



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Estudo da vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do
Estuário do Rio Pará**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

ANTONIO GONÇALVES DA SILVA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva (IG-UFPA)

Coorientador: Geólogo MSc. Osmar Guedes da Silva Junior (IG-UFPA)

BELÉM-PARÁ

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Estudo da vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do
Estuário do Rio Pará**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado por:

ANTONIO GONÇALVES DA SILVA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva (IG-UFPA)

Coorientador: Geólogo MSc. Osmar Guedes da Silva Junior (IG-UFPA)

BELÉM-PARÁ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586e Silva Junior, Antonio Gonçalves da.
Estudo da vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do Estuário do Rio Pará / Antonio Gonçalves da Silva Junior, . — 2019.
xii, 76 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva
Coorientador(a): Prof. Me. Osmar Guedes da Silva Junior
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Sensoriamento remoto. 2. Zona costeira. 3. Vulnerabilidade. 4. Risco. I. Título.

CDD 621.3678098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de geociências
Faculdade de geologia

**Estudo da vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do
Estuário do Rio Pará**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO POR:

ANTONIO GONÇALVES DA SILVA JUNIOR

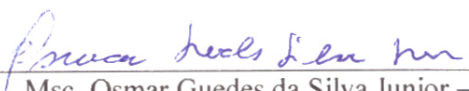
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia.

Data de Aprovação: 14/02/2019

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva – IG/UFPA
(Orientador)



Msc. Osmar Guedes da Silva Junior – IG/UFPA
(Coorientador)



Profª. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima – IG/UFPA
(Membro)



Geólogo Msc. Raimundo Almir Costa da Conceição - CPRM
(Membro)

Dedico este trabalho à minha pequena Olga.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por de alguma forma me manter vivo todos esses anos, e pelos bons ventos que me trouxeram até aqui.

Aos meus pais Antonio Gonçalves e Francisca Sales por todo apoio, estrutura e incentivo durante a minha formação escolar, acadêmica e humana.

À minha companheira, amiga e mulher Liliane Mendes por todos esses anos ao meu lado. Teu carinho, compreensão e incentivo foram cruciais nessa dura jornada.

À minha pequena Olga, que nos momentos de fraqueza foi meu último refúgio. Apesar da constante sabotagem noturna, tudo que fiz foi por ti.

Aos meus irmãos Karolini e Fábio, aos meus primos Bebeco e Babi, aos meus sogros Cilene e Adriano, ao meu amigo Marcelo (Basto), e todos os familiares que sempre estiveram por perto. Em especial à minha Avó Maria do Livramento, por sempre me ter sem suas preces.

Ao meu Orientador e amigo Dr. Arnaldo de Queiroz, por todos os ensinamentos, oportunidades, e acima de tudo, por ter acreditado meu potencial.

À Professora Brigida Rocha e ao Projeto CNPq-MCTI-Aquaviário, pela oportunidade de participar de um grupo de pesquisa enriquecedor, e pela bolsa de estudos que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Geotecnologias (LEPGEO) por toda a estrutura computacional que possibilitou o processamento dos dados, e por ter sido literalmente minha casa anos últimos dias. Agradeço também ao Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), pela assistência no período infortúnio do LEPGEO.

Aos meus companheiros de laboratório Matheus Ramos, Osmar Guedes, Jéssica Cristina, Igor François, Adérito Luacuti, Paulo Isaac e Alison Elias, pela camaradagem e troca de experiência ao longo da graduação.

Aos meus amigos dos primórdios do Paleozoico Jean Bizet (Malucão), José Maria (Sansis) e João Paulo (*Riedel Face*), pelos momentos de descontração no compus e nos campos da geologia.

Aos meus amigos do LAIT, Paulo-do-LAIT (atualmente Paulo Alves), Carlos Cowboy e especialmente ao Arthur Gustavo pela força nos momentos de agonia.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram na minha formação, em especial aos que possibilitaram a produção deste documento. Não conseguiria sem vocês.

*“A história da humanidade torna-se cada vez mais
uma corrida entre a educação e a catástrofe.”*

Herbert George Wells

RESUMO

A zona costeira é um dos ambientes de maior vulnerabilidade física e socioeconômica, e a erosão costeira é um dos principais causadores de impactos ambientais e econômicos. Cerca de 40% da costa brasileira enfrenta graves problemas de erosão, e no Estado do Pará onde 45% da população habita a zona costeira, estima-se que 60% da costa está sob processo erosivo. Neste cenário insere-se o Estuário do Rio Pará, uma região de grande importância, contendo a metrópole de Belém, e um complexo industrial-portuário onde circula grande parte da produção e comércio do Estado. Neste trabalho foi analisada a vulnerabilidade e o risco à erosão costeira no Estuário do Rio Pará. Para isso foram adaptadas metodologias existentes ajustando os parâmetros de análise às características fisiográficas do ambiente estuarino amazônico. Montou-se uma tabela de classificação de vulnerabilidade com sete variáveis: Geologia, Habitats, Declividade, Taxa de variação da linha de costa, Velocidade máxima de corrente, Máxima altura de ondas e Amplitude de maré. Para definir pesos às variáveis, foi utilizado processo de análise hierárquica (AHP). Como dado de entrada foram utilizadas imagens orbitais do satélite Landsat, modelo digital de elevação ALOS-AW3D30, Mapa Geológico, Grade estatística do IBGE e banco de dados das cartas SAO da Foz do Amazonas. Os resultados mostram que pelo menos metade da costa do Estuário do Rio Pará apresenta baixa vulnerabilidade à erosão, e isto deve-se principalmente à tendência progradacional ou de estabilidade dessas regiões. Pouco menos da metade da costa do Estuário do Rio Pará tem um grau moderado ou superior de vulnerabilidade à erosão costeira. Isto estaria associado à retrogradação desses segmentos e a ocorrência praias arenosas, planícies de maré, áreas urbanas e construções artificiais. Quando avaliada as tendências de risco, apenas Belém, Barcarena, Colares e Vigia apresentam extensões significantes de costa apresentando tendência de risco à erosão moderado ou superior. Os demais municípios apresentam porcentagens pouco expressivas ou nulas. A metodologia utilizada neste estudo mostrou-se uma ferramenta poderosa, e os resultados obtidos foram satisfatórios e atenderam aos objetivos da pesquisa.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto; Zona costeira; Vulnerabilidade; Risco

ABSTRACT

The coastal zone is one of the most physically and socioeconomically vulnerable environments, and coastal erosion is a major cause of environmental and economic impacts. About 40% of the Brazilian coast has serious erosion problems, and in the State of Pará where 45% of the population inhabits the coastal zone, it is estimated that 60% of the coast is in an erosion process. This scenario includes the Pará River Estuary, a region of great importance, containing the metropolis of Belém, and an industrial-port complex where much of the state's production and commerce circulates. This work evaluated the vulnerability and risk of coastal erosion in the Pará River Estuary. To that end, existing methodologies were adapted by adjusting the parameters of analysis to the physiographic characteristics of the Amazonian estuarine environment. A vulnerability classification table was set up with seven variables: Geology, Habitats, Slope, Coastline Rate of Change, Maximum Current Speed, Maximum Wave Height, and Tidal Amplitude. In order to define weights to the variables, a hierarchical analysis process (AHP) was used. The input data used were orbital images of the Landsat satellite, digital elevation model ALOS-AW3D30, Geological Map, IBGE statistical grid and database of the SAO charts of Foz do Amazonas. The results show that at least half of the coast of the Pará Estuary presents a low vulnerability to erosion, and this is mainly due to the progradational or stability tendency of these regions. Just under half the coast of the Pará River Estuary has a moderate or higher degree of vulnerability to coastal erosion. This would be associated with the retrogradation of these segments and the occurrence of sandy beaches, tidal flats, urban areas, and artificial constructions. The analysis of the risk trend shows that only Belém, Barcarena, Colares and Vigia present significant portions of coast presenting moderate or higher risk tendencies. The other municipalities have little or no expressive percentages. The methodology used in this study proved to be a powerful tool, and the results were satisfactory and met the objectives of the research.

Keywords: Remote sensing; Coastal zone; Vulnerability; Risk

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Mapa de localização da área de estudo – Estuário do Rio Pará.....	4
Figura 2.1- População brasileira na zonacosteira.....	8
Figura 2.2- Compartimentação geomorfológica da zona costeira brasileira.....	9
Figura 2.3- A Zona Costeira Amazônica partir de um modelo digital de elevação SRTM.....	9
Figura 2.4- A Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) e sua subdivisão em setores.....	10
Figura 2.5- Metodologia de análise de vulnerabilidade e risco de Coelho (2005).....	16
Figura 3.1- Fluxograma com as principais etapas e dados utilizados para a produção dos mapas de vulnerabilidade e risco à erosão para o Estuário do Rio Pará.....	20
Figura 3.2- Diferentes resultados na análise da distribuição da população do Estado do Pará.....	24
Figura 3.3- Fluxograma da metodologia de obtenção das classes de vulnerabilidade para a variável “Taxa de variação da linha de costa”.....	26
Figura 3.4- O ganho em resolução espacial a partir da técnica de fusão de bandas.....	28
Figura 3.5- Aplicação do AWEI para extração de linha de costa.....	30
Figura 3.6- Funcionamento do aplicativo DSAS.....	31
Figura 3.7- Construção dos segmentos de vulnerabilidade a partir do cálculo do EPR.....	32
Figura 3.8- (A) Modelo digita de elevação ALOS-AW3D30. (B) Declividade (%) obtida a partir do ALOS-AW3D30.....	33
Figura 3.9- Tipos de Habitats e Litologias utilizados na classificação de vulnerabilidade.....	35
Figura 3.10- Dados de corrente, maré e onda para a Região do Estuário do Rio Pará.....	36
Figura 4.1- Síntese dos resultados obtidos na análise da Vulnerabilidade e Tendência de Risco à Erosão Costeira (percentagem da linha de costa analisada).....	43
Figura 4.2- Síntese dos resultados obtidos na análise da Vulnerabilidade e Tendência de Risco à Erosão Costeira (extensão da linha de costa analisada).....	44
Figura 4.3- Segmentos costeiros de Belém com vulnerabilidade à erosão baixa.....	45
Figura 4.4- Relação vulnerabilidade-risco na costa nordeste da Ilha do Combu.....	46
Figura 4.5- Efeitos da erosão em praias da Ilha de Mosqueiro.....	47
Figura 4.6- Obras de contenção da erosão na praia do Paraíso, Ilha de Mosqueiro.....	47
Figura 4.7- Erosão costeira na Ilha de Caratateua.....	48
Figura 4.8- Segmentos costeiros do município de Barcarena com vulnerabilidade à erosão baixa.....	49
Figura 4.9- Erosão na Praia do Caripi, município de Barcarena.....	51

Figura 4.10- Altas taxas de recuo da linha de costa nos municípios de Colares e Vigia.....	52
Figura 4.11- Material laterítico residual da Formação Barreiras, indicador da erosão e recuo do das falésias pela ação das ondas, costa oeste do município de Colares.....	53

SUMÁRIO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPÍGRAFE	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 JUSTIFICATIVA.....	2
1.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	3
1.4.1 Localização	3
1.4.2 Geologia e geomorfológica	5
1.4.3 Oceanográfica e clima	5
1.4.4 Socioeconomia	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 A ZONA COSTEIRA	7
2.1.1 Definições e limites	7
2.1.2 Compartimentação	8
2.2 VULNERABILIDADE, RISCO E A ZONA COSTEIRA	11
2.3 ÍNDICES DE VULNERABILIDADE E RISCO COSTEIRO.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 ESTRUTURA DA PESQUISA	19
3.2 CONCEPÇÃO METODOLÓGICA	21
3.2.1 Variáveis para o Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVEC)	21
3.2.2 Classificação da exposição	23
3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS	25
3.4 PROCESSAMENTO	26
3.4.1 Taxa de variação da linha de costa	26
3.4.2 Declividade	32
3.4.3 Habitats	34
3.4.4 Litologia	34
3.4.5 Amplitude de maré, Altura máxima de onda e Velocidade máxima de corrente	36
3.4.6 Determinação dos coeficientes de ponderação	38

3.4.7.	Cálculo do Índice de Vulnerabilidade à erosão Costeira (IVEC) e Tendência de Risco.	40
3.4.6	Produção de Mapas Temáticos.	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	BELÉM	42
4.2	BARCARENA	48
4.3	COLARES E VIGIA	51
4.4	SANTO ANTÔNIO DO TAUÁ, SANTA BÁRBA DO PARÁ, BENEVIDES, MARITUBA, ANANINDEUA E ACARÁ.	53
5.	CONCLUSÕES	55
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.	57
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICES	66
	APÊNDICE A. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “TAXA DE VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA”	67
	APÊNDICE B. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “DECLIVIDADE”	68
	APÊNDICE C. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “HABITATS”	69
	APÊNDICE D. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “LITOLOGIA”	70
	APÊNDICE E. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “AMPLITUDE DE MARÉ”	71
	APÊNDICE F. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “VELOCIDADE MÁXIMA DE CORRENTE”	72
	APÊNDICE G. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO “ALTURA MÁXIMA DE ONDA”	73
	APÊNDICE H. CLASSIFICAÇÃO DA EXPOSIÇÃO.	74
	APÊNDICE I. MAPA DE VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA PARA O ESTUÁRIO DO RIO PARÁ.	75
	APÊNDICE J. MAPA DE TENDÊNCIA DE RISCO À EROSÃO COSTEIRA PARA O ESTUÁRIO DO RIO PARÁ.	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A zona costeira é considerada um dos ambientes de maior vulnerabilidade física e socioeconômica, cujos fatores condicionantes são principalmente a complexidade dos processos litorâneos, a fragilidade de seus ecossistemas, a elevada concentração populacional e sua importância turística (Lins-de-Barros 2011). Estima-se que cerca de 2/3 da população mundial vive a menos de 50 km do mar, em uma faixa correspondente a menos de 2% da superfície da Terra emersa (Alcoforado 2017). No Brasil, cerca de 26% da população habita municípios da zona costeira, e parte significativa dessa população está inserida em centros urbanos de médio a grande porte (IBGE 2011).

Este cenário revela a zona costeira como um ambiente sujeito à diversos vetores de pressão, provocados tanto pelo processo de desenvolvimento econômico quanto pela mudança do clima global, que somam uma série de complicadores à um sistema já fragilizado (MMA 2018a). Dentre os impactos ocorrentes, a erosão costeira tem grande destaque, pois estima-se que cerca de 40% da costa brasileira enfrente graves problemas de erosão (MMA 2018a). A nova edição do livro “Panorama da Erosão Costeira no Brasil” mostra que no Estado do Pará o problema é mais grave, onde cerca de 60% da linha de costa está sob processo erosivo (MMA 2018b). Estes índices são alarmantes tendo em vista que cerca de 45% da população do estado reside nos 40 municípios que compõe a zona costeira paraense.

A discussão acerca da problemática da zona costeira antecede a década de 70, porém só se intensifica a nível internacional com a I Conferência Mundial do Meio Ambiente, promovida pela ONU em 1982, e no Brasil com o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), implantado pelo Governo Federal em 1988 (Alcoforado 2017). Em 1990 o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) expôs pela primeira vez a zona costeira como altamente vulnerável às alterações climáticas, e desde então, uma série de metodologias têm sido criadas com intuito de determinar sua vulnerabilidade física e socioeconômica (Mallmann 2016).

Nas últimas décadas, vários mapas de vulnerabilidade foram elaborados para diversos setores costeiros no Brasil e no mundo, obtidos através da utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), análise multivariada computacional e modelos numéricos (Rangel-Buitrago & Anfuso, 2015). As metodologias diferem basicamente no nível de detalhe (escala), no caráter qualitativo ou quantitativo, e nas variações de parâmetros analisados como consequência de adequações às realidades locais (Mallmann 2016). Dentre as metodologias, o IVC (Índice de

Vulnerabilidade Costeira) de Gornitz (1990) foi a mais amplamente utilizada ou adaptada, pois permite simplificar parâmetros físicos ou socioeconômicos, representados na forma de dados espaciais, e classificá-los em escalas de vulnerabilidade (McLaughlin & Cooper 2011).

Este trabalho adaptou metodologias de obtenção de índices de vulnerabilidade, para determinar a vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do Estuário do Rio Pará, setor Continental Estuarino da Zona Costeira Paraense. Para isso, os parâmetros de análise foram ajustados às características fisiográficas do ambiente estuarino amazônico. Como subsídio, foram utilizados dados de sensoriamento remoto e censitários, e ponderações baseadas em processo de análise hierárquica (AHP). O resultado consiste na cartografia das áreas susceptíveis à erosão bem como as de risco potencial, o que é de grande relevância tendo em vista a intensa dinâmica dos processos físicos e socioeconômicos que se desenvolvem na região.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho tem como objetivo geral:

“Determinar as áreas de vulnerabilidade e risco à erosão costeira na região do Estuário do Rio Pará”.

São propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Adaptar as metodologias de obtenção de índices vulnerabilidade e risco em zonas costeiras, para as características fisiográficas da região do Estuário do Rio Pará.
- b) Determinar e quantificar as áreas vulneráveis à erosão costeira as áreas de tendência de risco à erosão costeira;
- c) Produzir mapa de vulnerabilidade e mapa de tendência de risco à erosão para a região do Estuário do Rio Pará, em escala de semi-detalle (1:150.000).

1.3 JUSTIFICATIVA

Os impactos potenciais decorrentes do processo de erosão têm sido um fato constante nas populações costeiras e ribeirinhas no Brasil (MMA 2018a). O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais aponta que entre 1991 e 2012, na região norte, os impactos decorrentes de erosão e inundação já afetaram mais de 2 milhões de pessoas, desabrigaram mais de 500 mil, e mais de 60 foram mortas (CEPED UFSC 2013).

No Brasil, a política pública de ordem maior para o tratamento da temática da zona costeira é o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), que desenvolve programas visando a utilização dos recursos e o ordenamento dos espaços litorâneos (MMA 2015). Um dos objetivos traçados pelo PNGC é o desenvolvimento sistemático do diagnóstico ambiental da Zona Costeira, identificando suas potencialidades, vulnerabilidades e tendências

predominantes. O mais recente direcionamento do Ministério do Meio Ambiente para a problemática costeira foi a criação Programa Nacional de Gerenciamento da Linha de Costa (PROCOSTA), que tem como objetivo a criação de projetos que visem o monitoramento, gestão e conservação da zona costeira, através da elaboração de estudos que envolvam análises de risco, vulnerabilidades e impactos associados a cenários atuais e futuros (MMA 2018a).

O PROCOSTA elenca os principais problemas socioambientais decorrentes da erosão costeira, dentre eles cabe citar: (i) redução na largura da praia; (ii) perda e desequilíbrio de habitats naturais; (iii) aumento na frequência e magnitude de inundações costeiras; (iii) perda de propriedades, bens públicos e destruição de estruturas artificiais; (iv) perda do valor imobiliário de habitações costeiras; (v) perda do valor paisagístico e turístico; (vi) prejuízos nas atividades socioeconômicas; (vii) gastos astronômicos na recuperação de praias e reconstrução da orla marítima (MMA 2018a). Desta forma, é extremamente necessário o conhecimento acerca da vulnerabilidade e dos riscos aos quais o litoral está submetido, sendo uma das principais preocupações no campo do gerenciamento costeiro.

Nesse sentido, o presente trabalho justifica-se ao ir ao encontro às necessidades e preocupações atuais no âmbito do gerenciamento costeiro do país, contribuindo para a cartografia das áreas vulneráveis e de risco potencial à erosão na zona costeira paraense. Além disso, a determinação de índices de vulnerabilidade e risco costeiro foram aplicados ou em localidades específicas de pouca abrangência, ou estudos regionais de pouco detalhe. Neste estudo avaliou-se uma porção significativa da zona costeira paraense em escala de semi-detalhe (1:150.000), sendo uma potencial ferramenta no auxílio ao gerenciamento costeiro.

1.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

1.4.1 Localização

No contexto da Zona Costeira do Estado do Pará, situa-se o Estuário do Rio Pará, um dos maiores do Brasil, com uma desembocadura de aproximadamente 60 km (Rosário 2016). O Estuário é caracterizado como um corpo hídrico alongado na direção NNE-SSW com cerca de 300 km de extensão e com em média 50 km de distância entre suas margens NW e SE. O Rio Pará, seu principal tributário, não possui nascente propriamente dita, porém se forma a partir da Baía das Bocas, onde o Rio Amazonas conecta-se ao Rio Pará através dos Estreitos de Breves (Rosário 2016). Neste contexto, a área de estudo compreende parte da margem direita do Estuário do Rio Pará, na costa que se estende do município de Barcarena ao município de Vigia (Figura 1.1).

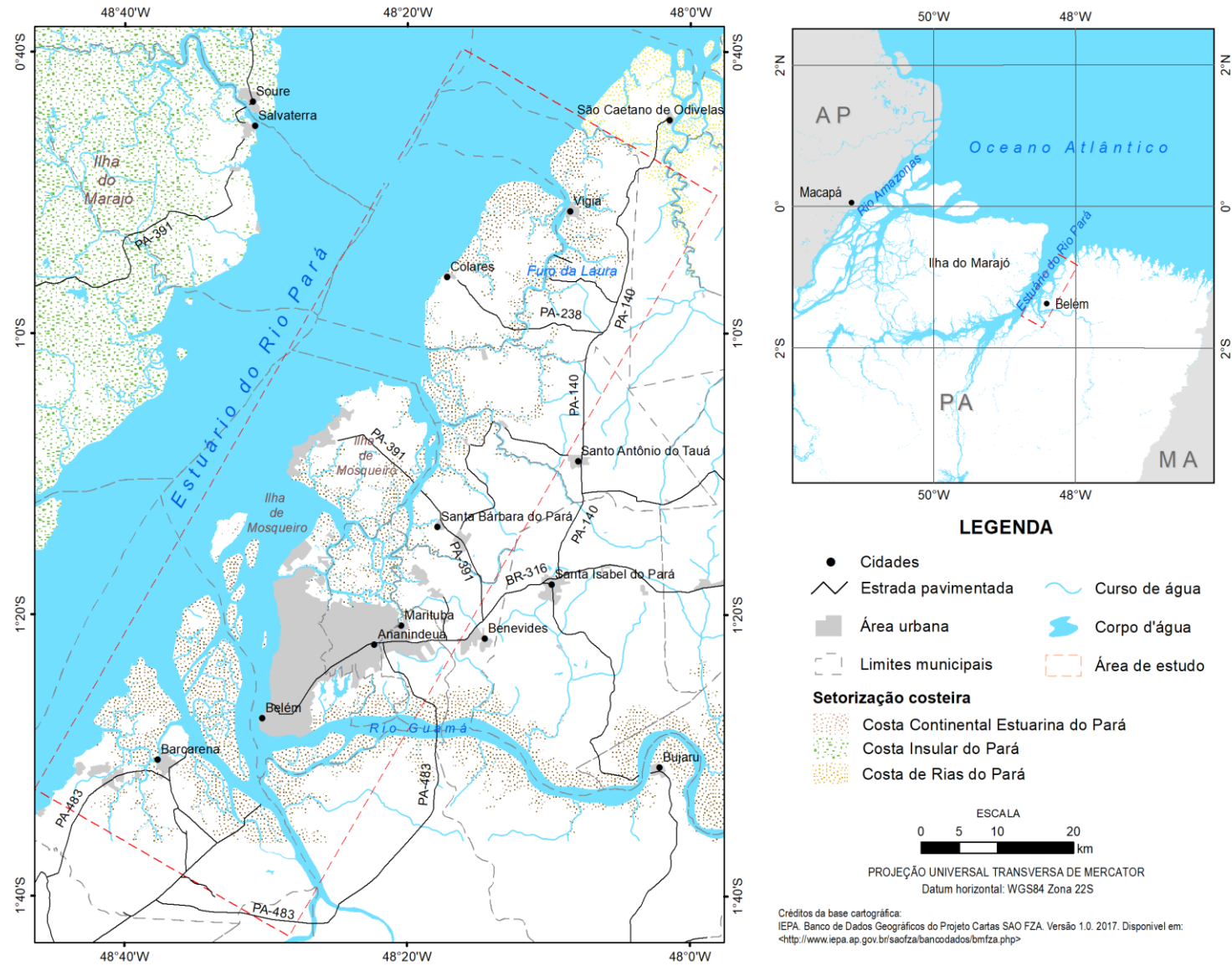


Figura 1.1 Mapa de localiza o da área de estudo – Estuário do Rio Pará.

1.4.2 Geologia e geomorfológica

Segundo o Mapa Geológico do Estado do Pará (Vasquez *et al.* 2008), a geologia da área de estudo é composta por rochas e sedimentos cenozoicos. Nas regiões mais internas ao litoral ocorrem as rochas do Grupo Barreiras (Paleógeno/Neógeno), no geral caracterizada por arenitos, argilitos e conglomerados de ambiente litorâneo e marinho transicional. Nas margens do estuário ocorrem: (a) Sedimentos Pós-Barreiras (Plioceno), compostos por areias argilosas de ambiente eólico, cordão litorâneo e planície de maré; (b) Depósitos litorâneos (Holoceno), compostos por areias e pelitos de ambientes transicionais costeiros (mangues, planícies e canais de maré, dunas e praias); (c) Depósitos aluvionares (Holoceno), compostos por areias, pelitos e cascalhos de depósitos fluviais recentes.

Segundo o Mapa Geomorfológico do Estado do Pará, esta porção da Zona Costeira apresenta três unidades distintas. A primeira unidade, denominada “Tabuleiro Paraense”, insere parte do município de Colares, Belém e Barcarena, e as ilhas de Mosqueiro e Cotijuba. É caracterizada por um conjunto de formas de relevo de topo tabular, esculpidas por vales rasos a partir da dissecação de superfície de aplainamento. A segunda unidade denominada “Litoral de Mangue e Rias”, e ocorre na faixa estreita costeira dos municípios da área de estudo. É caracterizada por planícies flúvio-marinhas, canais fluviais, manguezais e cordões arenosos, resultantes de aculturação fluvial e marinha, sujeitas ou não a inundações periódicas. A terceira unidade é denominada “Planícies aluviais”, e ocorre nas margens do Rio Guamá. É caracterizada por planícies e terraços aluviais, resultantes de acumulação fluvial periódica ou permanentemente alagada.

Santo *et al.* (2016), realizaram levantamento detalhado da linha de costa extraindo o Índices de Sensibilidade do Litoral (ISL) a partir do mapeamento integrado e categorizado das unidades geomorfológicas e morfológica. Verificaram que em Colares há predominância do ecossistema manguezal, nas ilhas de Mosqueiro e Outeiro as praias se sobressaem juntamente com as planícies lamosas vegetadas (margens de rios). Nas proximidades das zonas portuárias predominam margens de rios inundadas, planícies de maré abrigadas, terraços de baixa-mar abrigados, praias de areia grossa a intermediárias expostas e planícies lamosas.

1.4.3 Oceanográfica e clima

As características morfológicas e fisiográficas do Estuário do Rio Pará são predominantemente moldadas pela resultante da dinâmica dos processos oceanográficos atuantes nesta região. Este estuário foi caracterizado como uma zona de mistura onde a água oceânica é imensuravelmente diluída, por receber uma parte da contribuição hídrica do Rio

Amazonas e vazão total dos rios Tocantins, Acará e Guamá (Baltazar *et al.* 2011, Bezerra *et al.* 2011, Rosário *et al.* 2016).

A vazão destes rios associados com as energias das marés distingue este estuário em dois períodos, um de alta descarga líquida no período mais chuvoso e um período de baixa descarga no período menos chuvoso, atingindo picos de 300.000 m³/s durante a maré vazante e 200.000 m³/s durante a maré enchente (Prestes *et al.* 2014). Este sistema fluvial foi classificado em 11º lugar na lista dos maiores rios do mundo em volume de água (Dai & Trenberth 2002).

Segundo INMET (2018), a região é caracterizada pelo clima equatorial quente e úmido e sazonalidade climática é bem definida com um período menos chuvoso de junho a novembro e período chuvoso de dezembro a maio. Os ventos alísios locais são mais intensos entre janeiro e abril, quando sopram predominantemente de nordeste, e mais suave entre junho e outubro, quando oeste/noroeste. Esta variação sazonal é determinada pelos turnos da posição da Zona de Convergência Intertropical ao longo do ano (Fontes 2000).

1.4.4 Socioeconomia

Nas dependências do Estuário do Rio Pará estão situados os portos de Vila do Conde, no município de Barcarena, Porto de Belém na capital do Estado, além do terminal petroquímico de Miramar. O Porto de Vila do Conde é o mais movimentado, onde instalou-se o complexo industrial de beneficiamento de bauxita, alumina e alumínio pela empresa Albras-Alunorte (Rosário 2016). Na mesma área situam-se também os portos das empresas Imerys Rio Capim Caulim S/A (IRCC), Pará Pigmentos (PPAS) e Companhia Docas do Pará Vila do Conde, onde se realizam as importações e exportações de cargas e movimentação de óleo combustível (Rosário 2016).

Outras atividades socioeconômicas que caracterizam a ocupação dos espaços e os usos dos recursos costeiros nesta região destacam-se: casas residenciais e de veraneio, complexo industrial com uso e estoque de derivado de petróleo, *ferry boat*, fortaleza e forte histórico, hotéis, indústrias pesqueiras, indústrias navais, mineração, instalações militares, pesca artesanal, terminal de desembarque de pescado industrial, portos e atracadouros, terminal de derivados do petróleo, praias de intenso uso recreacional (Santos *et al.* 2016).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A ZONA COSTEIRA

2.1.1 Definições e limites

A zona costeira compreende a estreita área de transição que conecta os ambientes terrestres e marinhos, e é considerada o ecossistema mais produtivo e valorizado do planeta (Baztan *et al.* 2015). O relatório do 4º Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) aponta que cerca de 60% das principais cidades do mundo estão localizadas na zona costeira, e cerca de 40% da população mundial reside a menos de 100 km da costa (Nicholls *et al.* 2007).

Devido ao dinamismo dos processos naturais e sociais, é difícil definir com exatidão ou construir uma única definição para a zona costeira (UNDP 2018). Segundo Ketchum (1972 *apud* UNDP 2018), a zona costeira pode ser definida como uma faixa de terra adjacente ao espaço oceânico em que os processos terrestres e o uso da terra afetam diretamente os processos e usos oceânicos, e vice-versa. Para Wong *et al.* (2014), a zona costeira deve ser entendida como um sistema sócio-ecológico, formado por subsistemas naturais e humanos. O subsistema natural consiste nas formas terrestres e seus ecossistemas costeiros associados, e o subsistema social consiste nas infraestruturas, população e suas atividades.

No Brasil, a zona costeira é definida pelo Decreto nº 5.300/04, e corresponde o espaço de interação terra-mar-atmosfera, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima limitada até 12 milhas náuticas (~22 km), e uma faixa terrestre limitada ao território dos municípios que sofrem influência direta dos fenômenos ocorrentes na zona costeira (MMA 2018a). Desta forma, a zona costeira brasileira é uma das mais extensas do mundo, estendendo-se por mais de 8.500 km e abrangendo uma área de aproximadamente 514.000 km² que corresponde ao somatório da faixa oceânica, águas interiores e território de 395 municípios de 17 estados costeiros (Zamboni & Nicolodi 2008). Apesar de vasta extensão, a zona costeira compreende apenas 4% da área do país, contudo, esta área contém cerca de 26,58% da população, com uma parte significativa concentrada em centros urbanos de médio a grande porte (IBGE 2011), como mostra a Figura 2.1.

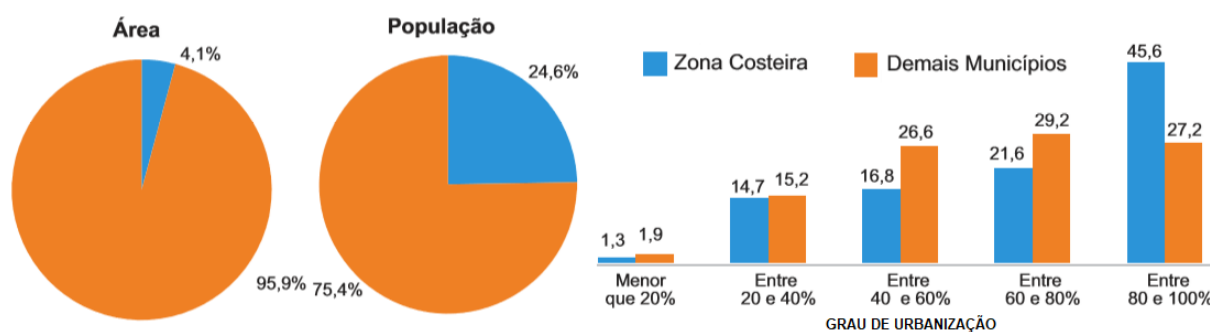


Figura 2.1 População brasileira na zona costeira: gráficos em pizza mostram a distribuição da população em municípios da zona costeira e a área correspondente; histograma mostra a distribuição percentual dos municípios da zona costeira segundo seu grau de urbanização. Fonte: Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (IBGE 2011).

2.1.2 Compartimentação

Segundo Muehe (2009), vários autores desenvolveram propostas de compartimentação da zona costeira brasileira, e estas coincidem em vários aspectos, tendo como referência comum a proposta de Silveira (1967 *apud* Muehe, 2009) baseada em critérios geológicos, geomorfológicos, climáticos e oceanográficos. Muehe (2009) apresenta uma proposta de compartimentação baseada nos trabalhos anteriores, porém direcionada às feições geomorfológicas predominantes e vulnerabilidades associadas a potenciais mudanças climáticas. A proposta de Muehe (2009) divide a costa brasileira em seis compartimentos, com algumas subdivisões (Figura 2.2).

No extremo norte do Brasil situa-se a compartimentação denominada “Embaçamento de marés do Amazonas”, que por sua vez é subdividida em “Litoral lamoso do Amapá”, “Golfão amazônico” e “Litoral das Reentrâncias”. Estas áreas e denominações definidas por Muehe (2009) são correspondentes a área da chamada Zona Costeira Amazônica (Nittrouer *et al.* 1995; Souza Filho *et al.* 2005; Pereira *et al.* 2009).

A Zona Costeira Amazônica (ZCA) (Figura 2.3) se estende desde o Rio Oiapoque no estado do Amapá, até a Baía de São Marcos no estado do Maranhão, região compostas por diversos ambientes costeiros como praias, planícies de marés, estuários, manguezais, floresta de várzea e ilhas (Pereira *et al.* 2009). A ZCA destaca-se das demais zonas costeiras pois está sob influência da foz do Rio Amazonas, cuja vazão e descarga sedimentar extremas caracterizam um ambiente singular e altamente dinâmico (Souza Filho *et al.* 2005; Guimarães *et al.* 2017). A ZCA inclui as regiões metropolitanas de Macapá (AP), Belém (PA) e São Luís (MA), além de outros municípios com densidade populacional moderada, e grandes extensões territoriais com baixa densidade populacional ou inabitadas (Pereira *et al.* 2009).

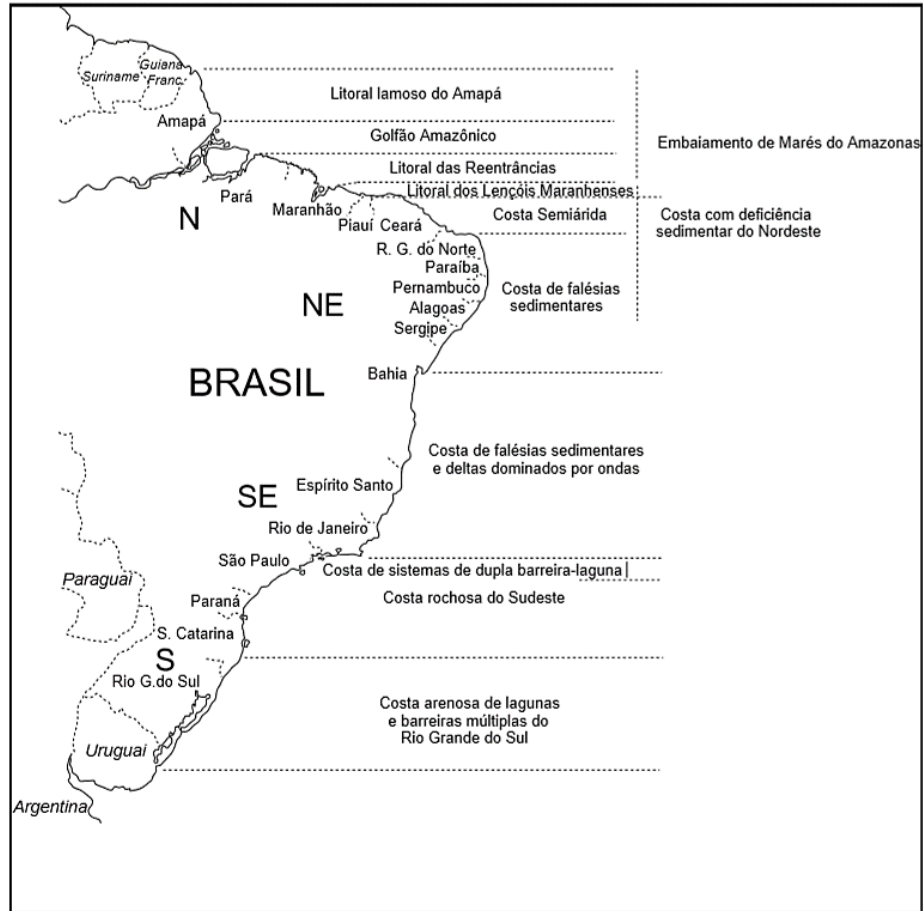


Figura 2.2 Compartimentação geomorfológica da zona costeira brasileira, segundo Muehe (2009).

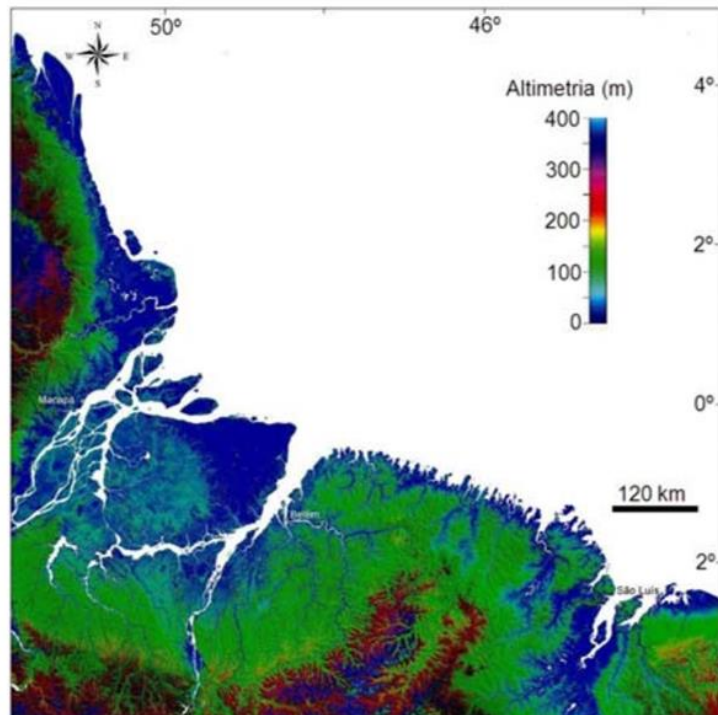


Figura 2.3 A Zona Costeira Amazônica partir de um modelo digital de elevação SRTM. Fonte: Souza Filho *et al.* (2005).

No contexto da ZCA insere-se a Zona Costeira do Estado do Pará (ZCPA) ou Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP), que assim como a zona costeira brasileira, foi definida a partir dos critérios do Decreto de Lei 5.300/04 (El-Robrini *et al.* 2006, Espírito-Santo & Szlafsztein 2016). A ZCEP (Figura 2.4) compreende 40 municípios incluindo a capital Belém, o que corresponde a uma área de aproximadamente 55.137 km² (~4,5% da área total do estado) e onde residem cerca de 45% da população (El-Robrini *et al.* 2018). A ZCEP é dividida em três setores de características fisiográficas distintas: Costa Atlântica do Salgado Paraense; Continental Estuarino do Rio Pará; e Insular Estuarino (El-Robrini *et al.* 2018), como mostra a Figura 2.4.

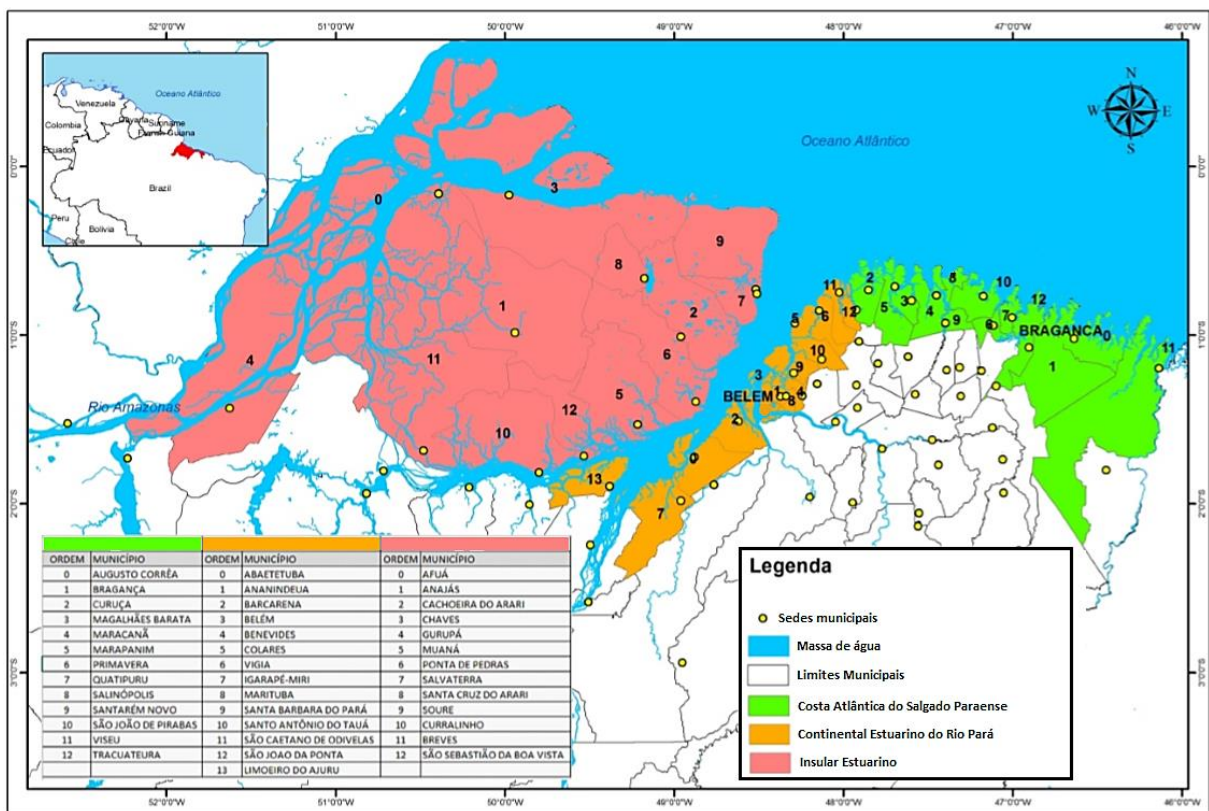


Figura 2.4 A Zona Costeira Estuarina Paraense (ZCEP) e sua subdivisão em setores: I – Costa Atlântica do Salgado Paraense; II – Continental Estuarino do Rio Pará; III – Insular Estuarino. Números correspondem aos municípios que compõe cada setor. Fonte: adaptado de Espírito-Santo & Szlafsztein (2016).

O setor Costa Atlântica do Salgado Paraense compreende a costa entre a foz do estuário do Rio Pará e o Rio Gurupi, uma área de cerca de 17.828 km² com uma população de aproximadamente 757.000 habitantes (El-Robrini *et al.* 2018). Este setor é caracterizado por duas regiões fisiográficas: (a) uma costa recortada de terrenos altos onde vales estuarinos estreitos estão esculpidos em terrenos do Grupo Barreiras; (b) e uma costa baixa adjacente formada por planícies de manguezais, recortadas por vales afogados esculpidos em depósitos holocênicos (El-Robrini *et al.* 2018).

O setor Continental Estuarino do Rio Pará compreende grande parte da margem direita do Estuário do Rio Pará, uma área de aproximadamente 15.850 km² com uma população aproximada de 1.813.700 habitantes (El-Robrini *et al.* 2018). Este setor é composto por parte do Planalto Costeiro, terraços aluviais de até 25 m de altitude, planícies aluviais com até 10 m de altitude, sedimentos inconsolidados recentes nas áreas inferiores a 5 m de altitude, e a estrutura urbana da região metropolitana de Belém que permeia a costa (El-Robrini *et al.* 2018).

O setor Insular Estuarino compreende a margem esquerda do Estuário do Rio Pará, a Ilha do Marajó e as demais ilhas a oeste próximas a fronteira com o Estado do Amapá, uma área de aproximadamente 21.457 km² com uma população aproximada de 56.155 habitantes (El-Robrini *et al.* 2018). O setor é caracterizado na Ilha do Marajó pelo Planalto Rebaixado Amazônico e pela Planície Amazônica, à sudoeste da ilha predominam planícies aluviais, e sua costa oeste e leste compõem as regiões de desagüe dos rios Amazonas e Pará, respectivamente (El-Robrini *et al.* 2018).

2.2 VULNERABILIDADE, RISCO E A ZONA COSTEIRA

As temáticas vulnerabilidade e risco são tratadas em diversos trabalhos desde a década de 1940, desenvolvendo um campo de pesquisas de caráter multidisciplinar dedicadas ao estudo da população humana em ambientes ou zonas de risco (Iwama *et al.* 2016). A vasta bibliografia da ciência da vulnerabilidade produziu muitas discrepâncias nos significados de vulnerabilidade e risco, variando de acordo com as orientações epistemológicas e práticas metodológicas, resultando em um léxico confuso de significados e abordagens (Cutter 1996).

Segundo Brooks (2003) o crescente corpo de literatura sobre vulnerabilidade e risco contém uma série de termos como sensibilidade, resiliência, adaptação, capacidade adaptativa, risco, *hazard*, faixa de sobrevivência, linha de base de adaptação, entre outras. As relações entre esses termos geralmente não são claras, e têm diferentes significados quando usado em diferentes contextos e por diferentes autores (Brooks 2003).

No sentido de sintetizar a essência do termo vulnerabilidade nos diversos ramos de abordagem, Cutter (2011) a define como:

“[...] numa definição lata, é o potencial para a perda. A vulnerabilidade pode incluir tanto os elementos de exposição ao risco (circunstâncias que podem colocar pessoas ou localidades em risco perante a um determinado perigo), quanto elementos de propensão ao risco (as circunstâncias que aumentam ou reduzem a capacidade da população, da infraestrutura ou dos sistemas físicos para responder e recuperar-se de ameaças ambientais)” (Cutter 2011).

Para Brooks (2003) as definições de vulnerabilidade tendem a se dividir em duas categorias: (a) em termos da quantidade ou potencial de danos causados a um sistema, por um evento ou perigo; ou (b) como um estado que existe dentro de um sistema antes de encontrar um evento de perigo. O risco está associado à determinado perigo para um sistema humano, e depende da gravidade e probabilidade de ocorrência do perigo.

O Departamento de Assuntos Humanitários das Nações Unidas (UNDHA), define a vulnerabilidade como o grau de perda resultante de um fenômeno potencialmente prejudicial, e o risco como as perdas esperadas (de vidas, pessoas feridas, bens danificados e atividade econômica interrompida) devido a um perigo específico para uma determinada área e período de referência (UNDHA 1993).

Para o Escritório das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres (UNISDR), vulnerabilidade consiste nas características e circunstâncias de uma comunidade, bens ou sistema que o tornam susceptível aos efeitos prejudiciais de um perigo (UNISDR 2009). O Risco teria duas conotações: (a) ênfase no conceito de acaso ou possibilidade (“o risco de um acidente”); (b) ênfase nas consequências, em termos de “perdas potenciais” para uma causa, local e período específicos.

Se tratando de vulnerabilidade e risco na zona costeira, a problemática da uniformização dos termos se propaga. Segundo Lins-de-Barros (2011) uma das maiores confusões conceituais na literatura sobre análise e gestão da vulnerabilidade e dos riscos costeiros gira em torno da própria tentativa de definição e distinção dos termos risco e vulnerabilidade. A autora reitera a exaustiva discussão e distinções nas definições, que variam de acordo com o viés de estudo, produzindo termos como “vulnerabilidade socioeconômica” e “vulnerabilidade física”.

Em contribuição, Lins-de-Barros (2010) apresenta uma proposta conceitual-metodológica para análise da vulnerabilidade costeira e riscos associados. A proposta assume que a vulnerabilidade costeira depende de dois fatores indissociáveis: (a) exposição da linha de costa, ecossistemas e população aos perigos relacionados a dinâmica física costeira; (b) capacidade da linha de costa, ecossistemas e população de resistir, recuperar-se ou adaptar-se os impactos causados por esses perigos. O risco seria a probabilidade de ocorrerem impactos negativos diretos ou indiretos causados por fenômenos costeiros considerados perigosos ao homem ou seus bens (Lins-de-Barros 2011).

Analisando o risco costeiro como resultado da ação energética do mar, Coelho (2005) e Pereira e Coelho (2013) consideram a vulnerabilidade como a sensibilidade dos sistemas biofísicos costeiros, expressada através de alterações hidromorfológicas. Para o potencial de vulnerabilidade se tornar um potencial de risco, devem haver pessoas ou bens envolvidos, de

forma que o risco se traduz na relação entre a vulnerabilidade de um local e a respectiva exposição da população ou bens à uma determinada ação (Coelho 2005).

Para efeito de operacionalidade na metodologia da produção da carta de vulnerabilidade física e riscos associados para o Estuário do Rio Pará, considera-se nesse trabalho a vulnerabilidade como um estado do sistema físico, que pode ser determinado pela susceptibilidade dos elementos que o compõem. A definição de risco será considerada a partir da ideia central da existência ou não de pessoas ou bens em determinada área vulnerável. A quantificação ou qualificação do risco, será obtida através da relação entre a vulnerabilidade física e o grau de exposição.

2.3 ÍNDICES DE VULNERABILIDADE E RISCO COSTEIRO

A metodologia mais empregada na avaliação da vulnerabilidade costeira é a construção de índices de vulnerabilidade, método que permite simplificar parâmetros físicos ou socioeconômicos, que são representados por diversos dados espaciais (McLaughlin & Cooper 2011). O trabalho de Gornitz (1990) foi uns dos primeiros e mais relevantes a utilizar a metodologia de índices, e teve como legado o chamado Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), que seria a base metodológica da grande maioria dos trabalhos posteriores envolvendo vulnerabilidade costeira.

O IVC de Gornitz (1990) foi formulado para a costa dos Estados Unidos com foco nos efeitos da elevação do nível do mar, principalmente inundação e erosão, utilizando sete parâmetros: elevação, litologia, geomorfologia, taxa de elevação do nível do mar, taxa de variação da linha de costa, amplitude de maré e máxima altura de onda. Cada variável e suas particularidades foram classificadas em uma escala numérica de 1 a 5, onde o menor e o maior valor correspondem as características de menor e maior vulnerabilidade, respectivamente, como mostra a Tabela 2.1. Ao determinar o valor de vulnerabilidade para cada parâmetro analisado, Gornitz (1990) utiliza os sete parâmetros para o calcular o IVC, que é definido pela raiz quadrada do produto das variáveis, dividido pelo número de variáveis analisadas, como mostra a Equação 2.1:

$$IVC = \frac{\sqrt{a_1 \times a_2 \times a_3 \times \dots \times a_n}}{n} \quad (2.1)$$

onde a_1 , a_2 e a_3 são variáveis analisadas, e n = número de variáveis envolvidas no cálculo.

Os valores obtidos no cálculo do IVC são divididos em quatro partes iguais onde a quarta parte (com valores mais elevados) corresponde à mais alta vulnerabilidade costeira

(Gornitz 1990). Em um estudo posterior, Gornitz (1993) considera que a falta de variáveis de natureza socioeconômica pode limitar potencialmente a análise da vulnerabilidade costeira.

Tabela 2.1 Classes de vulnerabilidade costeira. Adaptado de Gornitz (1990).

Variável	Muito baixo 1	Baixo 2	Moderado 3	Alto 4	Muito alto 5
Elevação (m)	≥ 30	20 - 30	10 - 20	5 - 10	0 - 5
Litologia	- Plutônica - Vulcânica (lava) - Metamórficas de alto a médio grau	- Metamórficas de baixo grau - arenitos e conglomerados (cimentados)	Maioria das rochas sedimentares	Sedimentos inconsolidados grossos e/ou pobremente selecionados.	Sedimentos inconsolidados finos e cinza vulcânica
Geomorfologia	- Costas rochosas - Falésias - Fiordes e <i>Fiards</i>	- Falésias médias - Costas recortadas	- Falésias baixas - <i>Glacial drifts</i> - Pântanos salgados - Recifes de coral - Mangue	- Praias seixosas - Estuário - Laguna - Planícies aluviais	- Praia barreira - Praia arenosa - Planície de maré - Delta
Mudança no nível relativo do mar (mm/ano)	≤ -1.1	-1.0 - 0.99	1.0 - 2.0	2.1 - 4.0	≥ 4.1
Varição da Linha de costa (m/ano)	≥ 2.1	1.0 - 2.0	-1.0 - +1.0	-1.1 - -2.0	≤ -2.0
Amplitude média de maré (m)	≤ 0.99	1.0 - 1.9	2.0 - 4.0	4.1 - 6.0	≥ 6.1
Máxima altura de onda (m)	0 - 2.9	3.0 - 4.9	5.0 - 5.9	6.0 - 6.9	≥ 7.0

Após os trabalhos de Gornitz (1990, Gornitz *et al.* 1991, Gornitz *et al.* 1997) diversos autores utilizaram a concepção do IVC para determinar a vulnerabilidade costeira, tanto em escala regional como em escala local, em várias regiões do planeta, tornando-se uma difundida ferramenta de apoio à gestão costeira (Rocha 2016). Derivações diretas do IVC são aplicadas nos trabalhos de Shaw *et al.* (1998) e Thieler & Hammar-Klose (1999). O primeiro foi aplicado à costa canadense com uma denominação de Índice de Sensibilidade Costeira (ISC), e o segundo foi aplicado na costa norte-americana mantendo a denominação original.

Variações significativas aparecem no trabalho de McLaughlin & Cooper (2002) que desenvolvem um índice de vulnerabilidade para a costa da Irlanda do Norte, porém determinado a partir de três sub-índices: (a) características costeiras; (b) forçantes costeiras; (c) socioeconomia. O trabalho se destaca por efetivamente incluir a variável socioeconômica na análise da vulnerabilidade costeira, e que segundo o autor, esta inclusão é extremamente

importante, porém é geralmente omitida devido às dificuldades em obter e classificar dados dessa natureza.

Para a zona costeira portuguesa, Coelho (2005) propõe uma metodologia de índice de vulnerabilidade que difere em alguns pontos das demais citadas. Primeiramente, o autor diferencia parâmetros de vulnerabilidade dos parâmetros de risco. Os parâmetros de vulnerabilidade são um total de nove (Figura 2.5a), dentre eles estão os sete parâmetros de Gornitz (1990) com alterações no intervalo de classes ou denominações, e adiciona três variáveis – distância à linha de costa, revestimento do solo e ações antropogênicas. Os parâmetros de risco ou parâmetros de exposição (Coelho 2005, Pereira & Coelho 2013) consideram quatro variáveis socioeconômicas e ecológicas: densidade populacional, atividades econômicas, ecologia e patrimônio histórico existente (Figura 2.5b). Calculando a média dos parâmetros de exposição, obtém-se um índice de exposição global, cujo valor não pode ser menor que o valor atribuído ao parâmetro densidade populacional (Coelho 2005). Outra inovação no trabalho de Coelho (2005) foi a aplicação de coeficientes de ponderação para parâmetros de vulnerabilidade. Esses coeficientes seriam determinados pelo usuário e aplicados a cada parâmetro de vulnerabilidade, gerando um índice de vulnerabilidade global. Ao relacionar o Índice de Exposição Global e a Vulnerabilidade Global em uma matriz, Coelho (2005) obtém a Classificação de Risco (Figura 2.5c).

A inserção de coeficientes de ponderação nos índices de vulnerabilidade é uma importante ferramenta para diferenciar o grau de contribuição que cada variável tem para mudanças físicas da costa, além de ser decisivamente condicionantes no resultado. No entanto, quando as ponderações são determinadas arbitrariamente ou de forma subjetiva, o cálculo do índice de vulnerabilidade ou risco é passível de questionamentos, e o problema se agrava quanto maior for o número de variáveis envolvidas.

Afim de minimizar a subjetividade na ponderação dos parâmetros de vulnerabilidade, Yin *et al.* (2012) aplicou o Processo Hierárquico Analítico (AHP) proposta por Saaty (1977), técnica amplamente utilizada em problemas de tomada de decisão em diversos ramos da ciência. Os autores determinaram oito variáveis para o cálculo do IVC para a costa da China, onde as subdividiu em variáveis oceânicas e variáveis terrestres, estipulando peso igual para ambos os grupos (Yin *et al.* 2012). Dentro dos grupos, foram determinados os pesos de cada variável de acordo com os resultados da análise AHP, ainda assim os autores relatam dificuldade em medir com precisão a importância relativa entre as variáveis devido ao alto grau de incerteza nos ambientes ao longo da costa.

		MUITO BAIXA 1	BAIXA 2	MODERADA 3	ALTA 4	MUITO ALTA 5	
(A) Parâmetros de vulnerabilidade	CT - COTA TOPOGRÁFICA (ZH, m)	CT > 30	20 < CT ≤ 30	10 < CT ≤ 20	5 < CT ≤ 10	CT ≤ 5	
	DC - DISTÂNCIA À LINHA DE COSTA (m)	DC > 1000	200 < DC ≤ 1000	50 < DC ≤ 200	20 < DC ≤ 50	DC ≤ 20	
	AM - MÁXIMA AMPLITUDE DE MARÉ (m)	AM < 1.0	1.0 ≤ AM < 2.0	2.0 ≤ AM < 4.0	4.0 ≤ AM < 6.0	AM > 6.0	
	AO - MÁXIMA ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA (m)	AO < 3.0	3.0 ≤ AO < 5.0	5.0 ≤ AO < 6.0	6.0 ≤ AO < 6.9	AO ≥ 6.9	
	EA - TAXA MÉDIA DE EROSIÃO/ACREÇÃO (m/ANO)	EA > 0 acreção	-1 < EA ≤ 0	-3 < EA ≤ -1	-5 < EA ≤ -3	≤ -5 erosão	
		MUITO BAIXA 1	BAIXA 2	MODERADA 3	ALTA 4	MUITO ALTA 5	
(B) Parâmetros de exposição	GL - GEOLOGIA	Rochas magmáticas	Rochas metamórficas	Rochas sedimentares	Rochas sedimentares	Pequenos sedimentos não consolidados	
	GM - GEOMORFOLOGIA	Montanhas	Arribas rochosas	Arribas erodíveis, praias abrigadas	Praias expostas, planícies	Dunas, restingas, estuários, etc	
	RS - REVESTIMENTO DO SOLO	Floresta	Vegetação rasteira, solo cultivado	Solo não revestido	Urbanizado rural	Urbanizado ou industrial	
	AA - AÇÕES ANTROPOGÊNICAS	Intervenções de manutenção da posição	Intervenções sem redução nas fontes sedimentares	Intervenções com redução nas fontes sedimentares	Sem intervenções e sem redução nas fontes sedimentares	Sem intervenções com redução nas fontes sedimentares	
		Muito baixa (Classe 1)	Baixa (Classe 2)	Moderada (Classe 3)	Alta (Classe 4)	Muito alta (Classe 5)	
Exposição							
Densidade populacional (habitantes/km ²)		<100	100-200	200-350	350-500	>500	
Atividades económicas (empresas por município)		<2000	2000-4000	4000-6000	6000-8000	>8000	
Ecologia		Zonas sem relevância ecológica	Reserva Agrícola Nacional	Reserva Ecológica Nacional	Zonas de Proteção Ecológica	Reservas Naturais	
Património histórico existente (número de elementos identificados por freguesia)		<5	5-15	15-25	25-35	>35	
(C) Classificação de risco	Matriz de risco		Grau de exposição				
			1	2	3	4	5
	Vulnerabilidade Global	1	I	I	I	II	III
		2	I	I	II	III	IV
		3	I	II	III	IV	V
		4	II	III	IV	V	V
5		III	IV	V	V	V	
		Legenda: I - Risco desprezável II – Risco baixo III - Risco médio IV – Risco elevado V – Risco muito elevado					

Figura 2.5 Metodologia de análise de vulnerabilidade e risco de Coelho (2005): (A) parâmetros de vulnerabilidade determinados por Coelho (2005), que aplicando pesos diferenciados para cada parâmetro, obtém-se a Vulnerabilidade Global; (B) parâmetros de exposição, que a partir da média dos valores de cada variável, obtém-se um Índice de Exposição Global; (C) matriz de Classificação de Risco obtida através da relação entre Vulnerabilidade Global e o Índice de Exposição Global (ou grau de exposição). Fonte: Coelho (2005), Coelho et al. (2006) e Pereira & Coelho (2013).

Assim como Yin *et al.* (2012), Murali *et al.* (2013) utilizaram a técnica AHP para ponderar os parâmetros do seu índice de vulnerabilidade para a costa de Puducherry, Índia. O diferencial em relação ao trabalho anterior é que Murali *et al.* (2013) compõe o IVC a partir de dois sub-índices chamados Índice de Vulnerabilidade Física (PVI) e Índice de Vulnerabilidade Social (SVI). O primeiro corresponde às mesmas variáveis do trabalho de Gornitz (1990), e o segundo corresponde as variáveis população, cobertura e uso da terra, rede viária e patrimônio

cultural ou áreas turísticas. Para determinar os coeficientes de ponderação, os autores submetem as variáveis de ambos os sub-índices aos processos de organização e obtenção de métricas para geração do modelo hierárquico de Saaty (1977). Uma das métricas é a chamada “relação de consistência”, cujo valor determina se o modelo é coerente e respeita as condições matemáticas do método. Em outras palavras, escolhas aleatórias ou importâncias relativas incoerentes são facilmente rejeitadas no modelo (Murali et al. 2013, Saaty 1987, Rocha 2016). Com o peso de cada variável determinada, os sub-índices são calculados através da soma ponderada das variáveis (Equação 2.2), e o IVC é obtido através da média dos sub-índices PVI e SVI (Equação 2.3).

$$PVI \text{ e } SVI = W_1X_1 + W_2X_2 + \dots W_nX_n \quad (2.2)$$

$$IVC = \frac{PVI+SVI}{2} \quad (2.3)$$

em que W_n é o peso determinado para cada variável, e X_n é o valor da vulnerabilidade obtido para cada variável (Murali *et al.* 2013).

O trabalho de Murali *et al.* (2013) mostra uma metodologia objetiva para analisar e ilustrar a vulnerabilidade ligada a vários perigos costeiros e pode ser usada efetivamente por gerentes e tomadores de decisão costeiros para elaborar melhores planos de gestão de zonas costeiras.

No Brasil, vários trabalhos utilizaram ou adaptaram índices de vulnerabilidade em diversos regiões da zona costeira brasileira. Apesar de não tratar sobre índice de vulnerabilidade costeira, é necessário citar o trabalho de Crepani (2001) que é grande relevância para o estudo e mapeamento da vulnerabilidade natural, e muitos trabalhos nessa temática têm base conceitual-metodológica neste autor. Crepani (2001) elabora o chamado Índice de Vulnerabilidade Natural (IVN) baseado na caracterização morfodinâmica das variáveis geologia, geomorfologia, solos, vegetação e clima, determinando valores para uma escala de vulnerabilidade à perda ao solo, que varia de 1 (estável) a 3 (vulnerável). Baseado no IVN de Crepani (2001), Grigio *et al.* (2004) elaboraram um Índice de Vulnerabilidade Ambiental (IVA) para o município de Guamaré (RN), que foi obtido a partir de cruzamento entre o mapa de vulnerabilidade natural e um mapa de uso e cobertura da terra.

Szlafsztein & Sterr (2007) elaboraram um índice de vulnerabilidade baseada em SIG para a costa nordeste do Estado do Pará. Este índice foi construído a partir da média entre um

Índice de Vulnerabilidade Natural e um Índice de vulnerabilidade Socioeconômica, cujas variáveis diferem das tradicionais já abordadas, como população total afetada por inundações, pobreza e prosperidade municipal. Mezzaer *et al.* (2008) propõe um método de análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da Ilha de Santa Catarina (SC), utilizando uma metodologia compartimentada da linha de costa em células costeiras. Para obter os índices de vulnerabilidade, os autores utilizaram oito variáveis ligadas à morfodinâmica costeira e duas taxas de variação da linha de costa.

Busman (2016) estudou a vulnerabilidade física e socioeconômica dos municípios costeiros de Macau e Guamaré (RN), e Salinópolis (PA). A autora aplica diferentes metodologias de classificação de vulnerabilidade socioeconômica, e diferentes abordagens para a determinação da vulnerabilidade física, dentre elas Lógica *Fuzzy* e AHP. A autora ainda submete as variáveis do estudo ao cálculo do IVC de Thieler & Hammar-Klose (1999), e cria seu próprio IVC adicionando as variáveis prognóstico da variação da linha de costa, infraestrutura urbana e uso-atividade. Alcoforado (2017) determinou o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) para o Estuário do Rio Piranhas-Açu (RN), estabelecendo modelos para diferentes cenários de mudanças climáticas. Para melhorar a qualidade da avaliação da variável declividade, o autor utiliza modelo digital de elevação obtido a partir de LiDAR aerotransportado.

Diversos outros trabalhos analisaram a problemática da vulnerabilidade costeira no Brasil e no mundo, através do uso ou adaptação de índices de vulnerabilidade e risco, utilizando ou não ponderações para as variáveis analisadas (Gornitz *et al.* 1997, Lins-de-Barros 2005, Abuodha & Woodroffe 2010, Kumar *et al.* 2010, Ozyurt & Ergin 2010; Pendleton *et al.* 2010, Muehe *et al.* 2011, Mujabar & Chandrasekar 2011, Torresan *et al.* 2012, Silva 2015, Mallmann 2016, Rocha 2016, Royo *et al.* 2016, Germani *et al.* 2017, UDNP 2018). Vale ressaltar os trabalhos de Mohamad *et al.* (2014) e Silveira & Bonetti (2018) por serem os únicos na bibliografia analisada a incluírem a variável “velocidade de corrente de maré” ou “máxima velocidade de corrente”.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESTRUTURA DA PESQUISA

O processo metodológico de elaboração do mapa de vulnerabilidade à erosão costeira e riscos associados para a região do Estuário do Rio Pará consiste em quatro etapas principais: (i) concepção metodológica; (ii) aquisição de dados, (iii) processamento; e (iv) produção de mapas temáticos. O fluxograma da Figura 3.1 mostra as quatro etapas e seus componentes, e esquematiza a metodologia do trabalho.

Na etapa de concepção metodológica foi feito um levantamento bibliográfico buscando trabalhos que abordassem a temática de índices de vulnerabilidade e risco costeiro. A pesquisa tem como objetivo definir os possíveis parâmetros à serem analisados, metodologias de classificação e ponderação, e por fim, construir um índice de vulnerabilidade à erosão costeira para a área de estudo, a partir de adaptações de modelos considerados na literatura.

Com a definição da base conceitual-metodológica, avançou-se para a etapa de aquisição da base de dados que subsidiou a obtenção das variáveis que compõe as classificações de vulnerabilidade e exposição. O banco de dados incluiu dados de sensoriamento remoto, como imagens de satélite orbital, e levantamentos geológicos, oceanográficos e censitários, produzidos por órgãos governamentais e instituições de pesquisa.

A partir da base dados, na etapa de processamento, foram extraídas as informações necessárias para obter a classificação de vulnerabilidade e exposição. Estas informações, sejam elas qualitativas ou quantitativas, foram traduzidas em uma escala de vulnerabilidade ou exposição, de acordo com a metodologia estabelecida. As variáveis classificadas foram ponderadas de acordo com sua importância, e em seguida entraram no cálculo do Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVEC). O resultado do IVEC foi cruzado com a classificação de exposição no cálculo de tendência de risco.

Na etapa de produção de mapas temáticos, foram produzidos o Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira e o Mapa de Tendência de Risco à Erosão Costeira. Foram também produzidos mapas de vulnerabilidade para cada variável envolvida na construção do IVEC e classificação de exposição.

Os detalhes acerca da concepção metodológica, base de dados, processamentos e produção dos mapas serão descritos nos tópicos seguintes.

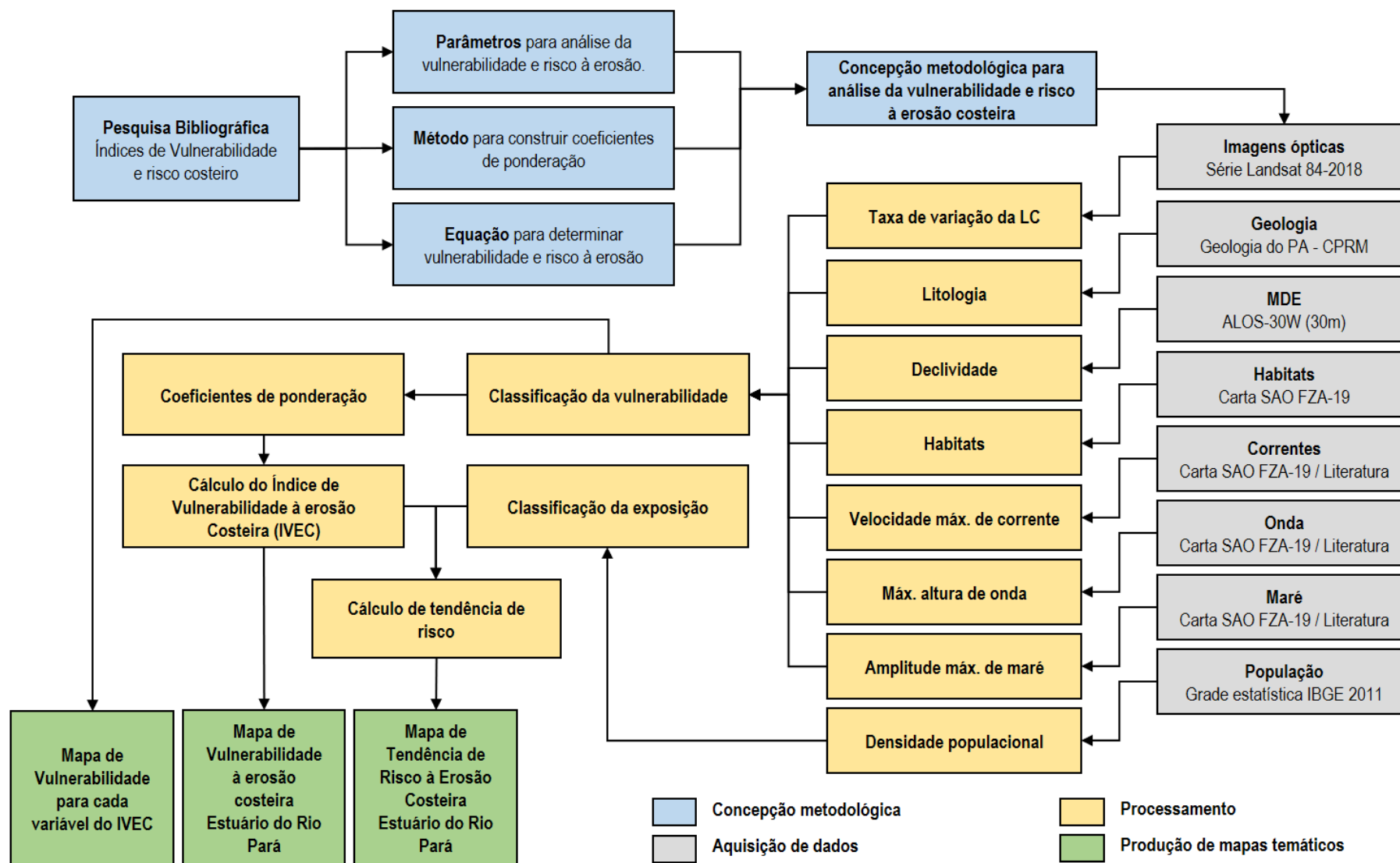


Figura 3.1 Fluxograma com as principais etapas e dados utilizados para a produção dos mapas de vulnerabilidade e risco à erosão para o Estuário do Rio Pará.

3.2 CONCEPÇÃO METODOLÓGICA

Como exposto no Item 2.3, existem diversos modelos de índices de vulnerabilidade costeira, e grande parte deles são adaptações da proposta de Gornitz (1990). Neste trabalho tomou-se o mesmo ponto de partida, porém, modificações foram feitas com base em modificações de outros autores, no intuito de construir um modelo que melhor se ajuste aos dados disponíveis e às características fisiográficas da área de estudo.

3.2.1 Variáveis para o Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVEC).

Das sete variáveis da proposta de Gornitz (1990) (ver Tabela 2.1), mantiveram-se “Amplitude de maré” e “Litologia”. A variável “Amplitude de maré” e seus intervalos de classificação são relativamente constantes nas diversas propostas de literatura (Coelho 2005, Murali *et al.* 2013, Germani *et al.* 2018). A variável “Litologia” nem sempre está presente nas propostas, porém há uma certa uniformidade na classificação dos principais grupos de rochas ou tipos de sedimentos, diferenciando apenas no detalhamento dos tipos. A diferenciação dos litotipos ou sedimentos em classes de vulnerabilidade costeira é melhor tratada no trabalho de Gornitz *et al.* (1997), e aprofundada (não de forma exclusiva para a zona costeira) por Crepani (2001). Esses trabalhos, dentre outros, apresentam alta correlação nos tipos e valores relativos de vulnerabilidade, e desta forma, serão adotados neste trabalho.

Na proposta de Gornitz (1990) a variável “Máxima altura de ondas” classifica como menor grau de vulnerabilidade, ondas com altura máxima de até 2,9 m (Tabela 2.1). Como a área de estudo localiza-se em uma zona costeira estuarina, está relativamente protegida do efeito de ondas em comparação a zonas costeiras oceânicas. Desta forma, a proposta de Thieler & Hammar-Klose (1999), que considera o menor grau de vulnerabilidade ondas com altura máxima de até 0,55 m, se ajusta melhor as características da área de estudo, além de ser amplamente usada na literatura.

Assim como a litologia, a variável “Declividade” nem sempre está presente nos índices de vulnerabilidade, e as propostas que à contem geralmente apresentam intervalos e unidades de medidas diferentes. No entanto, a grande maioria converge sobre a relação vulnerabilidade-declividade na zona costeira, em que são inversamente proporcionais (Thieler & Hammar-Klose 1999, Lins-de-Barros 2010, Pendleton *et al.* 2010, Mujabar & Chandrasekar 2011, Yin *et al.* 2012, Rani *et al.* 2015). Esta relação se justifica, pois, costas de menor declividade são mais sujeitas às ações de ondas, correntes e maré, e têm maior potencial de recuo (Pendleton *et al.* 2010). Neste trabalho serão adotados os intervalos propostos por Ozyurt & Ergin (2010),

aplicados por Busman (2016) e Alcoforado (2017) em zonas costeiras do norte e nordeste do Brasil.

A proposta de Gornitz (1990) e de diversos trabalhos posteriores incluem a variável “Relevo” ou “Geomorfologia” na classificação de vulnerabilidade. Neste trabalho foi feita uma adaptação em função dos dados disponíveis, denominando a variável de “Habitats”. A modificação foi feita devido a disparidade na escala dos trabalhos que contém informações geomorfológicas que cobrissem a área de estudo (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Mapas que contém informações sobre a geomorfologia do Estuário do Rio Pará com as respectivas escalas de detalhe.

Dado	Escala
Geomorfologia do Estado do Pará (IBGE 2008).	1:800.000
Geodiversidade do Estado do Pará (CPRM 2013)	1:2.000.000
Carta Tática de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo Bacia da Foz do Amazonas - Rio Pará - FZA19 (IEPA 2016).	1:150.000

As Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo (Cartas SAO) classificam as seções do litoral em habitats, e um dos parâmetros de classificação são as características geomorfológicas da costa (IEPA 2016). Neste trabalho, as características geomorfológicas da área de estudo foram obtidas a partir da base de dados da Carta Tática FZA19 (IEPA 2016), e preferiu-se manter a denominação “Habitats” do dado original. Para classificar as informações obtidas em graus de vulnerabilidade, foi utilizado a classificação da variável “Relevo” das propostas de Gornitz (1990) e Gornitz *et al.* (1997), inserindo áreas urbanas e estruturas artificiais com base na proposta de Coelho (2005).

A variável “Taxa de variação da linha de costa” é unanimidade nas diversas propostas de análise da vulnerabilidade física costeira. A diferença está nos intervalos de classificação, podendo ser mais ou menos sensíveis. A proposta de Gornitz (1990) considera taxas de erosão de 2m/ano como vulnerabilidade muito alta, em contrapartida, Busman (2016) considera que vulnerabilidade muito alta são para taxas de erosão superiores a 10m/ano. Neste trabalho foi utilizado os princípios da proposta de Coelho (2005), com modificações nos intervalos das classes de vulnerabilidade baixa e muito baixa, buscando se adequar as limitações do dado utilizado na análise da variação da linha de costa.

Neste trabalho, assim como nos trabalhos de Mohamed *et al.* (2014) e Silveira & Bonetti (2018), foi inserida a variável “Velocidade máxima de corrente”. Esta variável é pouco utilizada nas propostas de análise da vulnerabilidade física costeira, e isso deve-se principalmente à falta de dados sistemáticos dessa natureza. A Carta SAO FZA19 (IEPA 2016) dispõem de

informações de velocidade de correntes de maré no Estuário do Rio Pará, e dessa forma decidiu-se incluir a variável, e os intervalos de classificação foram extraídos da proposta de Mohamed *et al.* (2014).

A partir das considerações expostas, construiu-se a tabela de classificação das variáveis utilizadas no Índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVEC) (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 Classes de vulnerabilidade e variáveis analisadas. A coluna “Fonte” indica em quais autores foi baseada a classificação de cada variável: A - Gornitz (1990) e Gornitz *et al.* (1997); B - Gornitz (1990), Gornitz *et al.* (1997) e adaptações de Coelho (2005); C - Modificado de Coelho (2005); D - Ozyurt & Ergin (2010), Busman (2016) e Alcoforado (2017); E - Mohamed *et al.* (2014); F - Thieler & Hammar-Klose (1999).

VARIÁVEIS	CLASSES DE VULNERABILIDADE					FONTE
	Muito baixo 1	Baixo 2	Moderado 3	Alto 4	Muito alto 5	
Litologia	- Plutônica - Vulcânica (lava) - Metamórficas de alto à médio grau	- Metamórficas de baixo grau - Arenitos e conglomerados (cimentados)	Maioria das rochas sedimentares	Sedimentos inconsolidados grossos e/ou pobremente selecionados.	Sedimentos inconsolidados finos e cinza vulcânica	A
Habitats	- Costas rochosas - Falésias - Fiordes e <i>Fiards</i>	- Falésias médias - Costas recortadas	- Falésias baixas - <i>Glacial drifts</i> - Pântanos salgados - Recifes de coral - Manguezal	- Praias seixosas - Estuário - Laguna - Planícies aluviais	- Praia barreira - Praia arenosa - Planície de maré - Delta - Área urbana - Estruturas artificiais	B
Taxa de variação da LC (m/ano)	> 1 Acreção	1 a -1 Estabilidade	-1 a - 3 Erosão	-3 a -4 Erosão	< -5 Erosão	C
Declividade (%)	5 - 45	5 - 3,33	3,33 - 2	1 - 2	0-1 e > 45	D
Velocidade máxima de corrente (m/s)	< 0,2	0,2 - 0,4	-0,4 - 0,6	0,6 - 0,8	> 0,8	E
Amplitude média de maré (m)	< 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	> 6	A
Máxima altura de onda (m)	0 - 0,55	0,55 - 0,85	0,85 - 1,05	1,05 - 1,25	≥ 1,25	F

3.2.2 Classificação da exposição

Para determinar classificação da exposição, é necessário obter informações socioeconômicas da população e bens inseridos na zona costeira. Dentre as variáveis, a “Densidade populacional” é unanimidade nas classificações risco ou vulnerabilidade

socioeconômica (McLaughlin & Cooper 2002, Coelho 2005, Szlafsztein & Sterr 2007, Murali *et al.* 2013, Rani *et al.* 2015; Busman, 2016). Até o ano de 2016, dados espaciais socioeconômicos eram obtidos a partir dos setores censitários do IBGE, não apropriados para análises de maior escala. Com o lançamento da Grande Estatística, a resolução do dado foi consideravelmente melhorada, possibilitando análises socioeconômicas com maior definição em relação ao dado antecessor.

Bueno (2014) mostra a diferença na análise da distribuição da população entre a grade estatística e setores censitários (Figura 3.2). A disparidade entre as análises é acentuada em regiões cuja distribuição espacial da população é desigual, logo, a utilização das células da grade estatística como unidade espacial aproxima a análise da realidade. Apesar do ganho na resolução espacial, informações como atividades econômicas não foram incorporados à grade estatística. Desta forma, utilizaremos neste trabalho apenas a variável “Densidade populacional” como indicador socioeconômico, adotando os intervalos de classificação de exposição propostos por Coelho (2005), como mostra a Tabela 3.3.

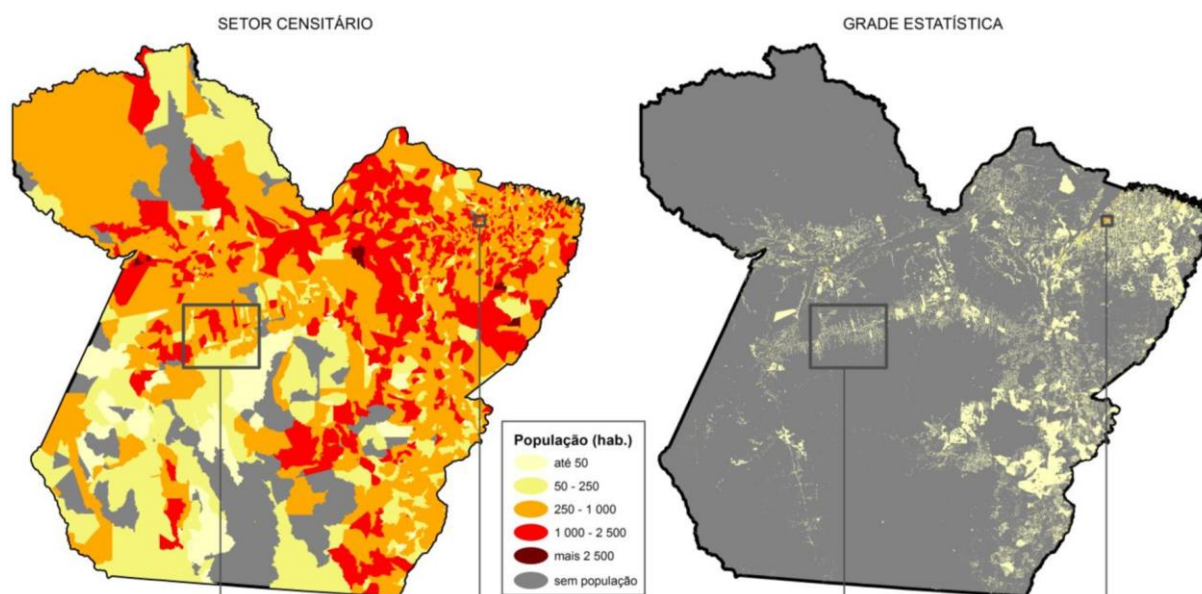


Figura 3.2 Diferentes resultados na análise da distribuição da população do Estado do Pará. O mapa da esquerda foi construído utilizando os setores censitários como unidade espacial, e o mapa da esquerda utilizou a grande estatística. Os intervalos de classificação são os mesmos. Fonte: Bueno (2014).

Tabela 3.3 Classes de exposição para a variável densidade populacional segundo Coelho (2005).

VARIÁVEL	CLASSE DE EXPOSIÇÃO				
	Muito baixo 1	Baixo 2	Moderado 3	Alto 4	Muito alto 5
Densidade populacional (habitantes/km ²)	< 100	100 - 200	200 - 350	350 – 500	> 500

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS

Para obter a variável “taxa de variação da linha de costa” foram obtidas imagens de satélite orbital óptico da série Landsat (5-8), disponibilizadas pelo *U.S. Geological Survey* (USGS) através da plataforma *Earth Explorer*. Para a variável “declividade” foi utilizado o modelo digital de elevação *ALOS Global Digital Surface Model* (AW3D30) disponibilizados pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) através do banco de dados do *Earth Observation Research Center* (EORC). Dados geológicos para compor a variável “Litologia” foram obtidos no “Mapa Geológico do Estado do Pará” de Vasquez *et al.* (2008), publicado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e disponível no formato digital na plataforma GeoSGB. Para compor as variáveis “Habitats”, Velocidade máxima de corrente”, “Máxima altura de onda” e “Amplitude máxima de maré” foram utilizadas as informações contidas no Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas, elaborado pelo Instituto de Pesquisa Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA 2016), cuja base de dados digital está disponível no Banco de Dados Geográficos do Projeto Cartas SAO para a Bacia Marítima Foz do Amazonas (IEPA 2017). As informações contidas nas Cartas SAO, foram complementadas com dados de diversos trabalhos contidos no livro Panorama da Erosão Costeira no Brasil (MMA 2018b), capítulo Pará (El-Robrini *et al.* 2018). Para compor a variável “Densidade populacional” foi utilizado a Grade Estatística do Censo 2010 (IBGE 2016) disponível na plataforma Mapas do Instituto Brasileira de Geografia e Estatística (IBGE 2018). A base de dados, fontes de aquisição e principais características estão dispostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Fontes e principais características dos componentes da base de dados.

Dado	Fonte	Característica
Imagens ópticas Série Landsat	USGS / Earth Explorer	Resolução espacial (30-15m)
MDE ALOS-AW3D30	JAXA / EORC	Resolução espacial (30m)
Geologia do Estado do Pará	CPRM / Vasquez <i>et al.</i> (2008)	Escala 1:1.000.000
Habitats, correntes, ondas, e amplitude de maré para a região do Estuário do Rio Pará.	Carta Tática de Sensibilidade Ambiental ao Derramamento de Óleo Bacia da Foz do Amazonas - Rio Pará - FZA19 (IEPA 2016).	Escala 1:150.000
	Panorama da Erosão Costeira no Brasil – Pará (MMA 2018, El-Robrini <i>et al.</i> 2018).	Informações de diversos autores citados.
População	Grade Estatística do Censo 2010 – Articulação ID_75 (IBGE 2016).	Resolução espacial: células de 200x200 m e 1x1 km .

3.4 PROCESSAMENTO

Neste tópico serão descritos os métodos, dados, softwares e processamentos executados para obtenção das classes de vulnerabilidade de cada variável do IVEC e da Classe de exposição. A metodologia foi adaptada de Alcoforado (2017) que estudou a vulnerabilidade costeira do Estuário do Rio Piranhas-açu (RN). Para cada variável foi gerado um mapa temático de vulnerabilidade, e estes constam nos Apêndices em escala 1:250.000.

3.4.1 Taxa de variação da linha de costa

As taxas de variação da linha de costa para o Estuário do Rio Pará foram obtidas através de processamento digital de imagem (PDI) e análise espacial. Através do índice de extração de água AWEI, imagens do satélite óptico Landsat foram processadas e obteve-se a posição da linha de costa nos anos 1984 e 2018. A partir da variação espacial das linhas de costas, calculou-se a taxa de variação utilizando o *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*. O fluxograma da Figura 3.3 mostra a metodologia de obtenção da variável em questão.

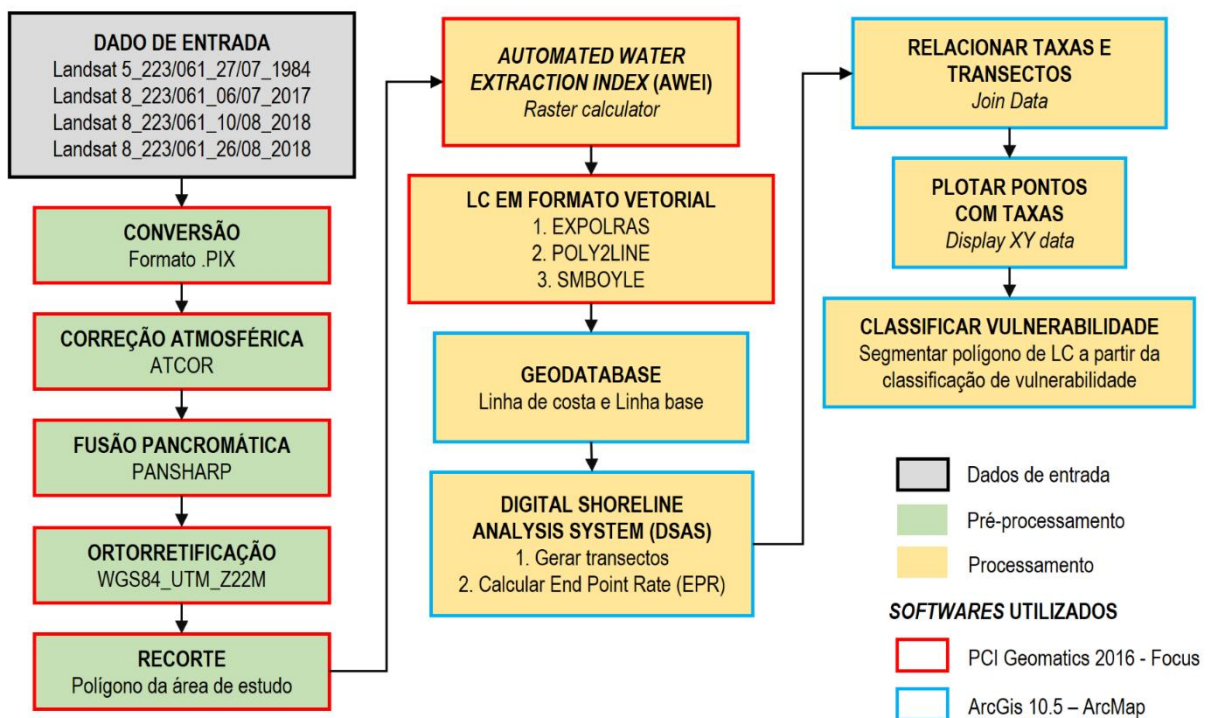


Figura 3.3 Fluxograma da metodologia de obtenção das classes de vulnerabilidade para a variável “Taxa de variação da linha de costa”. O preenchimento dos quadros indica a etapa de processamento, e a borda dos quadros indica o *software* utilizado.

3.4.1.1 Dados de entrada

A série de imagens orbitais dos satélites Landsat compõe a maior coleção de dados de sensoriamento remoto de Terra de resolução moderada, construída com o imageamento da superfície terrestre em uma frequência de 16 dias, desde a década de 70 (Wulder *et al.* 2015).

As cenas Landsat utilizadas são do acervo *Landsat Collection 1 Level 1 Data Products*, que consiste em produtos de nível 1 gerados pelos sensores *Thematic Mapper (TM)*, *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)* e *Operational Land Imager (OLI)* (USGS 2017). Este é o pacote de mais alta qualidade de processamento em nível 1 disponibilizado na *Plataforma Earth Explorer*, onde as cenas encontram-se radiometricamente calibradas e ortorretificadas.

A seleção das cenas buscou atender três critérios básicos: (i) maior intervalo possível entre as cenas, para que a análise tenha um período abrangente; (ii) baixa (ou nula) cobertura de nuvens, para que não haja interferência na extração automática dos corpos de água; (iii) condição de maré aproximadas no horário do imageamento, para que as linhas de costas extraídas em momentos diferentes sejam comparáveis. A Tabela 3.3 lista as cenas obtidas e suas principais características.

Tabela 3.3 Cenas Landsat selecionadas e suas principais características.

Identificador da Cena	Satélite/Sensor	*Condição de maré (m)	Resolução espacial
L5_L1_223061_19840727	Landsat-5/TM	3,06	30m
L8_L1_223061_20170706	Landsat-8/OLI	2,74	30/15 m
L8_L1_223061_20180810	Landsat-8/OLI	3,45	
L8_L1_223061_20180826	Landsat-8/OLI	3,21	

*Dados de maré pra cenas de 2017 e 2018 foram obtidos da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, através do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para a cena de 1984, dados de maré foram obtidos do levantamento feito por Guimarães *et al.* (2014).

3.4.1.2 Pré-processamento

As cenas Landsat foram convertidas para o formato .PIX, que é o formato nativo do software de geoprocessamento *PCI Geomatics 2016*, onde todo o pré-processamento e parte do processamento foi executado (ver fluxograma da Figura 3.3). A energia captada pelos sensores Landsat é influenciada pela atmosfera da Terra, e os efeitos incluem a dispersão e absorção da radiação eletromagnética devido a interações com a atmosfera (Young *et al.* 2017). Geralmente estes efeitos tem como consequência a diminuição do contraste entre as feições presentes na imagem (Menezes & Almeida 2012). Para suprimir os efeitos atmosféricos nas cenas analisadas, estas foram submetidas ao algoritmo *ATCOR Ground Reflectance*, que permite calcular os valores de refletância no nível do solo e remover os efeitos atmosféricos em imagens de satélite.

As cenas Landsat-8 contém a banda pancromática, utilizada para melhorar a resolução espacial das bandas multiespectrais da cena. Utilizando o algoritmo *PANSHARP*, as bandas multiespectrais foram fusionadas com a banda pancromática, melhorando a resolução espacial

das cenas de 30m para 15m. Esta técnica foi utilizada para melhorar a definição da interface terra-água nas cenas, e conseqüentemente tornar mais preciso a diferenciação das duas classes. A Figura 3.4 ilustra o ganho em resolução obtido com a fusão no algoritmo PANSHAP.



Figura 3.4 O ganho em resolução espacial a partir da técnica de fusão de bandas. À esquerda, a cena Landsat-8 em multiespectral em composição RGB com resolução de 30m. À direita, a mesma cena após a fusão com a banda pancromática com resolução de 15m.

A pesar das cenas *Level 1 Data Products* constarem como ortorretificadas, a sobreposição das mesmas mostra deslocamentos relativos que podem chegar a até 300m. Para corrigir o erro no georreferenciamento, as cenas foram novamente ortorretificadas no *software OrthoEngine* do *PCI Geomatics* 2016. O modelo matemático utilizado foi o *Optical Satellite Modeling – Rational Function*, calculado a partir de coleta de GCP's (*Ground control points*), tomando como imagem de referência a cena Landsat-8 de 2017. As correlações foram feitas a partir de 20 GCP's distribuídos em toda cena. O resultado foi a correção do deslocamento e diminuição do erro quadrático médio (RMSE) das cenas, como mostra a Tabela 3.4. No processo de ortorretificação, as cenas foram reprojctadas para o Datum WGS84, Zona UTM 22M. Por fim, as cenas foram recortadas nos limites da área de estudo.

Tabela 3.4 RMSE das cenas originais e RMSE final após a ortorretificação.

Identificador da Cena	Satélite/Sensor	RMSE Inicial (m)	RMSE Final (m)
L5_L1_223061_19840727	Landsat-5/TM	12,54	3,48
L8_L1_223061_20180810	Landsat-8/OLI	9,01	4,49
L8_L1_223061_20180826	Landsat-8/OLI	8,84	3,14

3.4.1.3 Automated Water Extraction Index (AWEI)

Uma das definições mais simples para linha de costa é a de que ela coincide com a interface física terra-água, desde que se considere a sua variação no tempo e no espaço devido fatores sedimentares e hidrodinâmicos (Boak & Turner 2005). Partindo dessa premissa, a interface terra-água nas cenas Landsat foi obtida através do *Automated Water Extraction Index* (AWEI). O índice foi criado por Feyisa *et al.* (2013) com objetivo maximizar a separabilidade de pixels de água e não-água através da diferenciação de bandas, adição e aplicação de diferentes coeficientes. O AWEI para áreas onde sombras não são fatores determinantes é calculado segundo a Equação 3.1.

$$AWEI = 4(p_{GREEN} - p_{SWIR1}) - (0,25p_{NIR} + 2,75p_{SWIR2}) \quad (3.1)$$

onde p = valor da reflectância nas bandas espectrais Landsat.

Segundo Feyisa *et al.* (2013), este índice foi relativamente mais preciso ao classificar os pixels da borda em comparação com outros métodos de classificação como MNDWI e ML. Além disso, o limiar ideal de separação mostrou-se menos variável que nos outros métodos quando aplicado em imagens de diferentes localizações e tempos, mostrando-se um índice adequado à estudos de detecção de mudança.

Utilizando a ferramenta *Raster calculator* do PCI *Geomatics* 2016, aplicou-se o AWEI nas cenas Landsat de 1984 e 2018, resultando em *rasters* cujos pixels têm valores iguais ou maiores que zero. Para as cenas analisadas, valores acima de zero são classificados como corpo de água, e valores iguais a zero são classificados como não-água. Desta forma, a posição da linha de costa é considerada como a posição da interface entre as duas classes.

Para converter os resultados do AWEI em dado vetorial, foi utilizado o algoritmo EXPOLRAS que converte um *raster* em polígono no formato *Shapefile*. Em seguida, utilizou-se o algoritmo POLY2LINE para converter os polígonos em linhas. As linhas geradas herdam a geometria dos pixels, apresentando um aspecto serrilhado. Para diminuir o serrilhado foi aplicado o algoritmo de suavização SMBOYLE. No *ArcMap* 10.2, os *shapefiles* de linha de costa foram editados manualmente para corrigir eventuais imperfeições na classificação. A Figura 3.5 mostra a aplicação do AWEI em cena Landsat, e a conversão dos resultados para a forma vetorial em linha.

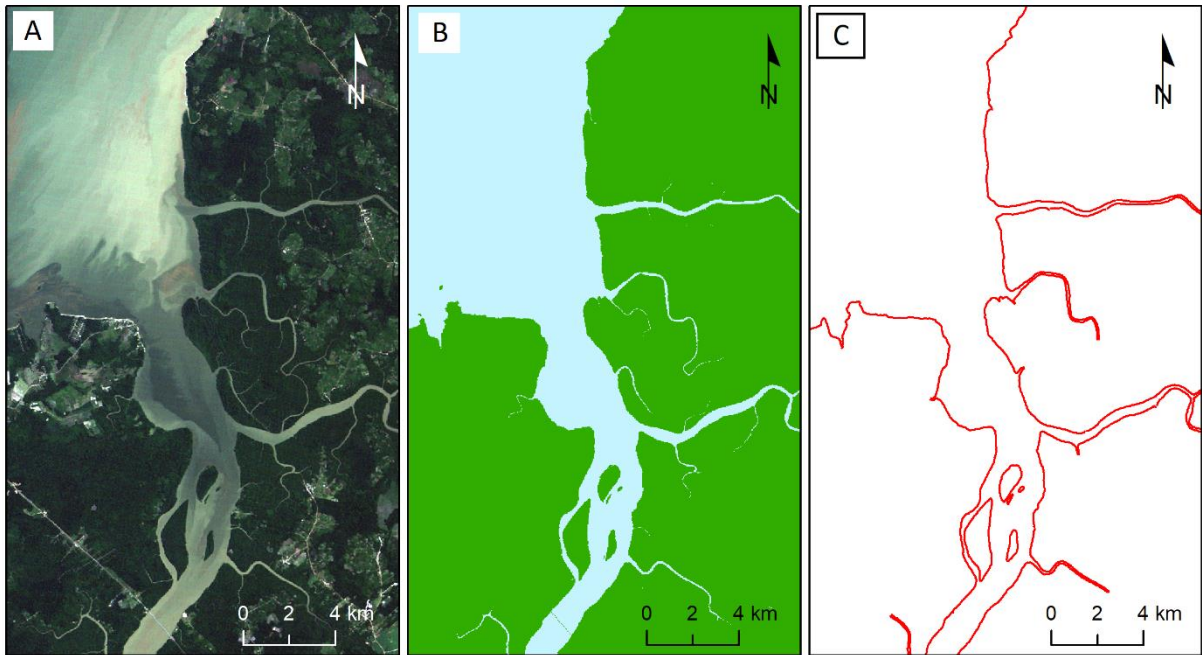


Figura 3.5 Aplicação do AWEI para extração de linha de costa: (A) cena Landsat-5 em composição colorida RGB; (B) aplicação do AWEI, onde a porção verde corresponde a classe não-água ($AWEI=0$), e a porção azul corresponde à classe água ($AWEI > 0$). A posição da linha de costa é considerada como a interface entre as duas classes; (C) Linha de costa no formato vetorial após suavização e edição.

3.4.1.4 *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*

O aplicativo *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* é uma extensão para o *software ArcGis* disponibilizado gratuitamente pela USGS. O aplicativo permite calcular estatísticas de taxa de mudança da linha de costa a partir de uma série temporal de dados vetoriais de linha de costa (Thieler *et al.* 2017). O funcionamento do DSAS consiste na criação de transectos, de tamanho e espaçamento determinado, que interceptam os dados de linha de costa a partir de uma linha base, criando pontos de medição que possibilitam mensurar as alterações entre os períodos analisados (Figura 3.6a). No DSAS, a métrica que possibilita o cálculo da taxa de variação da linha de costa é o *EPR (End point rate)*, que calcula para cada transecto, a distância entre a linha de costa mais antiga e a linha de costa mais nova, e divide esta distância pelo tempo decorrido entre ambas, resultando em uma taxa de variação em m/ano (Figura 3.6b).

A linha de costa mais antiga foi obtida do dado vetorial extraído a partir da cena Landsat-5 de 1984. Já a linha de costa mais nova foi obtida a partir dos dados vetoriais das duas cenas Landsat-8 de 2018. Como ambas as cenas de 2018 têm interferência de nuvem, foi utilizado prioritariamente a cena de 10 de agosto, e os segmentos alterados pela cobertura de nuvens foram substituídos por segmentos inalterados da cena de 26 de agosto. Como requisito de operação do DSAS, os dados vetoriais foram importados pra um arquivo *geodatabase (.gdb)* obedecendo a estrutura definida no Guia do Usuário da versão 4.4 (Thieler *et al.* 2017).

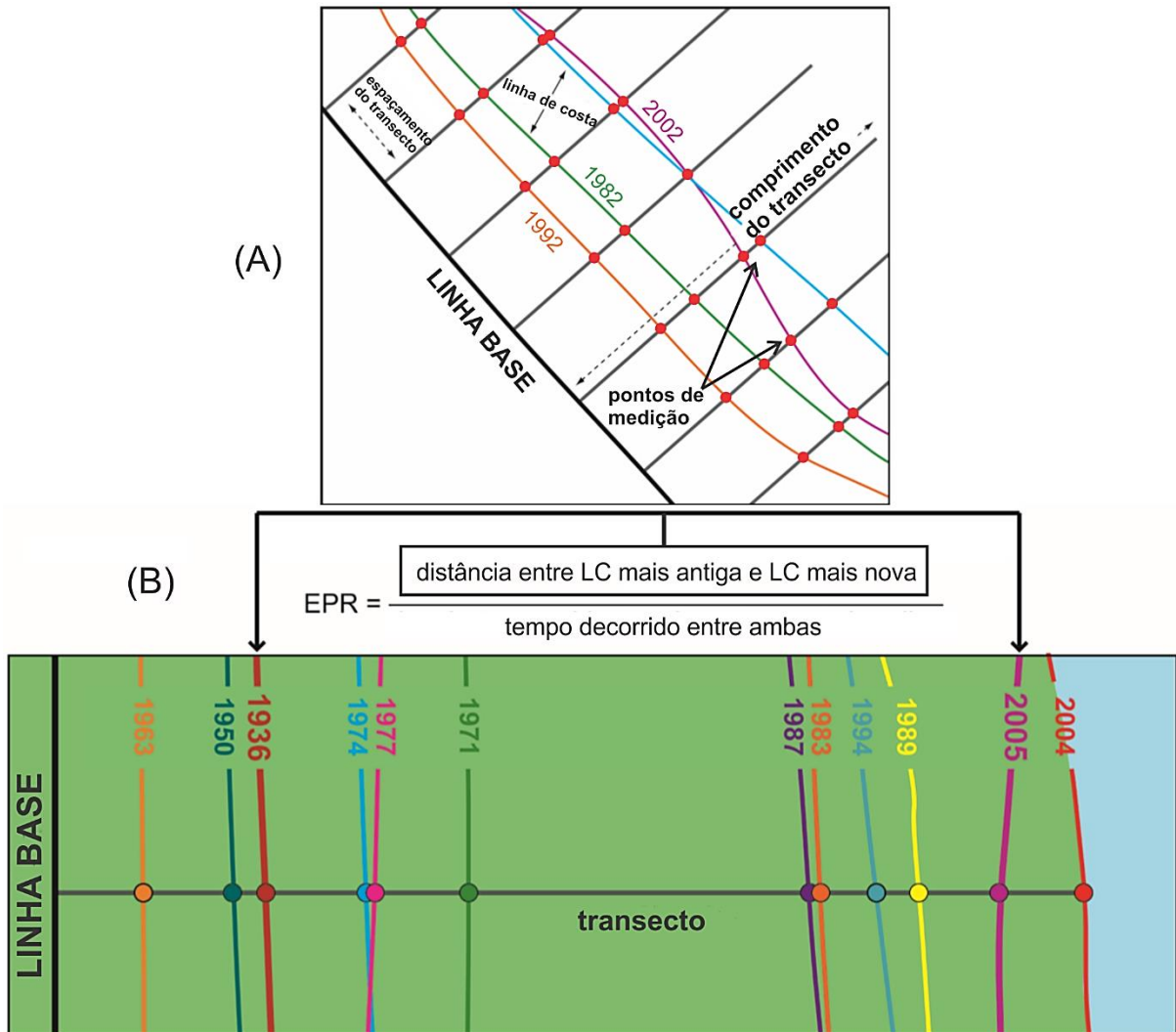


Figura 3.6 Funcionamento do aplicativo DSAS: (A) componentes da análise da variação da linha de costa. A partir da linha base, transectos são gerados cruzando perpendicularmente as linhas de costa. Na interseção entre o transecto e as linhas de costa, são calculadas as distâncias relativas; (B) métrica EPR utilizada no cálculo da taxa de variação da linha de costa. Determina-se a distância entre a linha de costa mais antiga e a linha de costa mais nova, e divide-se a distância pelo tempo decorrido entre ambas. Fonte: Adaptado de Thieler *et al.* (2017) e Himmelstoss *et al.* (2018).

A linha base foi digitalizada manualmente seguindo paralelamente a orientação geral das linhas de costa de 1984 e 2018, para que os transectos gerados cruzem as linhas de costa formando um ângulo próximo à 90°. Os transectos foram gerados automaticamente pelo DSAS, com tamanho determinado de 800 m (distância máxima entre as linhas de costa na área de estudo) e espaçamento de 30m (resolução máxima das cenas Landsat). Executando o cálculo do EPR obteve-se uma tabela com a posição (coordenadas X,Y) da interseção entre as linhas de costa e os transectos, e uma tabela com o valor da taxa calculada em cada transecto. Utilizando a ferramenta *Join Data* do ArcGis 10.5 foi associado os valores EPR tabelados, com a posição de interseção da linha de costa mais nova. Utilizando a ferramenta *Display XY Data*, foram plotados os pontos de interseção com as taxas de variação atribuídas.

Os pontos plotados foram simbolizados de acordo como as classes de vulnerabilidade para a variável “Taxa de variação da linha de costa” propostos na Tabela 3.2. Para representar a linha de costa em uma feição poligonal, foi feito uma um *buffer* de 110m a partir da linha de costa mais nova, e esta foi segmentada manualmente no limite dos intervalos de classificação dos pontos simbolizados. Para cada segmento foi atribuído o valor da classe de vulnerabilidade do intervalo correspondente, gerando segmentos com diferentes graus de vulnerabilidade. A Figura 3.7 mostra uma sequência de quadros com a construção dos segmentos de vulnerabilidade a partir do cálculo do EPR. A partir desses segmentos foi elaborado um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Taxa de variação da linha de costa” (Apêndice A).

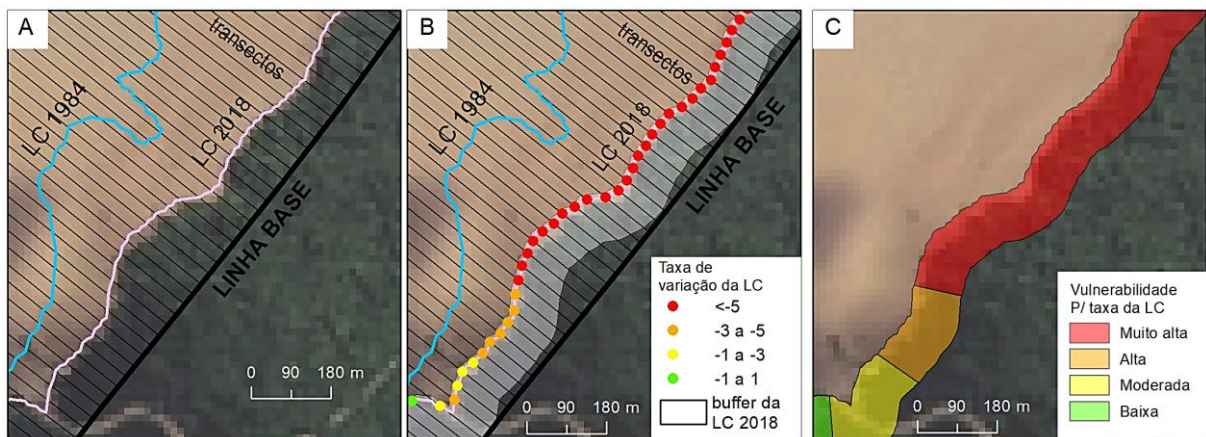


Figura 3.7 Construção dos segmentos de vulnerabilidade a partir do cálculo do EPR: (A) linhas de costa de 1984 e 2018 sobrepostas à cena Landsat-8 de 2018. A partir da linha de base são gerados transectos, espaçados a cada 30m, que interceptam as linhas de costa; (B) após o cálculo do EPR, as taxas são atreladas a posição de interceptação na LC mais nova, e são classificadas nos intervalos de vulnerabilidade. Um buffer da LC mais nova e feito para representar a LC na forma poligonal; (C) o polígono das LC é segmentado a partir dos limites dos intervalos dos pontos, e os segmentos são atribuídos com a denominação das classes de vulnerabilidade.

3.4.2 Declividade

Neste trabalho optou-se por utilizar o modelo digital de elevação ALOS-AW3D30 (Figura 3.8a) em detrimento de modelos digitais como SRTM e ASTER, por ser mais atual e ter melhor ajuste à fisiografia atual nas proximidades da interface terra-água. Possui resolução espacial de 30m e tem maior precisão que os outros modelos digitais de elevação de acesso livre, apresentando precisão altimétrica e planimétrica de 5m (RMS) (Takaku *et al.* 2014). Utilizando a ferramenta *Slope* do ArcGis 10.5 foi calculado a declividade em porcentagem (%) (Figura 3.8b).

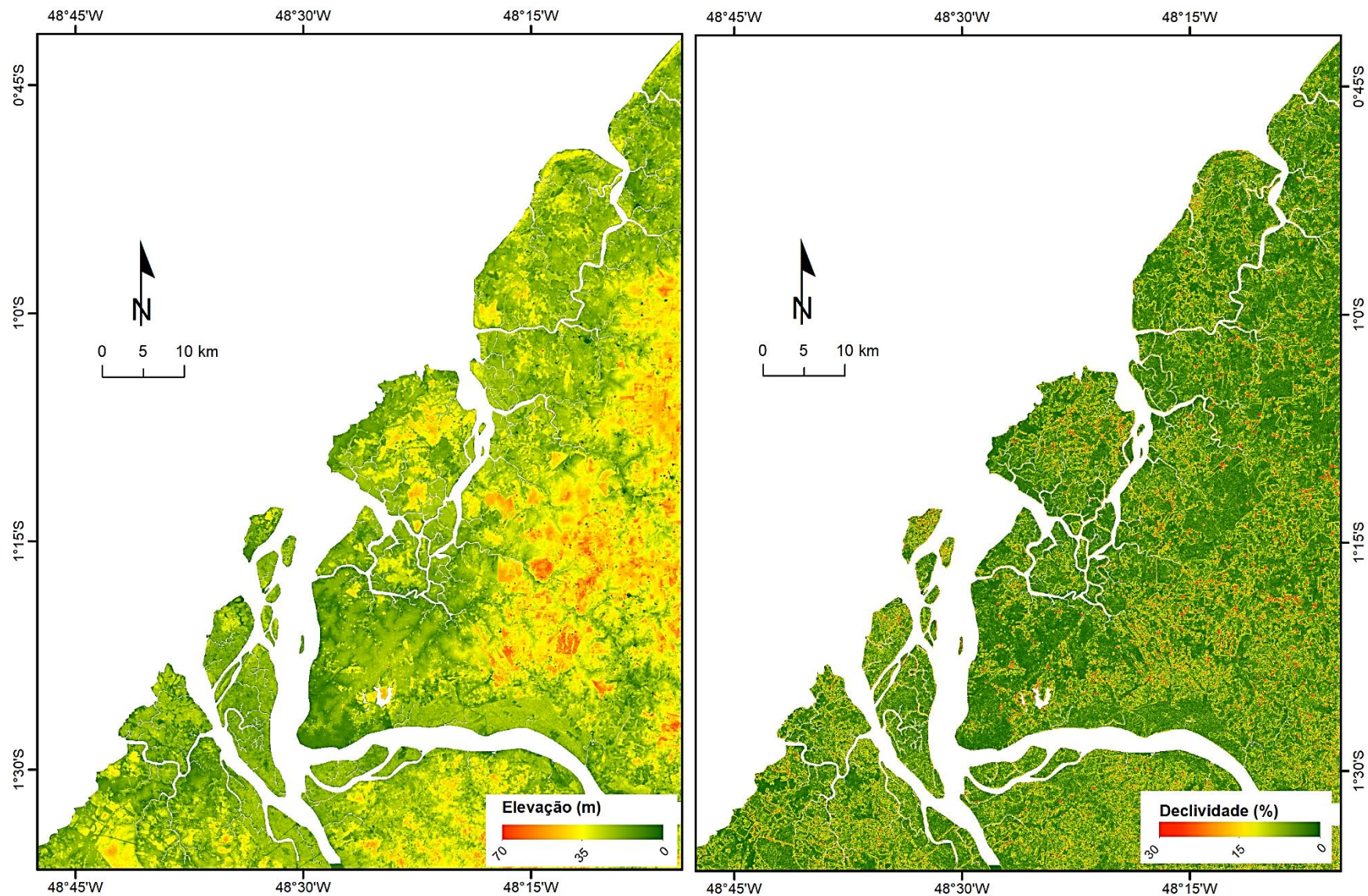


Figura 3.8 (A) Modelo digital de elevação ALOS-AW3D30. (B) Declividade (%) obtida a partir do ALOS-AW3D30.

Utilizando a ferramenta *Reclassify* do ArcGis 10.5 os valores de declividade foram reclassificados seguindo as classes de vulnerabilidade da Tabela 3.2, resultando em um *raster* cujos pixels têm valores entre 1 e 5. Utilizando a ferramenta *Clip*, o *raster* reclassificado foi recortado através do polígono de linha de costa. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Declividade”, contido no Apêndice B.

3.4.3 Habitats

A partir do banco de dados da Carta SAO FZA19 (IEPA 2017) foram adaptadas as tipologias de “Habitats” agrupando-as em categoriais mais abrangentes, como mostra a Figura 3.9a. As denominações de “Habitats” da Figura 3.9 foram classificadas quanto a vulnerabilidade a partir dos critérios da Tabela 3.2. Os tipos “Tabuleiro costeiro e colinas” e “Manguezal” foram classificados com valor de vulnerabilidade 3. O tipo “Barra de rio/Margem de rio/Terraços” foi classificado com valor de vulnerabilidade 4. Os tipos “Banco de areia”, “Planície de maré”, “Praias” e “Área urbana/Estrutura artificial” foram classificados com valor de vulnerabilidade 5. A partir dessa classificação, o polígono de linha de costa foi segmentado nos limites entre as tipologias, e para cada segmento foi atribuído o valor da vulnerabilidade. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Habitats”, contido no Apêndice C.

3.4.4 Litologia

A partir do Mapa Geológico de Estado do Pará (Vasquez *et al.* 2008), quatro unidades litológicas foram identificadas para a área de estudo (Figura 3.9b), e estas foram classificadas quanto a vulnerabilidade a partir dos critérios da Tabela 3.2. A unidade “Grupo Barreiras”, caracterizada por argilitos, arenitos e conglomerados (Vasquez *et al.* 2008), foi classificada com valor de vulnerabilidade 3. As unidades “Sedimentos pós-barreiras”, “Depósitos aluvionares” e “Depósitos litorâneos”, são no geral caracterizadas por sedimentos inconsolidados na fração granulométrica tamanho areia ou inferior, podendo ocorrer cascalho nos depósitos aluvionares (Vasquez *et al.* 2008). Essas unidades foram classificadas com valor de vulnerabilidade 5. Com as unidades classificadas quanto a vulnerabilidade, o polígono de linha de costa foi segmentado nos limites entre as tipologias, e para cada segmento foi atribuído o valor da vulnerabilidade. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Litologia”, contido no Apêndice D.

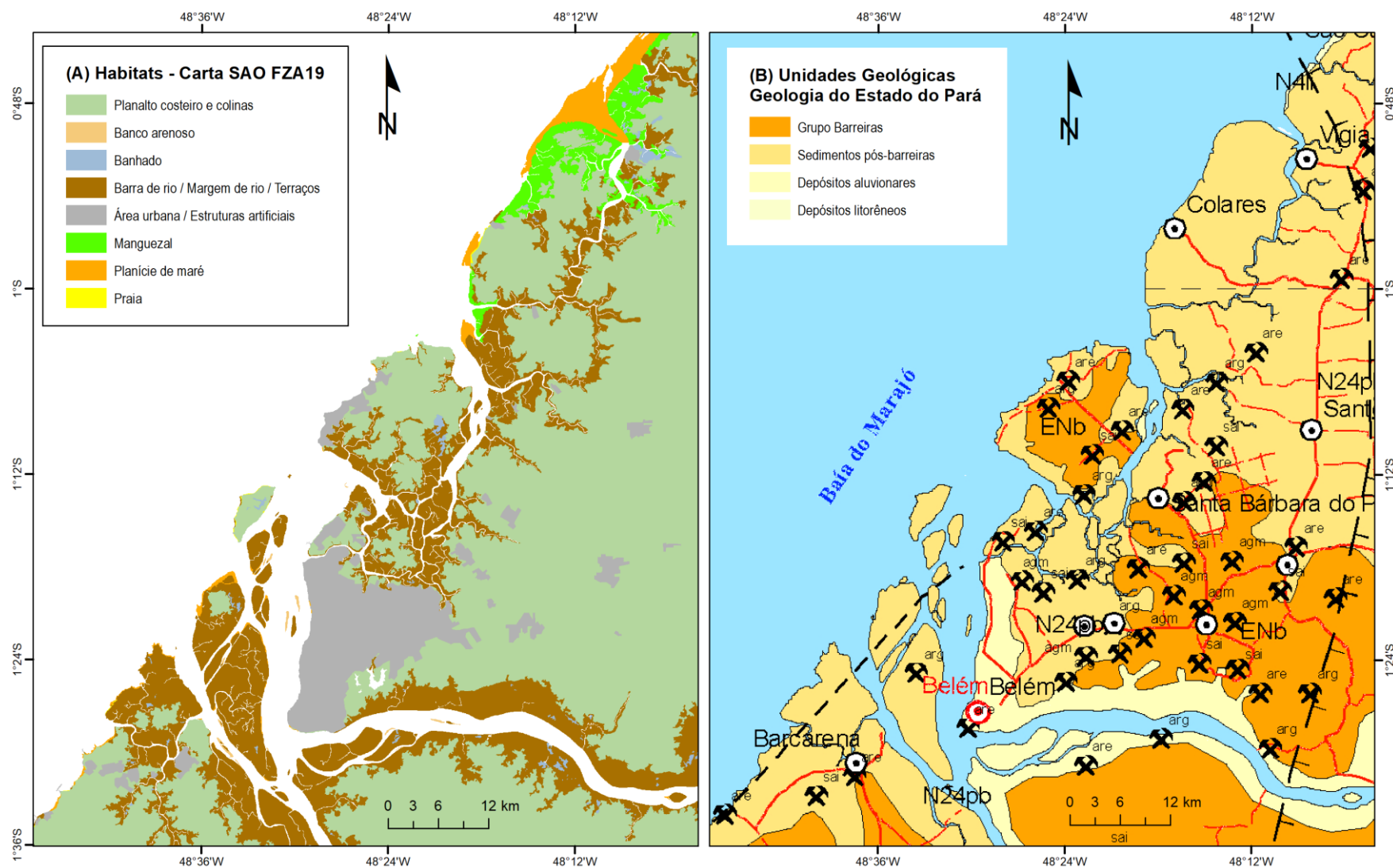


Figura 3.9 Tipos de Habitats e Litologias utilizados na classificação de vulnerabilidade: (A) Habitats obtidos a partir do banco de dados do Projeto Carta SAO da Foz do Amazonas – Carta Tática FZA19 (1:150.000). Fonte: Modificado de IEPA (2017); (B) Unidades geológicas obtidas a partir do Mapa Geológico do Estado do Pará (1:1.000.000). Fonte: Vasquez *et al.* (2008).

3.4.5 Amplitude de maré, Altura máxima de onda e Velocidade máxima de corrente

Dados para compor as variáveis “Amplitude de maré”, “Altura máxima de onda” e “Velocidade máxima de corrente”, foram obtidos inicialmente a partir dos dados de circulação oceânica da Carta SAO FZA19 (IEPA 2017), expressos na Figura 3.10.

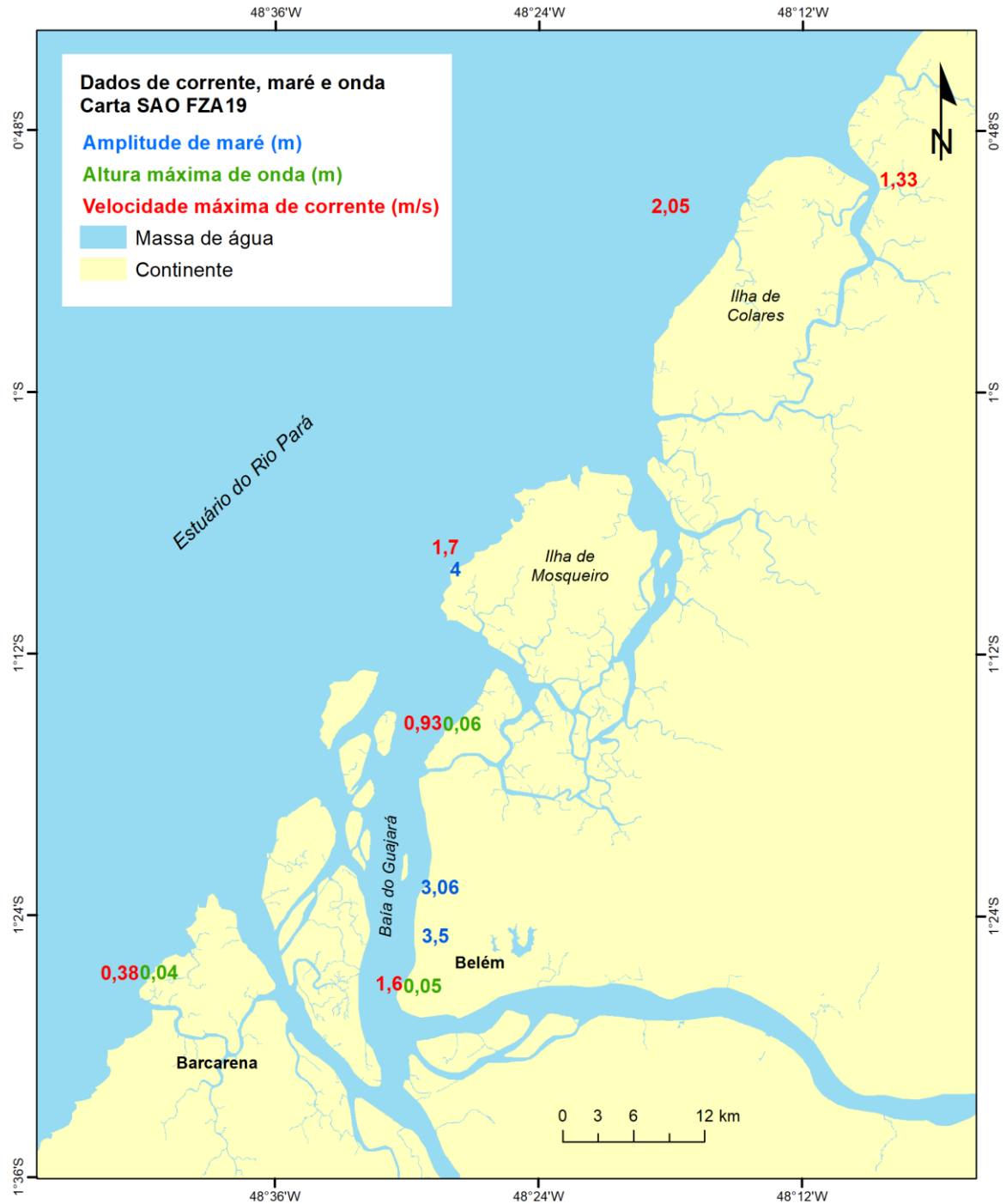


Figura 3.10 Dados de corrente, maré e onda para a Região do Estuário do Rio Pará. Fonte: Banco de dados do Projeto Carta SAO Foz do Amazonas (IEPA 2017.)

Na zona costeira do Estuário do Rio Pará ocorrem macromarés nas regiões mais próximas a costa oceânica, e mesomarés nas regiões de mais internas do estuário. Os dados oceanográficos da Carta SAO FZA19 mostram influência de macromaré na Ilha de Mosqueiro, e internamente, na Baía do Guajará, ocorrem mesomarés (Figura 3.10). Baseado na classificação de vulnerabilidade para a variável “Amplitude de maré” da Tabela 3.2, amplitudes entre 2m e 4m tem valor de vulnerabilidade 3, e amplitudes entre 4m e 6m tem valor de vulnerabilidade 4. Os segmentos de costa entre a Ilha de Mosqueiro e a costa oceânica foram considerados sob influência de macromaré e classificados com valor de vulnerabilidade 4. Para os segmentos de linha de costa anteriores à Ilha de Mosqueiro, nas porções mais internas do Estuário, foram considerados sob influência de mesomarés e classificados com valor de vulnerabilidade 3. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Amplitude de maré”, contido no Apêndice E.

A Figura 3.10 mostra que as velocidades de corrente podem variar entre 0,38 m/s nas costa norte do município de Barcarena, e 2,05 m/s nas proximidades das Ilha de Colares. El-Robrini *et al.* (2018) referem-se a correntes de maré na costa de Barcarena que podem chegar a velocidades de até 1,1 m/s em marés de sizígia. Na Baía do Guajará são registradas correntes de maré com velocidades máximas entre 1,24 m/s e 1,74 m/s (Souza 2006, Böck 2010, IEPA 2017, El-Robrini *et al.* 2018). Próximo à Ilha de Mosqueiro, são registradas velocidades máximas de corrente entre 1,7m/s e 2,1 m/s (IEPA 2017, Pinheiro 1987 *apud* El-Robrini *et al.* 2018). Na Ilha de Colares ocorrem velocidades máximas de corrente na ordem de 2,05 m/s, e nos canais de maré internos podem chegar a 1,33 m/s (IEPA 2017). A composição dos dados mostra que, de forma generalista, velocidades máximas de corrente de maré na região do Estuário do Rio Pará podem ser superiores da 1 m/s, que na classificação de vulnerabilidade da Tabela 3.2 é atribuído valor 5. Dessa forma, determinou-se que os seguimentos de linha de costa no geral apresentam vulnerabilidade muito alta. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Velocidade máxima de corrente”, contido no Apêndice F.

Os dados de altura de onda da Carta SAO FZA19 são muito baixos e discrepantes de dados relatados na literatura (Figura 3.10). Segundo El-Robrini *et al.* (2018), no setor Continental Estuarino (ver Figura 2.4) as ondas têm predominância de incidência N-NE com altura máxima de onda na ordem de 1,51 m. Segundo os mesmos autores, a costa da Ilha de Mosqueiro caracteriza um sistema relativamente tranquilo com ondas de até 0,3m de altura. De acordo com Pinheiro (1987 *apud* El-Robrini *et al.* 2018), na Baía de Guajará as ondas quebram com altura de até 1m. Na falta de dados sistemáticos de altura de onda, adotou-se um valor médio de altura máxima de onda de 1m para os seguimentos de linha de costa da área de estudo.

Desta forma, foi atribuído valor 3 para os seguimentos na classificação de vulnerabilidade. O produto final gerou um mapa temático de vulnerabilidade para a variável “Altura máxima de onda”, contido no Apêndice G.

3.4.6 Determinação dos coeficientes de ponderação

A determinação dos coeficientes de ponderação consiste na atribuição de pesos para cada variável analisada, determinando sua importância relativa no cálculo do Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVEC). Para mesurar o valor dos coeficientes foi utilizado método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) criado por Saaty (1977). O método AHP consiste na criação de uma escala de preferência entre os elementos disponíveis, empregando um procedimento de comparação par a par entre os elementos de decisão e classificando-os de acordo com a sua importância relativa. Os elementos são comparados entre si utilizando uma escala de valores de importância que variam de 1 (igual importância) à 9 (Extrema importância), como mostra a Tabela 3.5.

Tabela 3.5 A escala fundamental de intensidade de importância de Saaty (1977, 1987).

INTENSIDADE DA IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Igual importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada de um sobre o outro	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em detrimento da outra.
5	Grande importância ou importância essencial	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre outra.
7	Importância muito grande	Uma atividade é fortemente favorecida em detrimento da outra; sua dominância é demonstrada na prática.
9	Extrema importância	A evidência que favorece uma atividade em detrimento da outra é da mais alta ordem possível de afirmação.
2,4,6,8	Valores intermediários entre níveis de importância adjacentes	Quando procura-se uma condição de compromisso entre duas definições.
Princípio da reciprocidade	Quando uma atividade <i>i</i> recebe uma das designações acima quando comparada com <i>j</i> , então <i>j</i> terá valor recíproco quando comparado com <i>i</i> .	Uma suposição razoável.

A partir da escala de importância relativa de Saaty, construiu-se uma matriz de comparação par-a-par (Tabela 3.6) para as variáveis que compõem o IVEC, obtendo os seguintes valores de importância relativa:

Tabela 3.6 Matriz de importância relativa para as variáveis que compõem o IVEC. LTL – Litologia, DCV – Declividade, HBT – Habitats, TLC – Taxa de variação da linha de costa, AMO – Altura máxima de onda, VMC – Velocidade máxima de corrente, APM – Amplitude de maré.

VARIÁVEIS IVEC	LTL	DCV	HBT	TLC	AMO	VMC	APM
LTL	1	1/3	1/2	1/7	3	2	5
DCV	3	1	1/3	1/7	3	2	5
HBT	2	3	1	1/5	2	3	5
TLC	7	7	5	1	8	7	9
AMO	1/3	1/3	1/2	1/8	1	1/3	5
VMC	1/2	1/2	1/3	1/7	3	1	5
APM	1/5	1/5	1/5	1/9	1/5	1/5	1

Algumas considerações devem ser feitas sobre a Tabela 3.6 e os valores relativos que a compõe. Diferentemente de outros trabalhos, como por exemplo Yin *et al.* (2012), Murali *et al.* (2013) e Busman (2016), neste trabalho a variável “Taxa de alteração da linha de costa” foi considerada a de maior importância dentre as demais, pois traduz o comportamento da costa, e seu recuo ou avanço são reflexos das demais variáveis analisadas. Além disso, esta variável foi obtida através de uma análise quantitativa, e dentre as outras, é a que apresenta maior variabilidade e conseqüentemente apresenta diferentes cenários de vulnerabilidade. A variável “Habitats” foi considerada a segunda variável de maior importância, pois distingue as fisiografias da área de estudo, além de incluir áreas urbanas e estruturas artificiais. As variáveis “Declividade” e “Litologia” tem importâncias similares, pois tanto o tipo de rocha ou sedimento quanto a declividade dos corpos são determinantes para a vulnerabilidade à erosão, porém a variável “Declividade” foi considerada de importância ligeiramente maior pois tem influência direta nos efeitos de ondas, correntes e marés.

A matriz da Tabela 3.6 foi normalizada, a partir da divisão de cada valor da variável pelo total da sua coluna. Para determinar os pesos, Saaty (1977) utiliza os conceitos e cálculos de valor próprio (*Eigenvalues*) e vetor próprio (*Eigenvectors*), utilizados para extração dos pesos (vetores de prioridades) a partir de uma matriz de comparação de critérios par-a-par (Saaty 1977, Rocha 2016). Para otimizar o cálculo dos valores e vetores próprios, assim como determinar a acurácia do modelo, foi utilizado o módulo AHPcalc para EXCEL 2016, desenvolvido por Goepel (2013). A partir do módulo AHPcalc obteve-se os pesos para cada variável e a Razão de Consistência do modelo, cujo valor não pode ser maior que 10% (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 Pesos e Razão de Consistência obtidos pela análise AHP para as variáveis do IVEC.

VARIÁVEL DO IVEC	PESO
Litologia	8,8%
Declividade	11,8%
Habitats	15,6%
Taxa de variação da linha de costa	49,3%
Altura máxima de onda	5,1%
Velocidade máxima de corrente	7,2%
Amplitude de maré	2,2%
Razão de Consistência (RC) – deve ser menor que 10%	RC = 9,6%

3.4.7 Cálculo do Índice de Vulnerabilidade à erosão Costeira (IVEC) e Tendência de Risco

A maioria dos índices de vulnerabilidade costeira são calculados pela raiz quadrada do produto das variáveis dividido pelo número de variáveis (ver Equação 2.1). Gornitz *et al.* (1997) apresentam seis equações para cálculo do IVC, e avalia a sensibilidade de cada uma delas em eventuais mudanças nas variáveis envolvidas. Os autores determinaram que a soma das variáveis multiplicadas por coeficientes apresenta melhores resultados (Gornitz *et al.* 1997). O método da soma ponderada, obtendo coeficientes a partir do AHP, foi utilizado por Yin *et al.* (2012), Murali *et al.* (2013) e Rocha (2016). Neste trabalho foi adotado o método da soma ponderada, e desta forma, utilizando os pesos determinados na Tabela 3.7. O Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVEC) foi calculado a partir da Equação 3.1:

$$IVEC = 0,5A + 0,15B + 0,13.C + 0,08.D + 0,07.E + 0,05.F + 0,02.G \quad (3.1)$$

onde A = Taxa de variação da linha de costa, B = Habitats, C = Declividade, D = Geologia, E = Velocidade máxima de corrente, F = Altura máxima de onda e G = Amplitude de maré.

Os valores obtidos com o cálculo do IVEC podem variar de 1 a 5, e esses valores são divididos em cinco partes iguais, que são classificadas em escala de vulnerabilidade (muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto).

Para o cálculo da Tendência de risco, adotou-se os princípios de Coelho (2005) e Murali *et al.* (2013) que definem o risco pela relação direta dos parâmetros de vulnerabilidade física com os parâmetros de exposição (ou vulnerabilidade econômica). Coelho (2005) relaciona os dois fatores através de uma matriz de risco (ver Figura 2.5c), e Murali *et al.* (2013) obtém a vulnerabilidade final a partir da média dos fatores. Neste trabalho obteve-se os valores de

Tendência de Risco a partir da média entre o IVEC e a Classificação de Exposição, como mostra a Equação 3.2:

$$Tendência\ de\ risco = \frac{IVEC+CE}{2} \quad (3.2)$$

onde, *IVEC* = valores obtidos no cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira, e *CE* = valores obtidos na Classificação da Exposição (ver Tabela 3.3 e Apêndice H).

3.4.8 Produção de Mapas Temáticos

Os cálculos do IVEC e da Tendência de Risco foram executados através da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGis 10.5. Para isso, os dados vetoriais finais de vulnerabilidade e da classificação da exposição foram convertidos para *raster* através da ferramenta *Polygon to Raster*, com os dados de saída com resolução de 5m para que os limites entre feições tenham uma definição razoável. O produto final gerou o “Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira para a região do Estuário do Rio Pará” e “Mapa de Tendência de Risco à Erosão Costeira para a região do Estuário do Rio Pará”, que constam nos Apêndice I e J, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (Apêndice I) e o Mapa de Tendência de Risco à Erosão Costeira (Apêndice J) mostram a distribuição espacial dos resultados da análise de vulnerabilidade e risco para a região do Estuário do Rio Pará. Em complemento, as Figuras 4.1 e 4.2 mostram uma síntese da quantificação das classes de vulnerabilidade e risco nos segmentos de linha de costa analisados. Os segmentos foram analisados considerando os limites territoriais dos municípios que compõem a área de estudo. Os segmentos analisados não correspondem à totalidade da extensão costeira dos municípios, então estimou-se o percentual de costa analisada para cada município. Esta estimativa foi calculada dividindo a extensão total dos segmentos analisados (em km) pela extensão total (em km) da interface terra-água em cada município.

Os resultados serão apresentados de acordo com as similaridades entre os municípios. Belém e Barcarena serão analisadas individualmente devida a maior extensão e importância na região. E seguida a costa dos municípios de Colares e Vigia são analisadas conjuntamente, assim como os municípios interiores ao eixo principal do Estuário do Rio Pará (Ananindeua, Benevides, Marituba, Santa Bárbara do Pará, Santo Antônio do Tauá e Acará). Para validar o estudo, buscou-se relacionar os resultados da análise com ocorrências de erosão registrados na literatura.

4.1 BELÉM

Dentre os municípios analisados, Belém apresenta o maior percentual de linha de costa analisada (cerca de 70%), e por isso resultados obtidos têm maior representatividade. No município predominam costas de baixa e moderada vulnerabilidade à erosão, com alguns segmentos apresentando vulnerabilidade alta (ver Apêndice I).

Os segmentos de baixa vulnerabilidade compreendem cerca de 48% dos segmentos analisados, o que corresponde a aproximadamente 154 km de costa. Estas regiões estão concentradas nas costas sudoeste, sul e leste da Ilha de Mosqueiro, na costa interna da Ilha de Caratateua, e parte das costas das demais ilhas que compõem o município – Ilha de Cotijuba, Ilha Longa, Ilha Jararaca, Ilha Jararaquinha, Ilha Mirin, Ilha Paquetá Açú, Ilha Jutuba e Ilha do Cumbu. A classificação de vulnerabilidade baixa atribuída a esses segmentos deve-se principalmente à característica estável ou progradante da costa (ver Apêndice A). Por exemplo, parte da costa sul da Ilha Paquetá-Açú tem caráter progradante, onde podem ocorrer pontos de acreção com taxas de até 16m/ano (Figura 4.3).



Figura 4.1 Síntese dos resultados obtidos na análise da Vulnerabilidade e Tendência de Risco à Erosão Costeira (percentagem da linha de costa analisada).

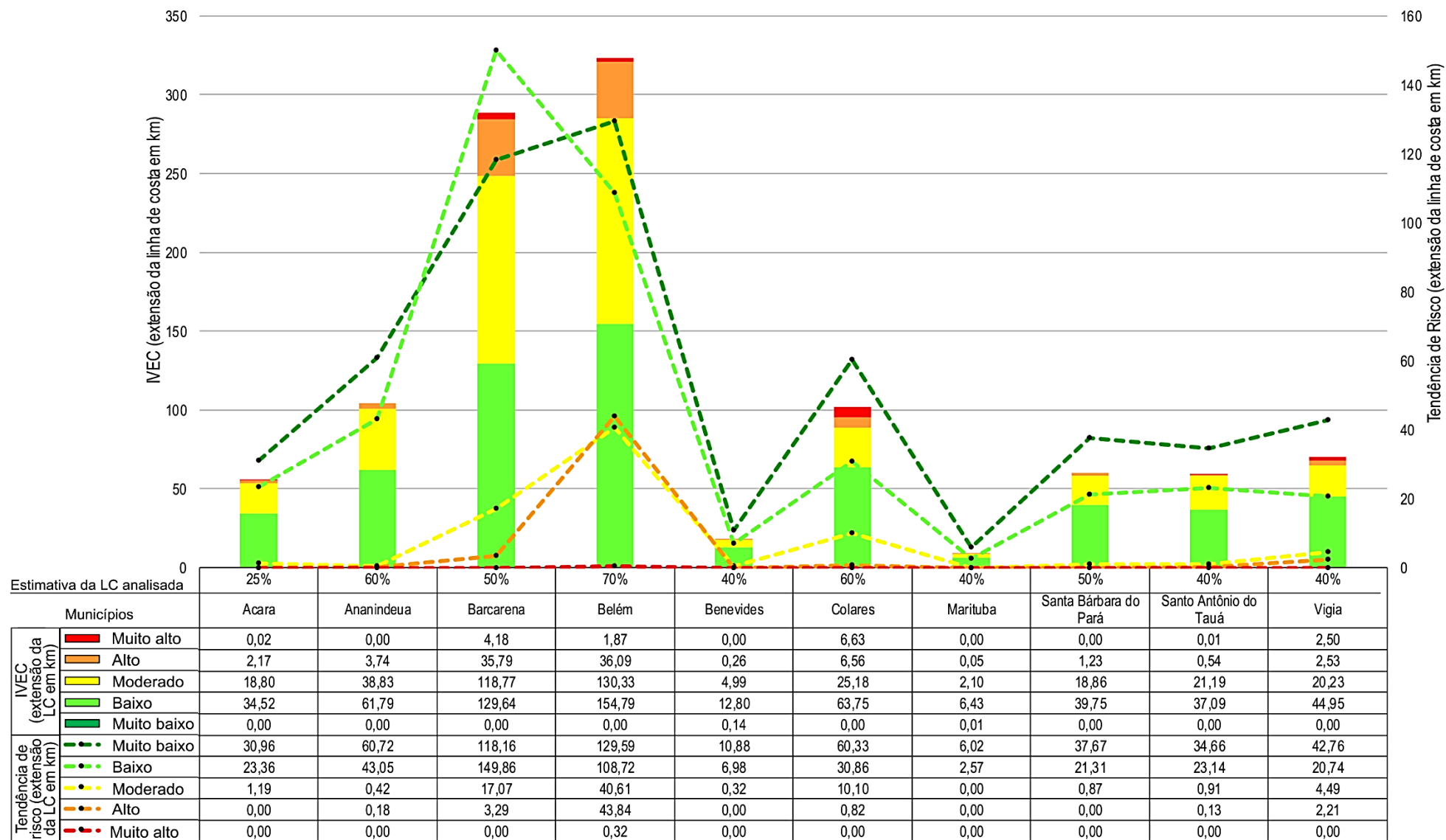


Figura 4.2 Síntese dos resultados obtidos na análise da Vulnerabilidade e Tendência de Risco à Erosão Costeira (extensão da linha de costa analisada).



Figura 4.3 Segmentos costeiros de Belém com vulnerabilidade à erosão baixa. Parte da costa sul da Ilha de Paquetá-Açu apresenta caráter progradante, com taxas de acreção entre 10 m/ano e 16 m/ano. A posição relativa das linhas de costa de 1984 e 2018 mostra o avanço da costa.

Os segmentos de moderada e alta vulnerabilidade somam cerca de 51% dos segmentos analisados, o que corresponde à aproximadamente 166 km de costa. Estes valores classificam o município de Belém como o de maior extensão de costa em situação de vulnerabilidade moderada à alta. Estas regiões concentram-se ao longo das costas oeste e noroeste das ilhas citadas, e ao longo da costa oeste da zona urbana de Belém (margem leste da Baía do Guajará). A classificação de vulnerabilidade moderada à alta atribuída a esses segmentos deve-se em parte à uma tendência de retrogradação moderada da linha de costa, com taxas de erosão entre 1 m/ano e 3 m/ano (ver Apêndice A). Outro fator determinante é que essas regiões são caracterizadas por praias arenosas, áreas urbanas e estruturas artificiais, determinando grau muito alto de vulnerabilidade para a variável “Habitats” (ver Apêndice C).

Apesar da grande extensão de linha de costa apresentando vulnerabilidade moderada à alta, cerca de 73% dos segmentos analisados apresentam grau de risco à erosão entre muito baixo e baixo, o que corresponde à cerca de 137 km de costa (ver Apêndice J). Isso deve-se ao fato de que grande parte dos segmentos de costa compreendem margem de ilhas e canais de maré, que por sua vez são pouco habitadas (com exceção de parte das ilhas de Mosqueiro, Caratateua e Cotijuba). A partir de análise dos dados da Grade Estatística (IBGE, 2016) estima-se que cerca de 84% dos segmentos de linha de costa de Belém apresentam densidades populacionais inferiores a 100 habitantes por km². A costa nordeste da Ilha do Cumbu exemplifica a relação vulnerabilidade-risco, onde apesar de ter grau de vulnerabilidade

moderado à alto, apresenta risco muito baixo, pois a probabilidade de dos efeitos da erosão causarem danos ou prejuízos é muito menor devido ao baixo grau de povoamento (Figura 4.4).

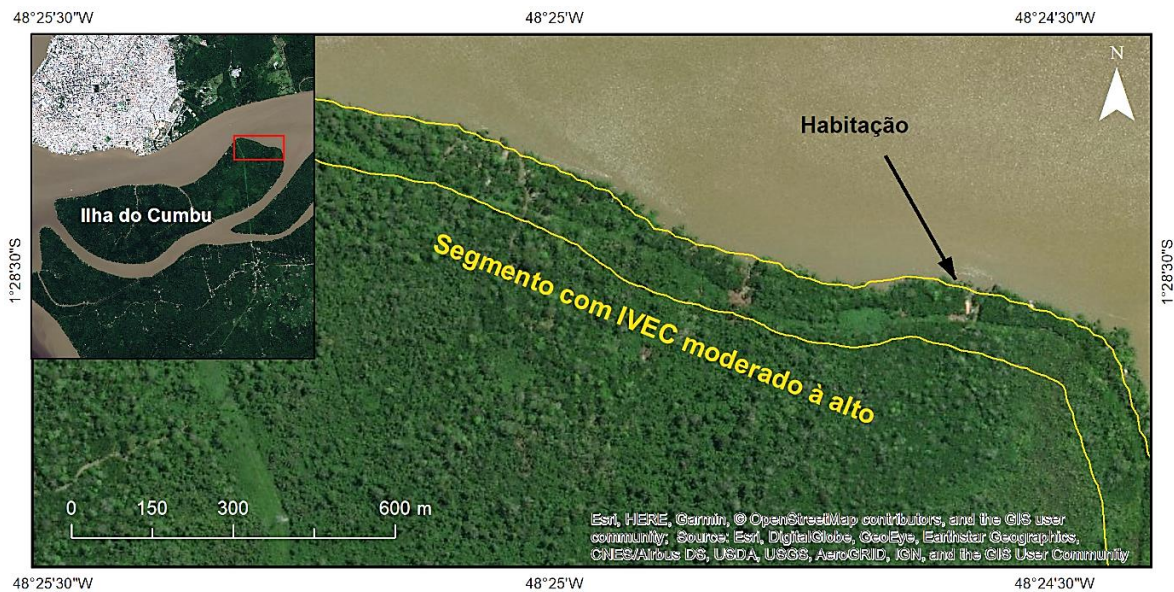


Figura 4.4 Relação vulnerabilidade-risco na costa nordeste da Ilha do Cumbu. No cálculo do IVEC, o segmento de costa é classificado com grau moderado à alto de vulnerabilidade à erosão, porém devido à baixa densidade populacional, a Tendência de Risco foi classificada com grau muito baixo.

Em contrapartida, o município de Belém apresenta a maior extensão de linha de costa (aproximadamente 84 km) apresentando tendência de risco moderado à alto, e o segundo maior percentual (carca de 26%) de segmentos nessas condições. Essas áreas estão concentradas ao longo da margem leste da Baía do Guajará e Rio Guamá (zona urbana de Belém), parte da costa oeste da Ilha de Caratateua, as costas oeste e noroeste da Ilha do Mosqueiro, e as costas sul e noroeste da Ilha de Cotijuba (ver Apêndice J). Isso deve-se principalmente a presença de áreas urbanas com alta densidade populacional, ocorrência estruturas artificiais, praias e áreas turísticas. Há farto registros na literatura jornalística sobre o fenômeno de erosão na zona costeira do município de Belém, com destaque para a Ilha de Mosqueiro e Ilha de Caratateua.

As Ilhas de Mosqueiro e Caratateua são as maiores e mais populosas do município de Belém, e as costas oeste e sudoeste dessas ilhas estão sob ação de intensos processos erosivos. Estas costas são caracterizadas por um alinhamento de falésias afeiçãoadas pela erosão, que formam uma sequência de enseadas e promontórios expostos a energia de ondas e maré (Igreja *et al.* 1990). Para as praias da Ilha de Mosqueiro, os segmentos de costa apresentam tendência de risco moderada à alta. Isto deve-se tendência retrogradante da linha de costa, com taxas de erosão de até 2 m/ano. Somado a isso, há a alta vulnerabilidade das praias arenosas e falésias, além alta concentração populacional e atividades ligadas ao turismo. A ação da erosão nas praias da Ilha de Mosqueiro produz a queda de barrancos e recuo da linha de falésias, e com

isso a destruição de estruturas como muros de contenção, calçamento e edificações residenciais (Figura 4.5).



Figura 4.5 Efeitos da erosão em praias da Ilha de Mosqueiro: (A) Barreiras de concreto na orla da praia do Marau; (B) Colapso de falésia e desmoronamento de trecho da avenida Beira Mar, na Praia Grande. Residências em situação de alto risco de desmoronamento. Fonte: A - Neves & França (2016). B - Diário Online Pará (2019).

Recentemente uma série de obras foram implementadas pelo município para tentar conter o problema da erosão em dez praias da Ilha de Mosqueiro, prevendo a construção de muros de arrimo, calçadas e reconstrução de taludes, com um custo previsto de R\$ 23 milhões (Folha da Ilha 2019) (Figura 4.6). A fisiografia da Ilha de Mosqueiro mostra como a costa é naturalmente vulnerável à ação dos agentes de erosão, e a ocupação desordenada agrava o processo e expõe parte da população aos impactos decorrentes do processo erosivo.



Figura 4.6 Obras de contenção da erosão na praia do Paraiso, Ilha de Mosqueiro. Foi previsto a construção de 600m de muros de arrimo para conter o desmoronamento das falésias baixas e consequentemente a destruição dos imóveis sobrejacentes. Obras similares ocorrem em outras nove praias ao longo da costa. Fonte: Agência Belém de Notícias (2019).

Na Ilha de Caratateua ocorrem problemas similares aos da Ilha de Mosqueiro, onde parte da costa está sendo intensamente erodida, causando danos à estrutura física da orla e pondo em risco as habitações adjacentes. Na análise foi identificado que o segmento de costa entre as praias da Brasília e Belo Paraíso (trecho de cerca de 5 km) apresentam risco moderado à alto.

Esta porção da costa é composta por falésias em processo de erosão, que são intensificados pelas forçantes oceanográficas e pela ocupação desordenada (Figura 4.7). Segundo Araújo-Júnior & Azevedo (2013), o processo erosivo de falésias na Praia da Brasília é acelerado pelo uso e ocupação desordenada, onde há construção de casas e estabelecimentos comerciais diretamente no topo das falésias. A construção de edificações nas proximidades das escarpas, removem a vegetação e contribui para a desestabilização das vertentes.

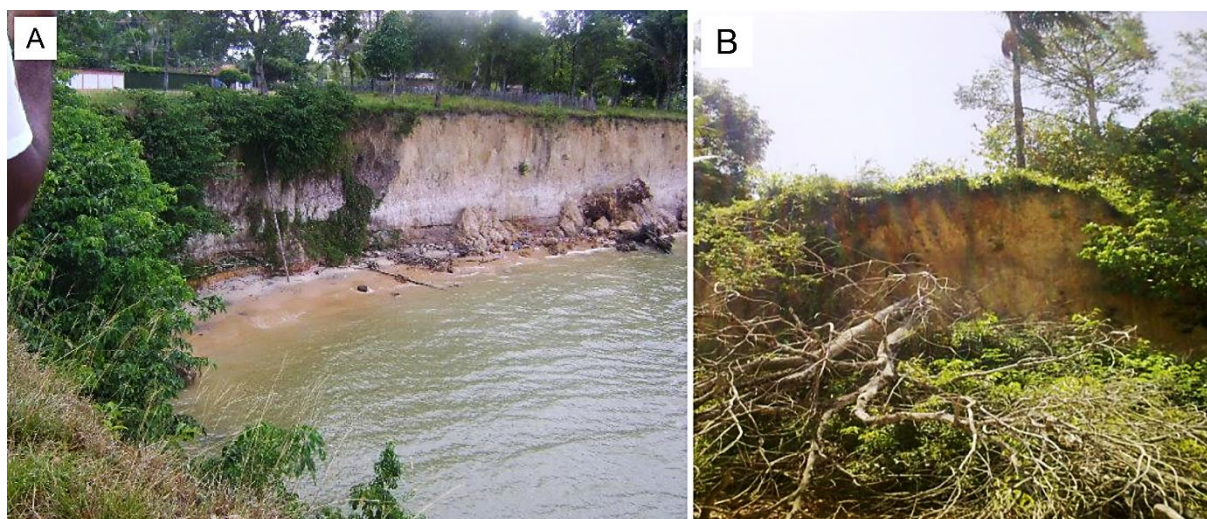


Figura 4.7 Erosão costeira na Ilha de Caratateua: (A) Erosão de falésia na Praia da Brasília. No sopé da encosta há blocos e cobertura vegetal caídos pelo desmonte da falésia, e sobre topo há ocorrência de edificações, que nessas condições estão sob situação de risco; (B) Queda da vegetação em consequência do desmonte de falésia, Praia da Brasília. Fonte: Pimentel *et al.* (2012).

4.2 BARCARENA

Para o município de Barcarena, cerca de 50% dos segmentos de linha de costa foram analisados. Este percentual é devido aos vários canais de maré e fluviais de menor ordem, principalmente nas ilhas do município, que não foram analisados. O município de Barcarena é o que apresenta maior percentual dos segmentos analisados classificados com vulnerabilidade moderada à alta, porém grande parte desses segmentos apresentam risco baixo e muito baixo (ver Apêndice I e J).

Assim como no município de Belém, os segmentos de baixa vulnerabilidade compreendem cerca de 45% dos segmentos analisados, o que corresponde à uma linha de costa de aproximadamente 130 km. Estas regiões estão concentradas nas costas norte e leste da Ilha

Arapiranga, nas costas sul e noroeste da Ilha das Onças, e o restante encontra-se difundido nos canais de maré das ilhas e da porção continental, ao sul da Ilha Carnapijó, ao longo das margens do Furo do Arrozal (com exceção da porção que compreende a sede do município).

A atribuição de vulnerabilidade baixa para esses segmentos deve-se principalmente à característica estável ou progradante da costa nestas regiões (ver Apêndice A). Grande parte desses segmentos apresentam taxas de acreção entre 0,5 m/ano e 2,5 m/ano, com alguns segmentos apresentando forte tendência progradacional. As áreas mais significativas são os segmentos da costa norte da Ilha Arapiranga (Figura 4.8) e costa noroeste da Ilha das Onças, que podem apresentar taxas de acreção de até 19 m/ano. Enquanto algumas regiões enfrentam problema da perda de orla por efeito da erosão, áreas como essas vêm crescendo massa continental ao território do município, através da expansão e consolidação de bancos de areia que se transformam em ilhas vegetadas.

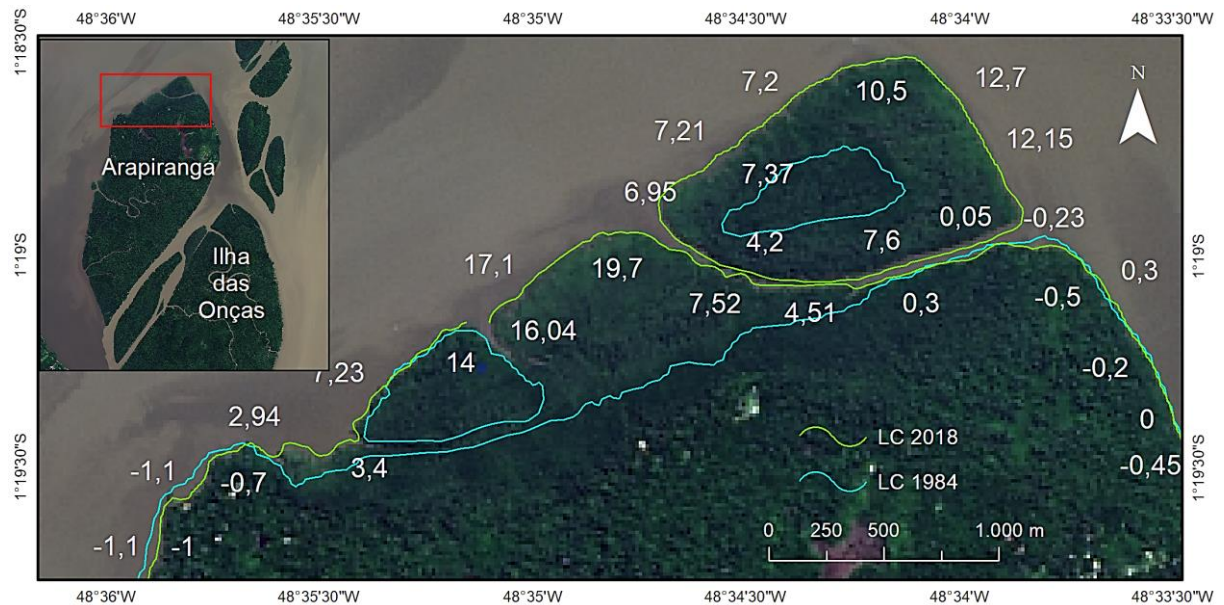


Figura 4.8 Segmentos costeiros do município de Barcarena com vulnerabilidade à erosão baixa. A costa norte da Ilha Arapiranga apresenta caráter progradante, com taxas de acreção de até 19 m/ano. Entre 1984 e 2018, o núcleo de bancos de areias vegetados se expandiram e foram anexados a costa da ilha. A posição relativa das linhas de costa mostra as alterações no período.

Os segmentos de moderada e alta vulnerabilidade somam cerca de 53% dos segmentos analisados, o que corresponde à aproximadamente 154 km de costa. Desta forma, Barcarena apresenta o maior percentual de áreas vulneráveis detectadas, e a segunda maior extensão de costa nessas condições. Estas regiões concentram-se ao longo das costas oeste e nordeste da Ilha Arapiranga, partes das costas leste e oeste da Ilha das Onças, toda a margem externa da Ilha Carnapijó, e os segmentos da margem leste do Rio Pará. A classificação de vulnerabilidade moderada à alta atribuída a esses segmentos tem causas diferentes. Na Ilha Arapiranga e Ilha

das Onças, a classificação deve-se principalmente devido a retrogradação da linha de costa em grau moderado (taxas de erosão entre 1 m/ano e 3/ano). Já na margem leste do Rio Pará, a taxa de variação da linha de costa é secundária, e o fator predominante é o grau muito alto de vulnerabilidade dos habitats, caracterizados por planícies de maré, praias arenosas, habitações e estruturas artificiais (ver Apêndice A e C).

O padrão na relação vulnerabilidade-risco identificado no município de Belém, repete-se no município de Barcarena. Apesar da grande extensão de linha de costa apresentando vulnerabilidade moderada à alta, pouco mais de 7% apresentam risco à erosão moderado ou superior. Assim como em Belém, grande parte dos segmentos de costa são margem de ilhas e canais de maré, e apresentam densidade populacional muito baixa (ver Apêndice H). Sendo assim, Barcarena é o município que apresenta a maior extensão de linha de costa (aproximadamente 248 km) em situação de risco baixo ou muito baixo.

Os segmentos classificados com risco moderado ou superior somam cerca de 21 km de costa, e estão localizados na margem leste do Rio Pará, próximo à localidade de Itupanema, nas praias ao logo da margem oeste do município (Caripi, Farol, Praia do Sol, Cuipiranga e Guajarino), e zona sede do município, nas margens do furo do Arrozal (ver Apêndice J). Parte desses segmentos costeiros apresentam densidade populacional alta a muito alta, o que eleva o grau de risco dessas áreas. Outros segmentos apresentam densidade populacional baixa, porém encontram-se em habitats de vulnerabilidade muito alta, como áreas urbanas e praias arenosas.

Várias praias do município de Barcarena apresentam evidências do processo de erosão, dentre elas a Praia do Caripi tem grande destaque. Rocha (2016) mapeou a sensibilidade de praias de Barcarena e identificou diversos indícios da ocorrência de processos erosivos na Praia do Caripi. São registrados árvores de grande porte com suas raízes expostas ou tombadas, danos materiais em estabelecimentos comerciais, e estruturas de contenção deterioradas (Figura 4.7a).

Em 2015, parte da orla da praia do Caripi já havia sido destruída, e os impactos decorrentes do processo de erosão estavam prejudicando a economia desta localidade turística (Figura 4.7b). Segundo a Prefeitura de Barcarena (2019), foram destinados em caráter emergencial cerca de R\$ 1,2 milhões para a construção de muros de contenção e revitalização da orla (Figura 4.9c).



Figura 4.9 Erosão na Praia do Caripi, município de Barcarena: (A) Exposição de raízes de árvores de grande porte, evidências da continua remoção do sedimento praias por efeito da erosão; (B) Calçadas e barracas sendo destruídas pelo efeito de ondas e maré na orla da Praia do Caripi; (D) Muro de contenção construído para conter a erosão na orla da Praia do Caripi. Fontes: A – Rocha (2016); B – Elídio (2019); Prefeitura de Barcarena (2019).

4.3 COLARES E VIGIA

Os municípios de Colares e Vigia constituem parte da costa entre a Ilha de Mosqueiro e o limite da Zona Costeira Continental Estuarina. Estes municípios apresentam padrões similares na análise de vulnerabilidade e risco à erosão. Ambos têm cerca de 60% dos segmentos de linha de costa classificados com vulnerabilidade baixa, o que corresponde a cerca de 63 km de linha de costa em Colares, e 45 km em Vigia. Esses segmentos estão distribuídos em parte da costa norte e noroeste de Colares, e ao longo de ambas as margens do Furo da Laura, canal que separa os municípios de Colares e Vigia. A baixa vulnerabilidade a erosão dessas áreas está associada principalmente ao caráter estável ou prográdante da linha de costa (ver Apêndice A), associado a ocorrência de manguezal, que tem grau moderado na classificação de habitats.

O diferencial desses municípios são as áreas de vulnerabilidade muito alta à erosão. Juntos somam um percentual de segmentos, e uma extensão de linha de costa maior que o somatório dos demais municípios analisados. Ao contrário de outras regiões, esses segmentos são contínuos e demarcam nitidamente porções da costa que apresentam caráter altamente retrogradante. Nesses segmentos foram identificadas taxas de erosão de até 12 m/ano, o que mostra a tendência de recuo natural e acelerada nessas regiões (Figura 4.10).

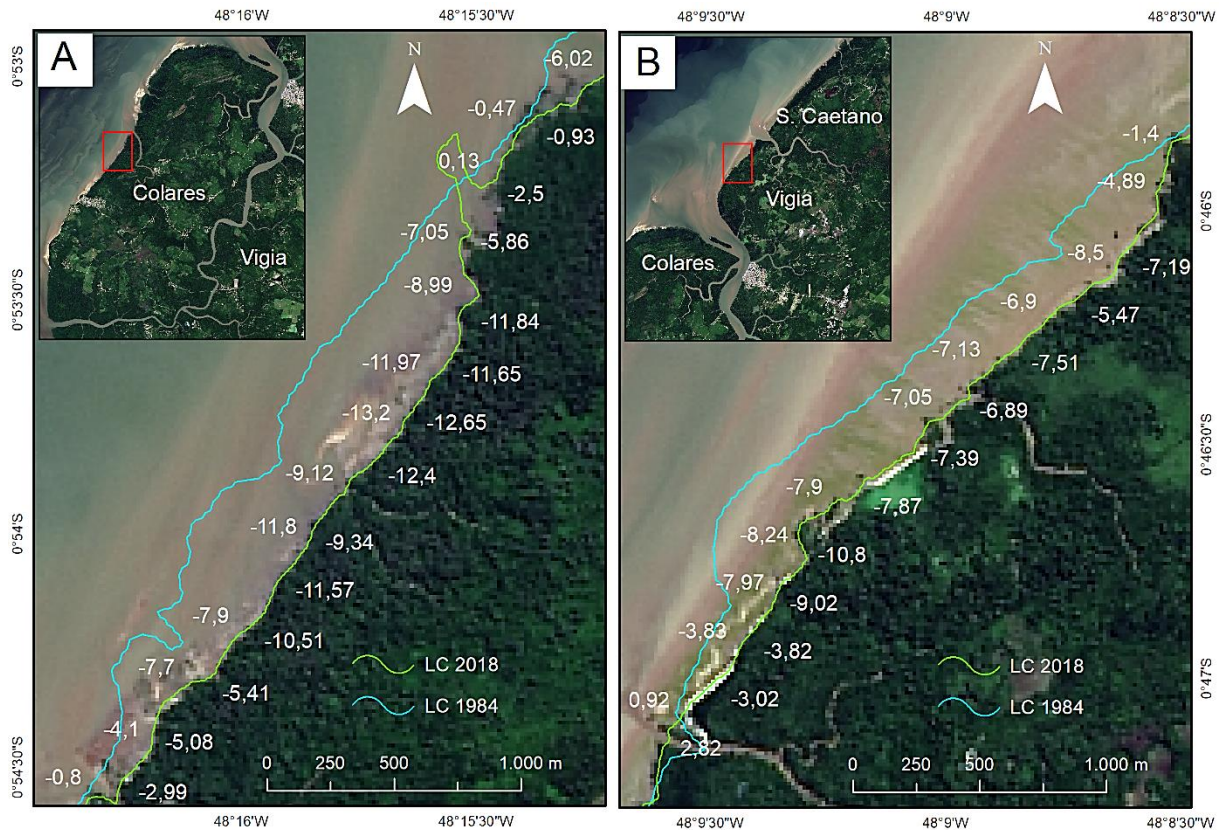


Figura 4.10 Altas taxas de recuo da linha de costa nos municípios de Colares e Vigia: (A) parte da costa oeste município de Colares registra taxas de erosão de até 12 m/ano, um recuo de aproximadamente 430m; (B) parte da costa norte do município de Vigia registra taxas de erosão de até 7 m/ano, um recuo de aproximadamente 240 m.

Segundo Barbosa (2007), as praias estuarinas do oeste de Colares são formadas por fenômenos locais de erosão e sedimentação na base das falésias baixas de até 4m de altura. Segundo o mesmo autor, esses segmentos de costa são erodidos por ondas, causando o solapamento das margens e retração local da linha de costa. O recuo das falésias é marcado por material laterítico residual da Formação Barreiras, que é exposto na zona de intermaré das praias (Figura 4.11).



Figura 4.11 Material laterítico residual da Formação Barreiras, indicador da erosão e recuo do das falésias pela ação das ondas, costa oeste do município de Colares. Fonte: Barbosa (2007).

Apesar da elevada vulnerabilidade à erosão dos segmentos citados, estes são classificados com grau de risco moderado, pois a densidade populacional nessas regiões é muito baixa ou nula. Os municípios de Colares e Vigia tem apenas cerca de 10% dos segmentos de costa classificados com risco moderado ou superior, o que corresponde a uma extensão de costa de aproximadamente 6 km (Vigia) e 10 km (Colares). Esses segmentos concentram-se próximos as zonas sede de ambos os municípios, e nas praias do Humaitá e Machadinho na costa de Colares.

4.4 SANTO ANTÔNIO DO TAUÁ, SANTA BÁRBA DO PARÁ, BENEVIDES, MARITUBA, ANANINDEUA E ACARÁ.

Os municípios sob influência direta do Estuário do Rio Pará, ou seja, os que são diretamente afetados pela ação das ondas e marés, apresentam áreas vulneráveis à erosão, e parte dessas áreas apresentam risco moderado à alto devido à elevada concentração de bens e pessoas. Barcarena, Belém e Colares expressam essa relação. Porém, neste trabalho também foram analisados os segmentos de costa que compreendem os canais internos, que não estão sob influência direta do Estuário. Esses segmentos compõem a costa dos municípios de Santo Antônio do Tauá, Santa Barbara do Pará, Benevides, Marituba e Ananindeua.

Esses municípios apresentam características similares na análise da vulnerabilidade e risco à erosão costeira, e essas características são reflexos das suas localizações relativas ao Estuário do Rio Pará. No geral, são os municípios com os maiores percentuais de segmentos com grau de vulnerabilidade baixo, e não foram identificados trechos significantes com grau de

risco moderado ou superior. Por exemplo, os municípios de Benevides e Marituba são os mais internos em relação ao eixo principal do Estuário do Rio Pará, e por consequência são os que têm a menor extensão de costa, somando pouco mais de 26 km. Além disso, os dois municípios são os que apresentam os maiores percentuais de segmentos classificados com grau de vulnerabilidade baixa (acima de 70%), e não apresentam áreas de risco moderado ou superior.

O baixo índice de risco dos segmentos de costa desses municípios está associado principalmente ao padrão de ocupação, onde não há grandes aglomerações nas margens dos canais, concentrando-se em núcleos urbanos relativamente distantes da costa. Há exceções como os parques madeireiros nas margens do Furo das Marinhas (divisa dos municípios e Benevides e Santa Barbara do Pará), e as localidades de Maurícia e Espírito Santo do Tauá, porém não foram encontrados registros de impactos decorrentes de erosão costeira.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a vulnerabilidade à erosão costeira e a tendência de risco para a região do Estuário do Rio Pará, setor Continental Estuarino da Zona Costeira do Estado do Para (ZCA). Esta região é de grande importância para o estado pois cerca 1.8 milhões de pessoas residem nos municípios que compõem este setor, além de ser uma importante hidrovia de entrada e saída de produtos e pessoas. Dentre os produtos gerados neste trabalho, obteve-se mapas de vulnerabilidade e risco à erosão para a região do Estuário do estuário do Rio Pará, a partir dos quais chegou-se as seguintes conclusões:

- Os dez municípios que compõe a área de estudo têm pelo menos 45% dos segmentos de costa em condições de vulnerabilidade baixa, e oito desses municípios têm pelo menos 60% dos segmentos de costa nessas condições. Isto indica que pelo menos metade da costa do Estuário do Rio Pará apresenta baixa vulnerabilidade à erosão;
- Os segmentos de costa em situação de vulnerabilidade moderada ou superior variam nos municípios, podendo estar entre 25% a 55%. Isto indica que pouco menos da metade da costa do Estuário do Rio Pará tem um grau moderado ou superior de vulnerabilidade à erosão costeira;
- Quando avaliada as tendências de risco, apenas os municípios de Belém, Barcarena, Colares e Vigia apresentam extensões de costa significantes apresentando tendência de risco à erosão moderado ou superior, no entanto, os demais municípios apresentam porcentagens pouco expressivas ou nulas;
- O município de Belém é o que apresenta a maior extensão de costa em situação de vulnerabilidade moderada à alta. Estas regiões concentram-se nas praias das Ilha de Mosqueiro e Caratateua, na costa oeste das ilhas Arapiranga e Cotijuba, e na margem leste da Baía do Guajará onde localiza-se a zona urbana de Belém. Além das áreas vulneráveis, Belém contém a maior extensão de costa em situação de risco moderado ou superior;
- O município de Barcarena é o que apresenta maior percentual dos segmentos analisados em condição de vulnerabilidade moderada à alta. Porém apenas 7% dos segmentos apresentam risco moderado ou superior, tendo a maior extensão de costa em situação de risco baixo ou muito baixo. As áreas de risco estão concentradas na margem leste do Rio Pará, na localidade de Itupanema, nas praias do Caripi, Farol, Praia do Sol, Cuipiranga e Guajarino, e na zona sede do município;

- Os municípios de Colares e Vigia apresentam as maiores extensões de costa em situação de vulnerabilidade muito alta; Esses segmentos são contínuos e demarcam porções da costa altamente retrogradantes onde foram identificadas taxas de erosão de até 12 m/ano. Ainda assim, apenas 10% dos segmentos de costa apresentam risco moderado ou superior;
- Os municípios de Santo Antônio do Tauá, Santa Barbara do Pará, Benevides, Marituba e Ananindeua são os municípios com os maiores percentuais de segmentos com grau de vulnerabilidade baixo, e não foram identificados trechos significantes com grau de risco moderado ou superior. Estes índices estão associados à posição mais interna em relação ao eixo principal do Estuário do Rio Pará, e ao padrão de ocupação que está concentrado na porção interior do continente.

A metodologia utilizada neste estudo, baseada na análise multicritério a partir de dados de sensoriamento remoto, mostrou-se uma ferramenta poderosa na qualificação e quantificação de áreas vulneráveis e de risco à erosão costeira. Os resultados obtidos foram satisfatórios e atenderam aos objetivos da pesquisa. Como exposto, as áreas de risco moderado ou superior identificadas estão sendo afetadas por impactos decorrentes da erosão, o que tem causado prejuízos à população e às suas atividades econômicas dessas regiões. Estas áreas precisam de atenção especial dos órgãos competentes, que precisam buscar soluções sérias que diminuam os efeitos da erosão e previnam desastres dessa natureza. A atenção deve voltar-se também às áreas naturalmente vulneráveis, buscando políticas públicas de ordenamento territorial que previnam a ocupação desordenada em áreas susceptíveis.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A qualidade e precisão dos resultados obtidos com esse tipo de metodologia está diretamente ligada a qualidade e precisão do banco de dados utilizado. Ressalta-se que o produto gerado deste trabalho é um modelo em parte baseado em generalizações obtidas de dados de múltiplas fontes de resoluções. A utilização de imagens e modelos digitais elevação de maior resolução elevariam significativamente a qualidade do produto gerado, porém, dados sistemáticos dos parâmetros oceanográficos seriam de maior importância e dariam robustez ao modelo. Recomenda-se para trabalhos futuros avançar nos parâmetros socioeconômicos e na questão do reordenamento territorial, tendo em vista elevada atividade econômica e especulativa.

REFERÊNCIAS

- Abuodha P. A. O. & Woodroffe C. D. 2010. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *Journal Coastal Conservation* **14** (3):189–205.
- Agência Belém. 2019. *Obras de prevenção à erosão em Mosqueiro avançam em três praias*. Disponível em: <http://agenciabelem.com.br/Noticia/164959/obras-de-prevencao-a-erosao-em-mosqueiro-avancam-em-tres-praias>. Acesso em: fev. 2019.
- Alcoforado A. V. C. 2017. *Índice de vulnerabilidade costeira e risco à inundação em cenários de mudanças climáticas no estuário do rio piranhas-açu com utilização de imagens de sensores orbitais e de lidar aeroportado*. DS Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 107p.
- Araújo-Júnior A. C. & Azevedo A. K. 2013. Análise geomorfológica da porção oeste-sul (w-s) da ilha de Caratateua, distrito de Belém-Pará. *GeoAtos*, Departamento de Geografia da FCT/UNESP, Presidente Prudente, **2** (13): 10-25.
- Baltazar L. R. S., Menezes M. O. B., Rollnic M. 2011. Contributions to the Understanding of Physical Oceanographic Processes of the Marajó Bay - PA, North Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 1443 – 1447.
- Barbosa E. J. 2007. *Unidades de relevo em zona costeira estuarina: municípios de Colares e Santo Antônio do Tauá (PA)*. DS Mestrado em Geografia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007. 96 p.
- Baztan J., Chouinard O., Jorgensen B., Tett P., Vanderlinden P.J., Vasseur Nicholls L. 2015. *Costal zones: solutions for the 21st century*. 1st ed. Amsterdam.
- Bezerra M. O., Medeiros C., Krelling A. P. M., Rosário R. P., Rollnic M. 2011. Physical oceanographic behavior at the Guama/Acara-Moju and the Paracauari river mouths, Amazon coast (Brazil). *Journal of Coastal Research*, SI 64: 1448 - 1452.
- Boak E.H. & Turner I.L., 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, **21**(4): 688–703. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Böck C. S. 2010. *Influência da morfologia do fundo na hidrodinâmica da Baía de Guajará (Pará)*. Dissertação Mestrado, Programa de Engenharia Civil, UFRJ/ COPPE. 100 p.
- Bueno M. C. 2014. *Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários*. Tese de Doutorado em Demografia, Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, 2014. 239 p.
- Busman, D. V. 2016. *Zoneamento da dinâmica costeira – aplicação de geotecnologias em apoio à gestão costeira integrada na praia Atalaia-Pa e trecho de praias entre os municípios de Guamaré e Macau-RN, setor sob influência da indústria petrolífera*. Tese doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. 185 p.

Coelho, C. D. B. 2005. *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Dissertação apresentada Universidade de Aveiro, Secção Autónoma de Engenharia Civil. 404 p.

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). 2018. Disponível em: <http://ondas.cptec.inpe.br>. Acesso em: nov. de 2018.

Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres - Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED UFSC). 2013. *Atlas Brasileiro de Desastres Naturais: 1991 a 2012* / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. 2. ed. – Florianópolis: CEPED UFSC, 2013. 126 p.

Crepani, E., Medeiros, J.S., Filho, P.H., Florenzano, T.G., Duarte, V., Barbosa, C.C.F. 2001. *Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico econômico e ao ordenamento territorial*. Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos - SP. 103p.

Cutter, S. L. 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, **20**(4): 529–539. Doi:10.1177/030913259602000407.

Cutter, S. L. 2011. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, (93): 59-69. Doi:10.4000/rccs.165.

Diário Online – Pará. 2019. *Erosão prejudica comércio em Mosqueiro*. Diário Online - Pará. Disponível em: <http://www.diarioonline.com.br/notired-434203-6-.html>. Acesso em: fev. 2019.

El-Robrini, M., Silva, M., Silva Jr. P., El-Robrini, M., Silva Jr. O., França, C. 2006. Pará. In: Dieter Muehe (org.), *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente (MMA), Brasília, DF, Brasil.

El-Robrini, M., Ranieiri, L. A., Silva, P. V. M., Guerreiro, J. S., Alves, M. A. M., El Robrini, M. H. S., Fenzl, N. 2018. Pará. *Programa da erosão costeira no Brasil* [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial; Organização Dieter Muehe. - Brasília, DF.

Espirito-Santo, C. 2011. *A gestão dos riscos naturais à erosão e inundação nos planos diretores de municípios da zona costeira (estado do Pará)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil. 98p.

Espirito-Santo, C. M. & Szlafsztein, C. F. 2016. Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, **16**(2):223-229.

Feyisa, G. L., H. Meilby, R. Fensholt, and S. R. Proud. 2014. Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **140**: 23-35.

Folha da Ilha. 2019. *Obras de prevenção a erosão em Mosqueiro seguem na reta final*. Disponível em: <https://folhadailha.com.br/obras-de-prevencao-a-erosao-em-mosqueiro-seguem-na-reta-final/>. Acesso em: fev. 2019.

Germani, Y. F., Figueiredo, S. A., Calliari, L. J., Tagliani, C. R. A., 2015. Vulnerabilidade costeira e perda de ambientes devido à elevação do nível do mar no litoral sul do Rio Grande do Sul. *Revista de Gestão Costeira Integrada / Journal of Integrated Coastal Zone Management*, **15**(1):121-131.

Guimaraes, U. S., Rodrigues, T. W. P., Lourdes, B. T. G., Pamplona, V. M. S. 2014. Change detection applied on shorelines in the mouth of Amazon River. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. p. 2146–2149.

Guimarães, U. S., Narvaes, I., S., Galo, M. L. B. T., 2017. Aplicação de dados ERS, envisat e sentinel para detecção de mudanças nos ambientes costeiros amazônicos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **18**(2).

Goepel, K. D. 2013. *Implementing the analytic hierarchy process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises – a new AHP excel template with multiple inputs*. Apresentado em The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. Doi:10.13033/isahp.y2013.047

Gornitz, V. 1990. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (Global and Planetary Change Section)*. **89**: 379-398.

Gornitz, V.M., White, T.W., Cushman, R.M. 1991. *Vulnerability of the US to future sea level rise*. Coastal Zone '91, Proceedings of the 7th Symposium on Coastal and Ocean Management, American Society of Civil Engineers.

Gornitz, V. M., Beaty, T. W., & Daniels, R. C. 1997. A coastal hazards data base for the U.S. West coast [Data set]. Oak Ridge National Laboratory. Doi:10.3334/CDIAC/ssr.ndp043c.

Grigio, A.M., Castro, A.F., Souto, M.V.S., Amaro, V.E., Vital, H. M. A. 2006. Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Guamaré municipal district. *Journal of Coastal Research*, SI 39:1427-1431.

Himmelstoss, E.A., Henderson, R.E., Kratzmann, M.G., Farris, A.S. 2018. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179*, 110 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2008. *Mapa geomorfologia do estado do Pará*. Ministério do Planejamento e gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2011. *Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro. 176p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2016. *Grade Estatística*. [online] Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm. Acesso em dez. de 2018.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2018. *Mapas*. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/>. Acesso em dezembro de 2018.

Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá (IEPA). 2017. *Banco de Dados Geográficos do Projeto Cartas SAO FZA*. Versão 1.0. 2017. Disponível em: <http://www.iepa.ap.gov.br/saofza/bancodados/bmfza.php>. Acesso em dezembro 2018.

Iwama, A. Y., Batistella, M., Ferreira, L. da C., Alves, D. S., Ferreira, L. C. 2016. Risk, vulnerability and adaptation to climate change: an interdisciplinary approach. *Ambiente e Sociedade*, **19**(2): 93-116. Doi:10.1590/1809-4422ASOC137409V1922016

Lins-de-Barros, F. M. 2010. *Contribuição metodológica para análise local da vulnerabilidade costeira e riscos associados: estudo de caso da Região dos Lagos, Rio de Janeiro*. Tese (doutorado) – UFRJ, Programa de Pós-Graduação em Geografia. UFRJ-PPGG. 297p.

Lins-de-Barros, F. M., 2011. Análise integrada da vulnerabilidade costeira e dos riscos associados. *VI Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*.

Kumar, T.S., Mahendra, R.S., Nayak, S., Radhakrishnan, K., Sahu, K.C. 2010. Coastal vulnerability assessment for Orissa State, east coast of India. *Journal of Coastal Research*, **26**(3): 523-534. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.

Mallmann, D. L. B. 2016. *Análise de risco à erosão costeira de curto-termo para o litoral central de Pernambuco*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. 158 p.

Pimentel, M. A., Oliveira, I. S., Rodrigues, J. C. 2012. Dinâmica da paisagem e risco ambiental na ilha de Caratateua, distrito de Belém-PA. *Revista Geonorte*, Edição Especial, **1**(4): 624-633.

Mazzer, A. M., Dillenburg, S. R., Souza, C. R. G. 2008. Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. **38**(2): 278-294.

Meneses, P. R. & Almeida, T. 2012. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. UnB. Brasília. 266 p.

McLaughlin, S., McKenna, J., & Cooper, J. A. G. 2002. Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities. *Journal of Coastal Research*, **36**: 487–497. Doi:10.2112/1551-5036-36.sp1.487.

McLaughlin, S. & Cooper, J. A. G. 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, **9**(3): 233-248.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2015. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro: 25 anos do Gerenciamento Costeiro no Brasil / Flávia Cabral Pereira e Márcia Regina Lima de Oliveira, organizadoras. Brasília. 181 p.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2018a. Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa - PROCOSTA [recurso eletrônico]. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial. - Brasília, DF.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). 2018b. Panorama da Erosão Costeira no Brasil [recurso eletrônico]. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial; Organização Dieter Muehe. –Brasília, DF. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80342/Panorama_erosao_costeira_Brasil.pdf.

Mohamad, M. F., Lee, L. H., Samion, M. K. H. 2014. Coastal Vulnerability Assessment towards Sustainable Management of Peninsular Malaysia Coastline. *International Journal of Environmental Science and Development*. **5**(6): 533-538.

Muehe, D. 2009. *A zona costeira do Brasil e sua vulnerabilidade face à ocupação e às mudanças climáticas*. Conference: ENANPEGE.

Muehe, D., Fernandes, G. B., Bulhões, E. M. R., Azevedo, I. F. 2011. Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praiial entre rio das ostras e o cabo Búzios/RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. **12**(2).

Mujabar, P. S. & Chandrasekar, N. 2011. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, **69**:1295–1314.

Murali, R. M., Ankita, M.S., Vethamony, P. 2013. Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards Earth Syst. Sci*, **13**: 3291-3311.

United Nations Development Programme (UNDP). 2018. *National Coastal Vulnerability Assessment and Designing of Integrated Coastal Management and Adaptation Strategic Plan for Timor*. 161 p.

Neves, S. C., França, C.F. 2016. Boletim Amazônico de Geografia. Belém, **03**(06): 6078.

Nicolodi, J.L. & Zamboni, A. 2008. Gestão Costeira. In: *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*, pp.213-241, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Brasília. DF, Brasil. ISBN: 9788577381128.

Nittrouer, C. A., Kuehl, S. A., Sternberg, R. W., Figueiredo, A. G., Faria, L. E. C. 1995. An introduction to the geological significance of sediment transport and accumulation on the Amazon continental shelf. *Marine Geology*, **125**(3-4): 177–192. Doi: 10.1016/0025-3227(95)00075-A.

Ozyurt, G. & Ergin, A. 2010. Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator-based methodology for decision makers. *Journal of Coastal Research*, **26**(2): 265–273.

Paulo Elídio. 2019. *Erosão está acabando com a Praia do Caripi*. Disponível em: <http://pauloelidio.blogspot.com/2015/03/erosao-esta-acabando-com-praia-do-carypi.html>. Acesso em: fev. 2019.

Pendleton, E.A., Barras, J.A., Williams, S.J., and Twichell, D.C. 2010. Coastal Vulnerability Assessment of the Northern Gulf of Mexico to Sea-Level Rise and Coastal Change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1146.

Pereira, C. & Coelho, C. 2013. Mapas de risco das zonas costeiras por efeito da ação energética do mar. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, **13**(1): 27–43. Doi:10.5894/rgci325.

Prefeitura de Barcarena. 2019. *Começa a construção da orla do Caripi*. Disponível em: <http://www.barcarena.pa.gov.br/portal/noticia?id=172&url=comea-a-construo-da-orla-do-caripi>. Acesso em: fev. 2019.

Prestes, Y. O., Rollnic, M., Silva, M.S., Rosário, R. P. 2014. Volume transport in the tidal limit of the Pará River, Brazil. *Proceedings of the 17th Physics of Estuaries and Coastal Seas conference*, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brazil.

Published by the United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) 2009. Geneva, Switzerland, May.

Rani, N. N. V., Satyanarayana, A. N. V., Bhaskaran, P. K., 2015. Coastal vulnerability assessment studies over India: a review. *Natural Hazards*, **77**:405–428.

Rocha, N. C. 2013. *Sensibilidade ambiental das praias de Vila do Conde, Itupanema e Caripí (Barcarena/PA)*. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário do Estado do Pará (CESUPA) - Ciências Ambientais. Belém. 64 p.

Rocha, C. S. 2016. *Estudo e Análise da Vulnerabilidade Costeira face a Cenários de subida do Nível Médio do Mar e Eventos Extremos devido ao efeito das Alterações Climáticas*. Mestrado em Engenharia Geográfica, departamento de engenharia geográfica, geofísica e energia, Universidade de Lisboa, 129 p.

Rosário, R.P., Borba, T.A.C., Santos, A.S., Rollnic, M. 2016. Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. In: Vila-Concejo, A.; Bruce, E.; Kennedy, D.M., and McCarroll, R.J. (eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium (Sydney, Australia)*. *Journal of Coastal Research, Special Issue*, No. 75: 128–132. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Royo, M. L.; Ranasinghe, R., Jiménez, J.A. 2016. A rapid, low-cost approach to coastal vulnerability assessment at a national level. *Journal of Coastal Research*, **32**(4): 932–945.

Saaty, T. L. 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, **15**(3): 234–281. doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5.

Saaty, R. W. 1987. The analytic hierarchy process - what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, **9**(3–5): 161–176. doi:10.1016/0270-0255(87)90473-8.

Santos, V. F., Mendes, A. C., Silveira, O. F. M., Prost, C., Jimenez, E. A., Takiyama, L. R., Figueira, Z. R., Facundes, F., Santana, L. O., Pereira, R. A., Miranda, A. G. O., Costa Neto, N. V., Petri, N., Neves, N. G., Rollnic, N., Aguiar, K. M. O., Silva, B. D., Lima, N. R. E., Lees, A. C., Vieira, I. M. 2016. *Atlas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo da Bacia Marítima da Foz do Amazonas*. 1. Ed. Macapá: IEPA. 106p.

Shaw, J., Taylor, R.B., Forbes, D.L., Ruz, M. H., Solomon, S. 1998. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. Geological Survey of Canada Bulletin 505. Catalogue N°. M42-505EISBN 0-660-17569.

Silva, P. M. P. C. P. 2015. *Avaliação da Vulnerabilidade Costeira no concelho de Almada (Portugal)*. Mestrado em Gestão e Conservação da Natureza. Universidade dos Açores. 339 p.

Silveira, Y. G. & Bonetti, J. 2018. Assessment of the physical vulnerability to erosion and flooding in a sheltered coastal sector: Florianópolis Bay, Brazil. *Journal of Coastal Conservation*. doi: 10.1007/s11852-018-0659-0.

Souza, R. R. 2006. *Modelagem numérica da circulação de correntes de maré na Baía de Marajó e Rio Pará (PA)*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 159 p.

Souza Filho, P.W.M., Sales, M.E. da C., Prost, M.T.R. da C., Costa, F.R. & Souza, L.F.M. de O. 2005. Zona Costeira Amazônica: O Cenário Regional e os Indicadores Bibliométricos em C&T. “*Bibliografia da Zona Costeira Amazônica*”. Museu Paraense Emilio Goeldi / Universidade Federal do Pará / Petrobras, Belém, PA, Brasil. 401p.

Szlafsztein, C. F. & Sterr, H. 2007. A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Pará, Brazil. *Journal coastal conservation*, **11**:53–66.

Takaku, J., T. Tadono, and K. Tsutsui. 2014. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**(4): 243-248.

Thieler, E.R. & Hammar-Klose, E.S. 1999. *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise, U.S. Atlantic Coast*: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-593, 1 sheet.

Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ayhan, E. 2017. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change* (ver.4.4, July 2017): U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.

Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., Marcomoni, A. 2012. Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **12**: 2347–2368.

United Nations Department of Humanitarian Affairs (UNDHA). 1993. *Glossary: internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management*. Geneva.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2017. *Landsat Level-1 Data Products - Landsat Missions*. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/landsat-level-1-standard-data-products>. Acesso em: agosto de 2018.

Vasquez, L. V., Rosa-costa, L. R., Silva, C. G., Ricci, P. F., Barbosa, J. O., Klein, E. L., Lopes, E. S., Macambira, E. M. B., Chaves, C. L., Carvalho, J. M., Oliveira, J. G., Anjos, G. C., Silva, H. R. 2008. *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará. Sistema de informações geográficas: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.

Yin, J., Yin, Z., Wang, J., & Xu, S. 2012. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *Journal of Coastal Conservation*, **16**(1): 123–133. doi: 10.1007/s11852-012-0180-9.

Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., Evangelista, P. H. 2017. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, **98**(4): 920–932. doi: 10.1002/ecy.1730.

Wong, P.P., Losada, I. J., Gattuso J. P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., 2014. Coastal systems and low-lying areas. *In: 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 [Field Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (eds.)]. New York, NY, USA, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. p. 361-409.

Wulder, M. A., White, J. C., Loveland, T. R., Woodcock, C.E., Belward, A. S., Cohen, W. B., Fosnight, E. A., Shaw, J., Masek, J. G., Roy, D. P. 2015. The global Landsat archive: Status, consolidation, and direction. *Remote Sensing of Environment*, **185**: 271–283.

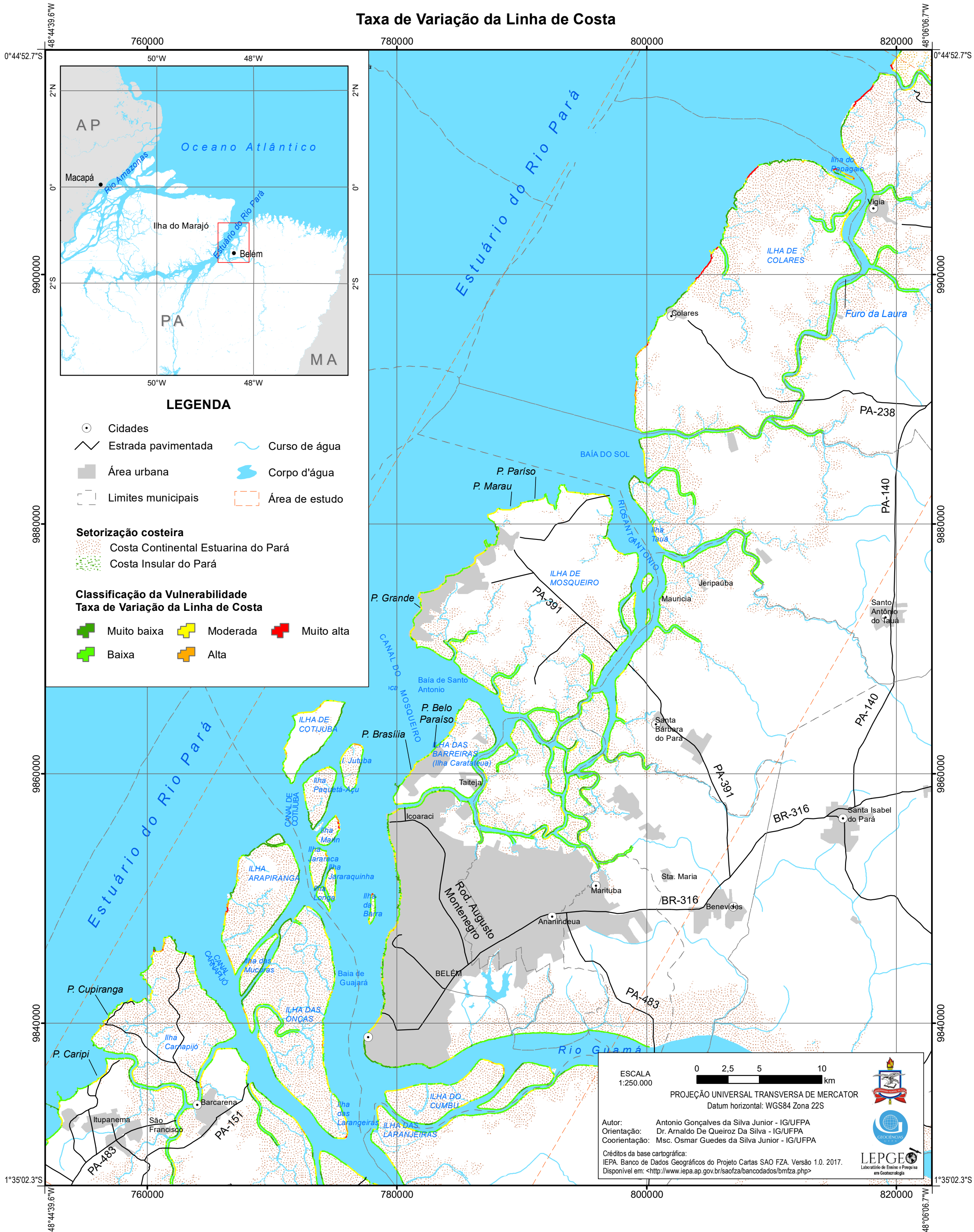
Zamboni, A. & Nicolodi, J. (org.). 2008. *Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil*. Brasília. DF, Brasil, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. 242p.

APÊNDICES

**APÊNDICE A. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“TAXA DE VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA”.**

Classificação dos Parâmetros de Vulnerabilidade

Taxa de Variação da Linha de Costa



LEGENDA

- Cidades
- Estrada pavimentada
- Área urbana
- Limites municipais
- Curso de água
- Corpo d'água
- Área de estudo

- Setorização costeira**
- Costa Continental Estuarina do Pará
 - Costa Insular do Pará

- Classificação da Vulnerabilidade Taxa de Variação da Linha de Costa**
- Muito baixa
 - Baixa
 - Moderada
 - Alta
 - Muito alta

ESCALA 1:250.000

0 2,5 5 10 km

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Datum horizontal: WGS84 Zona 22S

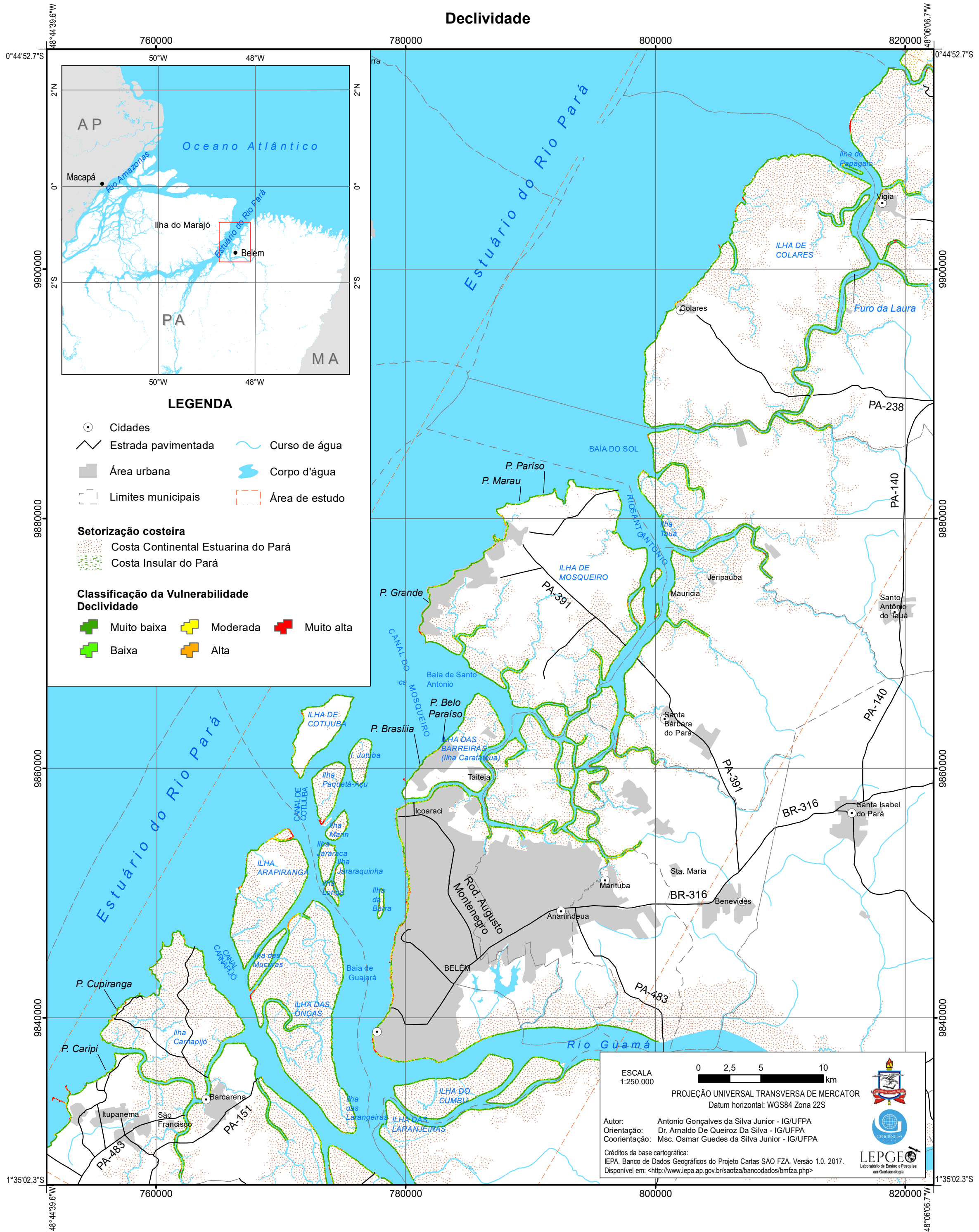
Autor: Antonio Gonçalves da Silva Junior - IG/UFPA
Orientação: Dr. Arnaldo De Queiroz Da Silva - IG/UFPA
Coorientação: Msc. Osmar Guedes da Silva Junior - IG/UFPA

Créditos da base cartográfica:
IEPA. Banco de Dados Geográficos do Projeto Cartas SAO FZA. Versão 1.0. 2017.
Disponível em: <<http://www.iepa.ap.gov.br/saofza/bancodados/bmfza.php>>

**APÊNDICE B. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“DECLIVIDADE”.**

Classificação dos Parâmetros de Vulnerabilidade

Declividade



LEGENDA

- Cidades
 - Estrada pavimentada
 - Área urbana
 - Limites municipais
 - Curso de água
 - Corpo d'água
 - Área de estudo
- Setorização costeira**
- Costa Continental Estuarina do Pará
 - Costa Insular do Pará
- Classificação da Vulnerabilidade Declividade**
- Muito baixa
 - Baixa
 - Moderada
 - Alta
 - Muito alta

ESCALA 1:250.000

0 2,5 5 10 km

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Datum horizontal: WGS84 Zona 22S

Autor: Antonio Gonçalves da Silva Junior - IG/UFPA
Orientação: Dr. Arnaldo De Queiroz Da Silva - IG/UFPA
Coordenação: Msc. Osmar Guedes da Silva Junior - IG/UFPA

Créditos da base cartográfica:
IEPA. Banco de Dados Geográficos do Projeto Cartas SAO FZA Versão 1.0. 2017.
Disponível em: <<http://www.iepa.ap.gov.br/saofza/bancodados/bmfza.php>>

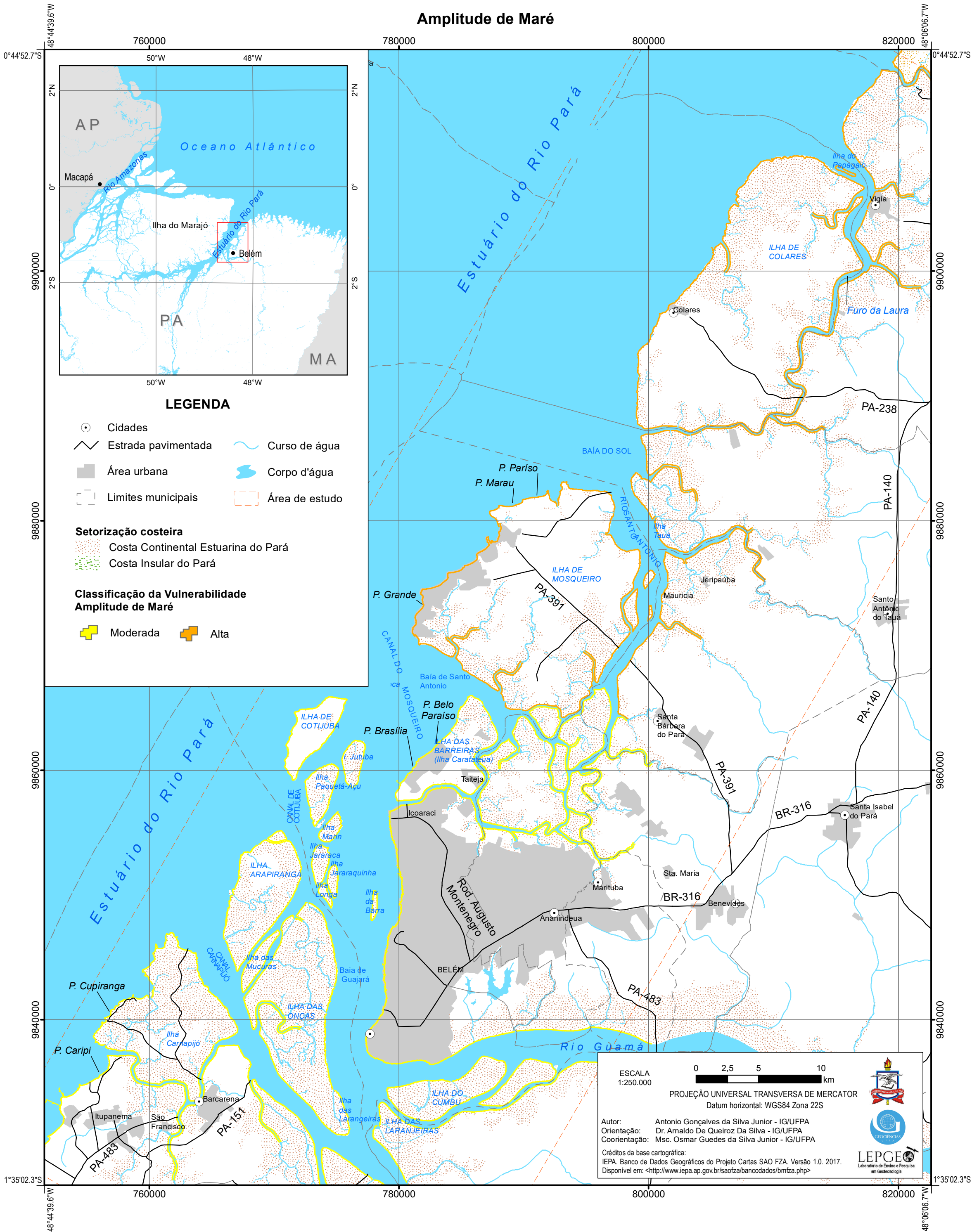
**APÊNDICE C. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“HABITATS”.**

**APÊNDICE D. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“LITOLOGIA”.**

**APÊNDICE E. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“AMPLITUDE DE MARÉ”.**

Classificação dos Parâmetros de Vulnerabilidade

Amplitude de Maré



LEGENDA

- Cidades
- Estrada pavimentada
- Área urbana
- Limites municipais
- Curso de água
- Corpo d'água
- Área de estudo

Setorização costeira

- Costa Continental Estuarina do Pará
- Costa Insular do Pará

Classificação da Vulnerabilidade Amplitude de Maré

- Moderada
- Alta

ESCALA 1:250.000

0 2,5 5 10 km

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
Datum horizontal: WGS84 Zona 22S

Autor: Antonio Gonçalves da Silva Junior - IG/UFPA
Orientação: Dr. Arnaldo De Queiroz Da Silva - IG/UFPA
Coorientação: Msc. Osmar Guedes da Silva Junior - IG/UFPA

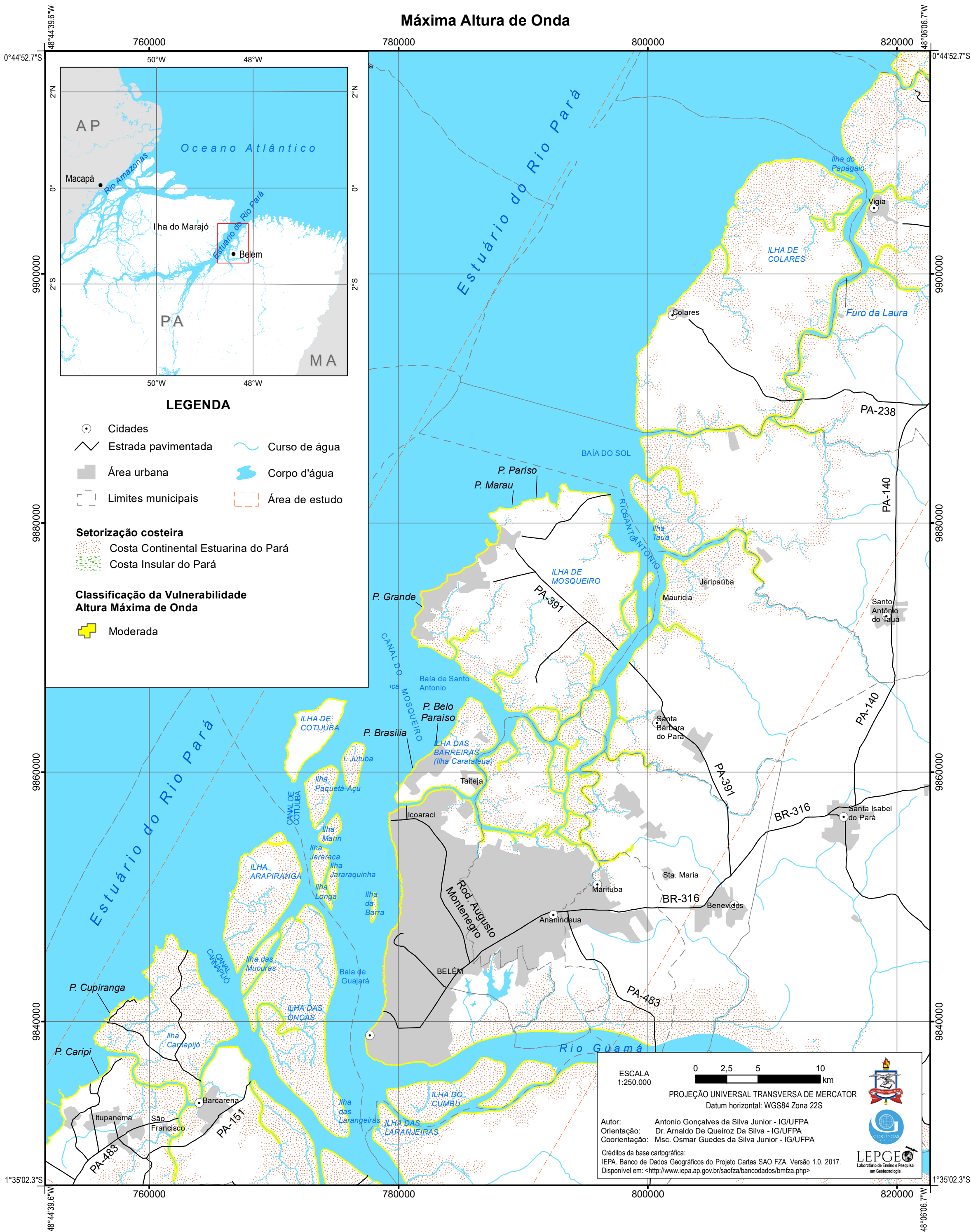
Créditos da base cartográfica:
IEPA. Banco de Dados Geográficos do Projeto Cartas SAO FZA. Versão 1.0. 2017.
Disponível em: <<http://www.iepa.ap.gov.br/saofza/bancodados/bmfza.php>>

**APÊNDICE F. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“VELOCIDADE MÁXIMA DE CORRENTE”.**

**APÊNDICE G. CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE PARA O PARÂMETRO
“ALTURA MÁXIMA DE ONDA”.**

Classificação dos Parâmetros de Vulnerabilidade

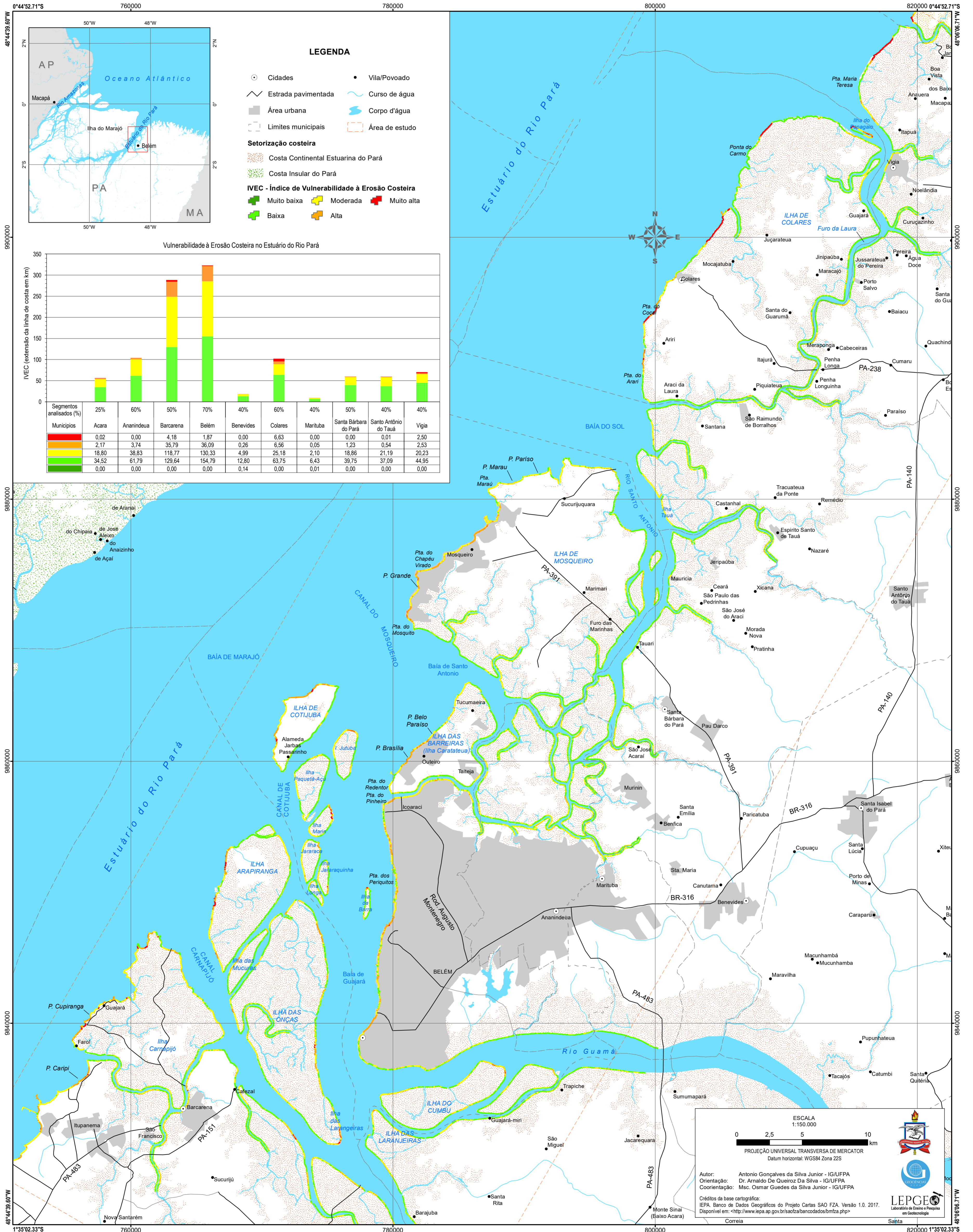
Máxima Altura de Onda



APÊNDICE H. CLASSIFICAÇÃO DA EXPOSIÇÃO.

APÊNDICE I. MAPA DE VULNERABILIDADE À EROSÃO COSTEIRA PARA O ESTUÁRIO DO RIO PARÁ.

Mapa de Vulnerabilidade à Erosão Costeira Estuário do Rio Pará



APÊNDICE J. MAPA DE TENDÊNCIA DE RISCO À EROSÃO COSTEIRA PARA O ESTUÁRIO DO RIO PARÁ.

Mapa de Tendência de Risco à Erosão Costeira Estuário do Rio Pará

