

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

KAROLINE ANGÉLICA MARTINS

VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS  
ATRAVÉS DE INDICADORES EM PERNAMBUCO, BRASIL

RECIFE/2015

KAROLINE ANGÉLICA MARTINS

VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS  
ATRAVÉS DE INDICADORES EM PERNAMBUCO, BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira

RECIFE/2015

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

M386v Martins, Karoline Angélica.  
Vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas através de indicadores em Pernambuco, Brasil / Karoline Angélica Martins. - Recife: O Autor, 2015.  
106 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2015.  
Inclui Referências e Anexos.

1. Oceanografia. 2. Índice de Vulnerabilidade Costeira. 3. Gestão costeira. 4. Retrogradação da linha de costa. I. Pereira, Pedro de Souza. (Orientador). II. Título.

UFPE

551.46 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-139

KAROLINE ANGÉLICA MARTINS

VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS  
ATRAVÉS DE INDICADORES EM PERNAMBUCO, BRASIL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco. Orientada pelo Professor Dr. Pedro de Souza Pereira.

Aprovada pela comissão examinadora em 17 de abril de 2015.

---

Dr. Pedro de Souza Pereira

---

Dr<sup>a</sup>. Tereza Cristina Medeiros de Araújo

---

Dr. Venerando Eustáquio Amaro

RECIFE, 2015

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira, por todas as boas ideias e por estar sempre disposto a ajudar.

À minha família, pelo apoio incondicional, especialmente ao Rafael, pelo carinho, pela parceria e pela ajuda desde a elaboração do projeto até a finalização da dissertação.

À meus amigos do LABOGEO e do LAHICO, em especial ao Anderson pela grande amizade e por todo o suor derramado na coleta dos meus dados.

Ao Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia pelos incentivos financeiros para a realização da coleta de dados. À SEMAS e ao CPRH, com destaque para Andréa Olinto, Leca, Vanessa, Rodolfo e Silvio. Ao Rodrigo Mikosz pela indispensável ajuda com o GNSS, e a todos que participaram da saída de campo.

À CAPES pelos dois anos de bolsa.

Ao Jarbas Bonetti, Andres Osorio, Cecilia Enriquez, Gabriel Ruiz, Mariela Muler, Marinez Scherer, Patricio Catalan, Pedro Pereira, Susan Hans e Rodolfo Casarín, que foram os pesquisadores que colaboraram respondendo à pesquisa de valoração dos indicadores de vulnerabilidade.

Ao EXCEED/DAAD pelo curso de erosão costeira e mudanças climáticas e pela bolsa de intercâmbio. Ao Rodolfo Casarín e ao Edgar Mendoza por me orientarem durante meu intercâmbio no México.

Meus mais sinceros agradecimentos aos amigos e professores do Departamento de Oceanografia, e a todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração desta dissertação.

## RESUMO

A erosão costeira é um problema relevante para o estado de Pernambuco, localizado no nordeste do Brasil. A zona costeira deste estende-se ao longo de 13 cidades, incluindo a capital Recife. Cerca de 56% da população vive nesta área e possui significativa infraestrutura residencial, industrial, comercial e centros financeiros. Tendo em vista a problemática o presente estudo foi dividido em três partes. A primeira apresenta a situação atual de erosão do litoral de Pernambuco determinada por indicadores visuais, e agrupados em quatro níveis de intensidade. Como resultado tem-se que 42% do litoral não apresentou nenhuma evidência de erosão, 11% apresentou indicadores de baixa intensidade, 18% moderada e os demais 29% apresentaram indicadores de alta intensidade. A segunda parte avaliou a vulnerabilidade do litoral à erosão, através de um Índice de Vulnerabilidade Costeira. Neste foram integrados parâmetros geológicos, dinâmicos, morfológicos e sociais, tendo a importância relativa de cada parâmetro definida pela opinião de especialistas na área de erosão costeira e vulnerabilidade. Os resultados foram agrupados em três classes, onde 38% da região costeira de Pernambuco apresentou baixa vulnerabilidade, principalmente no Setor Sul do estado, 49% apresentou vulnerabilidade moderada e 13% vulnerabilidade alta, principalmente no Núcleo Metropolitano. Nesta ainda foi avaliada a vulnerabilidade do litoral com relação às mudanças climáticas, levando em consideração aumentos na altura significativa das ondas ( $H_s$ ), e no nível médio do mar (ARNMM). Como resultado, no cenário mais pessimista com aumento de  $H_s$  de 0,75 m e ARNMM de 1,00 m, o litoral de Pernambuco chega a dobrar o número de segmentos com índice alto. Para entender as causas da erosão em uma praia é necessário fazer análises mais detalhadas dos processos. Para tal, a terceira parte trata-se de um estudo de caso tomando-se como exemplo o que foi realizado aqui para a Praia de Pau Amarelo, localizada no município de Paulista. Concluiu-se que o processo erosivo nesta praia é causada pelo padrão de circulação em duas células e intensificação da corrente litorânea, somadas, ao possível, déficit sedimentar causado por alterações antrópicas na zona costeira e na hidrodinâmica regional. Os dados gerados neste estudo podem servir para aprimorar planos de manejo costeiro e de adaptação tanto para os problemas de erosão quanto para os de mudanças climáticas.

Palavras-chave: Índice de Vulnerabilidade Costeira. Gestão costeira. Retrogradação da linha de costa.

## ABSTRACT

The coastal erosion is a significant problem at Pernambuco state, located in the northeast of Brazil. Its coastal zone extend along 13 cities, including the capital Recife. With 56% of the population living in this area with relevant infrastructure, industries, commerce and financial centres. This study is presented in three parts. The first one presents the current situation of coastal erosion in Pernambuco determined by the detection of local indicators and sorted into four intensity levels. The study reported that 42% of the coast showed no evidence of erosion, 11% had low intensity of erosion, 18% had moderate and the remaining 29% was highly eroded. The second part presents the coastal erosion vulnerability evaluated by the Coastal Vulnerability Index, integrating geological, dynamical, morphological and social parameters. A group of experts defined the relative importance of each parameter. The results were classified into three classes, where 38% of the coastal region presented low vulnerability, mainly located in the southern cities, 49% had moderate vulnerability and 13% high vulnerability, mainly located in the metropolitan area of Recife. The variation of coastal vulnerability was also predicted in relation to climate change, considering increases in significant wave height ( $H_s$ ) and the sea level rise (SLR). In the worst case scenario increasing  $H_s$  by 0.75 m SLR by 1.00 m, the coast of Pernambuco has doubled the number of segments with higher rates. Since a detailed analysis is necessary to understand the erosion causes at a beach, the third part present a example of Pau Amarelo beach, northern of Recife. Where is concluded that the erosion in this beach is caused by the circulation pattern in two cells and intensification of longshore current, along with a possible sediment deficit caused by anthropogenic changes in the coastal zone and in the regional hydrodynamics. The data generated in this study can be used to improve coastal management and adaptation plans for erosion problems and for climate change.

Keywords: Coastal vulnerability Index. Coastal management. Coastline retreat.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Localização da área de estudo e dos 174 pontos de coleta.....	19
Figura 1.2 -	a) Limite areia seca e areia úmida; b) Linha de vegetação; c) Linha de urbanização; d) Veículo quadriciclo utilizado no levantamento com antena do GNSS.....	21
Figura 1.3 -	Exemplo dos indicadores utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira em Pernambuco (ver tabela 1.1).....	24
Figura 1.4 -	Indicadores de erosão costeira; a) Escarpa erosiva, Praia do Paiva; b) Árvores caídas, Praia da Gamboa; c) Ausência de pós-praia, Praia do Porto; d) Obra de proteção costeira, Praia do Farol.....	26
Figura 1.5 -	Grau de erosão nos municípios do Setor Norte de Pernambuco.....	30
Figura 1.6 -	Grau de erosão nos municípios do Núcleo Metropolitano de Pernambuco.....	33
Figura 1.7 -	Grau de erosão nos municípios do Setor Sul de Pernambuco.....	35
Figura 1.8 -	Situação da erosão costeira; a) No ano de 2006; b) No ano de 2014.....	37
Figura 2.1 -	Relações entre as variações no clima, os efeitos causados na zona costeira pelas mudanças climáticas. As adaptações antrópicas realizadas nos ambientes podem modificar o grau de exposição ao risco de tais ambientes. ....	40
Figura 2.2 -	Matriz de comparação do métodoAHP.....	53
Figura 2.3 -	Dez indicadores que foram avaliados, na figura se apresentam classificados de acordo com três graus vulnerabilidade para cada indicador.....	58
Figura 2.4 -	Exemplo de dano ao patrimônio. Praia de Catuama, Goiana.....	59
Figura 2.5 -	Segmento 148, Praia de Tamandaré, Tamandaré, Setor Sul. Vulnerabilidade Baixa .....	63
Figura 2.6 -	Vulnerabilidade atual à erosão; a) Setor Norte; b) Núcleo Metropolitano; c) Setor Sul.....	64

Figura 2.7 -	Graus de vulnerabilidade; a) Pontal de Maria Farinha - vulnerabilidade baixa; b) Praia dos Quatro Cantos - vulnerabilidade Alta; c) Praia de Boa Viagem - vulnerabilidade Alta; d) Praia do Cupe - vulnerabilidade Moderada.....	65
Figura 2.8 -	Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com $H_s = 1,5$ m ARNMM=0 m. Projeções com ARNMM de 0,25 m, e $H_s$ de 0,15; 0,30; 0,75 m.....	67
Figura 2.9 -	Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com $H_s = 1,5$ m ARNMM=0 m. Projeções com ARNMM de 0,25 m, e $H_s$ de 0,15; 0,30; 0,75 m.....	69
Figura 2.10 -	Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com $H_s = 1,5$ m ARNMM=0 m. Projeções com ARNMM de 0,25 m, e $H_s$ de 0,15; 0,30; 0,75 m.....	71
Figura 2.11 -	Comportamento da vulnerabilidade para os diferentes cenários de mudanças climáticas analisadas.....	72
Figura 3.1 -	Representação do transporte litorâneo e configuração da linha de costa em áreas com recifes submersos a) Linha de costa paralela às ondas incidentes; b) Linha de costa oblíqua às ondas incidentes.....	79
Figura 3.2 -	Localização da Praia de Pau Amarelo, no município de Paulista, Pernambuco.....	81
Figura 3.3 -	Batimetria da área de estudo.....	82
Figura 3.4 -	Praia de Pau amarelo. a) Situação atual de erosão; b) Vulnerabilidade atual à erosão; I mostra o ponto de coleta na parte norte da baía, II mostra o ponto na parte central e III mostra o ponto na parte sul da baía.....	85
Figura 3.5 -	Circulação hidrodinâmica em Pau Amarelo; a) Padrão de altura de onda ( $H_s$ ); b) Superfície instantânea do mar; c) Correntes geradas por ondas, o círculo azul marca um foco de energia; para as condições hidrodinâmicas atuais $H_s = 1,3$ m, $T_p = 7$ s, $\theta = 112,5^\circ$ , $MTL = 1,7$ m.....	87
Figura 3.6 -	Altura de onda para cenários de mudanças climáticas, sendo os parâmetros $H_s = 2,25$ m; $T_p = 8$ s; $\theta = 112,5^\circ$ comuns para os três cenários; a) ARNMM de 0,25 m; b) ARNMM de 0,50 m; c) ARNMM de 1,00 m.....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 -	Indicadores de erosão presentes em cada classe de intensidade.....	23
Tabela 1.2 -	Indicadores de erosão e o número de vezes encontrados no campo.....	27
Tabela 2.1 -	Nome de identificação dos arquivos que foram utilizados para calcular a vulnerabilidade final.....	52
Tabela 2.2 -	Nove cenários utilizados para avaliar a vulnerabilidade a mudanças climáticas e a condição atual.....	55
Tabela 2.3 -	Média das opiniões dos especialistas quanto à importância de cada parâmetro.....	60
Tabela 2.4 -	Peso de cada categoria e de cada indicador normalizados pelo método AHP.....	61
Tabela 2.5 -	Relação entre os intervalos de IVC e os graus de vulnerabilidade.....	61
Tabela 2.6 -	Exemplo dos indicadores de vulnerabilidade do segmento 148.....	62
Tabela 3.1 -	Dados da reanálise das ondas de Pau Amarelo.....	83
Tabela 3.2 -	Indicadores dos três pontos localizados na Praia de Pau Amarelo utilizados no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira.....	86

## SUMÁRIO

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<b>SITUAÇÃO ATUAL DA EROÇÃO NO ESTADO DE PERNAMBUCO .....</b>	<b>14</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1.1 <i>Justificativa</i> .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	16
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	16
1.3 ÁREA DE ESTUDO .....	17
1.4 METODOLOGIA.....	19
1.4.1 <i>Linha de costa</i> .....	20
1.4.2 <i>Indicadores visuais de erosão</i> .....	22
1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
1.5.1 <i>Posição da linha de costa em 2014</i> .....	25
1.5.2 <i>Indicadores</i> .....	26
1.5.3 <i>Classes de Intensidade</i> .....	28
1.5 CONCLUSÕES .....	38
<b>CAPÍTULO 2</b>	
<b>VULNERABILIDADE À EROÇÃO COSTEIRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PERNAMBUCO, BRASIL .....</b>	<b>40</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	40
2.1.1 <i>Conceito de vulnerabilidade</i> .....	41
2.1.2 <i>Justificativa</i> .....	41
2.2 OBJETIVOS .....	42
2.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	42
2.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	42
2.3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	43
2.3.1 <i>Metodologia do IPCC (The Common Methodology - CM):</i> .....	43
2.3.2 <i>Utilização de geoindicadores para avaliação de risco costeiro:</i> .....	43

2.3.3 Avaliação da vulnerabilidade ao aumento do nível do mar ( <i>Synthesis and upscaling of sea-level rise vulnerability assessment - SURVAS</i> ): .....	44
2.3.4 Avaliação dinâmica e interativa da vulnerabilidade ( <i>Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment - DIVA</i> ): .....	44
2.3.5 Índice de vulnerabilidade costeira ( <i>Coastal Vulnerability Index - CVI</i> ):.....	45
2.3.6 Mapeamento da estabilidade geomorfológica ( <i>Geomorphic Stability Mapping - Smartline</i> ):.....	45
2.4 METODOLOGIA.....	45
2.4.1 Categorias e Indicadores .....	46
2.4.2 Organização dos dados.....	51
2.4.3 Ponderação dos indicadores.....	53
2.4.4 Cálculo do índice de vulnerabilidade costeira .....	54
2.4.5 Mudança climática.....	54
2.4.6 Graus de Vulnerabilidade .....	55
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
2.5.1 Indicadores.....	56
2.5.3 Pesos.....	59
2.5.4 Vulnerabilidade Atual à Erosão.....	63
2.5.5 Vulnerabilidade à mudanças climáticas .....	66
2.5.6 Possíveis ações.....	73
2.6 CONCLUSÕES .....	75

### **CAPÍTULO 3**

#### **EROSÃO COSTEIRA EM PAU AMARELO, PAULISTA – PERNAMBUCO ..... 78**

3.1 INTRODUÇÃO .....	78
3.1.1 Justificativa .....	80
3.2 OBJETIVOS .....	80
3.2.1 Objetivo Geral.....	80
3.2.2 Objetivos Específicos .....	80
3.3 ÁREA DE ESTUDO .....	80
3.4 METODOLOGIA.....	83
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	84
3.5.1 Situação atual de erosão e vulnerabilidade.....	84

3.5.2 Ondas e correntes.....	86
3.5.2 Possíveis causas da erosão .....	88
3.5.3 Mudança climática.....	89
3.6 CONCLUSÕES .....	91
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>101</b>

## APRESENTAÇÃO

O litoral de Pernambuco possui cerca de 187 km de extensão, com falésias, costões rochosos e principalmente praias arenosas. Há relatos de erosão em pontos ao longo de todo o litoral de Pernambuco, no qual se não houver o manejo adequado a erosão costeira pode se tornar um problema social e econômico para toda a comunidade.

O primeiro passo para elaborar planos de manejo eficientes é gerar informações sobre a área. Portanto, com o intuito de gerar tais informações, esta dissertação de mestrado foi estruturada em três capítulos. Sendo o primeiro uma introdução à problemática da erosão costeira no litoral pernambucano. O segundo capítulo descreve o principal produto deste projeto, que é a definição da vulnerabilidade do litoral à erosão e às mudanças climáticas. O terceiro capítulo mostra a aplicação em escala local dos dados gerados nos dois primeiros capítulos juntamente com a avaliação mais detalhada da hidrodinâmica e das possíveis causas do processo erosivo atuante na Praia de Pau Amarelo. A ideia central de cada capítulo foi:

Capítulo 1: Determinar o estado atual de erosão em todo o litoral do estado de Pernambuco, com uma metodologia baseada em indicadores ambientais observados em campo, sendo essas classificados em quatro grupos de impactos visuais causados pela erosão.

Capítulo 2: Identificar as áreas vulneráveis à erosão no litoral do estado de Pernambuco com a atual situação de hidrodinâmica e traçar uma relação com mudanças climáticas, que podem causar alterações no padrão de ondas e no nível médio do mar. A metodologia aplicada neste capítulo foi a integração de parâmetros dinâmicos, sociais, morfológicos e de evidência de erosão através do cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira, e posteriormente a classificação hierárquica da linha de costa em três níveis de vulnerabilidade em relação à resistência e à capacidade de adaptação da praia.

Capítulo 3: Analisar o processo erosivo e entender os processos hidrodinâmicos em escala local na Praia de Pau Amarelo. A metodologia deste capítulo foi propagar, através de um modelo numérico, dados de ondas e correntes em Pau Amarelo e, a partir da análise dos resultados, inferir sobre as causas da erosão nesta praia. Cada um dos capítulos apresenta um breve descrição da problemática a ser tratada, no formato de artigos completos.

## CAPÍTULO 1

### SITUAÇÃO ATUAL DA EROSÃO NO ESTADO DE PERNAMBUCO

#### 1.1 INTRODUÇÃO

O sistema costeiro é composto por complexas interações entre os elementos marinhos, continentais e atmosféricos, tendo sua evolução marcada pela dinâmica de ondas, marés e ventos, que remodelam constantemente as feições da orla marítima, sobretudo em ambientes sedimentares. É na zona costeira que se desenvolve uma significativa parcela das atividades sociais, nesse contexto a compreensão do equilíbrio entre as atividades antrópicas e os processos naturais é de fundamental importância para a adequada e mitigação de possíveis conflitos (ADGER et al., 2005; NEVES; MUEHE, 1995).

Mudanças na configuração da zona costeira são resultantes de fatores naturais e antropogênicos (ZHANG; DOUGLAS; LEATHERMAN, 2004). Entre os naturais podem ser citadas as variações sazonais do clima, tempestades, eventos extremos e mudanças climáticas. Enquanto os antrópicos, que tendem a causar mudanças em curta escala de tempo, podem ser citados a alteração do regime hidrológico em decorrência da construção de barragens, dragagem de canais de navegação, obras portuárias e de proteção costeira (VALDEMORO; SÁNCHEZ-ARCILLA; JIMÉNEZ, 2007).

Segundo o relatório de vulnerabilidade costeira realizado para a América Latina, os países mais vulneráveis, considerando o patrimônio costeiro, são o México, Cuba, Bahamas, Argentina e Brasil (ECLAC, 2012). Neste último, todos os estados litorâneos tem problemas em consequência de processos erosivos na zona costeira, muitas vezes com danos ao patrimônio e perda de valor econômico (MUEHE, 2006). Em Pernambuco, um estudo aponta que 33% das praias do estado apresenta intenso grau de erosão (MANSO et al., 2006).

A erosão costeira ocorre devido a retrogradação da linha de costa, ou seja, quando há um balanço negativo de sedimento. As variações da linha de costa estão associadas aos processos costeiros atuantes, ao contorno da linha de costa, à batimetria da plataforma interna, à presença de recifes de arenito, de coral ou de algas, aos processos de refração e difração de ondas e à disponibilidade de sedimentos no sistema de correntes costeiras (SOUZA, 2009b).

Não há um consenso sobre a principal causa de erosão no mundo, muitos autores consideram a elevação do nível do mar como principal fator, enquanto outros acreditam que seja as intervenções antrópicas nos processos costeiros. Quanto ao último, a erosão pode ser provocada pela alteração no balanço sedimentar por obras de engenharia costeira, ou pela impermeabilização da zona costeira (NICOLODI, 2008).

Estruturas rígidas de engenharia, como diques, molhes e quebra-mares têm sido tradicionalmente usado para a proteção de áreas desenvolvidas na zona costeira. Estas estruturas tem alto custo de instalação e tendem a promover a erosão em praias adjacentes, pela alteração das correntes da deriva litorânea (PHILLIPS; JONES, 2006).

Este é o caso do molhe de Olinda, construído no começo do século XX para proteção do Porto de Recife. Essa estrutura, perpendicular à praia, com 800 m de comprimento, causou significativa modificação nas taxas de deriva litorânea, com efeitos negativos à jusante (FINEP/UFPE, 2009). Com o déficit de sedimento as praias de Olinda passaram a sofrer erosão e progressivamente foram sendo construídas novas obras de proteção nestas praias, transferindo o problema para áreas mais ao norte. Hoje, principalmente devido às obras no Porto de Recife e à obras de proteção que sucederam esta, a erosão atinge todo o litoral do município de Olinda e de Paulista (MARTINS; PEREIRA, 2014; NEVES; MUEHE, 1995).

### *1.1.1 Justificativa*

O Brasil possui 26,6% da população em municípios da zona costeira, o equivalente a 50,7 milhões de habitantes. Parte dessa população está ocupada em atividades, direta ou indiretamente, ligadas ao turismo, produção de petróleo e gás natural, pesca e serviços que atendem à dinâmica econômica gerada por esses municípios e outros próximos (IBGE, 2011). A erosão costeira pode causar prejuízos no desenvolvimento de atividades antrópicas e também nos serviços ambientais das praias.

O mercado de viagens e turismo é responsável pela maior receita na economia mundial, e também é um dos setores que, atualmente, mais emprega trabalhadores (HOUSTON, 2002). Neste estudo Houston identificou que uma preocupação dos turistas norte-americanos que visitam as praias é com relação a erosão costeira, sendo que estes optam por praias que não apresentam danos na infraestrutura causados por este processo.

Segundo a Secretaria Nacional de Políticas de Turismo<sup>1</sup> o estado de Pernambuco recebeu cerca de 3 milhões de pessoas em 2013, contabilizando somente a via de acesso aéreo. A maior parte destes passageiros têm como destino a capital estadual Recife com capacidade hoteleira para 15 mil hóspedes, seguido pela Praia de Porto de Galinhas no município de Ipojuca, com capacidade hoteleira para 13 mil hóspedes. Esses turistas buscam principalmente o lazer nas praias do estado.

O turismo litorâneo tem grande importância econômica em Pernambuco e, como a erosão costeira, sem dúvida, representa uma ameaça significativa para a atividade é necessário um planejamento eficaz para evitar ou conter processos erosivos (PHILLIPS; JONES, 2006).

O “Projeto de Geração de Subsídios Técnico-Científicos às Políticas Públicas de Proteção à Costa” PGEST (2011) revisou toda a informação acerca da erosão costeira e assuntos correlatos disponíveis para Pernambuco. Neste foram registrados 173 estudos realizados no litoral, entretanto poucos com o principal objetivo voltado para a erosão costeira, e nenhum com abrangência estadual.

## 1.2 OBJETIVOS

### *1.2.1 Objetivo Geral*

Como foi descrito por (OLSEN, 2003) identificar o problema é o primeiro estágio para o desenvolvimento de bons planos de gerenciamento costeiro. Com base nisso o objetivo deste estudo foi determinar o estado atual de erosão em todo o litoral do estado de Pernambuco.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

O presente capítulo apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Delimitar a posição da linha de costa atual (2014) de Pernambuco;
- Definir os indicadores visuais que caracterizam o processo erosivo em Pernambuco;
- Mapear os indicadores ao longo do litoral;
- Definir graus de intensidade de erosão;

---

<sup>1</sup> Disponível em: [http://www.turismo.gov.br/turismo/o\\_ministerio/secretaria\\_politicas/](http://www.turismo.gov.br/turismo/o_ministerio/secretaria_politicas/)

- Classificar a erosão costeira no estado de Pernambuco.

### 1.3 ÁREA DE ESTUDO

O estado de Pernambuco está localizado na região nordeste do Brasil, cuja capital é Recife, um dos 13 municípios que compõe o litoral do estado (fig. 1.1). A região litorânea possui clima tropical do Atlântico, com uma temperatura média anual de 24°C e precipitação anual de cerca de 2.000 mm predominantemente de Março a Setembro, e um período de seca dominante no resto do ano (Melo, 1958). Nessa área é possível identificar somente duas estações climáticas ao longo do ano definidas pelo período de chuva.

Segundo dados da Diretoria Brasileira de Hidrografia e Navegação - DHN, a maré no litoral de Pernambuco é classificada como mesomaré, com amplitude média de 1,67 m, podendo chegar até 2,8 m durante marés equinociais. O período é de 12,42 horas e resulta principalmente de forçantes astronômicas, uma vez que a maré meteorológica não tem efeito significativo na costa (FINEP/UFPE, 2009).

Uma característica morfológica típica ao longo deste trecho do litoral brasileiro são os arenitos de praia (*beachrock*) paralelos à costa formados a cerca de 6.000 anos atrás, no período Holoceno. As águas costeiras do nordeste do Brasil favorecem a formação de recifes de arenito devido a supersaturação de carbonato de cálcio, a água do mar com temperatura próxima dos 27°C e do sistema de mesomaré. Estes fatores permitem a precipitação de carbonato de cálcio que age como um cimento que agrega o sedimento da praia formando uma rocha sedimentar (FERREIRA JÚNIOR et al., 2011).

Os arenitos formam uma paisagem única, permitindo o desenvolvimento de recifes de corais sobre a rocha, que têm uma importância significativa para o turismo e para a proteção da zona costeira (DOMINGUEZ et al., 1990).

O ambiente praial é naturalmente complexo e sensível e, além disso, tem suportado um forte crescimento urbano, sendo a área de maior densidade demográfica do estado, concentrando 56% da população urbana de Pernambuco<sup>2</sup>. É também nessa área que se encontra as principais atividades econômicas, industriais, de recreação e turismo, e conseqüentemente os problemas delas decorrentes.

---

<sup>2</sup> Segundo o Censo 2010 realizado pelo IBGE, disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br/>

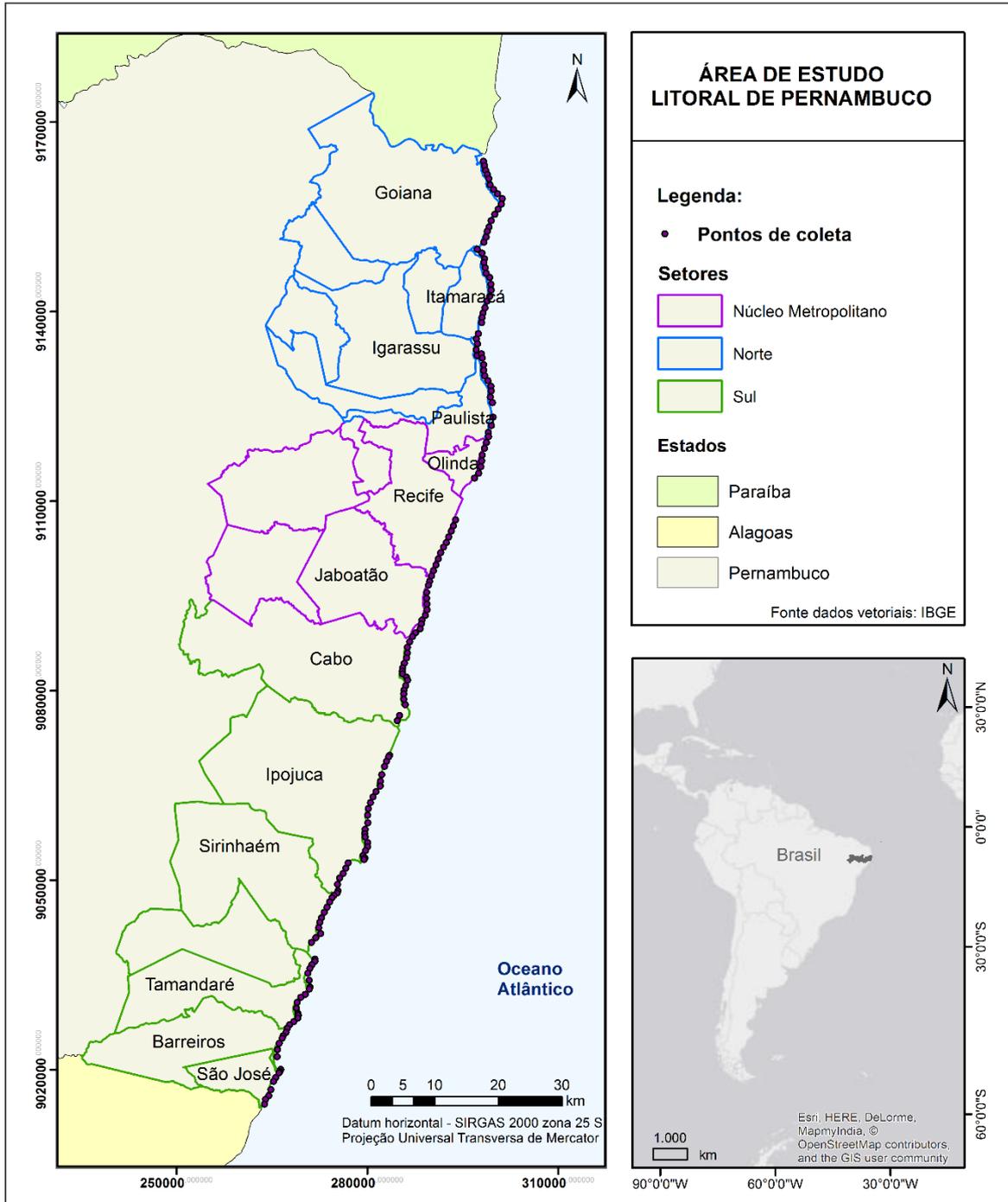
Os resultados ao longo desse estudo serão apresentados em relação à três setores da zona costeira, segundo a definição do Plano Nacional do Gerenciamento Costeiro (BRASIL, 2004), sendo:

- Setor Norte: Goiana, Itapissuma, Itamaracá, Igarassu, e Paulista;
- Núcleo Metropolitano: Recife, Olinda, Jaboatão dos Guararapes;
- Setor Sul: Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Sirinhaém, Tamandaré, Barreiros e São José da Coroa Grande.

A metodologia para determinar a situação da erosão costeira foi aplicada nos 187 km do litoral de Pernambuco. Para padronizar a logística de coleta de dados foram estabelecidos 174 pontos ao longo do litoral distantes cerca de 1 km um do outro (fig. 1.1).

Posteriormente, os dados coletados de forma pontual foram extrapolados em 500 m lateralmente formando um segmento de 1 km. A integração dos 174 segmentos cobre a linha de costa completa.

Figura 1.1 - Localização da área de estudo e dos 174 pontos de coleta.



Fonte: o autor.

## 1.4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste estudo para determinar as condições do litoral de Pernambuco em relação à erosão costeira foi baseada em indicadores ambientais obtidos através

de observação em campo. Sendo que indicadores são parâmetros utilizados para avaliar condições, processos ou desempenho de um determinado objeto de estudo. Quando aplicados à questão ambiental seu uso pode fornecer informações sobre as condições do meio ambiente e proporcionar suporte à tomada de decisão (MMA, 2007).

#### *1.4.1 Linha de costa*

A da posição da linha de costa (LC) é no limite que separa o terreno seco da área marinha. O limite da LC é aplicada na gestão costeira, como uma diretriz para estabelecer os planos de uso e ocupação do solo na zona costeira (FREIRE; ZAMBONI; MIGUENS, 2004).

Não existe um consenso quanto o melhor método para definir a LC, devido à diversidade de tipos de costa, diferentes propósitos de uso e as limitações das técnicas de observação e dados. Alguns países adotam uma metodologia padrão de acordo com seus sistemas jurídicos e a compreensão dos direitos na zona costeira (LIU et al., 2014).

Há uma série de fatores que influenciam a posição da LC, como, por exemplo, a amplitude de maré, ondas de tempestade, variações sazonais e alterações antrópicas na costa. Considerando estes fatores, alguns pesquisadores defendem a ideia de que a LC é definida com precisão quando resulta da média de várias medições ao longo de um ano. Entretanto para muitos locais não existem dados que permitam a aplicação desta técnica. Por isso a LC é geralmente definida através de uma medição efetuado no período que melhor representa as condições da LC média (LIU et al., 2014).

No Brasil a LC é definida como a marca da preamar de sizígia, ou seja, o limite entre a areia seca e areia úmida (no caso de praias arenosas) no período mais alto da maré (FREIRE; ZAMBONI; MIGUENS, 2004). A execução do mapeamento da LC de Pernambuco foi realizada por uma parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco, por meio dos Departamentos de Oceanografia e de Engenharia Cartográfica, da Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco, e da Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco, na forma de um projeto intitulado “Atlas da Vulnerabilidade Costeira de Pernambuco”, com apoio do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e do Ministério do Meio Ambiente.

Para esse estudo a LC foi determinada em um período de maré de sizígia equinocial, no mês de março de 2014. Esse mês, segundo dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação, apresentou as maiores amplitudes de maré do ano, chegando a 2,7 m. O trabalho de campo foi

realizado durante as duas marés de sizígia do referido mês, uma vez que foram necessários 10 dias para percorrer todo o litoral de Pernambuco. Sendo os dados foram coletados somente durante a maré baixa, porque em muitos locais, durante a maré alta não é possível trafegar com o quadriciclo.

O método utilizado foi a coleta de dados em campo, delimitando a marca de umidade deixada na areia ou a marca deixada por algas marinhas, e em locais onde não foi possível identificar uma das marcas citadas foi seguido, a base das dunas ou falésias, a primeira linha de vegetação ou de urbanização (fig. 1.2a-c).

Figura 1.2 - a) Limite areia seca e areia úmida; b) Linha de vegetação; c) Linha de urbanização; d) Veículo quadriciclo utilizado no levantamento com antena do GNSS.



Fonte: o autor.

Nos 166 km de praias arenosas, a LC foi delimitada com o uso de um equipamento posicionamento global (*GNSS – Global Navigation Satellite Systems*) através de levantamentos geodésicos usando o sistema americano GPS (*Global Positioning Systems*) e o sistema russo GLONASS (*Global Navigation Satellite System*). O equipamento foi instalado em um quadriciclo com motor de 250 cilindradas da marca Shineray (fig. 1.2d).

O GNSS operou em modo cinemático, coletando dados de latitude e longitude a cada 5 segundos, com pós processamento pelo método de pontos de posicionamento preciso (PPP), com precisão de 5 cm. Esses dados foram processados no Laboratório de Cartografia Costeira

(LaCCost) do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE, através do software Leica GeoOffice® 8.2, gerando um produto final no formato *shape*, com dados georreferenciados com coordenadas UTM e datum SIRGAS 2000 zona 25S.

Os demais 21 km que compõe a totalidade do litoral pernambucano, são formados por costões rochosos e foz de rios. Esses ambientes por serem de difícil acesso foram digitalizados a partir de imagens de satélite, também pelo Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE.

#### *1.4.2 Indicadores visuais de erosão*

A erosão costeira causa diversos impactos na praia, tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais (BUSH et al., 1999; FERREIRA et al., 2006; SAYE et al., 2005; SOUZA, 2009a). Neste estudo a erosão foi determinada através de dez impactos visuais, baseados na descrição de Souza (2009a) de indicadores de erosão encontrados no litoral de São Paulo, e que conclui ser os mais comumente encontrados no litoral brasileiro em geral (tab. 1.1).

Em cada um dos 174 pontos de coleta foi observado e registrado a presença ou a ausência de cada um dos indicadores. Em todos os pontos de observação foram registradas imagens para posterior análise e averiguação da tabela preenchida no campo.

Os dados coletados foram agrupados em quatro grupos de erosão. O primeiro grupo, de intensidade “nula” de erosão, é formado pelas praias que não possuem nenhum dos indicadores analisados; o segundo grupo, de intensidade “baixa”, são praias com a presença dos indicadores I, II e III; o terceiro grupo, de intensidade “moderada” é formado pelas praias que apresentam os indicadores IV, V, VI e VII, podendo apresentar ou não os indicadores do grupo de baixa intensidade; e o quarto grupo, de intensidade “alta”, é formado por praias que apresentam os indicadores VIII, XI e X, podendo apresentar ou não os indicadores do grupo de baixa e moderada intensidade (tab. 01 e fig. 1.2).

Estes grupos foram definidos com base na definição do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, por meio da resolução nº 001, que define que alterações antrópicas, nas condições estéticas do meio ambiente é considerado um impacto visual.

Áreas urbanas com infraestrutura próxima da linha de costa, principalmente com danos na estrutura representam os segmentos com alta intensidade de erosão. Por outro lado, áreas com a urbanização a uma distância segura da linha de costa (33 metros segundo a lei nº 9.760)

com indicadores que representam, na maior parte, impactos ecológicos, foram classificadas como tendo intensidade moderada de erosão. Em áreas com a presença de indicadores como erosão na base das dunas foram classificadas como áreas com erosão baixa, isso porque podem ser resultado de uma variação cíclica do perfil e não necessariamente de um processo erosivo.

Tabela 1.1 - Indicadores de erosão presentes em cada classe de intensidade.

		Baixa	Moderada	Alta
I	Presença de vegetação rasteira de duna ou restinga soterradas ou com raízes expostas	X	X	X
II	Presença de escarpa erosiva nas dunas	X	X	X
III	Concentrações de minerais pesados na face da praia	X	X	X
IV	Presença de vegetação superior com raízes expostas, caídas na face de praia, dentro da água		X	X
V	Marcas de erosão na base de muros residenciais		X	X
VI	Pós-praia estreita ou inexistente devido à inundação pelas preamares de sizígia		X	X
VII	Presença de obras de proteção costeira não estruturais		X	X
VIII	Presença de obras de proteção costeira estruturais			X
IX	Destruição de estruturas artificiais construídas sobre os depósitos marinhos			X
X	Restos de construção na face de praia			X

Fonte: Adaptado de Souza 2009a.

Os resultados da classificação foram representados em mapas da situação atual de erosão para cada um dos três setores da zona costeira de Pernambuco, definidos na área de estudo.

Figura 1.3 - Exemplo dos indicadores utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira em Pernambuco (ver tabela 1.1).



Praia de Mamucabas, Ipojuca



Praia do Cupe, Ipojuca



Praia de Gamboa, Ipojuca



Praia de Catuama, Goiania



Praia do Cupe, Ipojuca



Praia de Serrambi, Ipojuca



Ponta de Pedra, Goiania



Praia do Farol, Olinda



Praia de Catuama, Goiania



Enseada dos Golfinhos, Itamaracá

Fonte: o autor.

## 1.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1.5.1 Posição da linha de costa em 2014

Os dados coletados pelo *GNSS* gerou a delimitação da linha de costa de Pernambuco. Essa LC deu início de forma oficial ao monitoramento da mesma no Estado de Pernambuco, como previsto na Lei de Gerenciamento Costeiro do Estado de Pernambuco (UFPE; SEMAS, 2014).

O levantamento da LC usando o método cinemático *GNSS* apresentou algumas vantagens como a possibilidade de produzir dados consistentes para análises temporais, ser aplicado em campo por uma equipe reduzida, ter baixo custo operacional e ser rápido para pequenas áreas. Entretanto as principais desvantagens constatadas foram a dificuldade de acesso a zonas costeiras de mangues, ou costões rochosos, e o longo tempo de coleta, uma vez que neste estudo, os dados para a delimitação da LC foram coletados com uma velocidade média de cerca de 17 km por dia.

A LC de 2014, em geral, está muito próxima dos dados vetoriais disponibilizados pela Agência Brasileira de Geografia e Estatística, com base em cartas planialtimétricas e fotografias aéreas. Entretanto há diversos pontos que diferem significativamente, chegando a ter 500 m de diferença. Essas diferenças observadas são por variações temporais na posição da linha de costa, e também pelo fato do IBGE trabalhar com a vetorização dos limites em escala maior, bem por utilizar uma metodologia diferente.

LIU et al., 2014 através de uma pesquisa de revisão sobre os diversos métodos de determinação da LC, concluiu que levantamentos de campo utilizando métodos cinemáticos com *GNSS* são considerados a ferramenta determinação mais precisa, mas também um dos mais demorados. Enquanto levantamento feitos com imagens de alta resolução reduzem esforços e tempo de trabalho, porém os resultados têm menor precisão.

A LC delimitada neste estudo serviu como base para representar a posição dos indicadores de erosão. Bem como no Capítulo 2, que foi utilizada para representar a posição dos segmentos com vulnerabilidade, além de ter sido utilizada para calcular a variação da LC entre os anos de 2005 e 2014, como será mostrado na sequência da dissertação.

### 1.5.2 Indicadores

Todos os indicadores descritos na metodologia foram encontrados em campo (tab. 1.2). Além deles também foram encontrados em alguns pontos outros possíveis indicadores de erosão tais como: exumação de arenitos de praia, leques de sobrelavagem e escarpa na berma formada durante a maré alta.

Dentre os indicadores propostos quatro deles foram mais frequentemente encontrados, o primeiro foi a escarpa em dunas, que apresentou alturas variando desde poucos centímetros até mais de 2 metros. Outro foi a presença de raízes expostas de coqueiros, ou caídos na praia, além de arbustos e árvores de mangue localizadas abaixo da linha de maré (fig. 1.4).

Figura 1.4 - Indicadores de erosão costeira; a) Escarpa erosiva, Praia do Paiva; b) Árvores caídas, Praia da Gamboa; c) Ausência de pós-praia, Praia do Porto; d) Obra de proteção costeira, Praia do Farol.



Fonte: o autor.

Outro foi o pós-praia inexistente. A alta frequência deste indicador em parte é devido a alteração das praias com construções sobre o perfil que impedem a dinâmica praial e o natural retrocesso da linha de costa em decorrência do aumento do nível do mar (NICHOLLS, 2003). Outra razão é a morfologia predominante das praias de Pernambuco, que são dominadas por maré, o que sugere a ocorrência de um padrão refletivo durante a preamar e outro dissipativo na baixamar (MALLMANN et al., 2014). Como foi observado em campo o limite máximo das

ondas de preamar, com o padrão morfológico refletivo, é seguido imediatamente por um terreno de baixo relevo e vegetação rasteira, sem a presença de pós-praia e de dunas, caracterizando um estágio morfológico e não uma evidência de erosão.

Tabela 1.2 - Indicadores de erosão e o número de vezes encontrados no campo.

Indicadores de erosão	nº de pontos observados
Nenhum	70
I Presença de vegetação rasteira de duna ou restinga soterradas ou com raízes expostas;	27
II Presença de escarpa erosiva nas dunas;	45
III Concentrações de minerais pesados na face da praia;	17
IV Presença de vegetação superior com raízes expostas, caídas na face de praia, dentro da água;	40
V Marcas de erosão na base de muros residenciais;	5
VI Pós-praia inexistente devido à inundação pelas preamares de sizígia;	38
VII Obras de proteção costeira não estruturais	4
VIII Obras de proteção costeira estruturais	40
IX Destruição de estruturas artificiais construídas sobre os depósitos marinhos;	7
X Restos de construção (por exemplo: pedaços de ferro, tijolo, telhas) na face de praia.	16

Fonte: o autor.

Outro indicador encontrado com frequência foi a presença de obras costeiras estruturais como quebra-mar, espigão, muro e enrocamento. Grande parte destas obras são pontuais, executadas pelos proprietários de casas que veem seu patrimônio em risco e tentam protegê-lo. Um problema já citado de obras estruturais, principalmente sem avaliação de instalação, é que estas podem transferir o problema para a praia adjacente, gerando assim um efeito cascata (PHILLIPS; JONES, 2006).

O indicador menos observado foi a erosão na base de muros residenciais. Uma possível justificativa pode ser a difícil identificação deste indicador, e o fato da coleta de dados ter sido realizada no final verão, que é um período de maior acreção nas praias (BIRD, 1996).

### *1.5.3 Classes de Intensidade*

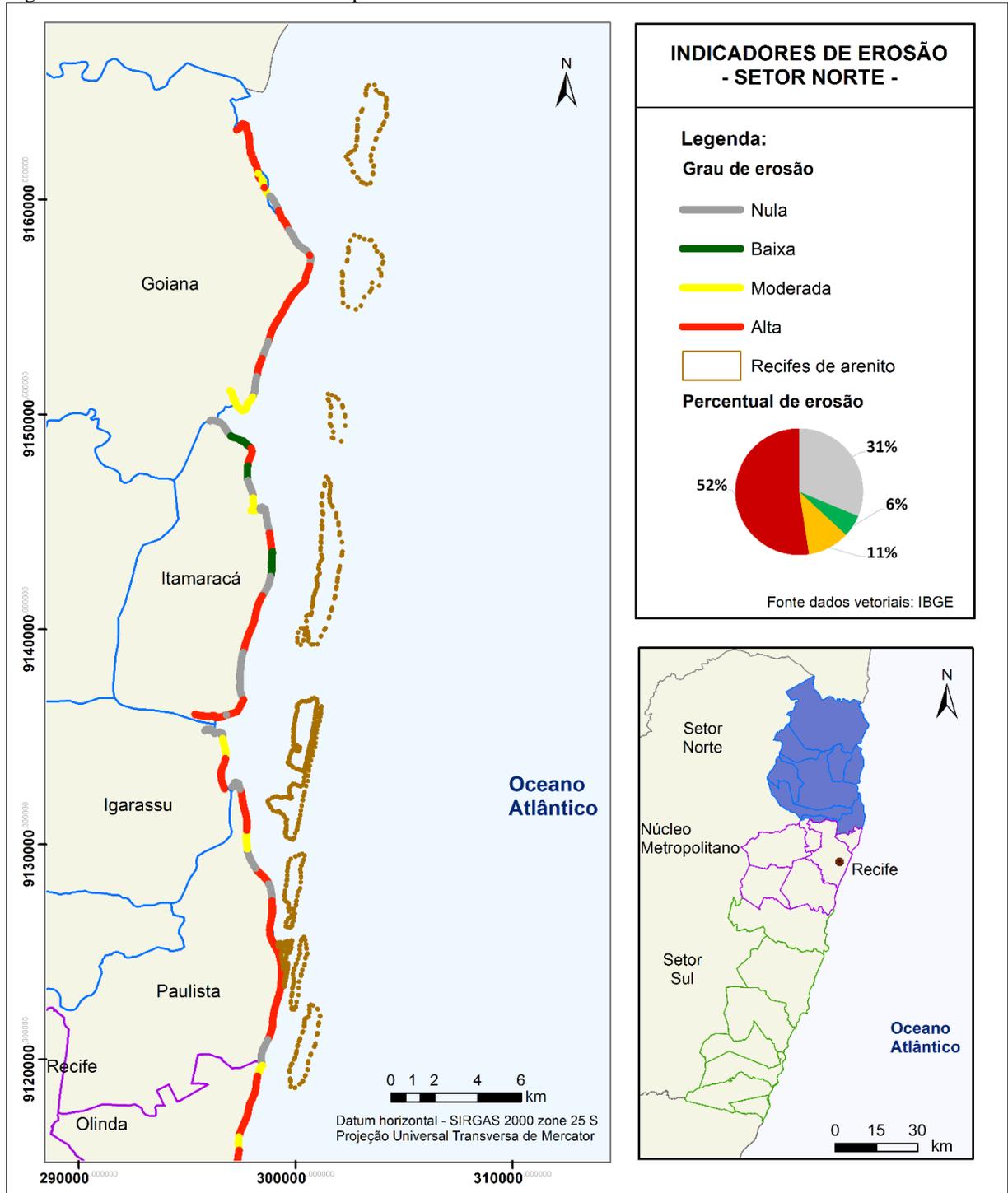
Os resultados foram separados em três classes de intensidade de erosão e mais uma contendo os segmentos de praia que não apresentaram nenhum dos indicadores analisados. Como é o caso de 42% (73 km) do litoral de Pernambuco aonde não foi identificadas evidências de erosão. Outros 11% (18 km) apresentaram indicadores de baixa intensidade de erosão, 18% (31 km) apresentaram indicadores de moderada intensidade de erosão e os demais 29% (50 km) apresentaram indicadores de alta intensidade de erosão.

O Setor Norte apresentou os resultados mais negativos entre os três setores (fig. 1.5). Este apresentou 31% (17 km) sem evidências de erosão que estão distribuídos ao longo dos quatro municípios, principalmente no litoral da Ilha de Itamaracá e próximo da desembocadura dos rios que cortam este setor. Isso ocorre porque a foz de rios são locais de deposição de sedimentos, o que geralmente caracteriza processos de acreção na praia das duas margens do rio (WRIGHT; THOM; HIGGINS, 1980).

Outros 6% (3 km) foram classificados com baixa intensidade de erosão, que estão localizados em três pontos de coleta na parte norte de Itamaracá. Isso ocorre porque há nenhuma ou pouca alteração antrópica nestas áreas do Setor Norte, e como já foi dito a metodologia utilizada destaca as interações do processo erosivo com a infraestrutura. Por tanto áreas menos urbanizadas sempre terão menor intensidade de erosão. 11% (6 km) apresentou intensidade moderada de erosão, localizados em pontos isolados ao longo de todo o setor. Os demais 52% (28 km) apresentaram intensidade alta de erosão. Localizados principalmente nos municípios de Goiana e Paulista, o primeiro possui diversos tipos de obra de proteção costeira ao longo de praticamente toda a costa, algumas obras rígidas, como muros de concreto e enrocamentos, e algumas obras de estruturas mais simples como espigões feitos de troncos de coqueiros, muros com sacos de areia, e armadilhas para fixar areia transportada pelo vento. Essas obras podem ser eficientes, entretanto a forma como foram construídas, com dimensões e espaçamento inapropriados e a falta de manutenção inviabilizaram a finalidade de conter a erosão. O segundo município, Paulista, foi classificado com alta intensidade de erosão porque possui intervenções

antrópicas em toda a costa, com espigões, quebra-mares, enrocamentos e muros de concreto. Estas obras executadas em Paulista garantem a proteção da infraestrutura da cidade, entretanto não conservam a praia. Na faixa que possui quebra-mares a circulação foi alterada propiciando o desenvolvimento de tómbolos permanentes e não permanentes. As pequenas baías formadas entre tómbolos consecutivos, é prejudicial para o turismo de praia, porque pode diminuir a qualidade da água tornando-a imprópria para banho (BYAPPANAHALLI et al., 2015; PEREIRA et al., 2003) (Fig. 1.5).

Figura 1.5 - Grau de erosão nos municípios do Setor Norte de Pernambuco.



Fonte: o autor.

No Núcleo Metropolitano os resultados são mais negativos do que a média do estado todo (fig. 1.6). Este apresentou 43% (12 km) do litoral sem nenhum dos indicadores de erosão analisados, localizados na parte sul do município de Olinda, na Praia del Chifre, que é uma

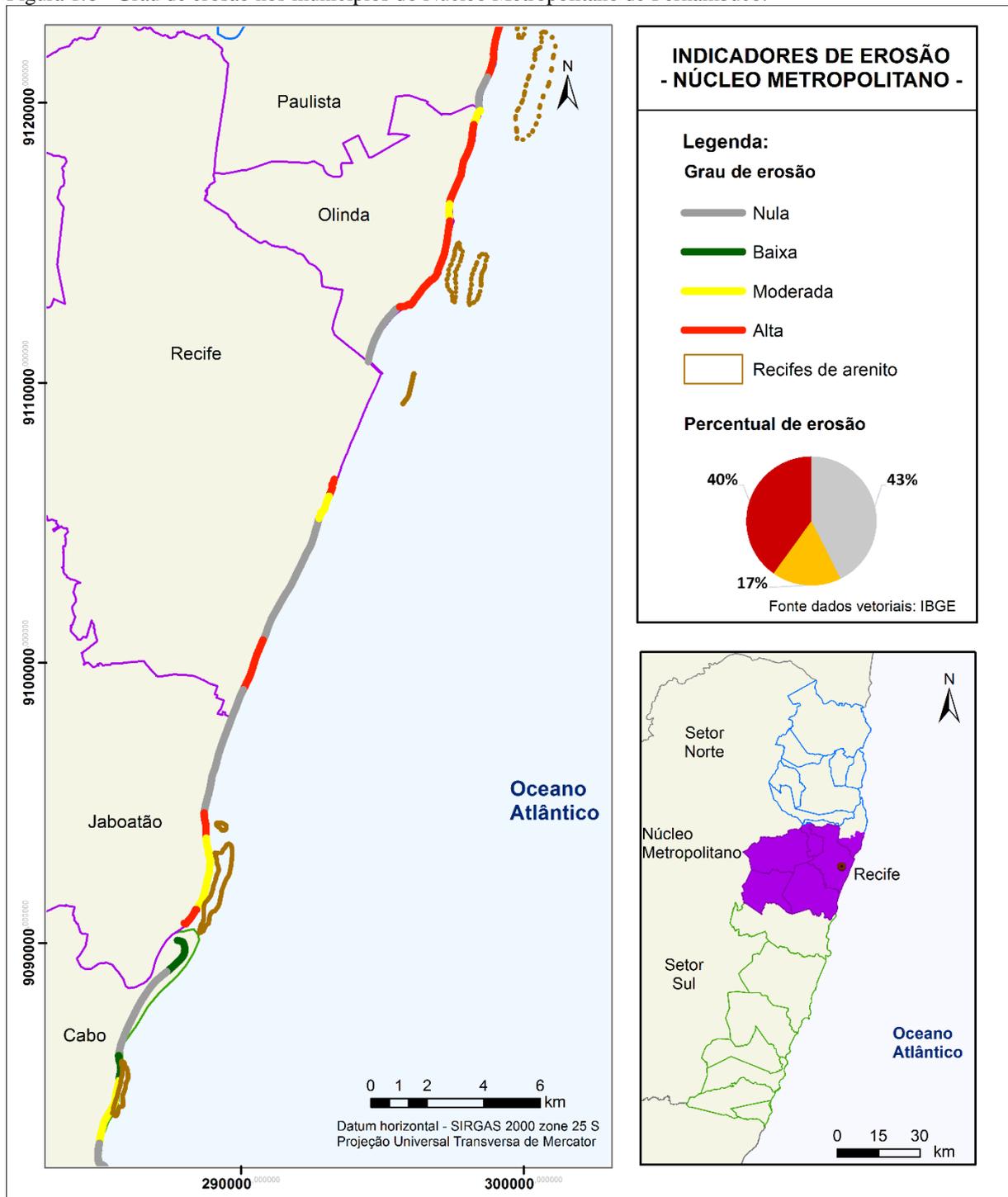
estreita barreira entre o mar e o Rio Beberibe, é uma região desabitada e conservada, assim como em trechos das praias do Pina e Boa Viagem em Recife, e na Praia de Piedade em Jaboatão dos Guararapes, que segundo o IBGE é a área com a maior densidade populacional do estado. Entretanto apresentam uma praia larga, com árvores e dunas vegetadas em alguns trechos. Isso mostra que a praia apresenta um manejo adequado, que proíbe a destruição das dunas e remoção da vegetação, bem como proíbe qualquer tipo de construções na praia (RECIFE, 1996). O mesmo foi concluído por COSTA et al., 2008 que classificou esta área, sem evidências de erosão, como uma praia de boa qualidade sócio ambiental.

Outros 17% (5 km) apresentaram intensidade moderada de erosão. Entre estes estão dois pontos em Olinda localizados próximos de obras de proteção costeira, entretanto a praia parece estar estabilizada, com uma faixa de praia larga, vegetação de dunas e coqueiros. Outro ponto está localizado no norte de Recife, que é uma área com recifes de arenito na face da praia. A presença dessas rochas altera a hidrodinâmica local e a disponibilidade de sedimentos inconsolidados na praia, podendo, em alguns casos, causar erosão costeira, além de inviabilizar o acesso de banhistas ao mar (VOUSDOUKAS; VELEGRAKIS; PLOMARITIS, 2007). Um trecho de da Praia de Piedade também apresenta intensidade moderada e foi enquadrado nesta classe por ser uma praia engordada, que é uma obra de proteção costeira não estrutural, entretanto não apresenta nenhum dos demais indicadores analisados.

Os outros 40% (11 km) são de praias com intensidade alta de erosão. Praticamente toda a orla do município de Olinda não possui pós-praia mesmo na maré baixa e é fixada por enrocamento, além de possuir uma sucessão de 38 espigões curtos (MANSO et al., 2006). PEREIRA et al., 2003 realizaram uma pesquisa sobre a percepção dos usuários de algumas praias de Olinda e concluíram as praias não são atrativas, por causa do impacto visual das obras de proteção e a baixa qualidade da água, consequência da circulação reduzida, como ocorre no município de Paulista. Segundo o Ministério do Turismo, Olinda é uma das cidades mais procuradas do país para o turismo interno por ser uma cidade declarada patrimônio histórico e cultural da humanidade pela UNESCO, desde 1982, considerando isso pode-se concluir que a erosão na praia não afeta consideravelmente o setor da economia local baseada no turismo, entretanto, este poderia ser mais desenvolvido se as praias fossem atrativas. Recife e Jaboatão dos Guararapes também apresentam alguns pontos de intensidade alta de erosão que são resultados da presença de enrocamentos e ausência de pós-praia no trecho sul de Recife, e quebra-mares no segundo município (fig. 1.6).

O Núcleo Metropolitano de Recife tem um longo histórico de erosão, principalmente na orla de Olinda (NEVES; MUEHE, 1995). A partir da década de 90, houve um crescimento do número de obras construídas ao longo do litoral com o intuito de reduzir a erosão, entretanto a maioria das obras não foi bem sucedida e inclusive intensificou o processo erosivo (FINEP/UFPE, 2009). Por estes motivos era esperado encontrar evidências de erosão intensa neste setor. No entanto os resultados mostraram condições relativamente positivas na sua maior extensão, principalmente devido à conservação de uma praia bem desenvolvida em parte de Recife, e da obra de engordamento realizada em Jaboatão dos Guararapes, onde também foram removidas algumas obras estruturais de proteção, garantindo uma aparência mais harmoniosa à praia. Um outro fator que necessita ser ressaltado, é o comportamento de acreção natural entre os anos de 2009 e 2012 em alguns trechos da Praia de Boa Viagem (MENDONÇA et al., 2014), que é correspondente à área que não apresentou evidências de erosão no presente estudo.

Figura 1.6 - Grau de erosão nos municípios do Núcleo Metropolitano de Pernambuco.



Fonte: o autor.

O Setor Sul é o setor mais positivo em relação à média do estado (fig. 1.7). Neste 49% (45 km) das praias não apresentaram nenhuma evidência de erosão, localizadas ao longo de todo o setor. Estas áreas possuem pouca ou nenhuma urbanização, portanto não sofrem a

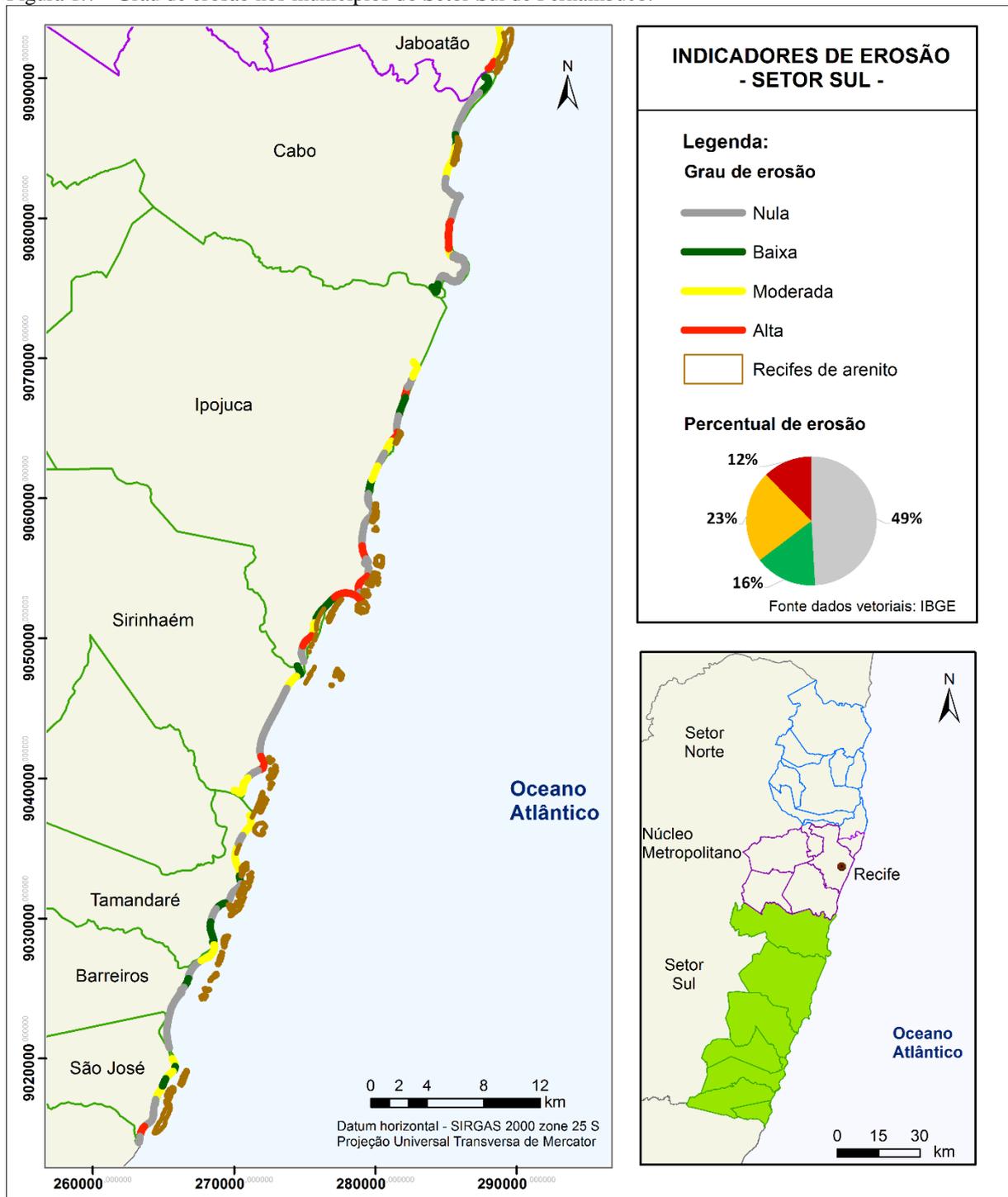
pressão antrópica que podem desencadear erosão. Com estas mesmas características outros 15% (14 km) apresentaram intensidade baixa de erosão.

Ao longo de todo o Setor Sul, cerca de 23% (21 km) apresentaram intensidade moderada de erosão, a urbanização nestes locais é composto principalmente por casas residenciais e pequenos comércios. A erosão moderada nestes locais foi principalmente devido à queda de árvores na face de praia e coqueiros com raízes expostas, sendo que em mais de 70% das praias com essa evidência também apresentou escarpa nas dunas. Na porção norte do município de Ipojuca, próximo à Praia de Porto de Galinhas é aonde estão localizados os maiores resorts do estado, aí existem alguns pontos de erosão moderada e dois pontos de erosão alta. Outro local turístico nessa categoria é o norte do município de Tamandaré. MALLMANN & ARAÚJO (2010) encontraram resultados semelhantes neste município e constataram que houve retrogradação da linha de costa no norte de Tamandaré.

Os demais 12% (11 km) do litoral compreendem as praias com intensidade alta de erosão. Localizados principalmente na parte sul de Ipojuca, estas não apresentam pós-praia, e todas possuem obras de proteção costeira, sendo que algumas já estão danificadas. Outro ponto é no município de Cabo de Santo Agostinho, na Praia Enseada dos Corais, que não possui pós-praia e os muros, construídos para proteger casas, se encontram danificados. Assim como na Praia do Pina, no norte de Recife, a Praia de Enseada dos Corais possui formações recentes de recifes de arenito na face da praia, o que pode ter intensificado o processo erosivo.

Evidências de erosão da praia, mesmo as classificadas como moderada neste trabalho, tornam a praia menos atrativa para turistas (PHILLIPS; JONES, 2006). Se a praia apresenta um aspecto artificial com obras rígidas de proteção, o turismo na região é reduzido drasticamente, as propriedades são desvalorizadas e conseqüentemente o comércio local é prejudicado. Por isso, nestas áreas, onde a comunidade necessita da renda proveniente do turismo, as técnicas de manejo devem prezar a conservação da paisagem natural, utilizando métodos não estruturais como reconstrução de dunas e engordamento (ARIZA et al., 2014; BERRY; FAHEY; MEYERS, 2014; LOZOYAA; SARDÁA; JIMÉNEZ, 2014). Portanto nas praias que já apresentam evidências moderadas de erosão, deve-se desenvolver um manejo adequado para manter a paisagem natural do ambiente, garantir o espaço de recreação dos moradores, além de manter o principal setor econômico destes locais, o turismo (fig. 1.7).

Figura 1.7 - Grau de erosão nos municípios do Setor Sul de Pernambuco.



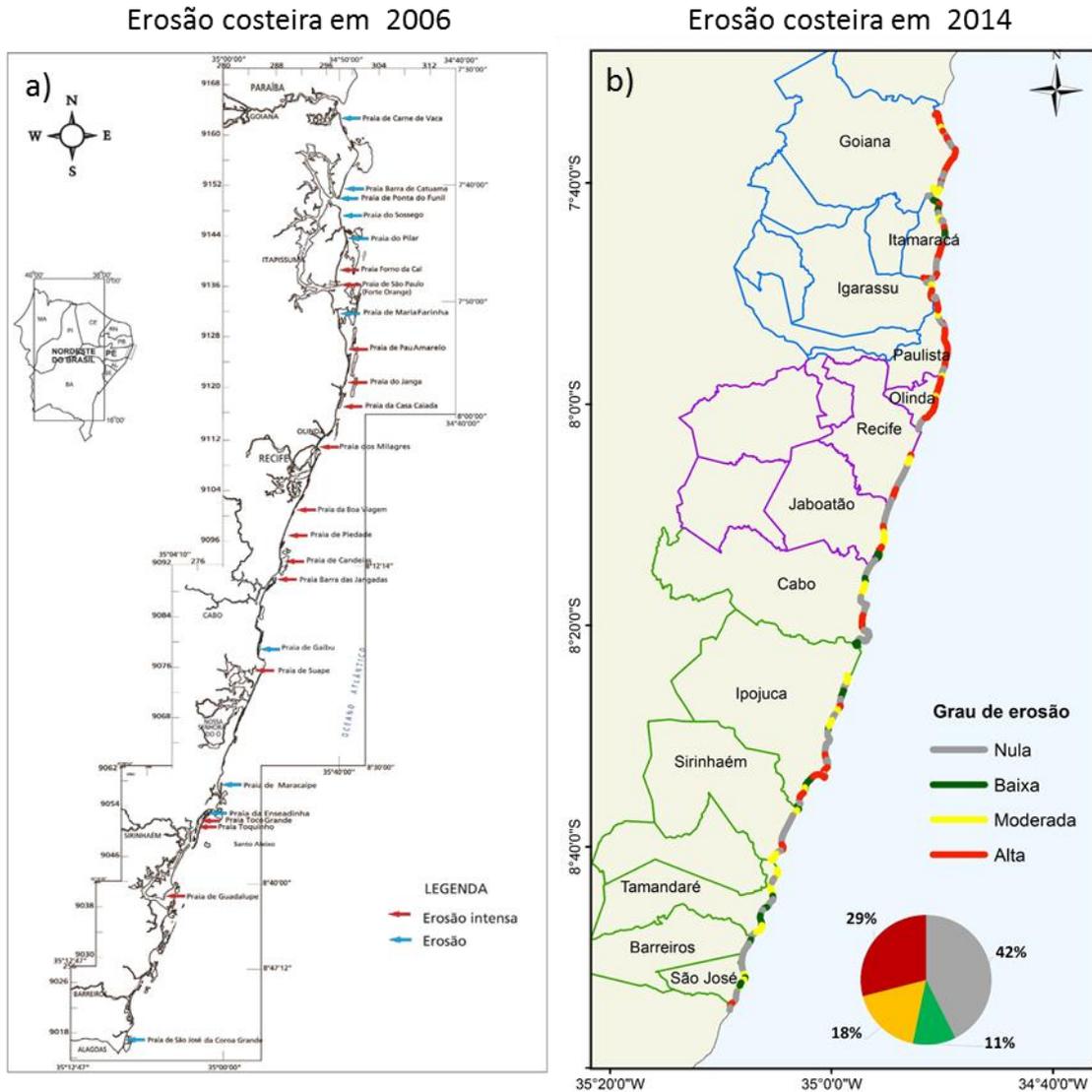
Fonte: o autor.

Em 2006 o Ministério do Meio Ambiente publicou um estudo definindo a situação da erosão costeira no estado de Pernambuco, analisando 24 praias ao longo do litoral (fig. 1.8). Estas praias foram classificadas com grau de erosão moderada e alta, utilizando dados de variação de LC, danos a estruturas antrópicas, presença de obras de proteção, escarpa erosiva

na base das dunas, exposição de arenitos na face de praia. A conclusão foi que cerca de 1/3 das praias apresentavam erosão, decorrente de diversas causas de caráter natural e antrópico, sendo que os autores consideram as interações antrópicas o fator mais atuante na medida que acelera processo erosivo, impedindo as praias de atingir o balanço sedimentar (MANSO et al., 2006).

Apesar das metodologias aplicadas nos dois estudos terem sido diferentes, os resultados do estudo de 2006 foram semelhantes aos resultados do presente estudo. O local que mais apresentou mudanças foi o litoral do município de Goiana que está, atualmente, com erosão mais intensa. Outra diferença constatada foi nas praias de Piedade e Boa Viagem no Núcleo Metropolitano, que apresentaram menores graus de erosão em 2014, isso pode ser em decorrência do um período de acreção citado anteriormente, e das obras de engordamento realizadas em Piedade. As praias do Setor Sul não apresentaram alterações significativas nos processos erosivos.

Figura 1.8 - Situação da erosão costeira; a) No ano de 2006; b) No ano de 2014.



Fonte: a) MANSO et al., 2006; b) o autor.

Um fato preocupante com relação as evidências de erosão no litoral de Pernambuco é o número de obras de proteção costeira realizadas de forma individual, pelos proprietários de imóveis. Tais obras, seguramente, foram realizadas sem a assistência adequada de um especialista em processos e engenharia costeira, que fariam uma análise de todo o ambiente para definir a melhor solução, podendo resultar na intensificação do processo erosivo no local, ou transferi-lo pra as áreas próximas (VAN RIJN, 2011).

Nestes locais a melhor opção seria a intervenção do poder público ou uma parceria público privada e para contratação de profissionais especializados na área de erosão e proteção costeira para tentar compreender e solucionar o problema reduzindo os possíveis impactos negativos das obras de proteção.

## 1.5 CONCLUSÕES

Os indicadores ambientais presentes em maior número na zona costeira de Pernambuco foram: dunas com escarpa erosiva, presença de raízes expostas ou árvores caídas na praia, pós-praia inexistente e presença de obras de proteção costeira. Em cerca de 40% do litoral não foram encontradas evidências de erosão, enquanto os demais 60% apresentaram grau de erosão baixo, moderado ou alto. O Setor Norte apresentou os resultados mais negativos entre os três setores, o Núcleo Metropolitano apresentou resultados semelhantes à média do estado e o Setor Sul apresentou os resultados mais positivos.

A metodologia aplicada é baseada nos impactos visuais causados por processos erosivos na costa. Em áreas urbanas os impactos visuais são maiores, conseqüentemente o grau de erosão será maior do que em uma praia pouco urbanizada, ainda que possuam as mesmas taxas de erosão. Esta estratégia foi adotada porque o objetivo foi destacar, principalmente, os locais com maiores danos socioeconômicos. O Setor Sul possui cidades com baixa densidade demográfica e apresentou os resultados esperados, com a maioria do litoral com baixa grau de evidências de erosão. Já o Setor Norte que tem menor densidade demográfica que o Núcleo Metropolitano apresentou uma maior porcentagem do litoral com alto grau de impactos. Isso se deve à maior frequência de pequenas obras de proteção instaladas no Setor Norte.

Tendo em vista a escassez de dados de monitoramento da linha de costa de Pernambuco que poderia determinar de taxas de erosão, a metodologia aqui utilizada permitiu apontar as praias que carecem de atenção emergencial e outras que possuem um tempo maior para identificar a melhor solução para os problemas de erosão. Entretanto, a metodologia é passível de falhas pois avaliou somente uma condição momentânea, que pode ser modificada, por exemplo, entre as estações de seca e de chuva. Para otimizar os resultados seria interessante ser adicionado na metodologia um parâmetro de variação de linha de costa, que traduz o comportamento temporal da praia.

Os impactos gerados, nos 60% do litoral afetado pela erosão, podem afetar o cotidiano de pessoas que residem na zona costeira, e principalmente o setor econômico ligado ao turismo de praia. Uma vez que os turistas evitam praias com muitas obras estruturais de proteção costeira, praias com aspecto artificial, e praias com baixa qualidade de água.

Neste contexto a melhor solução para erosão costeira em cidades que têm a economia baseada no turismo, é investir em obras não estruturais de proteção. Seguindo o exemplo da

prefeitura de Jabotão dos Guararapes que contratou uma conceituada empresa internacional na área de engenharia costeira para estudar o caso da erosão na Praia de Piedade, optando posteriormente por realizar o engordamento da praia, que irá valorizar os serviços de atendimento aos turistas.

Um fato observado neste estudo foram as ações de proteção restringidas a obras pontuais sem considerar todo o sistema envolvido que poderá ser influenciado por tais obras. Essas obras pontuais deveriam ser desencorajadas para evitar a geração de novos problemas.

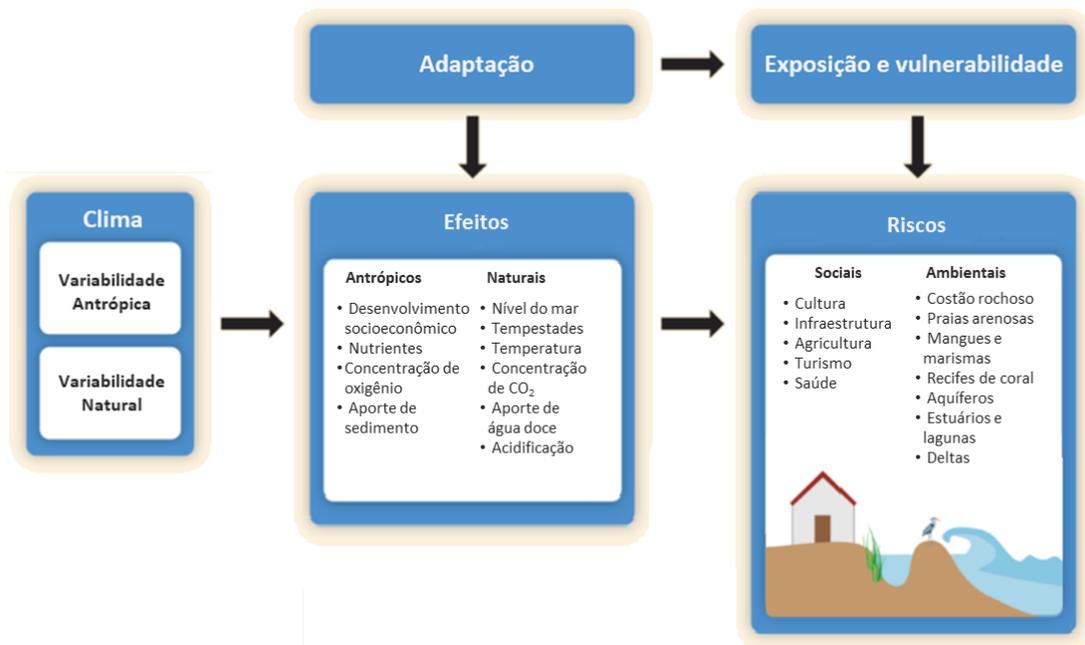
## CAPÍTULO 2

# VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM PERNAMBUCO, BRASIL

### 2.1 INTRODUÇÃO

O ambiente costeiro é composto por diversos ecossistemas como costões rochosos, praias, ilhas barreiras, dunas, lagunas, estuários, deltas, mangues, marismas e recifes de coral. Todos estes ambientes situados até a cota de 10 metros acima do nível do mar formam um dos sistemas mais ameaçados pelos potenciais impactos das mudanças climáticas (fig. 2.1). Dentre os impactos está o aumento do nível do mar, que segundo o Quinto Relatório de Avaliação (5AR), publicado em 2013 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) poderá variar, ao longo deste século, entre 0,26 e 0,55 m em um cenário otimista, e entre 0,45 e 0,82 m no cenário mais pessimista, de acordo com as projeções globais (IPCC, 2013).

Figura 2.1 - Relações entre as variações no clima, os efeitos causados na zona costeira pelas mudanças climáticas. As adaptações antrópicas realizadas nos ambientes podem modificar o grau de exposição ao risco de tais ambientes.



Fonte: modificado de Wong et al. 2014.

Fatores como a diminuição do aporte de sedimento, o aumento relativo do nível médio do mar (ARNMM) e da intensidade e frequência de eventos extremos (tempestades, ciclones e outros) e alterações no clima de ondas, decorrentes das mudanças climáticas, estão intimamente relacionados com processos de erosão nos ambientes costeiros (WONG et al., 2014).

### *2.1.1 Conceito de vulnerabilidade*

As mudanças climáticas podem provocar efeitos em longo prazo sobre os ecossistemas com consequências diretas sobre as comunidades humanas. Até mesmo pequenas alterações em decorrência das mudanças climáticas, resultam em níveis distintos de vulnerabilidade e consequentemente requer diferentes ações de manejo (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

Existem diversas metodologias para estimar a vulnerabilidade da zona costeira, e uma dificuldade encontrada pela comunidade científica é a definição de uma linguagem padrão para tratar diferentes abordagens metodológicas (LUNDGREN; JONSSON, 2012).

O conceito de vulnerabilidade aplicado neste trabalho refere-se à capacidade do ambiente em lidar com determinadas mudanças. Dessa forma a vulnerabilidade depende da exposição ao perigo, da sensibilidade e da capacidade de adaptação do sistema (IPCC, 2007).

Teoricamente a vulnerabilidade pode ser dividida em natural e socioeconômica. Sendo a primeira dependente de características físicas e biológicas do ambiente, enquanto a segunda é determinada pela densidade populacional, recursos econômicos, relações de poder, aspectos culturais, entre outros (BORUFF; EMRICH; CUTTER, 2005; CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003).

A determinação da vulnerabilidade é uma importante ferramenta do planejamento costeiro. Uma vez que esta pode aperfeiçoar tomadas de decisão, orientar planejamentos e gestão em áreas suscetíveis a algum perigo como, por exemplo, erosão costeira, inundações e mudanças climáticas (CASTILLO et al., 2012; THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000).

### *2.1.2 Justificativa*

A intensa urbanização da linha de costa juntamente com os efeitos da mudança climática já vêm causando alterações no litoral de Pernambuco. O principal efeito, inicialmente, observado é o aumento nas taxas de erosão (ZHANG; DOUGLAS; LEATHERMAN, 2004).

Ao longo dos últimos 60 anos, a ocupação da zona costeira cresceu desordenadamente, resultando, em muitos casos, na substituição de um ambiente natural com pequenas comunidades de pescadores, por extensas áreas residenciais e turísticas. A urbanização sem planejamento resultou em algumas construções em áreas sensíveis como o campo de dunas e o pós-praia (MANSO et al., 2006).

Em 2009 um estudo foi realizado na Região Metropolitana do Recife chamado Monitoramento Ambiental Integrado (MAI) o qual classificou 67% da área estudada como altamente vulnerável à erosão costeira (FINEP/UFPE, 2009). Posteriormente, um estudo de 2010 avaliou a vulnerabilidade à erosão do litoral sul de Pernambuco e constatou que 21% da área apresenta vulnerabilidade alta, que coincidem com os núcleos urbanos, sugerindo um controle predominantemente antrópico sobre a vulnerabilidade global (MALLMANN; ARAÚJO, 2010).

A partir desses resultados se mostrou necessária a realização de um estudo de vulnerabilidade, ao longo de toda a zona costeira de Pernambuco a fim de se ter conhecimento da situação atual de vulnerabilidade. Uma vez que estas informações são importantes para elaborar medidas de adaptação para evitar ou minimizar os impactos das mudanças climáticas na zona costeira.

## 2.2 OBJETIVOS

### 2.2.1 *Objetivo Geral*

O principal objetivo deste estudo foi identificar as áreas vulneráveis à erosão no litoral do estado de Pernambuco com a atual situação de hidrodinâmica e traçar uma relação com mudanças climáticas, que podem causar alterações no padrão de ondas e no nível médio do mar.

### 2.2.2 *Objetivos Específicos*

- Definir as principais variáveis que indicam a vulnerabilidade à erosão no litoral pernambucano;

- Definir a relevância de cada variável para a vulnerabilidade da região costeira;
- Determinar o grau de vulnerabilidade atual à erosão da zona costeira do estado de Pernambuco em escala regional.
- Relacionar mudanças climáticas previstas para a região nordeste do Brasil com possíveis alterações na vulnerabilidade à erosão em Pernambuco.

## 2.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Em geral, as metodologias disponíveis definem a vulnerabilidade de forma qualitativa e/ou quantitativa. A vantagem da abordagem qualitativa é a maior facilidade de obtenção de dados, enquanto a abordagem quantitativa tende a ser mais precisa. Neste capítulo serão mostradas brevemente as seguintes metodologias, com abordagens qualitativas, quantitativas e mistas: Metodologia do IPCC; Utilização de geoindicadores para avaliação de risco costeiro; Avaliação da vulnerabilidade ao aumento do nível do mar; Avaliação dinâmica e interativa da vulnerabilidade; Índice de vulnerabilidade costeira; Mapeamento da estabilidade geomorfológica.

### 2.3.1 Metodologia do IPCC (*The Common Methodology - CM*):

A Metodologia do IPCC (CM) proposta em 1991 estima a vulnerabilidade através da avaliação monetária das regiões possivelmente afetadas pela subida do nível do mar. Juntamente com a definição da vulnerabilidade social, o método também dispõe de um teste de custo-benefício para avaliar a opção mais vantajosa para mitigar os futuros impactos costeiros. As ações de respostas propostas estão concentradas em torno de três opções: realocar as construções vulneráveis, adaptar-se, ou proteger as edificações (VELLINGA; KLEIN, 1993). O CM é uma metodologia semiquantitativa e pode ser aplicada em escala regional e global.

### 2.3.2 Utilização de geoindicadores para avaliação de risco costeiro:

Metodologia desenvolvida por Bush *et al.* (1999) mostra que o uso de geoindicadores é uma boa forma de fazer uma rápida avaliação de risco. Especialmente em praias que não

possuem dados históricos suficientes para uma avaliação detalhada. Os parâmetros avaliados vão desde uma visão geral do local, como elevação do terreno, por exemplo, até condições específicas como a estabilidade e a configuração da costa. Assim como os estudos de vulnerabilidade, a determinação do risco costeiro fornece orientação para planos de manejo e mitigação. É uma metodologia qualitativa e pode ser aplicada em escala local e nacional (BUSH et al., 1999).

### *2.3.3 Avaliação da vulnerabilidade ao aumento do nível do mar (Synthesis and upscaling of sea-level rise vulnerability assessment - SURVAS):*

O SURVAS é um aprimoramento da Metodologia do IPCC, elaborado pela comunidade europeia no ano 2000. Este permite o desenvolvimento de uma avaliação global da vulnerabilidade da zona costeira utilizando conceitos básicos. Através da definição dos indicadores de suscetibilidade natural ao risco; de vulnerabilidade socioeconômica; e de resistência aos efeitos das mudanças climáticas. Considerando a elevação do nível do mar como sendo o principal efeito das mudanças climáticas. Esta metodologia tem caráter quantitativo e pode ser aplicada em análises de escala local, regional, nacional e global (VEGA-LEINERT; NICHOLLS, 2001).

### *2.3.4 Avaliação dinâmica e interativa da vulnerabilidade (Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment - DIVA):*

O DIVA é o resultado de um projeto europeu elaborado em 2004 para explorar a vulnerabilidade das zonas costeiras à subida do nível do mar. É uma técnica de modelagem computacional composta por uma base de dados global de fatores ambientais e socioeconômicos, cenários com projeções do nível do mar relevantes, e um conjunto de algoritmos que representam os impactos de adaptação. O banco de dados cobre todos os países do mundo (HINKEL; KLEIN, 2003). Na avaliação são considerados fatores como erosão, inundação, salinização e perda de zonas húmidas. A DIVA foi projetada para análises de escala nacional, regional e global com caráter quantitativo (VAFEIDIS et al., 2004).

### 2.3.5 Índice de vulnerabilidade costeira (*Coastal Vulnerability Index - CVI*):

O Índice de Vulnerabilidade Costeira foi usado inicialmente por Gornitz e Kanciruk (1989), no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e posteriormente passou por várias atualizações como a desenvolvida por Thieler (2000). Esta metodologia utiliza seis variáveis para avaliar a sensibilidade de uma região costeira, dentre elas estão: a variação da linha de costa; a geomorfologia; a declividade da costa; a variação da maré; altura de ondas; e cenários de elevação do nível do mar. Foi amplamente aplicada no litoral dos Estados Unidos e adaptada para ser usada em diversos outros países por ser um método rápido e consistente para determinar a vulnerabilidade de diferentes tipos de praia (WOODROFFE, 2006). Tem caráter semiquantitativo e pode ser aplicado em nível local e nacional.

### 2.3.6 Mapeamento da estabilidade geomorfológica (*Geomorphic Stability Mapping - Smartline*):

O Mapeamento da estabilidade geomorfológica ou *Smartline* foi proposta por Sharples em 2004 para mapear a costa da Tasmânia e atualizado em 2009 para ser aplicada na costa da Austrália. O *Smartline* é uma metodologia que integra múltiplas variáveis para avaliar a estabilidade das características geomorfológicas da zona costeira. O método é dividido em três fases, sendo que a primeira, apropriado para escala nacional, classifica as praias em relação ao formato, morfologia e a geologia da costa. A segunda fase, em escala regional, relaciona a estabilidade geomorfológica com critérios mais específicos como taxas de erosão e acreção. A terceira etapa, para escala local relaciona as etapas anteriores com dados de modelagem de refração e difração de ondas, balanço sedimentar, entre outros. Os resultados tem caráter qualitativo (Sharples 2006; Sharples et al. 2009).

## 2.4 METODOLOGIA

A metodologia aplicada para este estudo foi uma adaptação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (*Coastal Vulnerability Index - CVI*) desenvolvido por Gornitz (1991). Esta metodologia foi escolhida por ser já ter sido amplamente utilizada, por fazer uso de dados

semi-quantitativos, por ser de simples aplicação e principalmente por ser compatível com as informações acessíveis do litoral de Pernambuco.

Nesta adaptação foram integrados parâmetros dinâmicos, sociais, morfológicos e de evidência de erosão, baseados em outras metodologias relevantes (BUSH et al., 1999; COOPER; MCLAUGHLIN, 1998; KLEIN; NICHOLLS, 1999; RUDORFF; BONETTI, 2010; SHARPLES, 2006; SOUSA; SIEGLE; TESSLER, 2012). Para que finalmente pudesse ser feita a classificação hierárquica da linha de costa em três níveis de vulnerabilidade em relação à resistência e à capacidade de adaptação da praia.

#### 2.4.1 *Categorias e Indicadores*

Para calcular os índices de vulnerabilidade foram avaliados dez indicadores agrupados em quatro categorias, que serão descritos na sequência:

Os dados que compõe os indicadores foram obtidos através de:

- Coleta de dados em campo, com documentação em formulários, fotografias e vídeos;
- Linha de costa de 2014, descrita no Capítulo 1;
- Dados sobre a população na plataforma SIDRA do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE<sup>3</sup>;
- Dados de uma série de um ano de dados de onda disponibilizados pela boia do programa PNboia (Programa Nacional de Boias);
- Imagens adquiridas pelo satélite GeoEye IKONOS em 2014, com resolução espacial máxima de 1 m. Disponíveis na forma de *basemaps* do *software ArcGis® 10.2.2*.<sup>4</sup>;
- Uma composição de 42 imagens RGB adquiridas pelo satélite IKONOS em 2005, com resolução espacial de 1 m. Todas as imagens foram georreferenciadas com coordenadas UTM e datum SIRGAS 2000 zona 25S. As imagens foram disponibilizadas pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – FIDEM.

---

<sup>3</sup> Disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/>

<sup>4</sup> ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

A seguir é apresentada uma descrição das categorias e os indicadores que foram utilizados no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira, juntamente com a forma de obtenção (fonte) dos dados e os intervalos das classes que representam o grau de vulnerabilidade:

#### 1. Processos dinâmicos

Esta categoria representa os indicadores dinâmicos, com relação à energia incidente na costa.

1.1 Exposição relativa à onda ( $\alpha$ ): O grau de exposição refere-se à orientação da linha de costa em relação a direção de incidência das ondas na mesma. Esse dado foi medido em graus de  $0^\circ$  a  $359,9^\circ$  no sentido horário em relação ao norte (BUSH et al., 1999; SHARPLES, 2006). A direção das ondas ao longo da costa de Pernambuco é predominantemente de lés-sueste (ESE) com 91%, e em menores proporções ondas de leste (E) com 7%, e com 2% de sudeste (SE) (Oliveira, 2013).

Fonte: A orientação de cada segmento foi medida através da ferramenta *COGO Attributes* do Software *ArcGIS®*, com base na linha de costa de 2014 em relação à ondas de ESE. Os resultados foram agrupados em três classes considerando o grau de exposição em relação ao ESE.

Classes: Abrigado entre  $247,5^\circ$  e  $337,5^\circ$ . Semi-abrigado entre  $0^\circ$  e  $67,5^\circ$ ;  $157,5^\circ$  e  $247,5^\circ$ ;  $337,5^\circ$  e  $359,9^\circ$ . Exposto entre  $67,5^\circ$  e  $157,5^\circ$ .

1.2 Nível do mar: Este parâmetro está relacionado com riscos de erosão e sobrelavagem das dunas, que pode causar inundação. Um dos efeitos das mudanças climáticas é a variação do nível do mar, que mesmo pequena podem gerar graves impactos, como alteração da direção e intensidade de correntes, na altura significativa de ondas e no run-up, que resultam em mudanças no transporte de sedimentos e na área de inundação (GORNITZ, 1991; MAZZER; DILLENBURG; SOUZA, 2008; SHARPLES, 2006). Este parâmetro foi incluído no cálculo de vulnerabilidade para possibilitar a comparação entre a vulnerabilidade atual e às mudanças climáticas e está baseado em projeções globais.

Fonte: O nível do mar atual é considerado zero no limite superior da maré de 2,70 m, que está baseado nos dados disponibilizados pela Diretoria de Navegação e Hidrografia. A classificação de vulnerabilidade foi definida com base nas mudanças de nível do mar previstas para a região nos próximos anos devido as mudanças climáticas,

considerando que toda a plataforma continental de Pernambuco está sujeita ao mesmo regime de maré e de aumentos relativo do nível médio do mar (ARNMM).

Classes: baixa quando menor que 0,5 m; moderada entre 0,5 a 0,9 m; e alta quando superior a 0,9 m.

1.3 Altura significativa de onda ( $H_s$ ): A altura significativa das ondas juntamente com a amplitude de maré determinam a morfologia da praia, que por sua vez influencia o comportamento das correntes na costa e no transporte de sedimentos, que pode resultar na remoção de sedimentos e erosão da praia (GORNITZ, 1991; VELLINGA; KLEIN, 1993). A batimetria da plataforma rasa de Pernambuco é complexa devido à presença de recifes de arenito ao longo de toda a costa. Para determinar a vulnerabilidade é necessário considerar cenário mais energético, ou seja, aqueles com maior capacidade de mobilizar e transportar sedimentos. Muitas praias apresentam uma superfície do mar sem ondas durante a maré baixa devido a proteção dos recifes de arenito. Assim, a  $H_s$  foi estimada próximo da costa durante a maré alta em período de sizígia (amplitude de 2,7 m).

Fonte: Os valores de  $H_s$  foram calculados pelo Laboratório de Oceanografia Geológica do Departamento de Oceanografia da UFPE, através do modelo de propagação de ondas *WAPO* (*Wave Propagation on the Coast*) combinado com o módulo *OLUCA-UNAM* (SILVA; BORTHWICK; TAYLOR, 2005). Os parâmetros de onda utilizados para a modelagem de um cenário próximo ao atual são oriundos de uma série de dados de um ano disponíveis para a boia do programa PNboia (Programa Nacional de Boias), localizado nas proximidades da costa de Pernambuco, e da análise dos extremos de maré disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil para o porto do Recife. Os 174 segmentos estão localizados na linha de costa, para definir a  $H_s$ , os segmentos foram reposicionados em cerca de 10 metros em direção ao mar, a fim de medir a  $H_s$  em uma área inundada durante a maré alta.

Classes: Menor que 0,75 m; entre 0,75 e 1,25 m; e maiores que 1,25 m.

## 2. Fatores sociais

Esta categoria representa a influência que as comunidades costeiras exercem na vulnerabilidade.

2.1 Distância Linha de costa – Urbanização: A distância entre a linha de costa e a primeira linha de edificação representa a facilidade com que estas construções seriam afetadas quando ondas de tempestades atingem a costa e também em casos de aumento do nível do mar. Essa é uma medida importante uma vez que praias amplas e bem desenvolvidas geralmente são mais estáveis, enquanto praias que tiveram a morfologia alterada por construções sobre o perfil tem o espaço reduzido para dissipação da energia. Assim, as construções que foram feitas sobre o perfil, em cima das dunas por exemplo, estão mais vulneráveis a danos (MAZZER; DILLENBURG; SOUZA, 2008).

Fonte: Para cada segmento a distância foi medida através da ferramenta *Proximity Near* do software *ArcGIS®* entre a linha de costa de 2014 e a primeira linha de urbanização vetorizada sobre o *basemap* disponibilizado pelo mesmo software. Os resultados foram agrupados em três classes considerando o intervalo médio para a área de estudo.

Classes: maior que 30 m; entre 15 e 30 m; e menor que 15 m.

2.2 Densidade populacional: A densidade populacional representa o número de pessoas que poderiam sofrer os impactos da erosão costeira, tanto pela perda do patrimônio, que pode ser danificado ou destruído, quanto pela perda de uma área de valor cultural e econômico. Quanto maior o número de pessoas sujeitas às consequências da erosão, maior a vulnerabilidade da praia (LI et al., 2014; SHARPLES, 2006; VELLINGA; KLEIN, 1993).

Fonte: Esse indicador foi calculado com base nos dados de população por bairros disponibilizados pelo IBGE em relação a extensão de litoral dos mesmos. Assim foi definido quantos habitantes residem próximos à praia do bairro ou do município, resultando em um dado de habitantes por metro de praia (hab/m).

Classes: Baixa densidade populacional quando há menos que 5 (hab/m); moderada entre 5 e 10 hab/m; e alta quando há mais que 10 hab/m.

2.3 Tipo de urbanização: O tipo de urbanização faz referência as principais construções existentes na orla de cada praia. Este é um indicador da pressão que está sendo exercida sobre o solo, que pode sofrer compactação, impermeabilização e rebaixamento do terreno. Além dos efeitos citados o tipo de construção também indica os possíveis prejuízos econômicos caso a praia seja erodida e cause danos ao patrimônio (BUSH et al., 1999).

Fonte: O tipo de urbanização foi observado em campo para cada um dos segmentos.

Classes: nenhum ou quiosques; casas; e prédios.

### 3. Fatores morfológicos

Esta categoria representa a estabilidade geológica da praia, baseada na resistência a perda de sedimento.

3.1 Tipo de substrato: O tipo de substrato da praia define a facilidade com que a mesma pode ser erodida. A definição da estabilidade pode considerar o tamanho dos grãos de praias arenosas, a composição química dos mesmos ou também a resistência de um costão rochoso ou de uma falésia, por exemplo (GORNITZ, 1991; MAZZER; DILLENBURG; SOUZA, 2008; SHARPLES, 2006). Entretanto para se obter tais informações é necessário realizar estudos detalhados do substrato o que não foi possível realizar neste projeto. Portanto foram considerados dois grandes grupos de estabilidade facilmente definidos: consolidado e inconsolidado.

Fonte: O tipo de substrato foi observado em campo para cada um dos segmentos.

Classes: Consolidado e inconsolidado.

3.2 Conservação das dunas: As dunas são ambientes naturais encontrados depois do pós-praia que possuem uma importante função de defesa do continente. Quanto mais altas e densamente vegetadas mais proteção contra ondas, tempestades, marés equinociais e inundações, estas podem oferecer (BUSH et al., 1999; SHARPLES, 2006). Outro tipo de ambiente frequentemente encontrado no litoral de Pernambuco é a restinga, que também exerce a função de defesa do continente.

Fonte: O estado de conservação das dunas, e restingas foi observado em campo para cada um dos segmentos.

Classes: Ambiente conservado e bem vegetado, conservado sem vegetação e ambiente natural suprimido.

### 4. Evidências de erosão

Esta categoria representa os parâmetros que demonstram o estado atual de erosão da praia, através de observação e dados históricos.

4.1 Variação da linha de costa: As taxas de progradação ou retrogradação da linha de costa são intimamente relacionados com os processos energéticos de ondas e marés, também são influenciadas pelo grau de exposição da praia e pela proximidade com fontes de sedimento (BUSH et al., 1999; GORNITZ, 1991; MAZZER; DILLENBURG; SOUZA, 2008).

Fonte: A variação da linha de costa foi medida através da ferramenta *Proximity Near* do software *ArcGIS®*, entre a linha de costa de 2014 delimitada em campo e a linha de costa de 2005 vetorizada sobre imagens de satélite. A unidade utilizada para classificação de vulnerabilidade foi taxa de retrogradação ao longo de 9 anos.

Classes: positivas (praias sem variação no período ou em acreção); com retração entre 0 e 10 m; e retração superior a -10 m.

4.2 Indicadores visuais de erosão: Evidências de erosão na praia confirmam a vulnerabilidade atual da mesma frente à processos erosivos, como, por exemplo, construções próximas da linha de água, árvores caídas ou com raízes expostas e dunas escarpadas (descritos no Capítulo 1). Assim como a presença de obras de proteção costeira, como muros de contenção que estabilizam a linha de costa ou quebra-mares e espigões que alteram a incidência de ondas e a circulação das correntes, são evidências de que a linha de costa encontra-se em desequilíbrio dinâmico, o que mostra que a praia está ou já esteve erosão. O mesmo vale para obras leves como engorda de praia e dunas artificiais (BUSH et al., 1999). Este indicador representa a influência antrópica na erosão, uma vez que mesmo praias com variação da linha de costa positivas podem apresentar impactos de erosão, isso porque em alguns locais a urbanização avançou mais em direção ao mar, do que a praia teve de acreção no mesmo período.

Fonte: Os indicadores de erosão foram observados em campo para cada um dos segmentos.

Classes: Baixo, moderado e alto.

#### 2.4.2 Organização dos dados

Os resultados dos dez indicadores foram organizados em tabelas, inicialmente de acordo com as classes definidas e posteriormente de acordo com o grau de vulnerabilidade que cada um representa nos segmentos de linha de costa. A partir destes dados foram criados arquivos do tipo *shape*, como está mostrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Nome de identificação dos arquivos que foram utilizados para calcular a vulnerabilidade final.

<b>Categoria</b>	<b>Identificador</b>	<b>Indicador</b>	<b>Identificador</b>	<b>Classe</b>	<b>Identificador</b>
Processos dinâmicos	DINA	Exposição relativa à onda ( $\alpha$ )	HS_EXP	Abrigado	1
				Semi-abrigado	2
				Exposto	3
		Nível do mar	N_MAR	<0,5 m	1
				0,5 – 0,9 m	2
				<0,9 m	3
Altura de onda ( $H_s$ )	HS_ALT	<0.75	1		
		0.75 – 1.25	2		
		>1.25	3		
Fatores sociais	SOCÍ	Distância linha de costa - Urbanização	DIS_LC	>30 m	1
				15 – 30 m	2
				<15 m	3
		População por metro de praia	POP_M	<5	1
				5 -10	2
				>10	3
Tipo de urbanização	T_URB	Nenhum <sup>5</sup>	1		
		Casas	2		
		Prédios	3		
Fatores morfológicos	MORF	Tipo de substrato	T_SUB	Consolidado	1
				Inconsolidado	3
		Conservação das dunas	C_DUN	Vegetada	1
				Não vegetada	2
		Suprimida	3		
Evidências de erosão	EERO	Variação da linha de costa (negativa)	V_LC	> 0 m	1
				0 – -10 m	2
				< -10 m	3
		Indicadores visuais de erosão	I_ERO	Baixo	1
				Moderado	2
Alto	3				

Fonte: o autor.

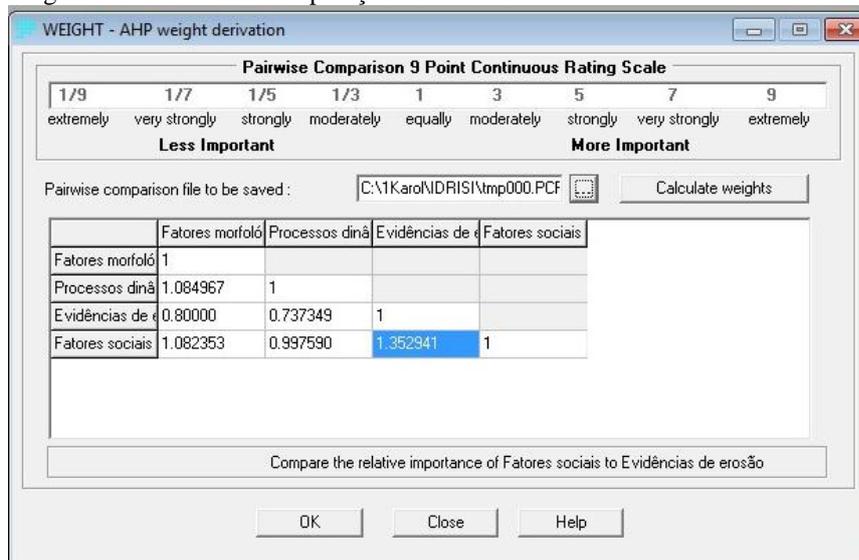
<sup>5</sup> A classe “nenhum” do tipo de urbanização também inclui praias com quiosques e casa esparsas.

### 2.4.3 Ponderação dos indicadores

O peso atribuído a cada indicador e categoria foi baseado na opinião de dez especialistas em erosão costeira e vulnerabilidade. Este método foi escolhido com o intuito de se obter um julgamento mais confiável do que seria somente com a opinião do autor. Os especialistas responderam um questionário sobre a importância de cada parâmetro analisado. Das respostas recebidas foi calculada a média dos valores dentro do intervalo de confiança de 95% em relação a mediana, através da ferramenta *Graphical Summary* do software *Minitab Statistical*®<sup>6</sup>.

Depois de estabelecer os pesos de cada parâmetro de acordo com a opinião dos especialistas foi aplicado um processo de análise hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) desenvolvida por Saaty (1987), através da ferramenta *Weight* do software *IDRISI Selva*®<sup>7</sup>. Neste método as variáveis são comparadas de forma pareada por meio de uma matriz quadrática recíproca (fig. 2.2). Através da comparação é estabelecida a importância relativa de cada um dos parâmetros.

Figura 2.2 - Matriz de comparação do método AHP.



Fonte: o autor.

<sup>6</sup> Minitab 17 Statistical Software (2010). [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc. (www.minitab.com)

<sup>7</sup> Eastman, J.R., 2012, IDRISI Selva (Worcester, MA: Clark University).

#### 2.4.4 Cálculo do índice de vulnerabilidade costeira

O índice de vulnerabilidade costeira (IVC) integrou os dez indicadores avaliados através de um somatório simples de cada categoria multiplicada pelos seus respectivos pesos, sendo que cada categoria é o resultado da somatória dos seus indicadores multiplicados pelos seus respectivos pesos. Este cálculo foi feito com a ferramenta *Field Calculator* do software *ArcGIS®*, sendo a resultante desta ferramenta um arquivo do tipo *shape* com a vulnerabilidade final na forma de uma mapa. A expressão abaixo demonstra o cálculo do índice:

$$DINA = N\_MAR * p_{N\_MAR} + HS\_EXP * p_{HS\_EXP} + HS\_ALT * p_{HS\_ALT} \quad (1)$$

$$SOCI = DIS\_LC * p_{DIS\_LC} + POP\_M * p_{POP\_M} + T\_URB * p_{T\_URB} \quad (2)$$

$$MORF = T\_SUB * p_{T\_SUB} + C\_DUN * p_{C\_DUN} \quad (3)$$

$$EERO = V\_LC * p_{V\_LC} + I\_ERO * p_{I\_ERO} \quad (4)$$

$$IVC = DINA * p_{DINA} + SOCI * p_{SOCI} + MORF * p_{MORF} + EERO * p_{EERO} \quad (5)$$

Equação 1: Cálculo da categoria "fatores dinâmicos - DINA", onde N\_MAR é o nível do mar, HS\_EXP é a exposição relativa às ondas, HS\_ALT é a altura significativa das ondas e p<sub>n</sub> é o peso de cada indicador, respectivamente.

Equação 2: Cálculo da categoria "fatores sociais - SOCI", onde DIS\_LC é a distância entre a linha de costa e a urbanização, POP\_M é a população por metro de praia, T\_URB é o tipo de urbanização e p<sub>n</sub> é o peso de cada indicador, respectivamente.

Equação 3: Cálculo da categoria "processos morfológicos - MORF", onde T\_SUB é o tipo de substrato, C\_DUN é a conservação das dunas e p<sub>n</sub> é o peso de cada indicador, respectivamente.

Equação 4: Cálculo da categoria "evidências de erosão - EERO", onde V\_LC é a variação da linha de costa (negativa), I\_ERO são os indicadores visuais de erosão e p<sub>n</sub> é o peso de cada indicador, respectivamente.

Equação 5: Cálculo final do Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC, onde DINA são os processos dinâmicos, SOCI são os fatores sociais, MORF são os fatores morfológicos e EERO são as evidências de erosão.

#### 2.4.5 Mudança climática

A vulnerabilidade do litoral à mudanças climáticas foi determinada utilizando a mesma metodologia usada para a vulnerabilidade à erosão, que foi descrita anteriormente. Para isso foram avaliadas nove projeções variando a altura significativa de onda (H<sub>s</sub>) e o aumento relativo

do nível médio do mar (ARNMM), considerando sempre os cenários de preamar, que representam a situação mais crítica.

Os dados de projeções da altura das ondas e do nível médio do mar utilizados neste estudo foram gerados pelo projeto “Identificação e Mapeamento da Vulnerabilidade Ambiental da Zona Costeira de Pernambuco”, desenvolvido pelo Laboratório de Oceanografia Geológica do Departamento de Oceanografia da UFPE. Com base em uma série de dados históricos de ondas de 11 anos, disponibilizados pela BMT ARGOS<sup>8</sup>, onde através dos mesmos foi possível traçar um panorama de aumento da altura de ondas incidentes na costa de Pernambuco.

O cenário considerado como representativo das condições atuais de incidência de ondas junto à costa de Pernambuco, a partir do qual foram gerados os demais cenários, apresenta  $H_s=1.5\text{m}$ , baixa-mar=  $-0.1\text{ m}$  preamar=  $2.7\text{ m}$ , período de pico ( $T_p$ )=  $8\text{ s}$  e direção de incidência (dir) de SE.

Nas simulações realizadas o período ( $T_p=8\text{ s}$ ) e a direção (dir=SE) foram mantidos constante, já os valores de  $H_s$  e amplitude de maré foram modificados a cada simulação, sendo que a variação da maré representa no modelo o ARNMM. No total foram realizadas nove projeções, combinando três valores de  $H_s$  com três valores de ARNMM, considerando que o nível do mar atual é igual a zero. As condições avaliadas estão mostradas na tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Nove cenários utilizados para avaliar a vulnerabilidade a mudanças climáticas e a condição atual.

PARÂMETRO	CENÁRIO									
	Atual	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_s$ (m)	1,50	1,65	1,65	1,65	1,80	1,80	1,80	2,25	2,25	2,25
ARNMM (m)	0,00	0,25	0,50	1,00	0,25	0,50	1,00	0,25	0,50	1,00

Fonte: o autor.

#### 2.4.6 Graus de Vulnerabilidade

Um ambiente definido neste estudo como vulnerabilidade baixa significa que no universo estudado este é o local menos propenso a sofrer erosão. São áreas onde a retração de

<sup>8</sup> [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com)

linha de costa não é historicamente significativa, possui maior resistência aos impactos e poucas pessoas seriam afetadas caso a praia fosse erodida, o que implica em baixa perda monetária.

Um ambiente com moderada vulnerabilidade significa que este necessita maior cautela por parte dos gestores públicos, pois a possibilidade de ocorrer erosão e os impactos neste ambiente são maiores. Este é o grau de vulnerabilidade de áreas que tem os primeiros metros do pós-praia em bom estado de conservação, há urbanização, formada principalmente por casas.

Um ambiente com alta vulnerabilidade significa que é o local de maior susceptibilidade a erosão com impactos severos na zona costeira. Nestas regiões a resistência natural da praia é baixa, pode haver registros prévios de erosão e principalmente uma intensa urbanização próxima da praia, que acarretaria em alta perda monetária para a população e para o município.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Indicadores

O resultado de cada um dos dez indicadores está mostrado na figura 2.3 com a classificação da influência que os mesmos têm na vulnerabilidade e as respectivas categorias as quais pertencem.

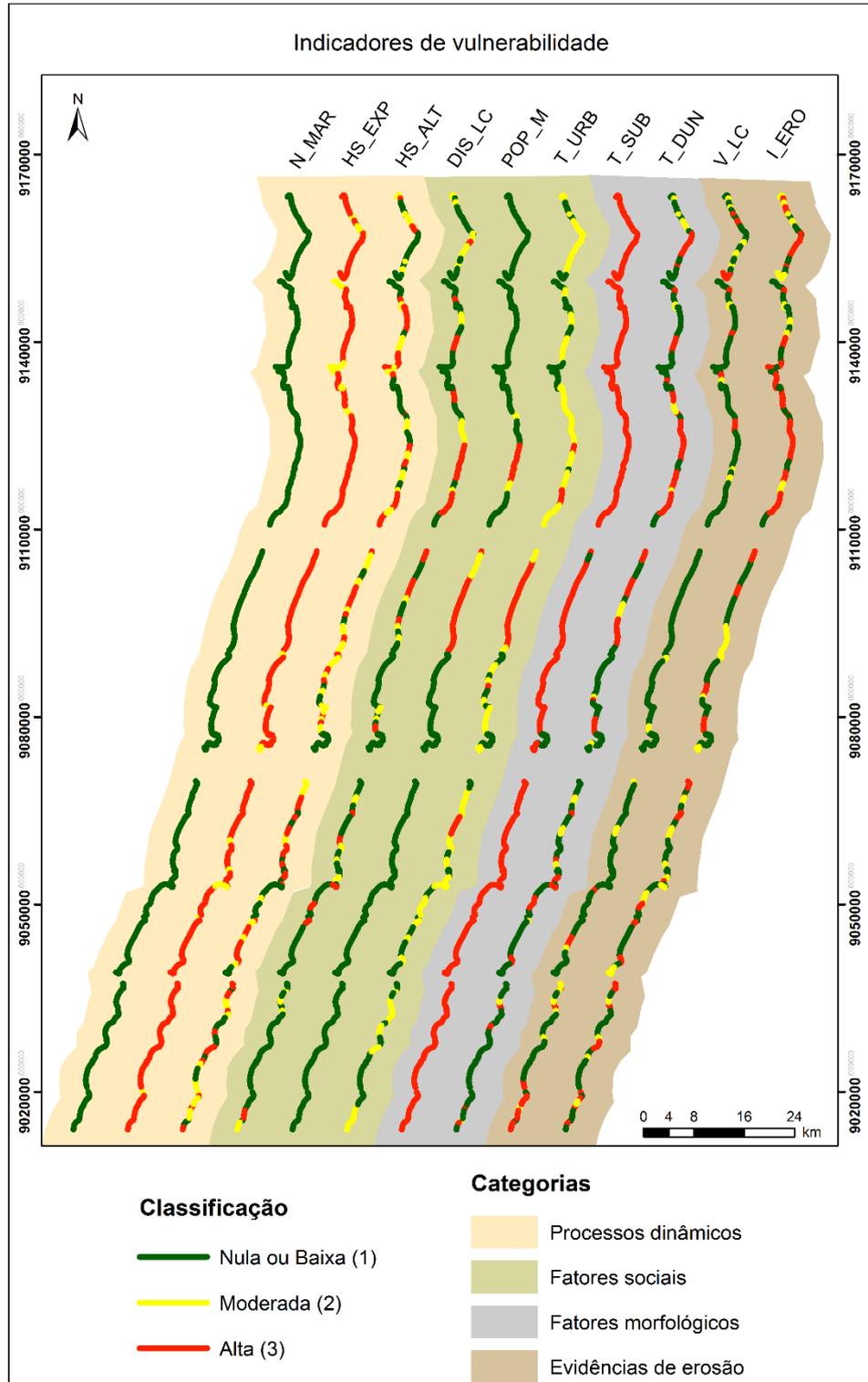
Os processos dinâmicos são representados pelos três primeiros indicadores mostrados na figura 2.3. O primeiro é o nível do mar (N\_MAR), não há diferença deste parâmetro ao longo do litoral pernambucano, por isso todos os segmentos são classificados como de baixa influência na vulnerabilidade. Este foi considerado na avaliação para permitir, posteriormente, a comparação com a vulnerabilidade às mudanças climáticas. A exposição às ondas (HS\_EXP) está, predominantemente classificado como alta influência porque a maioria dos segmentos estão orientados entre 75° e 150° em relação ao norte, ou seja estão expostos às ondas incidentes no litoral. Esse resultado é coerente com o fato de que praticamente todo o litoral é arenoso e ao longo do tempo as praias tendem a adquirir uma configuração principalmente paralela à frente de ondas (KOMAR, 1983). A altura significativa de ondas (HS\_ALT) é o parâmetro que mais variou ao longo da costa, isso se deve as diferenças na batimetria próximo da costa e a proteção exercida pelos recifes de arenito em alguns pontos. Estudos mostram que entre 50 e 90% da energia das ondas é dissipada quando propagadas sobre recifes e a altura da onda

diminui entre 20 e 47% dependendo da profundidade que o recife está localizado e a extensão do mesmo (LUGO-FERNANDEZ et al., 1998; ROBERTS; SUHAYDA, 1983).

Os fatores sociais são representados pelo quarto, quinto e sexto indicador mostrado na figura 2.3. O quarto é a distância entre a linha de costa e a primeira linha de urbanização (DIS\_LC) e mostra que, na maior parte do litoral, a urbanização está fixada a uma distância segura do mar e em alguns segmentos a urbanização é inexistente. A exceção são alguns pontos isolados e o Núcleo Metropolitano que tem construções muito próximas da linha de costa atual, neste setor toda a orla é asfaltada, possui calçadão, quiosques e edifícios. O quinto indicador é a população por metro de praia (POP\_M) que é baixa nos Setores Norte e Sul e está entre alta e moderada no Núcleo Metropolitano, que é um resultado esperado já que essa região é a mais populosa de todo estado (ARAÚJO et al., 2007). O sexto indicador é o tipo de urbanização (T\_URB) mostrando que as maiores construções estão localizadas no Núcleo Metropolitano enquanto no restante do estado as construções são de menor porte ou inexistentes. Esse dado está de acordo com a densidade populacional encontrada, que é maior no Núcleo Metropolitano e por isso é necessário que exista uma urbanização vertical para propiciar a acomodação de todos os habitantes.

Os fatores morfológicos são representados pelo sétimo e oitavo indicador mostrado na figura 2.3. O sétimo é o tipo de substrato (T\_SUB) que possui predominantemente praias arenosas (166 km) e alguns quilômetros de costão rochoso (6 km). Por isso praticamente em toda a costa esse indicador tem alta influência na vulnerabilidade. O litoral de Pernambuco possui no total 187 km, os 15 km que não foram citados formam a desembocadura de estuários e os portos de Recife e Suape. A conservação das dunas (C\_DUN) tem uma variação ao longo da costa muito parecida com a distância entre a linha de costa e a urbanização. Isso porque, em algumas situações, onde o cordão de dunas é destruído, este cede lugar a construções localizadas muito próximas do mar. O Setor Sul é o maior trecho em que as dunas estão conservadas e vegetadas, que é uma consequência da baixa urbanização nesta região.

Figura 2.3 - Dez indicadores que foram avaliados, na figura se apresentam classificados de acordo com três graus vulnerabilidade para cada indicador. Onde N\_MAR é o nível do mar, HS\_EXP é a exposição relativa às ondas, HS\_ALT é a altura significativa das ondas, DIS\_LC é a distância entre a linha de costa e a urbanização, POP\_M é a população por metro de praia, T\_URB é o tipo de urbanização, T\_SUB é o tipo de substrato, C\_DUN é a conservação das dunas, V\_LC é a variação da linha de costa (negativa), I\_ERO são os indicadores visuais de erosão.



Fonte: o autor.

As evidências de erosão são representadas pelos últimos dois indicadores mostrados na figura 2.3. O nono, variação da linha de costa (V\_LC) mostra alguns pontos distribuídos ao longo da costa com taxa de retrogradação, sendo os segmentos com as maiores taxas localizados no extremo norte e sul do estado. Considerando a distância destas áreas à centros urbanos, pode-se concluir que esse processo erosivo está associado, principalmente, a fatores naturais. Há uma relação entre este indicador e a distância entre a urbanização e a linha de costa, onde houve maior recuo na linha de costa a urbanização está mais vulnerável. Isso não se aplica ao Núcleo Metropolitano porque parte da linha de costa está fixada por obras de proteção costeira desde 1990 portanto não houve variações no período avaliado, neste projeto, que foi entre 2005 e 2014, entretanto a área sofreu intensa retrogradação nos anos antecedentes a fixação da linha de costa (FINEP/UFPE, 2009). O último indicador mostrado representa as evidências de erosão (E\_ERO) que estão presentes ao longo de toda a costa na forma de impactos visuais de erosão, sendo os casos mais graves relacionados com dano ou perda do patrimônio e com a presença de obras de proteção costeira (fig. 2.4).

Figura 2.4 - Exemplo de dano ao patrimônio. Praia de Catuama, Goiana.



Fonte: o autor.

### 2.5.3 Pesos

Os pesos que definem a importância relativa de cada indicador no cálculo da vulnerabilidade foi resultado de uma pesquisa de opinião com dez especialistas em erosão e/ou vulnerabilidade. Na tabela 2.3 está o resultado da média dos valores situados dentro do Intervalo de Confiança de 95% definido em relação à mediana:

Tabela 2.3 - Média das opiniões dos especialistas quanto à importância de cada parâmetro.

CATEGORIA	MÉDIA	INDICADOR	MÉDIA
Processos dinâmicos	9,22	Exposição relativa à onda ( $\alpha$ )	9,11
		Nível do mar	8,00
		Altura de onda ( $H_s$ )	7,00
Fatores sociais	9,20	Distância LC – Urbanização	9,44
		Densidade populacional	8,00
		Tipo de urbanização	4,00
Fatores morfológicos	8,50	Tipo de substrato	7,38
		Conservação das dunas	7,25
Evidências de erosão	6,80	Variação da linha de costa	8,56
		Indicadores visuais de erosão	7,71

Fonte: o autor.

Para normalizar os pesos de cada parâmetro, os valores de média passaram pelo processo de análise hierárquica – AHP (tab. 2.4). Para que o AHP possa ser aplicado é importante que se tenha uma matriz bem estruturada, ou seja, que os pesos atribuídos pelos especialistas sejam coerentes entre os indicadores. Nas cinco matrizes desenvolvidas foi obtido o Índice de Consistência (IC) igual a zero que é o parâmetro que testa a coerência dos dados e quanto mais próximo a zero mais coerente é a matriz (SAATY, 1987).

Tabela 2.4 - Peso de cada categoria e de cada indicador normalizados pelo método AHP.

CATEGORIA	PESO	INDICADOR	PESO
Processos dinâmicos	0,27	Exposição relativa à onda ( $\alpha$ )	0,38
		Nível do mar	0,33
		Altura de onda ( $H_s$ )	0,29
Fatores sociais	0,27	Distância Linha d'agua – Urbanização	0,44
		Densidade populacional	0,37
		Tipo de urbanização	0,19
Fatores morfológicos	0,25	Tipo de substrato	0,50
		Conservação das dunas	0,50
Evidências de erosão	0,20	Variação da linha de costa	0,53
		Indicadores visuais de erosão	0,47

Fonte: o autor.

Os pesos mostrados na tabela 04 foram substituídos nas equações 1, 2, 3, 4 e 5 para cada um dos 174 segmentos de linha de costa por meio da ferramenta *Field Calculator* do Software *ArcGIS®*, a fim de obter a vulnerabilidade à erosão do litoral de Pernambuco. Os valores de IVC calculados para toda a área de estudo está situado dentro do intervalo de 1,21 a 2,69. A partir desses resultados foram definidos três intervalos correspondentes ao nível de vulnerabilidade (tab. 2.5).

Tabela 2.5 - Relação entre os intervalos de IVC e os graus de vulnerabilidade.

Valor IVC	Grau de vulnerabilidade
< 1,70	Nula ou baixa
1,70 – 2,19	Moderada
> 2,19	Alta

Fonte: o autor.

A seguir é mostrado um exemplo da determinação da vulnerabilidade para um segmento, identificado pelo número 148 (tab. 2.6), para o qual foram encontrados os seguintes resultados: DINA=1,76; SOCI=1,00; MORF=2,01; EERO=1,0; e IVC=1,46. Com este valor de

IVC o segmento foi classificado com um grau de vulnerabilidade Nulo ou Baixo. Na figura 2.5 é possível observar que e este segmento, pertencente a Praia de Tamandaré não possui indicadores de erosão, a duna está bem conservada e a urbanização, ainda incipiente, não aparece na foto. Por isso, apesar da praia ser arenosa, e exposta as ondas ela está pouco suscetível a sofrer impactos decorrentes da erosão costeira.

Uma praia com estas características permite a aplicação de um plano de manejo que vise manter a baixa vulnerabilidade frente às mudanças climáticas. Para isso é recomendado fazer um estudo detalhado da área para estabelecer limites seguros para a implementação de novos centros urbanos.

Tabela 2.6 - Exemplo dos indicadores de vulnerabilidade do segmento 148.

INDICADOR	Classe	Identificador
Nível do mar	0	1
Exposição relativa à onda ( $\alpha$ )	Exposto (117°)	3
Altura de onda ( $H_s$ )	0,46 m	1
Distância Linha d'água – Urbanização	160 m	1
População por metro de praia	1,60 hab\m	1
Tipo de urbanização	Nenhum	1
Tipo de substrato	Inconsolidado	3
Conservação das dunas	Duna vegetada	1
Varição da linha de costa (negativa)	0	1
Indicadores visuais de erosão	Baixo	1

Fonte: o autor.

Figura 2.5 - Segmento 148, Praia de Tamandaré, Tamandaré, Setor Sul. Vulnerabilidade Baixa.

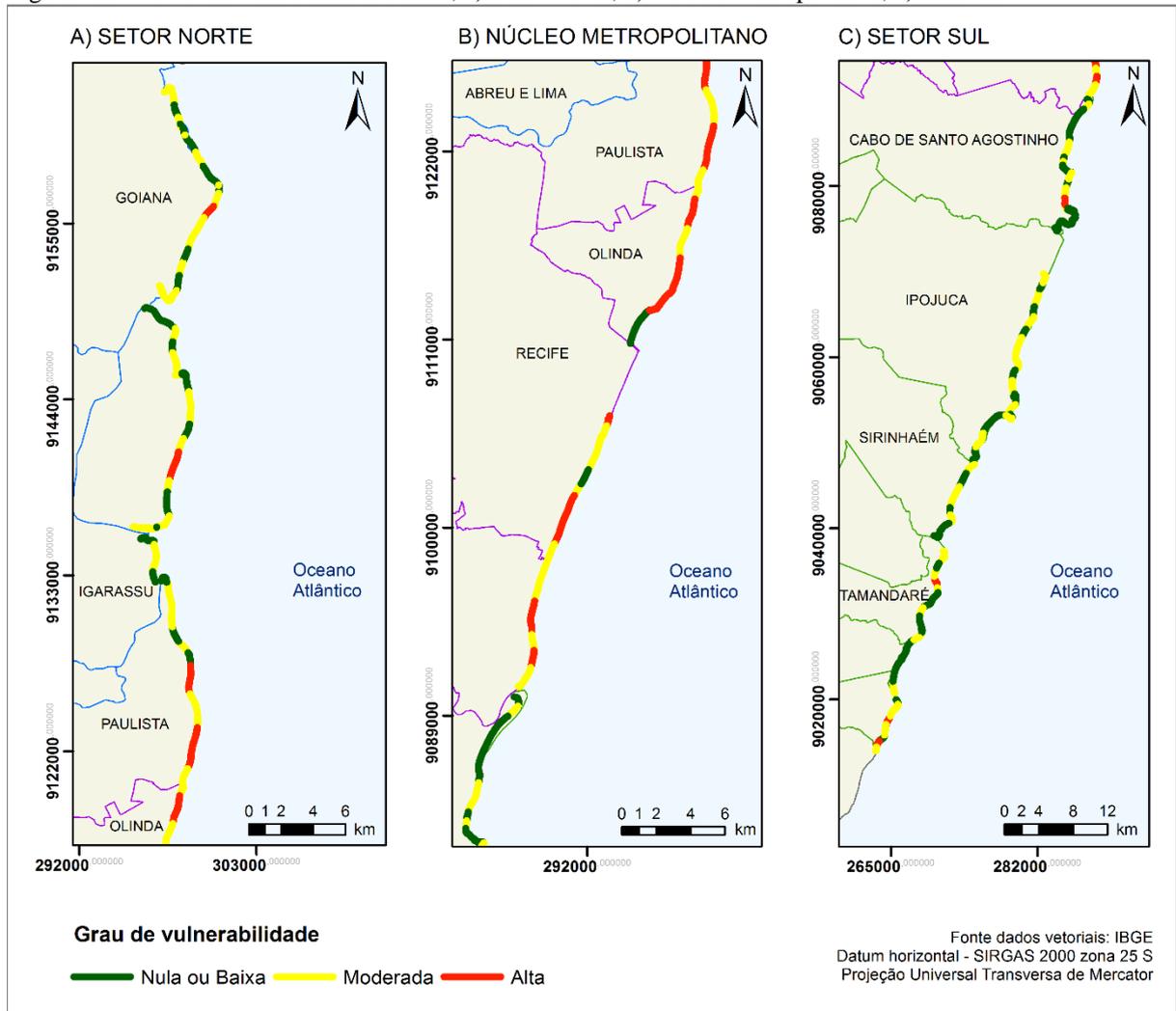


Fonte: o autor.

#### *2.5.4 Vulnerabilidade Atual à Erosão*

A situação atual da vulnerabilidade em Pernambuco é baixa em 38% a região costeira, localizados principalmente no Setor Sul, moderada em 49% e alta em 13% localizados principalmente no Núcleo Metropolitano (fig. 2,6). Os últimos 13% representam 22 km de litoral em estado de alta vulnerabilidade, que se deve principalmente aos fatores sociais, uma vez que a região tem alta densidade demográfica distribuídas em grandes edifícios, além da presença de estruturas rígidas artificiais de proteção contra o processo erosivo.

Figura 2.6 - Vulnerabilidade atual à erosão; a) Setor Norte; b) Núcleo Metropolitano; c) Setor Sul.



Fonte: o autor.

No Setor Norte 36% (19 km) apresenta baixa vulnerabilidade localizados principalmente em praias semi-abrigadas, como a porção norte de Goiana, a desembocadura do Rio Itapissuma e do Canal de Santa Cruz, e também no Pontal de Maria Farinha que atualmente se encontra em acreção (fig. 2.7a). Outros 50% (27 km) tem vulnerabilidade moderada, como a porção sul de Goiana que é uma região que atualmente está em erosão, assim como partes da Ilha de Itamaracá, e o norte de Paulista, que tem alta influência antrópica. O demais 14% (7 km) são de alta vulnerabilidade que estão localizados ao sul de Ilha de Itamaracá próximo ao Forte Orange, que é uma região pouco urbanizada, entretanto com alta taxa de erosão e exposta as ondas incidentes; outro ponto é o sul de Paulista com um processo intenso de erosão, alta urbanização e muitas interações antrópicas na linha de costa (fig. 2.6a e 2.7b).

Figura 2.7 - Graus de vulnerabilidade; a) Pontal de Maria Farinha - vulnerabilidade baixa; b) Praia dos Quatro Cantos - vulnerabilidade Alta; c) Praia de Boa Viagem - vulnerabilidade Alta; d) Praia do Cupe - vulnerabilidade Moderada.



Fonte: o autor.

No Núcleo Metropolitano apenas 7% (2 km) do litoral tem baixa vulnerabilidade à erosão que estão localizados em um pequeno trecho da Praia de Boa Viagem em Recife e na Praia del Chifre, no sul de Olinda, esta última é uma estreita barreira entre o mar e o Rio Beberibe, é uma região desabitada e está em ótimo estado de conservação. Cerca de 50% (14 km) tem vulnerabilidade moderada, nestas áreas a linha de costa está estável e as dunas estão em bom estado de conservação, entretanto, como em todo o setor, a densidade demográfica é alta e a urbanização está próxima da linha de costa. A maior extensão do Núcleo Metropolitano, 43% (12 km), tem alta vulnerabilidade, uma consequência de alteração morfológica da praia com construções próximas da linha de costa e das evidências de erosão, como a estabilização da mesma com obras de proteção costeira (fig. 2.6b e 2.7c).

O Setor Sul apresenta o maior percentual do litoral com baixa vulnerabilidade 47% (43 km) distribuídos ao longo de todo o setor, são áreas que tem pouca urbanização, a linha de costa é estável e bem conservadas. Cerca de 49% (44 km) tem vulnerabilidade moderada localizadas próximos de pequenos centros urbanos, muitas dessas praias tem as dunas bem conservadas porem com alta taxa de retrogradação (fig. 2.7d). Apenas 4% (3,5 km) apresentam alta

vulnerabilidade, localizados na Praia Enseada dos Corais e no sul de São José da Coroa Grande (fig. 2.6c).

### 2.5.5 Vulnerabilidade à mudanças climáticas

A vulnerabilidade encontrada para os cenários de mudança climática são mostradas nas figuras 2.8, 2.9 e 2.10. Cada figura mostra uma projeção de onda combinada com três projeções de ARNMM.

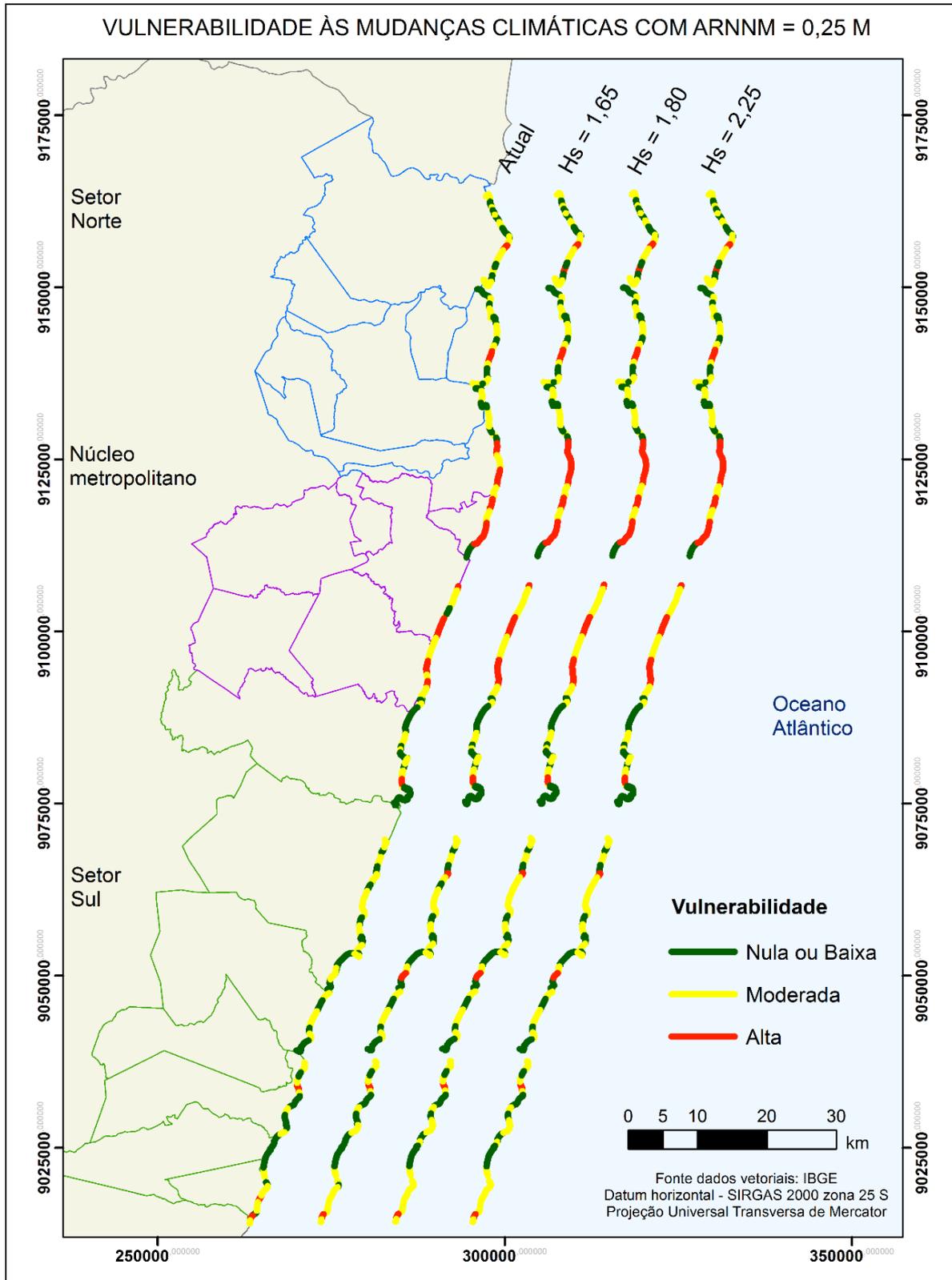
A primeira linha dos três mapas, mostrados nas figuras 2.8, 2.9 e 2.10, representam a vulnerabilidade atual do litoral à erosão. Os resultados desta linha são usados como base de comparação para as situações encontradas para as projeções de mudanças do nível do mar. Dessa forma a vulnerabilidade às mudanças climáticas é apresentada como a diferença entre a atual e as projeções.

Os primeiros três cenários apresentam a vulnerabilidade para o ARNMM de 0,25 m. Juntamente com aumentos na altura significativa de onda ( $H_s$ ) de 0,15; 0,30; 0,75 m (fig. 2.8). Nestas projeções cerca de 12 km de praias poderão ter a vulnerabilidade mais altas que a atual.

A segunda linha da figura 2.8 mostra a vulnerabilidade para a projeção de  $H_s=1,65$  m e ARNMM=0,25 m. Nesta a vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 36% e a moderada se mantém em 49%, enquanto a alta aumenta de 13 para 15%. Apesar da mudança não ser grande, isso significa que cerca de 3,5 km de costa deixaria de ter baixa vulnerabilidade e passaria a ser uma área com significativa possibilidade de ser erodida e causar impactos ao ambiente e a comunidade que frequenta a praia. Sendo que metade desta extensão está localizada no Setor Sul do estado, que é a área que tem o maior percentual de baixa vulnerabilidade atual.

A terceira e a quarta linha da figura 2.8 das projeção de  $H_s=1,80$  m e ARNMM=0,25 m; e  $H_s=2,25$  m e ARNMM=0,25 m respectivamente, apresentaram resultados idênticos. Que foram: diminuição de 38 para 34% das praias com baixa vulnerabilidade, aumento de 49 para 51% no grau moderado e de 13 para 15% no alto, com relação à vulnerabilidade atual. Isso mostra que o aumento do nível do mar de 25 cm faz com que cerca de 5 km de costa passem a ter alta vulnerabilidade, para todos os aumentos de onda testados. Já, nos dois últimos cenários descritos, a maior  $H_s$  resulta em maior perda de praia com baixa vulnerabilidade, cerca de 7 km, sendo destes, 5 km localizados no Setor Sul e 2 km no Núcleo Metropolitano, na praia do Pina. O Setor Norte não teve nenhum segmento que deixou de ter baixa vulnerabilidade.

Figura 2.8 - Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com  $H_s = 1,5$  m ARNNM=0 m. Projeções com ARNNM de 0,25 m, e  $H_s$  de 0,15; 0,30; 0,75 m.



Fonte: o autor.

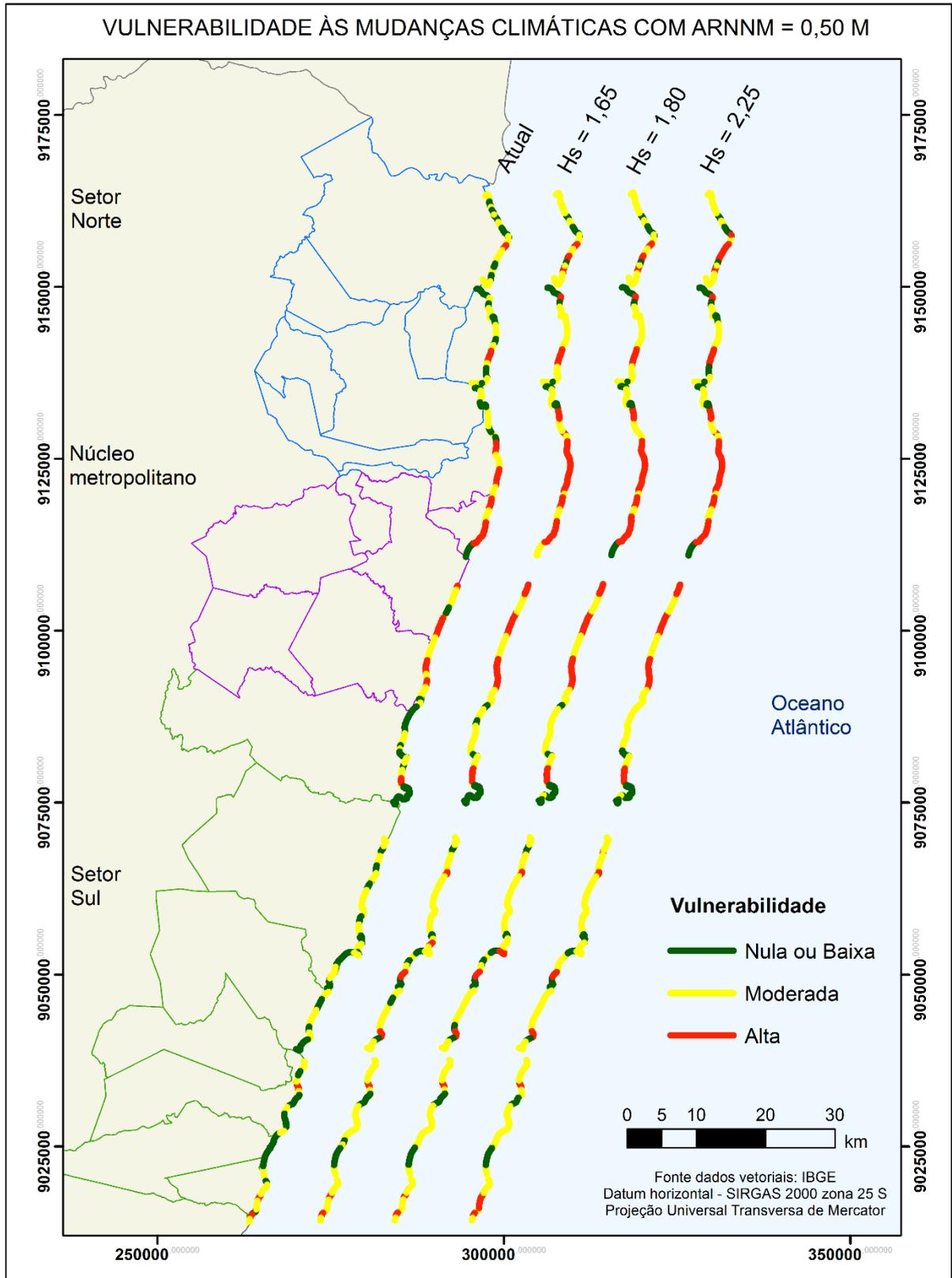
Os seguintes três cenários apresentados mostram a vulnerabilidade para o aumento no ARNMM de 0,50 m. Juntamente com aumentos na altura significativa de onda ( $H_s$ ) de 0,15; 0,30; 0,75 m (fig. 2.9). Nestas projeção o litoral de Pernambuco terá 37 km praias com vulnerabilidade mais altas que a atual o que os torna mais preocupantes que os primeiros cenários apresentados.

A segunda linha da figura 2.9 mostra a vulnerabilidade para a projeção de  $H_s=1,65$  m e ARNMM=0,50 m. Nesta a vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 17%, há um aumento de 49 para 58% na intensidade moderado e de 13 para 25% na alta, comparados com a situação atual.

Na terceira linha da figura 2.9 está apresentada a projeção de  $H_s=1,8$  m e ARNMM=0,50. Neste cenário o percentual de praias com vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 16%, a moderada aumenta de 49 para 59%, e a alta de 13 para 25% em comparação com a situação atual.

Na quarta linha da figura 2.9 está apresentada a projeção de  $H_s=2,25$  m e ARNMM=0,50 m. Neste cenário o percentual de praias com vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 15%, a moderada aumenta de 49 para 59%, e a alta de 13 para 26% em comparação com a situação atual. Estes três cenários com o ARNMM=0,50 tem resultados semelhantes, sendo que a vulnerabilidade se mostrou em geral com o dobro do potencial para sofrer erosão do que na situação de hidrodinâmica atual. Uma comparação entre o último cenário mostrado e a situação atual é: vulnerabilidade baixa é reduzida de 64 km para 27 km; a moderada sobe numa proporção menor, de 84 km atuais para 102 km; e a alta dobra sua extensão de 23 km para 45 km.

Figura 2.9 - Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com  $H_s = 1,5$  m ARNNM=0 m. Projeções com ARNNM de 0,25 m, e  $H_s$  de 0,15; 0,30; 0,75 m.



Fonte: o autor.

Os últimos três cenários apresentam a vulnerabilidade para o aumento no ARNMM de 1,00 m. Juntamente com aumentos na altura significativa de onda ( $H_s$ ) de 0,15; 0,30; 0,75 m (fig. 2.10). Estes cenários mostram uma situação crítica, pois 50 km do litoral tem a vulnerabilidade à erosão costeira elevadas. Isso significa que cerca de 90% do litoral terá vulnerabilidade de moderada à alta.

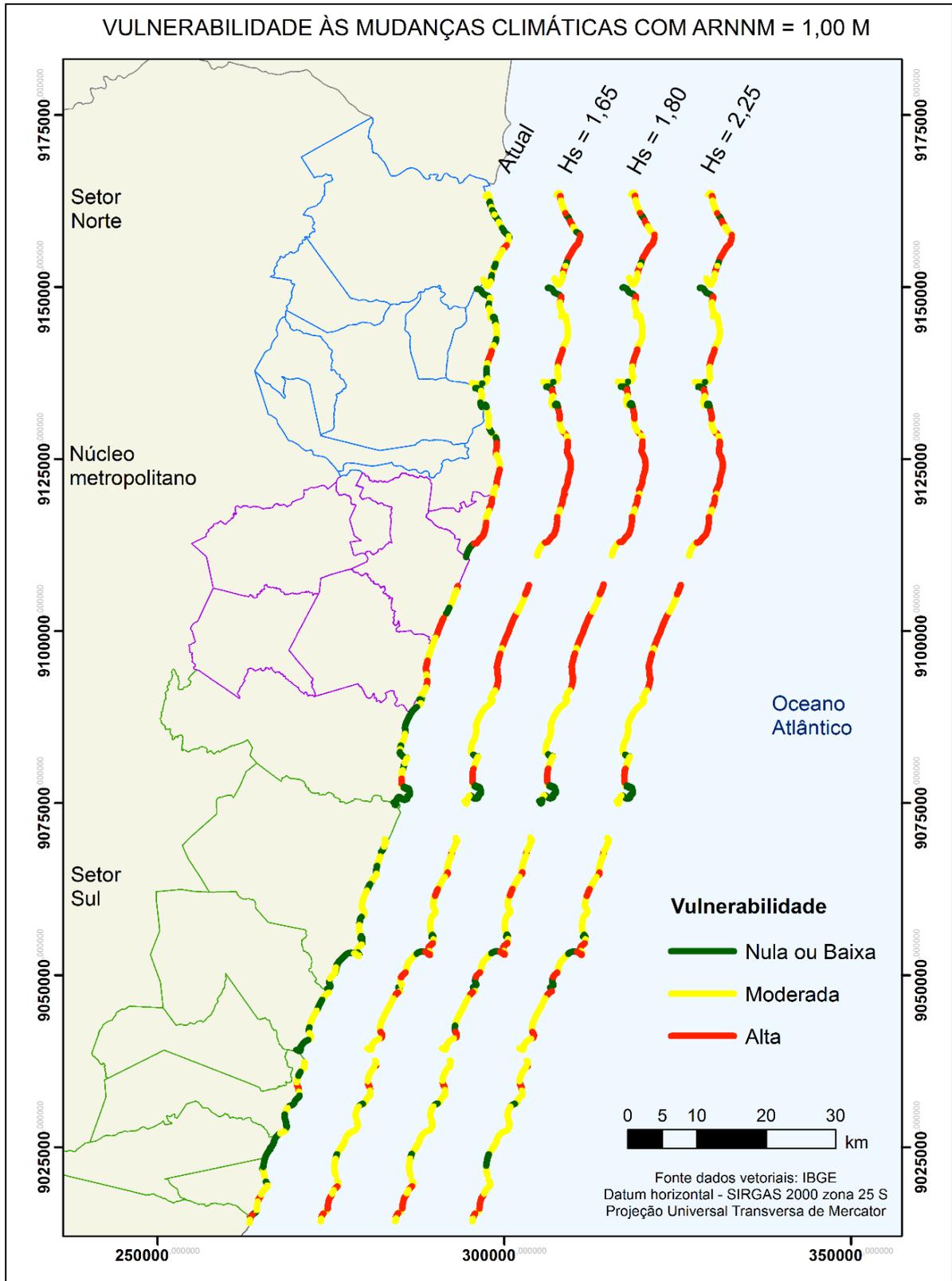
A segunda linha da figura 2.10 mostra a vulnerabilidade para a projeção de  $H_s=1,65$  m e ARNMM=1,00 m. Nesta a vulnerabilidade baixa diminui 38 para 8%, há um aumento de 49 para 56% na intensidade moderado e de 13 para 36% na alta, comparados com a situação atual.

A terceira linha da figura 2.9 mostra a vulnerabilidade para a projeção de  $H_s=1,80$  m e ARNMM=1,00 m. Nesta a vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 9%, há um aumento de 49 para 56% na intensidade moderado e de 13 para 35% na alta, comparados com a situação atual.

A quarta linha da figura 2.10 mostra a projeção de  $H_s=2,25$  m e ARNMM=1,0. Neste cenário percentual de praias com vulnerabilidade baixa diminui de 38 para 9%, a moderada aumenta de 49 para 57%, e a alta de 13 para 34% em comparação com a situação atual. Esse é o cenário mais preocupante, já que apenas 15 km da zona costeira não estaria em uma situação de atenção, localizados no costão rochoso de Cabo de Santo Agostinho e na desembocadura de alguns rios. Sendo que a praias próximas a foz de rios são locais bastante dinâmicos e requerem estudos detalhados para predizer o comportamento destes frente as variações climáticas. Outros 98 km apresentam vulnerabilidade moderada localizados principalmente no Setor Sul, o que é o esperado uma vez que os resultados atuais mostram a maior concentração de baixa vulnerabilidade neste setor, portanto se a conservação das características naturais forem mantidas, no futuro este será o setor com menor vulnerabilidade relativa. Os demais 60 km constituem a extensão de vulnerabilidade alta.

Nos dois últimos cenários é possível observar que houve um aumento de segmentos com vulnerabilidade baixa, o que não é o esperado uma vez  $H_s$  é maior. Entretanto isso ocorre porque o  $H_s$  é maior offshore e interação dessa onda com os recifes resulta em menores  $H_s$  na costa. O que acarreta em pequenas mudanças na vulnerabilidade final.

Figura 2.10 - Vulnerabilidade à erosão costeira e às mudanças climáticas. Vulnerabilidade atual, linha mais à esquerda, com  $H_s = 1,5$  m ARNNM=0 m. Projeções com ARNNM de 0,25 m, e  $H_s$  de 0,15; 0,30; 0,75 m.



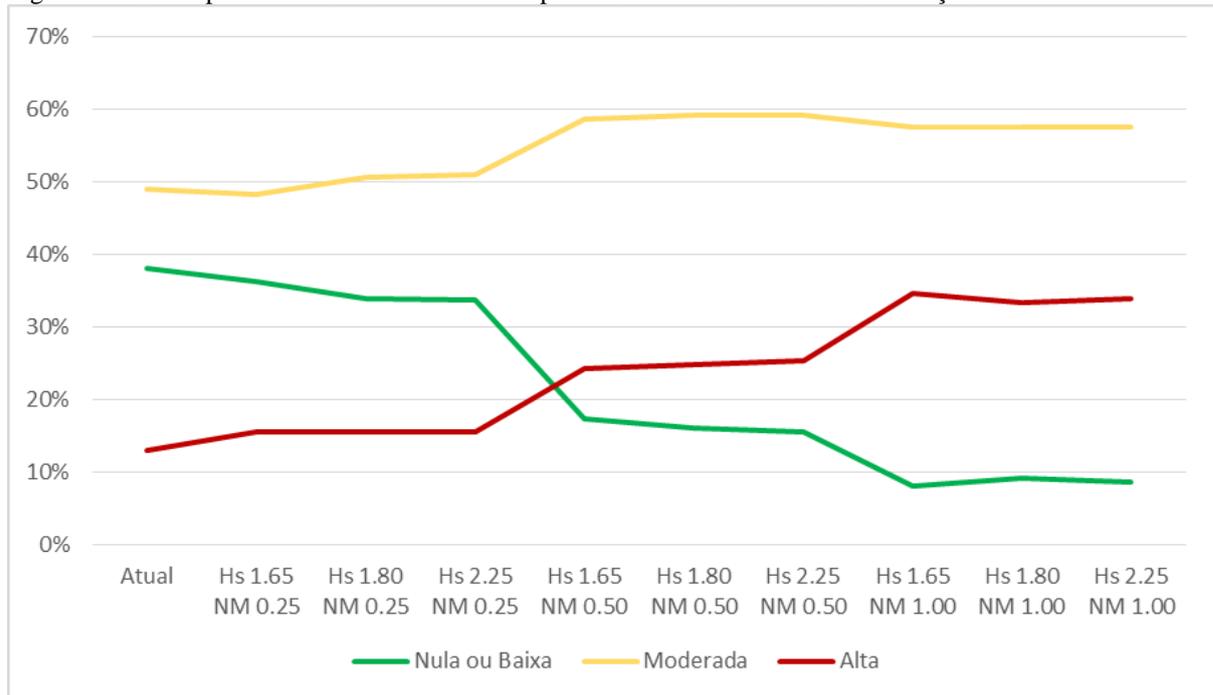
Fonte: o autor.

As variações do nível médio do mar são mais influentes nos resultados médios da vulnerabilidade às mudanças climáticas porque foi considerado que a subida do mar será igual ao longo de todo o litoral de Pernambuco. Enquanto os aumentos na altura de onda significativa, não causam um aumento homogêneo da altura de onda que atinge as praias, em decorrência dos processos de interação das ondas incidentes com a batimetria, que é distinta ao longo do litoral.

Os cenários com aumento de ARNMM=0,25 m não acarretam sérias mudanças na vulnerabilidade das praias numa visão regional de todo o estado, mas alguns pontos do litoral poderão estar mais susceptíveis aos impactos causados por um processo erosivo (fig. 2.11). Neste caso é necessário um estudo a nível local para avaliar as características detalhadas da praia, da comunidade que a utiliza para posteriormente definir qual a melhor resposta frente a possibilidade de erosão.

Já nos outros seis cenários a vulnerabilidade geral de Pernambuco tem uma elevação relevante que requer atenção dos responsáveis pela gestão das comunidades litorâneas.

Figura 2.11 - Comportamento da vulnerabilidade para os diferentes cenários de mudanças climáticas analisadas.



Fonte: o autor.

Nos nove cenários mostrados neste estudo, somente foram consideradas variações na altura de onda, entretanto podem acontecer variações no período e na direção da incidência das ondas, o que acarretaria em drásticas mudanças na configuração da linha de costa. Além das

possíveis mudanças nos demais indicadores analisados, como a densidade populacional e as taxas de retrogradação, por exemplo.

Segundo MUEHE (2001) a linha de costa no nordeste do país tende a recuar entre 120 e 210 metros dependendo da declividade do terreno, para uma elevação do nível do mar de 1 m. Com base nessa taxa de retrogradação Muehe sugere que a faixa de não urbanização seja de no mínimo 200 m. Entretanto, esta é uma opção viável somente para as praias ainda não urbanizadas, onde todo o ambiente praiado poderá migrar em direção ao continente, não caracterizando um problema de erosão, se não o recuo natural da linha de costa. Já nas áreas urbanizadas a retrogradação natural do sistema é barrado pela urbanização, que impede a dinâmica praiado. Existem diferentes abordagens para a adaptação das cidades frente aos problemas de erosão causados pela subida do nível do mar, como será mostrado no seguinte item deste estudo.

#### *2.5.6 Possíveis ações*

Primeiramente é importante salvaguardar as áreas mais vulneráveis à erosão, através de uma gestão adaptativa e preventiva. A vantagem de não permitir a construção nestas áreas é que usualmente, ações preventivas, são mais eficazes e de menor custo, que ações de reparação aos danos causados pela erosão.

Entretanto esta opção é viável somente em áreas ainda não urbanizadas, que permitem a prevenção de danos as comunidades que venham se fixar nestas áreas vulneráveis. O planejamento deve ser feito baseado em mecanismos de avaliação que tenham em conta a dinâmica da zona costeira, como estudos de morfodinâmica praiado e processos de inundação que considerem as mudanças climáticas. No Setor Sul de Pernambuco está a maior área que permite este tipo de planejamento.

Para as demais praias, que já possuem centros urbanos desenvolvidos há três abordagens básicas para reduzir o risco de danos à comunidade costeira (DRONKERS et al., 1990; KLEIN et al., 2001; NEVES; MUEHE, 2008). Estas são:

- Proteger: visa reduzir o risco através da diminuição da probabilidade de ocorrência do evento. A proteção pode ser feita com obras rígidas como: muro, quebra-mar, espigão, entre outras. Pode-se também optar por obras não estruturais como: engorda de praia e restauração ou criação de dunas.

- Recuar: visa diminuir possíveis impactos. O recuo pode ser de forma preventiva, impedindo construções próximas de áreas vulneráveis. Ou de forma mitigativa, com o deslocamento dos primeiros metros de construções próximas a linha de costa, com ou sem a revitalização da orla abandonada.
- Adaptar-se: prevenir a comunidade para que esta esteja preparada para conviver com os impactos causados pelo evento. Nos casos de adaptação é necessário elaborar planos para situações emergenciais, modificar a estrutura das construções ou redefinir o uso do solo em áreas vulneráveis, destinando-as à aquicultura, por exemplo.

No Setor Norte, nos municípios de Goiana, Itamaracá e Igarassu é possível desenvolver planos de manejo que impeçam construções em áreas mais vulneráveis, já que 16 km de litoral não possui nenhum tipo de urbanização. Neste trecho também pode ser aplicada a abordagem de adaptação, destinando as áreas vulneráveis para agricultura ou aquicultura. Outros 34 km da orla é formado por casas, que podem ser recuadas ou protegidas caso seja necessário. Entretanto, a maior parte destas casas não está localizada em áreas vulneráveis, com exceção do litoral do município de Paulista, cuja linha de costa sofreu uma intensa retrogradação. Neste já existem diversas obras de proteção costeira, formadas por uma sequência de quebra-mares, alguns espigões e muros de contenção.

A infraestrutura ao longo de toda a orla do Núcleo Metropolitano possui alto valor econômico e cultural, por isso a abordagem mais recomendada é a de proteger, seja com obras estruturais ou não. No município de Olinda o processo erosivo teve seus primeiros registros em 1915, desde esta data até 1990 foram perdidos cerca de 80 metros de costa (NEVES; MUEHE, 1995). Sendo a primeira linha de construções abandonada, caracterizando a abordagem recuo. E a partir de 1958 iniciaram-se as obras de proteção costeira, por meio de quebra-mares, espigões e enrocamento (PEDROSA, 2007). Atualmente toda a linha de costa deste município encontra-se fixada, os outros dois municípios deste setor também possuem trechos de praia protegidos por obras estruturais. A solução aqui recomendada é que sejam realizados estudos para avaliar a capacidade de proteção das obras já instaladas considerando os efeitos das mudanças climáticas, além de elaborar planos de manutenção ou adaptação das obras.

O Setor Sul é, em geral, a área menos vulnerável. Em 42 km, do litoral deste setor, não possui urbanização, onde poderia ser desenvolvido um plano preventivo, que é a solução mais

econômica para diminuir prejuízos futuros. Outros 50 km de orla possuem pequenos comércios e casas. Assim como o sugerido para o Setor Norte, neste trecho pode-se aplicar as abordagens de recuo ou proteção da costa caso venha a ser necessário. Apenas 4 km de orla no Setor Sul é composto por construções maiores, que são na maioria hotéis e resorts.

Como a principal atividade econômica dessa região é baseada no turismo é importante preservar as condições naturais das praias. Quando necessário proteger a costa é recomendável que seja dada preferência às obras não estruturais para que a aparência do litoral não tenha mudanças marcantes. Outra preocupação deve ser com os recifes de coral, que fazem parte dos atrativos turísticos da região.

## 2.6 CONCLUSÕES

A pesquisa de opinião realizada com os especialistas para atribuir pesos as categorias e indicadores avaliados neste estudo foi satisfatória, resultando na seguinte ordem de importância das categorias: fatores dinâmicos, sociais, morfológicos e por último evidências de erosão.

O principal resultado do Índice de Vulnerabilidade Costeira, mostrou que atualmente a vulnerabilidade em Pernambuco é baixa em 38% da região costeira, localizados principalmente no Setor Sul, moderada em 49% e alta em 13% localizados principalmente no Núcleo Metropolitano. Quando aplicado às mudanças climáticas, os resultados foram progressivamente maiores à medida que a energia hidrodinâmica aumentava no sistema. Chegando, no cenário mais pessimista resulta em vulnerabilidade baixa de 9%, moderada de 57%, e a alta de 34%.

A metodologia utilizada nesta dissertação se mostrou prática e adequada ao litoral de Pernambuco, proporcionando dados de vulnerabilidade à erosão e à mudanças climáticas para os 187 km de praias. Além de ser uma metodologia que pode ser reproduzida em outros estados, uma vez que o acesso as informações é simples, com a exceção de alguns indicadores, como a variação de linha de costa e projeções de altura de onda e de nível de mar, que requerem uma série de dados de reanálise de no mínimo 30 anos.

Uma falha verificada na metodologia de vulnerabilidade às mudanças climáticas que a projeção de dados futuros só foi feita para os fatores dinâmicos. Enquanto os demais indicadores permaneceram com os dados atuais. Uma sugestão para trabalhos futuros é usar projeções para outros indicadores como a densidade populacional, que é estimada pelo IBGE e

está disponível no site da agência; e distância entre a linha de costa e a urbanização, que pode ser calculada projetando as taxas de erosão da linha de costa.

A classificação apresentada permite identificar o grau de vulnerabilidade de cada segmento de praia e evidencia as praias relativamente mais ameaçadas, que deveriam ser priorizadas por políticas de prevenção de catástrofes. Apesar das particularidades de cada praia, neste estudo foi apresentado uma avaliação geral em relação aos setores Norte, Metropolitano e Sul.

Os resultados encontrados nesta dissertação suportam a hipótese inicial de que a Região Metropolitana de Recife concentra as maiores vulnerabilidades, e que nos outros trechos do litoral pernambucano a vulnerabilidade atual média é menor. Isso se deve principalmente à influência dos fatores sociais na determinação da vulnerabilidade, uma vez que os demais indicadores variam em intervalos menores.

Com relação aos setores Norte e Sul a vulnerabilidade atual é de baixa a moderada, porém nos cenários de mudança climática a situação passa a ser de moderada a alta. Uma opção para diminuir possíveis riscos nas áreas mais vulneráveis destes dois setores é aplicar plano de gestão urbana que determine uma faixa de segurança (de não edificação) maior do que os 33 m determinados pela lei nº 9.760, que compõe os terrenos da União (BRASIL, 1946). O planejamento urbano dessas áreas deveriam levar em consideração a vulnerabilidade que a região pode vir a ter em decorrência das mudanças climáticas, e dessa forma evitar problemas de erosão no futuro.

No Núcleo Metropolitano a situação atual de vulnerabilidade à erosão pode ser considerada preocupante. Ao contrário do Setor Norte e sul, o Núcleo Metropolitano é intensamente urbanizado e, por isso, determinar faixa de segurança considerando as mudanças climáticas não é possível. A sugestão mais indicada seria concentrar os esforços na conservação da praia remanescente, além de realizar análises detalhadas para implantar obras de proteção costeira, caso se mostrem necessárias no futuro.

Antever locais que podem carecer de obras de proteção é uma das aplicações do estudo de vulnerabilidade. Com essa informação as obras podem ser bem planejadas, com análises técnicas e avaliação de diversas propostas, a fim de aplicar a solução que cause menos impactos negativos na praia.

Um fator que deve ser considerado é que o turismo no litoral pernambucano é a única fonte de renda para muitas pessoas, e portanto o planejamento urbano e de obras de proteção devem prezar a preservação da beleza natural das praias, para que continue atraindo turistas.

Todos os dados que promovem o aprimoramento de planos de gestão urbana são de extrema importância, o mesmo acontece com informações de vulnerabilidade, seja à erosão ou à mudanças climáticas, que, se aplicados na gestão costeira podem ajudar a conservar o ambiente praias e também a infraestrutura local.

## CAPÍTULO 3

# EROSÃO COSTEIRA EM PAU AMARELO, PAULISTA – PERNAMBUCO

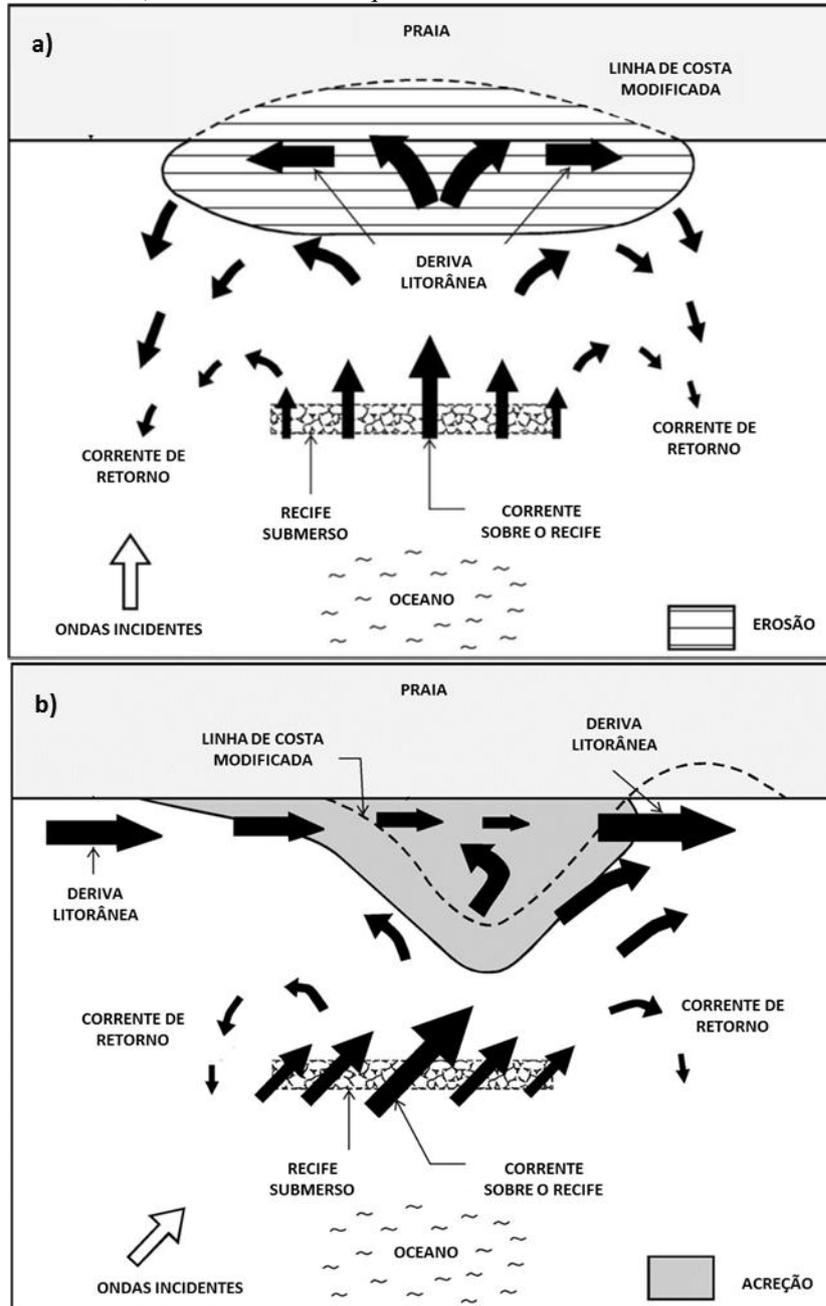
### 3.1 INTRODUÇÃO

Em Pernambuco, quase toda a zona costeira é protegida por recifes de arenitos (*beachrock*). Estes recifes interagem com as ondas incidentes na costa, e podem alterar todos os parâmetros da onda como a direção, amplitude, período e energia, por processos de refração, difração e fricção (HARDY; YOUNG, 1996).

A propagação das ondas para a costa em áreas com recifes também é modulada pela maré (BEETHAM; KENCH, 2014). Como é o caso de Pernambuco, onde alguns recifes ficam emersos durante a maré baixa e impedem a propagação de parte das ondas. Já durante os períodos de maré alta de sizígia a maior parte dos recifes ficam submersos e permitem a passagem das ondas para a costa.

O comportamento das ondas sobre recifes submersos pode ser comparado com o comportamento encontrado em quebra-mares submersos (BLACK; ANDREWS, 2001). Segundo Ranasinghe & Turner (2006) há dois padrões básicos de propagação de ondas sobre estas estruturas (fig. 3.1). A primeira é quando a direção da incidência principal é paralela à linha de costa. Esta gera duas células de circulação próximas da costa, e tende a causar erosão na parte central no ponto de divergência das duas células (fig. 3.1a). A segunda é quando a principal onda incidente é oblíqua à linha de costa. Esta gera um gradiente na magnitude da corrente litorânea, tornando-a mais fraca em frente ao recife e mais intensa logo após o fim da estrutura, seguindo a direção da deriva. Isso gera um acúmulo de sedimento em frente à estrutura e erosão na praia sem a proteção do recife (fig. 3.1b).

Figura 3.1 - Representação do transporte litorâneo e configuração da linha de costa em áreas com recifes submersos a) Linha de costa paralela às ondas incidentes; b) Linha de costa oblíqua às ondas incidentes.



Fonte: Modificado de RANASINGHE & TURNER, 2006.

RANASINGHE & TURNER (2006) mostram que a energia das ondas é reduzida ao passar pelos recifes, entretanto as correntes geradas pela onda juntamente com a deriva litorânea podem causar focos de erosão na costa, mesmo com ondas de menor intensidade. Além destes outros parâmetros também condicionam a dinâmica costeira, como, por exemplo, a

profundidade da plataforma, a altura significativa e o período das ondas, e a estabilidade geológica do litoral (KOMAR, 1983).

### *3.1.1 Justificativa*

Já foi constatado em diversos estudos que praias protegidas por recifes sofrem menor impacto de ondas, e têm também menores taxas de erosão, e maior facilidade de recuperação depois de um evento extremo (GALLOP et al., 2012).

Apesar do relatado benefício de proteção que os recifes oferecem às praias em Pernambuco alguns pontos protegidos por recife apresentam indicadores de erosão intensa. Para compreender a causa da erosão nestes pontos, este estudo analisou com maior detalhe a Praia de Pau Amarelo, que é protegida por recifes e está em processo de erosão.

## 3.2 OBJETIVOS

### *3.2.1 Objetivo Geral*

O principal objetivo deste estudo foi entender os processos hidrodinâmicos atuantes na costa.

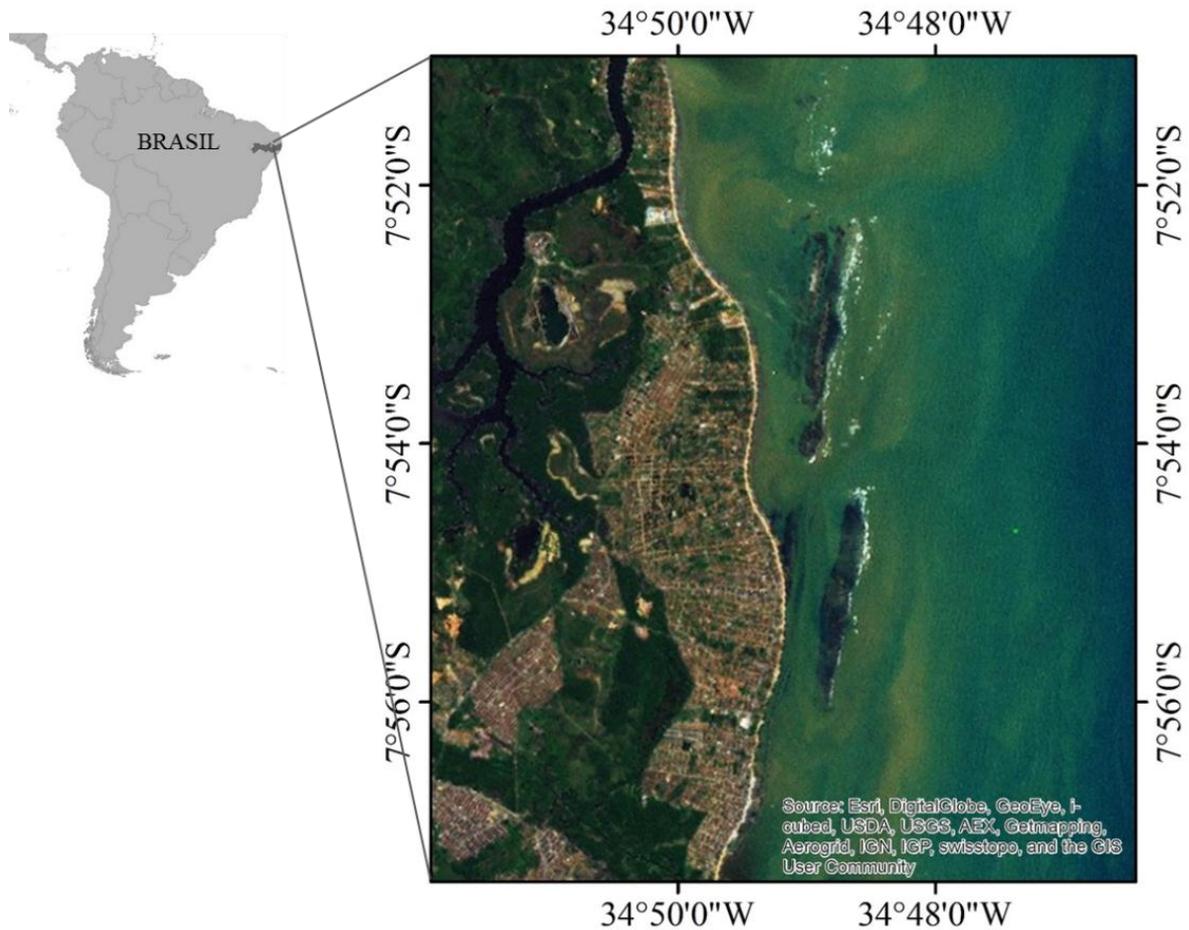
### *3.2.2 Objetivos Específicos*

- Determinar a dispersão das ondas sobre o recife de Pau Amarelo;
- Determinar o módulo e a direção das correntes próximas da costa de Pau Amarelo;
- Determinar as variações da dinâmica costeira em Pau Amarelo, para três cenários de mudanças climáticas;

## 3.3 ÁREA DE ESTUDO

Pau Amarelo é uma praia, em forma de arco, do município de Paulista, situada à 18 km ao norte de Recife. A praia tem cerca de 4 km de largura, é protegida por um sistema de recifes de barreira descontínuos, posicionado entre 300 - 700 m de distância da linha de costa (fig. 3.2).

Figura 3.2 - Localização da Praia de Pau Amarelo, no município de Paulista, Pernambuco.



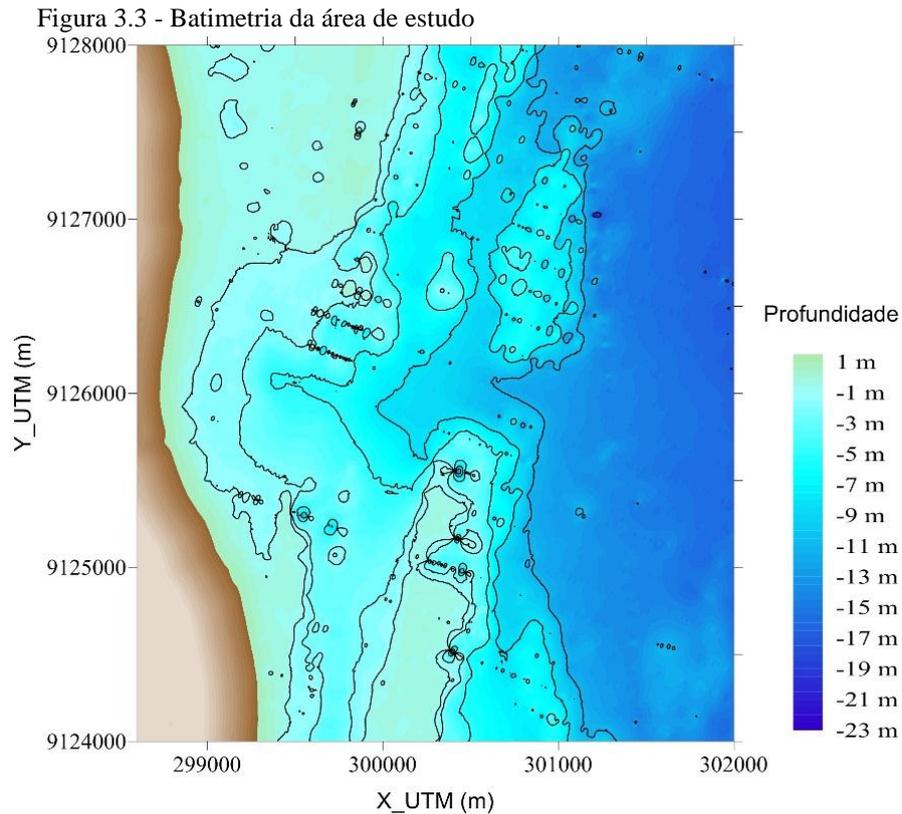
Fonte: o autor.

Aproximadamente 13 mil pessoas residem na zona costeira de Pau Amarelo, a densidade atinge 0,9 hab/m<sup>2</sup>, o que caracteriza uma área densamente povoada. Na orla podem ser encontrados bares e restaurantes, assim como casas e prédios residenciais (FINEP/UFPE, 2009).

Ao longo dos últimos 60 anos, a ocupação dos primeiros 500 m da costa se intensificou em Pau Amarelo desenvolvendo extensas áreas residenciais, comerciais e turísticas. A urbanização foi estabelecida de forma desordenada, com construções invadindo o sistema praial (MANSO et al., 2006).

A zona costeira local é composta de sedimentos do período Quaternário que foram depositados sobre o embasamento cristalino da Província Borborema de idade pré-cambriana, sendo composto, predominantemente, por silicatos e carbonatos, onde o tamanho médio dos grãos é de 0,34 mm (areia média e fina) (FINEP/UFPE, 2009).

Devido à existência do recife, a batimetria local, exibe um padrão complexo (fig. 3.3).



A tabela 3.1 mostra alguns parâmetros de ondas coletados de uma boia virtual, localizada em frente à Praia de Pau Amarelo, a 2,5 km da costa, a uma profundidade de 9 m. Estes estão disponíveis no banco de dados brasileiro fornecido pelo Sistema de Modelagem Costeira (*SMC-Tools*).

Tabela 3.1 - Dados da reanálise das ondas de Pau Amarelo.

Direção	Probabilidade de ocorrência (%)	$H_s$ (m)	$T_p$ (s)
ENE	0.01	1.0362	9.9691
SE	1.76	1.1618	5.9267
E	7.36	1.1564	7.57
ESE	90.86	1.291	7.1871

Fonte: o autor.

### 3.4 METODOLOGIA

Dois modelos numéricos foram aplicadas neste estudo para compreender a hidrodinâmica local. O modelo WAPO para reproduzir a propagação das ondas (SILVA; BORTHWICK; TAYLOR, 2005) e o modelo COCO para reproduzir o módulo e direção das correntes impulsionadas por ondas (SILVA et al., 2010).

O WAPO é baseado na equação de Berkhoff (1972), conhecida como “Equação do declive suave” e pode resolver casos de refração, reflexão, difração. Portanto, este modelo tem capacidade para reproduzir propagação de ondas em áreas com batimetrias complexas. O modelo COCO resolve equações não-lineares de águas rasas utilizando um resultado do modelo WAPO, a fim de calcular as tensões de radiação e as correntes geradas por ondas. Ambos os modelos têm sido utilizados com sucesso em outros estudos (ESCUADERO; SILVA; MENDOZA, 2014; MARINO-TAPIA et al., 2011).

Foram utilizados como entrada para os modelos os principais parâmetros estatísticos de onda, como a altura significativa ( $H_s$ ), o período de pico ( $T_p$ ), a direção ( $\theta$ ), e o nível médio da maré (MTL), este último foi utilizado como parâmetro para representar o aumento relativo do nível médio do mar (ARNMM), que é um dos efeitos das mudanças climáticas.

A área de estudo não possui nenhuma variação relevantes no clima de ondas ao longo do ano. Por isso as simulações nos modelos foram realizados com os valores de maior ocorrência, como foi mostrado na tabela 3.1. Este cenário representa a dinâmica atual.

Dados históricos de onda e maré foram analisados pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da Universidade Federal de Pernambuco, que definiu alguns possíveis cenários futuros com variações causadas pelas mudanças climáticas. O presente estudo selecionou três

destes possíveis cenários para analisar a hidrodinâmica em Pau Amarelo. Os cenários selecionados representam três aumentos relativos do nível médio do mar (ARNMM), juntamente com a altura de onda mais alta prevista para ocorrer nos próximos 30 anos.

(1)  $H_s = 1,30$  m;  $T_p = 7$  s;  $\theta = 112,5^\circ$  e ARNMM = 0,00 m.

(2)  $H_s = 2,25$  m;  $T_p = 8$  s;  $\theta = 112,5^\circ$  e ARNMM = 0,25 m.

(3)  $H_s = 2,25$  m;  $T_p = 8$  s;  $\theta = 112,5^\circ$  e ARNMM = 0,50 m.

(4)  $H_s = 2,25$  m;  $T_p = 8$  s;  $\theta = 112,5^\circ$  e ARNMM = 1,00 m.

Além dos parâmetros de onda outro dado de entrada dos modelos WAPO e COCO, é a batimetria. A batimetria de Pau Amarelo utilizada neste estudo foi proveniente do banco de dados do projeto “Monitoramento Ambiental Integrado – MAI” realizado em 2009 na Região Metropolitana do Recife. Esta possui uma malha de 681 x 801 pontos (x e y respectivamente) interpolados a cada 5 metros (FINEP/UFPE, 2009).

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

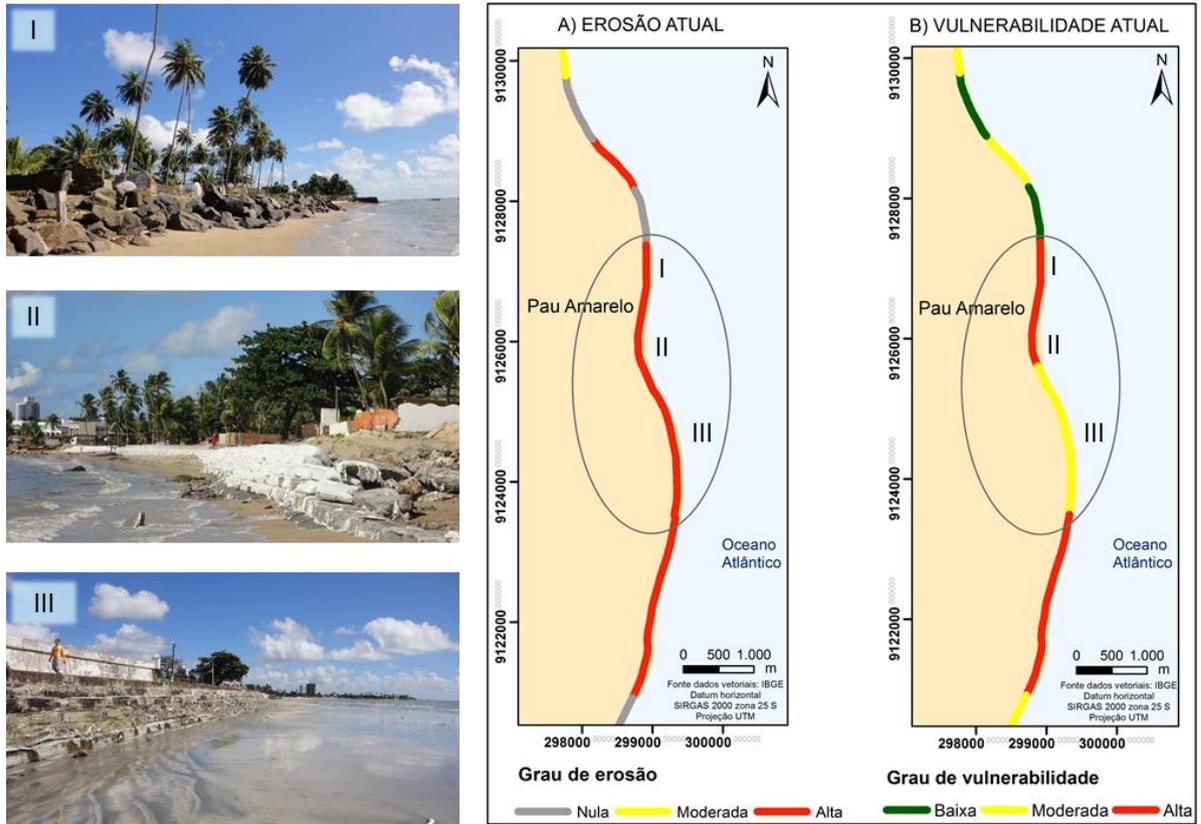
#### 3.5.1 Situação atual de erosão e vulnerabilidade

Na Praia de Pau Amarelo foram avaliados três pontos nos Capítulos 1 e 2 desta dissertação. Que estão marcados na figura 3.4 pelos números I, II e III. No Capítulo 1 foi analisada a situação atual da erosão por meio dos impactos visuais. Os resultados mostraram que toda a Praia de Pau Amarelo tem alto grau de erosão. Como pode ser visto na figura 3.4 os três pontos de coleta apresentam a linha de costa estabilizada por obras de proteção estruturais. No ponto I com enrocamento rochoso, no II e no III com *bagwalls* (obra similar a uma escada de concreto), nenhum dos pontos apresentou pós-praia.

No Capítulo 2 foi analisada a vulnerabilidade à erosão. O resultado da Praia de Pau Amarelo está mostrado na figura 3.4b, onde os pontos I e II apresentaram alta vulnerabilidade, devido ao maior recuo da linha de costa nestes pontos e da maior altura das ondas que chegam na costa. O ponto III apresentou vulnerabilidade moderada porque não teve retrogradação da linha de costa durante o período analisado (entre 2005 e 2014) e a altura das ondas que chegam

na costa são mais baixas do que nos pontos I e II. Na tabela 3.2 estão descritos todos os indicadores de vulnerabilidade utilizados para calcular o Índice de Vulnerabilidade Costeira.

Figura 3.4 – Praia de Pau amarelo. a) Situação atual de erosão; b) Vulnerabilidade atual à erosão; I mostra o ponto de coleta na parte norte da baía, II mostra o ponto na parte central e III mostra o ponto na parte sul da baía.



Fonte: o autor.

Tabela 3.2 – Indicadores dos três pontos localizados na Praia de Pau Amarelo utilizados no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira.

INDICADOR	I	II	III
Nível do mar (m)	0	0	0
Exposição relativa à onda	exposto	exposto	exposto
Altura de onda (m)	0.91	0.91	0.72
Distância urbanização - linha de costa (m)	25	30	20
População por metro de praia	4.54	4.54	4.54
Tipo de urbanização	casas	casas	casas
Tipo de substrato	Inconsolidado	Inconsolidado	Inconsolidado
Conservação das dunas	suprimida	suprimida	suprimida
Variação da linha de costa (m)	-15	-12	0
Indicadores visuais de erosão	alta	alta	alta

Fonte: o autor.

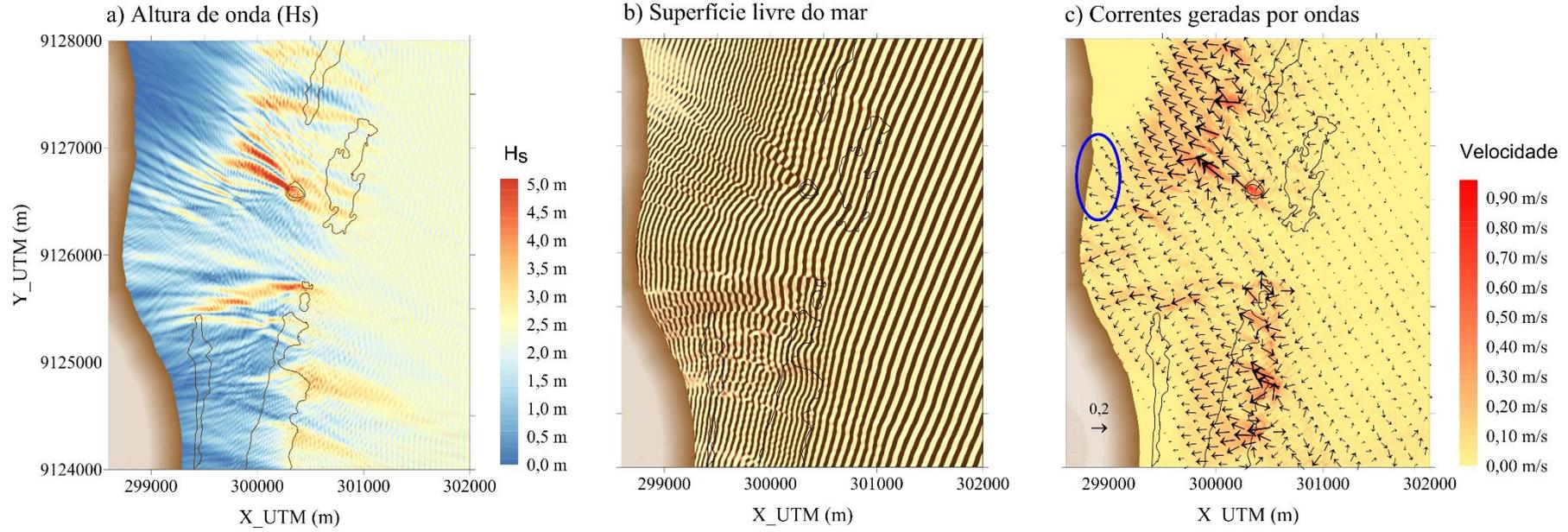
### 3.5.2 Ondas e correntes

Os resultados da simulação da propagação das ondas foram representados em três gráficos, mostrando a altura de onda, a superfície livre do mar e a velocidade e direção das correntes (fig. 3.5).

Na superfície do mar foi observado a ocorrência de processos de refração e difração, promovidos pela presença dos recifes mais próximos da costa (fig 3.5b). Este mesmo gráfico mostra a circulação complexa que ocorre sobre os recifes, com pequenas células de circulação aparentemente fechadas, ou seja a energia destas células é dissipada toda nos recifes. Além de uma zona de sombra na parte norte da praia aonde não há propagação de ondas.

Foi observado a presença de dois focos principais de energia próximos a parte central da baía, que podem ser vistos pela altura mais alta das ondas e velocidade das correntes. Há diversos estudos que relacionam os focos de energia causados por processos de refração com erosão costeira (CARTER; LOWRY; STONE, 1982; DILLENBURG; ESTEVES; TOMAZELLI, 2004; MARGHANY, 2001). O foco de energia localizado no lado norte da baía possui maiores taxas de erosão do que o sul, identificado pelo círculo azul na figura 3.5c.

Figura 3.5 - Circulação hidrodinâmica em Pau Amarelo; a) Padrão de altura de onda ( $H_s$ ); b) Superfície instantânea do mar; c) Correntes geradas por ondas, o círculo azul marca um foco de energia; para as condições hidrodinâmicas atuais  $H_s = 1,3$  m,  $T_p = 7$  s,  $\theta = 112,5^\circ$ ,  $MTL = 1,7$  m.



Fonte: o autor.

HUR, LEE & CHO (2012) analisaram uma praia com dois quebra-mares submersos, usando um modelo tridimensional, e concluíram que a energia que chega à costa é menor, a altura das ondas também, e o run-up é menor em frente a abertura dos quebra-mares e mais alta nas áreas adjacentes. Semelhante ao que foi observado no presente estudo, que mesmo sem dados de run-up pode-se observar a maior altura de onda nestes locais.

A erosão em Pau Amarelo é condicionada, também pelos períodos de maré alta. Isso porque nos períodos de maré baixa o  $H_s$  e as correntes são mais fracas. Uma situação semelhante foi observada por CARTER, LOWRY & STONE (1982), onde somente durante a maré alta, parte da energia das ondas era refratada e convergia para um único ponto, causando erosão.

A batimetria mostrada na figura 3.3 mostra a formação de um canal perpendicular à praia desde a abertura dos recifes até a costa, o que corrobora com os resultados encontrados, uma vez que no canal, zona de maior profundidade, as ondas se propagam dissipando progressivamente a energia. Enquanto na área protegida por recifes, mais rasa, as ondas quebram antes de chegar à costa. Como foi possível observar na figura 3.4a, de altura de onda.

O gráfico de velocidade de correntes mostra uma circulação em duas células, uma no sentido sul e outra rumo ao norte da baía, sendo que a última é mais intensa que a primeira (fig. 3.4c). A corrente litorânea no litoral de Pernambuco é predominantemente dirigida para norte sendo intensificada pela circulação em célula rumo ao norte. Enquanto na célula sul a corrente litorânea perde velocidade por ter direção oposta à circulação gerada por ondas. Corroborando outra vez a maior taxa de erosão na parte norte da baía.

A circulação local é uma mistura dos dois padrões descritos por RANASINGHE & TURNER (2006), mostrado na figura 3.1. Isso porque no modelo destes autores é considerado somente um quebra-mar submerso, enquanto Pau Amarelo possui um recife descontínuo. Com a formação de uma baía (fig. 3.1a) e erosão na parte norte (fig. 3.1b).

### *3.5.2 Possíveis causas da erosão*

De acordo com o relatório MAI de 2009, a retração da linha de costa de Pau Amarelo entre os anos de 1974 e 2008 chega a 25 metros na parte norte da baía (FINEP/UFPE, 2009). Existem diversos fatores que podem ter levado a esse processo erosivo.

Além do fator natural, já citado, causado pela dispersão das ondas sobre os recifes e a intensificação da corrente litorânea há também alguns fatores antrópicos. Um destes é a

alteração no transporte de sedimentos causada pelas obras do porto de Recife, que culminou com uma sequência de obras de proteção nas praias ao norte do porto até atingir Pau Amarelo. Esta é apenas uma hipótese, mas que está apoiada em relatórios da comunidade científica local, onde se afirma que a erosão foi transferida de um ponto a outro, como um efeito cascata, após a construção do molhe em Recife (NEVES; MUEHE, 1995).

Outro fator são as alterações na dinâmica costeira causadas por construções sobre o pós-praia. Estas impermeabilizam parte do substrato, alterando o balanço sedimentar do sistema. O que pode impedir a restauração natural do perfil após períodos cíclicos de erosão. Como mostra a figura 3.5c, onde a linha de ocupação está muito próxima da linha de costa.

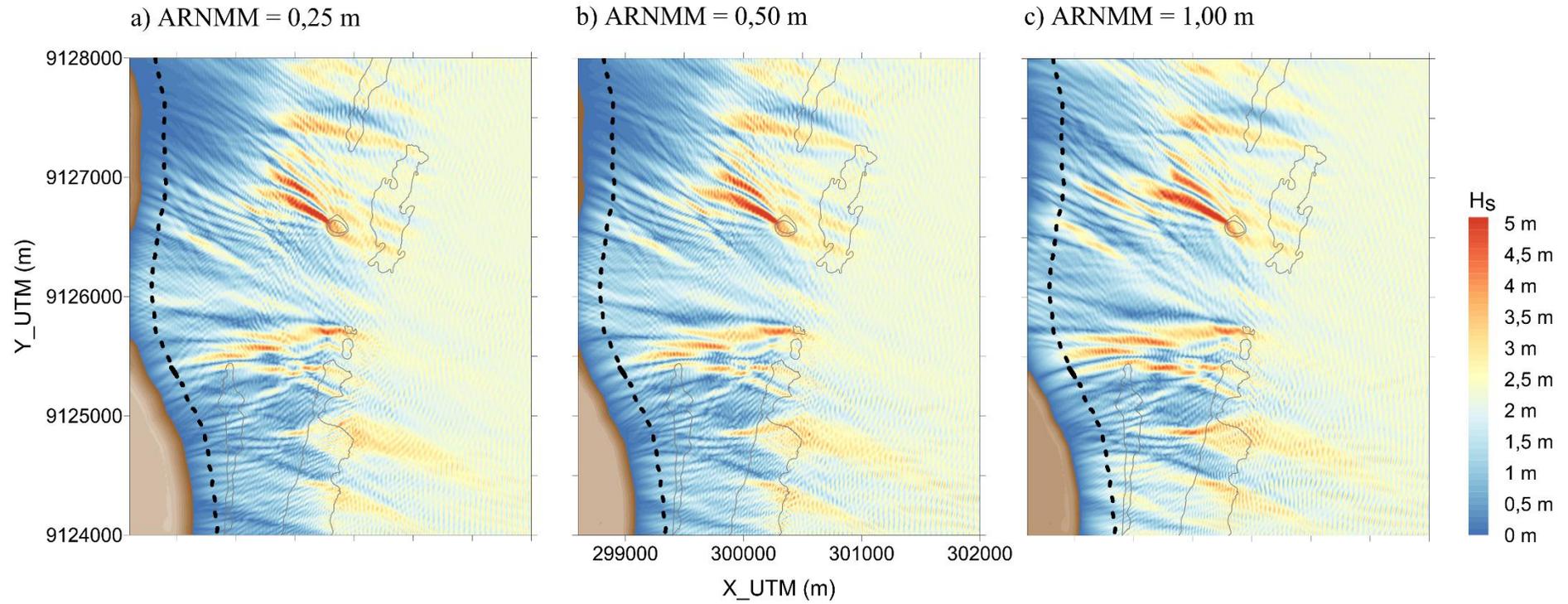
Outro fator antrópico identificado foi a fixação da linha de costa com escadas de concreto (*bagwall*). Estas estruturas podem aumentar o processo erosivo. Uma vez que na maré alta, as ondas são refletidas pelo muro e podem entrar em sinergia com as ondas incidentes, aumentando a perda de sedimentos costa afora. Como pode ser visto na figura 3.4, no ponto II e III, sendo que no ponto II a estrutura já encontra-se danificada.

### 3.5.3 Mudança climática

Nos três cenários de mudanças climáticas o comportamento das ondas foi semelhante ao estado atual (fig. 3.6). Entretanto a altura das ondas chegam com maior intensidade na costa, e os processos de difração são menos intensos do que na situação atual. Isso acontece porque nestes cenários a profundidade da crista dos recifes é maior, exercendo menor influência na propagação das ondas, principalmente no cenário (4), onde foi considerado ARNMM de 1,00 m.

Também é possível identificar que parte da zona costeira será inundada. Na figura 3.6 a linha pontilhada mostra a linha de costa atual, enquanto o contorno marrom mostra a posição da linha de costa prevista para cada cenário de mudança climática. O modelo WAPO não foi projetado para fazer análises de inundação, mas é seguro afirmar que pelos resultados da propagação das ondas na topografia atual, parte da linha de costa ficará inundada, pelo menos nos períodos de maré alta de sizígia, que foi o caso analisado.

Figura 3.6 - Altura de onda para cenários de mudanças climáticas, sendo os parâmetros  $H_s = 2,25$  m;  $T_p = 8$  s;  $\theta = 112,5^\circ$  comuns para os três cenários; a) ARNMM de 0,25 m; b) ARNMM de 0,50 m; c) ARNMM de 1,00 m



Fonte: o autor.

### 3.6 CONCLUSÕES

A análise da propagação de ondas realizada pelos modelos WAPO e COCO contribuiu de forma significativa para melhorar a compreensão da dinâmica da Praia de Pau Amarelo, uma vez que não existiam dados destes parâmetros para a área localizada entre a praia e os recifes.

Em alguns pontos da costa, a erosão é intensificado pelo padrão de circulação, somada ao possível déficit sedimentar causado pelas obras de proteção costeira à montante da praia, alterando a deriva litorânea. Entretanto, Pau Amarelo é uma praia urbanizada, com a zona costeira completamente modificada, o que torna difícil identificar as verdadeiras causas da erosão. Ou seja se é um processo natural, antropogênico, ou uma combinação de ambos.

Este apresentou intensidade de erosão distintas entre os segmentos estudados relacionados com causas antrópicas, principalmente no Núcleo Metropolitano e no município de Paulista pela construção de obras de proteção; e por causas naturais, como uma consequência da circulação hidrodinâmica local. Isso foi identificado na Praia de Pau, onde a presença de recifes de arenito gera correntes que causam erosão mais intensa na parte norte da praia.

Em Pau Amarelo, os recifes localizados próximos da praia causam difração das ondas incidentes, gerando uma corrente divergente próximo à costa, que somada a corrente litorânea gera um ponto de alta erosão no norte da baía. Esses resultados mostram que, contrariamente à ideia de que recifes representam uma proteção contra a erosão, estes podem desencadear processos erosivos.

É esperado que ocorra a retrogradação da linha de costa em todo o mundo devido, principalmente, ao aumento do nível do mar (COOPER; PILKEY, 2004). O mesmo poderá acontecer na Praia de Pau Amarelo, como foi constatado através dos resultados do modelo WAPO. Por isso é de fundamental importância estudar os possíveis impactos com as particularidades de cada praia, para que se possam planejar ações de mitigação ou proteção da zona costeira que em Pau Amarelo corresponde ao local de moradia de cerca de 13 mil pessoas que podem ser afetadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As metodologias utilizadas nesta dissertação foram satisfatórias para atingir os objetivos propostos, proporcionando dados de impactos visuais de erosão, vulnerabilidade à erosão e à mudanças climáticas para os 187 km de praias que compõem o litoral de Pernambuco.

Com relação aos impactos visuais causados pela erosão foi constatado que em cerca de 40% do litoral não existem evidências de erosão, enquanto nos demais 60% já existe algum grau de erosão. O Setor Norte apresentou o maior percentual de trechos com alto grau de impacto entre os três setores, o Núcleo Metropolitano apresentou resultados semelhantes à média do estado e o Setor Sul apresentou o maior percentual de segmentos sem evidências de erosão.

De acordo com a opinião de especialistas foi definida a importância relativa dos indicadores utilizados para calcular o Índice de Vulnerabilidade Costeira, resultando na seguinte ordem decrescente: fatores dinâmicos, sociais, morfológicos e por último evidências de erosão.

O principal resultado do Índice de Vulnerabilidade Costeira, mostrou que atualmente a vulnerabilidade em Pernambuco é baixa em 38% da região costeira, localizados principalmente no Setor Sul, moderada em 49% e alta em 13% localizados principalmente no Núcleo Metropolitano. Quando aplicado às mudanças climáticas, os resultados foram progressivamente maiores à medida que a energia hidrodinâmica aumentava no sistema, chegando, no cenário mais pessimista a valores de vulnerabilidade baixa de 9%, moderada de 57%, e a alta de 34%.

A vulnerabilidade à erosão mostrou que o Núcleo Metropolitano juntamente com o município de Paulista são as áreas mais vulneráveis. Isso se dá principalmente pelos possíveis prejuízos econômicos e maior número de pessoas afetadas por um processo erosivo nestas praias. O contrário ocorre nos demais setores que possuem uma densidade demográfica menor na zona costeira.

Os dados de vulnerabilidade à erosão e às mudanças climáticas mostram que é necessário tomar medidas preventivas a fim de diminuir os prejuízos econômicos causados pela erosão, e que deve ser levado em consideração o aumento do nível do mar. A maneira

mais adequada de diminuir os danos seria aumentar o limite de não edificação para no mínimo 200 metros, nas áreas ainda não urbanizadas. Para as demais áreas existem três alternativas básicas: proteger, com obras estruturais e não estruturais; recuar, ou seja, realocar os primeiros metros de urbanização da orla, o que é inviável para grandes centros urbanos como os da região metropolitana, entretanto é uma opção que pode ser analisada para pequenas vilas; ou então adaptar-se ao problema reestruturando as construções em áreas vulneráveis ou conformando-se com os possíveis danos.

A escolha da abordagem mais adequada deve ser feita de acordo com os interesses locais e principalmente de acordo com os processos hidrodinâmicos e as fontes de sedimento do sistema como um todo. O exemplo dado nesta dissertação analisou as possíveis causas da erosão na Praia de Pau Amarelo, a partir do histórico de interações antrópicas e do padrão hidrodinâmica atuante no local. Os resultados mostraram que em alguns pontos da costa, a erosão é intensificada pelo padrão de circulação, somada ao possível déficit sedimentar causado pelas obras de proteção costeira à montante da praia que alteraram a deriva litorânea. Portanto foi concluído que a causa do processo erosivo em Pau Amarelo é uma combinação fatores naturais e antrópicos.

Os dados gerados nesta dissertação podem ser utilizados para auxiliar na elaboração de planos de gerenciamento costeiro, e em estudos de proteção costeira.

## REFERÊNCIAS

- ADGER, W. N. et al. Social-ecological resilience to coastal disasters. **Science (New York, N.Y.)**, v. 309, n. June, p. 1036–1039, 2005.
- ARAÚJO, M. C. B. et al. Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 7, n. 2, p. 97–104, 2007.
- ARIZA, E. et al. Beach management in Florida: Assessing stakeholder perceptions on governance. **Ocean and Coastal Management**, v. 96, p. 82–93, 2014.
- BEETHAM, E. P.; KENCH, P. S. Wave energy gradients and shoreline change on Vabbinfaru platform, Maldives. **Geomorphology**, v. 209, p. 98–110, 2014.
- BERRY, A. J.; FAHEY, S.; MEYERS, N. Boulderdash and beachwalls - The erosion of sandy beach ecosystem resilience. **Ocean and Coastal Management**, v. 96, p. 104–111, 2014.
- BIRD, E. C. F. **Beach Management**. England, UK: John Wiley & Sons, 1996.
- BLACK, K.; ANDREWS, C. Sandy shoreline response to offshore obstacles: Part 1. Salient and tombolo geometry and shape. **Journal of Coastal Research**, v. 29, p. 82–93, 2001.
- BORUFF, B. J.; EMRICH, C.; CUTTER, S. L. Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Counties. **Journal of Coastal Research**, v. 215, n. 215, p. 932–942, 2005.
- BRASIL. Decreto-lei nº 5.300, de 07 de dezembro de 2004. Regulamentação da lei nº 7.661, Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, DF, 08/12/2004. Seção, p. 2.
- BRASIL. Decreto-lei nº 9.760, de 5 de setembro de 1946. Dos Bens Imóveis da União. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, DF, 6/07/1946. Seção, p. 12500.
- BUSH, D. M. et al. Utilization of geoindicators for rapid assessment of coastal-hazard risk and mitigation. **Ocean and Coastal Management**, v. 42, p. 647–670, 1999.
- BYAPPANAHALLI, M. N. et al. Wildlife, urban inputs, and landscape configuration are responsible for degraded swimming water quality at an embayed beach. **Journal of Great Lakes Research**, v. 41, n. 1, p. 156–163, mar. 2015.
- CARTER, R. W. G.; LOWRY, P.; STONE, G. W. Sub-tidal ebb-shoal control of shoreline erosion via wave refraction, Magilligan foreland, Northern Ireland. **Marine Geology**, v. 48, n. 1-2, p. M17–M25, 1982.

CASTILLO, M. E. et al. Characterization of Risks in Coastal Zones: A Review. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 40, p. 894–905, 2012.

COOPER, J. A. G.; MCLAUGHLIN, S. Contemporary Multidisciplinary Approaches to Coastal Classification and Environmental Risk Analysis. **Journal of Coastal Research**, v. 14, n. 2, p. 512–524, 1998.

COOPER, J. A. G.; PILKEY, O. H. Sea-level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. **Global and Planetary Change**, v. 43, p. 157–171, 2004.

COSTA, M. F. et al. Verticalização da Praia da Boa Viagem (Recife, Pernambuco) e suas Consequências Sócio-Ambientais. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 2, p. 233–245, 2008.

CUTTER, S. L.; BORUFF, B. J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003.

DILLENBURG, S. R.; ESTEVES, L. S.; TOMAZELLI, L. J. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 76, n. 3, p. 611–623, 2004.

DOMINGUEZ, J. M. L. et al. Geologia Do Quaternário Costeiro Do Estado De Pernambuco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 20, n. 1-4, p. 208–215, 1990.

DRONKERS, J. et al. **Strategies for Adaption to Sea Level Rise**. Genova, CH: 148 p. 1990.

ECLAC. **Vulnerabilidad y Exposición - Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe**. Santiago, CL: Naciones Unidas, CEPAL, 2012.

ESCUADERO, M.; SILVA, R.; MENDOZA, E. Beach Erosion Driven by Natural and Human Activity at Isla del Carmen Barrier Island, Mexico. **Journal of Coastal Research**, v. 71, p. 62–74, set. 2014.

FERREIRA JÚNIOR, A. V. et al. Petrologia dos arenitos de praia (beachroks) na costa central de Pernambuco. **Geociências (São Paulo)**, v. 30, p. 545–559, 2011.

FERREIRA, Ó. et al. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. **Continental Shelf Research**, v. 26, n. 9, p. 1030–1044, 2006.

FINEP/UFPE. **Monitoramento Ambiental Integrado – MAI**. Recife, BR. Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e Universidade Federal de Pernambuco –UFPE, 457p. 2009.

FREIRE, O. D. DA S.; ZAMBONI, A.; MIGUENS, A. P. **Projeto Orla: Subsídios para um projeto de gestão**. Brasília, BR: Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Ministério do Planejamento Orçamento e Gestão (MPO), 2004. v. 1

GALLOP, S. L. et al. The influence of limestone reefs on storm erosion and recovery of a perched beach. **Continental Shelf Research**, v. 47, p. 16–27, 2012.

GORNITZ, V. **Global coastal hazards from future sea level rise** *Global and Planetary Change*, 1991.

HARDY, T. A.; YOUNG, I. R. Field study of wave attenuation on an offshore coral reef. **Journal of geophysical research**, v. 101, n. C6, p. 311–326, 1996.

HINKEL, J.; KLEIN, R. J. T. DINAS-COAST: Developing a Method and a Tool for Dynamic and Interactive Vulnerability Assessment. **LOICZ Newsletter**, n. 27, p. 1–4, 2003.

HOUSTON, J. R. The Economic Value of Beaches – 2002 Update. **Shore & Beach**, v. 70, p. 9–12, 2002.

HUR, D.-S.; LEE, W.-D.; CHO, W.-C. Characteristics of wave run-up height on a sandy beach behind dual-submerged breakwaters. **Ocean Engineering**, v. 45, p. 38–55, maio 2012.

IBGE. **Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil**. Rio de Janeiro, BR: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011.

IPCC. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: M.L. PARRY, O.F. CANZIANI, J.P. PALUTIKOF, P. J. VAN DER L. AND C. E. H. (Ed.). . **Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 976.

IPCC. Sea Level Change Supplementary Material. In: CHURCH, J.A., P.U. CLARK, A. CAZENAVE, J.M. GREGORY, S. JEVREJEVA, A. LEVERMANN, M.A. MERRIFIELD, G.A. MILNE, R.S. NEREM, P.D. NUNN, A.J. PAYNE, W.T. PFEFFER, D. S. AND A. S. U. (Ed.). . **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: 8p, 2013.

KLEIN, R. J. T. et al. Technological options for adaptation to climate change in coastal zones. **Journal of Coastal Research**, v. 17, n. 3, p. 531–543, 2001.

KLEIN, R. J. T.; NICHOLLS, R. J. Assessment of Coastal Vulnerability to Change Climate. **Ambio**, v. 28, n. 2, p. 182–187, 1999.

KOMAR, P. D. **CRC handbook of coastal processes and erosion**. Boca Raton - USA: CRC Press Inc., 1983. v. 38

LI, X. et al. Ocean & Coastal Management GIS-based methodology for erosion risk assessment of the muddy coast in the Yangtze Delta. **Ocean and Coastal Management**, p. 1–12, 2014.

LIU, X. et al. A state of the art review on High Water Mark (HWM) determination. **Ocean & Coastal Management**, v. 102, p. 178–190, 2014.

LOZOYAA, J. P.; SARDÁA, R.; JIMÉNEZ, J. A. Users expectations and the need for differential beach management frameworks along the Costa Brava: Urban vs. natural protected beaches. **Land Use Policy journal**, v. 38, p. 397–414, 2014.

LUGO-FERNANDEZ, A. et al. Tide effects on wave attenuation and wave set-up on a Caribbean coral reef. **Estuarine Coastal and Shelf Science**, v. 47, n. 4, p. 385–393, out. 1998.

LUNDGREN, L.; JONSSON, A. **Assessment of social vulnerability: a literature review of vulnerability related to climate change and natural hazards**. Norrköping, Suécia: 20p, 2012. v. 9

MALLMANN, D. et al. Classificação morfodinâmica das praias arenosas de Ipojuca (Pernambuco, Brasil) através da análise semântica de imagens de satélite pancromáticas. **Pesquisas em Geociências**, v. 41, n. 2, p. 169–189, 2014.

MALLMANN, D. L. B.; ARAÚJO, T. C. M. Vulnerabilidade Física do Litoral Sul de Pernambuco à Erosão. **Tropical Oceanography**, v. 38, n. 2, p. 129–151, 2010.

MANSO, V. DO A. V. et al. Pernambuco. In: MUEHE, D. (Ed.). **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**. Brasília, BR: Ministério do Meio Ambiente, 2006. p. 179–196.

MARGHANY, M. M. TOPSAR wave spectra model and coastal erosion detection. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 3, n. 4, p. 357–365, jan. 2001.

MARINO-TAPIA, I. et al. Wave transformation and wave-driven circulation on natural reefs under extreme hurricane conditions. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 32, p. 28, 2011.

MARTINS, K. A.; PEREIRA, P. S. Coastal Erosion at Pau Amarelo Beach, Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 71, p. 17–23, 2014.

MAZZER, A. M.; DILLENBURG, S. R.; SOUZA, C. R. D. G. Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 278–294, 2008.

MENDONÇA, F. J. B. et al. Temporal shoreline series analysis using gnss. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 3, p. 701–719, 2014.

MELO, M.L. Paisagens do Nordeste em Pernambuco e Paraíba. Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Geografia. In MANSO (2006), 18p., 1958.

MMA. **Vulnerabilidade ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília, BR: 1, 2007.

MUEHE, D. Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para fins de Gerenciamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 35–44, 2001.

MUEHE, D. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília, BR: Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2006.

NEVES, C. C. F.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. **Parcerias estratégicas**, p. 217–295, 2008.

NEVES, C. F.; MUEHE, D. Potential Impacts of Sea-Level Rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. SI 14, p. 116–131, 1995.

NICHOLLS, R. J. Case study on sea-level rise impacts. **Environment**, p. 32, 2003.

NICOLODI, J. L. **Documento síntese do I Simpósio Nacional sobre Erosão Costeira**. Brasília, BR: 25p, 2008.

OLIVEIRA, M. SMC Brazil, Dialogues Brazil-Spain: Coastal Modeling System. **IABS**, Brasília, 72p., 2013.

OLSEN, S. B. **Crafting coastal governance in a changing world**. Kingston, USA: University of Rhode Island, 2003.

PEDROSA, F. J. DE A. **Aspectos da Evolução da Linha de Costa e da Paisagem Litorânea do Município de Olinda entre 1915 e 2004: Evidências do Tecnógeno em Pernambuco**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2007.

PEREIRA, L. C. C. et al. The influence of the environmental status of Casa Caiada and Rio Doce beaches (NE-Brazil) on beaches users. **Ocean and Coastal Management**, v. 46, n. 2003, p. 1011–1030, 2003.

PHILLIPS, M. R.; JONES, A. L. Erosion and tourism infrastructure in the coastal zone: Problems, consequences and management. **Tourism Management**, v. 27, p. 517–524, 2006.

RANASINGHE, R.; TURNER, I. L. Shoreline response to submerged structures: A review. **Coastal Engineering**, v. 53, n. 1, p. 65–79, 2006.

RECIFE. Lei n° 16.176, de 9 de abril de 1996. Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife. **Plano Setorial de Uso e Ocupação do Solo**, Prefeitura da cidade de Recife, 103 p.

ROBERTS, H. H.; SUHAYDA, J. N. Wave-current interactions on a shallow reef (Nicaragua, Central America). **Coral Reefs**, v. 1, p. 209–214, 1983.

RUDORFF, F. M.; BONETTI, J. Avaliação da Suscetibilidade à Erosão Costeira de Praias da Ilha de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 9–20, 2010.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3, p. 161–176, 1987.

SAYE, S. E. et al. Beach-dune morphological relationships and erosion/accretion: An investigation at five sites in England and Wales using LIDAR data. **Geomorphology**, v. 72, p. 128–155, 2005.

SHARPLES, C. **Indicative Mapping of Tasmanian Coastal Vulnerability to Climate Change and Sea-Level Rise : Explanatory Report**. Tasmania, AU: 116p, 2006.

SHARPLES, C. et al. **The Australian Coastal Smartline Geomorphic and Stability Map Version 1: Project Report**. Tasmania, Australia: 69p, 2009.

SILVA, R. et al. Hydrodynamics of a headland-bay beach—Nearshore current circulation. **Coastal Engineering**, v. 57, n. 2, p. 160–175, 2010.

SILVA, R.; BORTHWICK, A. G. L.; TAYLOR, R. E. Numerical implementation of the harmonic modified mild-slope equation. **Coastal Engineering**, v. 52, p. 391–407, 2005.

SOUSA, P. H. G. O.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G. Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). **Ocean and Coastal Management**, v. 77, p. 24–30, 2012.

SOUZA, C. R. D. G. A Erosão Costeira e os Desafios da Gestão Costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 1, p. 17–37, 2009a.

SOUZA, C. R. DE G. A Erosão nas Praias do Estado São Paulo: Causas, Conseqüências, Indicadores de Monitoramento e Risco. In: BONONI, V. L. R.; SANTOS JUNIOR, N. A. (Eds.). **Memórias do Conselho Científico da Secretaria do Meio Ambiente: A Síntese de Um Ano de Conhecimento Acumulado**. São Paulo, BR: Instituto de Botânica – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2009b. p. 48–69.

THIELER, E. R.; HAMMAR-KLOSE, E. S. **National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise Open-File Report 00-179**. 1p, 2000.

UFPE & SEMAS. **Mapeamento da linha de costa do estado de Pernambuco**. Recife, BR: Universidade Federal de Pernambuco e Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. 10p, 2014.

VAFEIDIS, A. . et al. Developing a global database for coastal vulnerability analysis: design issues and challenges. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, p. 801–805, 2004.

VALDEMORO, H. I.; SÁNCHEZ-ARCILLA, A.; JIMÉNEZ, J. A. Coastal dynamics and wetlands stability. The Ebro delta case. **Hydrobiologia**, v. 577, p. 17–29, 2007.

VAN RIJN, L. C. Coastal erosion and control. **Ocean & Coastal Management**, v. 54, n. 12, p. 867–887, 2011.

VEGA-LEINERT, A. C. DE LA; NICHOLLS, R. J. **Proceedings of the Survas Overview Workshop on the Future of Vulnerability and Adaptation Studies for Coastal Arenas (VA)**. Londres, UK: Flood Hazard Research Center, 2001.

VELLINGA, P.; KLEIN, R. J. T. Climate Change , Sea Level Rise and Integrated Coastal Zone Management : An IPCC Approach. **Ocean & Coastal Management**, v. 21, p. 245–268, 1993.

VOUSDOUKAS, M. I.; VELEGRAKIS, A. F.; PLOMARITIS, T. A. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. **Earth-Science Reviews**, v. 85, n. 1-2, p. 23–46, 2007.

WONG, P. . et al. Coastal Systems and Low-Lying Areas. In: FIELD, C. B. et al. (Eds.). . **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK - New York, USA: Cambridge University Press, 2014. p. 361–409.

WOODROFFE, P. A A. & C. D. Assessing Vulnerability of Coasts To Climate Change: a Review of Approaches and Their Application To the Australian Coast. **CoastGIS**, p. 18, 2006.

WRIGHT, L. D.; THOM, B. G.; HIGGINS, R. J. Wave influences on river-mouth depositional process: Examples from Australia and Papua New Guinea. **Estuarine and Coastal Marine Science**, v. 11, n. 3, p. 263–277, 1980.

ZHANG, K. Q.; DOUGLAS, B. C.; LEATHERMAN, S. P. Global warming and coastal erosion. **Climatic Change**, v. 64, p. 41–58, 2004.

## ANEXO I

Este anexo mostra o questionário respondido pelos especialistas em erosão costeira e/ou em análises de risco e vulnerabilidade costeira, a fim de valorar os indicadores utilizados no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira.

### **Vulnerabilidade à erosão costeira: indicadores geomorfológicos**

A erosão costeira gera importantes consequências sociais, econômicas e ambientais, especialmente em regiões tropicais, onde o turismo é uma importante fonte de renda. Apesar de ser um processo natural, muitas vezes a erosão pode ser ocasionada ou intensificada pela urbanização desordenada da orla marítima. Isso ocorre em decorrência do aumento de construções na orla e um manejo costeiro ineficiente, que afeta a estabilidade sedimentar das praias.

Existem muitos ramos na ciência que estudam a erosão, um deles é a determinação da vulnerabilidade. Através da integração de diversos fatores, como grau de exposição ao risco e a capacidade de resistência a este, é desenvolvido um mapeamento que mostra áreas de atenção prioritária e outras onde a possibilidade de ocorrer erosão é menor. Um método amplamente utilizado para determinar a vulnerabilidade do litoral é por meio de feições geomorfológicas, que são indicadores de evolução e estabilidade de praias. Com o uso destes é possível definir diferentes níveis de vulnerabilidade à erosão em uma praia.

O objetivo desta pesquisa é definir a importância relativa de cada geoindicador que será utilizado para definir a vulnerabilidade das praias do litoral de Pernambuco-Brasil. A pesquisa está baseada na metodologia Delphi, que busca um consenso na resposta dos especialistas entrevistados, a fim de permitir a ponderação dos itens avaliados.

### **Sua contribuição para o projeto:**

Nesta pesquisa, será pedido que você avalie uma série de indicadores e classifique-os quanto a sua importância em relação à vulnerabilidade à erosão costeira. Para isso, você deverá valorar os indicadores num intervalo de 1 a 10, sendo 1 o menos importante e 10 o mais importante (tab. 1). Se julgar que dois ou mais indicadores tem a mesma importância (peso), deve-se atribuir o mesmo valor a estes.

Tabela 1: Importância de cada peso para determinar a vulnerabilidade à erosão.

IMPORTÂNCIA NA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE	PESOS	GRAU DE IMPORTÂNCIA
<b>Alta</b>	<b>10</b>	↑
<b>Moderada</b>	<b>5</b>	
<b>Baixa</b>	<b>1</b>	

Fonte: o autor.

**1) Qual a importância relativa das seguintes categorias para avaliar a vulnerabilidade costeira?**

<b>Categoria</b>	<b>Peso (1 – 10)</b>	<b>Contexto</b>
<i>a) Fatores morfológicos</i>		A configuração da linha de costa desempenha uma importante função no modo como os processos dinâmicos se desenvolvem na região e como as forças que podem causar erosão interagem com a costa.
<i>b) Processos dinâmicos</i>		A dinâmica costeira é um fator determinante na vulnerabilidade a erosão costeira. Exemplos de processos são o tamanho da pista de vento, o grau de exposição às ondas e altura de ondas. Ademais a dinâmica costeira também pode ser influenciada por barreiras em alto mar ou pelo agente modificador da linha de costa.
<i>c) Evidências de erosão</i>		Quando presentes podem indicar um processo de erosão e influenciar na classificação da vulnerabilidade. Exemplos de evidências são: variações negativa na posição da linha de costa, escarpas nas dunas, leques de sobre-lavagem, estruturas rígidas danificadas, entre outros.
<i>d) Fatores sociais</i>		O número de pessoas vivendo no litoral e a proximidade das construções com a linha de costa pode influenciar a vulnerabilidade local, considerando tanto a pressão exercida sobre o ambiente praiado quanto a segurança da população.

Fonte: o autor.

**2) Qual a importância dos seguintes indicadores?**

**a) A importância de cada indicador relativo aos fatores morfológicos:**

<b>Indicador</b>	<b>Peso (1 – 10)</b>	<b>Contexto</b>
<i>Tipo de substrato</i>		É a definição do tipo de substrato local, que pode ser consolidado ou inconsolidado. Este representa a facilidade com que o mesmo pode ser removido para offshore ou para praias adjacentes.
<i>Feições no pós-praia</i>		O tipo de feição no pós-praia pode representar a capacidade do ambiente em resistir a processos erosivos, deve também ser considerado o estado de conservação do ambiente.

Fonte: o autor.

**b) A importância de cada indicador relativo aos processos dinâmicos:**

<b>Indicador</b>	<b>Peso (1 – 10)</b>	<b>Contexto</b>
<i>Altura de onda (<math>H_s</math>)</i>		A energia das ondas é um fator de grande importância nos processos costeiros e na geração de correntes longitudinais e transversais, que controlam grande parte dos processos de erosão.
<i>Exposição a ondas (<math>\alpha</math>)</i>		Ângulo medido entre a linha de costa e a direção predominante das ondas na região, isso representa o quanto uma praia está exposta à energia das ondas.
<i>Nível do mar</i>		Um dos efeitos das mudanças climáticas é a variação do nível do mar, que mesmo pequena podem gerar graves impactos, como alteração da direção e intensidade de correntes, na altura significativa de ondas e no run-up, que resultam em mudanças no transporte de sedimentos e nas áreas de inundação.

Fonte: o autor.

**c) A importância de cada indicador relativo às evidências de erosão:**

<b>Indicador</b>	<b>Peso (1 – 10)</b>	<b>Contexto</b>
<i>Evidências visuais de erosão</i>		São indícios de que a praia está em processo de erosão e podem alterar a classificação da vulnerabilidade. Alguns exemplos são: canais de maré expostos na zona de surf, ausência de vegetação no pós-praia, estruturas rígidas de proteção costeira, entre outras.
<i>Variação da linha de costa</i>		São variações na posição da linha de costa ao longo de um determinado tempo, sendo expressa na forma de taxas de erosão ou acreção.

Fonte: o autor.

**d) A importância de cada indicador relativo aos fatores sociais:**

<b>Indicador</b>	<b>Peso (1 – 10)</b>	<b>Contexto</b>
<i>Densidade populacional</i>		O número de pessoas que residem próximo à costa podem representar diferentes níveis de pressão no ambiente costeiro. Além da possível alteração no ambiente, a densidade populacional representa o número de pessoas susceptíveis a um risco.
<i>Distância entre a linha de costa e a urbanização</i>		A urbanização e outras atividades antrópicas na zona costeira podem interferir na dinâmica desse ambiente e refletir nos processos sedimentares, sendo a erosão uma possível consequência.
<i>Tipo de urbanização</i>		Tipo de construções existentes na orla de cada praia. É um indicador da pressão que está sendo exercida sobre o solo e também indica os possíveis prejuízos econômicos caso a praia seja erodida e cause danos ao patrimônio.

Fonte: o autor.

**3) Avaliação do método:**

*Você concorda com a determinação da vulnerabilidade por meio da divisão em quatro grandes categorias?*

( ) *Sim*

( ) *Não. O que você sugere?* \_\_\_\_\_

*Se sua resposta anterior foi positiva, você concorda com os indicadores que foram agrupados em cada categoria?*

( ) *Sim*

( ) *Não. O que você sugere?* \_\_\_\_\_

*Você tem outra sugestão ou observação?*

\_\_\_\_\_

***Muito obrigada por sua ajuda!***