtidos ao longo dos últimos 50 anos no Recife (PE), Rio Grande do Sul (RS) e Cananéia (SP), os pesquisadores verificaram uma ascensão do nível médio do mar da ordem de 30 cm (Goya, 2009).

No Rio de Janeiro, Lins-de-Barros (2005) destaca o monitoramento realizado pela equipe do professor Dieter Muehe, desde 1994, nas praias cariocas. Os estudos têm revelado que existe uma tendência erosiva em relação às taxas de recuo do litoral, de aproximadamente 1 metro por ano. Os dados coletados no litoral carioca foram enquadrados na metodologia descrita por Bush *et al.* (1999), a qual utiliza geoindicadores (Tab 04) para caracterizar os ambientes costeiros, quanto ao grau de erosão costeira.

Tabela 04: Geoindicadores utilizados para caracterização do processo erosivo.

| Erosão Severa | Erosão | Acresção ou Estabilidade em Longo Prazo |
|--|--|--|
| Ausência de dunas e transposição frequente | Dunas escarpadas ou rompidas | Dunas ou topo de praia robustos e vegetados |
| Escarpamento ativo pelas ondas das escarpas ou dunas remanescentes | Escarpas íngremes sem depósito de tálus | Escarpa vegetada com rampa estável |
| Canais de maré expostos na zona de surfe | Turfa, lama ou troncos de árvores expostos na praia | Praia larga e berma bem desenvolvida |
| Ausência de vegetação | Praia estreita | Sem transposição |
| Obras costeiras presentes atualmente | Passagens ou leques de transposição; aberturas artificiais (por exemplo, corte de estrada) | Vegetação bem desenvolvida desde floresta marítima interna, a arbustos de dunas, e grama pioneira de praia |
| Escarpamento da pós-praia evidente (acúmulo de areia) | Vegetação efêmera ou tombada ao longo da linha de escarpa | |

Fonte: Adaptado de Bush *et al.* (1999).

Estudos relacionados à ação das frentes frias nas praias brasileiras foram observados, em princípio, nos trabalhos de Kowsmann (1970), e posteriormente estudados por Alvarez *et al.* (1981; 1983), Rosman & Valentini (1989), Muehe & Corrêa (1989), Muehe & Neves (1990), Calliari & Klein (1993), Ângulo (1993), Calliari *et al.* (1996), Soares *et al.* (1998), Calliari *et al.* (1998), Parise (2007), Parise *et al.* (2009), Machado *et al.* (2010), entre outros. Contudo, o primeiro relato qualitativo dos processos físicos das marés meteorológicas na costa brasileira foi o trabalho desenvolvido no sul do Brasil por Marone & Camargo (1994).

Marés meteorológicas são descritas como a elevação no nível da maré sobre o máximo esperado pela maré astronômica. Elas podem atuar como agentes modeladores da linha de costa sendo responsável por alterações bruscas na morfologia e no volume sedimentar praial (Calliari *et al.*, 1998). No sul do Brasil esse fenômeno se configura pela passagem de frentes frias junto à costa, as quais causam severos danos costeiros quando coincidem com a maré de sizígia (Calliari *et al.*, *op cit.*).

No estado do Rio Grande do Sul (RS), desde a década de 1990, alterações nos ciclos climáticos, determinantes dos parâmetros oceanográficos, têm sido observados de forma que essas alterações são traduzidas através do aumento da intensidade das frentes frontais (caracterizadas pelas frentes frias), cuja chegada provoca rápidas alterações climáticas (Machado *et al.*, 2010). A retração e progradação de zonas costeiras arenosas, sujeitas ao regime de micromarés, resultam principalmente da dinâmica entre a quantidade e o tipo de suprimento sedimentar, energia física das ondas e mudanças relativas do nível do mar (Toldo Jr. *et al.*, 2006).

O litoral do Rio Grande do Sul é representado por 630 km de extensão e é caracterizado por depósitos quaternários inconsolidados (Villwock & Tomazelli, 1995), sobre os quais não ocorrem suprimentos atuais de sedimentos continentais, pois a descarga de areia produzida pela bacia de drenagem de sudeste do estado é retida nos sistemas lagunares e estuarinos (Toldo *et al.*, 1996). O litoral gaúcho é caracterizado por apresentar sua costa dominada por ondas, segundo a classificação estabelecida por Davies (1980).

Em litorais que possuem essa configuração, as marés meteorológicas são responsáveis pela determinação do grau de sobrelevação do mar e do retrabalhamento das praias, em virtude da intensificação e ação das ondas e das marés astronômicas (Hayes, 1979).

A extensão exata da magnitude da erosão costeira no Rio Grande do Sul ainda é uma controvérsia. Alguns estudos sugerem que a maior parte da costa está estável (Calliari *et al.*, 2000) e outros indicam que cerca de 70% das praias estão erodindo (i.e. Tomazelli *et al.*, 1998; Toldo *et al.*, 1999; Esteves *et al.*, 2001). As possíveis causas para o estabelecimento dos processos erosivos estariam associadas a um conjunto de causas naturais, entre elas a variação da dinâmica das ondas e o impacto gerado pelas tempestades, devido alterações climáticas. Dentre os diversos estudos realizados, tem-se um consenso de que um intenso processo erosivo é largamente aceito e amplamente evidenciado nas localidades da praia do Hermenegildo (Fig. 08) e do farol da Conceição (Calliari *et al.*, 1998, 2000; Tomazelli *et al.*, 1998).



Figura 08: Casas atingidas pelas tempestades, na praia do Hermenegildo. Fonte: Arquivo pessoal.

As hipóteses de elevação do nível do mar ao longo da costa do Rio Grande do Sul estariam de acordo com a tendência global de uma elevação eustática na ordem de 1-2 mm/ano (e.g. Douglas, 1991). Essas mudanças costeiras seriam resultado da interação de alguns processos, naturais e

humanos, de longa e curta duração na costa do RS. Quando variáveis maiores atuam nas mesmas direções (acresção ou erosão), elas realçam cada um dos outros efeitos, em seguida, as variações líquidas são claramente identificadas (Douglas, *op. cit.*).

Eventos de tempestades que provocam erosão das praias podem representar não apenas uma dinâmica sazonal destas, mas uma mudança climática cujo resultado seria a erosão costeira proporcional a frequência e intensidade desses eventos (Lins-de-Barros, 2005). Alterações no padrão e no comportamento das tempestades do Atlântico Sul modificam o padrão médio do regime energético das ondas, podendo ser apontada como uma das causas da erosão verificada na costa gaúcha (Tomazelli *et al.*, 1998).

Segundo Stech & Lorenzetti (1992), aproximadamente 6,5 sistemas frontais por mês atingem a região costeira do sul do Brasil, sendo mais frequentes no inverno. Tozzi & Calliari (1997) verificaram que o regime hidrodinâmico sazonal das tempestades costeiras do RS, onde condições de leste/sudeste no verão provocam menores alterações na morfologia favorecendo a acresção de sedimentos; enquanto o regime de sul/sudeste no inverno, influenciado por tempestades intensas, provocam alterações morfológicas significativas e erosão no estoque sedimentar das praias. As tempestades frequentemente chegam à costa nos meses de outono e inverno, principalmente em abril e julho (Calliari *et al.*, 1998). Esses eventos geralmente empilham água na costa resultando em marés meteorológicas de cerca de 1 m que combinada com a elevada energia das ondas causa intensa erosão costeira.

Estudos realizados por Tozzi (2000) têm caracterizado a ação das marés meteorológicas em associação aos processos erosivos na costa sul do RS. Tozzi (*op. cit.*) aponta as tempestades costeiras como os principais agentes de erosão na costa gaúcha, causando sobrelevação do nível do mar acima do prisma de maré astronômica. Soma-se ao efeito das marés meteorológicas a questão da ocupação humana. Observações de condições sinóticas de tempo e elevação do nível médio do mar feitas por Parise *et al.* (2009) demonstraram que eventos de maior elevação resultam da ação dos ventos SW que sopram

paralelos as principais orientações NE-SW da linha de costa (Fig. 09). Como uma resultante tem-se a acumulação de água na costa devido ao efeito de Coriolis (i.e. Transporte de *Ekman*).

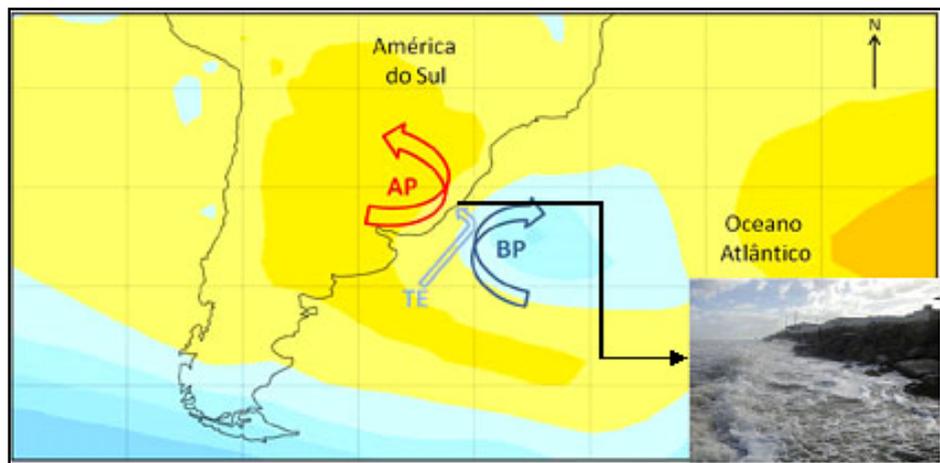


Figura 09: Esquema do empilhamento de água na costa resultando em maré meteorológica. AP: centro de alta pressão; BP: centro de baixa pressão; TE: transporte de Eckman. Fonte: Maia (2011).

Marés meteorológicas são consideradas como um dos maiores riscos geológicos em zonas costeiras de baixa declividade. Esses eventos são frequentemente associados com significantes perdas de vidas e de propriedades. Mudanças climáticas, com elevação do nível médio dos mares e mudanças na faixa de intensidade das tempestades, modificaram a distribuição regional desses eventos perigosos (von Storch & Woth, 2008).

Em um estudo mais amplo, resultados preliminares obtidos por Machado *et al.* (2010), para a costa sul do Brasil, destacam que em trinta anos de monitoramento dos principais eventos extremos, diferenças significativas na quantidade de tempestades incidentes na costa não foram observadas. O estudo publicado por Machado *et al.* (*op cit.*) leva em consideração os dados do modelo de ondas *Wave Watch III* (WW3) e dados de vento do Projeto Reanálise, datados do período de 1979 a 2008, coletados a 100 m de profundidade.

Em geral, a erosão é causada por eventos extremos que combinam ondas altas e marés meteorológicas elevadas. Depois dos períodos de acresção, que ocorrem entre dezembro e março no litoral sul, tempestades

iniciam um ciclo de erosão das praias no mês de abril (Maia, 2011). A erosão é maximizada quando o nível de maré alta coincide com o pico da maré de sizígia, quando a elevação é alta. No caso da costa do Rio Grande do Sul, elevações de 1,5 m acima da previsão de maré já foram observadas (Almeida *et al.*, 1997; Calliari *et al.*, 1998). Os resultados de diferentes estudos sobre erosão costeira, ao longo do litoral brasileiro, foram catalogados no Atlas de Erosão Costeira, o qual foi financiado pelo Ministério do Meio Ambiente e reúne dados de quase todas as praias do litoral brasileiro.

5.4 EROSÃO E VULNERABILIDADE COSTEIRA

Eventos extremos podem representar um significativo perigo em algumas áreas costeiras do mundo, causando perdas catastróficas de vidas, destruição de infraestruturas e perdas econômicas. A análise da vulnerabilidade dos ambientes costeiros, em relação a eventos extremos, é fundamental para o planejamento efetivo de um possível desastre a ser mitigado de forma eficaz (Papathoma *et al.*, 2003).

O impacto de tempestades costeiras ocorre em uma curta escala de tempo e, recentemente, tem recebido atenção na literatura científica (Houser & Hamilton, 2009). O litoral é exposto ao efeito cumulativo de vários eventos médios de energia que podem produzir respostas morfológicas correspondentes a um evento único de alta energia com um período de retorno longo (Ferreira, 2006).

Associado as questões dos impactos de eventos extremos tem-se a inserção do Gerenciamento Costeiro, o qual engloba desde questões relacionadas à preservação ambiental e dos recursos até as questões sociais como o uso do solo, os conflitos entre diferentes atividades, entre outras. A busca por uma melhor qualidade de vida das comunidades que dependem dos recursos costeiros, a manutenção da diversidade biológica e a produtividade dos ecossistemas, segundo Pollete & Pagetti Silva (2003), estão entre as principais metas do gerenciamento costeiro. Tais metas podem ser alcançadas através de um amplo processo de articulação política, no entanto esse

processo tem sido feito de forma setorial, com uma grande carência de interdisciplinaridade científica e sem participação dos diferentes atores sociais vinculados ao uso da costa (Aguirre *et al.*, 2001).

Atualmente, excluindo-se o debate e as contradições em relação às mudanças climáticas, à tendência de subida do nível do mar e das mudanças no clima de ondas, a potencial fragilidade da zona costeira é claramente percebida (Muehe, 2004). Uma ocupação, muitas vezes de forma desordenada, pode ocasionar o rompimento de um suposto equilíbrio dinâmico, de forma negativa ao meio (Vasconcelos, 2005). Dessa forma, a identificação dos riscos e da vulnerabilidade a erosão costeira ao longo de um determinado trecho do litoral tornou-se importante para formulação de ações e programas de gerenciamento costeiro, incluindo neste o planejamento urbano das orlas oceânicas.

Segundo o ISDR (2004), o conceito de vulnerabilidade foi inicialmente utilizado pelos engenheiros referindo-se aos níveis/ graus de resistência dos materiais e edifícios perante a ocorrência de um terremoto/sismo, ação do vento e da água. Posteriormente, Westgate & O'Keefe (1976) *apud* Alcántara-Ayala (2002) definiram vulnerabilidade como sendo o grau de risco sob o qual está sujeita uma comunidade, sendo que o risco refere-se a probabilidade de ocorrência de fenômeno físico ou natural extremo.

O conceito vulnerabilidade passou a ser utilizado na literatura costeira em meados da década de 1980, sendo relacionado ao impacto de desastres, e posteriormente, na localização desses impactos, fazendo menção a fenômenos e eventos naturais e/ou antrópicos. Tal conceito assume uma amplitude bastante significativa tendo em vista que engloba tanto aspectos físicos como socioeconômicos. Lins-de-Barros (2005) destaca que a vulnerabilidade física envolve ainda aspectos relacionados à susceptibilidade, resistência e resiliência, sendo este último à resposta natural à determinada perturbação. A evolução do conceito vulnerabilidade, ao longo dos anos, passou a agregar questões de natureza socioeconômica e ambiental (Mazzer, 2007).

Em termos socioeconômicos, a vulnerabilidade é determinada pelo seu impacto potencial e pela capacidade de prevenção das tecnologias, das

instituições, entre outros, em deter ou amenizar os impactos causados por eventos extremos (Lins-de-Barros, 2005). A questão da vulnerabilidade das zonas costeiras, de acordo com Dal Cin & Simeoni (1994), pode ser abordada sobre diferentes escalas. Os principais indicadores de linha de praia a serem monitorados são: linha de vegetação, crista da duna frontal, pé de uma duna frontal, crista do berma, linha entre a praia úmida e a praia seca, linha de maré alta, linha de espraiamento da onda (Toldo Jr. & Almeida, 2003).

Estudos realizados por Gornitz *et al.* (1993), na costa leste norte-americana, têm considerado que fatores relacionados aos agentes costeiros, oceanográficos e meteorológicos estão ligados a vulnerabilidade de um determinado litoral. No mesmo ano, Rivas & Cendredo (1994) discutem as questões da análise de riscos, a partir de modelos de risco e perigos costeiros. Esses autores consideraram em seu estudo que, a vulnerabilidade está ligada ao ambiente antrópico, sendo que a interação com o perigo traduz-se em risco.

Vellinga & Klein (1993) propõem a utilização de quatro graus de vulnerabilidade: baixo, médio, alto e crítico. Todavia, uma crítica ao trabalho desses autores, feita por Lins-de-Barros (2005), destaca que esta abordagem está relacionada a um cenário futuro, representando apenas uma análise dos efeitos em termos de perdas ou adaptações naturais, econômicas e sociais, em função das mudanças climáticas e da subida do nível do mar.

Tomando por base uma abordagem temporal, Dal Cin & Simeoni (1994), colocam o termo vulnerabilidade como sendo função da possibilidade de ocorrência de um episódio erosivo na costa. Na abordagem feita por esses autores para a praia de Marche (sul da Itália), qualquer episódio de erosão costeira é considerado, seja por subida do nível do mar ou pela ação de tempestades. Este estudo diferencia-se pelo fato de incorporar fatores relacionados à urbanização da costa, para efetuar uma análise de risco a erosão costeira. Para a praia de Marche foram realizadas análises estatísticas de correlação (modo Q e modo R) entre 15 indicadores. As análises permitiram traçar uma inter-relação entre as variáveis hidrodinâmica e energia; evolução da linha de costa; morfologia e sedimentologia; fundo marinho; e intervenção

humana. O estudo realizado no litoral italiano é similar a abordagem feita por Gornitz *et al.* (1991), porém em outra escala de trabalho.

No estudo da erosão costeira, bem como na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis ao processo erosivo, é importante tomar cuidado para não confundir eventos extremos com ciclos erosivos. Nos ciclos de erosão temos a reação da praia a uma tempestade ou variação no pacote arenoso, com desequilíbrio do balanço sedimentar e tendência a erosão costeira. Discussões sobre os métodos de zoneamento para quantificar o grau de vulnerabilidade de uma dada região litorânea a exposição a eventos perigosos e a riscos associados foram realizadas por Zuquete *et al.* (1995). Os resultados dessas discussões foram expressos, posteriormente, em mapas de vulnerabilidade da costa.

No final da década de 1990, uma ampla revisão de trabalhos que tratavam da temática vulnerabilidade costeira, das décadas de 80 e 90, foi feita por Cooper & McLaughlin (1998). Os autores catalogaram dezessete trabalhos sobre a temática e constataram que é de fundamental importância distinguir os elementos que norteiam cada método, tais como: escala espacial, tratamento e análise estatística e principalmente, as variáveis utilizadas na abordagem. Cooper & McLaughlin (*op cit.*) observaram que a maioria dos trabalhos, seja em escala global, regional ou local, utilizava entre 6 e 19 variáveis para caracterizar a vulnerabilidade de uma áreas e que, os métodos de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm se destacado como ferramenta dominante na classificação dessas áreas costeiras.

Com intuito de maior suporte aos conceitos de vulnerabilidade, Bush *et al.* (1999) sugeriram a utilização de geoindicadores para a caracterização da vulnerabilidade de uma determinada região. A União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) define geoindicadores como sendo medidas de superfície ou perto da superfície geológica, processos e fenômenos que variam significativamente em períodos de menos de 100 anos e que fornecem informações significativas para a avaliação ambiental sendo que, esses fenômenos e processos são aplicados a uma ampla variedade de ambientes (Berger, 1997). Os geoindicadores são caracterizados por apresentar

informações e orientações para a mitigação local de impactos de risco sendo os mesmos, uma ferramenta de gestão para uma rápida avaliação de riscos potenciais naturais, auxiliando também como suplemento, em longo prazo, de auditoria ou monitoramento ambiental.

Richmond *et al.* (2000) avaliaram a vulnerabilidade de sete processos causadores de danos e prejuízos nas ilhas havaianas: erosão costeira, elevação do nível do mar, grandes tempestades, atividade vulcânica e sísmica, inundação, tsunamis e eventos de onda de altura extrema. O estudo envolveu o levantamento de dados geológicos, declividade costeira, refração das ondas, séries temporais de marégrafos e ondógrafos, registros históricos de catástrofes e tipo e composição do ambiente praial.

Pethick (2001) e Hansom (2001) propuseram, para os litorais de Sanlúcar de Barrameda e Rota (sudoeste da Espanha), novos conceitos sobre manejo costeiro onde, um mapa de vulnerabilidade costeira foi criado a partir da comparação entre os dados de erosão costeira e uso da terra ao longo do litoral. No estudo, as razões de acresção e retração foram baseadas em estudos de fotografias aéreas de diferentes escalas e anos. No ano seguinte, Morton (2002) publicou um estudo onde as modificações na topografia, tipo e densidade de vegetação, e o tipo e densidade do solo costeiro serviriam de base para caracterizar o grau de vulnerabilidade de determinada localidade.

McLaughlin *et al.* (2002) desenvolveram um índice de vulnerabilidade baseado em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para o litoral da Irlanda do Norte, o qual levava em consideração atividades sócio-econômicas, a resistência do litoral à erosão, e características energéticas. Posteriormente, Gallerini *et al.* (2003) apresentaram um estudo fundamentado na construção de um banco de dados espacial para o desenvolvimento de um modelo de vulnerabilidade e risco costeiro, contemplando planos de informação de diversos temas: hidrografia, geologia, geomorfologia, hidrogeologia, cobertura do solo, altimetria, batimetria, linha de costa.

Ao longo dos anos, desde o início da década de 90 até os anos 2000, em detrimento das críticas apresentadas e das contribuições que tem surgido no meio científico, Dolan & Walker (2004) tem destacado que o debate a

respeito da definição de vulnerabilidade tem gerado uma visão cada vez mais integrada desse conceito.

5.5 MÉTODOS PARA MAPEAMENTO E EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

A expansão urbana desordenada sobre as zonas costeiras já é um problema conhecido em todo mundo, com inúmeros exemplos de impactos de erosão costeira sobre as cidades e balneários, além de perdas de importantes habitats de alta produtividade biológica (Lélis, 2003). O conhecimento dos processos de ocupação bem como o comportamento da linha de costa em virtude dessa ocupação torna-se imprescindível para os municípios costeiros.

Por definição, linha de costa é caracterizada como sendo a representação das bordas de um corpo d'água (Dolan *et al.*, 1978), sendo sua posição o resultado das interações morfodinâmicas controladas pelas ondulações geradas pelos sistemas meteorológicos, pelo balanço hídrico e sedimentar, resultante do aporte continental e marinho. Por ser um elemento geomorfológico, a linha de costa apresenta uma alta dinâmica espacial decorrente de respostas a processos costeiros de diferentes magnitudes e frequências (Mazzer & Dillenburg, 2009). Conhecer seu padrão de evolução e os processos físicos controladores do equilíbrio morfodinâmico é um subsídio indispensável para o planejamento do uso e ocupação nas zonas costeiras.

Em termos de um possível cenário de elevação do nível do mar, o ajustamento da linha de costa dependerá das características geomorfológicas e abundância de sedimentos de uma determinada localidade. Villwock & Tomazelli (1995) destacam ainda, que a influência da morfologia da antepraia nas ondulações, tectonismo, transporte sedimentar costeiro, dinâmica da zona de arrebenção e outros fatores, podem ser também relacionados aos processos de ajustamento da linha de costa.

Um estudo realizado por List *et al.* (1997) sobre o recuo da linha de costa no litoral do estado de Louisiana, EUA, demonstrou a importância do papel desempenhado pelo balanço longitudinal de sedimentos ao longo da costa nos processos erosivos praias. Estudos realizados por Speranski (1998)

têm destacado que, lateralmente, cada setor do ambiente costeiro tende a apresentar uma variabilidade espacial e temporal particular, em função da particularidade apresentada por diferentes costas arenosas.

A quantificação das taxas de retrogradação da linha de costa ainda é um grande desafio para os pesquisadores da área costeira. As primeiras tentativas de quantificação foram realizadas por Bruun (1954), o qual propôs um modelo que prediz a variação horizontal da linha de costa decorrente de uma alteração em longo prazo do nível do mar (Freitas Neto, 2008). “A regra de Bruun”, como é conhecida, tem por base o balanço sedimentar entre o volume erodido da face praial e o volume depositado na parte imersa adjacente, até a profundidade de fechamento do perfil.

A posição da linha de costa e sua confiabilidade, como medida para estimar tendências erosivas ao longo do tempo, dependem da variabilidade do indicador escolhido e da metodologia empregada, frente às condições dinâmicas naturais e antrópicas. O desconhecimento das flutuações da linha de costa em diferentes escalas temporais e/ou espaciais, ou a interpretação falha desses dados conduz gerenciadores e engenheiros costeiros a tomarem decisões equivocadas (Stive *et al.*, 2002). Para quantificação das variações históricas da linha de costa, os métodos mais utilizados são as fotografias aéreas: através de aerofotos, ortofotos e mapas, e as imagens de satélites.

Fotografias aéreas são utilizadas para estudos de evolução da linha de costa desde o início do século. Em 1927, nos Estados Unidos, as aerofotografias já apresentavam qualidade suficiente para análises de variação da linha de costa (Crowell *et al.*, 1993). Na literatura costeira, Dolan *et al.* (1978) *apud* Lélis (2003) destacam como estudos pioneiros, os trabalhos realizados por Lucke (1934), Eardley (1941), Shepard *et al.* (1991) e Smith (1943). No entanto, o uso de fotografias aéreas para a determinação das variações da linha de costa iniciou-se no final da década de 60 (Moffitt, 1969), tendo sido documentado por Stafford (1971).

O mapeamento da linha de costa a partir de mapas, fotos aéreas e em campo reflete um instante no tempo, tornando necessário quantificar incertezas e a variabilidade natural dos indicadores utilizados (Pajak & Leatherman, 2002).

O uso de imagens de satélites e aerofotos torna-se fundamental no sentido de que a posição e o deslocamento horizontal da linha de costa são as variáveis que comumente servem como indicadores de erosão e acresção (Stockdon *et al.*, 2002), embora as variações da linha de costa sejam processos tridimensionais.

A delimitação da linha de costa, nas fotografias aéreas e imagens de satélite, adotam o critério de linha de preamar média (LPM), a qual é determinada pela linha de sedimentos secos/sedimentos molhados (Mazzer & Dillenburg, 2009). Crowell *et al.* (1991), Anders & Byrnes (1991) e Leatherman (1983) discutem que a LPM representa uma boa opção como indicador, em virtude de representar melhor as posições de máximas variações da linha de costa. Toldo Jr. & Almeida (2000) destacam que a identificação precisa da linha de praia através de uma feição física e seu movimento através do tempo, possibilita uma análise mais consistente da extensão destes impactos naturais, sendo essa informação útil para o órgão gestor da cidade ou do município, no que diz respeito à tomada de decisões, nos planos de desenvolvimento e nos programas de uso da terra.

A primeira unidade geomorfológica da linha de costa a reagir a qualquer variação energética e/ou eustática é a praia, em virtude de sua localização na estreita faixa de contato da terra com o mar. Assim, as praias possuem a capacidade de adaptação, protegendo a terra contra ação erosiva do mar. Nem todas as praias têm um estoque de sedimentos suficiente para responder morfológicamente a subida do nível do mar por transferência de sedimentos da berma para a antepraia inferior.

Um grande problema encontrado, quando se usa fotografias aéreas antigas, é que quase não há pontos de controle na costa, o que pode impossibilitar, em alguns casos, o georreferenciamento dessas fotos. Alguns cuidados devem ser tomados no intuito de minimizar os erros no georreferenciamento. Fotos antigas apresentam maior distorção e menos pontos de controle, devendo ser selecionadas criteriosamente. É importante utilizar somente a parte central das fotos, com sobreposição de 60% em fotos adjacentes, para minimizar os erros de variação da escala de uma mesma foto

em fotos adjacentes. CERC (1986) faz uma observação referente à comparação de fotos tiradas após a passagem de frentes frias, a qual tais comparativos são desaconselháveis, sendo recomendável obter as mesmas sob condições ambientais semelhantes.

Smith & Zarillo (1990) destacam que mapas e cartas não deveriam ser usados para quantificar alterações de longo período no posicionamento da linha de costa, tendo em vista que os mesmos têm precisão duvidosa e geralmente restringem-se a áreas portuárias. Deve-se observar também o *datum* de maré utilizado, principalmente quando os dados são obtidos de diferentes tipos de mapas e cartas. A diferença de *datum* existente varia, podendo ser grande em praias de pente suave com variações moderadas na amplitude de maré. Uma atenção especial deve ser dada no sentido de converter os dados para o mesmo sistema de referência antes de serem comparados (CERC, 1986).

Nas últimas décadas, as técnicas de mapeamento da linha de costa e de quantificação dos processos erosivos têm apresentado grande evolução em virtude do rápido avanço tecnológico, popularização dos sistemas de informação geográfica e cartografia digital, e a incorporação de novas tecnologias. Na atualidade tem-se feito uso de técnicas de teledetecção, as quais são embasadas no comportamento espectral das coberturas, de forma que a extração da linha de costa se realize de forma automática, com precisão apoiada nas características do meio e sobre a experiência do operador encarregado da restituição e digitalização da linha d'água (Rodriguez, 1999b). Entende-se por teledetecção como sendo a tecnologia que permite obter informações dos corpos situados sobre a superfície terrestre sem entrar em contato com eles (Chuvienco, 1990). Dentro da definição acima estão incluídos os dados de fotografias aéreas e dados do LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

A tecnologia LIDAR consiste em um sistema que utiliza pulsos *laser* emitidos a partir de uma aeronave para medir variações na altitude e/ou na batimetria ao longo de uma faixa de varredura lateral (Irish & Lillycrop, 1999). O uso do *laser* como instrumento de sensoriamento remoto tem uma história de

mais de trinta anos onde, a ideia de se usar o LIDAR para medições de profundidade surgiu no início dos anos 60, tendo sido testado a primeira vez no início da década de 70 (Irish & White, 1998; Irish & Lillycrop, *op. cit.*). No entanto, a tecnologia só se tornou comercialmente viável na década de 90. A partir do LIDAR é possível gerar dados tridimensionais da topografia praial, bem como o mapeamento da posição da linha de costa em escala regional (Stockdon *et al.*, 2002) de forma bastante detalhada.

A posição da linha de costa é definida utilizando-se uma variação de 0,5 m em torno do referencial escolhido (*datum*), o qual é específico para cada local, devendo ser selecionado de forma a minimizar os erros pela contaminação do laser na zona de espraiamento. Para se conhecer os processos atuantes na linha de costa é necessário ter conhecimento do comportamento da topografia subaquosa. Os processos atuantes na zona de surfe, os quais vão se refletir na linha de costa serão dependentes do comportamento da batimetria.

Atualmente, segundo Esteves (2002), há quatro sistemas LIDAR em operação: o LADS, o SHOALS, o *Hawk Eye* e o ATM. O *Laser Airborne Depth Sounder* (LADS) foi desenvolvido pela Marinha Real Australiana e está operando desde 1993; o Sueco *Hawk Eye* opera desde 1994. O *Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey* (SHOALS) foi desenvolvido pelos governos do Canadá e EUA. Esse possibilita a aquisição de dados quase que instantaneamente ao longo de costas sujeitas a grandes variações. O SHOALS tem a capacidade de realizar levantamentos contínuos, partindo da zona de surfe até a praia emersa, registrando a conformação dos bancos arenosos e possíveis canais existentes. Esse sistema possui a vantagem de ser mobilizado rapidamente para a realização de registros de impactos provocados por eventos extremos (Esteves, *op. cit.*).

O *Airborne Topographic Mapper* (ATM) é um altímetro laser originalmente desenvolvido para o estudo de mudanças climáticas a partir do mapeamento da variação da espessura das geleiras da Groelândia (Krabil *et al.*, 1995 *in* Esteves, 2002). O ATM associado ao LIDAR tem a capacidade de

mapear um trecho de 250-350 km de extensão (Brock *et al.*, 1999) tendo a precisão de seu levantamento dada pelo GPS cinemático.

Outras formas de se medir as variações da linha de costa são as medições indiretas caracterizadas por sistemas de sensoriamento remoto baseados em vídeo-imagens (Fig. 10). Esses sistemas consistem de câmeras posicionadas em locais altos, como torres, prédios ou penhascos, que monitoram e armazenam imagens de trechos determinados da praia e da zona de arrebentação (Holman & Stanley, 2007). Essas imagens são tratadas em algoritmos computacionais, os quais geram dois produtos: imagens do tipo *Timex* e *Variance*. Imagens do tipo *Variance* separam nitidamente a zona de arrebentação, onde há alto desvio padrão de intensidade de brilho em função da presença intermitente de espuma, da praia emersa, e também do limite externo em direção ao mar, onde as ondas não começaram a quebrar (Holman & Stanley, *op. cit.*). A partir de transformações fotogramétricas, realizadas através de pontos de controle em campo (GCPs), as imagens coletadas em campo sofrem um processo de retificação, com coordenadas reais, produtos semelhantes a fotografias aéreas oblíquas são gerados.

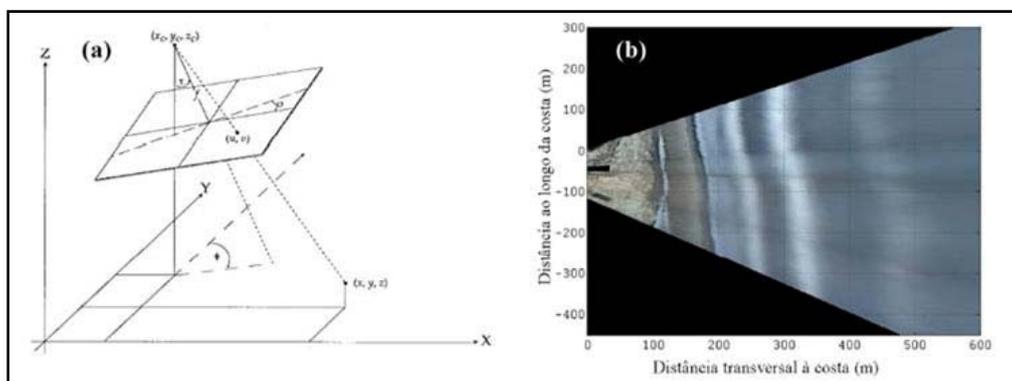


Figura 10: (a) Esquema destacando as relações de colinearidade entre as coordenadas da câmera, imagem, mundo real e ângulos de rotação, utilizados nas transformações fotogramétricas. (b) Mosaico obtido a partir de retificação das imagens *Timex*, geradas pelo sistema ARGUS. Fonte: Guedes (2008).

Além das vídeo-imagens, outra técnica bastante utilizada para levantamentos da posição da linha de costa, com precisão, é o uso do Sistema de Posicionamento por Satélites (GPS). O GPS é um sofisticado sistema eletrônico de navegação mundial, baseado em uma rede de satélites que

permite estimativa de posição, velocidade e tempo (localização instantânea), em qualquer ponto da Terra. Dentre os receptores GPS, o uso de GPS cinemático, para o mapeamento da linha de costa, revolucionou os levantamentos de campo à medida que proporcionava a obtenção de dados de forma rápida, precisa e relativamente barata, ao longo dos segmentos costeiros (Morton *et al.*, 1993).

O princípio básico do GPS geodésico consiste no uso de um par de antenas receptoras: uma antena fixa (base), situada em um ponto com altitude, latitude e longitude conhecidas; e uma antena móvel (*roover*), a qual transmite as informações de qualquer ponto da área em monitoramento, do seu raio de alcance, até a base. O alcance e a precisão do sinal são regidos por um *link* de rádio localizado junto à base. Os dados são armazenados em uma controladora portátil (chamada de *pda*), a qual acompanha o *roover*, se comunicando com o mesmo por *bluetooth*. O refinamento e a precisão do sinal do GPS é dado a partir de duas portadoras do tipo L1 e L2, as quais trabalham em frequência de microondas.

Mapeamentos da linha de costa com GPS acabam se tornando mais precisos do que levantamentos feitos por fotointerpretação, pois permitem uma melhor determinação dos indicadores da linha de costa. Esses indicadores, segundo Morton & Speed (1998) e Pajak & Leatherman (2002), são caracterizados pela continuidade ao longo da área a ser mapeada, fácil identificação de forma que sua posição possa ser reproduzida por diferentes indivíduos, consistência ao ser monitorada através de diferentes métodos e representação confiável das mudanças de linha de costa.

A precisão horizontal de um posicionamento obtido por GPS depende do equipamento utilizado e da relação entre as linhas de mapeamento e a pendente da praia. É importante destacar que os dados obtidos com GPS geodésico são referenciados junto ao elipsóide terrestre sendo necessário, para trabalhos realizados em zonas costeiras, o cálculo da ondulação geoidal da localidade em estudo, para a correção desses dados para altitudes ortométricas. Essas correções são realizadas a partir de dados de gravimétricos e de pontos de apoio espalhados ao longo da costa.

Estudos realizados por Morton *et al.* (1993), List & Farris (1999), Toldo Jr. *et al.* (1999) e Esteves *et al.* (2001) tem demonstrado que este método é bastante eficaz para o mapeamento de regiões com extensão de 100 km ou mais. Contudo, Ruggiero *et al.* (1999) e Huang *et al.* (2002) ressaltam que mapeamentos de detalhe, com uso de GPS, são admissíveis para áreas de até 4 km de extensão. O uso de métodos mais eficazes no mapeamento do processo erosivo, bem como o aperfeiçoamento dessas técnicas e de grande importância nos estudos sobre erosão costeira.

5.6 METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO

A determinação da posição da linha de costa e seu comportamento migratório ao longo do tempo são de grande importância para inúmeras atividades, sejam elas de pesquisa, engenharia ou planejamento (NRC, 1990). Na literatura internacional tem-se relatado uma série de metodologias para avaliar o recuo médio de uma determinada linha de costa sendo que, o primeiro requisito para realização desse mapeamento é a escolha de qual indicador será mapeado. Dentre os indicadores mais utilizados estão à linha de preamar (Pajak & Leatherman, 2002), a linha de vegetação permanente, a base ou crista das dunas e as escarpas de erosão, os quais, segundo Morton & Speed (1998), são citados como os indicadores mais adequados por serem menos suscetíveis às variações de curto prazo.

Atualmente, na literatura costeira, dois métodos são consagrados para a realização do cálculo do recuo médio da linha de costa: o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) e o Método do Polígono de Mudança. O DSAS é um aplicativo desenvolvido pelo Centro de Pesquisa em Geologia dos Estados Unidos (USGS), e é uma extensão do *software* ArcGis[®], desenvolvido pela ESRI. A partir de uma linha base e da criação de transectos perpendiculares equidistantes, o DSAS calcula as taxas de variação estatística para uma série temporal de dados vetoriais que representam a linha de costa (Fig. 11). Esse método é mais indicado para o cálculo de recuo em linhas de costa homogêneas, as quais não apresentam reentrâncias ou cúspides acentuadas, ao longo do segmento costeiro.

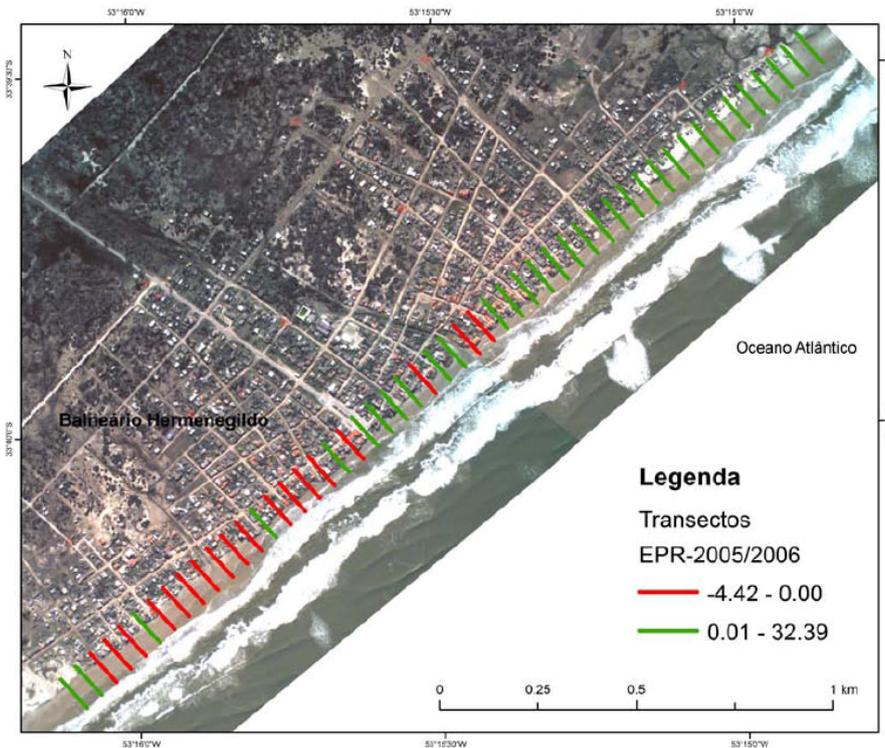


Figura 11: Croqui do método DSAS para diferentes tipos de costa. Fonte: Teixeira (2011)

O método do polígono de mudança (Smith & Cromley, 2012) é fundamentado no fato de que, a partir de duas linhas de costa distintas, e previamente vetorizadas, é possível extrair, através da subtração de polígonos, a diferença total de área entre duas linhas de costa (Fig. 12). A partir do cruzamento de duas linhas, uma série de polígonos é criada de forma que esta representa uma alternância de regiões que estão sofrendo processo de acresção ou erosão. Com a análise da mudança do polígono, toda região de variação entre duas linhas de costa é quantificada. Dessa forma, áreas de mudança, tanto positivas quanto negativas, podem ser calculadas a partir da decomposição desse polígono complexo em uma série de polígonos simples. Os procedimentos para quantificação das áreas em erosão, bem como o cálculo de deslocamento da linha de costa ao longo do tempo, no método do polígono de mudança, serão discutidos ao longo deste trabalho.

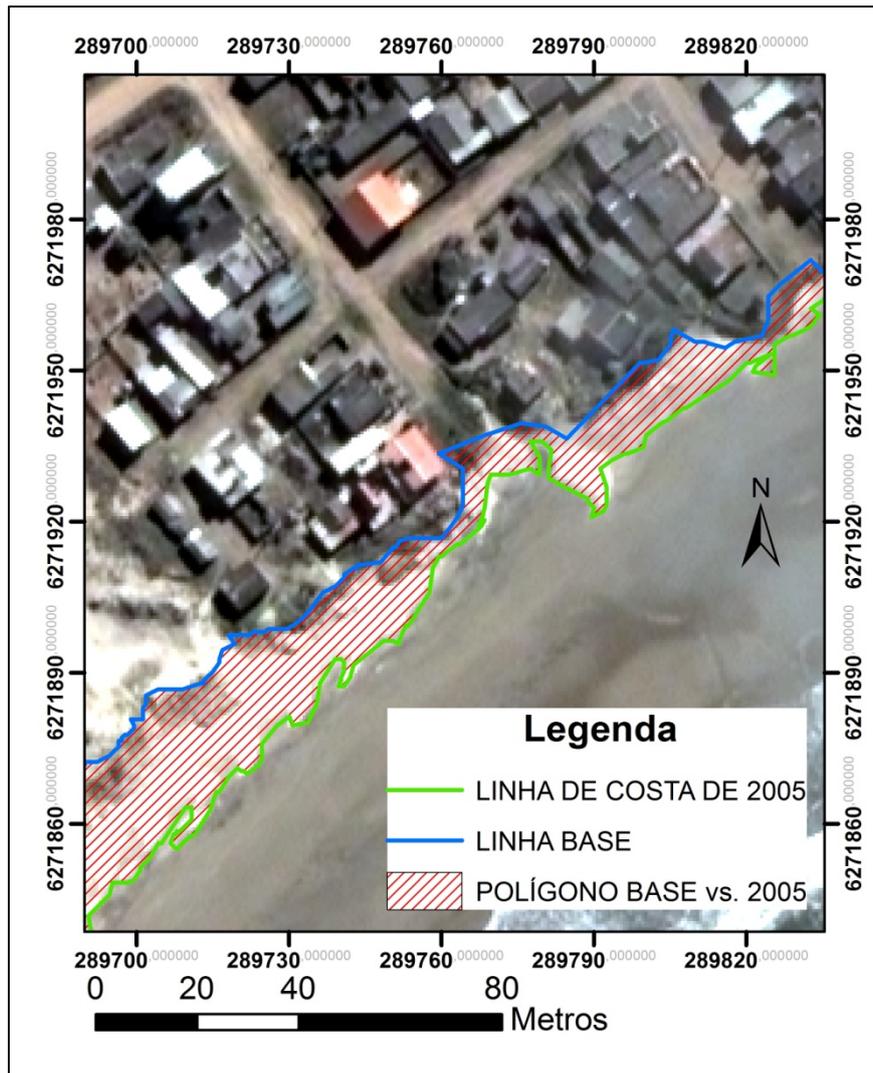


Figura 12: Caracterização do método do polígono de mudança. Fonte: elaborado pelo próprio autor.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PREPARAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA

Para o presente estudo, elaborou-se uma base cartográfica composta de fotografias aéreas e imagens de satélite. As aerofotos foram obtidas em modo pancromático, digitalizadas com 0,5 m de resolução espacial, e são datadas dos anos de 1947, 1964, 1975, 1996 e 2000. As três mais antigas foram adquiridas junto à Agência de Desenvolvimento da Lagoa Mirim, pertencente à Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e, a fotografia de 1996 na 1ª Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro, divisão de cartografia, situada na cidade de Porto Alegre - RS. A fotografia do ano 2000 foi adquirida junto ao banco de dados do Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

A imagem orbital do ano de 2007 (sensor *Quickbird*) foi adquirida junto ao LabGerco - FURG e a imagem de 2009 (sensor *Alos Prism*) foi cedida pelo LOG-FURG. Em complemento às fotografias aéreas e imagens de satélite, foram coletadas em campo linhas de costa, com auxílio de um GPS geodésico, nos anos de 2005, 2006, 2008, 2010, 2011 e 2012, as quais também foram incorporadas a base de dados.

Para as fotografias aéreas, a seleção das cenas levou em consideração as faixas que abrangessem toda a área de estudo. Por estarem em meio analógico, as fotografias foram digitalizadas de forma que as mesmas ficassem com resolução entre 600 dpi ou 1200 dpi, levando em consideração a escala do vôo, de forma que todas correspondessem a uma resolução espacial de 0,5 m/pixel. As fotografias foram digitalizadas em scanner convencional de forma que, ao final do processo ficassem com um recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 25%. Na digitalização das fotografias aéreas foi considerado o limite do imageamento original (Tab. 05) de forma que, as informações da fotografia original pudessem ser preservadas ao máximo (Jensen, 2009).

Tabela 05: Escalas de digitalização e resolução espacial de fotografias aéreas.

| IFOV do detector do digitalizador | | Resolução do Pixel no Terreno para Diversas Escalas das Fotografias (em metros) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---|----------|---------|---------|---------|---------|
| DPI | μm | 1:40.000 | 1:20.000 | 1:9.600 | 1:4.800 | 1:2.400 | 1:1.200 |
| 100 | 254,00 | 10,16 | 5,08 | 2,44 | 1,22 | 0,61 | 0,30 |
| 200 | 127,00 | 5,08 | 2,54 | 1,22 | 0,61 | 0,30 | 0,15 |
| 300 | 84,67 | 3,39 | 1,69 | 0,81 | 0,41 | 0,20 | 0,10 |
| 500 | 50,80 | 2,03 | 1,02 | 0,49 | 0,24 | 0,12 | 0,06 |
| 600 | 42,34 | 1,69 | 0,85 | 0,41 | 0,20 | 0,10 | 0,05 |
| 1000 | 25,40 | 1,02 | 0,51 | 0,24 | 0,12 | 0,06 | 0,03 |
| 1200 | 21,17 | 0,85 | 0,42 | 0,20 | 0,10 | 0,05 | 0,03 |
| 2000 | 12,70 | 0,51 | 0,25 | 0,12 | 0,06 | 0,03 | 0,02 |
| 3000 | 8,47 | 0,33 | 0,17 | 0,08 | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| 4000 | 6,35 | 0,25 | 0,13 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 0,008 |

Fonte: Jensen (2009).

6.2 GEORREFERENCIAMENTO E REGISTRO DO BANCO DE DADOS

O georreferenciamento consiste na correspondência entre a localização dos pixels na imagem (posição x,y) e a posição destes no terreno em um dado sistema de coordenadas. Esta correspondência é obtida a partir de uma equação de transformação obtida a partir de pontos de controle coletados em campo (GCPs). Além do georreferenciamento, se fez necessário o registro dos dados. O registro corresponde a aplicar três conjuntos de transformações sobre os dados (i.e., rotação, translação e escala), de forma que esses tenham correspondência espacial entre si garantida, mesmo possuindo pequenas divergências de georreferenciamento. Para o cálculo do deslocamento da linha de costa, tanto nas fotografias aéreas quanto nas imagens de satélite, é fundamental que todo o banco de dados possua um mesmo sistema de coordenadas e esteja registrado, permitindo a comparação espacial de suas posições.

Os pontos de controle foram obtidos em campo com o auxílio de um GPS geodésico da marca Leica, operando no modo *stop and go*, com

coordenadas referenciadas ao datum WGS 84, sistema de projeção UTM (Universal Transverso de Mercator), zona 22 S. A base do GPS foi posicionada no marco do IBGE (Fig. 13), situado próximo a estatua de Iemanjá da praia do Hermenegildo, de forma que este proporcionasse as correções dos dados obtidos em tempo real. Ao todo foram coletados cerca de 25 GCPs, os quais foram distribuídos em toda a área de estudo.



Figura 13: GPS geodésico posicionado sobre o marco do IBGE. Fonte: arquivo pessoal.

A primeira imagem a ser georreferenciada foi a de 1947, em virtude desta apresentar feições que podem ser identificáveis nas demais fotografias e imagens do banco de dados. Após o georreferenciamento da imagem mais antiga foi aplicado o processo de registro das demais imagens do banco de dados, onde esta imagem foi designada como base e a partir dela as demais foram registradas. Esse procedimento foi necessário para que fosse possível realizar um comparativo da linha de costa mais antiga, com as demais linhas de costa analisadas. O registro consiste na determinação de um conjunto de transformações sobre a imagem de forma que os *pixels* das diferentes cenas coincidam, em posição, embora possam possuir diferentes coordenadas

(Jensen, 2009). Esse procedimento foi realizado no *software Envi 4.4*[®], através da ferramenta *map – registration - image to image*.

6.3 VETORIZAÇÃO DAS IMAGENS E COLETA DE DADOS DE CAMPO COM GPS

O processo de vetorização do banco de dados foi realizado no *software Envi 4.4*[®] e contou com um erro médio quadrático, (RMS) para o georreferenciamento da base cartográfica, de 0,3908 m (Tab. 06). Fenster *et al.* (2001) têm destacado que a natureza da dinâmica da linha de costa torna difícil identificar e analisar grandes áreas que têm, ambas, sofrido acresção ou retração ao longo do tempo. Dessa forma, a vetorização das imagens mais recentes (ano 2000, 2007 e 2009) foi realizada junto às estruturas de engenharia presentes na orla, uma vez que a escolha de outro indicador de linha de costa, como a fronteira entre areia seca e úmida, mostrou-se de difícil identificação. Para as fotografias aéreas dos anos de 1947, 1964, 1975 e 1996, a vetorização foi realizada entre o limite areia seca/areia molhada.

Tabela 06: Erro médio quadrático atribuído a cada fonte de dados.

| Tipo de dado espacial | Sensor/equipamento utilizado | Ano | Erro médio quadrático (RMS) |
|---|------------------------------|------|-----------------------------|
| | | 1947 | 0,72 m |
| | | 1964 | 0,58 m |
| Aerofoto | Filme Fotográfico | 1975 | 0,90 m |
| | | 1996 | 0,42 m |
| | Sensor Adar | 2000 | 0,46 m |
| Imagem de satélite (sensor <i>QuickBird</i>) | Pancromático | 2005 | 0,5 m |
| Linhas de GPS | GPS Geodésico | 2006 | 0,05 m |
| Imagem de satélite (sensor <i>QuickBird</i>) | | 2007 | 0,5 m |
| Imagem de satélite (sensor <i>Alos</i>) | Pancromático | 2009 | 0,41 m |
| | | 2010 | 0,05 m |
| Linhas de GPS | GPS Geodésico | 2011 | 0,05 m |
| | | 2012 | 0,05 m |
| Erro Médio Quadrático Total (RMS) = 0,3908 m | | | |

Crowell *et al.* (1991) e Leatherman *et al.* (2000) destacam que, em fotografias aéreas e imagens de satélites, um dos critérios para delimitação da linha de costa é a linha de preamar. A mesma é definida como sendo o limite entre a areia seca e a areia molhada (Lélis, 2003). Os dados de campo, provenientes do GPS geodésico, foram referenciados, também, em relação à linha de estruturas (Fig. 14). O critério para seleção da linha de estruturas costeiras como indicador se dá no fato da mesma, para a localidade estudada, apresentar o limite entre a areia seca e areia molhada, coincidente com a linha de estruturas de engenharia presentes na costa.



Figura 14: Coleta de pontos realizada na linha de estruturas e nas escarpas.

Junto ao processo de vetorização foram criadas linhas de fechamento nas extremidades da área estudada, compreendendo os limites analisados. Essas delimitações foram estabelecidas de modo que fosse possível calcular a área de todo o segmento costeiro vetorizado, para cada um dos intervalos temporais, compreendidos pelas respectivas imagens e dados de GPS do banco de dados.

6.4 ELABORAÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Um modelo de elevação digital do terreno (Fig. 15) foi elaborado no *software* ArcGis 9.3[®], a partir de dados coletados com o GPS geodésico, também, no modo *stop and go*. Foi coletado um total de 10.000 pontos, os quais foram distribuídos ao longo dos 2,5 km do balneário Hermenegildo. A

precisão do equipamento é dada pelo código C/A e pelas portadoras L1, L2 e L2C de modo que, sua configuração permitiu coletar pontos com precisão planimétrica de 0,005 m e altimétrica de 0,02 m. O ângulo de corte para recepção do sinal configurado foi de 15° (ângulo de máscara). O marco geodésico posicionado próximo a estatua de Iemanjá foi utilizado como referencial de nível (RN) para os levantamentos.

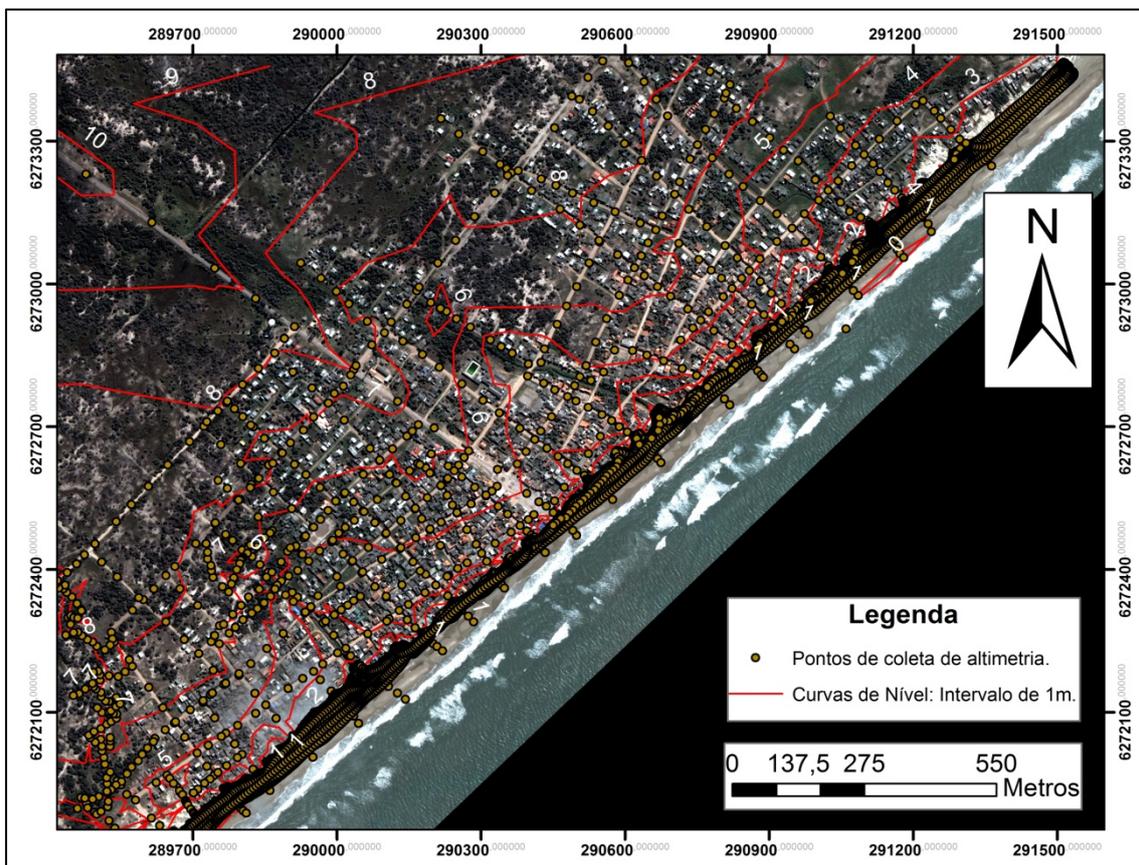


Figura 15: Malha de pontos utilizada na geração do modelo digital do terreno (DEM).

6.5 PERFIS TOPOGRÁFICOS

Os levantamentos topográficos foram realizados, segundo os métodos propostos por Birkemeier (1985), com auxílio de uma estação total da marca *Ruide* e um prisma (Fig. 16). As leituras foram realizadas nos pontos de variação da morfologia praial. A cota inicial dos levantamentos foi definida de acordo com o zero estabelecido pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil.



Figura 16: Estação total e prisma utilizado nos levantamentos de perfis.

6.6 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOIDAL LOCAL

Para a elaboração do modelo geoidal local foram utilizados os três referenciais de nível do IBGE existentes na localidade. Através do uso de um nível eletrônico digital, modelo sprinter 250M e duas miras com código de barras foi possível realizar o nivelamento geométrico na área de interesse com intuito de se estabelecer as altitudes ortométricas (em relação ao geoide). O levantamento foi realizado em dois circuitos de modo a se evitar os erros grosseiros e sistemáticos. Ao longo do nivelamento buscou-se calcular as diferenças de altura nas observações de modo a verificar a precisão do nivelamento e contranivelamento.

As altitudes em relação ao geoide são estimadas a partir de modelos gravimétricos, os quais produzem uma boa estimativa em grandes escalas, mas também podem ter grandes desvios de caráter regional (Mata, 1996). A deficiência de uma ampla rede gravimétrica no país (Fig. 17) faz com que esses dados, para o extremo sul do Brasil, tenham uma distorção. Dessa forma, a utilização de um modelo geoidal local, desprezando os valores da gravidade local, faz-se necessário.



Figura 17: Rede gravimétrica do sistema geodésico brasileiro. Extraído de Teixeira (2011).

O modelo geoidal local foi construído a partir de uma rede de nivelamento, a qual teve como base os referenciais de nível (RNs) estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Na praia do Hermenegildo, três RNs foram identificados de modo que, a partir dos levantamentos de campo foi possível estabelecer a altitude ortométrica enquanto que, com o GPS geodésico foi possível extrair os valores das altitudes geométricas. A diferença entre as altitudes (Fig. 18) possibilitou o cálculo da ondulação geoidal (N) para os três referenciais de níveis situados na localidade estudada. A partir da ondulação geoidal e dos valores de elevação coletados com o GPS geodésico foi possível estimar a real altitude da localidade em relação ao nível médio dos mares.

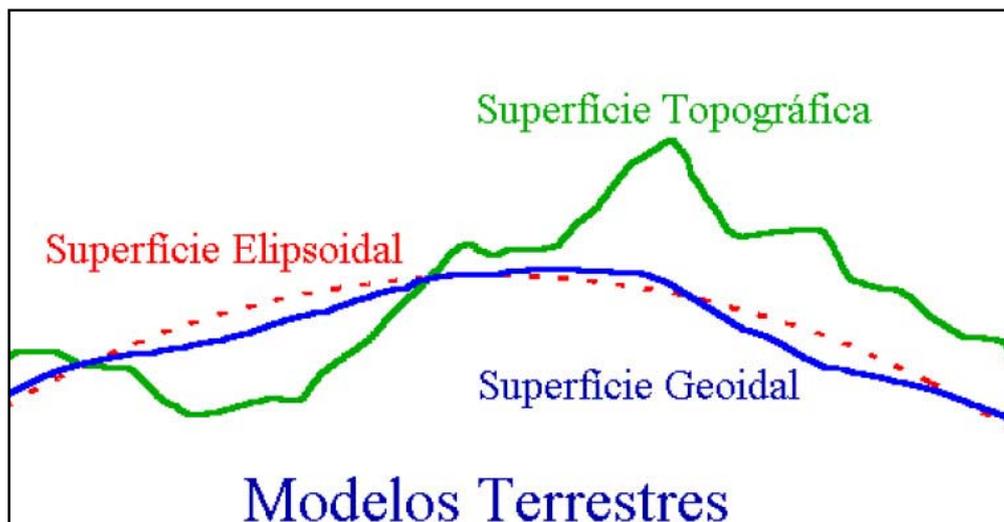


Figura 18: Representação das superfícies da Terra. Adaptado de Dana (1994).

O valor da ondulação geoidal foi obtido pela equação 01 de modo que, o nivelamento fornece a altitude ortométrica enquanto que o rastreamento por satélites fornece a altitude geométrica, desta forma, a diferença entre as altitudes possibilitou o cálculo da ondulação geoidal para a área de estudo.

$$N = h - H \quad (01)$$

6.7 OBTENÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DO MAR (TSM)

Os dados de temperatura de superfície do mar foram obtidos junto ao banco de dados do National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NCAR), oriundos do projeto Reanálise R-1. A base de dados abrange a área compreendida entre 30°S - 35°S e 50°W - 55°W e possui uma resolução temporal de 6h (i.e., quatro vezes ao dia) e resolução espacial de 2,5° x 2,5°. Essa janela de dados foi escolhida por centrar-se sobre a área de estudo.

6.8 OBTENÇÃO DOS DADOS DE VENTO E PRESSÃO

Os dados de vento e pressão atmosférica foram adquiridos junto ao banco de dados do projeto Reanálise R-1 do NCEP/NCAR. Os dados possuem uma resolução temporal 6h e resolução espacial de 2,5° x 2,5°, e foram coletados, também, para a janela de coordenadas 32,5°S e 52,5°W. Para o

cálculo da velocidade do vento foram utilizadas as componentes zonal (u) e meridional (v) a 10m de altura (Bowden, 1983; Maia, 2011) e, para a pressão atmosférica, foram utilizados valores reduzidos ao nível do mar.

Para o período de coleta de perfis semanais, os dados de intensidade e direção do vento, da temperatura e da pressão local, foram adquiridos, de hora em hora, junto à estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a qual se encontra instalada junto ao farol do Chuí, aproximadamente 13 km de distância da área de estudo.

6.9 OBTENÇÃO DOS DADOS DE ONDAS E DE NÍVEL

Os dados de onda utilizados nesse estudo são provenientes do modelo *Wave Watch* III utilizado pelo NCEP/NOAA, e foram extraídos do estudo realizado por Melo *et al.* (2010). Para este estudo foram utilizadas informações referentes à altura significativa (H_s) e período das ondas (T), com resolução de $1,00^\circ$ de latitude x $1,25^\circ$ de longitude, no ponto de coordenadas 34°S e $52,5^\circ\text{W}$, com intervalo de tempo de 30 anos (1979 a 2008). Uma descrição mais detalhada do modelo, suas equações e o método numérico utilizado, podem ser encontradas em Tolman (2002). Os dados de nível foram extraídos do estudo realizado por Maia (2011), para a praia do Hermenegildo, e são provenientes de um modelo analítico desenvolvido pelo autor na ocasião.

6.10 OBTENÇÃO DAS TAXAS DE RECUO DA LINHA DE COSTA

Para a obtenção das taxas de recuo da linha de costa em mesoescala (65 anos) e microescala (dados semanais ao longo de 6 meses), a partir de diferentes fotografias aéreas, imagens de satélite e dados de GPS, foi adotado, nesse estudo, o método do polígono de mudança, proposto por Smith & Cromley (2012). Nesse método, a partir de duas linhas de costa distintas previamente vetorizadas, é possível extrair as áreas erodidas e/ou acrescidas, através da geração e subtração de polígonos. Assim, do cruzamento de duas linhas de costa, uma série de polígonos é criada de forma que estes representem as regiões que estão sofrendo processo de acreção e/ou erosão. Com a análise da mudança do polígono, toda região de variação entre duas linhas de costa é quantificada. Dessa forma, áreas de mudança, tanto positivas

quanto negativas, podem ser calculadas a partir da decomposição desse polígono complexo em uma série de sub-polígonos simples.

Na álgebra de polígonos, inicialmente foram gerados polígonos entre as linhas de interesse (correspondentes à vetorização da linha de costa de cada data) e a linha base (linha de referência pré-estabelecida), obtendo-se um polígono para cada data de interesse em relação à linha base. Em seguida foi realizada uma subtração dos polígonos correspondentes aos intervalos analisados, determinando como saída, para cada intervalo analisado, um arquivo *raster*, expresso em metros-quadrados, com valores negativos e positivos (Eq. 02).

$$Raster = Poligono A - Poligono B \quad (02)$$

Nesta relação, “A” corresponde a data mais antiga e “B” a data mais recente do intervalo temporal analisado. No raster encontrado, valores negativos indicam erosão e valores positivos indicam acresção (Fig. 19). Considerando-se as dificuldades técnicas envolvidas no tratamento de arquivos raster com valores negativos, aplica-se um segundo processamento onde, a partir do raster de entrada se obtém dois arquivos raster binários (0 ou 255 como valores possíveis), onde um dos arquivos representa a área erodida e o outro a área acrescida.

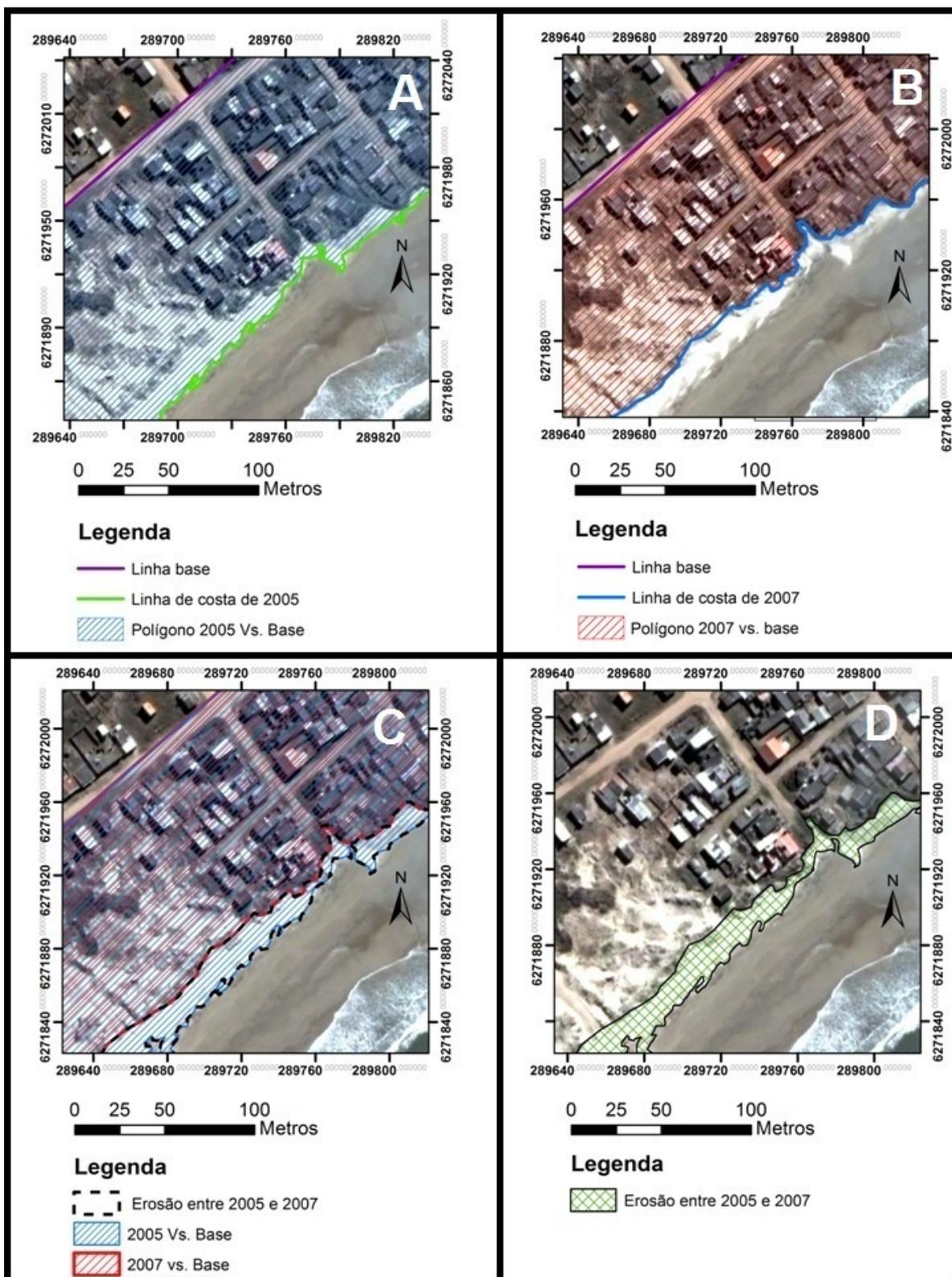


Figura 19: (A e B) Esboço do Método do Polígono de Mudança para diferentes datas, a partir de uma linha base; (C) Sobreposição dos polígonos para realização do processo de subtração; (D) Polígono gerado a partir das linhas de interesse. Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento descrito anteriormente, para a determinação das áreas erodidas e/ou acrescidas, foi realizado no *software Erdas-Image*[®], através da ferramenta *Modeler* (Fig. 20) de forma que, foi possível criar uma rotina para a determinação da área entre dois vetores, os quais representam a posição da linha de costa. A partir da entrada de dois arquivos vetoriais, o modelo faz uma comparação entre vetores de modo que, é realizada a subtração da informação da imagem mais antiga pela imagem mais recente. A resultante desse processo é um arquivo de saída do tipo raster, o qual diz respeito à erosão ou a acreção, e é expresso em metros quadrados. A quantificação da área é obtida através da mensuração de pixels da área erodida, relacionada à área de cada pixel desta região. As informações referentes ao arquivo raster de saída são expressas em valores positivos de 255, quando a área está sofrendo erosão, valores negativos de -255 quando ocorre acreção e valores nulos quando não há deslocamento da linha de costa. Cada um dos dois processos é individualizado em um arquivo raster próprio (i.e., erosão ou acreção) que contém apenas valores positivos de 255 para o processo correspondente e 00 para os demais, formando um arquivo *raster* binário de acreção e outro de erosão. A sobreposição destas duas imagens binárias permite a visualização simultânea das áreas erodidas e acrescidas para um dado período, bem como obter o saldo da erosão ou da acreção para a área analisada.

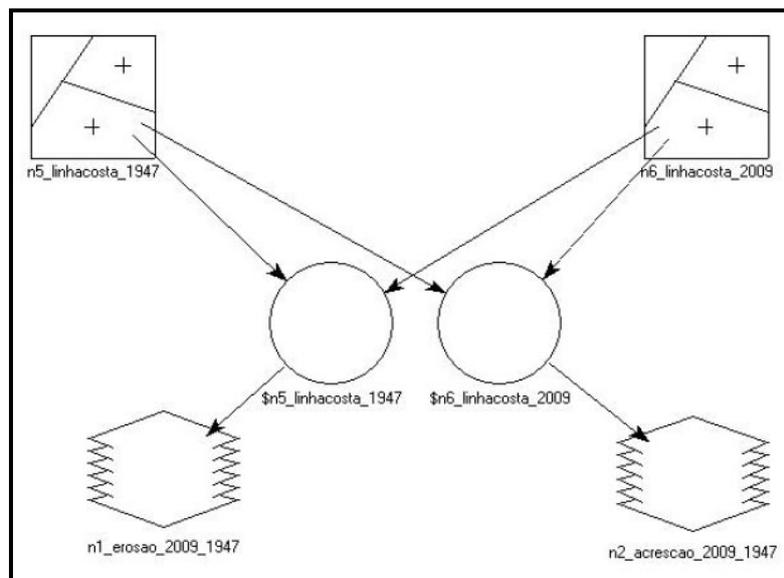


Figura 20: Modelo elaborado no *software Erdas-Image*[®] 9.3 para o cálculo de erosão e acreção.

Para esse estudo foi desenvolvida uma função condicional, através de um modelo de binarização (Fig. 21 e 22), visando evitar os valores menores que zero presente na imagem.

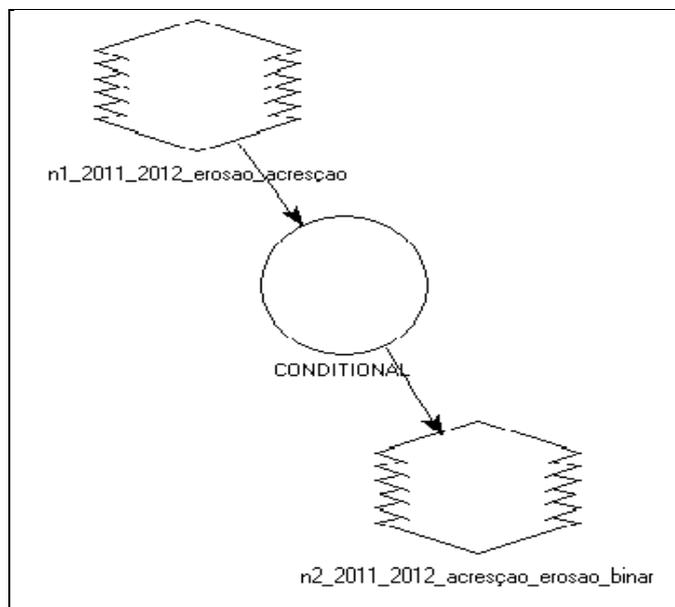


Figura 21: Modelo elaborado no *software Erdas-Image*® 9.3 para binarização da imagem.



Figura 22: Imagem binária obtida a partir do modelo *Erdas-Image*® 9.3.

A leitura da área erodida/acrescida é obtida através da mensuração do número de pixels da área erodida, relacionada à área de cada pixel desta região. No *software MultiSpec*® 3.3, um software gratuito desenvolvido e distribuído pela universidade de PURDUE (Indiana, EUA), foi possível quantificar os valores, em metros quadrados, das área erodidas e acrescidas

de cada uma das imagens binárias (Fig. 23). O *software* foi escolhido por sua interface amigável, robustez, por ser gratuito e oferecer a saída em forma textual.

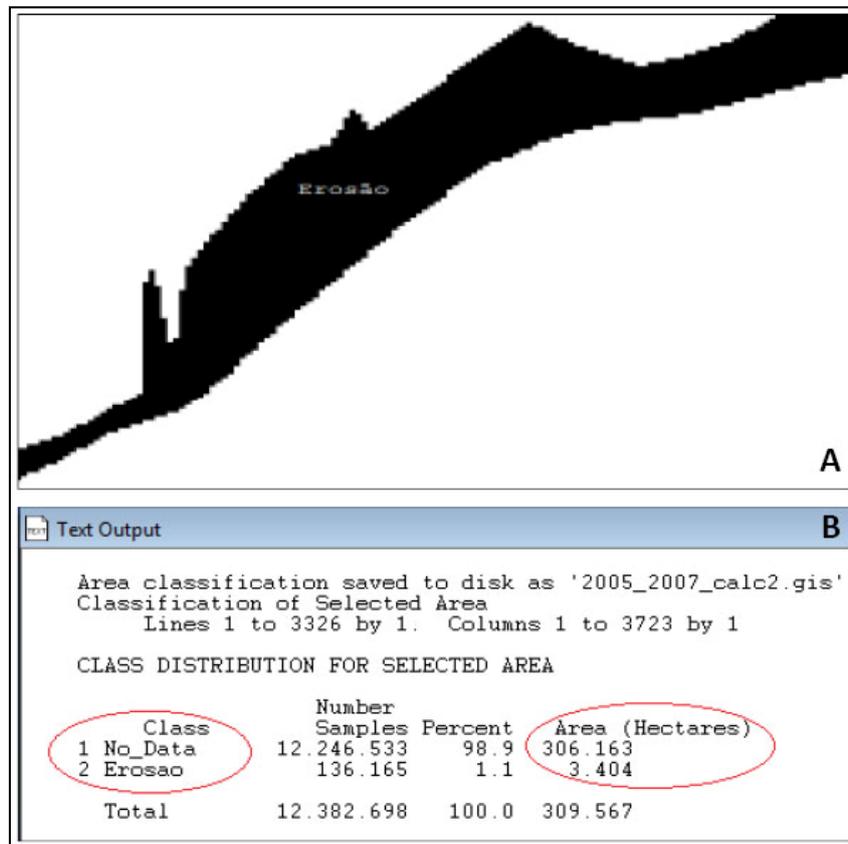


Figura 23: Leitura da área erodida no *software Multispec*.

A resultante desse processo foi um arquivo de texto, o qual disponibiliza informações sobre a área erodida (A_e) e a área acrescida (A_a), nos polígonos selecionados. A diferença entre as áreas acrescidas e erodidas resultará em uma área final (A_f), a qual, quando dividida pelo perímetro da linha externa, resultará no recuo médio da linha de costa (D) (Eq. 03). Para o cálculo do deslocamento/ano (D_{anos}), é necessário realizar uma divisão entre o recuo médio (D) e o intervalo observado (p) (Eq. 04). Para o cálculo do deslocamento/ano, o deslocamento total foi dividido pelo período monitorado, em anos.

$$D = \frac{A_f (m^2)}{P (m)} \quad (03)$$

$$D_{\text{ano}} = \frac{D (m)}{p (\text{anos})} \quad (04)$$

Com a aplicação deste conjunto de equações, atribui-se para cada polígono a correspondente área e movimentação. Estes dados alimentam um conjunto tabular que cruzados com os demais do banco de dados servem de subsídio para extração de estatísticas de avaliação da consistência do método. Um resumo de todo processo é mostrado na Fig. 24.

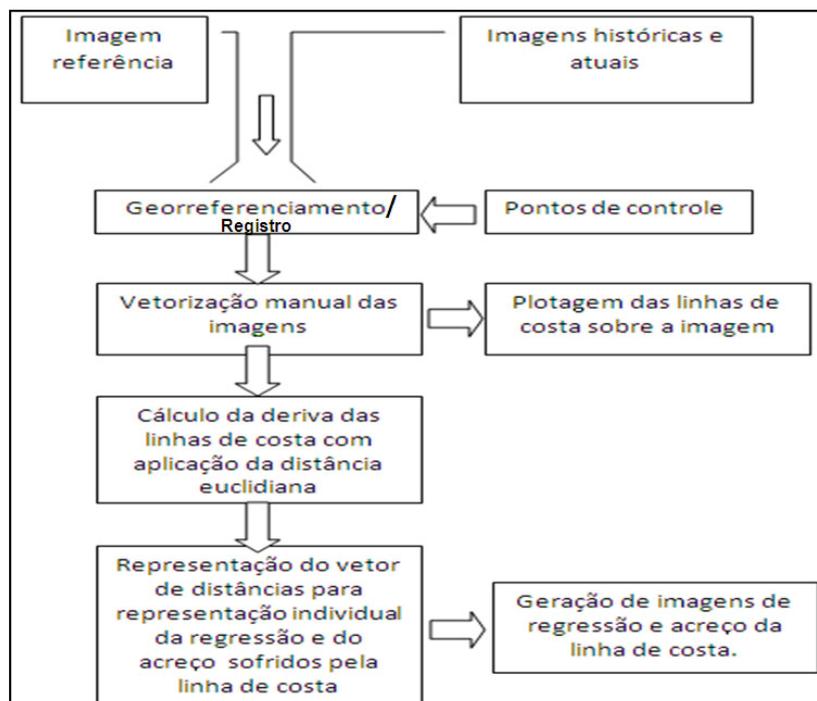


Figura 24: Resumo da metodologia para o cálculo das taxas de erosão.

6.11 TESTE ESTATÍSTICO PARA CORRELAÇÃO DOS DADOS DE DESLOCAMENTO DA LINHA DE COSTA

Para a avaliação da correlação entre os diferentes dados de linha de costa foi utilizado o cálculo do coeficiente de determinação (R^2), o qual é fundamentado no método de regressão linear por mínimos quadrados. O método estatístico utilizado estimou uma equação linear de determinação da posição futura da linha de costa (Eq. 05). Esta equação permite, atribuindo uma data, estimar o deslocamento para a linha de costa.

$$Perdas = 2,229\left[\frac{m}{a}\right] \times Ano - 4368 [m] \quad (05)$$

Essa distribuição foi a que permitiu uma melhor visualização de um possível comportamento erosivo para uma determinada área de forma que, as taxas de variação, segundo Thieler & Danfort (1994), podem ser obtidas através de diferentes formas de interpretação da distância entre posições relativas ao longo da linha de costa, em períodos distintos.

6.12 TESTE DE TENDÊNCIA ESTATÍSTICA PARA SÉRIES DE DADOS DE TSM

Para a caracterização da tendência da série de dados de temperatura de superfície do mar (TSM) e dos ventos foi realizada uma análise não paramétrica por meio do teste estatístico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975; Sneyers, 1975). O teste consiste em comparar cada valor de uma determinada série temporal com os valores restantes, sempre em ordem sequencial. Esse comparativo conta o número de vezes em que os termos restantes da série de dados são maiores que o valor analisado (Santos *et al.*, 2010). Essa análise considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente, e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma da série (série aleatória simples). Considerando uma série temporal de temperatura (T_i), contendo N termos ($1 \leq i \leq N$), se observa que a soma tn do número de termos m_i da série, relativo ao valor de T_i e cujos termos precedentes ($j < i$) são inferiores ao mesmo ($T_j < T_i$), é representada pela equação 06.

$$tn = \sum_{i=1}^n m_i \quad (06)$$

Segundo Back (2001), caso a série de dados apresente um grande número de termos (N), sob a hipótese nula (H_0) de ausência de tendência, tn apresentará uma distribuição normal com média (Eq. 07) e variância (Eq. 08).

$$E(tn) = \frac{N(N-1)}{4} \quad (07)$$

$$Var(tn) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72} \quad (08)$$

A significância estatística de t_n é feita a partir de um teste bilateral, o qual considera a hipótese nula e sendo está passível de ser rejeitada para grandes valores da estatística $u(t)$ (Eq. 09).

$$u(t) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{\text{Var}(t_n)}} \quad (09)$$

O valor da probabilidade α_1 é calculado por meio de uma tabela “normal reduzida” (Eq. 10), onde a hipótese nula é rejeitada ou não, a um nível de significância α_0 se $\alpha_1 > \alpha_0$ ou $\alpha_1 < \alpha_0$, respectivamente (Back, 2001).

$$\alpha_1 = \text{prob} |u| > |u(t)| \quad (10)$$

Em geral, considera-se o nível de significância do teste $\alpha_0 = 0,005$. Dessa forma, a hipótese nula é rejeitada quando existe uma tendência significativa na série temporal. O sinal estatístico $u(t)$ indica se a tendência é crescente ($u(t) > 0$) ou decrescente ($u(t) < 0$).

6.13 APLICAÇÃO DE FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS (EOF)

A determinação de funções ortogonais empíricas (EOF) consiste em uma técnica que permite descrever a variabilidade temporal e espacial de um conjunto de dados em termos de funções mutuamente ortogonais, tendo a separabilidade estatística maximizada (Emery & Thomson, 2001). Dessa forma, as primeiras componentes geradas nesta transformação representam uma maior porção significativa da variação total da série, cujo padrão contém fenômenos com diferentes escalas espaciais e temporais (Emery & Thomson, *op cit.*). Na aplicação da técnica de EOF é possível obter a variação de uma propriedade qualquer no espaço e no tempo, como a soma de um número de termos finitos de EOFs em (x, y, z) , representando a variabilidade espacial, com a amplitude $u_m(t)$, representando a variabilidade temporal (Eq. 11).

$$X(x, y, z, t) = \sum u_m(t) \text{ em } (x, y, z) \quad (11)$$

A componente principal, $um(t)$, representa o comportamento da amplitude de cada EOF no tempo. A EOF contém a estrutura espacial dos fatores de variação, com maior importância temporal na variação das propriedades da série temporal (X). Para as funções ortogonais empíricas alguns aspectos são considerados. Primeiramente, as componentes principais são ortogonais no tempo. Dessa forma não há correlação temporal entre uma ou mais componentes principais. Outro aspecto a ser considerado é que as EOFs são ortogonais no espaço de modo que, não há correlação entre uma ou mais funções ortogonais.

Para determinação das EOFs foram utilizados dados de temperatura de superfície do mar (TSM), em formato raster, datados do período de 1948 a 2011, coletados diariamente e obtidos a partir do banco de dados do *National Oceanographic Data Center* (NODC) do *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA). Inicialmente, a média da TSM foi removida dos dados de modo a se obter as anomalias de TSM (Eq. 12).

$$Anomalia = \frac{(TSM - \overline{TSM})}{\overline{TSM}} \quad (12)$$

A anomalia fornece uma boa estimativa da variabilidade espacial da série a ser determinada através das EOFs. Para o cálculo das funções ortogonais, os dados foram concatenados em campos de tempo por valores de temperatura, gerando uma matriz $tsm = (t, T)$, onde t representa o campo temporal dos dados e T indicam as temperaturas de certo ponto $A(x, y, z)$ neste instante. A partir desta matriz foi calculada a matriz de covariância (cov), que é obtida pela multiplicação da matriz tsm por sua transposta (Eq. 13).

$$cov = tsm \cdot tsm' \quad (13)$$

Para a solução das EOFs foi necessário realizar a determinação dos autovalores e autovetores da matriz de covariância (Eq. 14). Associado a essa solução, foi aplicado um sistema linear de equações que, para o conjunto de matrizes originais, determina os autovalores e os autovetores.

$$[EOF, L] = eig(cov) \quad (14)$$

A saída EOF é uma matriz quadrada que representa a variabilidade associada a cada valor dado de entrada, ou seja, os diferentes campos de variabilidade que compõem o dado original (modos). A saída L é uma matriz diagonal que representa a contribuição relativa de cada valor de EOF. Dessa forma, a EOF é a matriz de autovetores e L é a matriz de autovalores. Com a matriz L foi possível obter a contribuição percentual de cada EOF, dividindo-se cada valor de L pela soma dos mesmos e multiplicados por 100.

A partir dos maiores valores de L, em porcentagem, foi possível se determinar os campos de variabilidade com as maiores contribuições para a série de dados. Para tanto, se realizou a multiplicação da matriz tsm pela matriz EOF, obtendo-se a matriz de pesos de contribuição (PC) de cada campo (Eq. 15).

$$PC = tsm \cdot EOF \quad (15)$$

A partir da matriz PC foram construídos campos de variabilidade através da multiplicação da matriz EOF pela matriz PC. Como somente as primeiras EOFs são responsáveis por reconstruir grande parte de toda variabilidade dos dados, somente os três primeiros campos (EOF1, EOF2 e EOF3) foram reconstruídos. Para a análise dos dados físicos ambientais é necessário trabalhar com áreas extensas, densas em planos de informações e especializadas. Essa abordagem permitiu uma melhor compreensão das informações contidas na série de dados, bem como a promoção de um efetivo realce da dinâmica dos processos envolvidos.

6.14 DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO FUTURA DA LINHA DE COSTA

A partir dos dados de regressão linear, obtidos pelo conjunto de medidas de taxas médias de erosão e pelo método dos mínimos quadrados, determinou-se a equação de estimativa da posição futura da linha de costa (Eq. 16). Esta estimativa considera taxas erosivas estacionárias (i.e., constantes

temporalmente) para estimativa da nova posição da linha de costa para os anos de 2022, 2032 e 2100. Tendo por base cada ponto da linha de costa, determina-se o ponto futuro, ortogonal a linha presente, e deslocado segundo a taxa de erosão estimada.

$$Linha_{Futura} = 2,229 \times Ano - 4368 \quad (16)$$

6.15 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS SUSCEPTÍVEIS AO PROCESSO EROSIVO

Para a determinação das localidades mais ou menos susceptíveis ao processo erosivo foi realizada uma análise multicriterial através do método *Analytic Hierarchy Process - AHP* (Saaty, 2008) no software *Erdas Image 9.3*[®]. A partir da integração dos dados de recuo da linha de costa entre 1947 e 2012, comportamento dos ventos, altimetria do terreno e tipo de estruturas presentes na costa, foi possível estabelecer quais áreas estão mais propensas à erosão.

O modelo AHP é baseado na variação linear de critérios pré-estabelecidos onde, os parâmetros utilizados foram representados em arquivos do tipo *raster* que abrangem toda a área de estudo. As informações foram quantificadas segundo os critérios da tabela Saaty (Fig. 25) onde, posteriormente foram transformadas em valores numéricos, com seus respectivos graus de importância.

| | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|--|--|--|
| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | | | | |
| Extrema- mente | Muito fortemente | Moderada- mente | Moderada- mente | Igualmente | Moderada- mente | Moderada- mente | Muito fortemente | Extrema- mente | | | | |
| ← Menos importante | | | | | | | | | Mais importante → | | | |

Figura 25: Representação da tabela Saaty. Extraído de Pereira (2005).

Após a reclassificação dos critérios, foi realizado o processo de determinação da constante de suavização (k) de cada critério estabelecido (Eq. 17).

$$Peso = Peso_{\max} \times e^{-K.(raster)} \quad (17)$$

De posse dos pesos de cada critério foi determinada a distribuição de probabilidades segundo os pesos de cada critério (Eq. 18).

$$Probabilidade = \frac{\text{Media ponderada dos critérios}}{\text{Peso de cada critério}} \quad (18)$$

Cada fator foi comparado aos demais por meio de uma matriz (x), a qual leva em consideração a importância relativa para vulnerabilidade ambiental (Pereira, 2005). Os elementos da matriz foram dispostos de modo a indicar o quanto os elementos da linha são mais importantes do que os da coluna, sendo analisada cada comparação de forma isolada.

Através da interpolação dos critérios em uma tabela de cruzamentos (*crosstab*), os novos pesos deram origem a uma segunda distribuição de probabilidades. Estes foram obtidos pela média ponderada dos pesos de cada critério cruzados com o respectivo critério. A probabilidade final do Modelo Locacional AHP Geométrico foi dada pela média aritmética entre a distribuição de probabilidades individuais e as probabilidades obtidas pela *crosstab*, respectivamente.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DO POLÍGONO DE MUDANÇA

Para um melhor entendimento do processo erosivo ocorrido na praia do Hermenegildo é fundamental conhecer a acurácia da metodologia utilizada para o cálculo das áreas erodidas, bem como as taxas de recuo médio da linha de costa. Para a representação tanto da acurácia do método do Polígono de Mudança quanto do método DSAS, o qual foi discutido no estado da arte, foi utilizado o mesmo intervalo temporal de dados, datado entre os anos 2000 a 2011. Os resultados obtidos pelo método DSAS foram disponibilizados por Teixeira (2011), e foram comparados com os dados obtidos pelo método do Polígono de Mudança, para a mesma localidade. Os resultados obtidos pelo método do Polígono de Mudança apresentaram um coeficiente de determinação de 94% ($R^2 = 0,9418$). Esse percentual (Fig. 26) foi obtido a partir de uma regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados, tendo como base a linha de costa da imagem *Quickbird* de 2007 como referência. De 2000 a 2011, a taxa média de recuo da linha de costa, para todo segmento costeiro, foi de 1,76 m/ano.

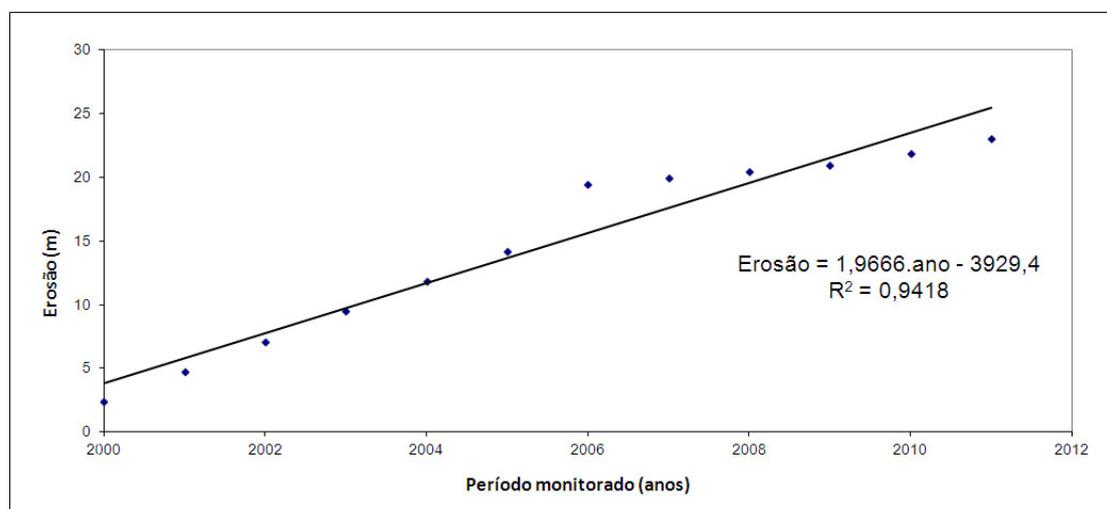


Figura 26: Correlação entre a erosão costeira e o período monitorado, através do método do polígono de mudança.

O maior pico erosivo foi registrado para o período de 2005 a 2006 (5,25 m/ano), o qual é o intervalo onde foi registrada a ocorrência de anomalias térmicas no oceano Atlântico Sul. Em períodos onde essas anomalias se

combinam as condições meteo-oceanográficas e a morfodinâmica (tanto *onshore* quanto *offshore*) específicas da região, estas propiciam a intensificação das frentes, com a atuação de ventos mais fortes incidindo sobre a costa. Esse cenário pode contribuir para um aumento do processo erosivo em virtude de um aumento no nível da água, o qual gera um maior percentual de perdas por erosão.

Os resultados obtidos com o método DSAS, para o mesmo banco de dados, destacam, também, um processo de retrogradação da linha de costa. O coeficiente de determinação foi de 13% ($R^2 = 0,131$) de modo que, o comportamento estatístico apresentado teve um caráter bimodal, assemelhando-se a uma distribuição polinomial de quarto grau. Esse padrão, para o método DSAS, demonstrou comportamentos erosivos em grande parte da localidade estudada, possibilitando identificar, também, áreas de acresção. A taxa de retração média estimada para o DSAS foi de 12,31 m/ano, com picos de 36,81 m/ano para o período entre 2005 a 2006. Estas estimativas não apresentaram um comportamento linear, o que justifica a baixa correlação apresentada pelos dados (Fig. 27).

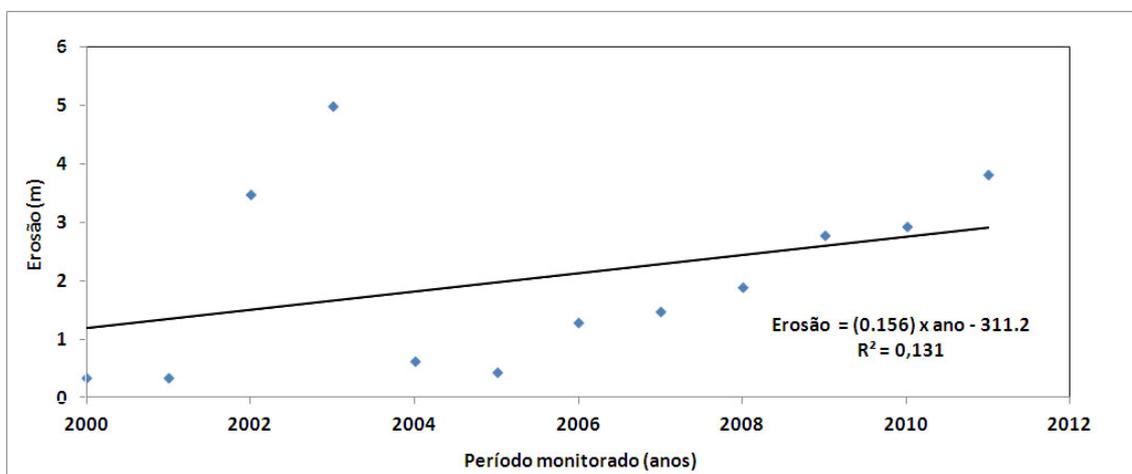


Figura 27: Correlação entre a erosão costeira e o período monitorado, através do método DSAS. Fonte: Dados extraídos de Teixeira (2011).

Thieler & Danfort (1994) discutem que, a determinação das taxas de variação pode ser obtida através de diferentes formas de interpretação da distância entre posições relativas, ao longo de uma costa, em períodos distintos. A utilização de duas linhas de costa distintas, ao invés de uma linha

base arbitrária, como base para uma análise comparativa, tem-se mostrado bastante satisfatória no que diz respeito aos estudos de retração da linha de costa (Smith & Cromley, 2012). A vantagem do uso do método do polígono de mudança se traduz no fato de que essa metodologia não se baseia em uma linha base arbitrária como fonte de medição costeira, não utilizando transectos pontuais equidistantes e pré-determinados. Toda região de variação entre duas linhas de costa é quantificada através da criação de um polígono. Essa abordagem possibilitou construir uma topologia de polígono, a qual representa a diferença total de área entre duas linhas de costa. O cruzamento de duas linhas possibilitou a criação de uma série de polígonos de mudança, os quais representam a diferença total de área entre duas costas. A álgebra entre polígonos, para períodos distintos, permitiu determinar as reais taxas de erosão e acresção do intervalo de tempo analisado.

Ambos os métodos comparados nesse estudo, determinam a variabilidade costeira. Comparativamente, o DSAS é suscetível a determinações equivocadas de erosão ou acresção. Isto ocorre em virtude do método considerar a medida pontual de variabilidade, alocada no posicionamento dos transectos. Caso esses transectos se posicionem em regiões de grande erosão (ou acresção), o resultado apresentado pelo DSAS trará resíduos destas regiões, viciando a estatística final apresentada e seus resultados determinados (i.e., sobrestimativa da erosão para o período de 2005 a 2006). Por outro lado, o método do polígono de mudança, ao considerar toda a área de praia, determina valores médios de erosão e acresção para todo o segmento costeiro considerado. Desta forma, o método do polígono de mudança é mais robusto, por não tendenciar seus resultados com variações pontuais isoladas que não representam o real comportamento da linha de costa.

7.2 VARIAÇÕES DA LINHA DE COSTA EM MESOESCALA

Ao longo de 65 anos, a taxa média de retração da linha de costa, para área de estudo, foi de 1,68 m/ano. Os maiores picos (Fig. 28) foram registrados entre os anos de 1996 a 2000 (6,29 m/ano) e entre 2005 a 2006 (5,25 m/ano). Nos demais intervalos as taxas médias de recuo oscilaram entre 0,11 m/ano e

2,37 m/ano. Para o período de 1947 a 1964, a taxa de recuo médio foi de 0,2 m/ano, o que pode ser atribuído ao ciclo natural de erosão e acresção. Nesse período foram catalogadas as primeiras construções estabelecidas sobre o campo de dunas frontais. De 1964 a 1975 a localidade apresentou um processo de expansão urbana, com quase 2 km de costa já edificadas e, uma taxa de retração média de 0,61 m/ano. Entre os anos de 1975 e 1996 a taxa de recuo médio da linha de costa declinou para 0,41 m/ano. Essa queda na taxa pode ser explicada pelo fato de que a primeira faixa de dunas costeiras já se encontrar edificadas de modo que, a continuidade do processo de expansão da praia do Hermenegildo foi direcionada para o interior do balneário.

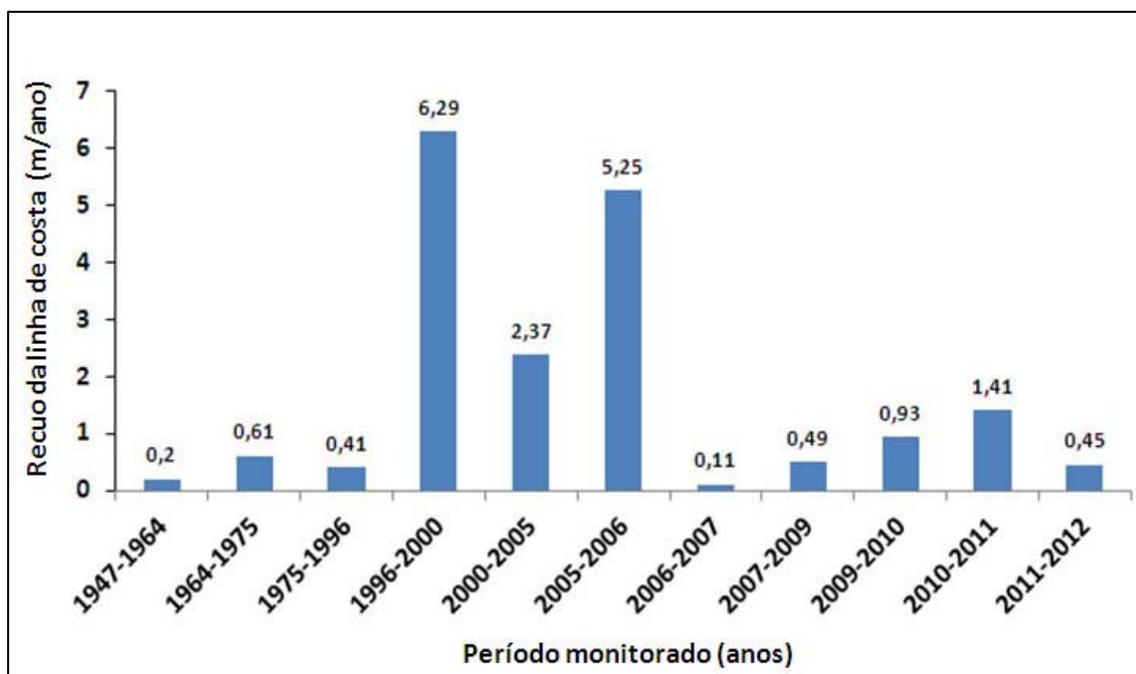


Figura 28: Taxas de recuo da linha de costa entre 1947 e 2012.

A partir de 2006, as taxas de retração média da linha de costa passaram a apresentar valores abaixo de 1,0 m/ano, à exceção do período entre 2010 e 2011 (1,41 m/ano). Os valores de recuo próximos ou acima de 1,0 m/ano registrados para os intervalos de 2009 a 2010 e 2010 a 2011, respectivamente, podem ser atribuídos ao fato de que algumas localidades, ao norte e a ao sul do balneário não apresentarem qualquer tipo de estrutura de contenção à erosão. Em contrapartida, os baixos valores de recuo da linha de costa podem ser justificados pela presença de estruturas de engenharia, as quais foram alocadas sem qualquer tipo de planejamento por parte do município. Estas, no

geral, têm como principal objetivo conter a atuação das marés meteorológicas e o agravamento do processo erosivo. Para dar um maior suporte no diagnóstico de quais áreas estão sendo mais ou menos impactadas pelo processo erosivo, o balneário Hermenegildo foi subdividido em três setores: setor norte, setor central e setor sul (Fig. 29).

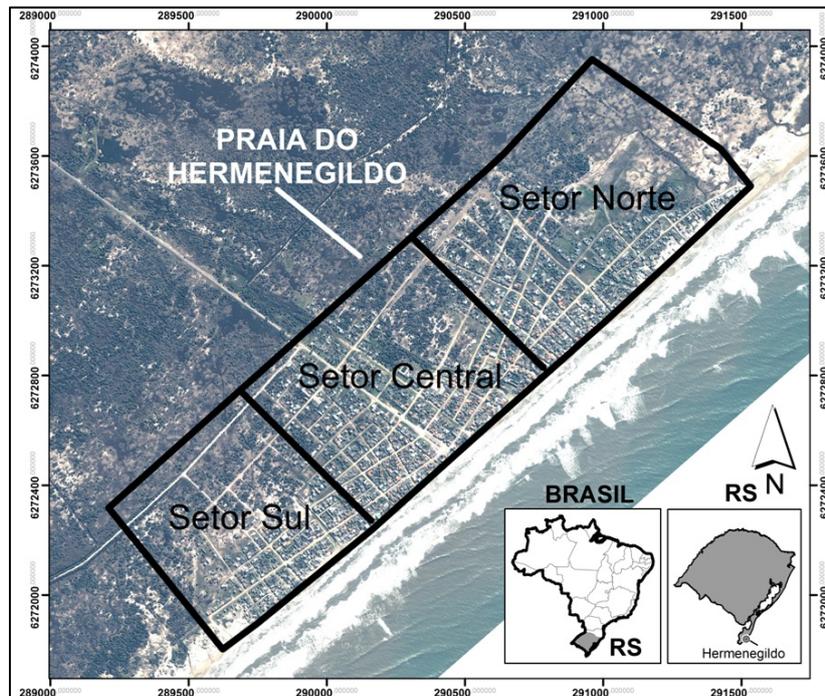


Figura 29: Subdivisão do balneário Hermenegildo em setores.

Os dados de recuo da linha de costa, ao longo de 65 anos entre os setores, mostram que desde 2005, o setor norte vem apresentando as maiores taxas de retração (Fig. 30). Entre os anos de 1996 e 2000, intervalo o qual se registrou o evento extremo mais impactante na costa sul do RS (abril de 1999), foram catalogadas grandes perdas por erosão no setor sul. Dentro do intervalo analisado, outro evento foi catalogado em 21 de julho de 1996 onde, segundo Machado *et al.* (2010), o cenário meteorológico apresentava dois ciclones extratropicais em paralelo um com o outro, representando uma ciclogênese no sul da costa Argentina com uma trajetória de deslocamento para leste (entre $47,5^{\circ}\text{S}$ e $57,5^{\circ}\text{S}$), e uma ciclogênese no sul da costa do Uruguai com uma trajetória de deslocamento também para leste (entre 28°S e 43°S).

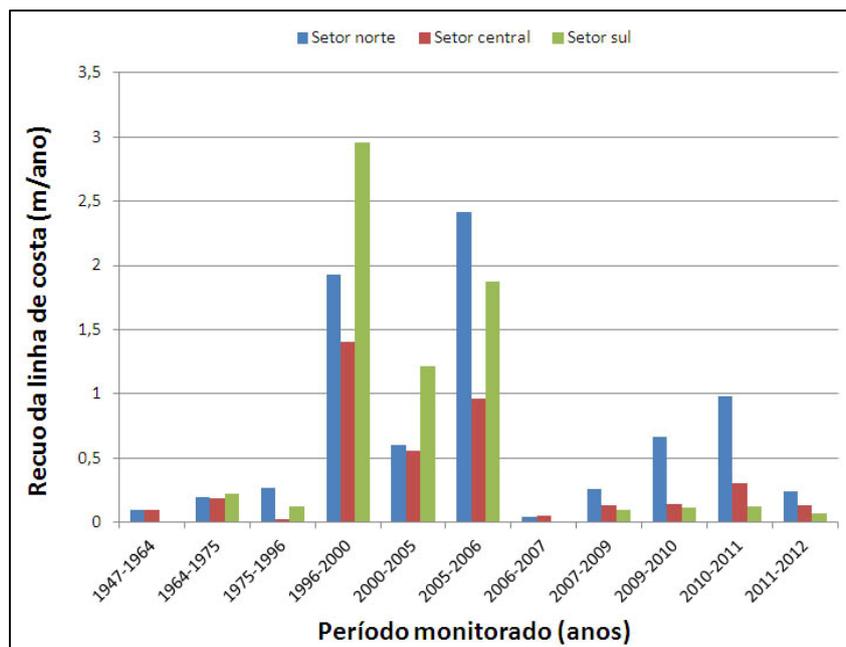


Figura 30: Recuo da linha de costa por setores, entre 1947 e 2012.

Um estudo realizado por Esteves *et al.* (2008), entre 1999 e 2006, com base em seis linhas de GPS, tem demonstrado uma retração da linha de costa de 3,4 m/ano. Entre 16 e 17 de abril de 1999, o impacto de um evento de alta energia foi catalogado por Esteves *et al.* (1999). Após a passagem do evento, Esteves *et al.* (*op cit.*) discutem que 20% das casas à beira-mar e 65% das estruturas de contenção haviam sido parcialmente ou totalmente destruídas. Koerner (2009), utilizando também linhas de GPS, estimou uma taxa de erosão de 1,22 m/ano. Um comparativo entre um perfil realizado em março de 1996 e outro em julho de 2011, feito por Machado *et al.* (2010), demonstram que, na praia do Hermenegildo, houve um déficit sedimentar de 134m³/m.

Von Storch & Woth (2008) destacam que as marés meteorológicas são consideradas como o maior risco geológico em áreas costeiras baixas de modo que, mudanças na elevação do nível médio dos mares e da faixa de atuação das tempestades têm influência na distribuição regional desses perigos. A colocação de estruturas rígidas ao longo do litoral, sem um estudo prévio, contribui para a baixa eficiência das mesmas, podendo agravar o processo erosivo em setores pontuais da localidade estudada.

No contexto geológico, Lima (2008) discute que a linha de costa e as dunas, na praia do Hermenegildo, estão em fase de transgressão a

aproximadamente 6800 anos, de forma que todo o sistema laguna barreira está avançando para o interior do continente. Dillenburg *et al.* (2000), relacionaram o processo de regressão das barreiras as áreas côncavas do litoral, tendo como consequência a erosão de sedimentos da barreira transgressiva presente em áreas convexas. Na porção sul, das projeções costeiras, os sedimentos erodidos se acumulam nas concavidades, promovendo acréscimo da barreira nestas áreas. Em termos de potencial de deriva litorânea, estimado a partir do método do fluxo de energia (U.S Army, 1984) com medições em águas profundas, Lima *et al.* (2001) estimaram, para a praia do Hermenegildo, uma taxa de 2,7 milhões de m³/ano.

Para o extremo sul do Brasil, os eventos de maior elevação do nível do mar, segundo Parise *et al.* (2009), resultam da ação de ventos provenientes de SW que sopram paralelos as principais orientações NE-SW da linha de costa. Esse panorama ocorre em situações onde centros de alta pressão são formados no continente e centros de baixa pressão são formados no oceano. Esses dois centros, interagindo em mesma intensidade, contribuem na criação de uma pista de vento entre os centros de pressão, ocasionando uma queda na pressão atmosférica sobre está pista de vento. Este processo favorece o empilhamento de água na costa em virtude do efeito de Coriolis (i.e. transporte de *Eckman*).

Em geral, as tempestades apresentam marés meteorológicas acima de 1,0 m, com período de pico maior que 12 segundos e altura significativa das ondas maior que 1,5 m. Tozzi (2000) destaca que a ciclogênese gerada ao sul da costa do Uruguai, com deslocamento para leste, é a que causa maior impacto erosivo, em virtude de permanecer mais tempo próxima à costa, gerando um impacto localizado nas praias do extremo sul do Brasil (Fig. 31). Tozzi (*op cit.*) considerou quatro categorias de impacto de acordo com a distribuição dos centros de baixa e condições sinóticas mais representativas. Dentre essas categorias, os ciclones extratropicais de impacto moderado distribuem-se em grandes extensões da costa, com taxas de retirada de sedimentos maiores que 20 m³/m.

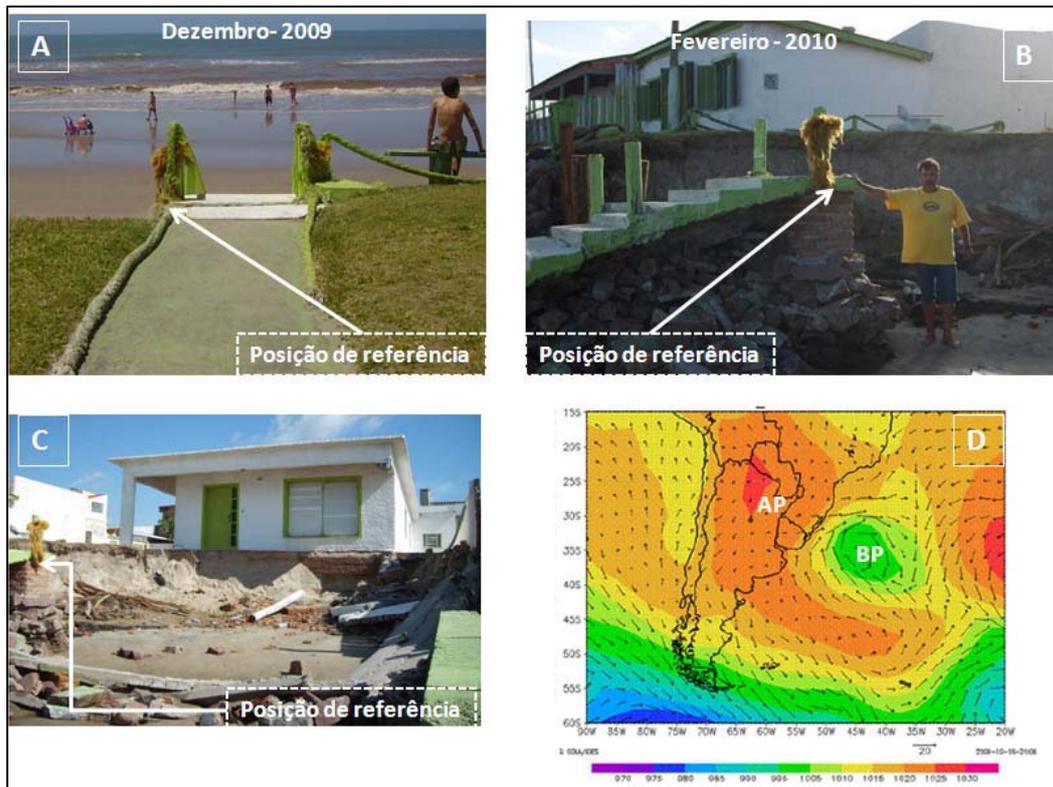


Figura 31: (A, B e C) Destruição ocasionada na parte central do balneário, após a passagem de um evento extremo em fevereiro de 2010; (D) Condição sinótica para o estabelecimento do empilhamento de água na costa (AP: centro de alta pressão e BP: centro de baixa pressão).

7.3 ANÁLISE DOS DADOS DE TSM VERSUS INTENSIDADE DE EL NIÑO

Para um período de 65 anos, a análise feita a partir dos dados de anomalias da TSM, períodos de ocorrência de El Niño e valores médios de retração da linha de costa demonstram que, os períodos onde foram registrados os picos erosivos mais intensos, são coincidentes com os períodos de forte El Niño e os intervalos temporais onde a TSM apresentou temperaturas acima de média. Essa combinação entre TSM e El Niño, em princípio, tem favorecido o processo de intensificação das tempestades no extremo sul do Brasil. Tal afirmação ganha força a partir do momento que é feita uma análise do comportamento da direção e intensidade dos ventos para o período estudado.

Em períodos de coincidência entre anomalias da TSM e El Niño, com predominância de ventos SW no período da passagem de um ciclone, foram registradas as maiores taxas de retração da linha de costa. Levando em consideração toda a série de dados de vento, para os intervalos de maior recuo analisados nesse estudo, observou-se que os ventos do quadrante NE e SW predominam, respectivamente, em 50% e 30% dos dias monitorados, ambos soprando acima da média histórica (3,48 m/s) (Fig. 32). Maia (2011) destaca que, mesmo o vento NE sendo o mais predominante nas praias do extremo sul do RS, são os ventos de SW os mais relevantes no estabelecimento do processo erosivo. Isso ocorre em função da orientação da linha de costa do Rio Grande do Sul (NE-SW), a qual propicia o empilhamento de água na mesma, como resultado do efeito de Coriolis.

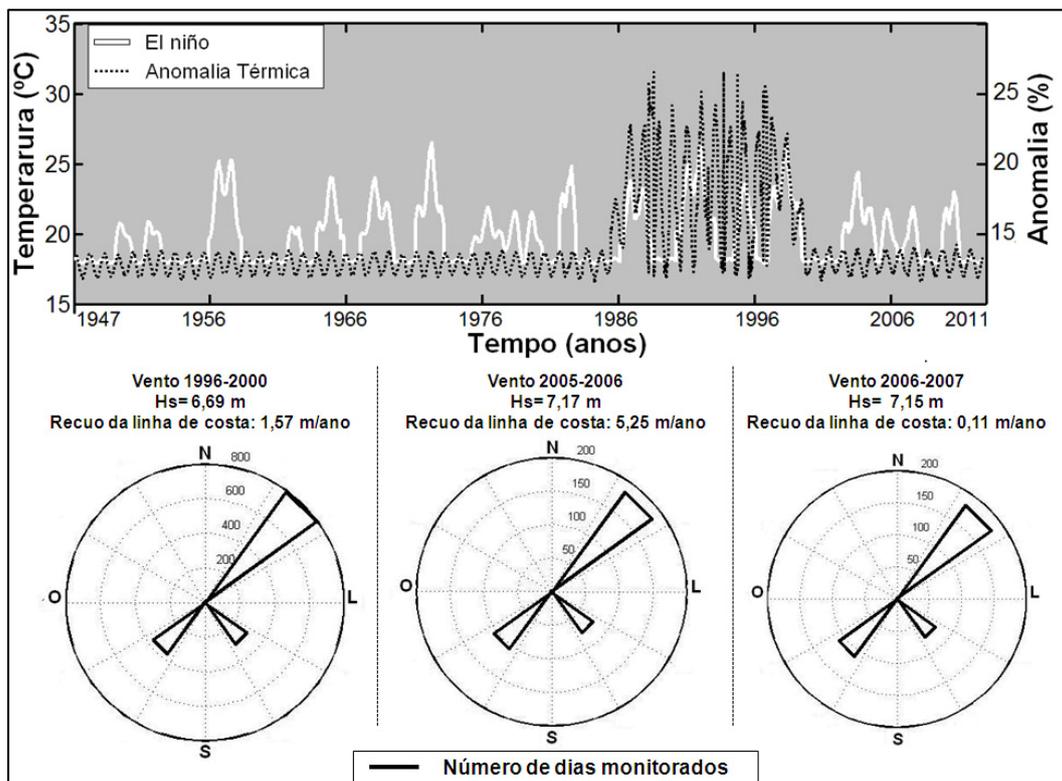


Figura 32: Correlação entre anomalias térmicas, El Niño e ventos em períodos de alta e baixa retração costeira, respectivamente.

Os valores de retração apresentados nesse estudo demonstraram uma relação direta com o comportamento dos ventos. Quando feita a correlação entre os dados de TSM e erosão, para os intervalos analisados, estes apresentaram um $R^2= 0,8041$ (Fig. 33) onde, os maiores recuos observados

ocorreram nos intervalos de 2005 a 2006, com retração de 5,25 m/ano e 1996 a 2000 (6,29 m/ano). Os maiores períodos de pico, apresentados nesse estudo, corroboram com os dados catalogados por Cataldi *et al.* (2010) onde, para o período de 2005 a 2006, entre os meses de janeiro a março, foram registradas anomalias da TSM no oceano Atlântico Sul extratropical, próximo a região da Confluência Brasil Malvinas (CBM). Para a mesma região, um estudo feito por Lentini *et al.* (2001), a partir de uma série de 13 anos de dados de satélite, discutem que a advecção de anomalias para a região sul do Brasil, tende a estar associada à ocorrência El Niño de Oscilação Sul (ENOS) de forma que, as maiores amplitudes são compreendidas entre o Rio da Prata e a Lagoa dos Patos. Os intervalos temporais que compreendem as maiores taxas erosivas, discutidas nesse estudo, corroboram com a catalogação dos maiores eventos extremos incidentes nas praias do extremo sul do Brasil, realizada por Machado *et al.* (2010).

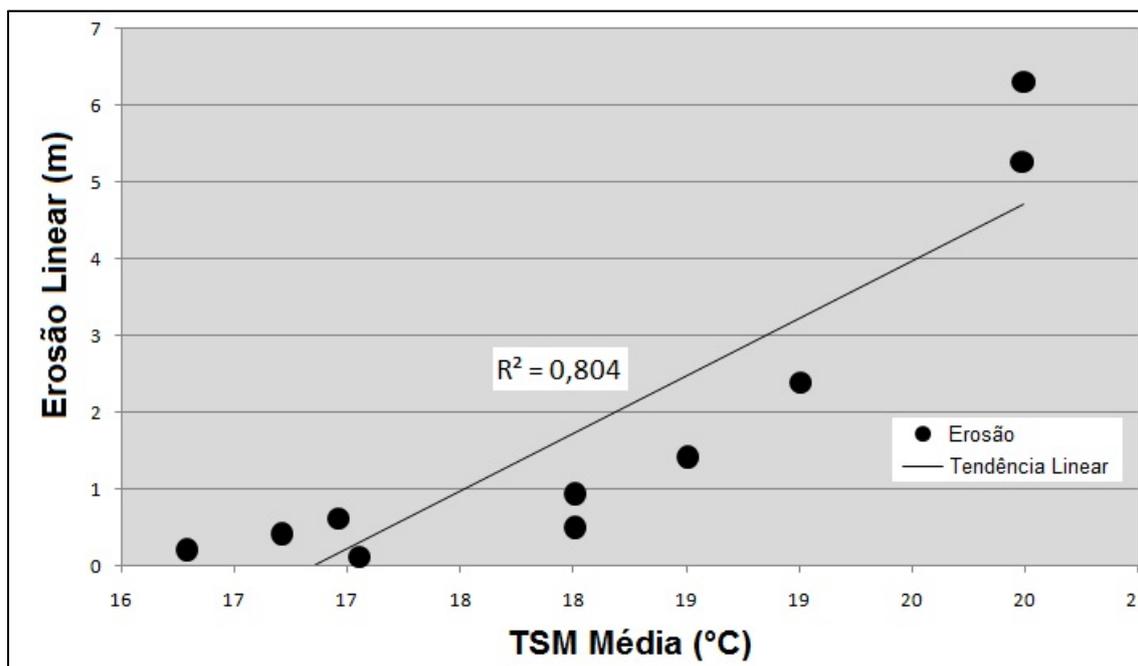


Figura 33: Correlação entre a TSM e as taxas de erosão entre 1947 e 2011.

Evidências do processo de intensificação dos eventos extremos associados a passagem de El Niños e à anomalias ocorridas na temperatura de superfície do mar (TSM), também têm sido catalogadas por Elsner & Kocher (2000) e Goldenberg *et al.* (2001) desde 1995. Para o oeste do Pacífico, Webster *et al.* (2005) têm destacado que a atividade de tufões tem sido

geralmente maior em períodos de El Niño e inferior em anos de La Niña. Anomalias na TSM são evidenciadas a partir de discrepâncias entre a temperatura observada e a média histórica esperada para uma determinada região. Quando a temperatura oceânica encontra-se acima dos valores esperados (anomalia), criam-se condições para formação de frentes oceânicas e atmosféricas.

Para esse estudo, as anomalias da TSM foram obtidas a partir da análise EOF onde, através da função *eigen-problem* do software MatLab®, foi possível obter matrizes de autovalores e autovetores. Para a primeira componente (EOF1) os percentuais de representatividade foram de 70,89%. Para a segunda (EOF2) e a terceira componente (EOF3), os valores percentuais de EOF foram de 19,23% e 8,55%, respectivamente. Os demais valores de EOF considerados apresentaram percentuais muito baixos, não apresentando, dessa forma, uma representatividade para a série de dados. O somatório das três primeiras componentes reconstitui 98,66% da variabilidade total dos dados, de modo a caracterizar bem os períodos de ocorrência de anomalias na série de dados históricos (Fig. 34).

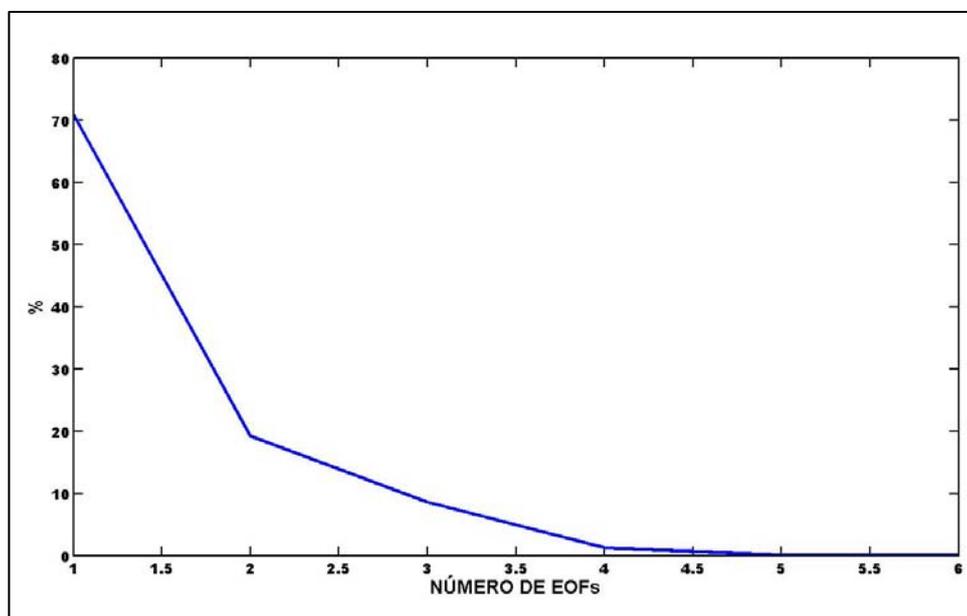


Figura 34: Caracterização dos percentuais de significância para cada componente da EOF.

Estudos realizados por Lippert & Briscoe (1990) e Barros (2008) demonstram que a aplicação de funções ortogonais empíricas, para a análise de dados oceanográficos, tem se mostrado satisfatória. Uma das vantagens da análise EOF, além da grande variabilidade associada aos fenômenos dinâmicos da série, é a separação dos modos de variabilidade, permitindo discriminar fenômenos distintos de variação espaço-temporal de interesse. Para esse estudo, a técnica EOF permitiu isolar as diferentes formas de variabilidade encontradas nos dados de interesse, possibilitando uma melhor associação destas com os fenômenos físicos observados.

Uma análise estatística feita a partir do teste de Mann-Kendall apresentou, para os dados de TSM, uma probabilidade de 99,93% de aumento da temperatura de superfície do mar para ao extremo sul do Brasil (Fig. 35). A série apresenta um caráter crescente, com gradiente médio de aumento da TSM de $0,5^{\circ}\text{C}$. Estudos realizados por Agudelo & Curry (2004) têm demonstrado, também, um aumento de $0,5^{\circ}\text{C}$ na TSM, nos oceanos tropicais, entre os anos de 1970 e 2004.

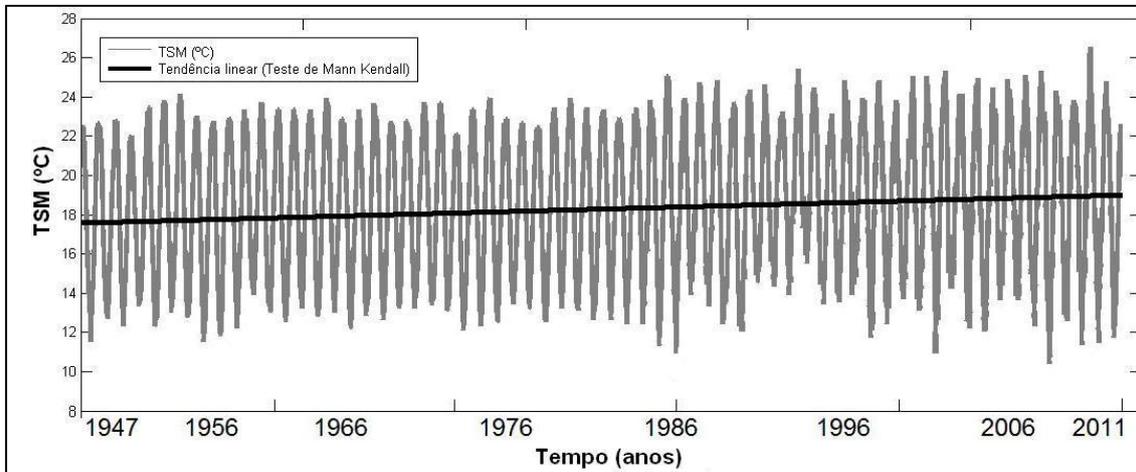


Figura 35: Tendência do aumento da temperatura de superfície do mar para o oceano Atlântico Sul.

A escolha do teste de Mann-Kendall é atribuída ao fato do mesmo ser um teste estatístico não paramétrico, diferentemente da análise Anova, a qual é uma análise do tipo paramétrica. Por ser uma série temporal estacionária, com mais de 30 anos de dados contínuos, os dados de TSM, utilizados no teste de Mann-Kendall, foram analisados com enfoque na tendência da série de dados.

7.4 COMPORTAMENTO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE VENTO E TSM

Uma análise feita com intuito de caracterizar o comportamento da direção e intensidade dos ventos para 65 anos de dados tem demonstrado que, para o período de 1947 a 2011, 50,5% dos ventos incidentes no extremo sul do Brasil são de NE. As demais direções predominantes são SW (25,1% dos ventos incidentes) e SE, com 23,43%. Os dados analisados corroboram com os apresentados por Parise *et al.* (2009), os quais discutem que as direções NE e SW são as mais predominantes para a região sul do Brasil. Pielk Jr. *et al.* (2005) têm discutido que nos últimos 10 anos, as anomalias na TSM passaram a ser mais significativas e mais intensas de forma que, um padrão de ocorrência passou a ser mais bem definido.

O IPCC, em seu relatório, tem discutido que com as mudanças do clima, o Brasil passaria a ter um aumento no número de eventos extremos incidentes em suas praias, principalmente nos litorais sul e sudeste (IPCC, 2007). No entanto, o estudo realizado por Machado *et al.* (2010) destaca, com base nos dados de ondas obtidos do projeto Reanálise da NOAA, que o número de eventos extremos incidentes, com ondas maiores que 6 m, no litoral sul do RS, ao longo dos últimos 30 anos, permaneceu estável. Entretanto, o que se tem de concreto é que em algumas localidades do RS, o processo erosivo vem se intensificando cada vez mais. Na literatura costeira, alguns estudos têm discutido que anomalias positivas ocorridas na temperatura de superfície do mar, em alguns pontos dos oceanos Pacífico e Índico têm intensificado os eventos extremos incidentes em muitos dos municípios costeiros, próximos a estas localidades.

Uma análise da significância estatística da série de ventos, utilizando também o teste estatístico de Mann-Kendall, mostrou que 97,5% da série apresenta uma tendência linear, com caráter crescente de aproximadamente 0,55 m/s em uma década (Fig. 36), e velocidade média dos ventos, para toda a série, de 3,48 m/s. Para períodos de El Niño, Gan & Rao (1991) têm detectado que o outono e o inverno são as estações mais propensas para o estabelecimento de eventos extremos de grande intensidade. Mesmo o vento NE sendo o mais predominante nas praias do extremo sul do Brasil, é o vento

SW que apresenta os maiores impactos no litoral do extremo sul gaúcho, em termos de erosão.

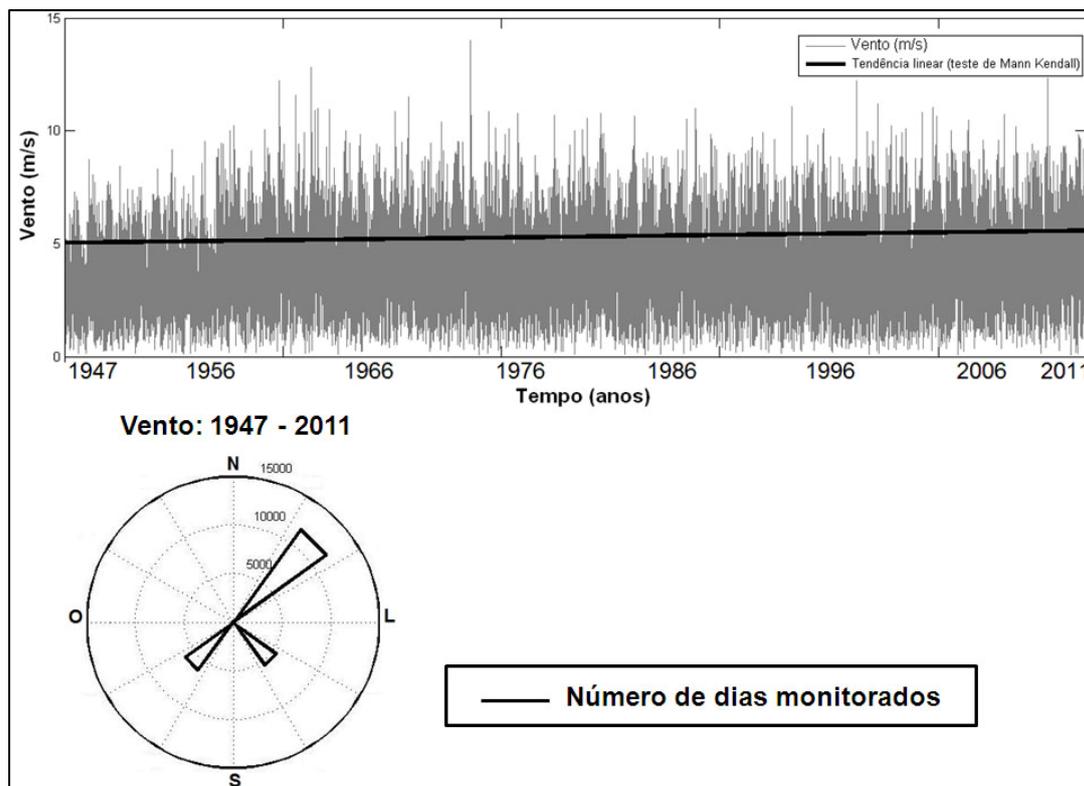


Figura 36: (a) Caracterização da direção e intensidade dos ventos em 65 anos. (b) Gráfico de tendência da direção dos ventos, na costa sul do RS.

Por ser um ambiente localizado na interface oceano-atmosfera, a praia apresenta-se como um local sujeito as interações destes meios. Os fenômenos de ocorrência nesta interface, estabelecidos pelas trocas de calor e regimes de ventos, fazem da praia um local suscetível a mudanças sobre o clima local. Como resultado observável destas mudanças, tem-se a intensificação dos eventos extremos sobre o litoral, provocando alterações nas ondas incidentes na costa e na morfodinâmica local. Para os maiores picos erosivos, os dados de altura significativa das ondas (H_s), obtidos do modelo *Wave Watch III*, apresentaram valores de H_s em torno de 7,17 m, para o período entre 2005 e 2006 e, altura significativa das ondas (H_s) de 6,69 m para o período entre 1996 e 2000.

Para os maiores intervalos erosivos, uma correlação de 76% ($R^2=0,7605$) foi encontrada para os valores de recuo média da linha de costa e

altura significativa das ondas. Quando efetuada a correlação entre a elevação do nível, durante a passagem de uma tempestade, com anomalias na temperatura de superfície do mar (TSM) observou-se que estas não se correlacionam diretamente, no entanto quando analisadas e comparadas separadamente, estas apresentaram variabilidade coincidente para os mesmos intervalos temporais de forma que, no gráfico, quando se identificava uma elevação do nível observava-se também uma elevação na TSM (Fig. 37). Esse comportamento é muito similar ao encontrado por Trenberth (2005), onde é discutida a existência de uma relação não linear entre a TSM e o aumento do nível.

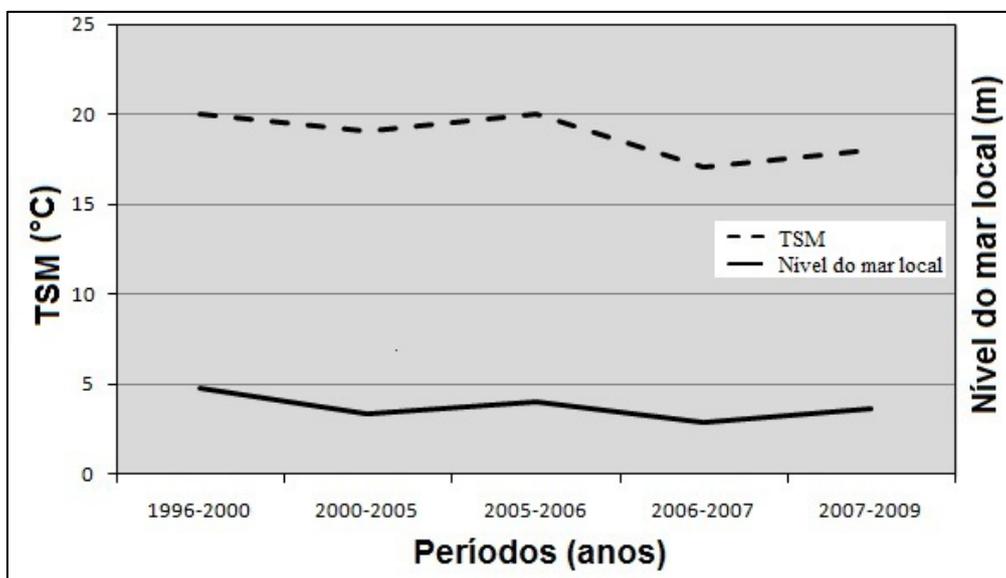


Figura 37: Correlação entre a TSM e o nível, no período monitorado.

O efeito sobreposto de vários eventos de média energia podem produzir respostas morfológicas correspondentes a um único evento de alta energia com um período de retorno longo (Ferreira *et al.*, 2006). Dessa forma, segundo Wrigth *et al.* (1985), o conhecimento das taxas de recuperação de uma praia é tão importante quanto à taxa de erosão, pois representa a mobilidade potencial do perfil praiial. Eventos de maior intensidade são responsáveis por impactos significativos no estoque sedimentar, em virtude de corresponderem a uma escala de alterações muito maior do que a taxa normal de recuperação do ambiente (Komar, 1976). Ao analisar somente a maré meteorológica, Maia (2011) destaca que o vento é responsável por cerca de 85% da elevação do

nível. Dessa forma, a influência das variáveis que afetam a elevação do nível do mar, durante uma maré meteorológica, depende da intensidade das tempestades geradas pela passagem de sistemas frontais (Benavente *et al.*, 2006).

7.5 CARACTERIZAÇÃO DOS PERFIS SAZONAIS

Os perfis sazonais (Fig. 38), coletados entre julho de 2010 e abril de 2012, mensalmente, demonstram que, em termos de variação do pacote sedimentar ao longo do perfil, a localidade estudada apresentou uma tendência de aumento da variabilidade do perfil a partir de 60 m em relação ao referencial de nível (RN). A extensão do perfil médio ficou em torno de 125 m e a variação média do volume ao longo de toda série foi de aproximadamente 103 m³/m.

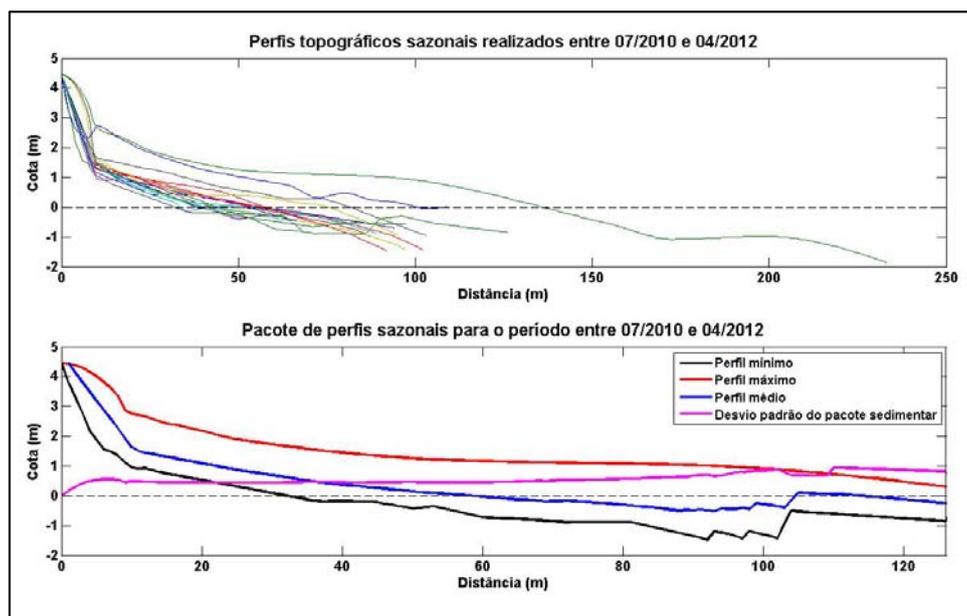


Figura 38: Comportamento dos perfis sazonais realizados entre 07/2010 e 04/2012.

A praia do Hermenegildo é composta de sedimentos finos ($Mz = 2,5 \phi$) e, segundo Calliari & Klein (1993), é classificada no estágio morfodinâmico intermediário com tendência dissipativa, de acordo com os parâmetros sugeridos por Short & Hesp (1982) e Wright & Short (1984). A localidade, segundo Pereira (2005), apresenta baixas taxas de permeabilidade do sedimento, o que leva a crer que a presença de turfas e depósitos lagunares

compactos na localidade aumenta essa impermeabilidade no subsolo praiar, reduzindo a permeabilidade e infiltração da água, o que facilitaria a retirada de sedimentos durante a ação do espraiamento e refluxo que ocorre na face praiar. Na antepraia os sedimentos predominantes são o silte e a argila (Fig. 39) de modo que, o sedimento arenoso existe em quantidades bastante restritas (Camargo, 2012).

Uma análise de dados morfológicos realizada entre 1991 e 1996 por Tozzi (1997) tem demonstrado uma pequena variação da linha de praia, e significativas mudanças no volume sedimentar subaéreo, com retração de 4 m nas dunas frontais. O fato de haver uma transição de perfis intermediários a refletivos e intermediários para dissipativos representa uma predisposição do setor sul da linha de praia ao efetivo processo erosivo de tempestades provenientes de S e SE.

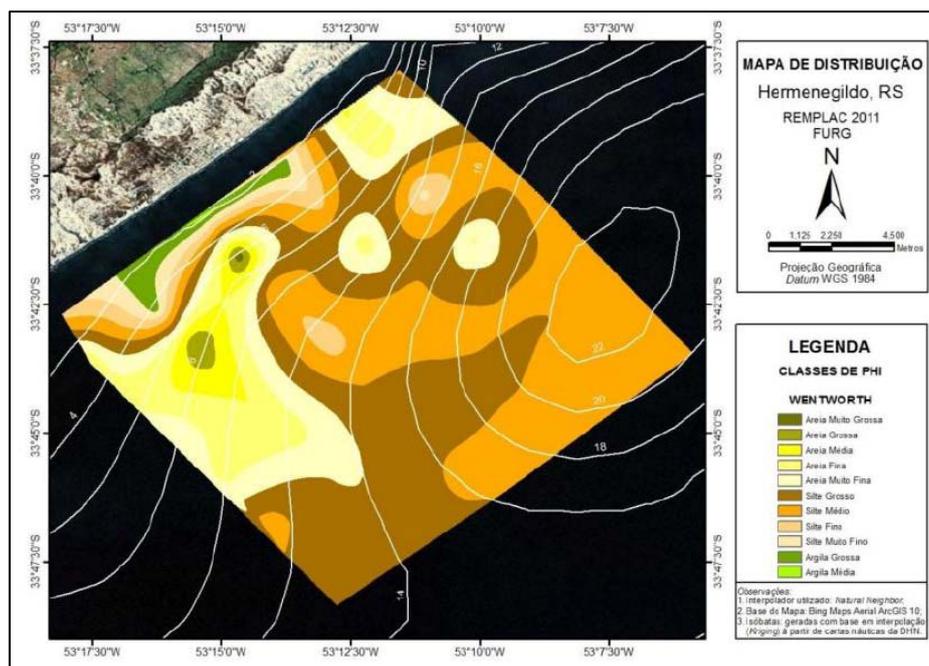


Figura 39: Mapa de distribuição de sedimentos da antepraia, na proximidade da praia do Hermenegildo. Fonte: Camargo (2012).

Um comparativo feito entre os dados obtidos pelo método do polígono de mudança e os perfis de praia, obtidos de trabalhos anteriores destacam que entre os anos de 2000 e 2007, as taxas de recuo médio da linha de costa foram de 1,88 m/ano, com picos de 5,25 m/ano após passagem de marés meteorológicas. Esses valores corroboram com os dados encontrados por

Calliari *et al.* (1998), onde, para o balneário Hermenegildo, foi detectado uma retração entorno de 2 m a 3 m em um único evento de maré meteorológica, sem posterior recuperação da praia.

Bush *et al.* (1999) destacam que os efeitos dos processos costeiros, e seus impactos potencialmente desastrosos, precisam ser considerados na gestão dos municípios costeiros. O conhecimento do comportamento dos perfis topográficos sazonais é fundamental para o conhecimento das taxas de aporte sedimentar no ambiente praial. Dentre os fatores que influenciam no processo erosivo foi observado que, a configuração regional da faixa costeira, bem como as características naturais da antepraia (presença de bancos arenosos ou rochosos) pode influenciar na chegada, distribuição e dissipação de energia no litoral. Para a praia do Hermenegildo, uma configuração na topografia da antepraia, a qual funciona como lentes batimétricas, provoca um processo de refração das ondas gerando um foco estável dos raios de energia das ondas em frente ao balneário (Speranski & Calliari, 2006). Localidades onde as bermas se apresentam amplas e bem definidas têm uma maior probabilidade de serem estáveis. No caso da praia do Hermenegildo, a inexistência de uma berma bem como a fixação do campo de dunas pelas estruturas de engenharia, faz da localidade um ambiente instável ao processo erosivo.

7.6 VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA EM MICROESCALA

Para uma análise em microescala (período compreendido entre 30/09/2011 a 30/06/2012), os valores de retração média da linha de costa oscilaram entre 0,066 m e 0,57 m (Fig. 40). Os maiores picos de retração foram observados nos meses de novembro de 2011 e janeiro de 2012.

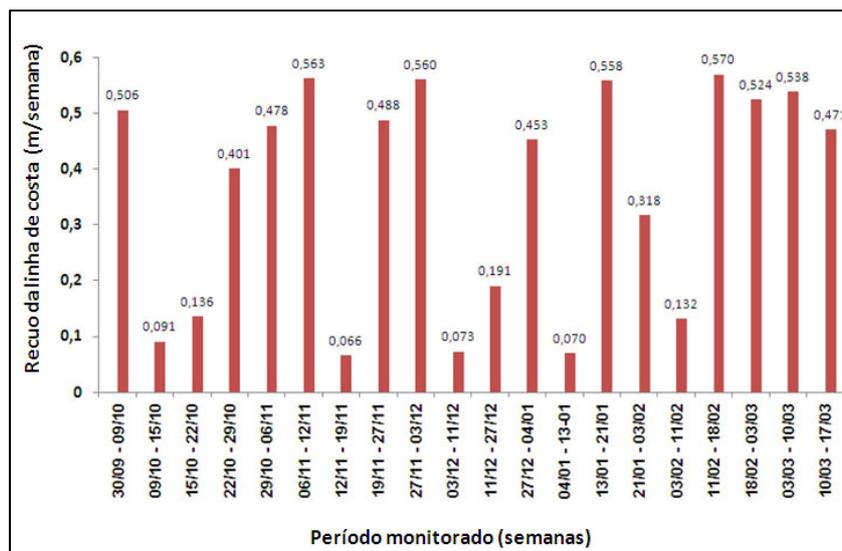


Figura 40: Variações da linha de costa entre 30/09/2011 e 30/06/2012 obtidas com GPS geodésico.

Quando efetuada a análise dos perfis topográficos, mês a mês, temos que em outubro de 2011 (Fig. 41), o perfil apresentou uma baixa variabilidade entre os dias 09/10 e 22/10. As direções do vento, para esse período, foram predominantemente de NE, seguidas de SE. No entanto, para o intervalo entre 22/10 e 29/11, o perfil apresentou uma grande perda de sedimentos, em volume, de 20,80 m³/m, um rebaixamento do pacote sedimentar, em altitude, de 0,47 m e predominância do vento NE.

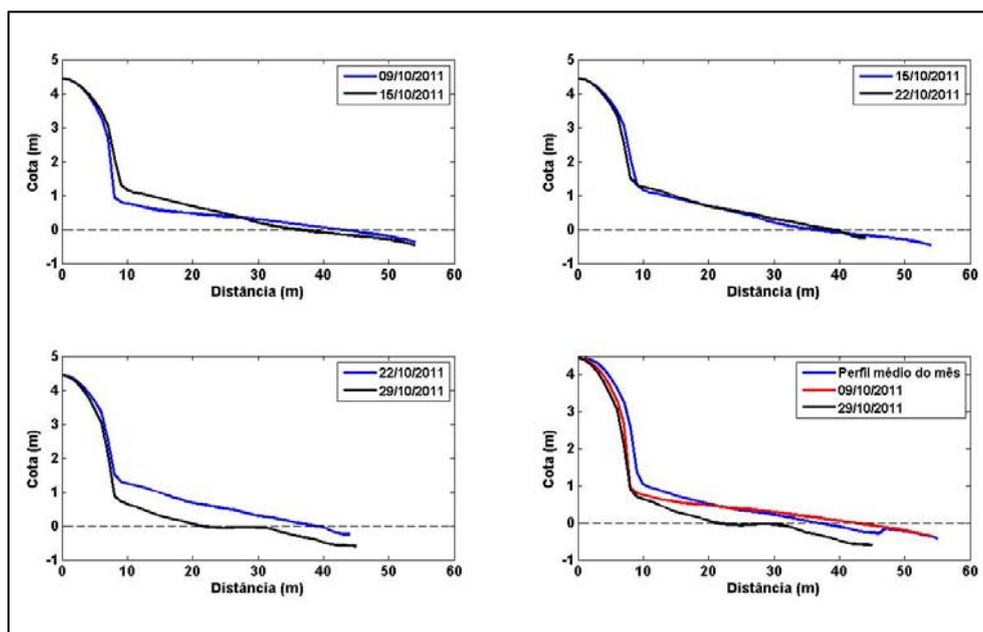


Figura 41: Perfil topográfico realizado entre 09/10/2011 e 29/10/2011.

No mês de novembro/2011 (Fig. 42), a variação de volume sedimentar se manteve praticamente estável com um grande aporte de sedimentos entre os dias 06/11 e 19/11 ($35,43 \text{ m}^3/\text{m}$), e uma perda de $36,36 \text{ m}^3/\text{m}$ de material ao longo do perfil registrada entre 19/11 e 27/11. O déficit do pacote de sedimentos do perfil, para o mês, foi um rebaixamento de $0,527 \text{ m}$ do terreno. Para as duas primeiras semanas de novembro, onde foram detectados períodos de acresção, a direção predominante dos ventos foi de NE, seguida de SE. Na última semana de novembro, os ventos foram predominantes de NE.

Em dezembro de 2011 (Fig. 43), o pacote de perfis apresentou um ganho de $59,02 \text{ m}^3/\text{m}$, com uma elevação média do terreno de $0,627 \text{ m}$. Para o período monitorado o vento predominante foi de SW. Nos primeiros intervalos analisados foi observado que o vento SE é o que tem reconstituído o perfil da porção central do balneário (localidade da estatua de Iemanjá). Em contrapartida, os ventos provenientes de NE tem sido responsáveis por retirar os sedimentos depositados na região central do balneário.

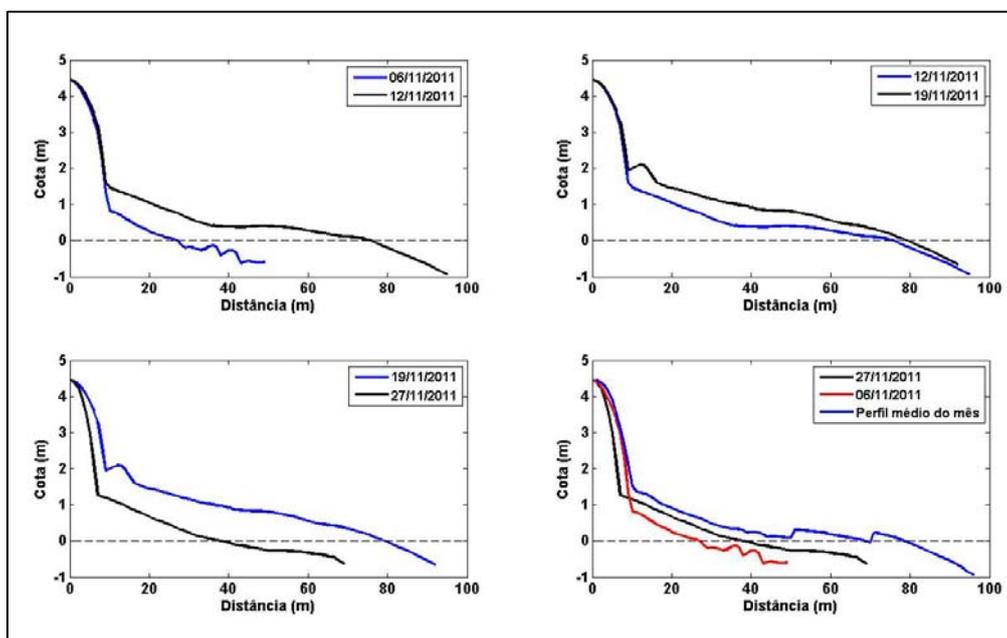


Figura 42: Perfil topográfico realizado entre 06/11/2011 e 27/11/2011.

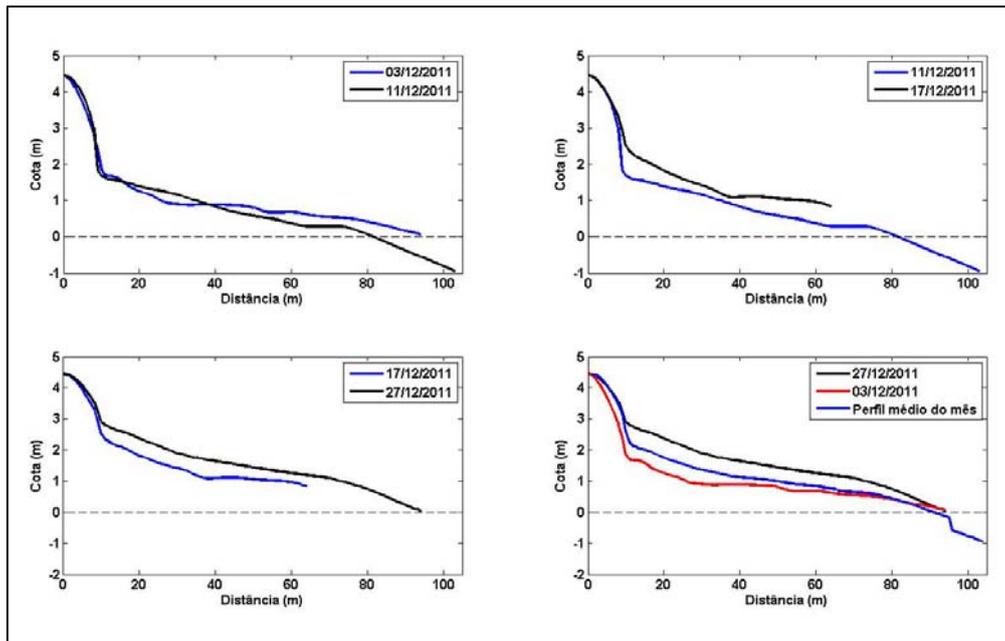


Figura 43: Perfil topográfico realizado entre 03/12/2011 e 27/12/2011.

Em janeiro de 2012 (Fig. 44), para o intervalo entre 04/01/2012 e 13/01/2012, o perfil apresentou uma redução discreta do pacote sedimentar de $47,12 \text{ m}^3/\text{m}$. Entre 13/01/2012 e 25/01/2012, o perfil ficou praticamente estável, com um ganho de sedimentos de $10,51 \text{ m}^3/\text{m}$ e, entre 25/01/2012 e 30/01/2012 uma redução de $78,30 \text{ m}^3/\text{m}$ com rebaixamento de $1,3\text{m}$ do terreno foi identificada, caracterizando o perfil como de erosão. Nos períodos onde o perfil permaneceu estável, os ventos predominantes eram de SE e, na última semana de janeiro, o vento predominante era de NE. Em fevereiro (Fig. 45), o perfil ficou praticamente estável, com um ganho de $7,49 \text{ m}^3/\text{m}$ entre 03/02 e 18/02, e perdas de $6,88 \text{ m}^3/\text{m}$ entre 18/02 e 03/03.

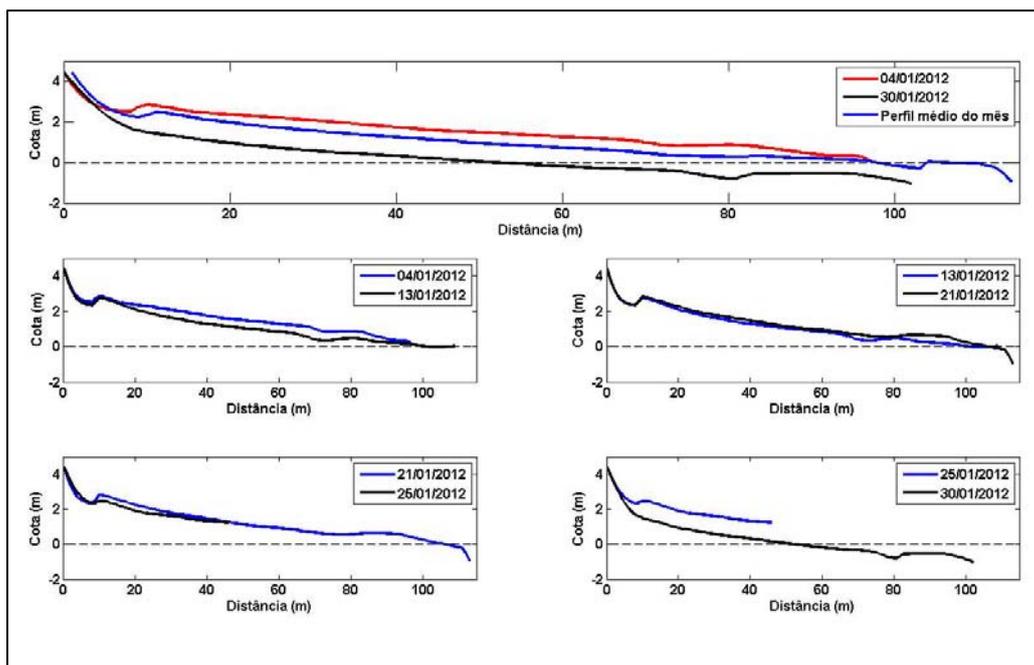


Figura 44: Perfil topográfico realizado entre 04/01/2012 e 30/01/2012.

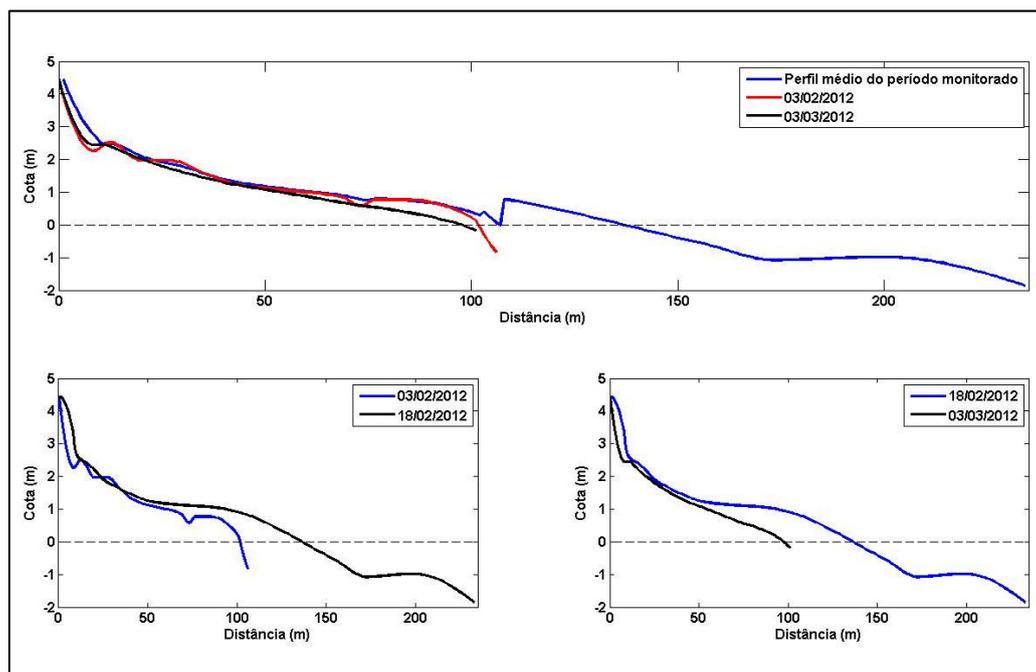


Figura 45: Perfil topográfico realizado entre 03/02/2012 e 03/03/2012.

É importante destacar que os valores aqui apresentados são estabelecidos apenas para a localidade da estátua de Iemanjá, porção central do balneário. Contudo, esses dados servem de subsídios para geração de estimativas das variações do pacote de sedimentos na praia do Hermenegildo. Para os períodos de 22/10 a 29/10 e 19/11 a 27/11, onde o vento NE foi

responsável pela erosão do perfil, na porção central do balneário, as linhas de retração obtidas com GPS não apresentaram uma alta taxa de retração, em comparação com os demais levantamentos. Dessa forma, levando em consideração os demais setores, o vento NE não tem uma grande ação erosiva sobre os setores norte e sul.

7.7 CARACTERIZAÇÃO DA POSIÇÃO DA LINHA DE COSTA FUTURA

Utilizando-se do método estatístico dos mínimos quadrados (MMQ), a partir de dados de retração da linha de costa em 65 anos, foi possível estimar, para a praia do Hermenegildo, a posição futura da linha de costa. Tendo como base o levantamento realizado no ano de 2012, a linha de costa apresentou uma retração linear de caráter crescente, onde os maiores picos de crescimento foram registrados entre 1996 e 2005. Para os dados de recuo da linha de costa, o método dos mínimos quadrados apresentou uma acurácia de 86% (Fig. 46).

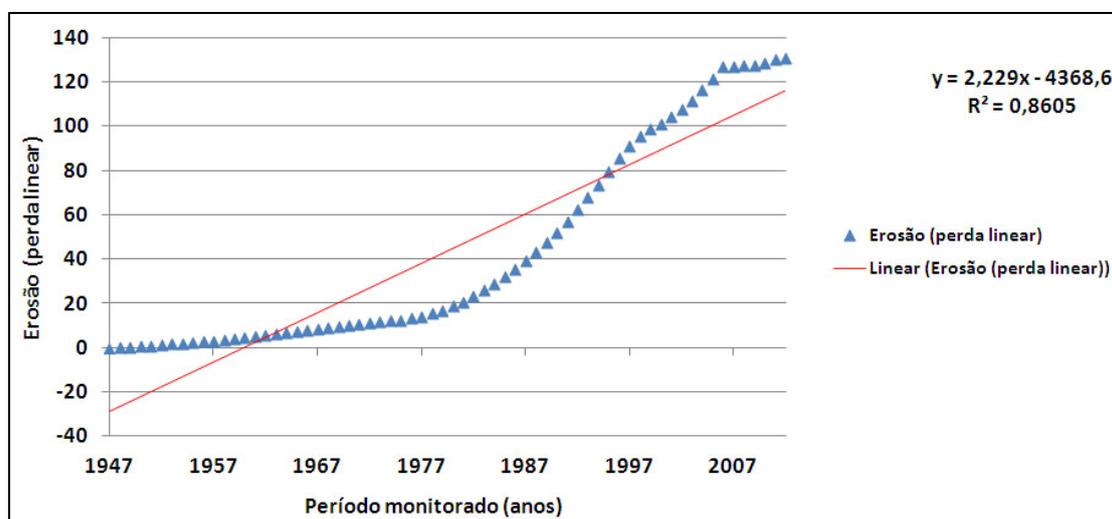


Figura 46: Tendência do processo erosivo entre 1947 e 2012.

Uma previsão da posição futura da linha de costa é de fundamental importância para o planejamento do crescimento urbano do balneário Hermenegildo de modo que, as futuras construções não venham a sofrer problemas por conta da ação das tempestades. Para os próximos 10 anos, segundo análise estatística MMQ dos dados de erosão entre 1947 e 2012, a

linha de costa tende a apresentar um recuo de 8,18 m. Para 2022, segundo o MMQ, a linha de costa apresentou uma tendência de recuo de 22,29 m e, para o ano de 2100, a linha de costa futura apresentou um recuo de 151,57 m em relação a linha base de 2012 (Fig. 47; Anexo I).

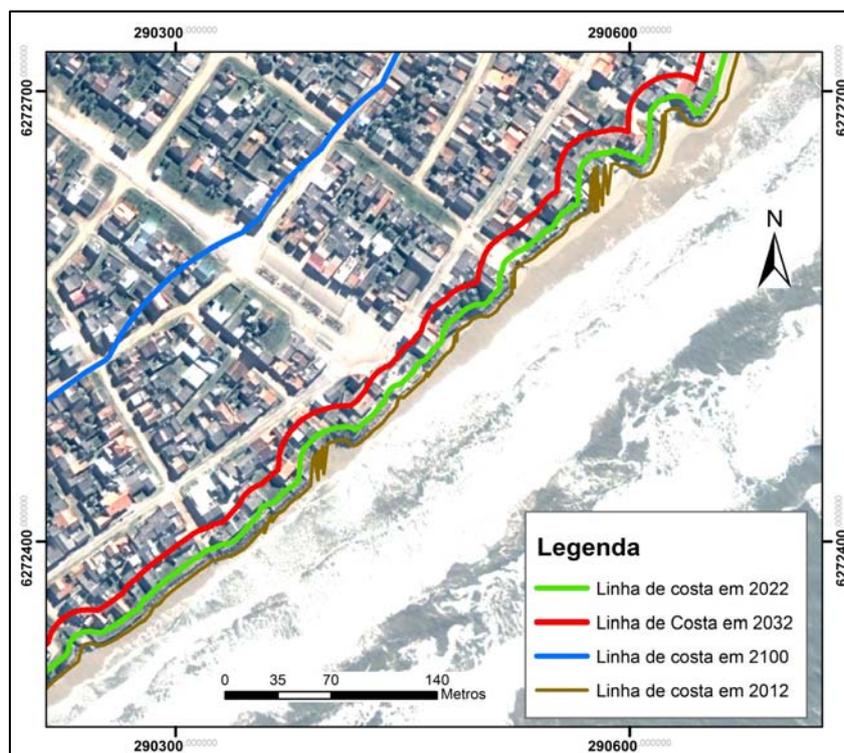


Figura 47: Posições das linhas de costa futuras em 2022, 2032 e 2100, obtidas a partir do método dos mínimos quadrados. Fonte: elaborado pelo autor.

Um estudo realizado por Figueiredo (2011) usando o enfoque do modelo *Shoreface Translate Model* (STM) para o litoral do RS tem discutido que, para a praia do Hermenegildo, a previsão de recuo da linha de costa para o ano de 2030 é de aproximadamente 250 m em direção ao continente e, para o ano de 2100 esse recuo é de 1.150 m (Fig. 48). Essas previsões foram obtidas a partir do modelo STM e abrangem uma área que vai desde o Chuí até a metade sul da Lagoa Mangureira. Os dados utilizados na modelagem das previsões são provenientes de levantamentos com GPS, ao longo de toda costa do RS e dados coletados na antepraia. Levando em consideração a escala de trabalho utilizada por Figueiredo (*op cit.*) em comparação ao tamanho da área abordada nesse estudo, as diferenças apresentadas nas previsões obtidas para os anos

de 2030 e 2100 podem estar associadas ao fato do modelo STM não considerar as obras de engenharia presentes na costa.

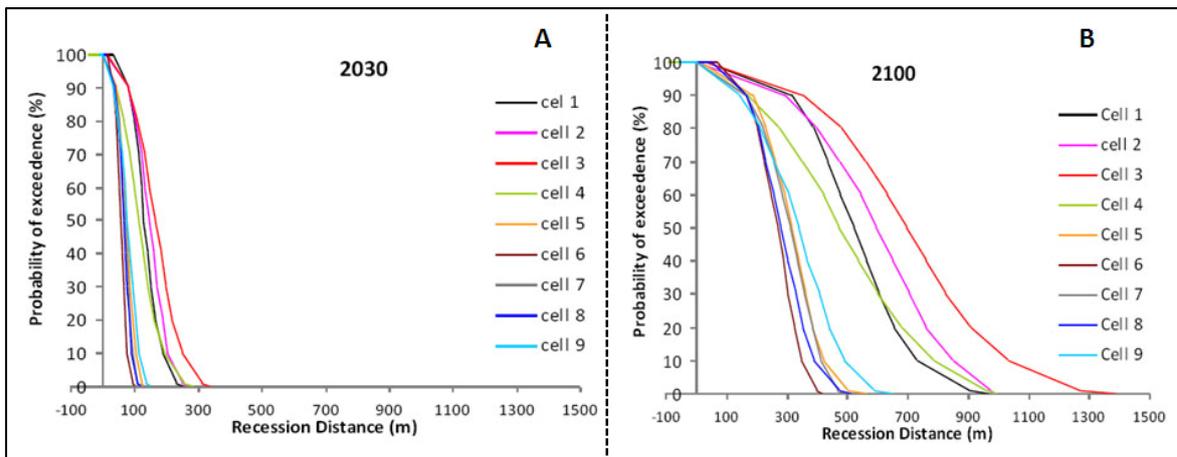


Figura 48: Resultados da simulação da previsão da linha de costa (cel. 1), para os anos de 2030 e 2100, na região compreendida entre o Chuí e a metade sul da Lagoa Mangueira. Extraído de Figueiredo (2011).

Em termos de ordenamento e gerenciamento do espaço costeiro, o conhecimento da posição futura da linha de costa torna-se uma importante ferramenta para que se possam implantar ações de planejamento, e recuperação de municípios afetados pela erosão. Em geral, iniciativas relacionadas à contenção do processo erosivo são de caráter local e motivadas por situações de crise, predominando a construção de obras costeiras rígidas, em geral efetuadas sem estudos prévios e análise de impactos ambientais, não havendo, também, um monitoramento após sua conclusão (Souza, 2009; 2009a).

Para a praia do Hermenegildo, uma das principais causas do processo erosivo está associada à má utilização da costa, mais especificadamente do espaço de resposta da praia diante das tempestades. Ao longo da orla diferentes tipos de estruturas costeiras puderam ser identificadas (Fig. 49), sendo que estas têm respostas diferentes ao impacto de eventos extremos incidentes na costa.

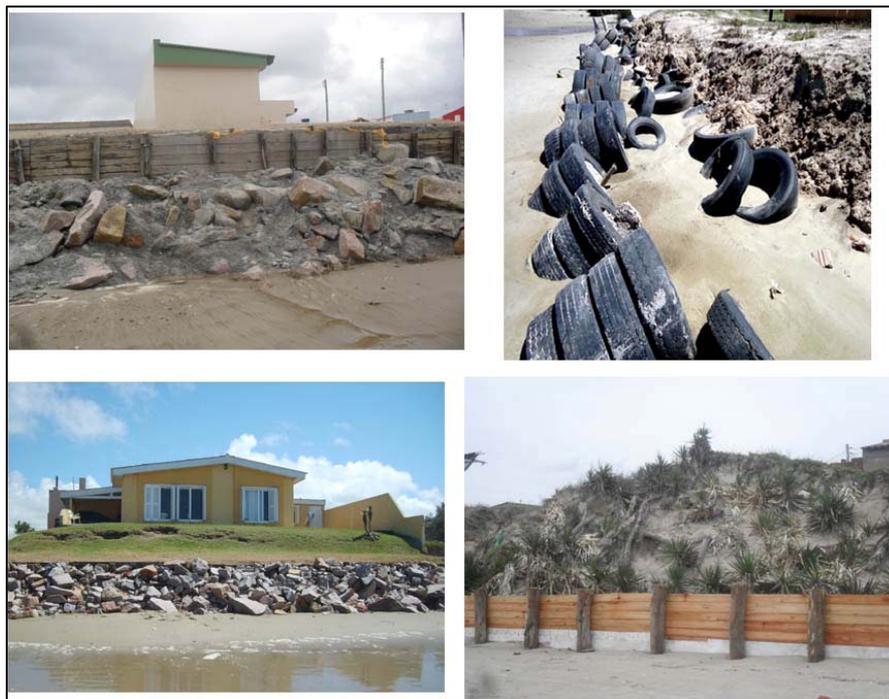


Figura 49: Diferentes tipos de estruturas utilizadas para a proteção da linha de costa.
Fonte: Arquivo pessoal.

Um estudo realizado por Koerner (2012), tendo por base as informações disponibilizadas no Plano de Manejo de Dunas de Santa Vitória do Palmar, demonstra que em termos de risco socioambiental, o setor norte da praia do Hermenegildo é que se apresenta mais suscetível ao processo erosivo (Fig. 50). Os resultados levaram em consideração além do limite de 300 m em relação à linha de preamar, as áreas urbanizadas e as localidades que apresentavam presença do campo de dunas. Os resultados apresentados por Koerner (*op cit.*) corroboram com os levantamentos de alta frequência, realizados entre outubro de 2011 e março de 2012, e com os levantamentos sazonais da posição da linha de costa, obtidos entre os intervalos de 2000 a 2012. Em ambas as escalas de trabalho, o setor norte foi identificado como sendo o que apresentava as maiores taxas de retração, bem como as maiores perdas sedimentares.

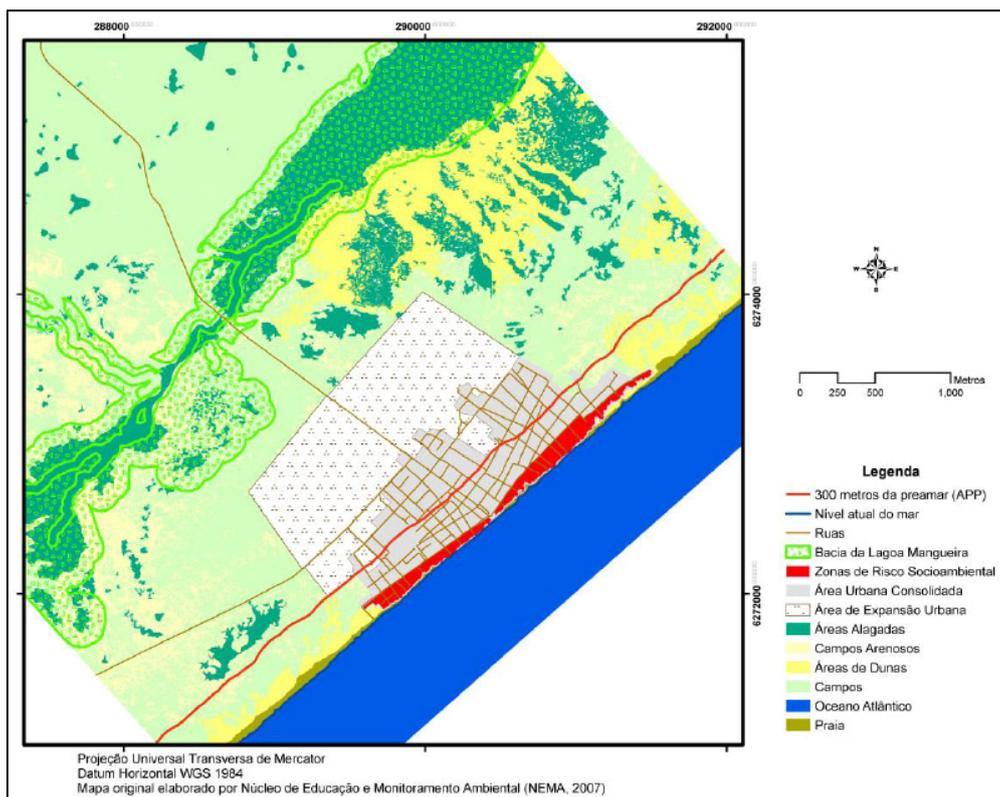


Figura 50: Área de expansão urbana e risco socioambiental proposto no Plano de Manejo de Dunas de Santa Vitória do Palmar. Fonte: Extraído de Koerner (2012).

Tendo por base fatores relacionados à altitude do terreno, padrão dos ventos incidentes na localidade em 65 anos, taxas de recuo da linha de costa entre 1947 e 2012 e os tipos de estruturas presentes na orla, foi realizada uma análise multicritérial para caracterizar as localidades com maior e menor suscetibilidade ao processo erosivo. Os resultados da análise (Fig. 51; Anexo II) demonstram, também, que o setor norte é o mais suscetível à erosão (zonas destacadas em vermelho) de forma que, dentro desse setor duas áreas se destacam: a primeira próxima ao setor central e a segunda mais ao extremo norte do balneário, a qual é caracterizada por dunas escarpadas (Fig. 52).

Os levantamentos de alta frequência e registros fotográficos realizados ao longo da orla (Fig. 53) têm comprovado que, o extremo norte do balneário tem tido grandes perdas sedimentares. Dessa forma, a partir das taxas de erosão, obtidas ao longo de 65 anos, bem como através do produto cartográfico gerado nesse estudo, um futuro processo de expansão do balneário teria que ser revisto. O mapa de probabilidades ao processo erosivo, obtido nesse estudo, poderá servir como ferramenta norteadora para os

gestores municipais, no que diz respeito ao processo de expansão urbana bem como o estabelecimento de novas construções em localidades que não venham a estar vulneráveis aos efeitos do processo erosivo.

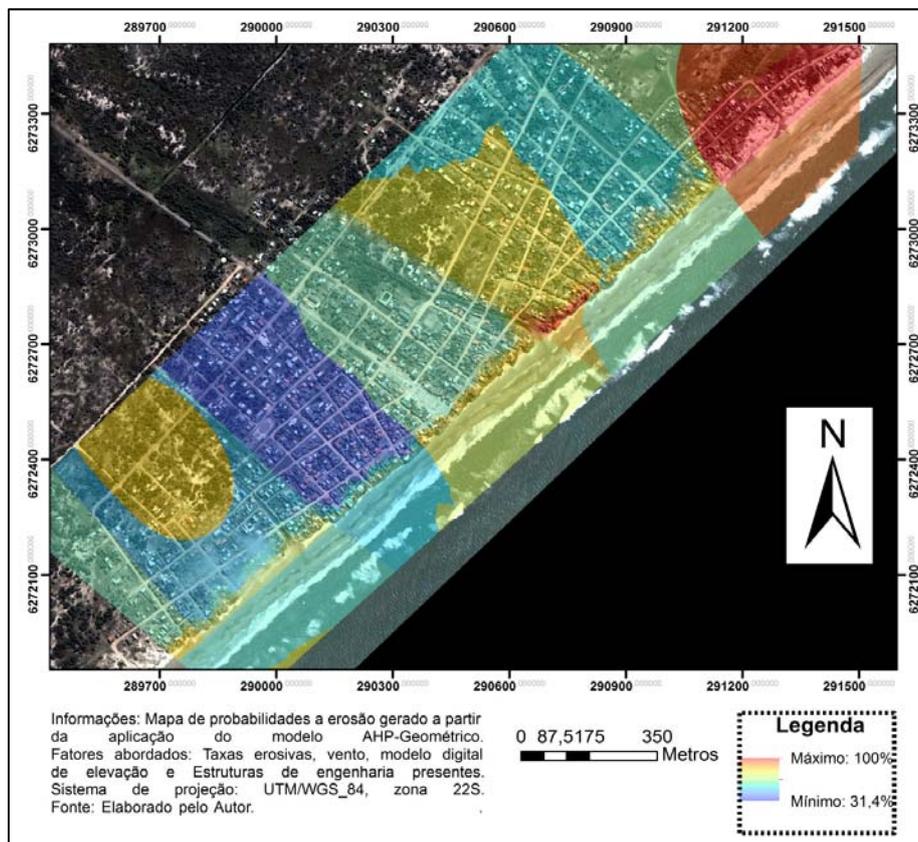


Figura 51: Mapa de probabilidades a erosão gerado a partir do método AHP Geométrico. Fonte: Mapa elaborado pelo autor.



Figura 52: Processo de erosão ocorrido no extremo norte do balneário Hermenegildo entre o período de 2009 e 2011. Fonte: Extraído de Koerner (2012).

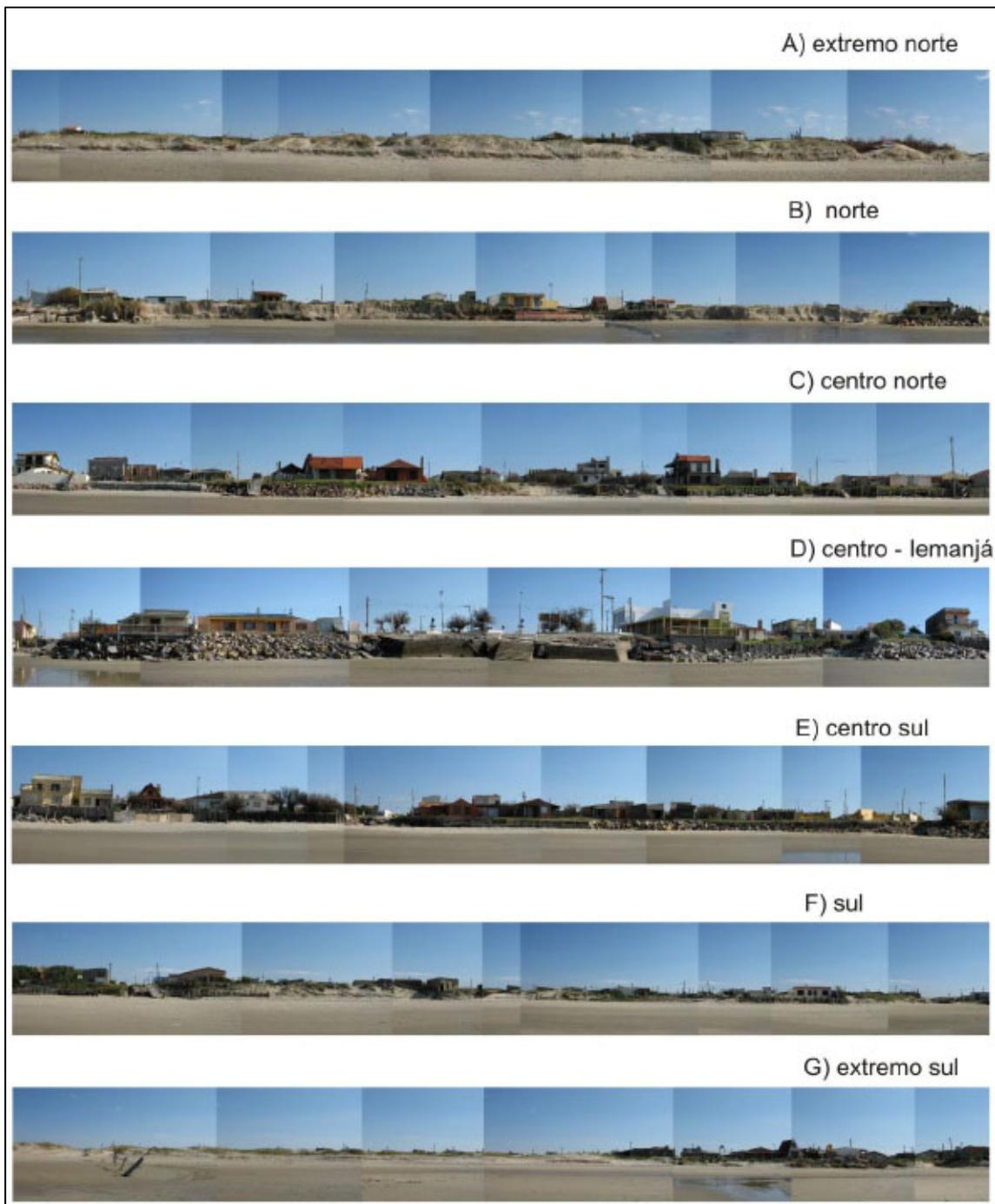


Figura 53: Mosaico de fotos de diferentes trechos da orla do balneário Hermenegildo no dia 28 de agosto de 2009 (fotos e mosaicos: Ulisses Oliveira). Extraído de Koerner (2009).

8. CONCLUSÕES

No contexto do monitoramento costeiro, os efeitos causados pelos processos naturais devem ser analisados e quantificados com o intuito de avaliar se esses processos ocorreram em todo segmento costeiro ou em áreas pontualmente suscetíveis ao processo erosivo. Aspectos relacionados ao processo de recuperação do ambiente, após esses eventos extremos, devem ser levados em conta, de modo que seja possível avaliar se a área apresenta perfis de acumulação e erosão, ou somente o processo erosivo, o que levaria a redução real do volume de sedimentos ao longo do tempo.

Tanto o método DSAS, citado e com resultados usados nesse estudo, quanto o método do polígono de mudança, efetivamente utilizado na pesquisa, determinam a variabilidade costeira. Comparativamente, o DSAS é suscetível a determinações equivocadas de erosão ou acreção. Isto ocorre pelo fato do método considerar a medida pontual de variabilidade, alocada no posicionamento dos transectos. Caso esses transectos se posicionem em regiões de grande erosão (ou acreção), o resultado apresentado trará resíduos destas regiões, viciando a estatística final apresentada e seus resultados. Por outro lado, o método do polígono de mudança, ao considerar toda a área de praia, determina valores médios de erosão e acreção para todo o segmento costeiro considerado. Desta forma, o método do polígono de mudança é mais robusto, por não tendenciar seus resultados com variações pontuais isoladas que não representam o real comportamento da linha de costa.

Embora ambos os métodos apresentados nesse estudo tenham seus adjetivos e limitações, o método do polígono de mudança, é o método mais indicado para áreas que apresentam uma linha de costa não homogênea (as quais apresentam presença de cúspides e reentrâncias costeiras). Esse se mostra o mais apropriado para avaliar o processo erosivo ocorrido na praia do Hermenegildo. Este método não só permite obter as taxas de variação linear da linha de costa, como estima as áreas erodidas e acrescidas, na sua totalidade, o que caracteriza um importante parâmetro para o estudo da dinâmica de praias. A maior robustez deste método ficou evidenciada com a comparação

dos coeficientes de determinação estatística do DSAS e do polígono de mudança ($R^2_{DSAS} < R^2_{change\ polygon}$), onde o DSAS acaba mascarando os resultados em virtude da utilização de transectos distribuídos homoganeamente, enquanto que o polígono de mudança firma-se como o método mais apropriado para a análise de variações de linhas de costa não homogêneas.

Em relação às anomalias da TSM e o fenômeno El Niño, os resultados apresentados nesse estudo destacam uma forte correlação existente entre esses fenômenos. Pode-se observar que a ocorrência do fenômeno El Niño, sobreposto às anomalias térmicas na temperatura de superfície do mar (TSM) local, em condições de vento SW, geram uma intensificação da ação dos eventos extremos, que incidem nas praias do extremo sul do RS, tendo como consequência uma subida do nível do mar na localidade. Para esse estudo, em períodos posteriores a ocorrência do conjunto de eventos El Niño-anomalia, foi observada as maiores taxas de retração da linha de costa na praia do Hermenegildo. A orientação da linha de costa do Rio Grande do Sul (NE-SW) favorece o empilhamento de água na costa de modo que, mesmo o vento NE sendo o mais predominante nas praias do extremo sul do RS, são os ventos de SW os mais relevantes no estabelecimento do processo erosivo.

Considerando a EOF como sendo uma técnica matemática-estatística, a mesma reduz a redundância dos dados ao descartar os demais componentes não representativos. Os resultados da decomposição podem ou não ter sentido físico, sendo recomendado o cuidado nas conclusões obtidas a partir desta análise e sendo necessário o conhecimento das variáveis que compõem o problema de interesse. O uso de Funções Ortogonais Empíricas, para a análise de séries temporais espacializadas, se mostra satisfatória à medida que propicia a determinação do quanto da variabilidade do dado original está determinada pelas primeiras componentes, permitindo dividir o sinal original em componentes ligadas a fenômenos físicos de interesse.

Os métodos aqui expostos constituem um conjunto de ferramentas de grande utilidade para o acompanhamento dos processos erosivos e a análise de variáveis climáticas correlacionadas no processo, ao longo do tempo. A

indicação da correlação entre os processos erosivos e as alterações nas temperaturas médias observadas para o oceano local, evidenciam a necessidade de estudos que estimem as relações temperatura-erosão, apontando subsídios para ações mitigatórias a seus efeitos. Assim como em outros trabalhos, ficam evidentes as relações entre a erosão e as mudanças climáticas observadas localmente, sendo as alterações de temperatura diretamente relacionadas à intensificação dos processos erosivos observados.

Para a praia do Hermenegildo, entre os anos de 1996 e 2007 foram catalogados os intervalos com maiores picos erosivos (1996 a 2000 e 2005 a 2006). Quando comparados os dados de retração da linha de costa com os períodos onde foram registradas anomalias na TSM, estes apresentaram uma correlação de 80%. Em anos de ocorrência do fenômeno El Niño, em consonância com anomalias da TSM, as maiores taxas de recuo foram catalogadas para situações onde o vento NE e SW predominaram. A velocidade média dos ventos para toda série de dados foi de 3,48 m/s de modo que, para cada intervalo analisado, os períodos onde o vento NE incidiu acima da média em 50% dos dias monitorados e, o vento SW em 30% dos dias monitorados, foi registrado os maiores picos erosivos. Mesmo o vento NE sendo predominante em grande parte da série de dados, é o vento SW que tem uma maior ação no processo erosivo. O teste de Mann-Kendall apresentou, para a série de ventos, uma tendência de aumento linear com 97,5% de probabilidade, sendo esse crescimento da ordem de 0,55 m/s em uma década.

Quando comparados os dados de altura significativa das ondas e taxas de recuo médio da linha de costa, ao longo dos anos, estes apresentaram uma correlação de 0,7605. Valores de Hs da ordem de 7,1 m foram catalogados para o período de 2005 a 2006, maior intervalo erosivo, e 2006 a 2007, período com as menores taxas de retração. Uma comparação feita entre os valores de elevação do nível do mar, após a passagem de tempestades, e os períodos de anomalias da TSM, não demonstrou uma correlação direta entre estas variáveis. No entanto, quando observadas separadamente essas variáveis apresentam uma variabilidade coincidente para os mesmos intervalos temporais.

A análise do pacote de perfis sazonais e de alta frequência demonstrou que em períodos onde o vento NE e SW são predominantes, são registradas as maiores perdas de volume nos perfis. Em contrapartida, o vento SE é caracterizado como sendo o responsável pela deposição de sedimentos no perfil. Os ventos provenientes do quadrante NW não têm influência direta no processo de acreção e erosão, de forma que estes mantêm o perfil estável. No contexto sazonal, as maiores perdas sedimentares no perfil são registradas no fim do outono.

A partir dos dados de retração da linha de costa, catalogados no período de 1947 a 2012, foi possível traçar a posição da linha de costa futura para os anos de 2022, 2032 e 2100. A posição da linha de costa futura em 2100, que é de 250 m tendo como referência a linha de 2012, não se mostrou coincidente com a posição estimada através da modelagem, efetuada por Figueiredo (2011) para o mesmo ano. Levando em consideração a escala de trabalho utilizada em ambos os trabalhos, a diferença observada na previsão obtida para o ano de 2100 pode estar associada ao fato do modelo STM não considerar as obras de engenharia presentes na orla. Para fins de determinação das áreas, com maior ou menor susceptibilidade a erosão, a análise multicritérial gerada pela aplicação do modelo AHP Geométrico demonstrou que o setor norte do balneário Hermenegildo é o mais suscetível ao processo erosivo.

A problemática da erosão, na praia do Hermenegildo se deve a uma soma de fatores de diferentes escalas. Dessa forma, apenas o diagnóstico da problemática não atende os interesses da comunidade local, no que diz respeito às medidas para conter a problemática da erosão. Para fins de manejo da zona costeira no município de Santa Vitória do Palmar, os produtos gerados nesse estudo servem de subsídio para futuros projetos de expansão do balneário de modo que, o mapa de probabilidades ao processo erosivo torna-se uma importante ferramenta no processo de diagnóstico das áreas sujeitas à erosão, dando suporte para que as futuras construções não venham a sofrer com os efeitos devastadores da erosão.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agudelo, P.A.; **Curry**, J.A. 2004. Analysis of spatial distribution in tropospheric temperature trends. *Geophysical Research Letters*, 31: 1-5.

Aguirre, M.; **Ávila**, D.; **Collazo**, D.; **Píriz**, C. & **Varela**, C. 2001. Una experiencia de gestion integrada costera. Las areas piloto Del programa ECOPLATA 1999-2001. Ed. Programa Ecoplata – Montevideo, Uruguai, 125 p.

Alcántara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries.

Almeida, L.E.S.B.; **Rosauro**, N.M.L. & **Toldo Jr.**, E.E. 1997. Análise preliminar das marés na Barra do rio Tramandaí, RS. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES, Resumos, p. 560-566.

Alvarez, J.A.; **Grê**, J.C.R. & **Toldo Jr.**, E.E. 1981. Estudos da praia a nordeste do molhe de Rio Grande, Rio Grande do Sul. *Pesquisas*, 14: 131-147.

Alvarez, J.A.; **Grê**, J.C.R. & **Toldo Jr.**, E.E. 1983. Estudos oceanográficos e sedimentológicos preliminares da praia de Tramandaí, RS. *Pesquisas*, 15: 66-85.

Anders, F.J. & **Byrnes**, M.A. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59(1): 17-26.

Angulo, R.J. 1993. Variações na configuração da linha de costa no Paraná nas últimas quatro décadas. *Boletim Paranaense de Geociências*, 41: 52-72.

Back, A.J., 2001. Aplicação da análise estatística para identificação de tendências climáticas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 36(5), 717-726.

Barletta, R.C. 2000. Efeitos da interação oceano-atmosfera sobre a morfodinâmica das praias do litoral central do Rio Grande do Sul, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de Mestrado, 160 p.

Barros, P.R.S., 2008. Dinâmica da Variabilidade do Sistema Sub-corrente Norte do Brasil em Escala Sub-inerciais. Master Thesis, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, Brazil, unpublished.

- Benavente, J.; Del Río, L.; Garcia, F.J. & Martínez-del-Pozo, J.A.** 2006. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay natural Park, SW Spain). *Continental Shelf Research*, 26: 1061-1076.
- Berger, A.R.** 1997. Assessing rapid environmental changes using geoindicators. *Environmental Geology*, 32: 36-44.
- Beribilli, M.P.; Klein, A.H.F. & Menezes, J.T.** 2007. Riscos associados ao banho de mar. Estudo de Caso da praia do Atalai, SC. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 7: 97-105.
- Bernatchez, P.; Fraser, C.; Lefavre, D. & Dugas, S.** 2011. Integrating antropogenic factors, geomorphological, indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards. *Ocean and Coastal Management*, 54: 621-632.
- Bird, E.C.F.** 1985. *Coastline changes: a global review*. Chinchester, John Wiley & Sons, 219 p.
- Bird, E.C.** 2008. *Coastal Geomorphology*. Wiley, New York, p. 436.
- Birkemeier, W.A.** 1981. Fast, accurate two-person beach surveys. *Engineering Technical Aid* 81-11, U.S. Army Engineer, Coastal Engineering Research Center Vicksburg, 17p.
- Bowden, K.F.** 1983. *Physical Oceanography and Coastal Waters*. Ellis Horwood Ltd, p. 301.
- Brock, J.; Sallenger, A.; Krabill, W.; Swift, R.; Manizade, S.; Meredith, A.; Jansen, M. & Eslinger, D.** 1999. Aircraft laser altimetry for coastal process studies. *Coastal Sediments '99*, 2414-2428.
- Bruun, P.** 1954. *Coast erosion and the development of beach profiles*. Beach Erosion Board, Tech Memo, Washington, D.C. 44.
- Bush, D.M.; Neal, W.; Young, R. & Pilkey, O.** 1999. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. *Ocean and Coastal Management*, 42: 647-670.
- Busman, D.V.; Mendes, A.C. & Gregório, A.S.** 2005. Valoração Econômica Relativa da Erosão Costeira na Praia do Farol Velho (Salinópolis/PA). *Anais do XXX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*.
- Calliari, L.J. & Klein, A.H.F.** 1993. Características morfodinâmicas e sedimentológicas das praias oceânicas entre Rio Grande e Chuí, RS. *Pesquisas*, 20 (1): 48-56.

Calliari, L.J.; Tozzi, H.A.M. & Klein, A.H.F. 1996. Erosão associada a marés meteorológicas na costa sul-riograndense (COMEMIR/OSNLR), Anais, 34º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador. SBG, 4: 682-684.

Calliari, L.J.; Speranski, N. & Boukareva, I. 1998. Stable focus wave rays as a reason of local erosion at the southern Brazilian coast. *Journal of Coastal Research*, 26(2): 19-23.

Calliari, L.J.; Boukareva, I.; Pimenta, F. & Speranski, N. 2000. Classificação da costa gaúcha com base nos padrões de refração das ondas de tempestades e evidências geomorfológicas de erosão costeira. Anais do Simpósio Brasileiro de Praias Arenosas. Itajaí, SC. PP. 195-198.

Camargo, R.S.V. 2012. Distribuição dos sedimentos superficiais e sua possível correlação com paleocanais na plataforma interna do Rio Grande do Sul. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 69 p.

Cambers, G. 1997. Planning for Coastline Change. UNESCO. Coastal Regions and Small Islands (CSI). Unit. Nº 4. 14p.

Cataldi, M.; Assad, L.P. de F.; Torres Junior, A.R. & Alves, J.L.D. 2010. Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul Extratropical na região de Confluência Brasil Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do sul e sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(4): 513-524.

CERC (Coastal Engineering Research Center), 1986. Measuring Shoreline Change. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Technical Note, II-86, 7p.

Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Ed. Rialp, 453 pp.

Ciavola, P.; Ferreira, Ó.; Haerens, P.; van Koningsveld, M.; Armaroli, C. & Lequeux, Q. 2011. Storm impacts along European coastlines. Part 1: The joint effort of the MICORE and ConHaz Projects. *Environmental, Science & Policy*, *in press*.

Crowell, M.; Leikin, H. & Buckley, M.K. 1999. Evaluation of coastal erosion hazards study: an overview. *Journal of Coastal Research*, 28 (SI): 2-9.

Crowell, M.; Honeycutt, M. & Hatheway, D. 1999. Coastal erosion hazards study: phase one mapping. *Journal of Coastal Research*, 28 (SI): 10-20.

Crowell, M.; Leatherman, S.P. & Buckley, M.K. 1991. Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7(3):839-852.

Crowell, M.; Leatherman, S. P. & Buckley, M. 1993. Shore-line change rate analysis: long term versus short term data. *Shore Beach*, 61(2): 13-20.

Cooper, J. & McLaughlin, S. 1998. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *Journal of Coastal Research*, 14(2): 512-524.

Dal Cin, R. & Simeoni, U., 1994. A model determining the classification, vulnerability and risk in the southern coastal zone of Marche (Italy). *Journal of Coastal Research* 10(1), 18-29.

Dana, P.H. 1994. Geographic Information Systems Loran-C Coverage Modeling. *Proceedings of the Twenty-Second Annual Technical Symposium*. Bedford, MA: The Wild Goose Association.

Davies, J.L. 1980. Geographical variation in coastal development. 2nd Edition, London: Longman, 212p.

De La Vega-Leinert, A.C. & Nicholls, R.J., 2008. Potential implications of sea-level rise for Great Britain. *Journal of Coastal Research*, 24 (2): 342-357.

Dillenburg, S.R.; Roy, P.S.; Cowell, P.J. & Tomazelli, L.J. 2000. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the Shoreface Translation-Barrier Model (STM). *Journal of Coastal Research*, 16(1): 71-81.

Dolan, R.B.; Hayden, B.; Rea, C. & Heywood, J. 1978. Analysis of coastal erosion and storm surge hazards. *Coastal Engineering*, 2: 41-53.

Dolan, R.; Hayden, B. & May, S. 1980. The reliability of shoreline changes measurements from aerial photographs. *Shore and Beach*, 48: 22-29.

Dolan, R.; Fenster, M.S.; McCafferty, H. & Willis, C. 1997. Determination of statistically valid and representative counties for the NFIRA analysis of coastal erosion hazards (Technical Report prepared for FEMA), 58 pp.

Dolan, A.H. & Walker, I.J., 2004. Understanding vulnerability of coastal communities to climate change related risks. *Journal of Coastal Research* 39(SI), 1316-1323.

Douglas, B.C. 1991. Global sea-level rise. *Journal of Geophysical Research*, 96: 6981-6992.

Eardley, A.J. 1941. Aerial photographs: their use and interpretation. Harper, New York, N.Y.

Elsner, J.B. & Kocher, B. 2000. Global tropical cyclone activity: a link to the North Atlantic oscillation. *Geophysical Research Letters*, 27: 129-132.

Emery, W.J. & Thomson, R.E. 2001. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier, Amsterdam, 638 p.

Esteves, L.S. 2002. Estado da arte dos métodos de mapeamento da linha de costa. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Exame de Qualificação, 56p.

Esteves, L.S.; Barletta, R.C.; Vranjac, M.P.; Pivel, M.A.G.; Silva, A.R.P.; Vanz, A.; Erthal, S. & Oliveira, U.R. 1999. Caracterização e eficiência das obras de proteção costeira do balneário do Hermenegildo, RS, Brasil. VIII COLACMAR, Livro de Resúmenes Ampliados, Tomo II, 916-917.

Esteves, L.S.; Toldo Jr., E.E.; Almeida, L.E.S.B. & Nicolodi, J.L. 2001. Erosão na costa do Rio Grande do Sul entre 1975-2000. VIII Congresso da ABEQUA, Boletim de Resumos (Imbé, Brasil), p. 511-513.

Esteves, L.S. 2002. Estado da arte dos métodos de mapeamento da linha de costa. Exame de Qualificação. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 55 p.

Esteves, L.S.; Silva, A.P.; Arejano, T.B.; Pivel, M.A.G. & Vranjac, M.P. 2003. Coastal development and human impacts along the Rio Grande do Sul beaches, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 35(SI): 548-556.

Esteves, L.S.; Teixeira, P.S. & Williams, J. 2008. Managing coastal erosion: from long-term coastal evolution to seasonal shoreline changes. IAHS-AISH publication, 325: 516-523.

Esteves, L.S.; Brown, J.M.; Williams, J.J. & LyMBERY, G. 2011. Quantifying thresholds for significant dune erosion along the Sefton Coast, Northwest England. *Geomorphology*, *in press*.

European Commission, 2004. Living with Coastal Erosion in Europe e Sediment and Space for Sustainability. Part I - Major Findings and Policy Recommendations of the EUROSION Project. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 40 pp.

Fenster, M.S.; Dolan, R. & Morton, R.A. 2001. Coastal storms and shoreline change: signal or noise? *Journal of Coastal Research*, 17(3): 714-720.

- Ferreira, Ó.** 2006. The role of storm groups in the erosion of sand coasts. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31: 1058-1060.
- Ferreira, Ó.; Garcia, T.; Matias, A.; Taborda, R. & Dias, J.A.** 2006. Na integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, 26: 1030-1044.
- Figueiredo, S.A.** 2011. External forcing and internal controls on coastal response to climate change at Rio Grande do Sul, southern Brazil. University of Sydney. PhD Thesis, 164 p.
- Fontan, A.; Albarracín, S. & Alcántara-Carrió, J.** 2009. Estudios de erosión en costas sedimentarias mediante GPS diferencial y ecosondas monohaz/multihaz. In: Alcantra Carrió et al. (eds). *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litotal. Ed. CYTED*, 297 p.
- Forbes, D.L.; Parkes, G.S.; Manson, G.K. & Ketch, L.A.** 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210: 169-204.
- Freitas Neto, D.** 2008. Quantificação de perigos costeiros e projeção de linhas de costa futuras para Enseada do Itapocorói. Centro de Ciências da Terra e do Mar. Universidade do Vale do Itajaí. Monografia de conclusão de curso, 61p.
- Gallerini, G.; De Donatis, M.; Devoti, S.; Gabellini, M.; Nisi, M.F. & Silenzi, S.** 2003. Na integrated GIS method to evaluate susceptibility and hazard of sea level rise in coastal plains: The Versilia Plain. In: *CoastGis'03, Int. Symp. on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management, Proceedings*.
- Gan, M.A. & Rao, V.B.** 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119(5): 1293-1302.
- Godolphin, M.F.** 1976. Geologia do holoceno costeiro no município do Rio Grande, RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 146 p.
- Goldenberg, S.B.; Landsea, C.W.; Mestas-Nuñez, A.M. & Gray, W.M.** 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, 293: 474.
- Gornitz, V.; White, T.W. & Cushman, R.M.** 1991. Vulnerability of the U.S. to future sea-level rise. *Coastal Zone '91*. Pp.2354-58. In: *Proceedings of Seventh Symposium on Coastal and Ocean Management*. ASCE.

Gornitz, V.; Daniels, R.; White, T. & Birdwell, K. 1993. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US southeast. DE-AC05[EM]84OR21400, US Government Report, Oak Ridge National Laboratory, TN.

Goya, S. C. 2009. Mudanças climáticas e desafios ambientais. *Scientific American Brasil*, 2: 56-61.

Guedes, R.M.C. 2008. Utilização de métodos diretos e vídeo-imagens ARGUS na caracterização morfodinâmica da zona de arrebentação da praia do Cassino, RS. Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de Mestrado, 93p.

Hansom, J. 2001. Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach. *Catena*, 42(2-4): 291-305.

Hayes, M.O. 1979. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Letherman, S.P. (ed.), *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, New York, p. 1-27.

Holman, R.A. & Stanley, J. 2007. The history and technical capabilities of ARGUS. *Coastal Engineering*, 54: 477-491.

Houser, C. & Hamilton, S. 2009. Sensitivity of post-hurricane beach and dune recovery to event frequency. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 613-628.

Huang, C.C.; Pang, J.; Huang, P.; Hou, C. & Han, Y. 2002. High-resolution studies of the oldest cultivated soils in the southern Loess Plateau of China. *Catena*, 47 (1): 29-42.

IOC, 2009. Hazard awareness and risk mitigation in integrated coast area management. In: *Manuals and Guides Number 50. ICAM Dossier Number 5*, Intergovernmental Oceanographic Commission, Unesco, Paris.

IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. Web site: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm> (accessed December 2009).

Irish, J.L. & Lillycrop, W.J. 1999. Scanning laser mapping of the coastal zone: the SHOALS system. *Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 123-129.

Irish, J.L. & White, T.E. 1998. Coastal engineering applications of high-resolution lidar bathymetry. *Coastal Engineering*, 35: 47-71.

ISDR, 2004. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives. UN/ISDR, Geneva.

Jensen, J.R. 2009. Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva dos Recursos Terrestres. 2ª edição, editora Parentese.

Jiménez, J.A.; **Garcia**, V.; **Valdemoro**, H.I.; **Mendoza**, E.T. & **Sánchez-Arcilla**, A. 2011. Managing erosion-induced problems in NW Mediterranean urban beaches. Ocean & Coastal Management, **in press**: 1-12

Kendall, M.G. 1975. Rank correlation methods. London: Charles Griffin, 120 p.

Koerner, K.F. 2009. Variação espaço-temporal em médio e curto termo da orla do balneário Hermenegildo, RS. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 63 p.

Koerner, K.F. 2012. Alternativas do manejo para o problema da erosão costeira no balneário Hermenegildo, Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande. Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro. Dissertação de Mestrado, 148 p.

Komar, P.D. Beach Process and Sedimentation. Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey, 1976, 428 p.

Kowsmann, R. 1970. Variações de curto e longo prazo de um perfil da praia de Copacabana, RJ. Instituto de Pesquisas da Marinha, Ministério da Marinha, 39: 1-15.

Krabil, W.B.; **Thomas**, R.H.; **Martin**, C.F.; **Swift**, R.N. & **Frederick**, E.B. 1995. Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland Ice sheet. International Journal of Remote Sensing, 16 (7): 1211-1222.

Leatherman, S.P., **Zhang**, K. & **Douglas**, B.C., 2000. Sea level rise show to drive coastal erosion. EOS Trans. AGU, 81(6): 55-57.

Leatherman, S.P. 1983. Shoreline mapping: a comparasion of techniques. Shore and Beach, 51: 28-33.

Lélis, R.J.F. 2003. Variabilidade da linha de costa oceânica adjacente às principais desembocaduras do Rio Grande do Sul. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, 81 p.

Lentini, C.A.D., Podestá, G.G., Campos, J.D. & Olson, D.B., 2001. Sea surface temperature anomalies on the western South Atlantic from 1982 to 1994. *Continental Shelf Research*, 21: 89-112.

Lima, S.F.; Almeida, L.E.S.B & Toldo Jr., E.E. 2001. Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 28(2): 99-107.

Lima, L.G. 2008. Estratigrafia e evolução da barreira holocênica na praia do Hermenegildo (RS). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 78 p.

Lins-de-Barros, F.M. 2005. Risco, vulnerabilidade física à erosão e impactos socioeconômicos na orla urbanizada do município de Maricá, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 6: 83-90.

Lippert, A. & Briscoe, M.G., 1990. Observations and EOF analysis of low-frequency variability in the western part of the gulf stream recirculation. *Journal of Physical Oceanography* 20(5), 646-656.

List, J.H.; Sallenger, A.H.; Hansen, M.E. & Jaffe, B.E. 1997. Accelerated relative sea-level rise and rapid coastal erosion: testing a causal relationship for the Louisiana barrier islands. *Marine Geology*, 140: 347-365.

List, J.H. & Farris, A.S. 1999. Large-scale shoreline response to storms and fair weather. *Coastal Sediments' 99*, pp. 1324-1338.

Lozano, I.; Devoy, R.J.N.; May, W. & Anderson, U. 2004. Storminess and vulnerability along the Atlantic coastlines of Europe: analysis of storm records and of a greenhouse gases induced climate scenario. *Marine Geology*, 210: 205-225.

Lucke, J.B. 1934. A study of Barnegat inlet. *Shore and Beach*, 2(2): 44-94.

Machado, A.A.; Calliari, L.J.; Melo, E. & Klein, A.H.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): 105-114.

Maia, N.Z., 2011. Avaliação da elevação do nível do mar e riscos de inundação costeira associados à passagem de ciclones no balneário Hermenegildo, RS. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de Mestrado, 118p.

Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13: 245-259.

Marchand, M.; Sanchez-Arcilla, S.; Ferreira, M.; Gault, J.; Jiménez, J.A.; Markovic, M.; Mulder, J.; van Rijn, L.; Stanica, A.; Sulisz, W. & Sutherland, J. 2011. Concepts and science for coastal erosion management – An introduction to the CONSCIENCE framework. *Ocean and Coastal Management*, 54: 859-866.

Marone, E. & Camargo, R. 1994. Marés meteorológicas no litoral do estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Revista Nerítica*, 8 (1): 73-85.

Mata, M.M. 1996. Aplicações da altimetria TOPEX/POSEIDON no estudo de aspectos dinâmicos do oceano Atlântico Sul Ocidental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado, 113 p.

Mrazik, B.R. & Kinberg, H.A. 1989. National flood insurance program-twenty years of progress toward decreasing nationwide flood losses. In: *National Water Summary 1988-1989*. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2375, pp. 133-142.

Mazzer, A.M. 2007. Proposta metodológica para análise de vulnerabilidade da orla marítima à erosão costeira: aplicação em praias arenosas da costa sudeste da ilha de Santa Catarina (Florianópolis, Santa Catarina – Brasil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, 170 p.

Mazzer, A.M. & Dillenburg, S.R., 2009. Variações temporais da linha de costa em praias arenosas dominadas por ondas do sudeste da ilha de Santa Catarina (Florianópolis, SC, Brasil). *Pesquisa em Geociências*, 36(1): 117-135.

McLaughlin, S.; McKenna, J. & Cooper, J.A. 2002. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, 36(SI): 487-497.

Melo, E.; Romeu, M.A.R. & Hammes, G.R. 2010. Condições extremas de agitação marítima ao largo do Rio Grande a partir do modelo WW3. IV Seminário e Workshop de Engenharia Oceânica. FURG, Rio Grande – RS, p. 1-20.

Moffit, F.H. 1969. History of shore growth from aerial photographs. *Shore & Beach*, 4: 23-27.

Morton, R.A.; Leach, M.P.; Paine, J.G. & Cardoza, M.A. 1993. Monitoring beach changes using GPS surveying techniques. *Journal of Coastal Research*, 9(3): 884-908.

Morton, R. 2002. Factors controlling storm impacts on coastal barriers and beach – a preliminary basis for near real-time forecasting. *Journal of Coastal Research*, 18(3): 486-501.

Morton, R.A. & **Speed**, F.M. 1998. Evaluation of shorelines and legal boundaries controlled by water levels on sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 14 (4): 1373-1384.

Muehe, D. 2004. Definição de limites e tipologias da orla sob os aspectos morfodinâmico e evolutivo. In: Ministério do Meio Ambiente. 2004. Projeto Orla – subsídios para um projeto de gestão. Brasília, 13-32.

Muehe, D. 2006. Erosion in the brazilian coastal zone: an overview. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 43-48.

Muehe, D. & **Correa**, C.H.T. 1989. The coastline between Rio de Janeiro e Cabo Frio. In: Neves, C. & Magoon, O.T. (Ed) *Coast Lines of Brazil*. Publish: American Society of Civil Engineers, New York. P. 110-123.

Muehe, D. & **Neves**, C.F. 1990. Changing climate and the coast, western Africa, the Americas, the Mediterranean basin, and the rest of Europe. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Miami Conference on Adaptive Responses to Sea Level Rise and Other Impact of Global Climate Change.

Muehe, D. & **Neves**, C.F. 2005. The implication of sea level rise on the Brazilian coast: a preliminary assessment. *Journal of Coastal Research*, SI 14: 54-78.

Nicolodi, J.L.; **Toldo Jr.**, E.E. & **Gruber**, N.L.S. 2001. Frequencia e sazonalidade das marés meteorológicas no litoral norte do Rio Grande do Sul. In: *Anais do VIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Imbé, RS, p. 212-214.

Nicolodi, J.L. & **Peterman**, R.M. 2010. Climate changes and vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social and technological aspects. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 10(2):3-29.

NRC (National Research Council). 1990. *Managing Coastal Erosion*. Washington, D.C., National Academy Press. 182p.

Pajak, M.J. & **Leatherman**, S. 2002. The High Water Line as Shoreline Indicator. *Journal of Coastal Research*, 18(2): 329-337.

Papathoma, M.; Dominey-Howes, D. & Smith, D. 2003. Assessing tsunami vulnerability, an example from Herakleio, Crete. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3: 377-389.

Parise, C.K. 2007. Padrões atmosféricos sinóticos geradores de marés meteorológicas intensas e a resposta morfodinâmica da praia do Cassino. Monografia de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Rio Grande, 70 p.

Parise, C.K.; Calliari, L.J. & Krusche, N. 2009. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Brazilian Journal of Oceanography*, 57(3): 175-188.

Pereira, P.S. 2005. Variabilidade da orla oceânica do Rio Grande do Sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geomorfológicos. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Oceanografia, Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 161 p.

Pethick, J. 2001. Coastal management and sea level rise. *Catena*, 42(2-4): 307-322.

Pielke Jr, R.A.; Landsea, C.; Mayfield, M.; Laver, J. & Pasch, R., 2005. Hurricanes and global warming. *American Meteorological Society*, 1571-1575.

Pollete, M. 1997. Gerenciamento Costeiro Integrado: Proposta para a Paisagem Litorânea da Microbacia de Mariscal – Município de Bombinhas (SC) – Brasil. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Tese de Doutorado. 499p.

Pollete, M. & Pagetti Silva, L. 2003. Gesamp Icam e PNGC – Análise comparativa entre as metodologias de gerenciamento costeiro integrado. *Revista da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência*, 4: 27-30.

Projeto EuroSION. 2004. Viver com a erosão costeira na Europa: sedimentos e espaço para a sustentabilidade. 21p.

Richmond, B.M.; Fletcher, C.H.; Grossman, E.E. & Gibbs, A.E. 2000. Islands at risk: coastal hazard assessment and mapping in the Hawaiian Islands. *Environment Geosciences*, 8(1): 21-37.

Rivas, V. & Cendrero, A. 1994. Human influence in a low-hazard coastal area: an approach to risk assessment and proposal of mitigation strategies. In: Finkl, C.W. (ed), *Coastal*

Hazards: perception, susceptibility and mitigation. The Coastal Education and Research Foundation, Fort Lauderdale, Florida, 289-298.

Rosman, P.C.C. & Valentini, E. 1989. Recent erosion in the “stable” Ipanema-Leblon beach in Rio de Janeiro. In: Neves, C. & Magoon, O.T. (ed). Coastlines of Brazil. American Society of Civil Engineers. P. 278-291.

Ruggiero, P.; Cote, J.; Kaminsky, G. & Gelfenbaum, G. 1999. Scales of variability along the Columbia river littoral cell. Coastal Sediments’99, 1692-1707.

Saaty, T.H.L. Relative measurement and its generalization indecision making: Why earwise comparisons are central in mathematics for then measurement off intangible factor. The analytic hierarch/network processes. Review off the royal Spanish academy of science a mathematics. Madrid, 2008.

Santos, D.N.; Silva, V.P.R.; Sousa, F.A.S. & Silva, R.A. 2010. Estudo de alguns cenários climáticos para o Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 14(5): 492-500.

Saraiva, J.M.B.; Bedran, C. & Carneiro, C. 2003. Monitoring of storm surges on Cassino beach. Journal of Coastal Research, 35(SI): 323-331.

Shepard, F.P.; Emery, K.O. & La Found, E.D. 1941. Rip currents: a process of geological importance. J. Geol., 49(4): 337-339.

Short, A.D. 2000. Beach systems. In: Beach and Shoreface Morphodynamics Course. Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, p.1-10.

Short, A.D. & Hesp, P.A. 1982. Wave beach and dune interactions in southeast Australia. Marine Geology, 48: 259-284.

Smith, H.T.U. 1943. Aerial photographs and their application. Appleton-Century-Crofts, Inc., New York, NY.

Smith, M.J. & Cromley, R.G. 2012. Measuring historical coastal change using GIS and the change polygon approach. Transactions in GIS, 16 (1): 3-15.

Sneyers, R., 1975. Sur l’analyse statistique des series d’observations. Genève: Organisation Météorologique Mondial. 192 pp. (OMN Note Technique, 143).

Soares, C.R.; Vogel, I. & Paranhos F^o, A.C. 1998. The marine erosion problem in Matinhos municipality, southern Brazil. In: Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOIZC), meeting, Anais da Academia Brasileira de Ciências, 70 (1): 1-2.

Souza, C.R.G. 2009. A Erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada, 9(1): 17-37.

Souza, C.R. de G. 2009a. A erosão nas praias do estado de São Paulo: Causas, Conseqüências, Indicadores de Monitoramento e Risco. Memórias do Conselho Científico da Secretária do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Instituto de Botânica – SMA, São Paulo (SP). P. 48-49.

Souza, C.R. de G.; Souza Filho, P.W.M.; Esteves, S.L.; Vital, H.; Dillenburg, S.R.. Patchineelam, S.M. & Addad, J. 2005. Praias arenosas e erosão costeira. In: Souza, C.R. de G.; Suguio, K.; Oliveira, A.M. dos S. & Oliveira, P.E. (eds.) Quaternário do Brasil. Holos Editora, Ribeirão Preto (SP), p. 130-152.

Speranski, N. 1998. Computer oriented atlas of dynamic process in coastal zone. Journal of Coastal Research, 26: 8-13.

Speranski, N.S. & Calliari, L.J. Padrões de Refração de Ondas para a Costa do Rio Grande do Sul e sua Relação com a Erosão Costeira. In: Muehe, D. 2006. Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro. Ministério do Meio Ambiente, 475p.

Stafford, D.B. 1971. Na aerial photographic technique for beach erosion surveys in North Carolina. Coastal Engineering Research Center, Technical Memorandum 36, 115p.

Stech, J.L. & Lorenzetti, J.A. 1992. The response of the south Brazil bight to the passage of winter time cold fronts. Journal of Geophysical Research, 97 (C6): 9507-9520.

Stive, J.F.; Aarninkhof, H.L.; Hanson, H.; Larson, M.; Winjnberg, K.M.; Nicholls, R.J. & Capobianco, M., 2002. Variability of shore and shoreline evolution. Coastal Engineering, 47: 211-235.

Stockdon, H.J.; Sallenger, A.H.; List, J.H. & Holman, R.A. 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic lidar data. Journal of Coastal Research, 18(3): 502-513.

Tagliani, C.R.A.; Asmus, M.L.; Reis, E.G.; & Calliari, L.J. 2000. Gerenciamento costeiro integrado: Trocas e inter-relações entre os sistemas continental e oceânico adjacente. 19 a

25 de novembro de 2000; Rio Grande – RS. FURG, CIRM, DOALOS/ONU. 12ª ed., pasta com 5 módulos e 4 sub-módulos. (PROGRAMA TRAIN-SEA-COAST BRASIL).

Teixeira, P.S. 2011. Uso do aplicativo Digital Shoreline Analysis System (DSAS) para avaliação da erosão praial no balneário Hermenegildo, RS, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Técnico em Geoprocessamento. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS, Rio Grande, 47 p.

Thieler, E.R. & **Danforth**, W.W. 1994. Historical shoreline mapping (I): improving techniques and reducing positioning errors. *Journal of Coastal Research*, 10(3): 549-563.

Thieler, E.R. & **Danforth**, W.W. 1994. Historical shoreline mapping (II): application of the digital shoreline mapping and analysis systems (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, 10(3): 600-620.

Toldo, E.E.; **Almeida**, L.E.S.B. & **Correa**, I.C.S. 1996. Produção de sedimentos no sistema lagunar da Lagoa dos Patos, RS. In: II Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, Rio de Janeiro RJ, ABRH, p: 261-268.

Toldo Jr, E.E.; **Almeida**, L.E.S.B.; **Barros**, C. & **Martins**, L.R. 1999. Retreat of the Rio Grande do Sul coastal zone, Brazil. In: **Martins**, L.R. & **Santana**, C.I. (eds.). Non living resources of the Southern Brazilian Coastal Zone and Continental Margin. Porto Alegre, Brasil: Editora da UFRGS, pp. 62-68.

Toldo Jr., E.E. & **Almeida**, L.E.S.B. 2003. A linha d'água como indicador da posição da linha de praia. *Anais do IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*.

Toldo Jr., E.E.; **Almeida**, L.E.S.B.; **Nicolodi**, J.L. & **Martins**, L.R. Erosão e acresção da zona costeira. In: **Muehe**, D. 2006. *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente, 475p.

Tolman, H.L., 2002. User manual and system documentation of Wave Watch III version 2.22. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 222. 130pp.

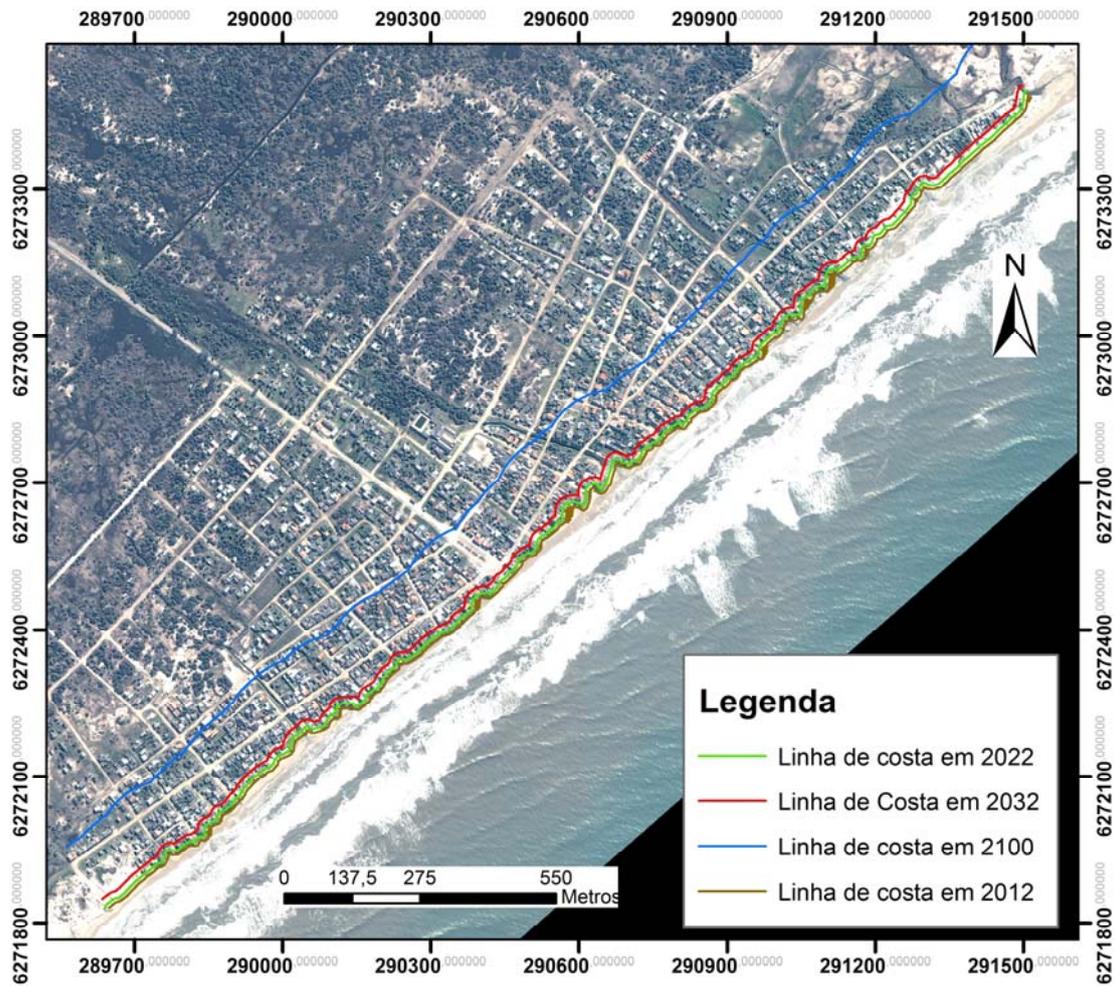
Tomazelli, L.J.; **Villwock**, J.A.; **Dillenburg**, S.R.; **Bachi**, F.A. & **Dehnhardt**, B.A. 1998. Significance of present-day coastal erosion and marine transgression, Rio Grande do Sul, southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 221-229.

Tozzi, H.A.M. & **Calliari**, L.J. 1997. Influências das tempestades extratropicais sobre o estoque de sedimentos das praias entre Rio Grande e Chuí, RS. Resumos, p: 85-87, *Anais da Semana Nacional de Oceanografia*, UNIVALI, Itajaí, SC, Brasil.

- Tozzi, H.A.M.** 2000. Influência das tempestades extratropicais sobre o estoque subaéreo das praias entre Rio Grande e Chuí, RS. Campanha do outono e inverno de 1996. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, 115p.
- Trenberth, K.**, 2005. Uncertainty in hurricanes and global warming. *Science*, 308: 1753.
- US Army.** 2004. Shore Protection Manual. Washington, USA: US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- van Rijn, L.C.** 2011. Coastal erosion and control. *Ocean and Coastal Management*, 54: 867-887.
- Vasconcelos, F.P.** 2005. Gestão Integrada da Zona Costeira: ocupação antrópica desordenada, erosão, assoreamento e poluição ambiental do litoral. Ed. 87 p.
- Vellinga, P. & Klein, R.** 1993. Climate change, sea level rise and integrated coastal zone management, 21: 245-268.
- Villwock, J.A. & Tomazelli, L.J.** 1995. Geologia costeira do Rio Grande do Sul. *Notas Técnicas, CECO-UFRGS*, 8: 1-45.
- Von Storch, H. & Woth, K.** 2008. Storm surges, perspectives and options. *Sustainability. Science*, 3: 33-44.
- Webster, P.J.; Holland, G.J.; Curry, J.A. & Chang, H.R.**, 2005. Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in warming environment. *Science*, 309: 1844-1846.
- Westgate, K.N. & O'Keefe, P.** 1976. Some definitions of disaster. Occasional Paper 4, Disaster Research Unit, University of Bradford, Bradford.
- Wright, L.D. & Short, A.D.** 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Wright, L.D.; Short, A.D. & Green, M.O.**, 1985. Short-term changes in morphodynamic state of beaches and surf zones: an empirical predictive model. *Marine Geology*, 62: 339-364.
- Zuquete, L.V.; Péjon, O.J.; Gandolfi, N. & Paraguassu, A.B.** 1995. Considerações básicas sobre a elaboração de carta de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. *Geociências*, 14(2): 9-39.

10. ANEXOS

ANEXO I:
ESTIMATIVA PARA A POSIÇÃO FUTURA DA LINHA DE COSTA PARA
OS ANOS DE 2022, 2032 E 2100.
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.



ANEXO II:
MAPA DE PROBABILIDADES A EROÇÃO GERADO A PARTIR DO MÉTODO
AHP-GEOMÉTRICO.
FATORES ABORDADOS: TAXAS EROSIVAS, VENTO, MODELO
DIGITAL DE ELEVAÇÃO E ESTRUTURAS DE ENGENHARIA.
PRESENTES.
SISTEMA DE PROJEÇÃO: UTM/WGS_84, ZONA 22S.
FONTE: ELABORADO PELO AUTOR.

