

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS  
DA GEOINFORMAÇÃO

---

**MODELAGEM FUZZY COMO SUBSÍDIOS PARA A  
ESPACIALIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE COSTEIRA À  
EROSÃO**

**LUCIANA MARIA DA SILVA**

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves**

**Co-orientadora: Profª. Drª. Milde Maria da Silva Lira**

**Dissertação de Mestrado**

**VIRTUS IMPAVIDA**

**RECIFE, 2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E**  
**TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**Luciana Maria da Silva**

**MODELAGEM FUZZY COMO SUBSÍDIOS PARA A ESPACIALIZAÇÃO  
DA VULNERABILIDADE COSTEIRA À EROSÃO**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologias e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de concentração Geodésia Aplicada defendida e aprovada no dia 31 de janeiro de 2013.

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves**

**Co-orientadora: Profª. Drª. Milde Maria da Silva Lira**

Recife

2013

Catalogação na fonte

Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

S586m Silva, Luciana Maria da.  
Modelagem *Fuzzy* como subsídios para a espacialização da vulnerabilidade costeira à erosão / Luciana Maria da Silva. - Recife: O Autor, 2013.  
xx, 164 folhas, il., gráfs., tabs.  
Orientador: Profº Drº. Rodrigo Mikosz Gonçalves.  
Co-orientadora: Profª Drª Milde Maria da Silva Lira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2013.  
Inclui Referências e Apêndices.  
1. Ciências Geodésicas. 2. Modelagem *Fuzzy*. 3. Erosão Costeira - Vulnerabilidade. 4. Cartografia Costeira. 5. Linha de Costa. I. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Orientador). II. Título.

526.1 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2013-041

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Candidata: Licenciada em Matemática **LUCIANA MARIA DA SILVA**.

**Modelagem Fuzzy como Subsídios para a Espacialização da Vulnerabilidade  
Costeira à Erosão**

**Dissertação defendida e aprovada em 31 de janeiro de 2013 pela Comissão  
Julgadora:**

---

**Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves (Orientador)**

**Centro de Tecnologias e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Prof. Dr. Admilson da Penha Pacheco (Examinador Interno)**

**Centro de Tecnologias e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco**

---

**Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira (Examinador Externo)**

**Centro de Tecnologias e Geociências - Universidade Federal de Pernambuco**

Dedico este trabalho as pessoas mais importante de minha vida. A Deus por tudo que sempre me proporcionou. A minha mãe Maria de Lourdes pela vida e por tudo que sempre fez por mim, enfrentando os desafios e os preconceitos da sociedade. A todos aqueles que acreditaram, dando-me sempre força para vencer todos os meus ideais.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer é um ato de reconhecimento que não podemos caminhar sozinho. Sendo assim quero agradecer a todas as pessoas que contribuíram em minha formação pessoal e profissional, merecendo destaque:

Inicialmente agradecer a Deus pela inteligência e desenvolvimento emocional para chegar até aqui.

À minha mãe Maria de Lourdes por tudo o que ela sempre fez por mim, em todas as ocasiões representando mãe e pai. Aos meus irmãos, pelo apoio incondicional, principalmente Adriana Maria e Sandriano José.

Ao meu orientador, Prof. Dr Rodrigo Mikosz Gonçalves, por ter aceitado o desafio de orientar-me, pela atenção desde o primeiro contato contribuindo para minha formação como Mestre. A minha co-orientadora, Profª. Drª. Milde Maria da Silva Lira, pelas contribuições.

Aos amigos de mestrado em especial: Betânia Queiroz da Silva, Juciela Cristina dos Santos pela paciência em dividir comigo um pouco dos seus conhecimentos e incentivo. Ao Jaidson Nandi Becker pela companhia e pelos momentos de incentivo.

Aos professores do programa de pós-graduação em especial: Prof. Dr. Daniel Carneiro pelo primeiro contato e pelas informações precisas para que eu tomasse a iniciativa de participar processo de seleção deste programa de pós-graduação. A Profª. Drª. Ana Lúcia Candeias e o Prof. Dr Silvio Jacks pelo apoio e incentivo em todos os momentos de angústia e conhecimento. Ao Prof. Dr. Francisco Jaime Mendonça pelas contribuições

---

na banca de qualificação e o Prof. Dr. Pedro de Souza Pereira pelas contribuições na banca de andamento e defesa.

A todos os professores e funcionários do programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas.

Aos professores de graduação que mesmo de longe continuaram incentivando-me e tendo paciência nos meus momentos de aflições: Prof. Doutorando Esdras Jafet e o Prof. Dr. Saul Campos.

Ao meu amigo Diego Rodrigues Pilatti pela paciência, palavras de incentivo e atenção.

Aos meus gatinhos: Bruno, Fofinha, Piaget (falecido) e Garfield, pela compania nas noites frias e solitárias.

Ao suporte financeiro da Capes e da FACEPE/CNPq através do projeto de pesquisa PPP/APQ-1242-1.07/10.

Ao Laboratório de Cartografia Costeira – LACCOST pela disponibilização de equipamentos e espaço físico para pesquisa.

Enfim a todos que de forma direta e indireta auxiliaram-me a chegar até aqui e prosseguir que não foram citados.

***“Mesmo que encontrar a perfeição das  
coisas seja impossível, não é impossível  
continuar a buscá-la.”***

***Luciana Maria da Silva***

## RESUMO

SILVA, Luciana Maria. **MODELAGEM FUZZY COMO SUBSÍDIOS PARA A ESPACIALIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE COSTEIRA À EROSÃO**. Recife, 2013, 164p. Dissertação (Mestrado) - Centro de Tecnologias e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

O avanço da urbanização vem provocando grandes transformações nas relações sociais e morfológica das áreas costeiras. As informações cartográficas e históricas quando comparadas ao longo do tempo tornam-se uma ferramenta poderosa para detectar mudanças de determinadas feições. O presente trabalho tem como objetivo modelar dados de diversas fontes como GNSS (Global Navigation Satellite Systems) e sensoriamento remoto (ortofotos e imagens de satélites artificiais) para posteriormente prover a espacialização da vulnerabilidade costeira à erosão utilizando a lógica fuzzy. A área de estudo concentra-se no litoral de Recife e de Jaboatão dos Guararapes formada respectivamente pelas praias de Boa Viagem e Piedade que totalizam aproximadamente 12 km de linha de costa. O método aplicado para análise da vulnerabilidade utilizou variáveis linguísticas, partições fuzzy, intervalos e análises paramétricas que caracterizam a modelagem fuzzy. Os resultados finais obtidos a partir de vários testes incluindo dois resultados com diferentes números de regras e análises paramétricas da modelagem fuzzy são apresentados através de dados numéricos e gráficos. Os mapas temáticos de vulnerabilidade costeira à erosão contêm dois tipos de classes primeiros: baixa, baixa/moderada, moderada, moderada/alta, alta, alta/muito alta e muito alta e o segundo após a defuzzificação dos graus de pertinência foram espacializadas as

seguintes classes: baixa, moderada, alta e muito alta. Após a análise dos níveis de vulnerabilidade à erosão costeira ao longo da linha de costa obtiveram-se os seguintes resultados: 33,33% da linha de costa possui vulnerabilidade baixa, 38,15% possui vulnerabilidade moderada 14,26% vulnerabilidade alta e 14,26% muito alta.

Palavras chaves: vulnerabilidade à erosão costeira, cartografia costeira, modelagem fuzzy, linha de costa.

## ABSTRACT

The advance of urbanization comes causing to great changes in social relations and morphological of coastal areas. The cartographic and historical information when compared over time become a powerful tool to detect changes of determined features. The present study aims to model data from diverse sources such as GNSS (Global Navigation Satellite Systems) and remote sensing (orthophotos and artificial satellite images) to subsequently provide the vulnerability coastal spatialization the erosion utilizing fuzzy logic. The study area is concentrated on the coast of Recife and Jaboatão dos Guararapes formed respectively by the beaches of Boa Viagem and Piedade totaling approximately 12 km of coastline. The method applied for vulnerability analysis has utilized linguistic variables, fuzzy partitions, intervals and parametric analysis that characterize fuzzy modeling. Final results obtained from various tests including two results with different numbers of rules and parametric analysis of fuzzy modeling are presented through numerical data and graphs. The thematic maps of vulnerability coastal to the erosion contain two types of classes, first: low, low / moderate, moderate, moderate / high, high, high / very high and very high and the second after the defuzzification of degrees of pertinence were spatialized the following classes: low, moderate, high and very high. After analyzing the levels of vulnerability to coastal erosion along the shoreline were obtained the following results: 33.33% of coastline has low vulnerability 38.15% has moderate vulnerability 14.26% high vulnerability and 14.26% very high.

Keywords: vulnerability to coastal erosion, coastal mapping, fuzzy modeling, shoreline.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação Gráfica do conjunto fuzzy P no universo U .....	35
Figura 2 – Representação Gráfica das funções de pertinências: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) singleton .....	37
Figura 3 – Representação Gráfica com conjunto nebuloso: (a) conjuntos A e B; (b) união; (c) intersecção; d (complemento) .....	39
Figura 4 – Esquema da Formulação do Raciocínio Fuzzy .....	40
Figura 5 – Processo Máx-Min de Mamdani .....	46
Figura 6 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Recife e Jaboatão dos Guararapes .....	60
Figura 7 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Boa Viagem (Recife) .....	62
Figura 8 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Piedade (Jaboatão dos Guararapes) .....	64
Figura 9 – Fluxograma das etapas de trabalho .....	67
Figura 10 – O fluxograma da montagem do Banco de Dados .....	69
Figura 11 – Trecho percorrido ao longo da linha de costa de Boa Viagem e Piedade .....	73
Figura 12 – Transectos dos Pontos e Perpendicularidade entre as linhas de costa .....	74
Figura 13 – Setor 1 da praia do Pina até a praia da Boa Viagem .....	76
Figura 14 – Setor 2 Centro da praia da Boa Viagem .....	77
Figura 15 – Setor 3 Norte do enrocamento da praia da Boa Viagem .....	79
Figura 16 – Setor com a construção do enrocamento da praia da Boa Viagem .....	80
Figura 17 – Setor 4 ao sul da praia da Boa Viagem e ao norte da praia de Piedade .....	81
Figura 18 – Setor 5 ao sul da praia de Piedade .....	83

Figura 19 – Mapa de Setores ao longo da Faixa Litorânea da praia da Boa Viagem e de Piedade.....	84
Figura 20 – Variáveis para construção da Modelagem Fuzzy .....	86
Figura 21 – Classificação temática da vulnerabilidades à erosão costeira.....	86
Figura 22 – Variáveis para entrada na modelagem fuzzy da área de estudo	87
Figura 23 – Classificações da variável Linha de Costa .....	90
Figura 24 – Funções de Pertinência da variável Linha de Costa.....	91
Figura 25 – Classificações da variável Pós-praia .....	92
Figura 26 – Funções de Pertinência da variável Pós-Praia.....	93
Figura 27 – Classificações da variável Vegetação .....	95
Figura 28 – Funções de Pertinência da variável Vegetação .....	96
Figura 29 – Classificações da variável Enrocamento.....	98
Figura 30 – Funções de Pertinência da variável Enrocamento .....	99
Figura 31 – Classificações da variável Benfeitorias de Lazer .....	100
Figura 32 – Funções de Pertinência da variável Benfeitoria de Lazer .....	101
Figura 33 – Classificações da variável Urbanização .....	103
Figura 34 – Funções de Pertinência da variável Urbanização .....	104
Figura 35 – Funções de Pertinência dos Níveis de Vulnerabilidade .....	105
Figura 36 – Média da taxa de variação do Deslocamento da Linha de Costa (m/ano) Setorial e Temporal .....	110
Figura 37 – Taxa de Deslocamento Mínimo (m/ano) Setorial e Temporal .....	111
Figura 38 – Taxa de Deslocamento Máximo (m/ano) Setorial e Temporal....	111
Figura 39 – Taxa de Deslocamento do Desvio Padrão (m/ano) Setorial e Temporal .....	112
Figura 40 – Valores do Deslocamento Médio em metros no período de 2007 a 2012 .....	114
Figura 41 – Valores da Distância do Deslocamento Mínimo em metros no período de 2007 a 2012 .....	115
Figura 42 – Valores da Distância do Deslocamento Máximo em metros no período de 2007 a 2012 .....	115
Figura 43 – Visualização do Modelo Fuzzy para valores iniciais – 27 Regras .	117

---

Figura 44 – Visualização do Modelo Fuzzy para valores iniciais – 114 Regras	117
Figura 45 – Influência da variável Linha de Costa na Vulnerabilidade .....	118
Figura 46 – Influência da variável Pós-praia na Vulnerabilidade .....	120
Figura 47 – Influência da variável Urbanização na Vulnerabilidade .....	122
Figura 48 – Influência da variável Vegetação na Vulnerabilidade .....	123
Figura 49 – Influência da variável Enrocamento na Vulnerabilidade.....	125
Figura 50 – Influência da variável Benfeitoria de Lazer na Vulnerabilidade .	127
Figura 51 – Células e variáveis de entrada para análise da Modelagem Fuzzy.....	128
Figura 52 – Variáveis de entrada e os termos primário das partições fuzzy para análise da Modelagem Fuzzy .....	129
Figura 53 – Análise da Vulnerabilidade ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade – 27 Regras .....	132
Figura 54 – Análise da Vulnerabilidade ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade – 114 Regras.....	134
Figura 55 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 27 regras na Modelagem Fuzzy .....	135
Figura 56 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 27 Regras na Modelagem Fuzzy após a análise do grau de pertinência ....	136
Figura 57 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 114 regras na Modelagem Fuzzy .....	137
Figura 58 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 114 Regras na Modelagem Fuzzy após a análise do grau de pertinência ....	139
Figura 59 – Vulnerabilidade em percentual da área de estudo .....	140
Figura 60 – Mapa de Vulnerabilidade Costeira das praias da Boa Viagem (Recife) e Piedade (Jaboatão dos Guararapes) .....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Área total e população dos municípios na malha urbana .....	59
Tabela 2 – Faixa Litorânea de Recife e Jaboatão dos Guararapes.....	59
Tabela 3 – Classes selecionadas para criar mapas temáticos e respectiva descrição.....	70
Tabela 4 – Geometria dos dados gráficos armazenados no BDE .....	71
Tabela 5 – Variáveis linguísticas utilizadas como dados de entrada e seus termos primários das partições fuzzy correspondentes para utilização da Lógica Fuzzy .....	88
Tabela 6 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável linha de costa.....	91
Tabela 7 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável pós-praia.....	94
Tabela 8 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável vegetação .....	96
Tabela 9 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável enrocamento.....	99
Tabela 10 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável benfeitorias de lazer .....	102
Tabela 11 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável urbanização.....	104
Tabela 12 – Valores de pertinência dos números Fuzzy dos níveis de vulnerabilidade (%) .....	106
Tabela 13 – Taxa de Variação (m/Ano) do deslocamento da linha de costa Setorial.....	108
Tabela 14 – Valores da Distância da Variação (m) do deslocamento da linha de costa Setorial .....	113

Tabela 15 – Valores Iniciais estabelecidos das variáveis .....	116
Tabela 16 – Valores adotados para variável Linha de Costa .....	118
Tabela 17 – Valores adotados para variável Pós-Praia .....	119
Tabela 18 – Valores adotados para variável Urbanização .....	121
Tabela 19 – Valores adotados para variável Vegetação .....	123
Tabela 20 – Valores adotados para variável Enrocamento .....	124
Tabela 21 – Valores adotados para variável Benfeitorias de Lazer .....	126
Tabela 22 – Input da Análise das variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade através das 27 regras .....	131
Tabela 23 – Input da Análise das variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade através das 114 regras .....	133
Tabela 24 – Vulnerabilidade em percentual para cada setor estudado.....	140

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Regras fuzzy com antecedente e consequente .....	44
Quadro 2 – Características dos satélites das imagens trabalhadas .....	66
Quadro 3 – Variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade .....	130

## LISTA DE SIGLA E ABREVIATURAS

ALS	Laser Aerotransportado
BDE	Banco de Dados Espaciais
C <sub>o</sub> A	Centro da Área
C <sub>o</sub> M	Centro de Massa
CP	Conjuntos das Partes
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FIS	<i>Fuzzy Inference System</i>
GLONASS	<i>GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HWL	<i>High Water Line</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPVs	Índices Parciais de Vulnerabilidade
IVG	Índice de Vulnerabilidade Global
LC	<i>Linha de Costa</i>
LF	<i>Lógica Fuzzy</i>
LGCEPE	Lei de Gerenciamento Costeiro do Estado de Pernambuco
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LIFE	Laboratório Internacional de Engenharia Fuzzy
MED	Modelo de Elevação Digital
MF	Modelo Fuzzy
M <sub>o</sub> M	Média do Máximo
MP	Média Ponderada
MQR	Mínimos Quadrados Recursivos
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy

SR	Sensoriamento Remoto
TKS	Takagi-Sugeno-Kang

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>XV</b>
<b>LISTA DE SIGLA E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
1.1 OBJETIVOS.....	27
1.1.1 Objetivo Geral.....	27
1.1.2 Objetivos Específicos.....	28
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	28
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>30</b>
2.1 LÓGICA FUZZY .....	30
2.1.1 Histórico da Lógica Fuzzy .....	31
2.1.2 Ideias Fundamentais da Lógica Fuzzy .....	32
2.1.3 Conjuntos Fuzzy.....	34
2.1.4 Funções de pertinência da Lógica Fuzzy .....	34
2.1.5 Operações entre Conjuntos Fuzzy.....	38
2.1.6 Formulação do Raciocínio da Lógica Fuzzy .....	39
2.1.7 Regras da Lógica Fuzzy .....	42
2.1.8 Modelos de Sistema Fuzzy.....	44
2.1.8.1 Modelo Mamdani .....	45
2.1.8.2 Modelo Takagi-Sugeno-Kang .....	49
2.1.9 Características da Lógica Fuzzy .....	51
2.1.10 Vantagens e Desvantagens da Lógica Fuzzy.....	52
2.1.11 Perspectivas da Lógica Fuzzy.....	53

---

2.1.12 Aplicações da Lógica Fuzzy utilizando dados Cartográficos e Geodésicos .....	54
2.2 VULNERABILIDADE COSTEIRA À EROSÃO.....	54
<b>3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>58</b>
3.1 BOA VIAGEM (RECIFE) .....	61
3.2 PIEDADE (JABOATÃO DOS GUARARAPES).....	63
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>65</b>
4.1 MATERIAIS .....	65
4.2 MÉTODOS. ....	66
4.2.1 Banco de Dados Espaciais .....	67
4.2.2 Processo de Fotointerpretação e Vetorização .....	71
4.2.3 Levantamento Temporal da Linha de Costa.....	72
4.2.4 Análise do deslocamento da Linha de Costa.....	74
4.2.5 Divisão Setorial da Área de Estudo .....	75
4.2.6 Variáveis adotadas na concepção do modelo fuzzy .....	85
4.2.7 Desenvolvimento da Modelagem Fuzzy.....	86
4.2.7.1 Variável Linha de Costa .....	89
4.2.7.2 Variável Pós-praia.....	91
4.2.7.3 Variável Vegetação .....	94
4.2.7.4 Variável Enrocamento.....	97
4.2.7.5 Variável Benfeitorias de Lazer .....	99
4.2.7.6 Variável Urbanização .....	102
4.2.7.7 Análise da Vulnerabilidade .....	104
4.2.7.8 Construção das Regras .....	106
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>108</b>
5.1 RESULTADO DO DESLOCAMENTO TEMPORAL DA LINHA DE COSTA .....	108
5.2 ANÁLISES PARAMÉTRICAS .....	116
5.2.1 Variável Linha de Costa .....	118
5.2.2 Variável Pós-praia.....	119
5.2.3 Variável Urbanização .....	120
5.2.4 Variável Vegetação .....	122

---

5.2.5 Variável Enrocamento.....	124
5.2.6 Variável Benfeitorias de Lazer .....	126
5.3 ANÁLISES DA MODELAGEM FUZZY .....	127
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>143</b>
6.1 RECOMENDAÇÕES .....	145
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>160</b>
APÊNDICE 1 – AS 27 REGRAS CRIADAS PARA O PROCESSO DE INFERÊNCIA NA CRIAÇÃO DA MODELAGEM FUZZY .....	160
APÊNDICE 2 – AS 114 REGRAS CRIADAS PARA O PROCESSO DE INFERÊNCIA NA CRIAÇÃO DA MODELAGEM FUZZY.....	161

## 1. INTRODUÇÃO

A linha de costa é considerada como uma das feições geomorfológicas mais dinâmicas do nosso planeta (Boak & Turner, 2005; Almeida, 2008; Rocha *et al.*, 2008). Seu monitoramento é necessário para que se possa gerenciar o ambiente costeiro, que pode sofrer erosões, resultantes da combinação de fatores naturais como as tempestades, as correntes marítimas, mudanças sazonais e ação humana (explorações costeiras e as atividades de engenharia) (Rocha *et al.*, 2008; Harley *et al.*, 2011).

Segundo King (1959), as praias são definidas como um ambiente sedimentar costeiro de composição variada, formadas mais comumente por areia, e condicionadas pela interação dos sistemas de ondas incidentes sobre a costa. Sendo assim, a praia seria o trecho que se limita as ondas vindas de mar aberto, próxima à linha de costa, ou seja, é a maior posição que as ondas podem chegar em época de tempestades.

O ambiente praial, segundo Komar (1998) pode ser dividido em quatro partes: dunas, pós-praia, praia média (estirâncio) e ante praia. Em um estudo realizado por Araújo *et al.* (2007) foi possível analisar a ocupação urbana das praias de Pernambuco, onde no setor Metropolitano do Estado apresentou 47% de sua extensão indicando a ocupação concomitante da pós-praia e do estirâncio.

Nos últimos 60 anos, a praia de Boa Viagem e Pina localizada no município de Recife-PE e a praia de Barra da Jangada, Candeias e Piedade localizada no município de Jaboatão dos Guararapes-PE vem sendo urbanizada próximo à linha de costa. Diante das construções cada vez mais sobre a pós-praia e até mesmo do estirâncio, observam-se problemas de erosão costeira.

Esses processos dão origem às praias urbanas que, segundo Smith

---

(1991), são aquelas que circundam cidades, bairros ou balneários consolidados de diversos níveis de desenvolvimento. Ou seja, são as praias sob ocupação desordenada que interferem em processos naturais podendo causar erosão.

A erosão praial é um problema sério que ocorre em vários lugares do mundo podendo alcançar estágios bastante crítico, assim como ocorre ou ocorreu em outras praias no mundo e no Brasil, por exemplo, na Espanha, em trechos do litoral, a urbanização não deixou espaço suficiente para dinâmica costeira ocasionando prejuízos ambientais, comerciais e recreativos (Doody, 2001). No estado de Delaware, localizada na costa leste dos Estados Unidos o enorme valor das propriedades ao longo da costa e o valor econômico da indústria do turismo costeiro combinam para criar um problema de gestão de recursos naturais que é particularmente difícil de resolver, pois na medida em que a indústria do turismo nessa área se expande, há o aumento de barreiras para evitar o avanço do mar devido à erosão das praias (Daniel, 2001).

O problema da erosão costeira é um processo natural que pode ter causas antrópicas, podendo se tornar um problema quando da perda de patrimônios, por exemplo, Morais *et al.* (2008) relatam que nos estudos do problema da erosão costeira na linha de costa em Maceió, os imóveis localizados nos primeiros 50m desvalorizaram-se economicamente. Os usuários da praia atribuem a dificuldade ao acesso a praia e impossibilidades na prática do banho.

Diversos estudos vêm buscando formas de combater a erosão costeira, por exemplo, Ryabchuk *et al.* (2010) apresentam um estudo de longo e curto prazo dos problemas da erosão costeira ao longo da linha de costa no leste do Golfo da Finlândia. Hapke & Plant (2010) apresentam um modelo probabilístico Bayesiano para tentar prever a erosão costeira do penhasco ao norte de San Diego, Califórnia onde verificam-se o aumento gradual do nível do mar ou grandes eventos de tempestade, entre outras pesquisas.

---

Segundo Calliari *et al.* (2003) a morfodinâmica praial é o estudo o qual integra observações morfológicas e dinâmicas numa descrição mais completa e coerente da praia e zona de arrebentação.

Diversos estudos vêm sendo realizados para analisar os índices da vulnerabilidade à erosão costeira, em geral estes utilizam-se de indicadores sociais e econômicos, parâmetros geomorfológicos, taxas de variações de erosão, variações do nível do mar, altura de ondas, fatores antrópicos, atributos naturais, etc., como pode ser visto em Boruff *et al.* (2005), Mazzer *et al.* (2008), Mallmann (2008), Mallmann & Araújo (2010), O’Zyurt & Ergin (2010), Raposeiro & Ferreira (2010).

A zona costeira concentra grande potencial econômico e turístico que por sua importância a Lei de Gerenciamento Costeiro do Estado de Pernambuco (LGCEP) (2010) que trata dos instrumentos e ocupação da zona costeira em seu capítulo V, artigo 10 inciso 2º, propõe que para as áreas urbanizadas não será permitido qualquer tipo de instalações de novas construções, urbanização ou outra forma de utilização do solo na zona costeira, na faixa de 33m (trinta e três metros), considerada como “non aedificandi”, ou valor superior a este quando comprovado em estudo técnico, medidos perpendicularmente em direção ao continente, a partir da linha de preamar máxima da siccitia atual. Ao longo do litoral de Boa Viagem e Piedade é possível observar novas obras muito próxima ao mar demonstrado que a urbanização costeira continua em plena atividade.

Uma forma de realizar um gerenciamento eficiente é investir no monitoramento geodésico da linha de costa, que desempenha um papel essencial para o planejamento territorial. Vários estudos apresentam o monitoramento da linha de costa como, por exemplo: Rocha *et al.* (2008) estudam aplicação de técnicas de posicionamento GPS (*Global Positioning System*) tridimensional para localizar a linha de costa, proporcionando a obtenção do Modelo de Elevação Digital (MED); Gonçalves *et al.* (2012) estuda modelos preditivos utilizando dados temporais de linha de costa e faz uma comparação com diferentes modelagens; entre outros estudos.

---

Segundo Gonçalves (2010), o monitoramento da linha de costa se beneficia do posicionamento global (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*) através de levantamentos geodésicos usando o sistema americano GPS; o sistema russo GLONASS (*GLObal NAVigation Satellite System*); e em breve o sistema europeu Galileo e o sistema chinês Beidou (ou Compass). Outras técnicas que são utilizadas para o mapeamento da linha de costa são as relacionadas ao Sensoriamento Remoto (SR), e entre as mais utilizadas encontram-se: imagens de satélites e fotografias aéreas (aerofotogrametria), LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que tem um sistema de varredura a laser aerotransportado ou terrestre de medição da superfície da terra que tem como princípio a emissão e recepção de raios laser, mais detalhes em Boyd & Foody (2011). Além da tecnologia *Laser-Scanning* que tem um sistema de varredura a laser aerotransportado (ALS) é um sistema de medição da superfície da terra que tem como princípio a emissão e recepção de raios laser, mais detalhes em Boyd & Foody (2011). Detalhes desses métodos são definidos e discutidos, por exemplo, em Boak & Turner (2005).

O uso do SR torna-se fundamental para obtenção de dados espaço temporais atuando como uma ferramenta poderosa para identificação dos problemas causados pelo não planejamento adequado do espaço físico destinado para urbanização, (Li et al., 2011), além de realizar análises de padrões, tendências e interações sobre as áreas costeiras.

Segundo Prado & Galo (2009, 2010) técnicas tradicionais de classificação de imagens multiespectrais têm sido a ferramenta usual para o mapeamento temático da cobertura da terra. Tais técnicas foram projetadas para tratar fenômenos que apresentam limites bem definidos e que podem ser facilmente discretizados. Contudo, existem regiões de incertezas e imprecisões a serem mapeadas, as quais demandam técnicas alternativas, como classificações baseadas em abordagem *fuzzy* que tem se mostrado mais adequada que as abordagens convencionais. As classificações *fuzzy* fornecem informações relacionadas com a incerteza na

---

atribuição dos pixels às classes que podem ser úteis e tornar os mapas temáticos gerados mais confiáveis.

Várias pesquisas têm utilizado a lógica fuzzy como ferramenta de estudo em Cartografia e Geodésia, por exemplo: Antunes *et al.* (2003) explicitam a classificação de imagens digitais de alta resolução com base na orientação a objeto, considerando descritores de forma e textura através das regras fuzzy em uma área teste na zona agrícola no município de Nova Esperança-PR, onde se propôs mapear a mata ciliar ao longo do Rio Porecatú; Lazzarotto *et al.* (2005) utilizaram os indicadores e sistema de inferência fuzzy como avaliação da qualidade de base cartográfica; Kersting & Centeno (2007) fazem a categorização dos objetos por meio de classificador fuzzy, a partir da definição das funções de pertinência baseadas nos descritores de forma, textura e relação entre os objetos; Ximenes *et al.* (2008), verificam a eficácia do modelo da dinâmica do desmatamento na Amazônia através de uma simulação do índice de similaridade fuzzy elevado; Fernandes *et al.* (2010) utilizam a lógica fuzzy e os sistemas de informações geográficas como apoio a decisão do planejamento do uso do espaço, onde elaboraram um mapa de sugestão, utilizando o conjunto difuso para analisar o resultado dos mapas entre outras pesquisas.

O cenário das áreas costeiras no passado em alguns casos não continham elementos geométricos visíveis nas fotografias aéreas eram compostos apenas por feições geográficas naturais tais como vegetação e oceano e com poucas feições identificáveis para serem utilizadas como controle fotogramétrico. Porém, destaca-se que a qualidade métrica obtida por fotografias aéreas é importante e, muitas vezes, são os únicos dados disponíveis para formar um conjunto de informações temporais em zonas costeiras (Gonçalves, 2010).

Atualmente através de um determinado conjunto com dados qualitativos e quantitativos vem se desenvolvendo novos métodos para análise da vulnerabilidade costeira. Para as variáveis são atribuídos pesos

---

proporcionais à influência da vulnerabilidade sendo utilizado como ferramenta de análise para geração de índices numéricos tendo como resultado mapas temáticos temporais da vulnerabilidade ao longo de uma área costeira, como pode ser visto em Mazzer *et al.* (2008), Mallmann & Araújo (2010), Raposeiro & Ferreira (2010).

Mazzer *et al.* (2008), com o objetivo de produzir respostas em relação a vulnerabilidade basearam-se em dois principais pressupostos: as células costeiras que são unidades homogêneas de balanço sedimentar e os processos costeiros que atuam na linha de costa em diversas escalas temporais. Para estabelecer índices de vulnerabilidade costeira foram utilizadas oito variáveis ligadas à morfodinâmica costeira e duas taxas de variação da linha de costa em escalas interanuais e interdecadais, além de analisar os riscos das edificações na orla em relação a um cenário de elevação do nível do mar.

Mallmann & Araújo (2010) utilizaram dados qualitativos e quantitativos codificados em pesos proporcionais à sua influência sobre um Índice de Vulnerabilidade Global (IVG) calculado a partir de cinco Índices Parciais de Vulnerabilidade (IPVs) relacionados à: morfologia costeira, presença de atributos naturais, influência marinha, aos processos costeiros e fatores antrópicos.

Raposeiro & Ferreira (2010) basearam-se em quatro etapas principais: divisão da área de estudo em subáreas com características semelhantes em termos de defesa costeira, determinação da probabilidade de ocorrência de cotas de inundações marítimas, estabelecimento de fatores qualitativos associados às consequências de ocorrência, associação das três etapas iniciais para avaliar os riscos de inundaçāo.

Através das condições morfológicas, atributos naturais, processos costeiros e processos antrópicos foram identificados 6 variáveis (classificadas em termos primário da partição fuzzy) que são respectivamente: pós-praia; vegetação, linha de costa, enrocamento, benfeitorias de lazer e urbanização; dados temporais da linha de costa, além da criação de duas

---

modelagem utilizando lógica *fuzzy*, onde foram utilizadas 27 regras e 114 regras respectivamente para avaliar o desempenho da espacialização da vulnerabilidade costeira à erosão.

As análises espaços-temporais da linha de costa assim como da erosão costeira tendem a fornecer dados para identificar a vulnerabilidade da interface oceano e continente.

Através da lógica *fuzzy* pode-se fazer interpretação de fenômenos não quantitativos e incertos onde se analisa a relação entre os dados de entrada e as variáveis linguísticas a qual eles pertencem através de um grau de pertinência se adequando ao caso de um estudo complexo sobre vulnerabilidade costeira.

Os resultados obtidos através da lógica *fuzzy* mostram questões importantes referentes à vulnerabilidade costeira e podem fornecer subsídios para o gerenciamento costeiro e tomada de decisões em ambientes costeiros.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Estabelecer os princípios de uma modelagem *fuzzy* para estudar uma espacialização da vulnerabilidade à erosão costeira baseada em variáveis disponíveis para os estudos abrangendo as praias de Boa Viagem e Piedade localizadas no município de Recife e Jaboatão dos Guararapes, respectivamente.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Resgatar os dados históricos da área em estudo e organizar os documentos cartográficos contendo mapas, fotografias aéreas, imagens de satélites e levantamentos geodésicos GNSS da linha de costa;
- Identificar as variáveis espaços-temporais que podem ser utilizadas na modelagem fuzzy.
- Aplicar a modelagem proposta para elaborar e analisar a espacialização da vulnerabilidade costeira à erosão.
- Verificar o comportamento da modelagem fuzzy quando são aplicados diferentes número de regras.

### **1.2 Estrutura da Dissertação**

Esta pesquisa está dividida em 6 capítulos. O capítulo 2 trata-se da revisão da literatura onde, são apresentados os conceitos fundamentais de lógica fuzzy nele é descrito um breve histórico da lógica fuzzy, onde foi dividido nas seguintes partes: amostragem dos conjuntos, a operação entre eles, as funções de pertinências possibilitando a formulação das regras que podem ser realizadas em dois modelos: Mamdani e Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Ainda no capítulo 2 detalham-se as ideias fundamentais de vulnerabilidade costeira.

No capítulo 3, descrevem-se os aspectos gerais da área de estudo. No capítulo 4, descrevem-se os aspectos gerais da metodologia aplicada, assim

---

como os materiais e os métodos. No capítulo 5, os resultados e discussões do que se obteve em relação ao deslocamento da linha de costa, as variáveis e o mapa de vulnerabilidade são apresentados. E finalmente no capítulo 6, as conclusões finais e recomendações.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

No presente capítulo apresentam-se os principais conceitos associados à revisão e ao desenvolvimento da pesquisa. De forma mais central são abordados os principais aspectos associados às ideias fundamentais da lógica fuzzy e vulnerabilidade costeira à erosão. As funções, expressões e equações escritas neste capítulo podem ser encontradas em distintos autores, entre eles pode-se destacar: Fernandes (2005) e Rezende (2005).

### 2.1 Lógica Fuzzy

Lógica é a ciência que tem por objetivo o estudo das leis do raciocínio. Segundo Vellasco (2010) a Lógica Fuzzy é uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, descritas em linguagem natural, e convertê-las para um formato numérico.

A lógica clássica é desde o tempo de Aristóteles onde se baseia na bivalência de V (verdadeiro) ou F(falso). A lógica fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy. Esta é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeira ou falsa” da lógica clássica.

Segundo Rodrigues & Santos (2005), um conjunto fuzzy é um conjunto que reflete classes de elementos e não tem fronteiras bem definidas. Consequentemente, em um conjunto fuzzy é difícil de distinguirem os elementos que pertencem e que não pertencem ao conjunto. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a

ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa (Junges, 2006).

### **2.1.1 Histórico da Lógica Fuzzy**

As primeiras noções da lógica fuzzy dos conceitos de multivalência foram desenvolvidas por um lógico polonês Jan Lukasiewicz (1878-1956) que em 1920 introduziu conjuntos com graus de pertinência sendo: 0,  $\frac{1}{2}$  e 1 (3 valores). Mais tarde em 1930, expandiu-se um número infinito de valores entre 0 e 1 ( $n$  valores) para lidar com o Princípio da Incerteza na Mecânica Quântica.

Em meados da década de 60, Lotfi Asker Zadeh observou que os recursos tecnológicos disponíveis eram incapazes de automatizar as atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas não passíveis de processamento através da lógica computacional fundamentada na lógica booleana. Procurando solucionar esses problemas o Prof. Zadeh publicou em 1965 um artigo resumindo os conceitos dos conjuntos fuzzy, revolucionando o assunto com a criação de sistemas fuzzy. Lotfi Asker Zadeh foi o pioneiro na criação da lógica fuzzy que combinou os conceitos da lógica clássica e os conjuntos de Lukasiewicz mais tarde expandindo um número infinito de valores entre 0 e 1. Os conceitos fundamentais de lógica fuzzy podem ser visto em Zadeh (1965).

A utilização da lógica fuzzy vem sendo utilizada e beneficiando distintas áreas. No decorrer das décadas sua utilização vem avançando em distintas áreas de estudos, pesquisas e desenvolvimento. Atualmente é fundamental para aplicações em áreas de incertezas. A partir dos anos 70 foi disseminada em aplicações industriais, após inúmeras tentativas frustradas do Prof. Mandani em controlar uma máquina a vapor com distintos controladores, conseguindo através do sistema fuzzy.

Atualmente sua utilização é fundamental para aplicações que tenham determinados graus de incertezas destacando-se, por exemplo, os controladores fuzzy de plantas nucleares, refinarias, processos biológicos e químicos, trocador de calor, máquina diesel, tratamento de água e sistema de operação automática de trens, UEM (2012a), Cunha *et al.* (2012).

A partir dos anos 80 o Japão iniciou seu uso com aplicações na indústria. Uma das primeiras aplicações foi tratamento de água feito pela *Fuji Electric*. A *Hitachi* inaugura um sistema de metrô. Em 1988 eles criaram o Laboratório Internacional de Engenharia Fuzzy (LIFE), uma cooperativa que compreendia 48 empresas para pesquisa em sistemas fuzzy (UEM, 2012 b).

## **2.1.2 Ideias Fundamentais da Lógica Fuzzy**

O emprego da lógica leva a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões. A lógica Ocidental, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa (Monteiro, 2002).

A lógica fuzzy viola estas suposições. Um sim ou um não como resposta é na maioria das vezes, incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta incerteza intrínseca à informação representada numa linguagem natural tem sido tratada matematicamente no passado com o uso da teoria das probabilidades. Contudo, a lógica fuzzy, com base na teoria dos conjuntos fuzzy tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades (UEM, 2012 c).

Segundo Fernandes (2005), desde então os sistemas baseados em conjuntos fuzzy, ou sistemas nebulosos, vem avançando tanto do ponto de vista teórico quanto prático. Para Corcoll-Spina (2010), a lógica fuzzy traduz

em valores numéricos expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, permitindo converter a experiência humana em uma linguagem decodificável por computador, sendo uma característica fundamental.

A lógica fuzzy é baseada em fundamentos de pertinência a eventos que não são prováveis, mas são eventos reais. Quando se faz uma série de inferências ou declarações preditivas, esses são predicados modificadores de descrições prévias que representam vários graus de certeza com relação à ocorrência, e que são determinísticos na sua origem. Em conjunto fuzzy é difícil de distinguir os elementos que pertencem e que não pertencem ao conjunto. Em contraste, em um conjunto clássico a pertinência é binária, ou seja, um elemento claramente pertence ou claramente não pertence a um conjunto, mais detalhes em Rodrigues & Santos (2004).

A lógica fuzzy vem sendo utilizada para abordar problemas em que modos de raciocínio aproximado, observados comumente na comunicação humana, são utilizados para expressar uma ideia, uma tomada de decisão ou para comunicar um resultado (Corcoll-Spina, 2010).

Em suma,

A lógica difusa ou lógica fuzzy é uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre o F (0) e o V (1). Por exemplo, o valor médio 'TALVEZ' (0,5). Isto significa que um valor lógico difuso é um valor qualquer no intervalo de valores entre 0 e 1. Este tipo de lógica engloba de certa forma conceitos estatísticos principalmente na área de Inferência (Silva et al., 2010).

A lógica fuzzy também pode ser definida como:

A lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados, ao invés de exatos, como está naturalmente acostumados a trabalhar (Filippini, 2003).

---

### 2.1.3 Conjuntos Fuzzy

Segundo Rezende (2005), a teoria dos conjuntos fuzzy pode ser vista como uma extensão da teoria clássica de conjuntos, e foi criada para tratar graus de pertinência.

O conjunto fuzzy  $F$  de um universo  $U$  é caracterizado por uma função de pertinência, representada por  $\mu_F : U \rightarrow [0, 1]$ , onde associa a cada  $x \in U$  um número real  $\mu_F(x)$  no intervalo  $[0, 1]$ , representando o grau de pertinência de  $x$  em  $F$ . Sendo  $U$  o conjunto universo, logo  $F$  é o subconjunto de pontos de  $U$ , para o qual  $\mu_F(x)$  é positivo, ver mais detalhes em Zadeh (1965) e Rezende (2005). Pode-se definir um conjunto universo  $U$  discreto que reúne todos os números, por exemplo, entre -10 e 10 do conjunto  $Z$  dos números inteiros, esta definição pode ser expressa por:

$$U : \{x \in Z / \text{módulo}(x) \leq 10\} \quad (1)$$

A utilização dos conjuntos fuzzy é de um tipo de computação baseada na regra composicional de inferência, com seus operadores associados, resulta em sistemas de decisão, estruturados no formato de uma base de regras nebulosas, adequados para processos dedutivos (Fernandes, 2005).

### 2.1.4 Funções de pertinência da Lógica Fuzzy

Na lógica fuzzy, o grau de pertinência de um dado elemento em relação ao conjunto universo é definido por uma função de pertinência, que assume os valores ao intervalo real  $[0, 1]$ , podendo ter uma pertinência, total e não pertinência. Sendo representado algebricamente por:  $\mu_p(x) : U \rightarrow [0, 1]$ .

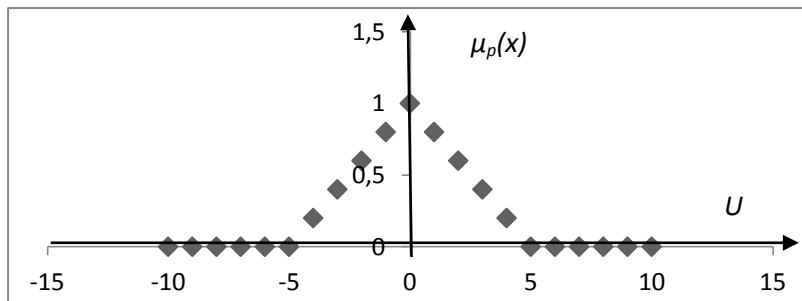
Sendo assim pode-se dizer que  $\mu_p(x)$  estabelece a cada  $x$  um grau de pertinência ao conjunto  $P$ , como  $\mu_p(x) \in [0, 1]$ . Onde esse valor representa a probabilidade do elemento  $x \in P$  (Rezende, 2005).

No conjunto universo mostrado na expressão (1), pode-se ter um conjunto fuzzy, denotado por  $P$  sendo o “conjunto de números pequenos”, onde o grau de pertinência dos elementos de  $U$  em  $P$  é definido por:

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 0,0 & , \text{se módulo } (x) > 5 \\ \frac{5-\text{módulo}(x)}{5} & , \text{se módulo } (x) \leq 5 \end{cases} \quad (2)$$

A Figura 1 representa o conjunto fuzzy variando no intervalo real  $[0,1]$  e os graus de pertinência dos elementos de  $U$  no conjunto  $P$ .

Figura 1 – Representação Gráfica do conjunto fuzzy  $P$  no universo  $U$ .



Fonte: Adaptado de Rezende (2005)

Através da Figura 1, observa-se o quanto uma variável pertence a um determinado conjunto. As funções de pertinência podem ser representadas em formatos distintos, existindo alguns que são mais utilizados, como: o triangular, trapezoidal e gaussiana, como mostram as funções (3, 4 e 5). Além destes formatos existe um bem utilizado em aplicações práticas: *singleton* (conjunto unitário), função (6).

A função triangular tem os seguintes parâmetros  $(a, m, b)$ , onde  $a \leq m \leq b$ , logo a função pode ser escrita como mostra a expressão (3). A função trapezoidal tem os seguintes parâmetros  $(a, m, n, b)$ , onde  $a \leq m, n \leq b$  e  $m < n$ , logo a função pode ser escrita como mostra a expressão (4).

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m} & \text{se } m < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a} & \text{se } a < x \leq m \\ 1 & \text{se } m < x \leq n \\ \frac{b-x}{b-n} & \text{se } n < x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (4)$$

A função Gaussiana tem os seguintes parâmetros ( $m, \sigma_k$ ), onde  $\sigma_k > 0$ , logo a função pode ser escrita da seguinte forma:

$$\mu_p(x) = e^{-\sigma_k(x-m)^2} \quad (5)$$

Onde:  $\begin{cases} m: \text{valor modal} \\ \sigma_k: \text{dispersão} \end{cases}$

A função unitária (*singleton*) tem os seguintes parâmetros ( $m, h$ ), logo a função pode ser escrita da seguinte forma:

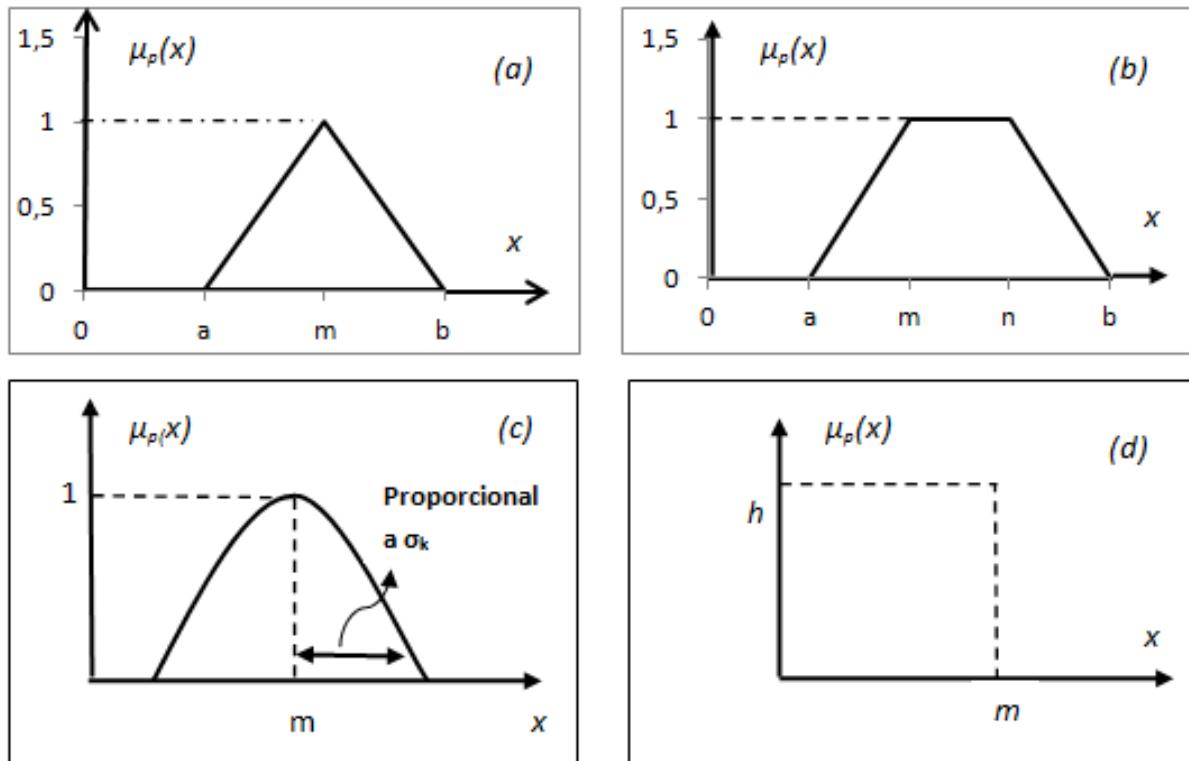
$$\mu_p(x) = \begin{cases} h & \text{se } x = m \\ 0 & \text{caso } x \neq m \end{cases} \quad (6)$$

Para melhor visualização e compreensão dos formatos das funções de pertinência descritos, a Figura 2 especificará os parâmetros associados a cada caso.

Segundo Fernandes (2005) a escolha do formato mais adequado nem sempre é óbvia, podendo inclusive não estar ao alcance do conhecimento do especialista para a aplicação em questão. Mas, existem sistemas fuzzy

cujos parâmetros das funções de pertinência são completamente definidos pelo especialista.

Figura 2 – Representação Gráfica das funções de pertinências: (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) singleton



Fonte: Adaptado de Fernandes (2005)

As funções de pertinências triangulares e trapezoidais são mais adequadas para utilização, pois a ideia de regiões de pertinências de ambas podem ser total, média e nula sendo bem mais objetivos do que as especificações ligadas aos parâmetros das funções Gaussianas (Fernandes, 2005). Onde, cada vez mais os sistemas nebulosos buscam adaptar os parâmetros das funções de pertinências para obter resultados otimizados, a partir dos dados de entrada e saída.

Segundo Jang et. al (1997) e Fernandes (2005), nos sistemas que exige a necessidade do ajuste dos parâmetros pelo método gradiente, a função Gaussiana é bem mais utilizada devido às suas propriedades matemáticas de continuidade e diferencial.

### 2.1.5 Operações entre Conjuntos Fuzzy

Através dos conjuntos fuzzy pode-se realizar diversas operações elementares, sendo que as mais comuns são união, intersecção e complemento.

O conjunto “fuzzy” A é um subconjunto de um conjunto “fuzzy” B se o grau de pertinência de cada elemento do conjunto universo  $U$  no conjunto A é menor ou igual que seu grau de pertinência no conjunto B; ou seja, para todo  $x \in U$ ,  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  e indicamos  $A \subseteq B$  (Rezende, 2005).

O complemento de um conjunto “fuzzy” A em relação ao conjunto universo  $U$  é indicado por  $A'$  e a equação de pertinência é definido como:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in U \quad (7)$$

Através da equação (7) observa-se que se um elemento  $x \in U$  tem grau de pertinência 0,8 no conjunto “fuzzy” A, seu grau de pertinência em  $A'$  será 0,2.

A união de dois conjuntos “fuzzy” A e B é um conjunto “fuzzy” indicado por  $A \cup B$  e a equação de pertinência é definida por:

$$\mu_{A \cup B} = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U \quad (8)$$

Analizando a equação (8), supondo os predicados limpa e protegida de uma praia. Se a praia x é 0,5 (razoavelmente limpa) e tem um valor de proteção igual a 0,7, então:  $\mu_{A \cup B} = 0,7$ .

A intersecção de dois conjuntos “fuzzy” A e B é um conjunto “fuzzy” indicado por  $A \cap B$  e a equação de pertinência é definida como pode ser visto na equação (9).

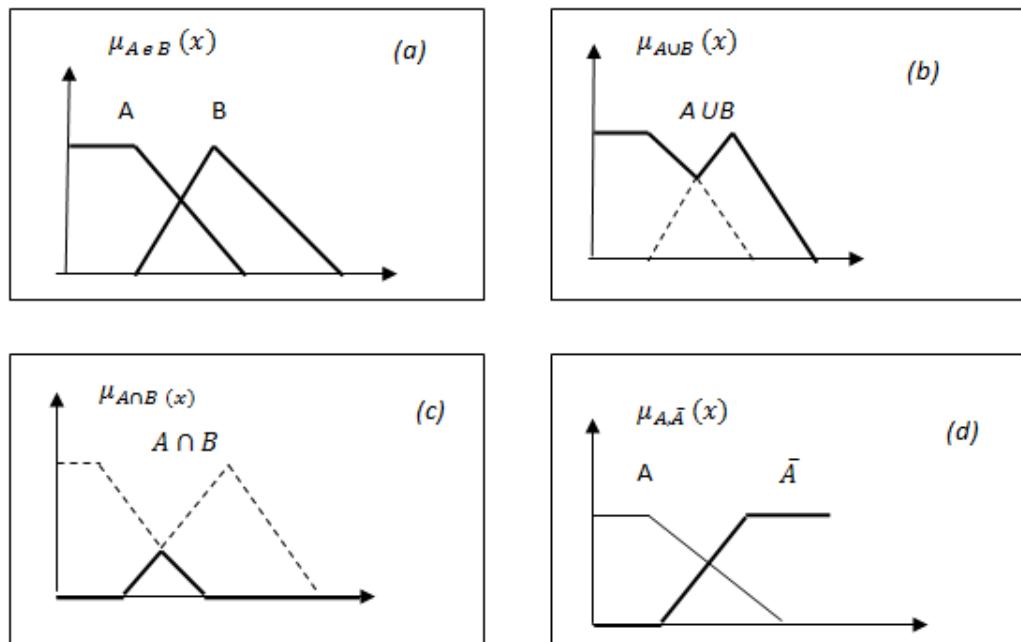
$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \forall x \in U \quad (9)$$

---

Analizando a equação (9), supondo os predicados limpa e protegida de uma praia. Se a praia  $x$  é 0,5 (razoavelmente limpa) e tem um valor de proteção igual à 0,7, então:  $\mu_{A \cap B} = 0,5$ .

A Figura 3 mostra a representação gráfica das Equações (7, 8 e 9) em um conjunto fuzzy A e B.

Figura 3 – Representação Gráfica com conjunto nebuloso: (a) conjuntos A e B; (b) união; (c) intersecção; d (complemento)



Fonte: Adaptado de Fernandes (2005)

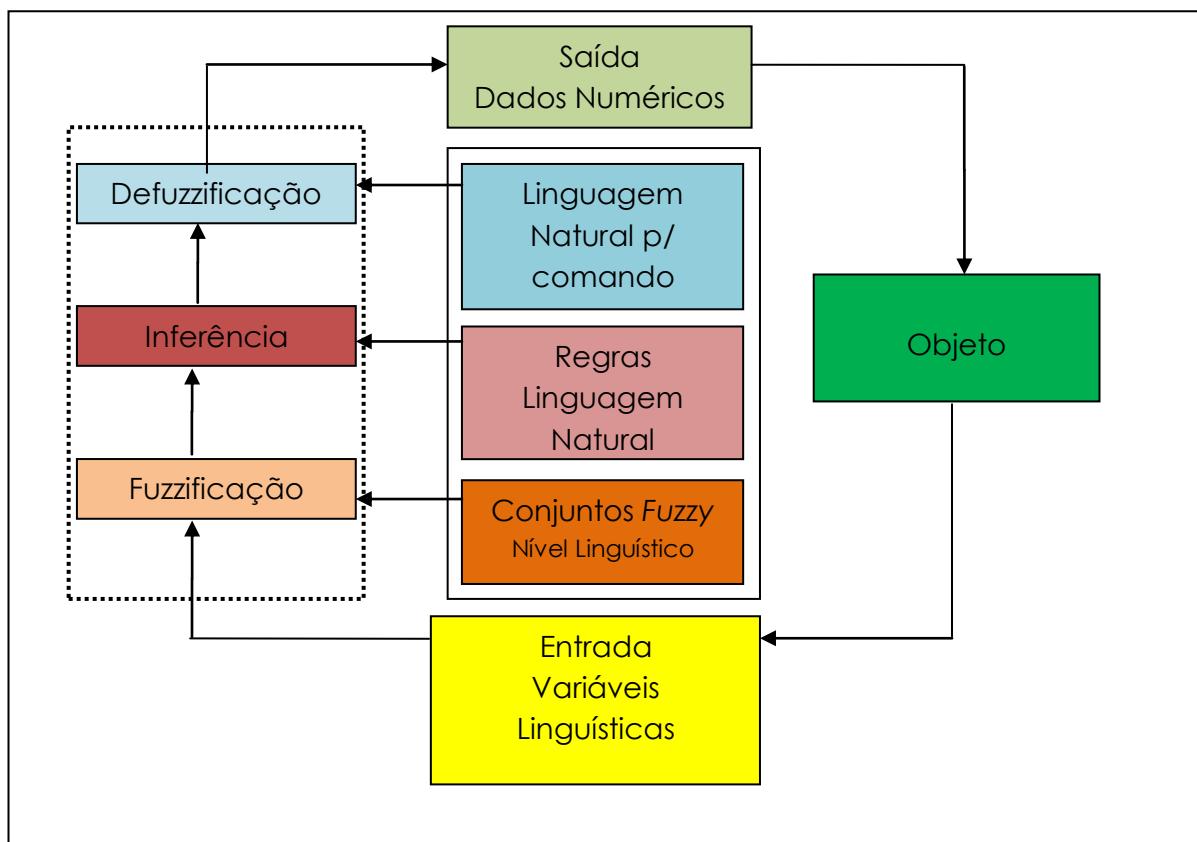
## 2.1.6 Formulação do Raciocínio da Lógica Fuzzy

A formulação do raciocínio fuzzy é formada por três etapas: a fuzzificação, a inferência e a defuzzificação, ver Figura 4. Estas três etapas são muito utilizadas em sistemas de controle para resolver diversos tipos de problemas.

Segundo Gomide *et al.* (2009) o controle fuzzy trata do relacionamento entre entradas e saídas, agregando vários parâmetros de processo e de

controle. Isso permite a consideração de processos complexos, de modo que os sistemas de controle resultantes proporcionam um resultado mais acurado, além de um desempenho estável e robusto. A grande simplicidade de implementação de sistemas de controle fuzzy pode reduzir a complexidade de um projeto a um ponto em que problemas anteriormente intratáveis passam agora a ser solúveis.

Figura 4 – Esquema da Formulação do Raciocínio Fuzzy



Fonte: Adaptado Fernandes (2005); Kohagura (2007)

Em geral, os controladores fuzzy encontram maior utilidade em sistemas não lineares, sendo capazes de superar perturbações e plantas com níveis de ruídos. Além disso, mesmo em sistemas onde a incerteza se faz presente de maneira intrínseca, agregam uma robustez característica. No entanto, provar determinadas propriedades de robustez é uma tarefa difícil neste tipo de abordagem (Correa, 1999).

A *Fuzzificação* é a primeira etapa do tratamento do raciocínio fuzzy, pois é através dela que se transformam as variáveis do problema em valores fuzzy que se encontram na forma determinística ou *Crisp* (número) em forma fuzzy (pertinência) (Silva, 2008). Os valores numéricos são em termos da linguagem natural para cada valor de entrada associamos uma função de pertinência, que permite obter o grau de verdade da proposição: determinar o grau de pertinência de cada conjunto (proposição), limitar o valor da entrada entre 0 e 1.

A *Inferência* é a segunda e a mais importante das etapas do raciocínio fuzzy, pois é através dela que é feita a tomada da decisão, onde se constrói o conjunto de regras obtendo os valores dos termos das variáveis de saída.

Segundo Silva (2012) e Silva & Gonçalves (2012), pode-se destacar que nesse processo ocorre, o seguinte:

- Aplicam-se os operadores fuzzy assim como os operadores da lógica booleana. (Os operadores usados na lógica fuzzy são *and* e *or*, conhecidos como operadores de relação. Na lógica fuzzy são utilizados para definir o grau máximo e mínimo de pertinência do conjunto);
- Aplica-se a implicação (usado para definir o peso no resultado e remodelar a função, ou seja, consiste em criar a hipótese de implicação);
- Combinam-se todas as saídas fuzzy possíveis (em um único conjunto fuzzy, algo semelhante ao processo de união e intersecção, na teoria dos conjuntos booleanos, ou seja, ocorre a combinação de todas as saídas).

Através da inferência é efetuado o raciocínio permitindo conclusões a partir de fatos conhecidos (*min-max*) e das variáveis linguísticas de

---

entrada e saída.

Segundo Silva (2008) a inferência possui duas fases distintas, a avaliação da implicação de cada regra e a composição das conclusões de todas as regras em um valor consolidado. Em Mendel (2001) é mostrado que existem muitos procedimentos inferenciais na lógica fuzzy, porém os mais utilizados são o Mamdani e o TSK (mais detalhes no 2.1.8).

A defuzzificação é a terceira e última etapa do raciocínio fuzzy, pois nessa etapa ocorre a transformação das variáveis que se encontram na forma fuzzificada para forma determinística (*Crisp*), determinando o valor real da(s) saída(s) (Silva, 2008). De forma geral pode-se dizer que a defuzzificação transforma o resultado fuzzy em um resultado nítido, ou seja, ele transforma o dado nebuloso em dado quantitativo (consiste em retornar os valores, obter um valor numérico dentro da faixa estipulada pela lógica fuzzy).

Os métodos mais utilizados para defuzzificação ou conversão fuzzy em escalar são: Centro de Massa ( $C_oM$ ), Média do Máximo ( $M_oM$ ), Centro da Área ( $C_oA$ ), Média Ponderada (MP), serão descritos nos subitens 2.1.8.1 e 2.1.8.2, mais detalhes em Gomide & Gudwin (1994), Fernandes (2005), Rezende (2005), Shaw & Simões (2007) e Silva (2008).

Em suma, o conhecimento do Raciocínio Fuzzy é representado através de proposições ou regras.

### **2.1.7 Regras da Lógica Fuzzy**

Segundo Rezende (2005) as regras fuzzy são a maneira mais comum de armazenar informações em uma base de conhecimento fuzzy. A regra normalmente é formada por duas declarações principais: *if* e *then*. Essas declarações relacionam as variáveis do modelo com os conjuntos fuzzy, ou seja, relacionam os antecedentes com os consequentes.

As regras fuzzy são baseadas em implicações lógicas que estando associada à lógica fuzzy requer definição de conceitos distintos das proposições e implicações. Elas podem ser condicionais ou incondicionais e sua ordem de execução depende do modelo adotado. No caso de modelos com somente regras condicionais ou incondicionais, a ordem é irrelevante. Se o modelo contém ambos os tipos de regras, a ordem é importante. As regras incondicionais devem ser executadas antes e são geralmente usadas como padrão, isto é, se nenhuma regra condicional é executada, então o valor da solução é determinado pela regra incondicional, segundo Silva (2008).

A construção das regras requer algumas propriedades como:

- Combinação das variáveis de entrada utilizando os conectivos *and* (mínimo) e *or* (máximo);
- Cada conjunto de regras deve ter uma saída correspondente, mas não é necessário as saídas serem distintas;
- Duas ou mais regras com as mesmas entradas devem ter saídas mutuamente exclusivas. Caso contrário, as regras são inconsistentes.

De acordo com uma regra ou um conjunto delas que modelam o comportamento de um sistema fuzzy, o objetivo do controle é gerenciar o comportamento de alteração de uma ou mais entrada, ou seja, substitui o papel do modelo matemático por um conjunto de regras que descrevem o comportamento desse sistema. Segundo Fernandes (2005) os sistemas dependem da especificação de uma série de elementos, que incluem a quantidade e o tipo de regras fuzzy, os parâmetros das funções, a semântica das regras que participam do raciocínio aproximado e os operadores do mecanismo de inferência utilizados pra obter uma saída, a partir dos dados de entrada, mais detalhes também podem ser vistos em Takagi &

---

Sugeno (1983), Lee (1990), Sugeno & Yasuakawa (1993).

O conjunto de regras definem os procedimentos das variáveis de entradas, o seu formato é do tipo:

Se (*IF*) – antecedente; Então (*THEN*) – consequente. No Quadro 1 mostra exemplos de regras que podem ser aplicadas em um ambiente costeiro.

Quadro 1 – Regras fuzzy com antecedente e consequente

Se linha de costa é instável e enrocamento é presente então a vulnerabilidade é muito alta
Se linha de costa é moderada e enrocamento é presente então a vulnerabilidade é alta
Se linha de costa é estável e enrocamento é presente então a vulnerabilidade é moderada
Se linha de costa é instável e enrocamento é adjacente então a vulnerabilidade é alta
Se linha de costa é moderada e enrocamento é adjacente então a vulnerabilidade é moderada
Se linha de costa é estável e enrocamento é adjacente então a vulnerabilidade é moderada
Se linha de costa é instável e enrocamento é ausente então a vulnerabilidade é alta
Se linha de costa é moderada e enrocamento é ausente então a vulnerabilidade é moderada
Se linha de costa é estável e enrocamento é ausente então a vulnerabilidade é baixa

### 2.1.8 Modelos de Sistema Fuzzy

Existem diversos modelos de sistema fuzzy. Os modelos serão utilizados de acordo com as propriedades sintáticas definidas, onde o modelo de processamento definido do sistema de conhecimento vai depender basicamente do armazenamento de informações das variáveis escolhidas (Rezende, 2005). O antecedente geralmente é formado por proposições linguísticas e a distinção entre os modelos se dão através das regras fuzzy (Fernandes, 2005).

Entre os modelos mais conhecidos destacam-se o Modelo de Mamdani e o Modelo de Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

O Modelo de Mamdani utiliza conceitos da lógica fuzzy em processamento de conhecimento, sendo consequente das regras fuzzy. A

saída é representada por um conjunto fuzzy resultante da agregação da inferência de cada regra. Para se obter a saída utilizam-se métodos de defuzzificação, como: Centro de Massa ( $C_oM$ ), Média do Máximo ( $M_oM$ ), Centro da Área ( $C_oA$ ).

O modelo de TSK é representado por uma função das variáveis de entrada. A saída é obtida através da Média Ponderada (MP) das saídas.

A seguir serão abordados esses dois métodos, sendo que o Modelo de Mamdani será analisado com mais detalhes, pois é o modelo escolhido para a modelagem da área costeira devido a necessidade de mais de uma classificação para análise da vulnerabilidade. Para o modelo TSK serão indicadas referências para aprofundamento.

#### **2.1.8.1 Modelo Mamdani**

No modelo Mamdani as regras possuem relações fuzzy em seus antecedentes como em seus consequentes, onde são mapeados através de conjuntos fuzzy.

Segundo Rezende (2005) o modelo Mamdani inclui módulos de interface que transformam as variáveis de entrada em conjuntos fuzzy equivalentes e, posteriormente, as variáveis fuzzy geradas em variáveis numéricas proporcionais, adequadas para os sistemas de atuação existentes.

A regra de inferência tradicional utilizada para o processamento do modelo de Mandani é a inferência Máx-Min, onde utiliza as operações de união e intersecção entre os conjuntos da mesma forma. Caso haja mais de uma variável de entrada é necessário aplicar uma técnica de agregação dos conjuntos antecedentes, a fim de que seja gerado um conjunto consequente para cada regra de inferência, onde a combinação desses conjuntos consequentes gera um conjunto final de saída que é geralmente

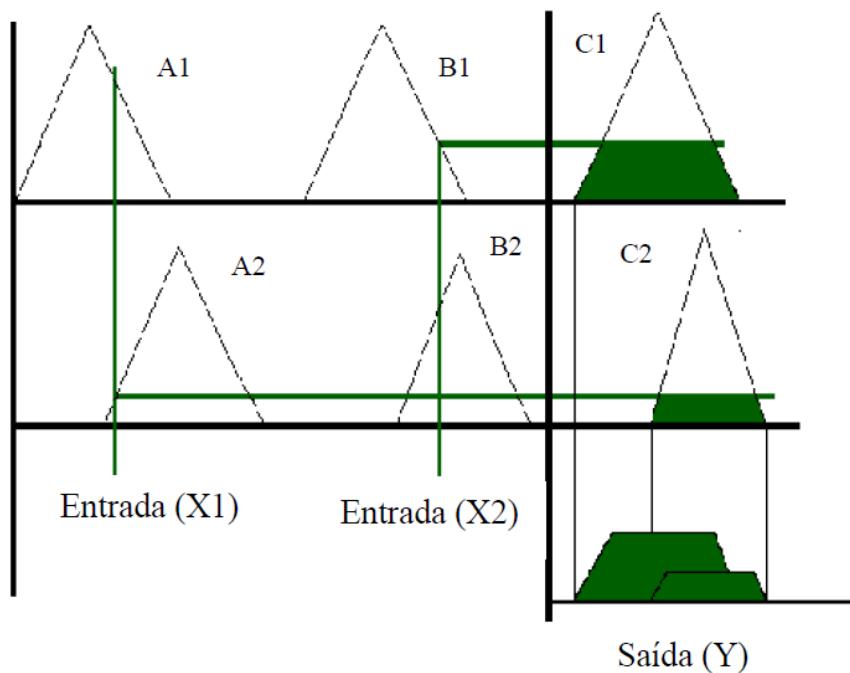
resultado do operador união (máximo), como mostra a Figura 5.

Através da regra de produção fuzzy genérica

$$\text{if } x_1 = A_1 \text{ and } x_2 = A_j \text{ and } \dots \text{ and } x_p = A_j \text{ then } y_1 = B_1 \text{ and } y_2 = B_m \quad (10)$$

Em (10),  $x_i$  são as entradas do sistema,  $A_1, \dots, A_j$  são os termos primários definidos nas partições fuzzy de cada variável de entrada,  $y_1$  e  $y_2$  são variáveis de saída e  $B_1, \dots, B_m$  são termos primários em suas partições fuzzy.

Figura 5 – Processo Máx-Min de Mamdani



Fonte: Fernandes (2005)

Sabe-se que o raciocínio fuzzy é formado pela fuzzificação, inferência e defuzzificação. A fuzzificação em Mamdani passa pelo processamento de transformação de informações quantitativas em qualitativas, onde é calculado para a  $k$ -ésima regra da Base de Conhecimento um coeficiente de disparo  $D^{(k)}$ ,  $T$  a norma. Os índices  $k$  nos conjuntos fuzzy denotam os termos primários que compõem a regra na Base de Conhecimento, como

mostra a equação (11).

$$D^{(k)} = T \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] = \min \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] \quad (11)$$

O processo de *inferência* através da equação (12) mostra a composição deste conjunto para o caso da saída  $y_2$  da regra mostrada em (10), onde o universo de discurso desta variável de saída é composto pelos elementos de  $y \in U_{y_2}$ . O processo transforma uma informação qualitativa em outra informação qualitativa.

$$\mu_{B'_i}(y) = \bigvee_{k=1 \dots n} \left[ T \left( D^{(k)}, \mu_{B_i}(y) \right) \right] = \max_{k=1 \dots n} \left[ \min \left( D^{(k)}, \mu_{B_i}(y) \right) \right], \forall y \in U_{y_2} \quad (12)$$

Segundo Rezende (2005) o conjunto *fuzzy* gerado durante o processo de inferência pode ser utilizado diretamente em um diagnóstico qualitativo de tomada de decisão ou será convertido em um valor escalar proporcional para atuação externa por meio de atuadores convencionais, no caso de sistema de controle.

No processo de *defuzzificação* utiliza-se os métodos de: Centro de Massa (C<sub>o</sub>M), Média do Máximo (M<sub>o</sub>M), Centro da Área (C<sub>o</sub>A).

O C<sub>o</sub>M é calculado para um dado conjunto *fuzzy* com a saída proveniente de dados do conhecimento codificado, a abscissa do ponto de C<sub>o</sub>M correspondente é utilizado como valor da *defuzzificação*, a equação (13), mostra como este método é implementado.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{y \in U_{y_2}} y \mu_{B'_i}(y)}{\sum_{y \in U_{y_2}} \mu_{B'_i}(y)} \quad (13)$$


---

Sendo:  $\begin{cases} \mu_{B'_i}(y) & - \text{Conjunto fuzzy de saída} \\ \widehat{y}_2 & - \text{valor escalar correspondente} \end{cases}$

O C<sub>o</sub>M é o resultado da transformação de C (conjunto nebuloso definido em um universo qualquer chamado Z) em um valor não fuzzy, e  $\mu_c$  é a função de pertinência em C e Z, podendo ser calculado através de (14).

$$\widehat{Z} = \frac{\int_z \mu_c(z) z dz}{\int_z z \mu_c(z) dz} \quad (14)$$

O (M<sub>o</sub>M) é o valor numérico do conjunto de saída correspondente a média dos pontos máximos locais da função de pertinência, produzido pelo processo de inferência, como mostra a equação (15).

$$\overline{y}_2 = \frac{\sum_{\substack{\widehat{y} \in Uy_2 \\ \widehat{y}}} \widehat{y}_k \mu_{B'_i} \left( \begin{matrix} \widehat{y} \\ k \end{matrix} \right)}{n}; \text{ onde } \widehat{y} = \max_{y \in U, U' \subseteq Uy_2} [\mu_{B'_i}(y)] \quad (15)$$

Segundo Fernandes (2005), o C<sub>o</sub>A, também é chamado de Centro de Gravidade, pois calcula o centroide da área composta na qual representa o termo de saída fuzzy ( $\mu_{out}$ ), esse termo de saída fuzzy é composto pela união de todas as contribuições de regras. O método C<sub>o</sub>A calcula o centroide da área, equação 16.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_{out}(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{out}(u_i)} \quad (16)$$

O centroide é um ponto que divide a área de  $\mu_{out}$  em duas partes

---

iguais, como mostra a equação (16), onde  $\mu_{out}(u_i)$  é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência fuzzy e  $u$  é a posição do centroide da função de pertinência individual.

### 2.1.8.2 Modelo Takagi-Sugeno-Kang

O modelo TSK é um modelo que funciona como aproximador para sistema que pode ser completa ou satisfatoriamente representados apenas por meio de suas relações de entrada e saída. Assim como o modelo de Mamdani o TSK é também baseado na utilização de uma base de regras condicionais de inferência. Sendo que enquanto em Mamdani as regras são formadas através de relações fuzzy, no TSK é composto por equações paramétricas relacionadas as entradas e saídas. Na expressão (17) mostra a regra genérica de um modelo TSK.

$$if x_1 = A_i \text{ and } x_2 = A_j \text{ and } \dots \text{ and } x_p = A_m \text{ then } y = \emptyset(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p) \quad (17)$$

O processamento em TSK é similar ao dos modelos de Mamdani. Sendo que a distinção é que em Mamdani a norma  $T$  utilizada na maioria das aplicações é função “*min*”. Então em TSK tem-se a  $k$ -ésima regra da base de conhecimento um coeficiente de disparo  $D^{(k)}$ , onde os índices  $k$  nos conjuntos fuzzy denotam os termos primários que compõem a regra na Base de Conhecimento, como mostra a equação (18).

$$D^{(k)} = T \left[ \mu_{A_1^k}(x_1), \mu_{A_2^k}(x_2), \dots, \mu_{A_p^k}(x_p) \right] \quad (18)$$

De acordo com Rezende (2005) um modelo TSK com múltiplas saídas sempre pode ser transformado em múltiplos modelos de saída única. A saída

numérica é calculada diretamente pela soma das saídas das regras, ponderada pelos valores de ativação  $D^{(k)}$ , como mostra a equação (19).

Geralmente o modelo de TSK é utilizado para substituir um modelo matemático convencional em esquema de controle ou modelagem de sistemas reais. Sendo que há necessidade do modelo ser ajustado para representar o comportamento do sistema real (Rezende, 2005).

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1 \dots k} D^{(i)} \phi_i(x_1, \dots, x_p)}{\sum_{i=1 \dots k} D^{(i)}} \quad (19)$$

O algoritmo de mínimos quadrados recursivos (MQR) pode ser utilizado para estimar a minimização do erro quadrado entre a saída do modelo TSK e os dados de saída disponível. Para estimar-se o MQR considera-se uma matriz  $X$  de dimensões  $m \times k(p+1)$ , onde  $m$  são os padrões,  $k$  as regras e  $p$  são as entradas, e um vetor  $Y$  de dimensão  $m$  e um vetor  $P$  de parâmetros de dimensão  $k(p+1)$ , ver em (20 e 21).

$$X = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \dots & \beta_{k1} & x_{11}\beta_{11} & \dots & x_{11}\beta_{k1} \\ & & & x_{p1}\beta_{11} & & \\ \dots & & \dots & & & \dots \\ \beta_{1m} & \dots & \beta_{km} & x_{1m}\beta_{1m} & & \\ \dots & & x_{p1}\beta_{1m} & \dots & & x_{p1}\beta_{km} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$Y = [y_1, \dots, y_m]^T \quad P = [P_{10}, \dots, P_{k0}, P_{11}, \dots, P_{k1}, \dots, P_{kp}]^T \quad (21)$$

Então os parâmetros  $P$  podem ser calculados por:

$$P = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (22)$$


---

Mais detalhes do processamento de TSK além de aplicações podem ser vistos em Takagi & Sugeno (1983), Sugeno & Yasukawa (1993), Rezende (2005), entre outros.

### 2.1.9 Características da Lógica Fuzzy

A lógica fuzzy é conceitualmente fácil de entender, tem uma ampla flexibilidade e está baseada em uma linguagem natural e não em números, ou seja, os valores verdades são expressos linguisticamente. Por exemplo: ausente, presente, instável, moderada, estável, muito vulnerável, vulnerável, não vulnerável, etc.

- Possui vários modificadores de predicado, como por exemplo: *muito*, *moderado*, *pouco*, *bastante*, *médio*, etc.
- Possui também um amplo conjunto de quantificadores, como por exemplo: *poucos*, *vários*, *em torno de*, *usualmente*, etc.
- Faz uso das probabilidades linguísticas, como por exemplo: *provável*, *improvável*, que são interpretados como números fuzzy e manipulados pela sua aritmética.
- Manuseia todos os valores entre 0 e 1, tomando estes, como um limite apenas. Havendo uma tolerância na imprecisão dos dados.
- Faz a modelagem da função não linear.
- Combina as técnicas de controle convencionais sendo construída com base na experiência dos especialistas.

Para aplicação da lógica fuzzy é realizado uma relação entre o dado e o agrupamento que varia de 0 a 1, onde o 0 exclui totalmente esse dado do agrupamento e o 1 indica a inclusão total do dado no agrupamento (Guiera et al., 2005).

### **2.1.10 Vantagens e Desvantagens da Lógica Fuzzy**

Algumas vantagens e desvantagens da utilização da Lógica Fuzzy, vem sendo estudada e aperfeiçoada desde o seu pioneirismo em 1965 por Zadeh, detalhes dessas vantagens vem sendo trabalhadas por distintos autores entre eles pode-se citar: Bilobrovec (2005), Fernandes (2005) e Silva (2008).

A lógica fuzzy apresenta uma série de vantagens, dentre as quais se destacam:

- Requer poucas regras, valores e decisões;
- Mais variáveis observáveis podem ser valoradas e o uso de variáveis linguísticas nos deixa mais perto do pensamento humano;
- Simplifica a aquisição da base do conhecimento e manuseia todos os valores entre o intervalo de 0 e 1;
- Proporciona um rápido protótipo dos sistemas possibilitando a captura do pensamento humano através da utilização de variáveis linguísticas. Simplificando a solução de problemas.

Assim como apresenta vantagens, apresenta algumas desvantagens ao trabalhar com relações físicas naturais, pois há uma necessidade maior

---

para verificar a causa e o efeito das variáveis trabalhadas.

De acordo com Silva (2008), sistemas baseados em lógica fuzzy são mais fáceis de entender, manter e testar, são robustos e operam com falta de regras ou com regras defeituosas.

Sendo assim as desvantagens que apresentam são: fazer mais simulações e testes; quem manuseia não aprende facilmente; há dificuldades em estabelecer regras corretamente; e não há uma definição matemática precisa.

### **2.1.11 Perspectivas da Lógica Fuzzy**

Uma grande variedade de aplicações comerciais e industriais está disponível, destacando-se neste cenário o Japão, EUA e Alemanha. Dentre os exemplos típicos incluem produtos de consumo tais como geladeiras (Sharp), ar condicionado (Mitsubishi), câmeras de vídeo (Canon, Panasonic), máquinas de lavar roupa (Sanyo), aspiradores de pó (Barbosa, 2005; UEM, 2012 d).

Na indústria automotiva destacam-se transmissões automáticas (Nissan, Lexus), injeção eletrônica, suspensão ativa, freios antibloqueantes. Sistemas industriais incluem controle de grupo de elevadores (Hitachi, Toshiba), veículos autoguiados e robôs móveis (NASA, IBM), controle de motores (Hitachi), ventilação de túneis urbanos (Toshiba), controle de tráfego urbano, controle de parada e partida de trens de metrô (Sendai, Tokio) (UEM, 2012 d).

Apesar do uso e da aplicação no Brasil ser incipiente, várias indústrias e empresas vêm desenvolvendo produtos e serviços (Villares, IBM, Klockner & Moeller, Robertshaw, Yokogawa, HI Tecnologia) (UEM, 2012 d).

De fato nos últimos anos, o potencial de manuseio de incertezas e de controle de sistemas complexos tornados possíveis pela Lógica Fuzzy estão

sendo combinados com Redes Neurais Artificiais, que por sua vez, possuem características de adaptação e aprendizagem (UEM, 2012 d). Sendo assim cada vez mais se espera que a Lógica Fuzzy sirva como ferramenta para diversas áreas.

### **2.1.12 Aplicações da Lógica Fuzzy utilizando dados Cartográficos e Geodésicos**

Através de dados cartográficos e geodésicos diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas utilizando lógica fuzzy seja em questões relacionadas a solo (Juang *et al.*, 1996), ao potencial de erosão (Mitra *et al.*, 1998; Alves *et al.*, 2002), áreas susceptíveis a escorregamentos (Lee & Juang, 1992), impactos de áreas com aterros sanitários (Lima, 1995; Macbean *et al.*, 1995) e resíduos (Menezes, 1995).

Em Lizarazo (2010), a lógica fuzzy é utilizada para estimar áreas de superfície impermeáveis através de imagens de alta resolução; Hester *et al.* (2010) utilizaram imagens de alta resolução para detecção de mudanças na cobertura da terra com base no raciocínio fuzzy desenvolvendo mapa temático; Benz *et al.* (2004) utiliza objetos fuzzy para análise orientada através de dados de sensoriamento remoto e informações SIG prontas; Hanson *et al.* (2010) explora uma metodologia para resultados dedutivo para análise geomorfológica através de conceitos da lógica fuzzy onde reconhece a não linearidade da morfologia costeira.

## **2.2 VULNERABILIDADE COSTEIRA À EROSÃO**

Ainda há poucas pesquisas integrativas e envolvendo previsões da

evolução da vulnerabilidade costeira, embora tais estudos estão emergindo, como pode ser visto em vários casos, tomados como referência: Clark *et al.* (1998), Adger (1999), Bryan *et al.* (2001), Daniel (2001), Kokot *et al.* (2004), Boruff *et al.* (2005), Doody (2005), Adger (2006), Mazzer *et al.* (2008), Mallmann (2008), Neves & Muehe (2008), Vafeidis *et al.* (2008), Saengsupavanich *et al.* (2009), Marandola Jr. & Hogan (2009), O’Zyurt & Ergin (2009), Mallmann & Araújo (2010), O’Zyurt & Ergin (2010), Raposeiro & Ferreira (2010), Wu *et al.* (2010), Ahmad & Lakhani (2011), entre outras pesquisas.

É comum pessoas não especialistas em área costeiras utilizarem como sinônimos riscos e vulnerabilidades para avaliar o potencial de risco dos eventos naturais ao longo da costa, mas Boruff *et al.* (2005) e Marandola Jr. & Hogan (2009) descrevem a definição desses conceitos, onde risco é a probabilidade de um evento ocorrer, enquanto vulnerabilidade é definido como os fatores que aumentam ou atenuam os efeitos de um extremo natural, evento tecnológico ou humano e os fatores que diminuem a comunidade ou a capacidade do indivíduo para se recuperar após o evento ocorrer, também pode ser visto em Mazzer *et al.* (2008).

A vulnerabilidade à erosão costeira está associada a diversos processos morfodinâmicos, onde é utilizado uma ampla gama de métodos para analisar o grau de vulnerabilidade. Em Bryan *et al.* (2001), a vulnerabilidade costeira relacionada ao nível médio do mar que são afetados por uma complexa interação de quatro parâmetros físicos ambientais (elevação, índices de erosão, aspectos físicos e inclinação). Para Clark *et al.* (1998), a vulnerabilidade significa a inclusão de tipos múltiplos em perigo a análise de riscos durante um determinado local, enquanto para Wu *et al.* (2010), a vulnerabilidade tem o potencial de exposição a um perigo físico.

Para Adger (1999), as causas da vulnerabilidade estão relacionadas com o ambiente e variáveis sociais. Sendo que as mudanças nas causas sociais de vulnerabilidade, muitas vezes acontecem em rápidas escalas

---

temporais do que em caso de mudanças ambientais. Portanto a vulnerabilidade não pode ser diretamente comparada com os efeitos físicos (O’Zyurt & Ergin, 2009).

Adger (2006), em uma análise da vulnerabilidade, observa a importância da ferramenta analítica na descrição de estados de susceptibilidade de sistemas físicos e sociais a danos, onde é possível utilizar os resultados de um estudo para orientar e gerar ações no sentido de reduzir riscos. No entanto, seu conceito, não é facilmente quantificado e reduzido a uma medida, visto que envolve várias etapas como: identificação das variáveis, definição de algoritmos para integração, classificação e interpretação dos resultados.

Mallmann (2008) para identificação da vulnerabilidade costeira utilizou as seguintes variáveis: a morfologia costeira, influência antrópica, processos costeiros e atributos naturais. Sabe-se que o aumento do nível médio dos mares também contribui para uma maior corrente de energia erosiva e ondas próximo a costa, onde os eventos extremos das ondas têm contribuído diretamente com processos de mudanças físicas em áreas costeiras (Ahmad & Lakhan, 2011).

Segundo Vafeidis *et al.* (2008) o estudo de vulnerabilidade tem fornecido avaliações qualitativas dos potenciais impactos do aumento do nível médio do mar, no entanto o âmbito destes estudos tem sido limitado devido a disponibilidade de dados e qualidade destes, constituindo um problema para análises. Novos problemas relacionados com a vulnerabilidade ainda podem ser apresentados com a construção de edifícios, estradas e outras infraestruturas na orla costeira (Daniel, 2001).

Nos últimos anos, esforços vêm sendo feitos para identificar as áreas mais vulneráveis para posterior monitoramento e detalhamento das razões dos desequilíbrios observados (Muehe, 2006). Segundo Daniel (2001) o problema da erosão não consiste em tempestades ou do nível do mar e sim na questão dos seres humanos localizarem suas casas, estradas e diques ao longo do litoral bloqueando toda a área de recreação e assim o

---

estreitamento da praia.

Os enrocamentos ou barreiras costeiras são utilizados em locais com o intuito de proteger o continente contra as forças do vento, ondas e marés (Neves & Muehe, 2008), mas normalmente as praias que tem essas barreiras construídas são as que estão bastante vulneráveis a erosão, pois geralmente nos locais onde havia dunas ou vegetação dão lugar a essas barreiras.

### 3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Recife, conforme dados do censo de 2010, conta com uma população de 1.537.704 habitantes e apresenta uma superfície territorial de 218,498 km<sup>2</sup>, com 7.037,6 hab/km<sup>2</sup>. Limitando-se ao norte com as cidades de Olinda e Paulista, ao sul com o município de Jaboatão dos Guararapes, a oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe, e a leste com o Oceano Atlântico. Jaboatão dos Guararapes conforme dados do censo de 2010, conta com uma população de 644.620 habitantes, apresenta uma superfície territorial de 258, 566 km<sup>2</sup>, com 2.493,06 hab/km<sup>2</sup>. Limitando-se ao norte com o município de Recife, ao sul com o município de Cabo de Santo Agostinho, a oeste com as cidades de São Lourenço da Mata e Moreno, e a leste com o Oceano Atlântico. O município na área fluvial recebe influência das Bacias Hidrográficas do Rio Jaboatão, Rio Pirapama e Tejipió. Além de possuir a maior lagoa estuarina (Lagoa Olho D'água) na área urbana do estado do Estado de Pernambuco.

Segundo Aureliano (2000) a caracterização da ocupação do município se deu através de loteamentos residenciais, industriais e comerciais, sendo que, nas ultimas décadas, houve uma grande ascensão na construção de edifícios, condomínios e hotéis ao longo da orla.

A Tabela 1 mostra os dados de área, população e densidade demográfica em 2010 dos municípios na malha urbana de Recife e Jaboatão dos Guararapes, totalizando aproximadamente três milhões e meio de habitantes.

Segundo Manso *et al.* (2006), o litoral pernambucano foi delimitado e setorizado com base na sua situação geográfica e política em 21 municípios, distribuídos numa faixa de 187 km, que se estende desde o município de Goiana, ao norte, até o município de São José da Coroa Grande, ao sul. A costa pernambucana apresenta baixa altitude, chegando a atingir, em

vários pontos, cota inferior ao nível médio do mar.

Tabela 1 – Área total e população dos municípios na malha urbana

<b>Municípios</b>	<b>População (hab)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Densidade Demográfica (hab/km<sup>2</sup>)</b>
Cabo de Santo Agostinho	185.025	446,578	414,32
Camaragibe	144.466	51,194	2.821,93
Jaboatão dos Guararapes	644.620	258,566	2.493,06
Moreno	56.696	196,071	289,16
Olinda	377.779	41,659	9.068,36
Paulista	300.466	97,364	3.086,01
Recife	1.537.704	218,498	7.037,61
São Lourenço da Mata	102.895	262,157	392,49
<b>Total</b>	<b>3.349.651</b>	<b>1572,087</b>	<b>2.130,70</b>

Fonte: IBGE (2010)

O litoral do setor do núcleo metropolitano de Pernambuco é formado pelos municípios de Jaboatão dos Guararapes, Olinda e Recife totalizando aproximadamente uma faixa costeira de 30 km. Limitando-se ao norte com o município de Paulista e ao sul com o município de Cabo de Santo Agostinho.

O Recife tem um litoral formado pelas praias do Pina e Boa Viagem que totalizam aproximadamente 8,5 km de linha de costa, enquanto Jaboatão é formado pelas praias de Barra da Jangada, Candeias e Piedade que totalizam aproximadamente 8 km, conforme mostra a Tabela 2 com a extensão litorânea das praias.

Tabela 2 – Faixa Litorânea de Recife e Jaboatão dos Guararapes

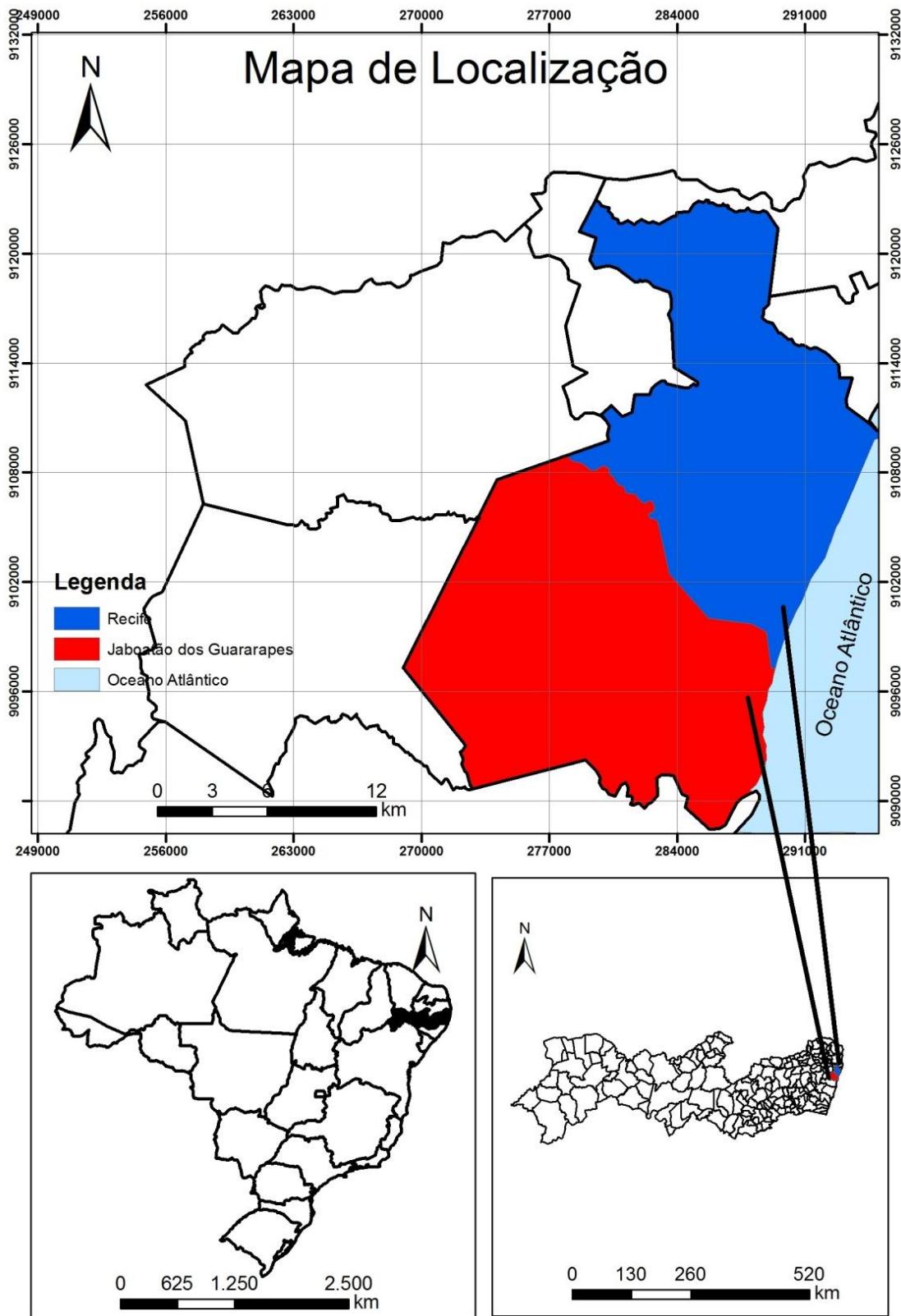
<b>Praias</b>	<b>Faixa Litorânea (km)</b>
Boa Viagem	7,38
Pina	1
Barra de Jangada	0,4
Candeias	3
Piedade	4,5

Fonte: Silva et al. (2012)

A Figura 6 apresenta um mapa de localização do Estado de Pernambuco na Região Nordeste do Brasil, a ampliação do Estado e em particular um polígono que define os municípios de Recife e Jaboatão dos

Guararapes.

Figura 6 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Recife e Jaboatão dos Guararapes



O Rio Capibaribe é um dos rios do estado de Pernambuco onde está localizado na porção norte oriental entre 07°41'20" e 08°19'30" latitude sul, e 34°51'00" e 36°41'58" de longitude oeste. Sua nascente é na divisa dos municípios de Jataúba e Poção. Apresenta direção inicial sudeste-nordeste até as proximidades de Santa Cruz de Capibaribe, quando seu curso toma direção oeste-leste percorre uma extensão total de 280 km até sua foz, na cidade do Recife dividindo a área central do Recife até desaguar no Oceano Atlântico (Silva et al., 2007)

### **3.1 Boa Viagem (Recife)**

A praia de Boa Viagem é uma das praias urbanas mais famosas da cidade do Recife. Ela é oceânica e se situa na zona sul da cidade fazendo parte de um conjunto de ecossistemas costeiros mais detalhes em Costa et al. (2008).

A maior parte da praia de Boa Viagem é protegida por cordões de arenito (beachrocks) paralelos a costa. Na maré baixa, formam-se várias piscinas naturais ao longo da praia, sendo possível andar sobre os recifes, que são relativamente planos, largos e escorregadios. Quando a maré sobe, os recifes ficam completamente cobertos pela água.

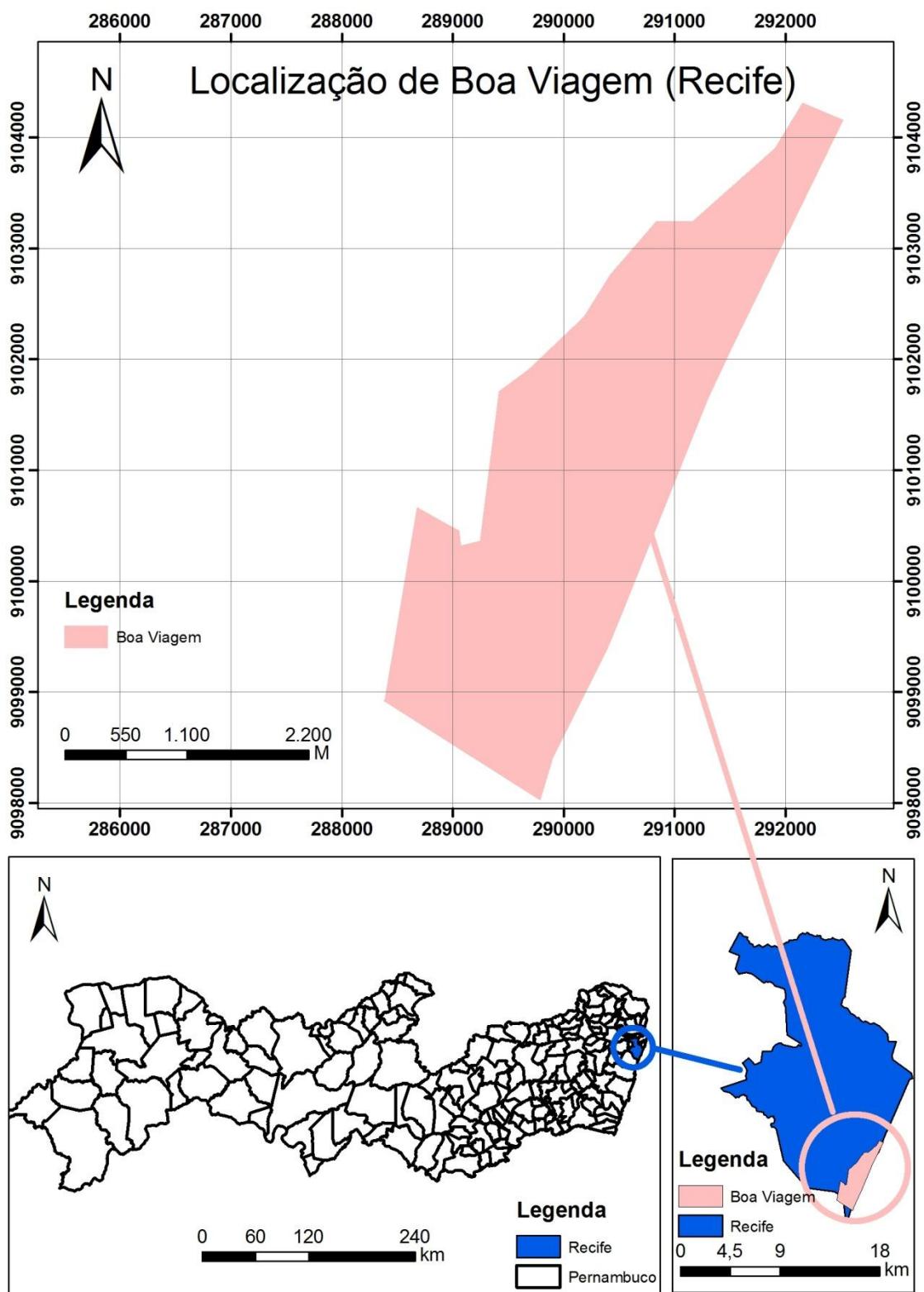
Costa et al. (2008), relatam que a praia da Boa Viagem e seu segmento mais ao norte, a praia do Pina, chegaram a ser consideradas Unidades de Conservação (58ha) pela Prefeitura da Cidade do Recife em 2000 e que a construção de uma avenida beira-mar (pistas de rolamento, calçada, mureta, quiosques, banheiros e infraestrutura de lazer) teve forte influência na impermeabilização do terreno e imobilização das dunas, podendo ter levado a um sério deslocamento do frágil balanço sedimentar para o lado da erosão da praia.

A Figura 7 apresenta um mapa de localização do município do Recife

---

no estado de Pernambuco, a ampliação do município e em particular a ampliação de um polígono que define o bairro de Boa Viagem.

Figura 7 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Boa Viagem (Recife)



### **3.2 Piedade (Jaboatão dos Guararapes)**

A praia de Piedade é a praia urbana mais frequentada da cidade de Jaboatão dos Guararapes (situada na porção centro-leste da mesorregião metropolitana do Recife). A praia é oceânica com aproximadamente 4,5 km de extensão. Ela localiza-se entre a praia de Boa Viagem no Recife ao norte e a praia de Candeias ao sul, e é banhada pelo Oceano Atlântico.

O município de Jaboatão dos Guararapes tem 58,9% de praias com sedimentos e 41,1% sem praias com sedimentos, constituindo-se, principalmente, de trechos com obras de tipo enrocamentos, espiões e muros (Projeto MAI-PE, 2009).

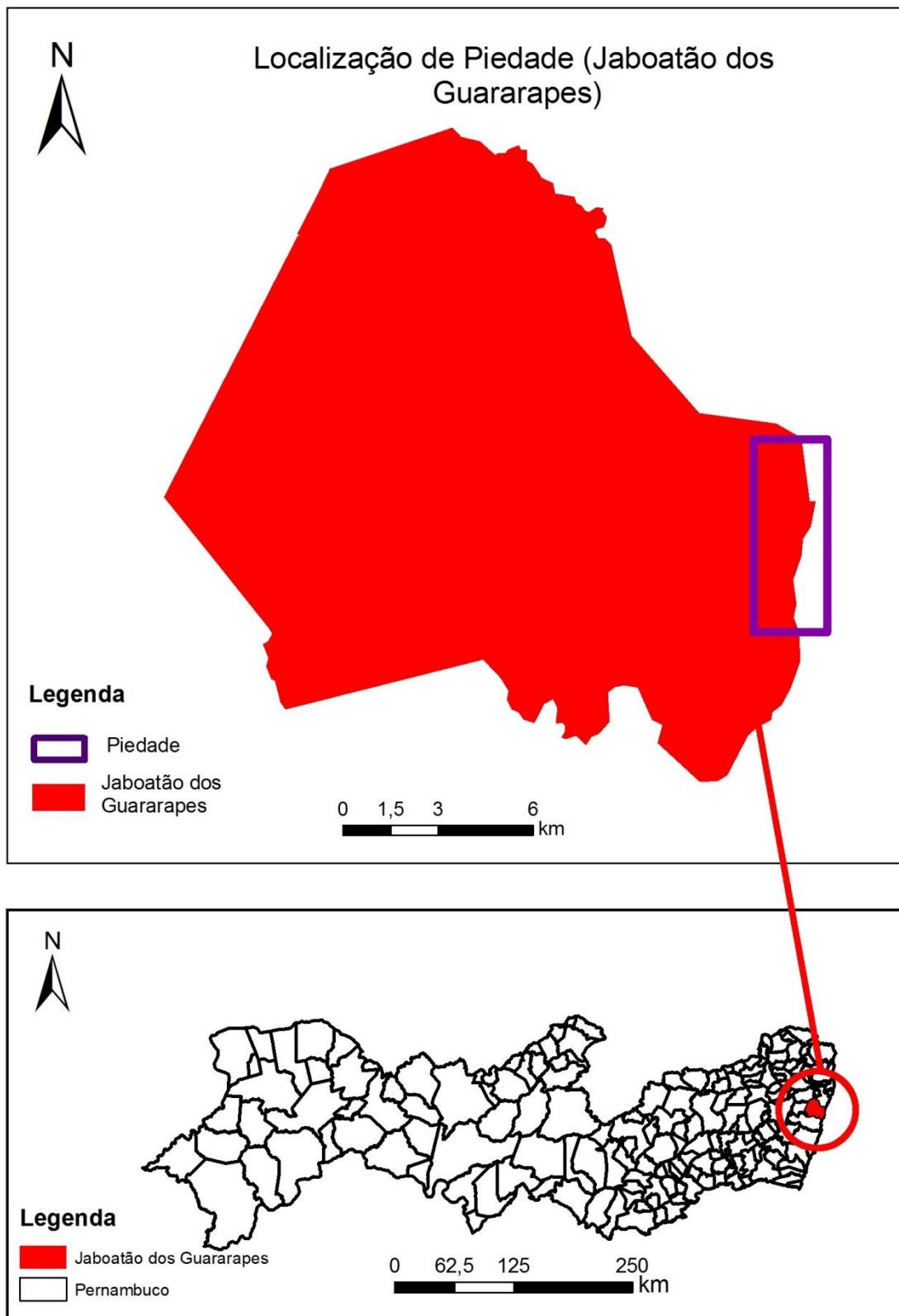
Segundo Moura et al. (2011) aproximadamente 21% de construções de proteções ao longo da costa são mais comuns os espiões de estruturas rígidas.

A praia de Piedade tem construção de quebra mar e espiões que alteram a passagem e a paisagem da praia, além da dinâmica de sedimentos. Seu âmbito é marcado pela ocupação humana que chega até a orla, exceto no trecho mais ao norte, onde a orla está ocupada por áreas de lazer e a Avenida Beira Mar. Sua vegetação é composta por coqueiros existentes nas residências da orla. A praia tem característica climática quente-úmida, com chuvas entre maio e agosto, e com temperatura média em torno dos 25°C.

Com a falta de planejamento e infraestrutura na área costeira houve o aumento da degradação ambiental trazendo perdas econômicas e extinguindo a fauna. A erosão costeira não é acarretada por apenas causas naturais, mas em grande parte, por atividades antrópicas, como as construções de enrocamentos.

A Figura 8 apresenta um mapa de localização do município do Jaboatão dos Guararapes no estado de Pernambuco, a ampliação do município e em particular um polígono que define o bairro de Piedade.

Figura 8 – Mapa de Localização da Área de Estudo: Piedade (Jaboatão dos Guararapes)



## 4. METODOLOGIA

Através de dados de sensoriamento remoto e levantamentos geodésicos da linha de costa (GNSS) foram organizadas as informações cartográficas vetoriais utilizadas para criação de um Banco de Dados Geográficos ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade.

A seguir são apresentados os materiais utilizados e os métodos.

### 4.1 Materiais

Este estudo foi desenvolvido a partir dos seguintes materiais:

- Ortofoto do ano de 1974, imagens orbitais dos satélites artificiais: Quickbird (2005) e Geoeye (2011), cujas características principais são apresentadas no Quadro 2.
- Levantamento de referências bibliográficas, resgate de documentos cartográficos e informações censitários.
- Levantamentos geodésicos da linha de costa utilizando GNSS em 2007, 2009, 2010 e 2012.
- Utilização do softwares ArcGis® para elaboração de dados em formato Shapefile (ArcCatalog: ArcInfo), fotointerpretação de feições cartográficas, elaboração de mapas temáticos de uso do solo, construção de um Banco de Dados Espaciais, e cálculo dos deslocamentos entre as linhas de costa.

- O software Matlab® foi utilizado para construção da modelagem fuzzy e obtenção das classificações de vulnerabilidade costeira à erosão.

Quadro 2 – Características dos satélites das imagens trabalhadas

Sistema	Altitude (Km)	Resolução Temporal (dias)	Resolução espectral por bandas (em $\mu$ m)	Resolução Espacial (em metros)
Quick Bird	450	1,9 a 10	B1: 0,45 – 0,52 $\mu$ - azul B2: 0,52 – 0,60 $\mu$ - verde B3: 0,63 – 0,69 $\mu$ - vermelho B4: 0,76 – 0,90 $\mu$ m – infravermelho B5: 0,45 – 0,90 $\mu$ m - pancromática	2,4 m 2,4 m 2,4 m 4 m 0,60 m
Geoye	15, 2	3 dias no máximo	PAN: 450 – 800 $\mu$ m -pancromática MS: 450 – 510 $\mu$ m - multiespectral MS: 510 – 580 $\mu$ m – multiespectral MS: 655 – 690 $\mu$ m – multiespectral MS: 780 – 920 $\mu$ m - multiespectral	41 cm 1,65 m

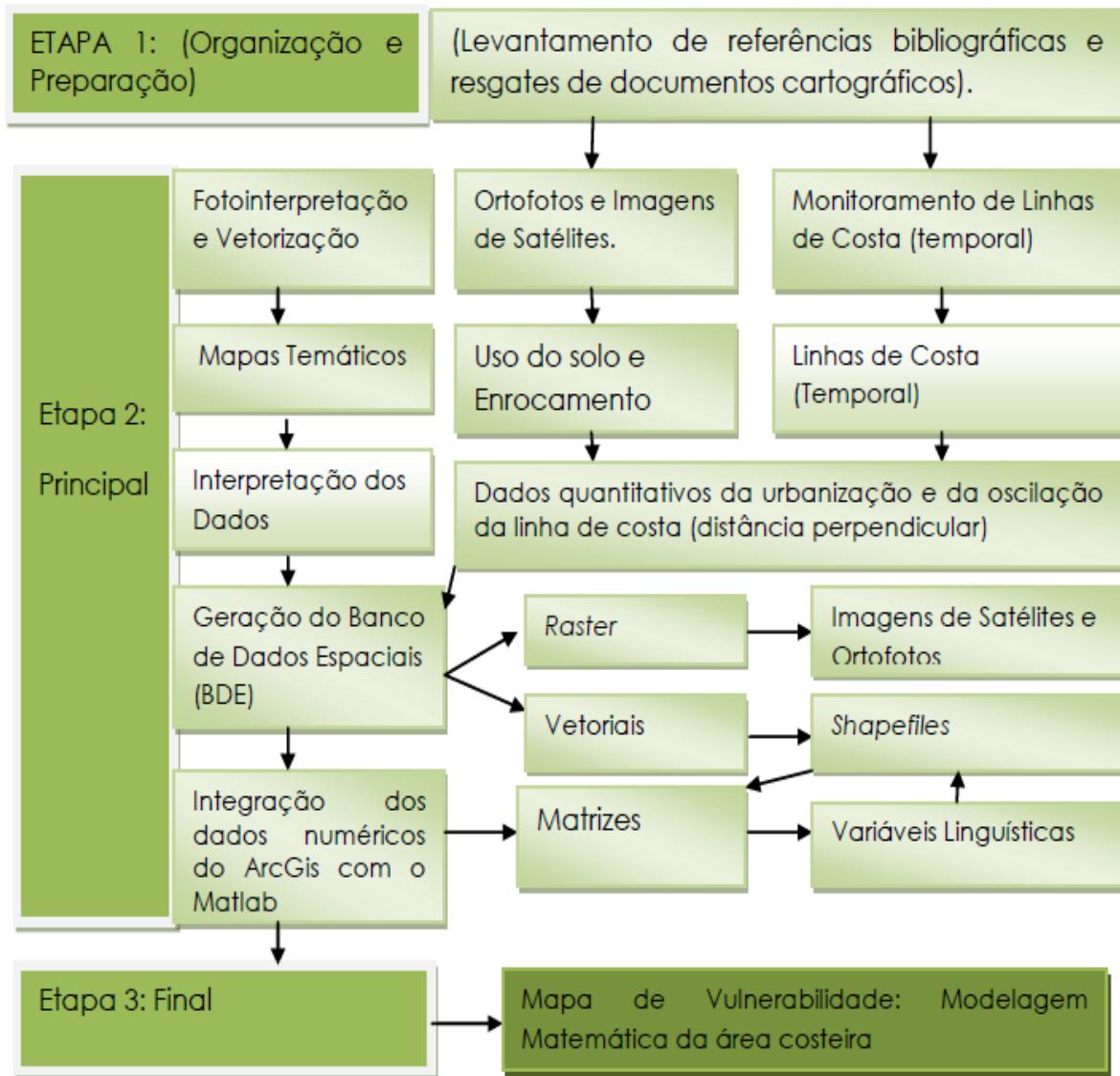
Fonte: Adaptado Fitz (2008) e <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/geoeye.htm>

## 4.2 Métodos

A organização dos dados da área de estudo foi o suporte inicial para a definição da metodologia adotada. A Figura 9 apresenta o fluxograma de trabalho dividido em etapas. A etapa 1 refere-se a organização e preparação de todas as referências e documentos cartográficos encontrados dando suporte a etapa 2. Na etapa 2 considerada a principal, realizou-se vários procedimentos: o processo de fotointerpretação e vetorização, construção de mapas temáticos, interpretação dos dados, geração do Banco de Dados Espaciais (BDE) (padronização e da averiguação da acurácia e da hierarquização dos dados espaciais e dos produtos gerados pelo SIG) e a integração dos dados numéricos gerados no ArcGIS com o Matlab. Na etapa 3 após a modelagem matemática, utilizou-se os dados numéricos gerados na toolbox *Fuzzy Logic* do Matlab integrando-os com o ArcGIS para gerar os mapas de vulnerabilidade

costeira à erosão.

Figura 9 – Fluxograma das etapas de trabalho



#### 4.2.1 Banco de Dados Espaciais

O BDE permite representar os dados espaciais em forma gráfica: imagens, mapas temáticos ou planos de informações, onde a estrutura desses dados pode ser de forma vetorial (ponto, linha e polígono) ou raster

(matricial). Sendo assim o BDE apresenta algumas funções como:

- Localizar geograficamente os objetos selecionados e suas informações cartográficas;
- Integrar em uma única base de dados os dados espaciais
- Atualização de seus dados
- Construir distintos mapas temáticos

O BDE integra distintas informações que se relacionam no desenvolvimento dos níveis de complexidade. A densidade e a complexidade dos dados espaciais são utilizados na aquisição dos dados que contribuem com a qualidade dos dados obtidos.

Para a criação do BDE foi feito a verificação se todos os materiais (vetoriais e raster) estavam em um mesmo Sistema Geodésico de Referência (SGR). Os que estavam em um SGR distinto foram transformados para SGR Brasileiro atual, no caso o SIRGAS 2000.

O banco de dados desenvolvido está no sistema de coordenadas cartesianas UTM Fuso 25S, ele foi estruturado temporalmente em camadas para os anos de: 1974, 2005, 2007, 2009, 2010, 2011 e 2012.

Na Figura 10 apresenta-se o fluxograma com as etapas utilizadas para elaboração do banco de dados.

Inicialmente utiliza-se o Geodatabase para organizar os dados em vetoriais e raster. Os dados raster são formados por ortofotos e imagens de satélites, nesta etapa também foram inseridos os metadados.

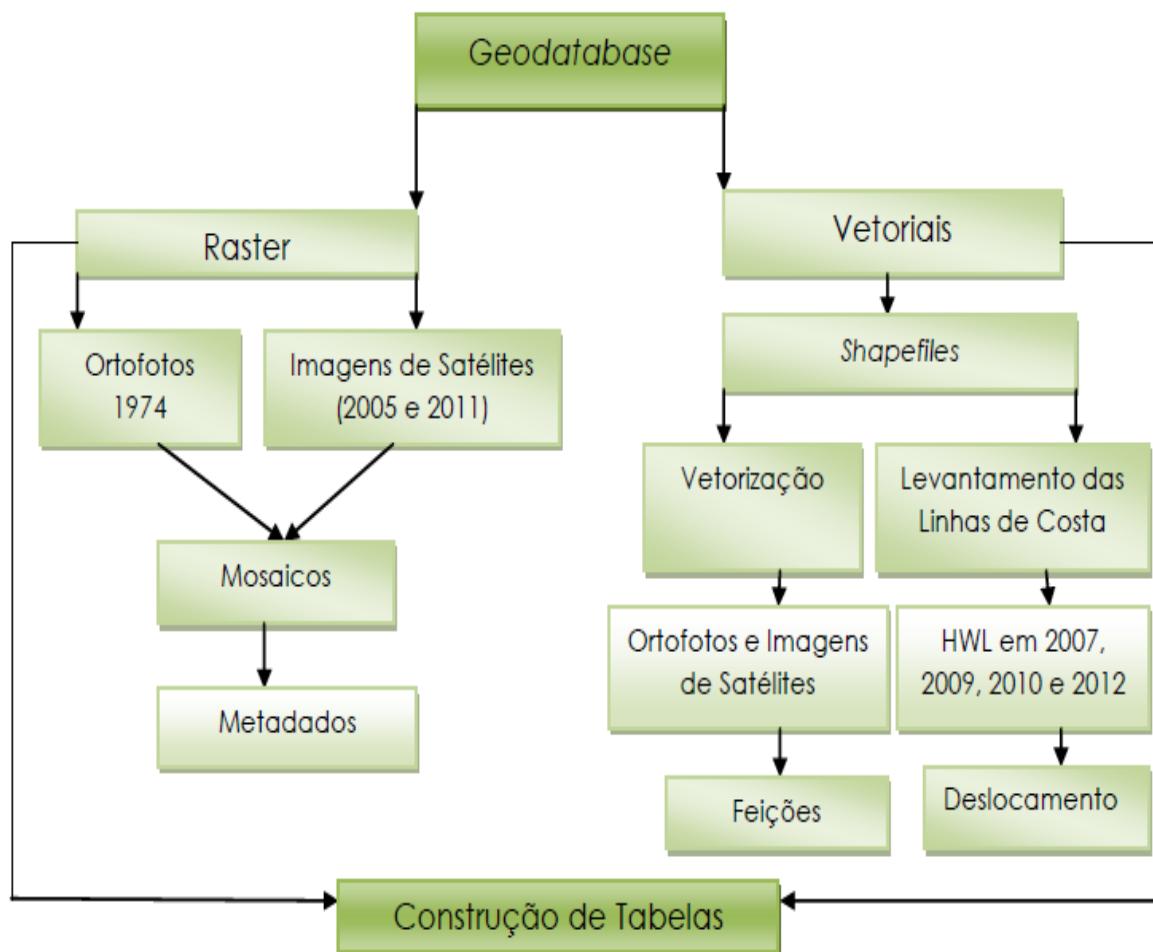
Os metadados permitem ao usuário identificar e acessar os dados armazenados no sistema, avaliando se o seu uso está de acordo com a aplicação. A criação de metadados tem a finalidade de documentar e organizar de forma estruturada os dados coletados além da manutenção

---

dos dados.

Os dados vetoriais são no formato *shapefile* onde foram obtidos através dos dados de vetorização (ortofotos e imagens de satélites - identificando-se as feições) e do levantamento das linhas de costa (*High water line (HWL)* - calculando-se o deslocamento). Tanto os dados vetoriais como raster foram organizados em tabelas para facilitar a entrada de dados para a modelagem *fuzzy*.

Figura 10– O fluxograma da montagem do Banco de Dados.



No processo de fotointerpretação identificaram-se feições sendo vetorizadas para construção dos mapas temáticos e seus dados numéricos foram utilizados como dados de entrada para a modelagem *fuzzy*. As feições antepraia, eixo de ruas e oceano foram considerada no mapa

temático, no entanto os dados não foram utilizados na modelagem fuzzy. Na Tabela 3 são descritas as feições identificadas.

Tabela 3 – classes selecionadas para criar mapas temáticos e respectiva descrição

Classes	Descrição
Enrocamento	Obras de contenção de estrutura rígida que visa conter o avanço do mar em direção a área costeira.
Benfeitorias de Lazer	Quadra de tênis, quiosque tudo de alvenaria construído sobre a pós-praia e campo de dunas.
Pós-praia	Areia exposta após a linha de costa identificada nas imagens digitais
Vegetação	Vegetação natural encontrada em dunas frontais e também se considera coqueiros plantados como a classe vegetação.
Ante praia	Neste estudo é identificada apenas como uma faixa pertencente à interface mar antes da linha de costa que é afetado por processos associados às ondas (Silva et al., 2012).
Linha de Costa (Linha d' água)	Considerou-se a linha instantânea de água captada na tomada da cena entre o continente e o oceano e as obtidas através de levantamentos GNSS.
Urbanização (tipos de ocupações)	São as casas, edifícios, tudo de alvenaria construído de forma ordenada ou desordenada (sobre a pós-praia)
Eixo de Ruas	São as ruas e avenidas e seus respectivos cruzamentos.
Solo Exposto	São áreas caracterizadas por não apresentarem nenhum tipo de cobertura, ou seja, apresentam-se desnudas (Rempel et al., 2012).
Oceano	Considerou-se a parte identificada com água após a linha de costa na tomada da cena em direção ao oceano.

---

Para construção da geometria das classes adotou-se o formato *shapefile* como padrão, pois este formato permite o uso de um modelo de dados que captura dados espaciais e hierárquicos entre classes. A geometria deste formato pode ser do tipo ponto, linha e polígono, sendo que para esta pesquisa utilizou-se linha e polígono, como mostra a Tabela 4 com as classes e suas respectivas geometrias. As feições foram selecionadas como mostradas na Tabela 3 através do processo de fotointerpretação.

Tabela 4 – Geometria dos dados gráficos armazenados no BDE

Classes	Geometria
Enrocamento	Linha
Pós-praia	Polígono
Vegetação (dunas frontais e coqueiros)	Polígono
Ante Praia	Polígono
Linha de Costa	Linha
Urbanização (tipos de Construções)	Polígono
Eixo de Ruas	Linha
Solo Exposto	Polígono
Oceano	Polígono

#### **4.2.2 Processo de Fotointerpretação e Vetorização**

A fotointerpretação é uma técnica utilizada para identificar, interpretar e obter informações sobre os fenômenos nelas contidos, portanto é necessário o pesquisador ter conhecimentos prévios da área de estudo, mais detalhes em Fitz (2008). O processo de vetorização consiste no transporte dos fenômenos identificados na imagem, realizado por meio de desenho.

Segundo Fitz (2008), o processo de vetorização pode ser de três tipos: manual, semiautomático ou automático. Nessa metodologia foi utilizado o processo de vetorização manual em tela, para representar as informações

---

espaciais da morfologia costeira. Utilizaram-se as imagens rasterizadas: ortofotos do ano de 1974 no formato *Tif* e imagens orbitais do satélite *Quickbird* (2005) e *Geoeye* (2011) para obtenção dos dados de entrada para modelagem matemática.

As feições cartográficas da área costeira foram extraídas da imagem orbital do satélite *Geoeye* através do processo de fotointerpretação e vetorização. Através desses processos analisaram-se e quantificaram-se valores numéricos para serem aplicados na modelagem *fuzzy*.

#### **4.2.3 Levantamento Temporal da Linha de Costa**

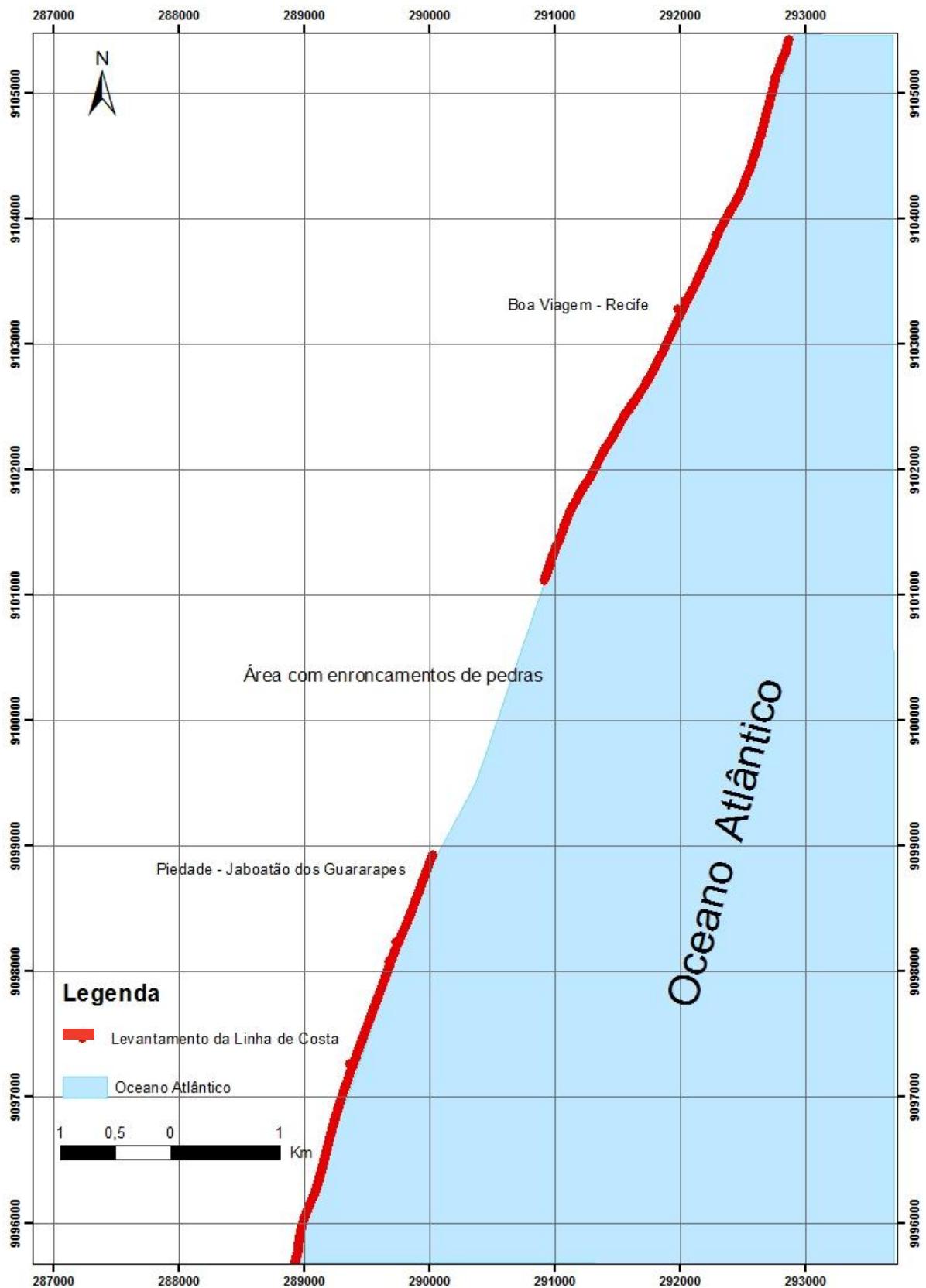
Os dados de levantamentos geodésicos da linha de costa na área de estudo são oriundos de um espaço amostral de  $t$  anos contendo quatro amostras: 2007, 2009, 2010 e 2012.

Em todos os levantamentos geodésicos foram utilizados o método de levantamento geodésico relativo cinemático, onde o receptor base ficou instalado em um local conhecido como terceiro jardim na Avenida Boa Viagem sobre um marco geodésico da prefeitura do Recife com coordenadas precisas previamente determinadas onde suas coordenadas são: latitude  $08^{\circ} 06' 30,16493''S$ , longitude  $34^{\circ} 53' 17,32463''W$  altitude geométrica -1,433 m e altitude ortométrica 4,533 m.

O nível de precisão do método de levantamento cinemático relativo com pós-processamento é em torno de 10 cm podendo alcançar poucos centímetros caso as condições sejam favoráveis (cobertura de satélites, ausência de multicaminho, distância até a base no processamento, etc) (Seeber, 2003).

A Figura 11 mostra o trecho percorrido no levantamento relativo cinemático na área de estudo.

Figura 11 – Trecho percorrido ao longo da linha de costa de Boa Viagem e Piedade



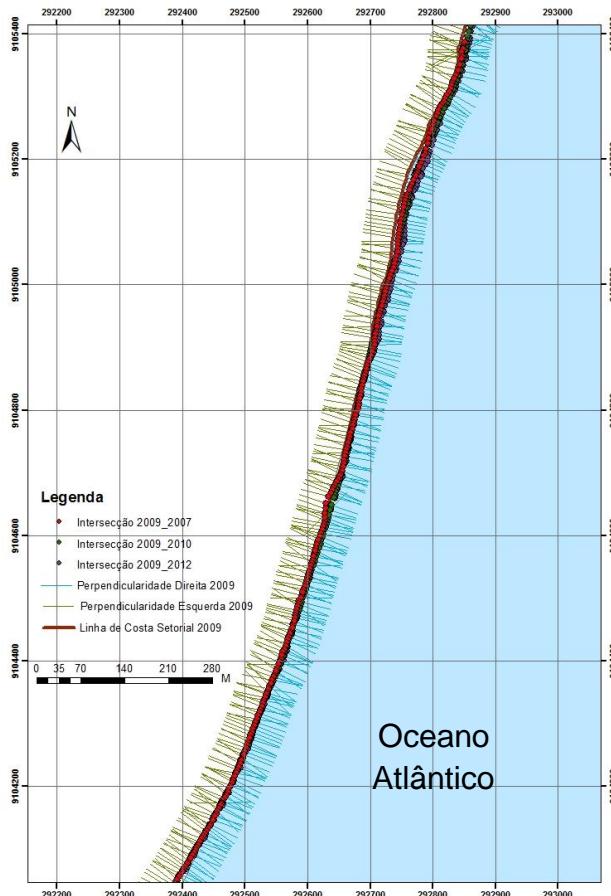
#### 4.2.4 Análise do deslocamento da Linha de Costa

Os mapas de deslocamento da linha de costa são gerados através de dados temporais da linha de costa (levantamentos que contém os dados vetoriais temporais).

O cálculo das taxas de variação (expressa em m/ano) da linha de costa à erosão (valor numérico identificado como negativo) e acrescção (valor numérico positivo), foram realizadas de modo automático na extensão *Detect Shifting Toolbox®* (Bartelt, 2012) (software ArcGIS 10.0).

O software utiliza as distâncias dos transectos entre a linha base (2007) e os demais anos (2009, 2011 e 2012). Foram configuradas uma distância de 10 em 10 m com um comprimento de 50 m para os transectos (Figura 12).

Figura 12 – Transectos dos Pontos e Perpendicularidade entre as linhas de costa



#### **4.2.5 Divisão Setorial da Área de Estudo**

Foram desenvolvidos mapas temáticos vinculados às feições que podiam ser identificadas através do processo de fotointerpretação e o processo de vetorização. Com os mapas temáticos desenvolvidos analisaram-se o uso do solo (mapa de classes e mapa de setores), posição espacial da linha de costa e a presença de enroncamento de pedras. Através dessas construções obtiveram-se os dados numéricos para entrada da modelagem fuzzy.

Para uma melhor compreensão da análise do deslocamento da linha de costa e do uso do solo dividiu-se em setores segundo o comportamento da região da pós-praia do ambiente praial.

O parâmetro distância em metros foi utilizado para caracterizar a proximidade de um setor à áreas urbanizadas ou com a presença de enrocamentos.

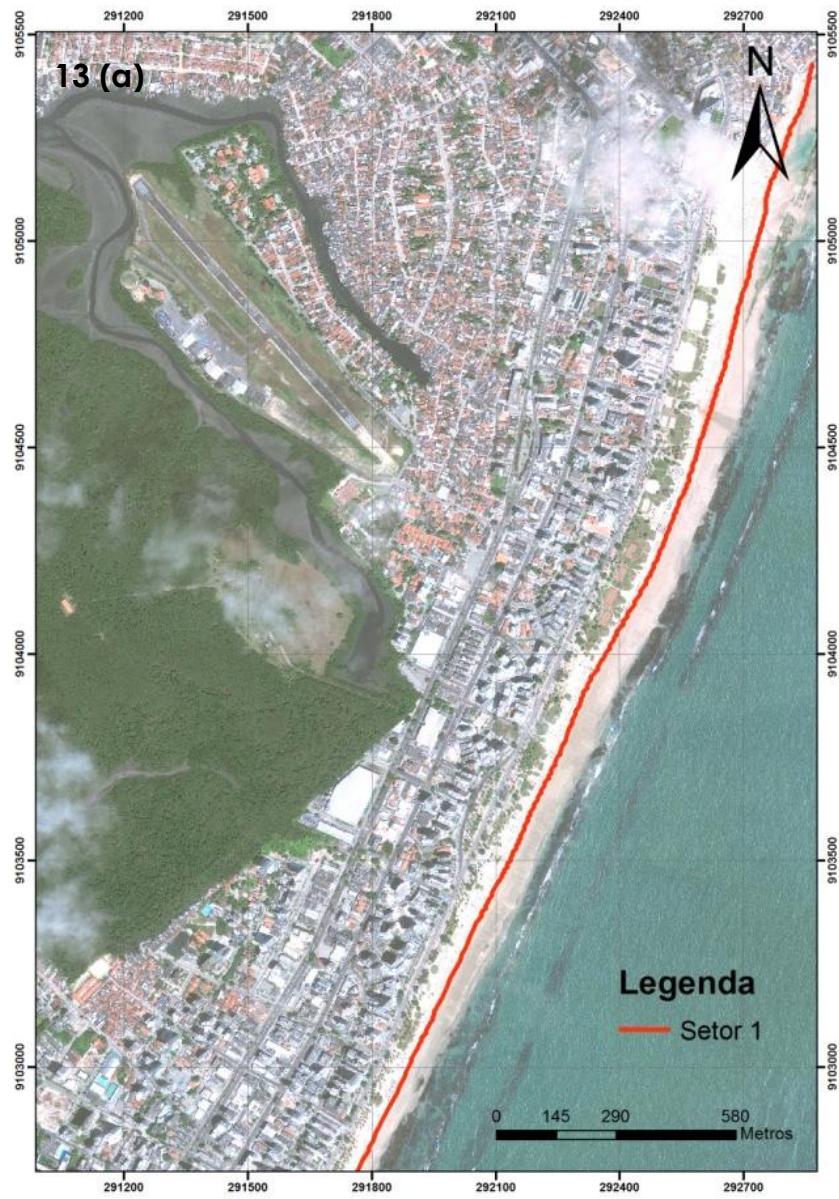
A Figura 13 apresenta o Setor 1 que se inicia na praia do Pina e a parte norte da praia de Boa Viagem. Na Figura 13 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se o Setor 1 que se inicia no fim do enrocamento de Brasília Teimosa e segue em direção sul com uma extensão de 3060 m, até um canal de escoamento de águas, na altura do edifício Canopus nº 2594 da Avenida Boa Viagem.

Na Figura 13 (b) apresenta-se uma área da praia do Pina mostrando uma ampla pós-praia e na Figura 13 (c) apresenta-se uma área da praia da Boa Viagem do Norte para Sul mostrando o estreitamento da faixa de areia.

Este setor é caracterizado por uma pós-praia bem desenvolvida, com a presença de dunas vegetadas e com uma distância entre a linha de costa e o primeiro obstáculo urbano entre 120 e 40 metros. No Terceiro Jardim da Av. Boa Viagem, verifica-se ocupação urbana na região da pós-praia (benfeitorias de lazer). Ao percorrer para a direção sul observa-se que a pós-praia torna-se mais estreita e apresenta uma diminuição da presença

das dunas frontais, descrições importantes para análise da vulnerabilidade.

Figura 13 – Setor 1 da praia do Pina até a praia da Boa Viagem



Fonte: Gregório (2012)



Fonte: Gregório (2012)

Na Figura 14 apresenta-se o Setor 2 no centro da praia de Boa Viagem. Na Figura 14 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se esse setor iniciando-se no final das dunas frontais depois do Terceiro Jardim da Avenida Boa Viagem e segue para o sul com uma extensão de 1485 m até o cruzamento da Av. Boa Viagem com a rua Bruno Veloso.

Figura 14 – Setor 2 Centro da praia da Boa Viagem



Fonte: Gregório (2012)



Fonte: Gregório (2012)

Na Figura 14(b) apresenta-se o início do Setor 2 com uma inclinação maior na face praial. E na Figura 14(c) apresenta-se o estreitamento do ambinete praial e a presença de beachrocks.

O setor 2 caracteriza-se por uma pós-praia sem a presença de dunas e sem vegetação rasteira, mas sem ocorrência de erosão costeira, e com uma distância média entre a linha de costa e o primeiro obstáculo urbano de aproximadamente 40 metros.

Na Figura 15 apresenta-se o Setor 3 ao norte do início do enrocamento da praia da Boa Viagem. Na Figura 15 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se esse setor iniciando-se no cruzamento da Av. Boa Viagem com a Rua Bruno Veloso e segue para o sul por 410 metros até o início do enrocamento de Boa Viagem. Na Figura 15(b) apresenta-se a aproximação da Av. Boa Viagem com a face praial. E na Figura 15(c) apresenta-se a pós-praia aplainada em direção sul.

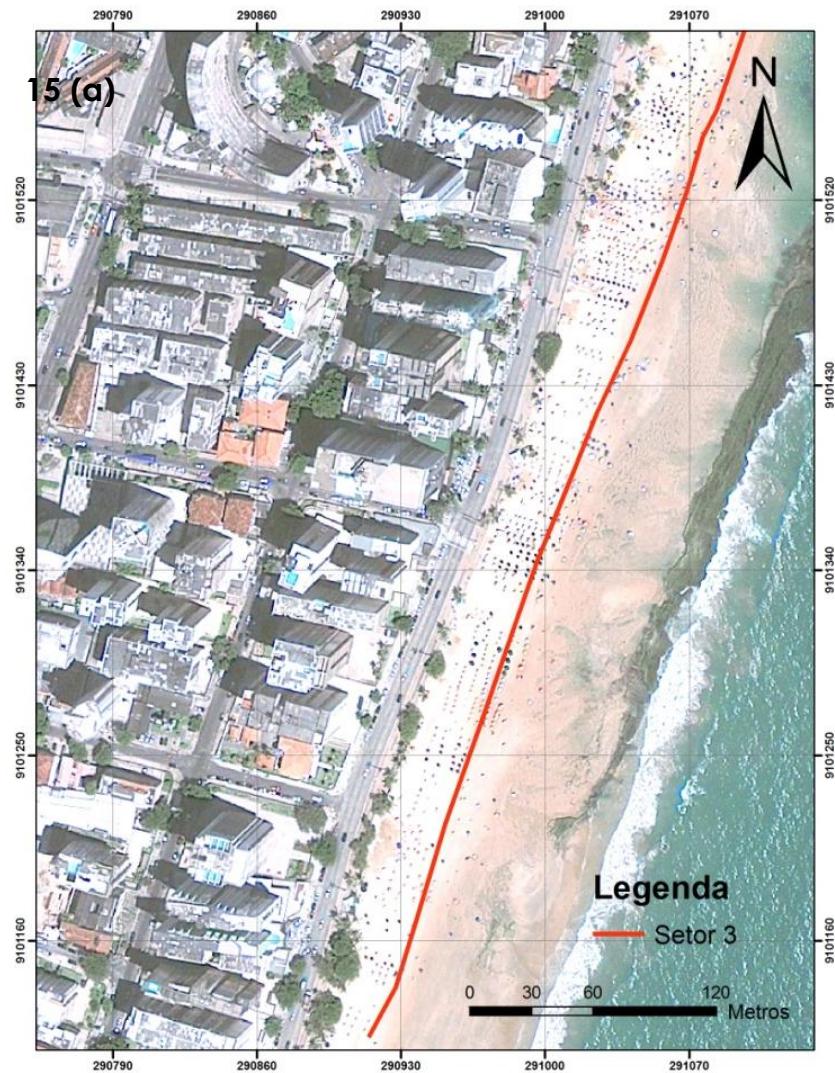
Este setor caracteriza-se por uma pós-praia próxima ao enrocamento reduzida a menos de 10 metros, com indicações claras de erosão costeira e com uma região de pós-praia de baixo declive.

Na Figura 16 apresenta-se o setor com construção de enrocamento de pedras. Na Figura 16 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se esse setor no início da construção do enrocamento com uma extensão de 2400m. Na Figura 16(b) apresenta-se o centro da construção do enrocamento onde a maré já chega a contenção da Av. Boa Viagem. E na Figura 16(c) apresenta-se o final do enrocamento com a presença da região da pós-praia.

Este setor se caracteriza com indicações de erosão costeira. A Figura 17 apresenta o setor 4 ao sul da construção do enrocamento da praia de Boa Viagem. Na Figura 17 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se esse setor iniciando-se no final do enrocamento e seguindo para o sul com uma extensão de 2.882 m. Onde desta extensão 794m pertencem a praia de Boa Viagem e 2088m a praia de Piedade. Na Figura 17(b) apresenta-se o início do setor onde ainda há enrocamentos, com a

presença de pós-praia. E na Figura 17(c) em direção sul apresenta-se uma pós-praia desenvolvida.

Figura 15 – Setor 3 Norte do enrocamento da praia da Boa Viagem

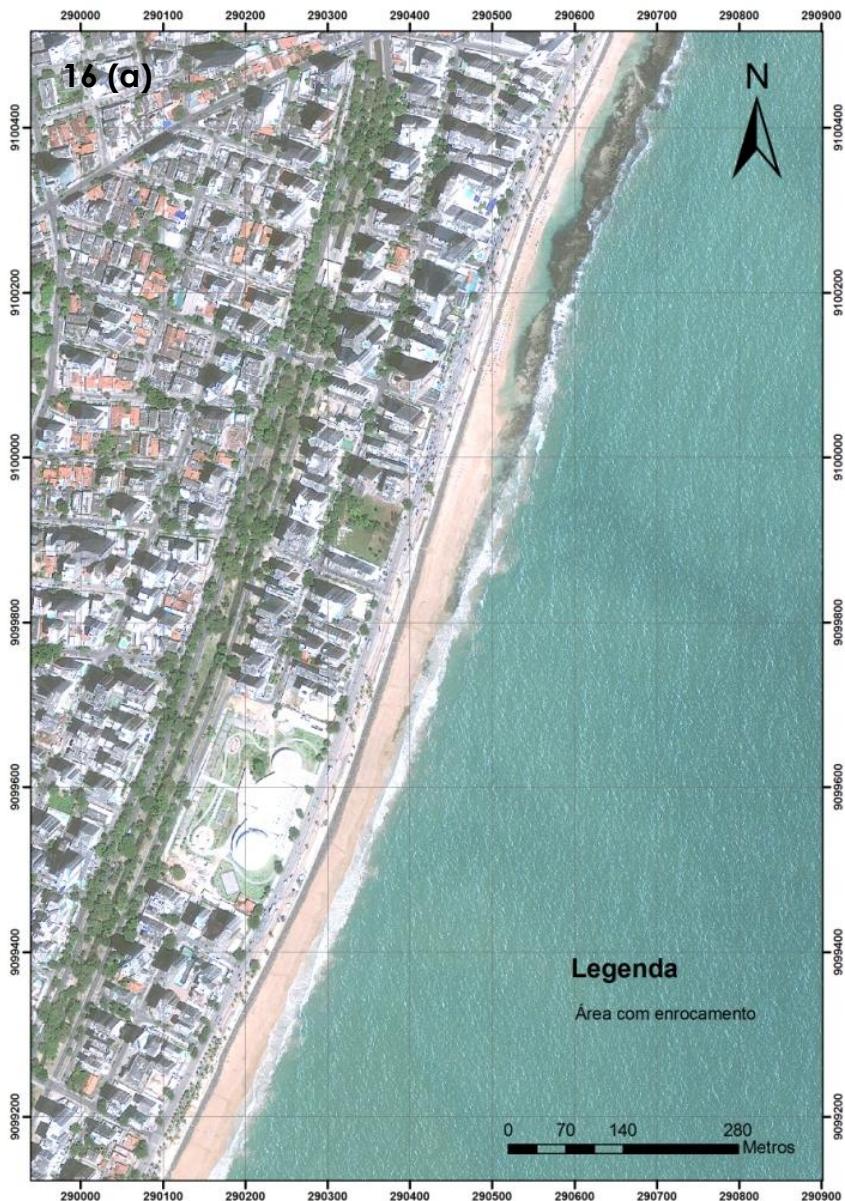


Fonte: A autora (2012)



Fonte: Gregório (2012)

Figura 16 – Setor com a construção do enrocamento da praia da Boa Viagem



Fonte: A autora (2012)



Fonte: Gregório (2012)

Figura 17 – Setor 4 ao sul da praia da Boa Viagem e ao norte da praia de Piedade



Fonte: Gregório (2012)



Fonte: A autora (2012)

O setor 4 apresenta uma face praial bem desenvolvida caracterizada por uma praia arenosa em média 20 m, sem indícios de erosão costeira.

A Figura 18 apresenta-se o setor 5 ao sul da praia de Piedade. Na Figura 18 (a) em um recorte da imagem de satélite destaca-se esse setor em direção ao sul da praia por uma extensão de 2.022 m até o início do enrocamento da praia de Candeias. Na Figura 18 (b) apresenta-se a presença de uma linha de costa curvilínea. E na Figura 18 (c) apresenta-se o final do setor antes do enrocamento.

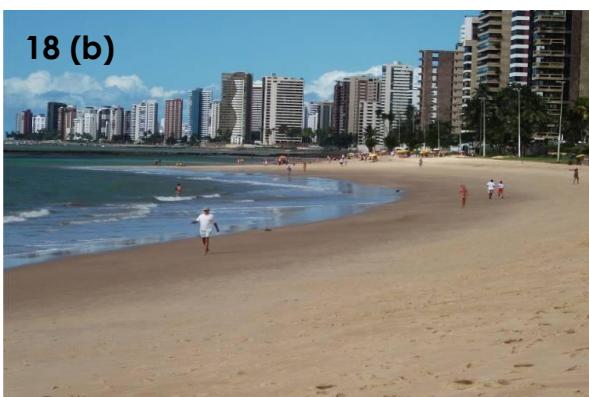
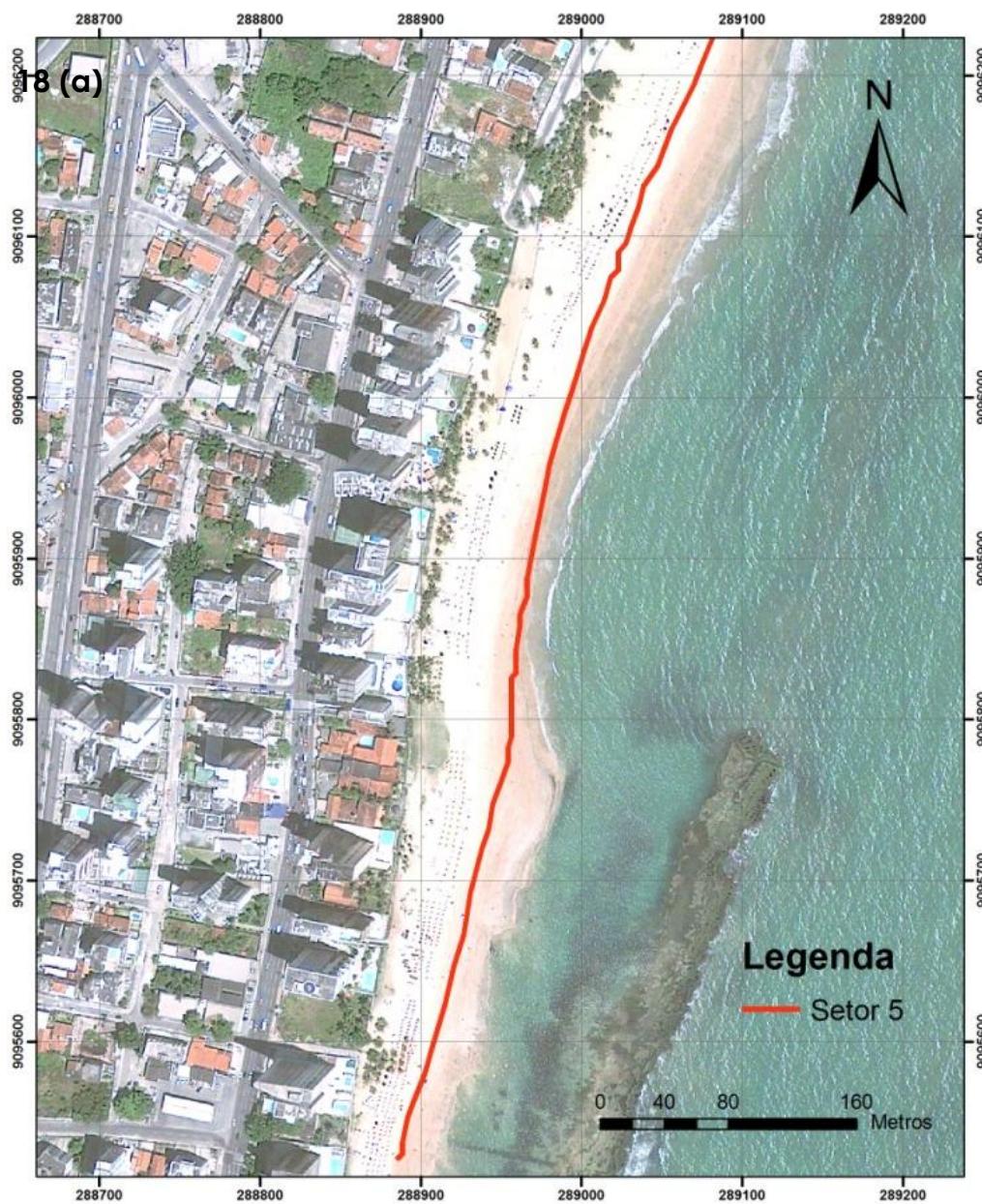
Observa-se neste setor uma face praial bem desenvolvida, porém na direção sul uma linha de costa menos retilínea que os setores anteriores. E no final do setor há um estreitamento da face praial.

Como visto na descrição o município do Recife compreende 4 setores e parte do setor 5, o município de Jaboatão dos Guararapes compreende 1 setor e parte do setor 5.

A Figura 19 apresenta todos os setores descritos, onde o Setor 1 - praia do Pina ao norte da praia da Boa Viagem; Setor 2 - ao centro da praia da Boa Viagem; Setor 3 - ao norte do enrocamento da praia da Boa Viagem; Setor 4 – enrocamentos, Setor 5 - ao sul do enrocamento em Piedade, e Setor 6 – localizado ao sul da praia de Piedade.

Ainda poder-se-ia acrescentar outro setor na praia de Piedade ao norte da praia de Candeias, mas optou-se não mapear a linha de costa, pois ela encontra-se em contato direto com as construções e assim os problemas de erosão costeira estão presentes exigindo constantes obras de recuperação e manutenção.

Figura 18 – Setor 5 ao sul da praia de Piedade

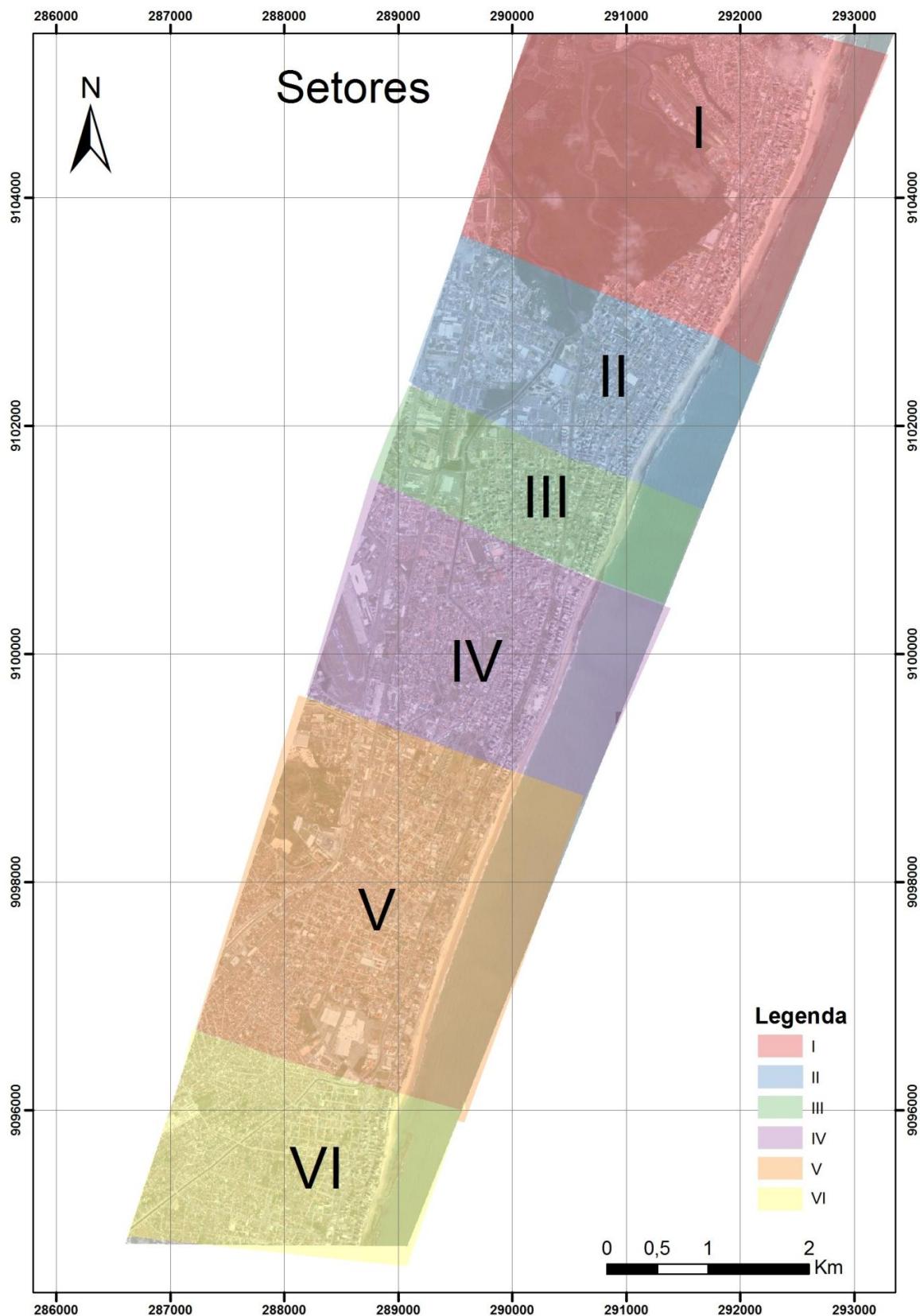


Fonte: Gregório (2012)



Fonte: Gregório (2012)

Figura 19 – Mapa de Setores ao longo da Faixa Litorânea da praia da Boa Viagem e de Piedade



#### **4.2.6 Variáveis adotadas na concepção do modelo fuzzy**

Com o propósito de modelar a vulnerabilidade à erosão costeira, foi escolhida uma abordagem semi-quantitativa, na qual todos os atributos, qualitativos ou quantitativos, foram codificados em variáveis linguísticas (1, 2, 3 e 4) analisando o grau de influência que cada partição fuzzy no modelo.

O método utilizado na lógica fuzzy foi o de Mamdani, devido sua facilidade na formação das regras lógicas além de permitir o uso de várias variáveis de saídas. Para utilização do método foi incorporado dados geomorfológicos para obtenção de valores numéricos. Os dados numéricos utilizados para entrada no intervalo foram obtidos através do processo de fotointerpretação e vetorização.

A equação de pertinência foi utilizada através da inferência máx-min, onde o máx é formado da união e o min é formado da intersecção representada pelo “e” na formação das regras. Para realização da defuzzificação foi utilizado o centro da área.

O Modelo Fuzzy (MF) necessita de alguns elementos como: variáveis de entrada, regras e variáveis de saídas. Para criação do MF foram inseridas seis variáveis de entrada que estão associadas a fatores condicionantes a vulnerabilidade; foram estabelecidas duas modelagem com procedimento comparativo onde se utilizou 27 e 114 regras para cada modelagem que fazem parte do processo de inferência fuzzy, mais detalhes das regras encontram-se nos Apêndices); e por fim foi estabelecido uma saída do modelo que constitui na classificação da vulnerabilidade à erosão costeira.

A Figura 20 apresenta o esquema das variáveis no MF e a Figura 21 apresenta os adjetivos da classificação temática do nível de vulnerabilidade.

As variáveis identificadas nos mapas de setores serviram como dados de entrada para o modelo fuzzy através dos resultados numéricos criaram-se variáveis linguísticas para função de pertinência. Além dos mapas de setores

foram construídos mapas identificando cada termo primário das partições fuzzy.

Figura 20 – Variáveis para construção da Modelagem Fuzzy

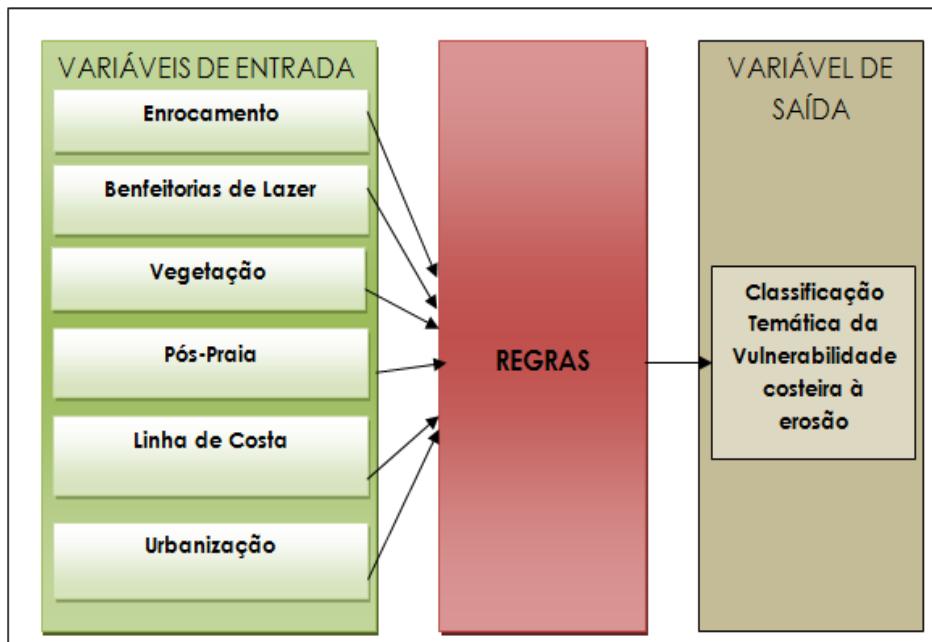
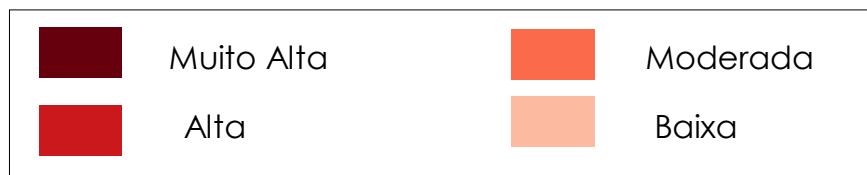


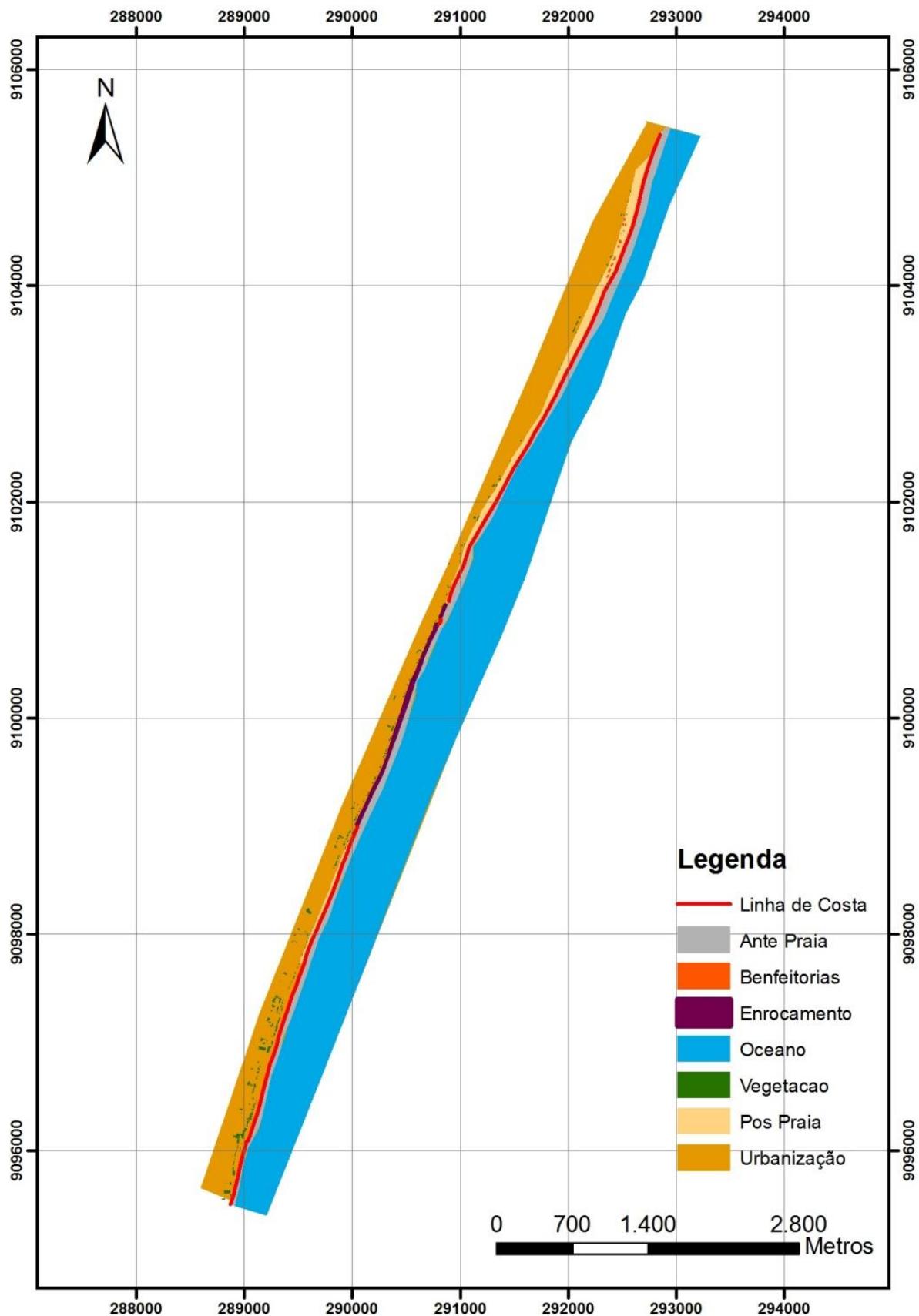
Figura 21 – Classificação temática da vulnerabilidades à erosão costeira



#### 4.2.7 Desenvolvimento da Modelagem Fuzzy

A Figura 22 apresenta as variáveis identificadas na área de estudo onde os seus dados numéricos foram utilizados como entrada na modelagem fuzzy. Nos itens 4.2.7.1 a 4.2.7.8 são apresentados os fatores utilizados para a concepção do MF, além dos graus de pertinências associados.

Figura 22 – Variáveis para entrada na modelagem fuzzy da área de estudo



A Tabela 5 apresenta os termos primários das partições fuzzy que foram adotados para cada variável. Foram adotadas 6 variáveis agrupadas em 4 categorias. Ressalta-se que a escolha das variáveis de entrada e dos termos primários são representadas a partir das informações coletadas sobre área costeira e os mapas temáticos espacializados.

Todos os dados analisados foram fundamentais na definição de cada variável e nos pesos correspondentes, tendo em vista que algumas variáveis são mais significativas do que outras para o processo de vulnerabilidade à erosão costeira. Foram optados por não associar pesos distintos as variáveis.

Tabela 5 – Variáveis linguísticas utilizadas como dados de entrada e seus termos primários das partições fuzzy correspondentes para utilização da Lógica Fuzzy

Lista para Índices de Vulnerabilidade Costeira	Termos Primários das partições Fuzzy			
	1	2	3	4
<b>Condições Morfológicas</b>				
Pós Praia (Área)	Ampla (>60m <sup>2</sup> )	Moderada (30 -60m <sup>2</sup> )	Estreita (0 -30m <sup>2</sup> )	Ausente (0m <sup>2</sup> )
<b>Atributos Naturais</b>				
Vegetação (Tipo/altura)	Rasteira (0 – 0,5m)	Arbustiva (0,5m – 2m)	Arbórea (>2m)	Ausente (0m)
<b>Processos Costeiros</b>				
Linha de Costa* (Deslocamento)	Estável (>0,6 m)	Moderada (0,3-0,6m)	Instável (0-0,3m)	Ausente (0m)
<b>Processos Antrópicos</b>				
Enrocamento** (Presença em Km)	Ausente 0 km	Moderado (0,5 – 1 km)	Alto > 1 km	
Benfeitorias de Lazer** (Presença)	Ausente >50	Adjacente (30-50)	Presente (0-30)	-
Urbanização (Distância)	Distante >70	Moderada 40 – 70	Próxima 0-40	Sem Ocupação 0
Saída				
<b>Classificação Temática da Vulnerabilidade à erosão costeira</b>	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta

\* Baseado na Lei de Gerenciamento Costeiro de Pernambuco, considerado a distância mínima.

\*\* Cálculos realizados através do processo de fotointerpretação

#### **4.2.7.1 Variável Linha de Costa**

A linha de costa é um fator preponderante na avaliação da susceptibilidade para determinação de índices de vulnerabilidade. De forma a minimizar o número de termos primários e consequentemente o número de regras, optou-se por agrupar as classificações ausente e instável que foram propostas na Tabela 5, sem perder eficiência do modelo fuzzy.

A Figura 23 mostra as classificações identificadas através do processo de fotointerpretação e do levantamento da linha de costa na área de estudo. Ao lado desta figura apresenta-se uma imagem onde não há espaço entre o mar e a construção do enrocamento.

Salienta-se que, quanto mais estável a linha de costa, menor será a vulnerabilidade à erosão. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 1 relacionado ao deslocamento.

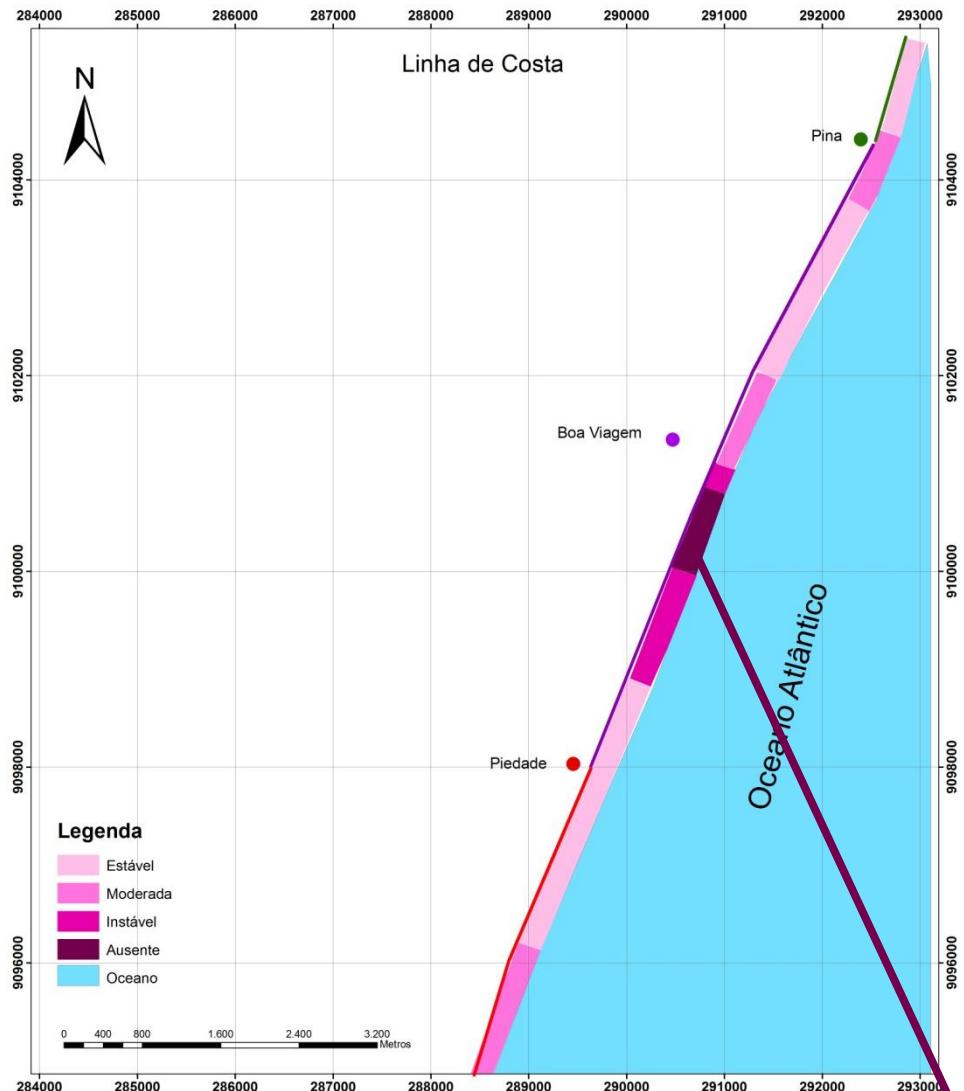
Foi adotado o valor de 1 para linha de costa estável, em que a influência humana não ocasiona vulnerabilidade. Na medida em que se aumenta o grau de instabilidade da linha de costa diminui-se o valor atribuído a esta variável.

Baseado na Figura 23 foi definido os termos primários das partições fuzzy: ausente, instável, moderada e estável. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 24, sendo do tipo linear decrescente e triangular para as partições instável e moderada respectivamente e trapezoidal para a partição estável.

Analizando a Figura 24, quando o valor atribuído à linha de costa foi 0,4, este valor pertence a partição instável e moderada, onde respectivamente tem um grau de pertinência 0 e 0,7. Quando o valor atribuído à linha de costa foi 0,58, este valor pertence a partição moderada e estável, ambas tem um grau de pertinência 0,6.

A Tabela 6 apresenta os valores resumidamente dos números fuzzy e as partições fuzzy.

Figura 23 – Classificações da variável Linha de Costa



Fonte: A autora

Figura 24 – Funções de Pertinência da variável Linha de Costa

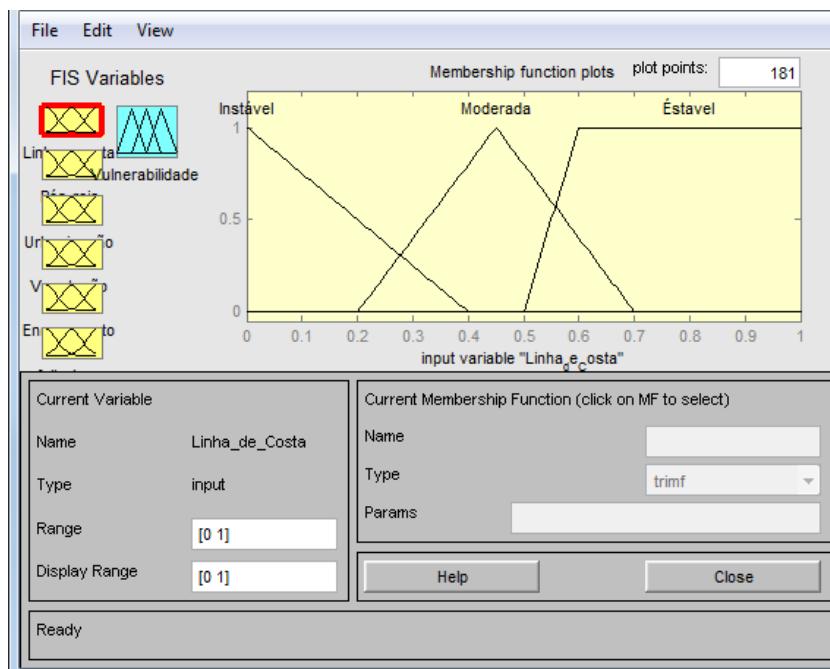


Tabela 6 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável linha de costa

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Instável	Linear Decrescente	-	0	0,4
Moderada	Triangular	0,2	0,45	0,70
Estável	Trapezoidal	0,5	0,6 – 1	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

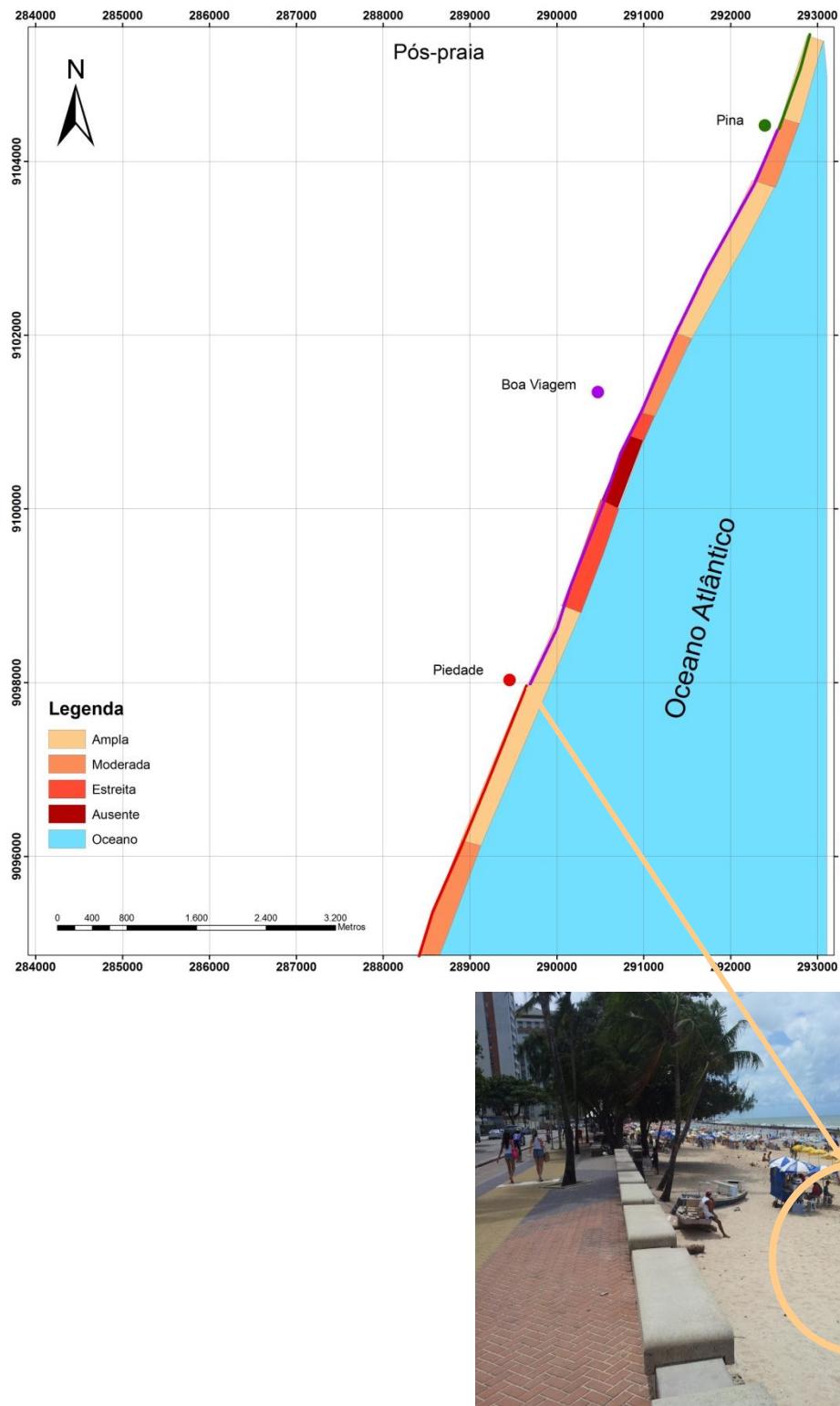
#### 4.2.7.2 Variável Pós-praia

A pós-praia é uma das três regiões da praia que se localiza fora do alcance das ondas e marés normais, podendo ser alcançada pela água quando ocorrem marés muito altas ou tempestades. De forma a minimizar o número de termos primários e consequentemente o número de regras, optou-se agrupar as classificações ausente e estreita que foram propostas na Tabela 5 sem perder eficiência do modelo fuzzy.

A Figura 25 mostra as classificações identificadas através do processo de fotointerpretação e do levantamento da linha de costa na área de

estudo. E ao lado mostra-se uma imagem onde à pós-praia é ampla e tem uma área recreativa.

Figura 25 – Classificações da variável Pós-praia



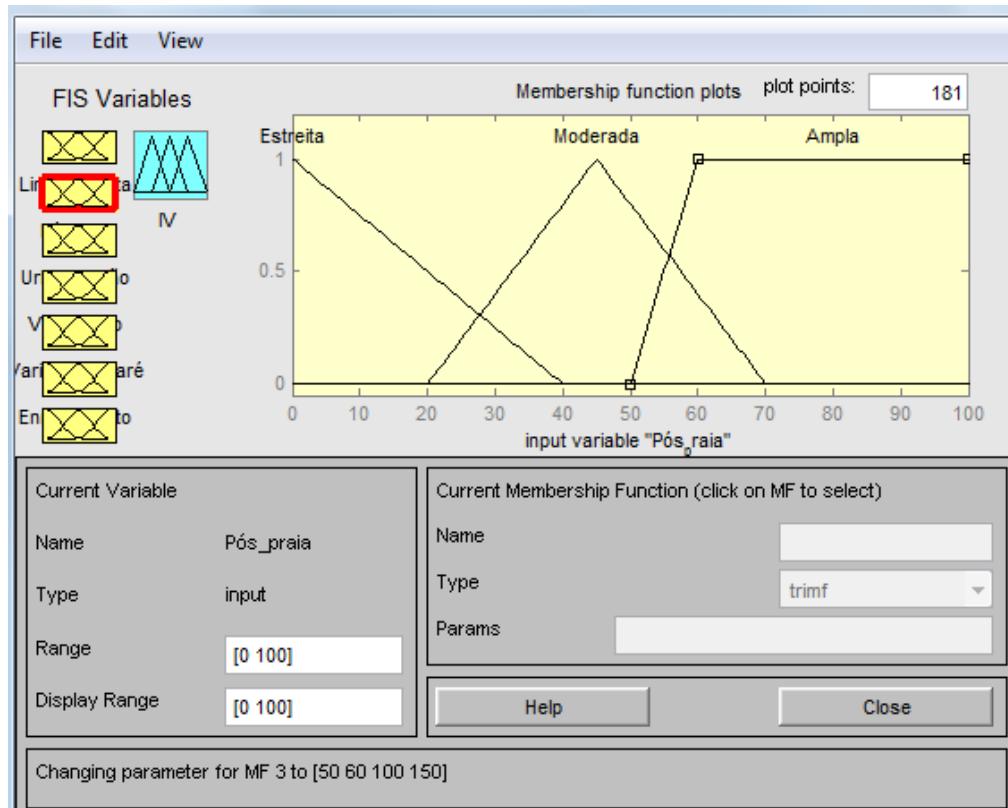
Fonte: A autora

Salienta-se que, quanto mais amplo for a pós-praia, menor será a probabilidade da vulnerabilidade à erosão costeira. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 100 para os valores da variável. Foi adotado o valor de 100 para pós-praia ampla, em que a influência humana ainda não ocasionou vulnerabilidade. Na medida em que a faixa de praia estreita-se diminui o valor atribuído a esta variável.

Baseado na Figura 25 foi definido os termos primários das partições fuzzy: ausente, estreita, moderada e ampla. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 26, sendo do tipo triangular para as partições estreita e moderada e trapezoidal para a partição ampla.

Analizando a Figura 26, quando o valor atribuído a pós-praia foi 40, este valor pertence a partição estreita e moderada, onde respectivamente tem um grau de pertinência 0 e 0,7. Quando o valor atribuído a pós-praia foi 58, este valor pertence a partição moderada e ampla, ambas tem um grau de pertinência 0,6.

Figura 26 – Funções de Pertinência da variável Pós-Praia



A Tabela 7 apresenta resumidamente os valores dos números fuzzy e as partições fuzzy.

Tabela 7 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável pós-praia

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Estreita	Linear Decrescente	-	0	40
Moderada	Triangular	20	45	70
Ampla	Trapezoidal	50	60 -100	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

#### 4.2.7.3 Variável Vegetação

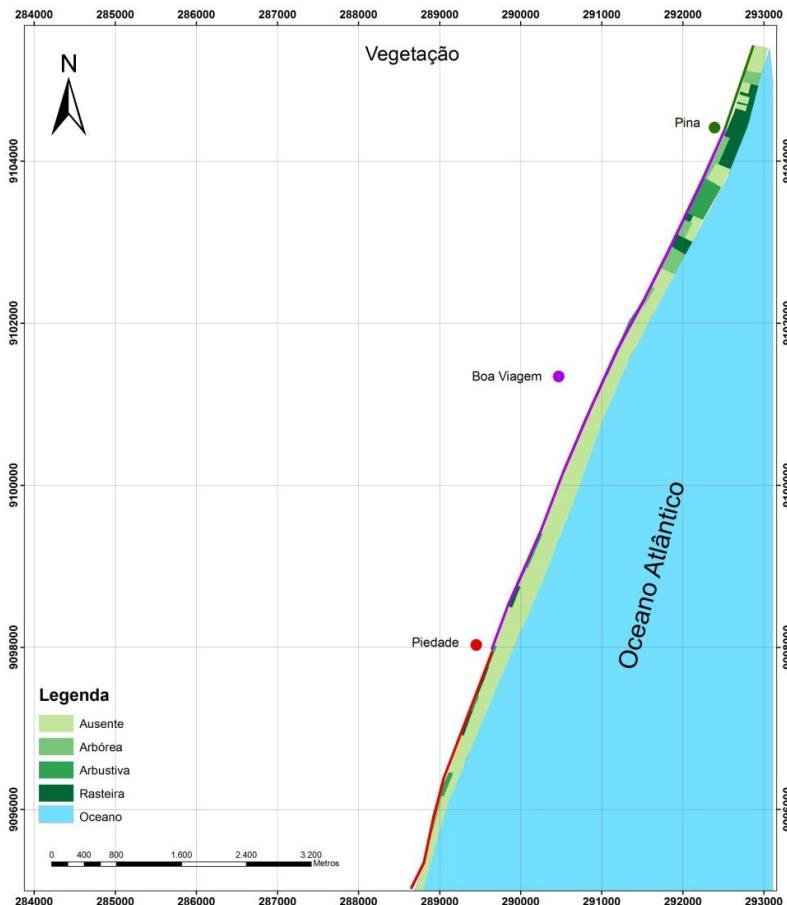
A presença de vegetação na área costeira mostra que o ambiente praial ainda não sofreu muita intervenção do homem, e em na maioria dos casos não apresenta problemas de erosão costeira. Com a descaracterização das dunas e da vegetação rasteira causada pela implantação de benfeitorias de lazer e plantações de coqueiros acabam afetando diretamente a dinâmica praial, aumentando desta maneira as chances de vulnerabilidade à erosão costeira. De forma a minimizar o número de termos primários e consequentemente o número de regras, optou-se por agrupar as classificações: ausente e rasteira que foram propostas na Tabela 5 sem perder eficiência do modelo fuzzy.

A Figura 27 mostra as classificações identificadas através da classificação supervisionada no processo de fotointerpretação e da visita em campo. Abaixo apresenta-se imagens identificando a vegetação rasteira (a) e arbórea (b).

Salienta-se que, quanto mais a vegetação for nativa, menor será a vulnerabilidade à erosão. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 10 para os valores desta variável. Foi adotado o valor de 10 para vegetação arbórea, em que a influência humana já modificou o ambiente. Na medida

em que altura da vegetação diminui o valor atribuído a esta variável também diminui.

Figura 27 – Classificações da variável Vegetação



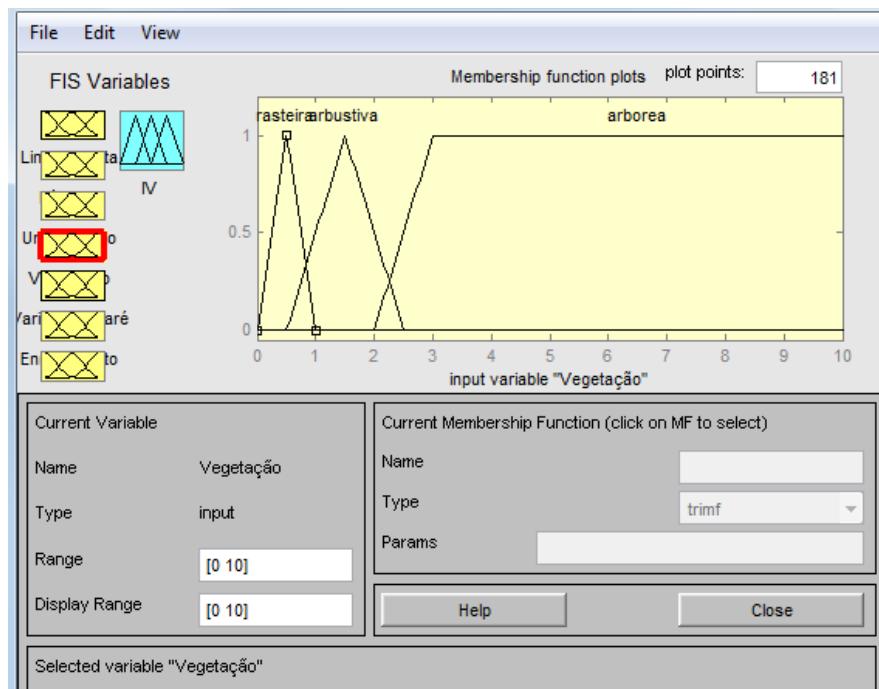
Fonte: A autora



Fonte: A autora

Baseado na Figura 27 foi definido os termos primários das partições fuzzy: ausente, rasteira, arbustiva e arbórea. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 28, sendo do tipo triangular para as partições rasteira e arbustiva e trapezoidal para a partição arbórea.

Figura 28 – Funções de Pertinência da variável Vegetação



Analizando a Figura 28, quando o valor atribuído a vegetação foi 2, este valor pertence a partição arbustiva e arbórea, onde respectivamente teve um grau de pertinência 0,4 e 0. Quando o valor atribuído a vegetação foi 2,25, este valor pertence a partição arbustiva e arbórea, ambas tem um grau de pertinência 0,2. A Tabela 8 apresenta os valores resumidamente dos números fuzzy e as partições fuzzy.

Tabela 8 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável vegetação

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 1$
Rasteira	Triangular	0	0,5	1
Arbórea	Triangular	0,5	1,75	2,5
Arbustiva	Trapezoidal	2	3-10	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

#### **4.2.7.4 Variável Enrocamento**

A presença do enrocamento no ambiente praial mostra que o ambiente sofreu uma intervenção antrópica apresentando problemas de erosão costeira. O enrocamento é considerado uma estrutura rígida que visa conter a erosão marinha, devido a proteção ser feita com rochas tendo a missão de retirar a energia das ondas e proteger a área urbanizada. A contenção do mar, por conta do mau planejamento da cidade, se torna um problema, pois exige cuidados constantes devido o aumento da vulnerabilidade. A Figura 29 mostra as classificações identificadas através do processo de fotointerpretação e da visita em campo. Ao lado apresenta-se uma imagem com a presença de enrocamento.

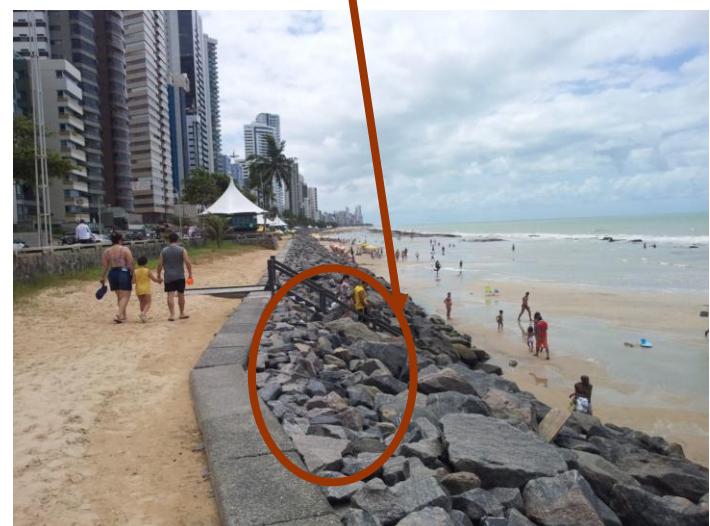
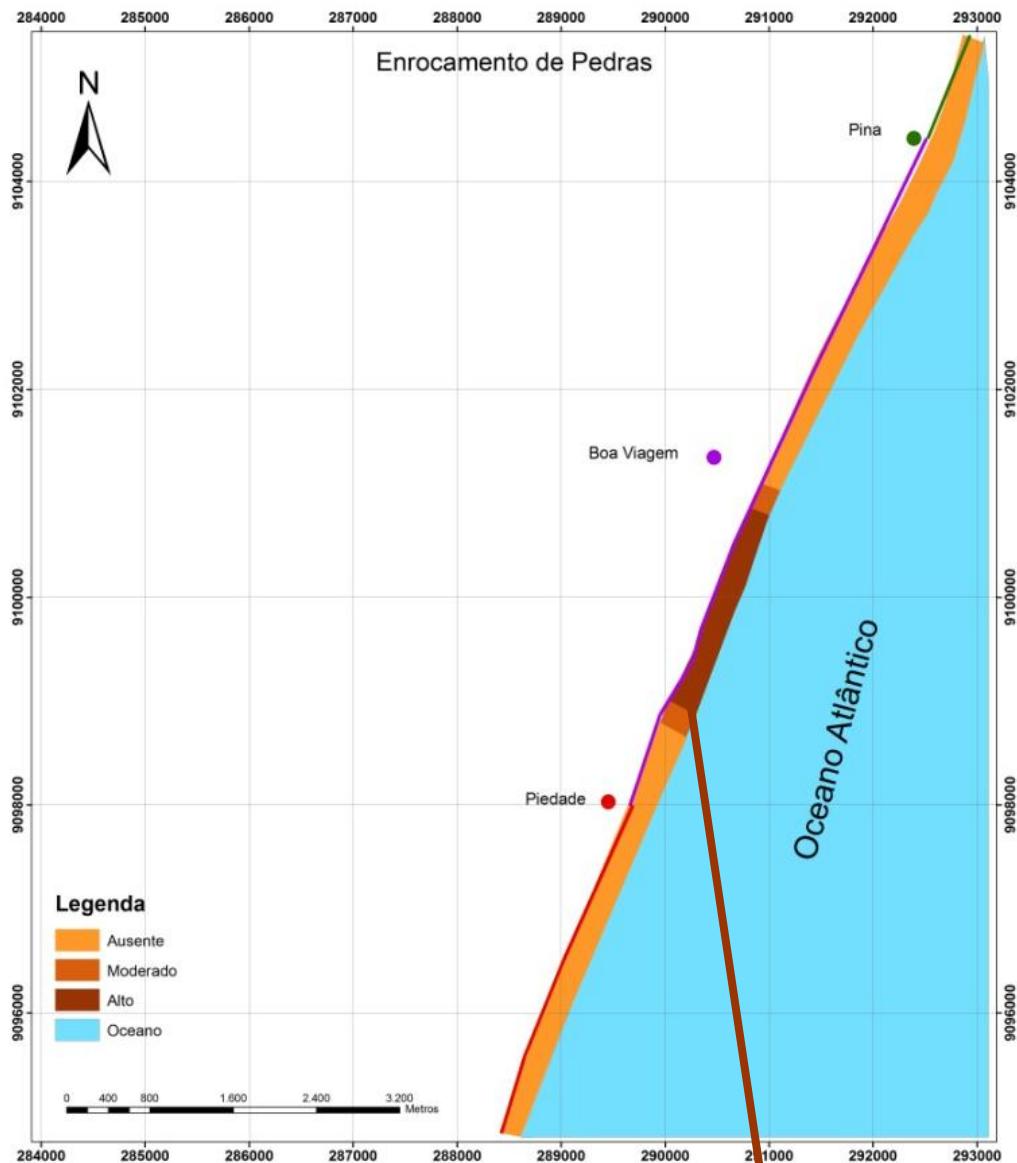
Salienta-se que, quanto maior for a construção de enrocamento maior será a vulnerabilidade à erosão. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 10 para os valores da variável. Foi adotado o valor de 10 para os locais com enrocamentos, uma vez que quanto maior for a área construída maior é a influência. Na medida em que a presença de enrocamentos diminui o valor atribuído a esta variável também diminui.

Baseado na Figura 29 foi definido os termos primários das partições fuzzy: ausente, moderado e alto. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 30, sendo do tipo linear decrescente para a partição ausente, triangular para a partição moderado e linear crescente para a partição alta.

Analizando a Figura 30, quando o valor atribuído ao enrocamento foi 1, este valor pertence a partição moderada e alta, onde respectivamente teve um grau de pertinência 0 e 0,01. Quando o valor atribuído ao enrocamento foi 5, este valor pertence a partição alta, tendo grau de pertinência 0,5.

A Tabela 9 apresenta os valores resumidamente dos números fuzzy e as partições fuzzy.

Figura 29 – Classificações da variável Enrocamento



Fonte: A autora

Figura 30 – Funções de Pertinência da variável Enrocamento

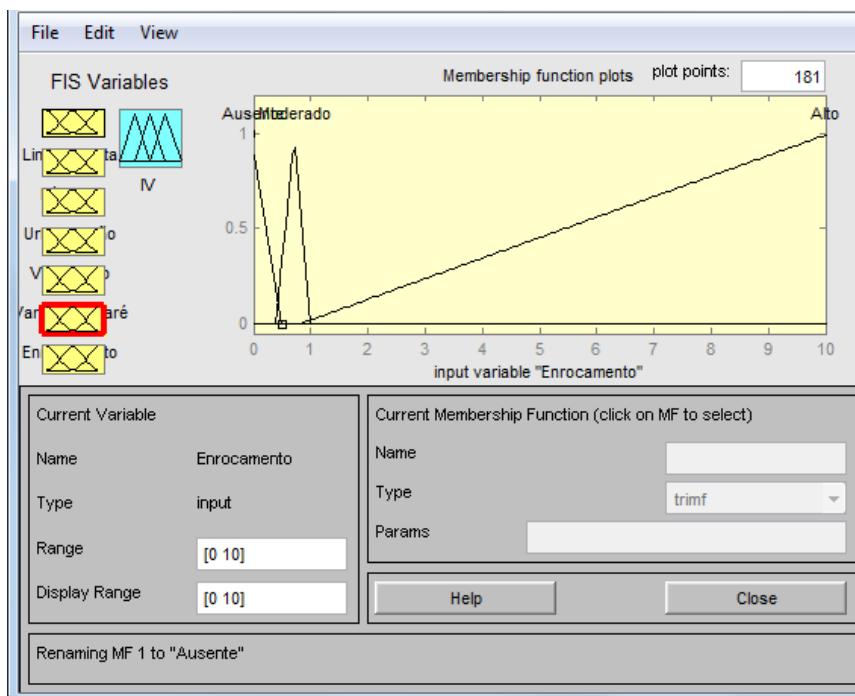


Tabela 9 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável enrocamento

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Baixo	Linear Decrescente	-	0	0,5
Moderado	Triangular	0,4	0,7	1
Alto	Linear Crescente	0,9	10	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

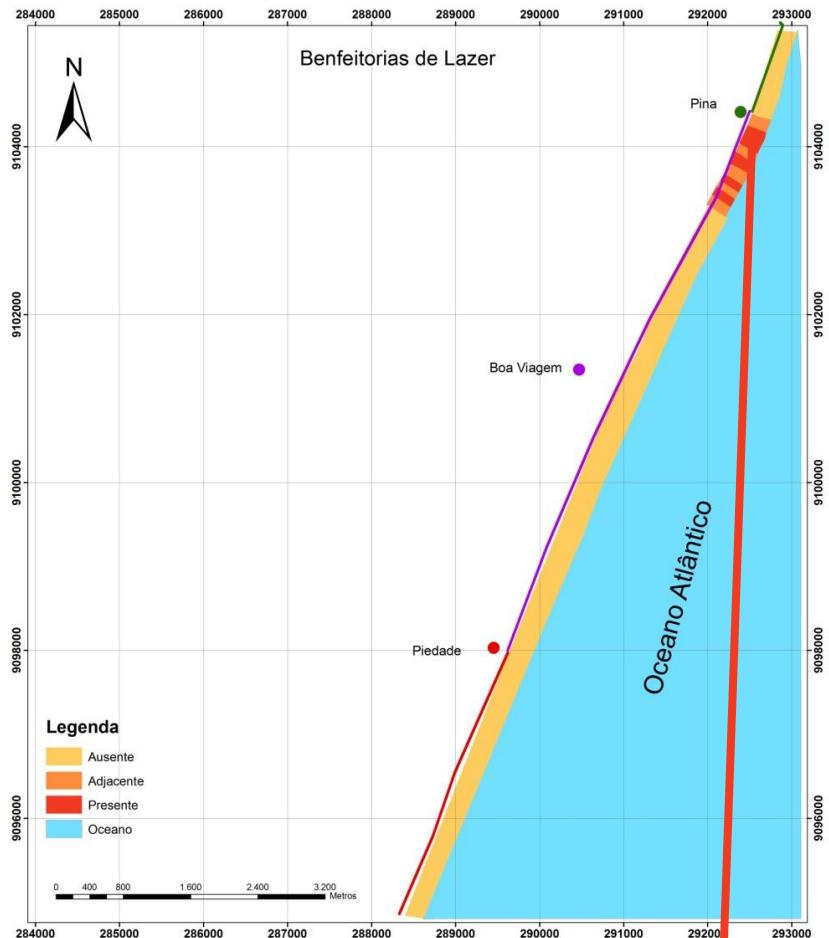
#### 4.2.7.5 Variável Benfeitorias de Lazer

Com a construção de benfeitorias de lazer na pós-praia observou-se que houve interferência humana e assim sendo susceptíveis à vulnerabilidade à erosão. A Figura 31 mostra às classificações identificadas através do processo de fotointerpretação e da visita a área de estudo. E ao lado mostra uma imagem onde se encontram locais com a presença de benfeitorias de lazer na pós-praia.

Salienta-se que, quanto mais áreas forem ocupadas por construções

na pós-praia, maior tenderá a vulnerabilidade à erosão. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 100 para os valores desta variável. Foi adotado o valor de 100 para benfeitorias de lazer ausente, em que ainda não houve influência humana.

Figura 31 – Classificações da variável Benfeitorias de Lazer



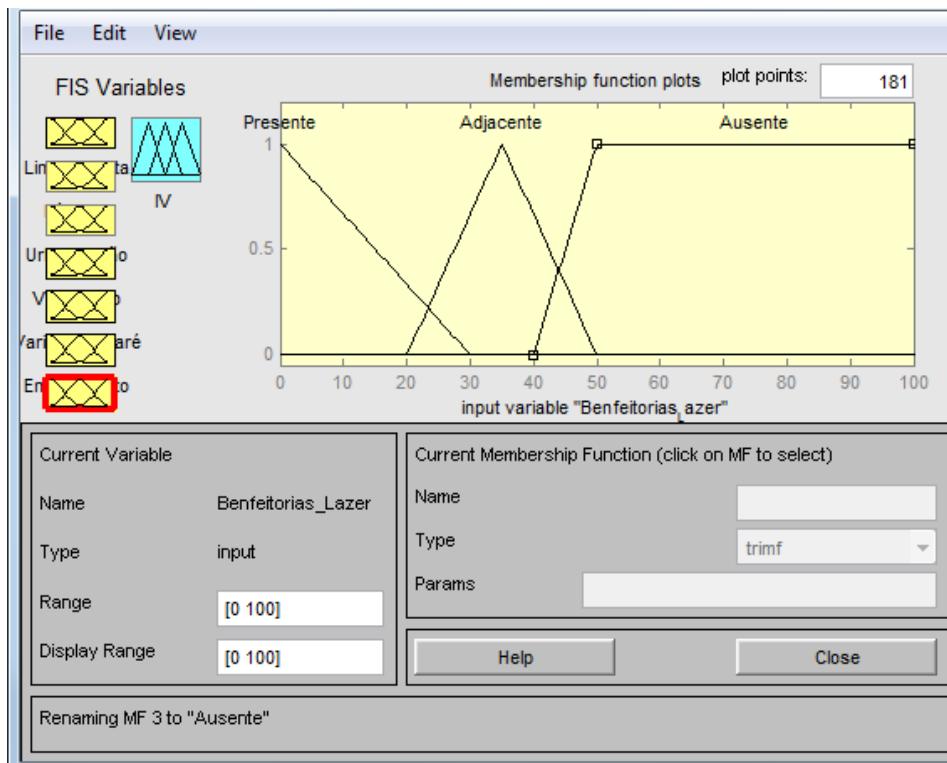
Fonte: Gregório (2012)

Na medida em que surgem as construções de benfeitorias de lazer diminui-se o valor atribuído a esta variável, pois quanto menor houver a presença das benfeitorias menor é a possibilidade do local ser vulnerável.

Baseado na Figura 31 foi definido os termos primários das partições fuzzy: presente, adjacente e ausente. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 32, sendo do tipo linear decrescente para a partição presente, triangular para a partição adjacente e trapezoidal para a partição ausente.

Analizando a Figura 32, quando o valor atribuído à benfeitorias de lazer foi 25, este valor pertence as partições presente e adjacente, onde ambas tem um grau de pertinência 0,25. Quando o valor atribuído à benfeitorias de lazer foi 50, este valor pertence as partições adjacente e ausente, onde tem um grau de pertinência respectivamente 0 e 1.

Figura 32 – Funções de Pertinência da variável Benfeitoria de Lazer



A Tabela 10 apresenta resumidamente os valores dos números fuzzy e as suas partições fuzzy.

Tabela 10 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável benfeitorias de lazer

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Presente	Linear Decrescente	-	0	30
Adjacente	Triangular	15	30	50
Ausente	Trapezoidal	40	50-100	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

#### 4.2.7.6 Variável Urbanização

A ocupação de um ambiente costeiro influí diretamente no processo de dinâmica praial podendo criar, acelerar e ampliar processos de desordenação na área costeira. Nos ambientes costeiros em que o processo de urbanização vem crescendo se apresenta maior susceptibilidade a vulnerabilidade, onde muitas vezes dependendo da distância que esteja zona costeira a área passa a ser vulnerável a processos erosivos.

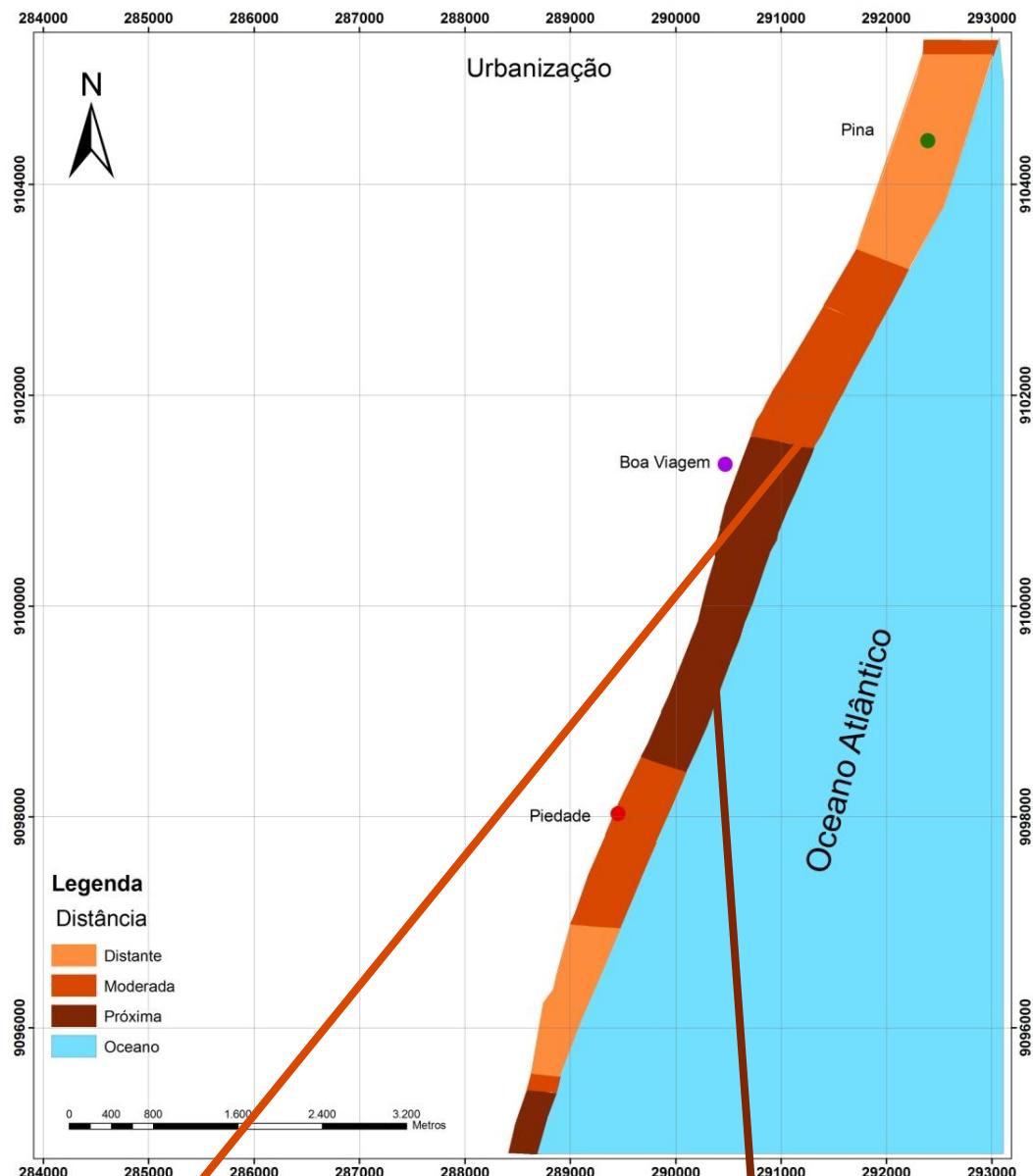
A Figura 33 mostra as classificações identificadas através do processo de fotointerpretação e um levantamento da caracterização na área de estudo. E ao lado apresenta-se uma imagem onde foi considerado que a urbanização está próximo a área costeira, com os critérios da caracterização do Setor 3 e da área com enrocamento, onde a avenida apresenta adjacência a face praial.

Salienta-se que, quanto mais distantes a urbanização estiver das áreas costeiras, menor será a vulnerabilidade a erosão. Sendo assim, estabeleceu-se um intervalo de 0 a 100 para os valores da variável. Foi adotado o valor de 100 para área urbanizada distante da área costeira em que a influência humana não ocasiona vulnerabilidade. Na medida em que a urbanização se aproxima das áreas costeiras diminui-se o valor atribuído a esta variável.

Baseado na Figura 33 foi definido os termos primários das partições fuzzy: próxima, moderada e distante. As funções de pertinência destas partições estão apresentadas na Figura 34, sendo do tipo triangular para as

partições próxima e moderada e trapezoidal para a partição distante.

Figura 33 – Classificações da variável Urbanização

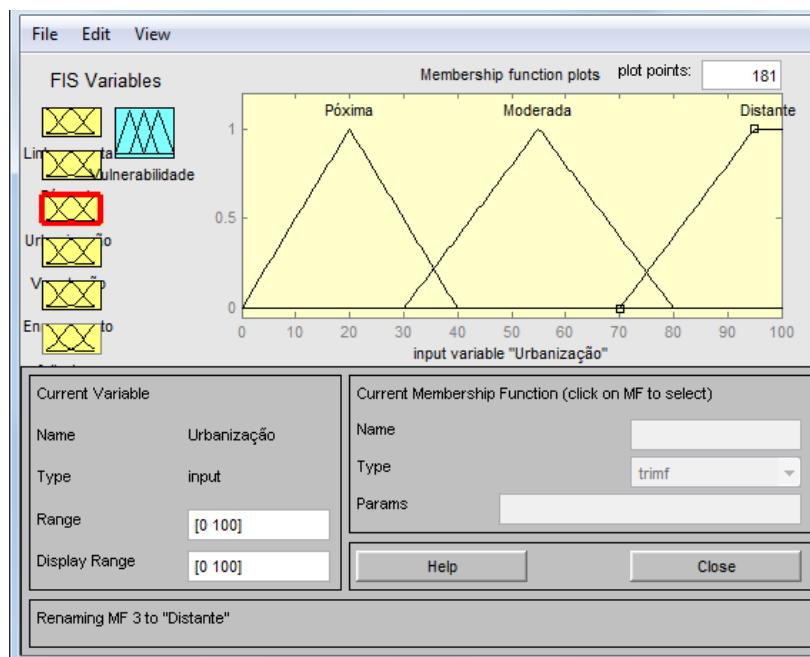


Fonte: Gregório (2012)



Fonte: A autora (2012)

Figura 34 – Funções de Pertinência da variável Urbanização



Analizando a Figura 34, quando o valor atribuído a variável urbanização foi 40, este valor pertence as partições próxima e moderada, onde respectivamente tem um grau de pertinência 0 e 0,3. Quando o valor atribuído à urbanização foi 75, este valor pertence a partição moderada e distante, ambas com um grau de pertinência 0,3. A Tabela 11 apresenta os valores resumidamente dos números fuzzy e suas partições fuzzy.

Tabela 11 – Valores de pertinência dos números Fuzzy da variável urbanização

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Próxima	Triangular	0	20	40
Moderada	Triangular	30	55	80
Distante	Trapezoidal	70	90 -100	-

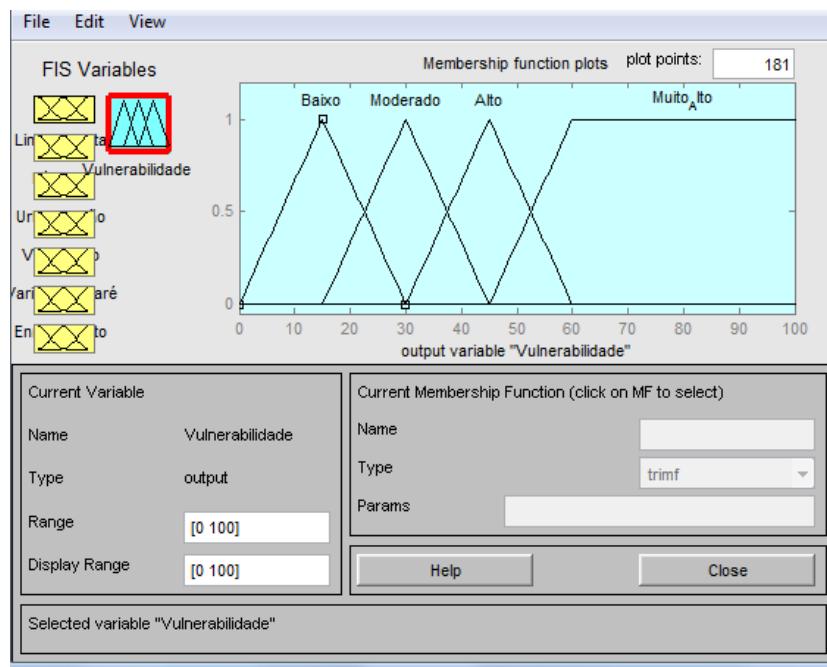
$\mu$  = Grau de Pertinência

#### 4.2.7.7 Análise da Vulnerabilidade

A variável de saída do modelo fuzzy são as classes de vulnerabilidade

à erosão. Nesta pesquisa foram classificadas quatro partições: baixa, moderada, alta e muito alta. Para a saída do modelo classificando a vulnerabilidade a erosão adotou-se uma escala de 0 a 100, onde se convencionou que quanto menor o valor desta saída, menor é a vulnerabilidade a erosão, ou seu oposto quanto maior for o valor desta saída do modelo maior é a vulnerabilidade a erosão. A Figura 35 apresenta as funções de pertinência das partições fuzzy da saída classificada deste modelo. Sendo do tipo triangular para as partições baixa, moderada e alta e do tipo trapezoidal para a partição muito alta.

Figura 35 – Funções de Pertinência dos Níveis de Vulnerabilidade



Analizando a Figura 35, quando o valor atribuído ao nível de vulnerabilidade foi 30, este valor pertence as partições baixa, moderada e alta, onde respectivamente tem um grau de pertinência 0; 1 e 0, então pelo grau de pertinência a partição é moderada. Quando o valor atribuído ao nível de vulnerabilidade foi 60, este valor pertence as partições alta e muito alta, tendo respectivamente o grau de pertinência 0 e 1, então pelo grau de pertinência a partição é muito alta. A Tabela 12 apresenta resumidamente os valores dos números fuzzy e as partições fuzzy.

---

Tabela 12 – Valores de pertinência dos números Fuzzy dos níveis de vulnerabilidade (%)

Adjetivos	Tipo de Função	Valores dos Números Fuzzy		
		$\mu = 0$	$\mu = 1$	$\mu = 0$
Baixo	Triangular	0	15	30
Moderado	Triangular	15	30	45
Alto	Triangular	30	45	60
Muito Alto	Trapezoidal	45	60-100	-

$\mu$  = Grau de Pertinência

#### 4.2.7.8 Construção das Regras

As regras foram construídas seguindo conhecimentos dos Conjuntos das Partes (CP) e Princípio Fundamental da Contagem, ver detalhes, respectivamente em Lima *et al.* (2005) e Dante (2011).

Sabendo que as variáveis constam de uma sequência ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ ) onde cada variável  $V_i$  está associada a três partições fuzzy: A (1<sup>a</sup> partição fuzzy), B (2<sup>a</sup> partição fuzzy) e C (3<sup>a</sup> partição fuzzy). Então o número de regras que podem ser construídas para modelagem fuzzy de vulnerabilidade à erosão é do tipo  $2^6 + 3^6 = 793$  regras.

Para criação das duas MF propostas foram estabelecidas 27 e 114 regras que fazem parte do processo de inferência fuzzy, as demais regras foram excluídas por serem consideradas improváveis de ocorrer e não serem adequadas a modelagem, como mostram dois exemplos abaixo:

1. **Se** linha de costa = estável **e** pós-praia estreita **então** vulnerabilidade = alta
2. **Se** urbanização= próxima **e** benfeitoria de lazer presente **então** vulnerabilidade alta

As 27 regras foram concentradas por operadores: "If", "and" e "then" estabelecida inicialmente uma a uma variável com sua partição fuzzy

(exemplo 1) para as demais regras foram realizada a integração com todas as variáveis (exemplo 2):

1. **Se** linha de costa = estável **então** vulnerabilidade = baixo
2. **Se** linha de costa = estável **e** pós-praia = ampla **e** urbanização = distante **e** vegetação = rasteira **e** enrocamento = ausente **e** benfeitoria de lazer = ausente **então** vulnerabilidade = baixa

Na construção das 114 regras utilizaram-se os mesmos operadores usados na construção das 27 regras, além de outras regras que são prováveis de ocorrer.

A construção do conjunto de regras e os graus de pertinência foram atribuídos ao processo de inferência para extrair a resposta final. Além disso, foram utilizados para a defuzzificação o Método de Mínimos e Máximos para se encontrar a saída do processo. Para confirmação da criação das regras utilizou-se a seguinte análise numérica:

Se linha de costa = estável (0,7) **e** urbanização distante (0,3) **então** vulnerabilidade baixa ( $\min(0,7;0,3)=0,3$ )

Existem casos em que um valor estabelecido para uma variável possui um grau de pertinência presente em mais de uma partição fuzzy, obtendo-se assim mais de um valor de grau de pertinência para o mesmo. Nesse caso o índice final para essa função é o máximo dos índices.

No Capítulo 5 a seguir serão apresentados os resultados da modelagem fuzzy além das análises dos mapas de vulnerabilidade obtidos a partir da combinação das regras.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados em relação ao deslocamento da linha de costa do levantamento realizado em 2007, 2009, 2010 e 2012. Além da análise realizada em relação a classificação da vulnerabilidade à erosão utilizando a modelagem fuzzy.

### 5.1 Resultado do deslocamento temporal da linha de costa

Após a caracterização da área de estudo são apresentados os resultados observados nos cinco setores. Na Tabela 13 observam-se as taxas de variação do deslocamento da linha de costa (m/ano), deslocamentos máximos, deslocamentos mínimos e o desvio padrão dos anos 2009, 2010 e 2012.

Os dados da Tabela 13 são apresentados em forma de gráfico para melhor visualização das características das praias de Boa Viagem e Piedade. Os resultados são analisados convencionados a aferir a mudança da linha de costa, taxas negativas como de erosão (direção ao continente) e acresção as taxas positivas (direção ao mar).

O setor 1 localizado na praia do Pina e parte norte da praia da Boa Viagem e o setor 4 localizado em Piedade apresentaram as médias anuais positivos na taxa de deslocamento da linha de costa entre os anos de 2007 a 2009, 2007 a 2010 e 2007 a 2012. Esse setor apresenta uma estabilidade na linha de costa por ter um ambiente praial bem desenvolvido, com uma face praial plana e extensa. O setor 2 localizado na praia da Boa Viagem apresentou as médias negativas na taxa de deslocamento da linha de costa entre os anos de 2007 a 2009, 2007 a 2010 e 2007 a 2012. Esse setor apresenta

uma instabilidade na linha de costa por ter um ambiente praial menos desenvolvido e possuir uma tendência a erosão.

Tabela 13 - Taxa de Variação (m/Ano) do deslocamento da linha de costa Setorial

Setores/Ano	Média Anual (m)	Deslocamento Mínimo (m)	Deslocamento Máximo (m)	Desvio Padrão (m)
Setor 1 – 2009	0,62	-6,48	9,61	3,15
Setor 1 – 2010	0,79	-6,37	9,76	2,41
Setor 1 – 2012	0,86	-0,88	9,95	1,93
Setor 2 – 2009	-1,41	-9,77	1,05	2,05
Setor 2 – 2010	-0,68	-6,9	2,83	2,36
Setor 2 - 2012	-0,18	-6,13	5,45	3,03
Setor 3 – 2009	-1,63	-7,88	1,92	2,35
Setor 3 – 2010	-0,45	-3,71	2,51	1,45
Setor 3 - 2012	0,03	-4,17	5,7	2,67
Setor 4 – 2009	0,54	-9,82	8,46	3,35
Setor 4 – 2010	0,83	-9,81	9,71	4,78
Setor 4 - 2012	0,79	-9,99	10	5,19
Setor 5 – 2009	-3,53	-10	-2,53	2,97
Setor 5 – 2010	-2,94	-9,82	-7,9	0,74
Setor 5 - 2012	0,59	-10	10	4,13

O setor 3 (praia de Boa Viagem) e o setor 5 (praia de Piedade) apresentaram as médias negativas nas taxas de variação do deslocamento da linha de costa nos anos de 2009 e 2010 e as médias positivas nas taxas de variação do deslocamento da linha de costa no ano de 2012.

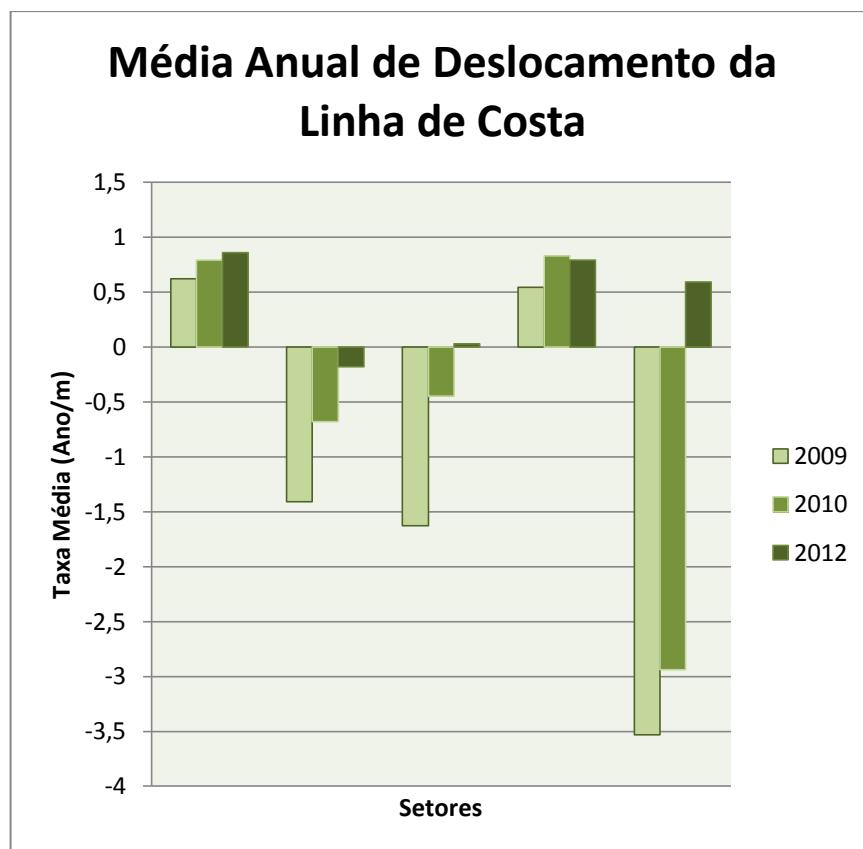
A Figura 36 mostra as médias da taxa de variação do deslocamento da linha de costa em metros por ano dos 5 setores das praias de Boa Viagem e Piedade entre os anos de 2007 e 2012.

Nas variações dos deslocamentos mínimos da linha de costa observam-se que todos os setores apresentam uma tendência erosiva para os períodos de 2007 a 2009, 2007 a 2010 e 2007 a 2012, como pode ser visto na Figura 37.

Em relação às distâncias máximas dos setores, observa-se que os setores de 1 a 4 apresentaram deslocamentos máximos positivos, sendo estes maiores deslocamentos observados (Tabela 13), nos valores de 9,76 (m/ano)

e 9,95 (m/ano) para o setor 1 nos períodos respectivamente de 2010 e 2012 e os valores de 9,71 (m/ano) e 10 (m/ano) para o setor 4 nos períodos respectivamente de 2010 e 2012. Entretanto essa tendência de um maior deslocamento da linha de costa em direção ao oceano foi menor para os setores 2 e 3, apresentando valores maiores em 2012 para ambos setores para o setor 5 o deslocamento máximo foi negativo nos períodos de 2009 e 2010. Ressalta-se que o maior avanço da linha de costa em direção ao continente, quando ocorreu maior progradação foi durante o ano de 2012 nos setores 1, 4 e 5, ver Figura 38.

Figura 36 - Média da taxa de variação do Deslocamento da Linha de Costa (m/ano) Setorial e Temporal



Na Figura 39 apresenta-se o desvio padrão na taxa de deslocamento da linha de costa. Os valores mais altos foram observados no setor 4 valores com 4,78m e 5,19m respectivamente para os anos de 2010 e 2012, (Tabela 13).

Figura 37 – Taxa de Deslocamento Mínimo (m/ano) Setorial e Temporal

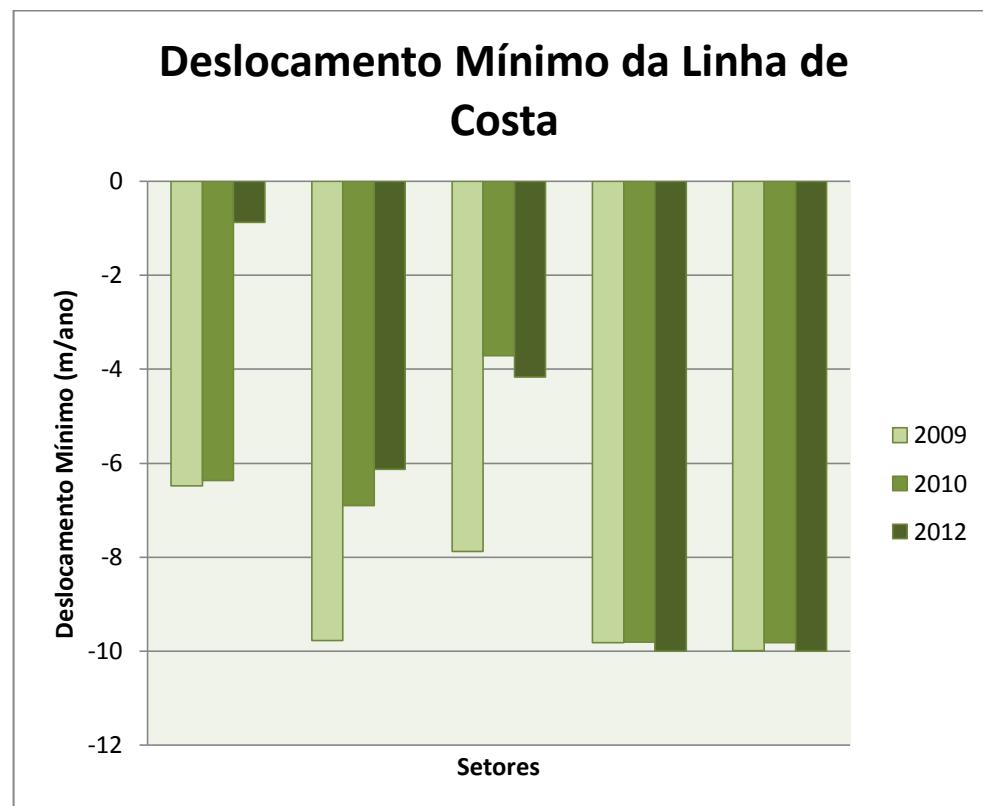
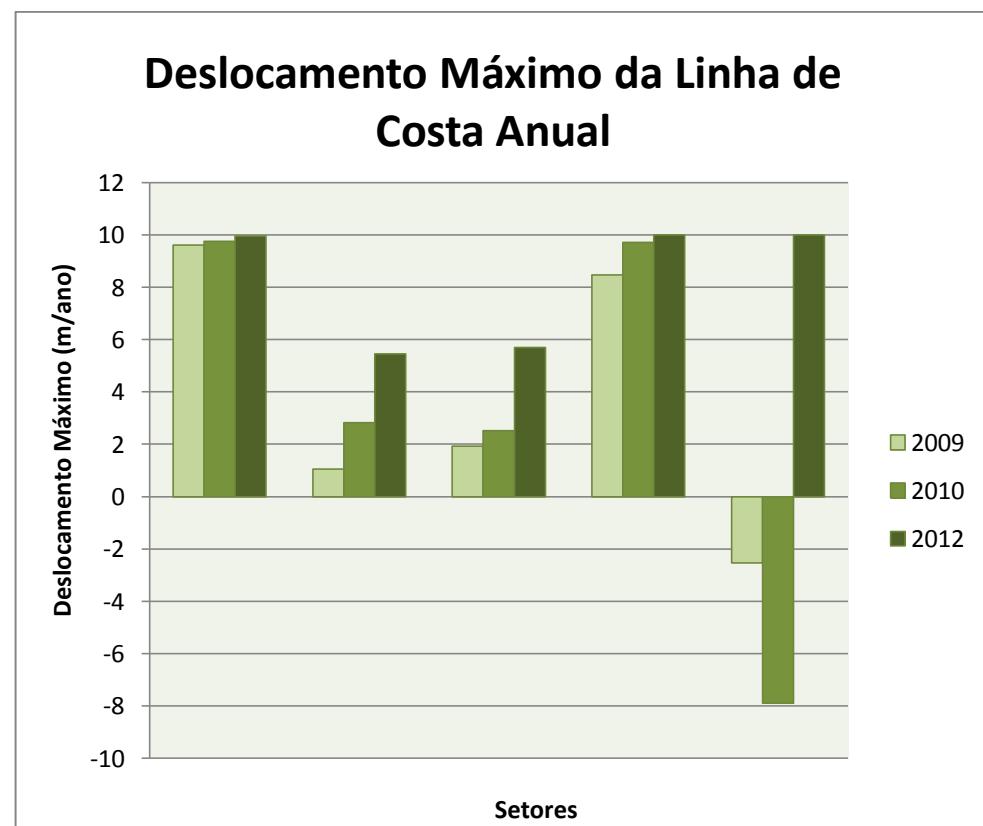
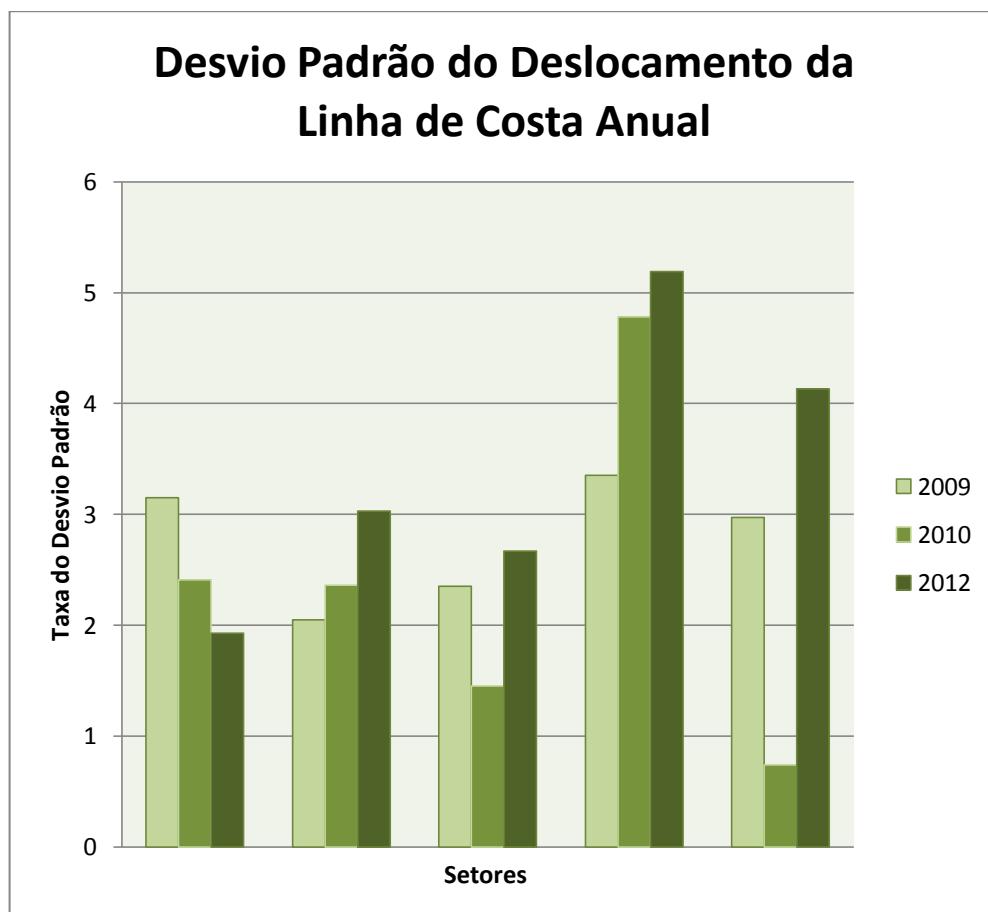


Figura 38 – Taxa de Deslocamento Máximo (m/ano) Setorial e Temporal



Os dados apresentaram uma diminuição nos valores do desvio padrão em todos os outros setores. O menor valor observado foi no setor 5 e no setor 3 os valores do desvio padrão são 0,74m e 1,45m, respectivamente, ambos para o ano de 2010. Ressalvando que estes setores representam as menores extensões nos seguimentos dos 5 setores, principalmente o setor 3, que apresentou uma diminuição na extensão do seu seguimento a partir do ano de 2009, devido a expansão do enrocamento para o norte na praia da Boa Viagem.

Figura 39 – Taxa de Deslocamento do Desvio Padrão (m/ano) Setorial e Temporal



Na Tabela 14 observa-se a distância em metros dos deslocamentos médios, mínimos e máximos nos períodos de 2007 a 2009, 2007 a 2010 e 2007 a 2012. Esses dados são apresentados em forma de gráfico para melhor visualização das características dos 5 setores. Os resultados são analisados para verificação em qual setor houve acresção ou erosão.

---

Tabela 14 – Valores da Distância da Variação (m) do deslocamento da linha de costa Setorial

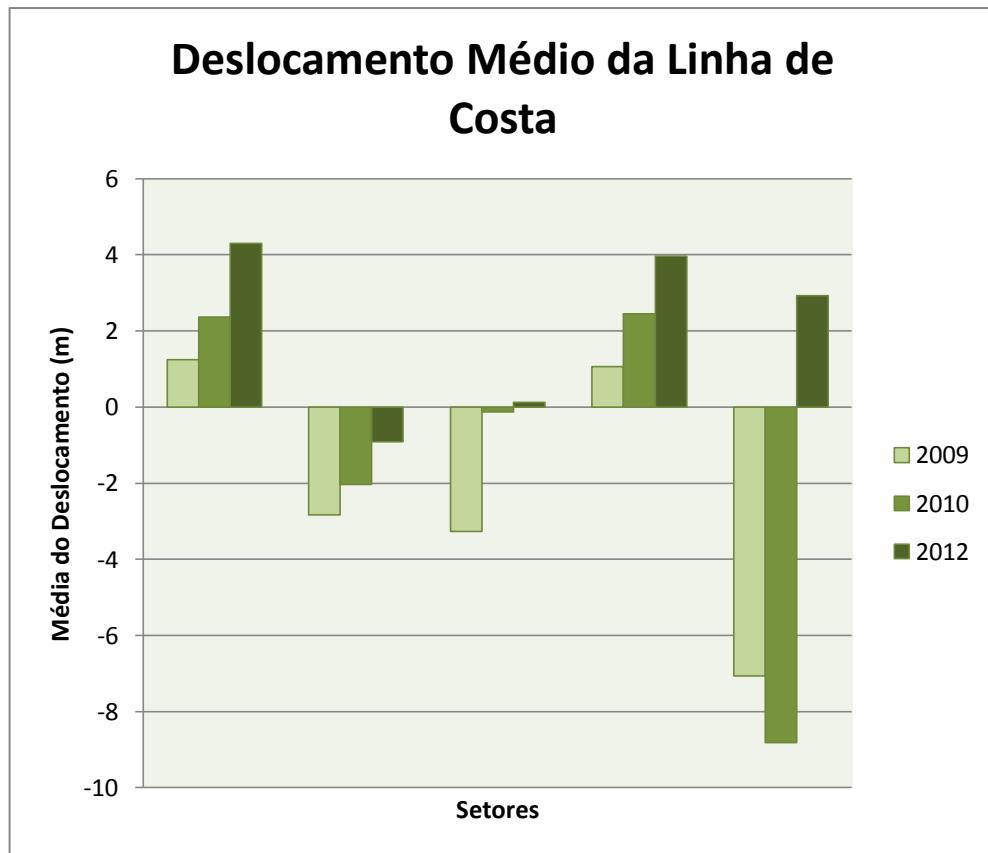
Setores/Ano	Média (m)	Deslocamento Mínimo (m)	Deslocamento Máximo (m)
Setor 1 – 2009	1,24	-12,96	19,22
Setor 1 – 2010	2,37	-19,11	29,28
Setor 1 - 2012	4,30	-4,40	49,75
Setor 2 – 2009	-2,83	-19,54	2,1
Setor 2 – 2010	-2,03	-20,70	8,49
Setor 2 - 2012	-0,91	-30,65	27,25
Setor 3 – 2009	-3,27	-15,76	3,84
Setor 3 – 2010	-0,13	-11,13	7,53
Setor 3 - 2012	0,13	-20,85	28,5
Setor 4 – 2009	1,07	-19,64	16,92
Setor 4 – 2010	2,45	-29,43	29,13
Setor 4 - 2012	3,97	-49,95	50
Setor 5 – 2009	-7,07	-20,00	-5,06
Setor 5 – 2010	-8,82	-29,46	-23,7
Setor 5 - 2012	2,93	-50,00	50

Todos os valores do deslocamento médio da linha de costa no setor 1 e o setor 4 apresentam acresção em todos os períodos 2007 a 2009, 2007 a 2010 e 2007 a 2012. No setor 2 os valores médios apresentam erosão em todos os períodos. Nos setores 3 e 5 no período de 2007 a 2009 e de 2007 a 2010 apresentam erosão, enquanto no período de 2007 a 2012 a tendência a acresção, como pode ser visto na Figura 40. Observa-se também que o maior deslocamento médio em direção ao continente foi no setor 5 no período de 2007 a 2010 correspondendo um valor de -8,82 m, enquanto no setor 1 houve um deslocamento médio em direção ao oceano no período de 2007 a 2012 correspondendo um valor de 4,30 m.

Para as distâncias mínimas foi observado que todos os setores apresentaram recuos da linha de costa com valores entre -4m e -50m. O setor 1 apresentou o menor valor -4,4m no período de 2007 a 2012 e o maior deslocamento negativo (recesso da linha de costa) no setor 5 com o valor de -50m para o período de 2007 a 2012. Comparando o setor 5, aos setores 2, 3 e 4 observa-se uma diminuição na taxa de deslocamento negativo durante o período de 2012. Mas pode-se observar na Figura 41 que a distância do

deslocamento do setor 4 é praticamente igual a distância média do deslocamento do setor 5.

Figura 40 – Valores do Deslocamento Médio em metros no período de 2007 a 2012



Em relação às distâncias máximas dos setores, observa-se que os setores de 1 a 4 apresentaram deslocamentos máximos positivos, sendo estes maiores deslocamentos observados nos valores de 49,75 m e 50 m respectivamente para o setor 1 e para o setor 4 no período de 2007 a 2012. Entretanto essa tendência de um maior deslocamento da linha de costa em direção a costa foi menor para os setores 2 e 3, principalmente no setor 5 onde o deslocamento máximo foi negativo para os períodos de 2007 a 2010 e 2007 a 2009, mas pode-se observar que no período de 2007 a 2012 a distância do deslocamento máximo tem o valor igual ao do setor 4, sendo a distância maior da análise. A maior acresção da linha de costa em direção ao oceano, ocorreu nos setores 4 e 5 e no mesmo período, como mostra Figura 42.

Figura 41 – Valores da Distância do Deslocamento Mínimo em metros no período de 2007 a 2012

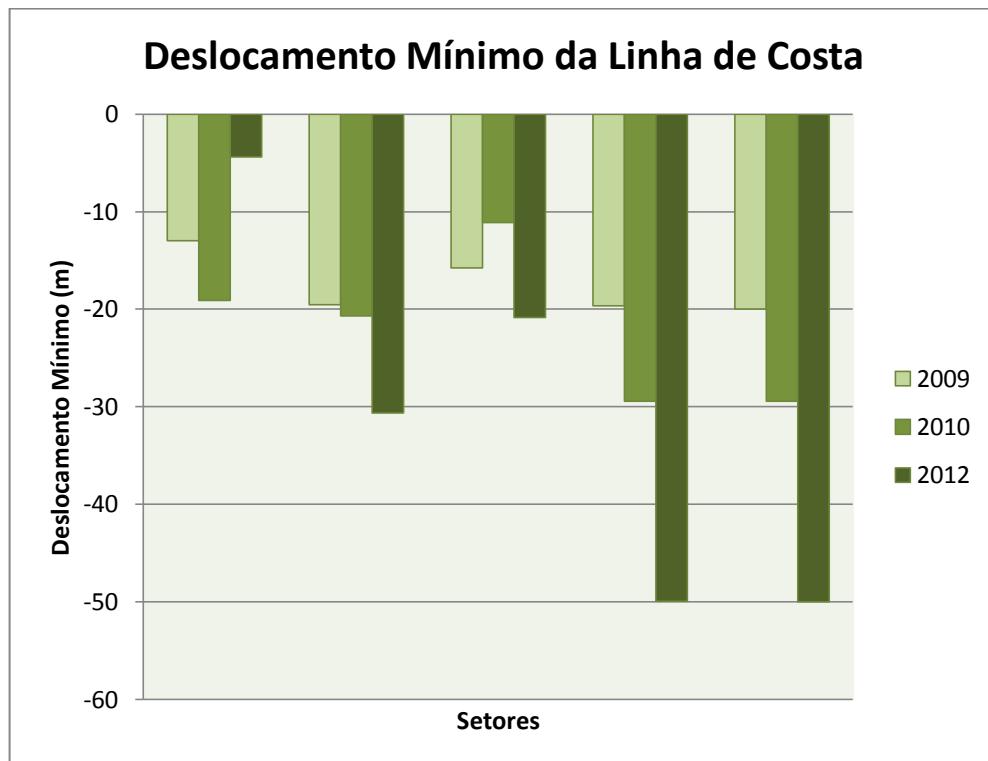
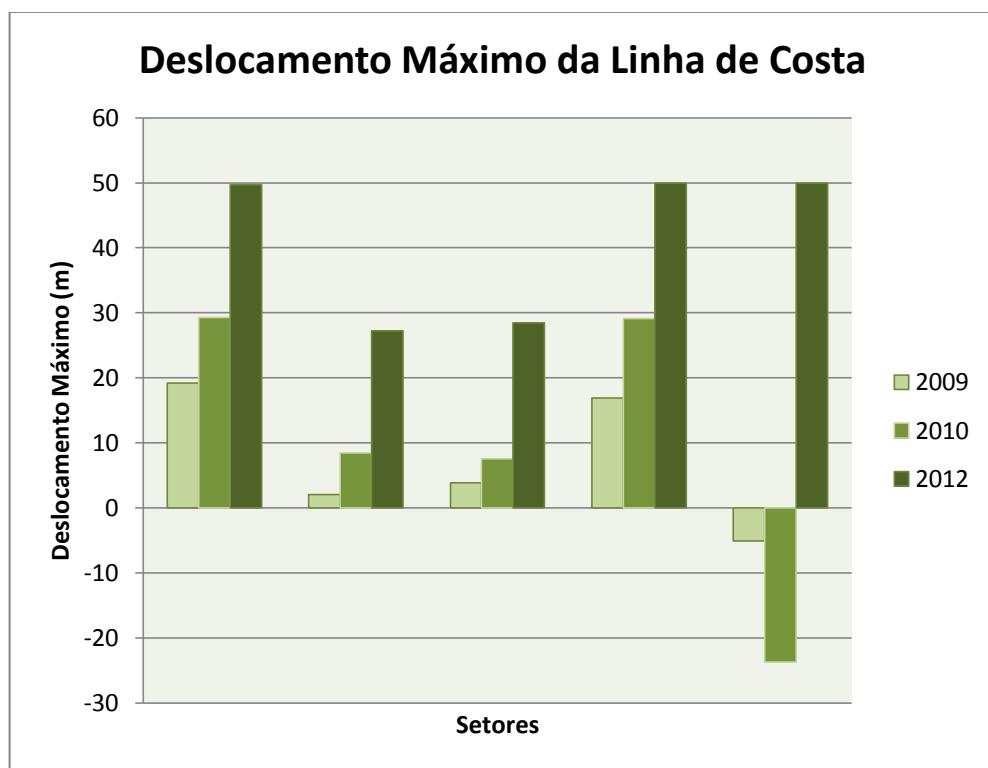


Figura 42 – Valores da Distância do Deslocamento Máximo em metros no período de 2007 a 2012



## 5.2 Análises Paramétricas

Baseado na análise desenvolvida por Silva (2008) em verificar a previsão de risco de escorregamento. Realizou-se uma análise paramétrica para as variáveis: linha de costa, pós-praia, urbanização, enrocamento, benfeitorias de lazer e vegetação. A partir desta análise foi verificada a coerência do Modelo Fuzzy e a influência de cada uma dessas variáveis na vulnerabilidade. Estabeleceram-se valores iniciais das variáveis, como mostra a Tabela 15, utilizando-se a Toolbox de Lógica Fuzzy do Matlab para visualizar as regras e o campo de entrada dessas variáveis na modelagem.

Tabela 15 – Valores Iniciais estabelecidos das variáveis

Variáveis	Variável Linguística	Valor estabelecido
Linha de Costa	Instável	0,05
Pós-praia	Estreita	5
Urbanização	Próxima	5
Vegetação	Rasteira	0,1
Enrocamento	Baixo	0,5
Benfeitoria de Lazer	Presente	5

Os dados estabelecidos inicialmente foram inseridos na caixa *input* obtendo os percentuais de vulnerabilidade para o modelo utilizando 27 e 114 regras, após a inserção, a lógica fuzzy forneceu respectivamente um percentual de 36% e 62,1% correspondendo a vulnerabilidade moderada e muito alta identificado pelo grau de pertinência como mostra a Figura 43 e 44.

Para análise e validação do MF analisou-se a influência da vulnerabilidade para cada variável, sendo que para cada *input* apenas a variável em análise teve os seus valores variados, enquanto as demais permaneceram com valores fixos.

## Modelagem Fuzzy como Subsídios para a Espacialização da Vulnerabilidade Costeira à Erosão

Figura 43 – Visualização do Modelo Fuzzy para valores iniciais – 27 Regras

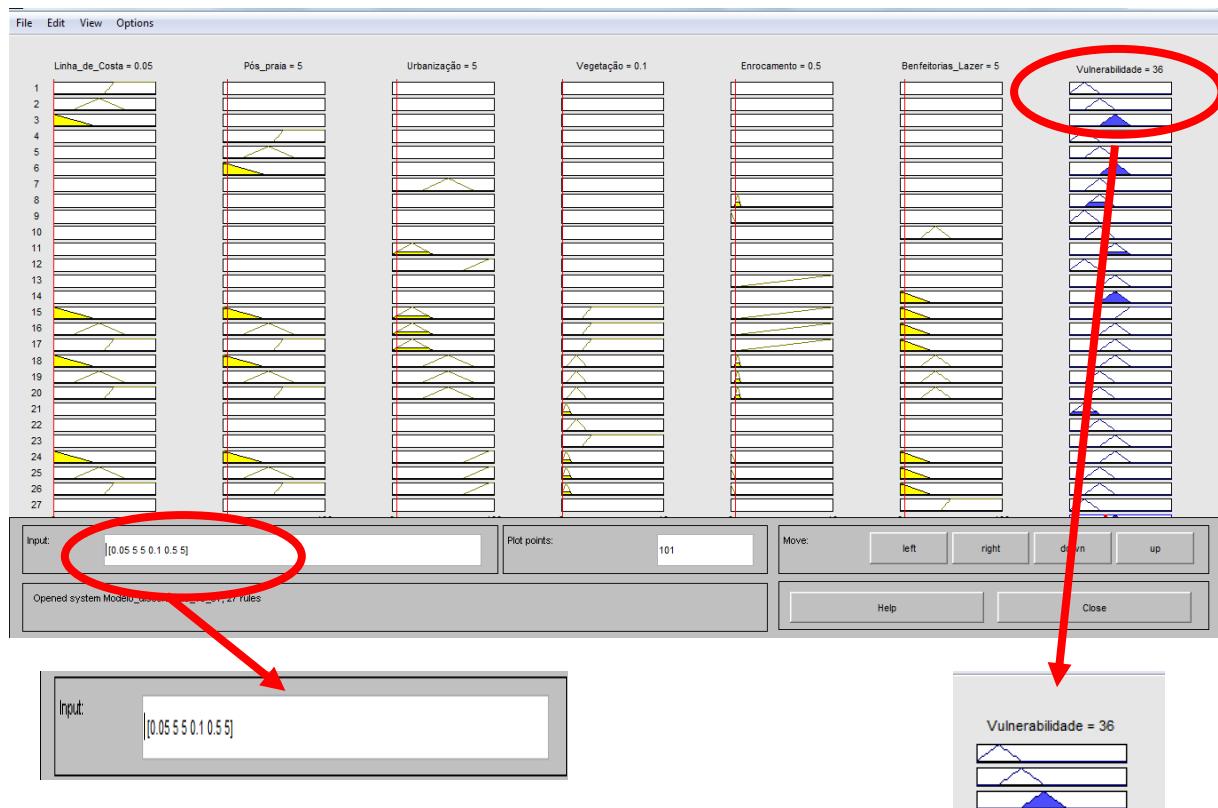
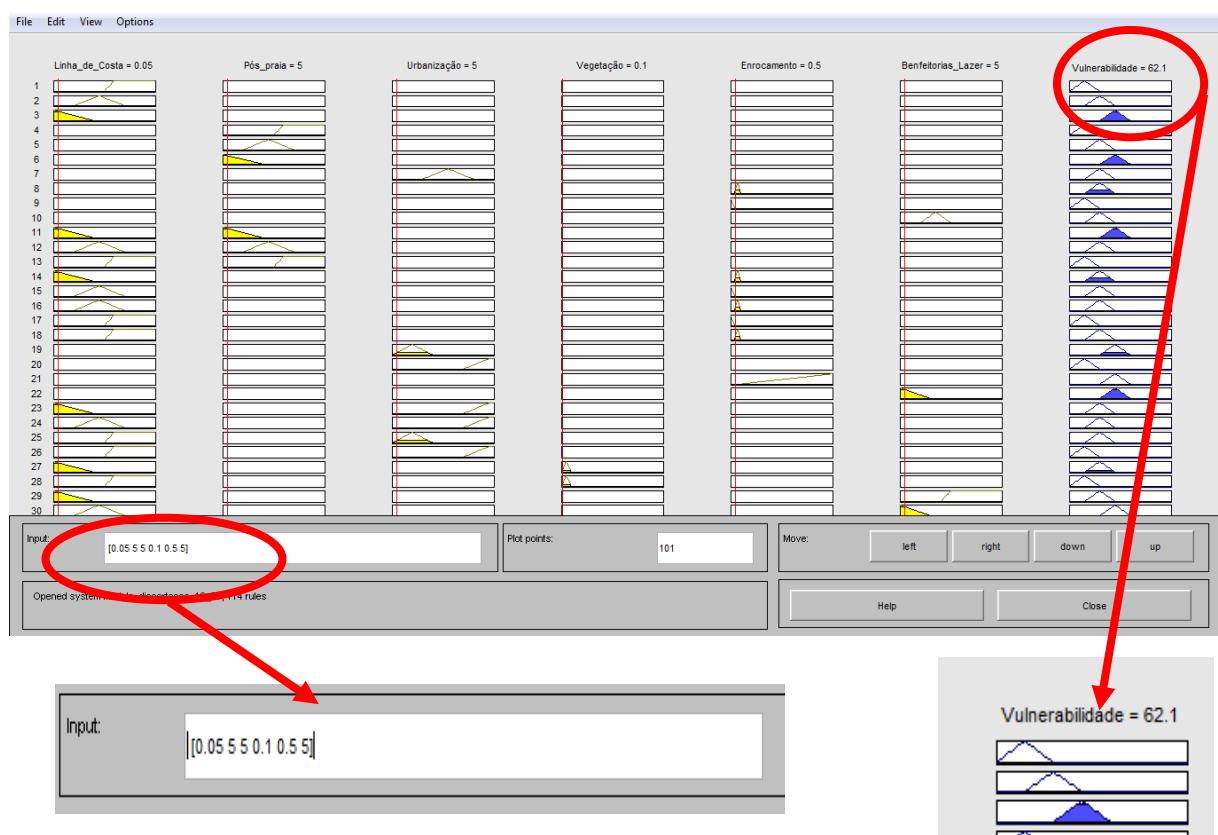


Figura 44 – Visualização do Modelo Fuzzy para valores iniciais – 114 Regras



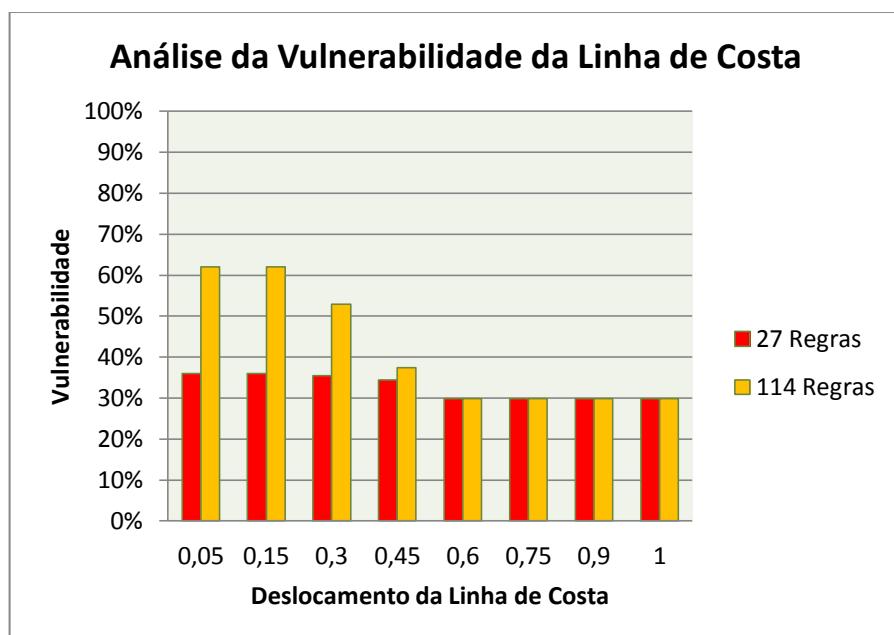
### 5.2.1 Variável Linha de Costa

A Tabela 16 apresenta distintos valores adotados para a influência da linha de costa no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para a linha de costa e os percentuais de vulnerabilidade serão apresentados na Figura 45.

Tabela 16 – Valores adotados para variável Linha de Costa

Valor Adotado (m)	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
0,05	[0,05 5 5 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
0,15	[0,15 5 5 0,1 0,5 5]	36%	62%
0,30	[0,30 5 5 0,1 0,5 5]	35,5%	52,9%
0,45	[0,45 5 5 0,1 0,5 5]	34,5%	37,4%
0,60	[0,60 5 5 0,1 0,5 5]	29,9%	29,9%
0,75	[0,75 5 5 0,1 0,5 5]	29,9%	29,9%
0,90	[0,90 5 5 0,1 0,5 5]	29,9%	29,9%
1	[1 5 5 0,1 0,5 5]	29,9%	29,9%

Figura 45 – Influência da variável Linha de Costa na Vulnerabilidade



Observa-se que a vulnerabilidade através da variação da linha de costa são coerentes, pois na medida em que a linha de costa tem um deslocamento maior da costa a vulnerabilidade diminui. Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta) pelo grau de pertinência. A vulnerabilidade do deslocamento de 0,05 a 0,30 é moderada (27 regras) e alta (114 regras). Mas à medida que o deslocamento da linha de costa afasta-se da costa a vulnerabilidade diminui passando a ter uma vulnerabilidade baixa/moderada, mas pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é moderada (29,9%) para ambos modelo.

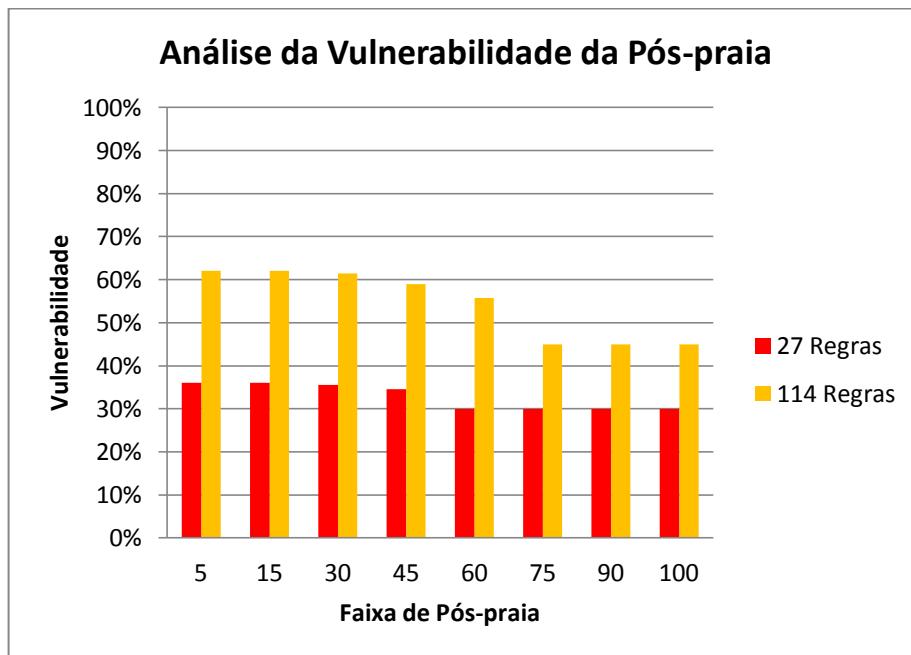
### 5.2.2 Variável Pós-praia

A Tabela 17 apresenta distintos valores adotados para a influência da pós-praia no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para a pós-praia e os percentuais de vulnerabilidade são apresentados na Figura 46.

Tabela 17 – Valores adotados para variável Pós-praia

Valor Adotado (m)	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
5	[0,05 5 5 0.1 0.5 5]	36%	62,1%
15	[0,05 15 5 0.1 0.5 5]	36%	62,1%
30	[0,05 30 5 0.1 0.5 5]	35,5%	61,5%
45	[0,05 45 5 0.1 0.5 5]	34,5%	59%
60	[0,05 60 5 0.1 0.5 5]	29,9%	55,8%
75	[0,05 75 5 0.1 0.5 5]	29,9%	45%
90	[0,05 90 5 0.1 0.5 5]	29,9%	45%
100	[0,05 100 5 0.1 0.5 5]	29,9%	45%

Figura 46 – Influência da variável Pós-praia na Vulnerabilidade



Observa-se que a vulnerabilidade através da faixa da pós-praia são coerentes, pois à medida que a faixa de pós-praia aumenta a vulnerabilidade diminui. Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta) pelo grau de pertinência. A vulnerabilidade da faixa de 5 a 30 é moderada (27 regras) e muito alta (114 regras). Mas à medida que a faixa da pós-praia aumenta a vulnerabilidade diminui passando a ter uma vulnerabilidade baixo/moderado (29,9%) e alto/muito alto (45%) , mas pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é respectivamente moderada e alta.

### 5.2.3 Variável Urbanização

A Tabela 18 apresenta distintos valores adotados para a influência da urbanização no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com

os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para a urbanização e os percentuais de vulnerabilidade são apresentados na Figura 47.

Tabela 18 – Valores adotados para variável urbanização

Valor Adotado (m)	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
5	[0,05 5 5 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
15	[0,05 5 15 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
30	[0,05 5 30 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
45	[0,05 5 45 0,1 0,5 5]	34,9%	52,1%
60	[0,05 5 60 0,1 0,5 5]	34,6%	41,7%
75	[0,05 5 75 0,1 0,5 5]	32,9%	38,1%
90	[0,05 5 90 0,1 0,5 5]	30,2%	32,3
100	[0,05 5 100 0,1 0,5 5]	29,9%	32,1%

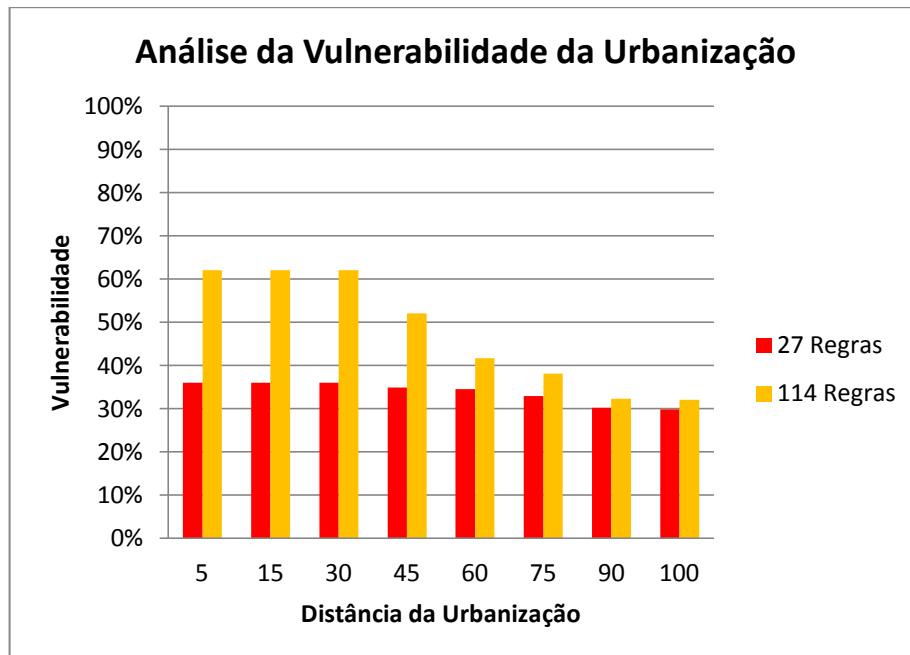
Observa-se que a vulnerabilidade através da faixa da urbanização são coerentes, pois à medida que a urbanização distancia-se da pós-praia a vulnerabilidade diminui. Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta) pelo grau de pertinência. Na medida em que a urbanização torna-se mais próxima da pós-praia a vulnerabilidade aumenta.

Observando a Tabela 18 e a Figura 47, observou-se que quando a proximidade é de 5 a 30 a vulnerabilidade é moderada (27 regras) e muito alta (114 regras). Quando a urbanização passa a ser moderada em 45 a vulnerabilidade é 34,9% (27 regras) 52,1% (114 regras) que pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é moderada e alta respectivamente. Quando a urbanização atinge uma distância em 60 a vulnerabilidade é 34,6% (27 regras) e 41,7% (14 regras) que pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é respectivamente moderada e alta.

Quando atinge a distância de 75, 90 e 100 a vulnerabilidade é respectivamente (32,9% (moderado), 30,2% (moderado) e 29,9% (moderado)) resultado de 27 regras e (38,1% (alto) 32,3% (moderado) e 32,1%

(moderado)) resultado das 114 regras.

Figura 47 – Influência da variável Urbanização na Vulnerabilidade



#### 5.2.4 Variável Vegetação

A Tabela 19 apresenta distintos valores adotados para a influência da vegetação no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para a vegetação e os percentuais de vulnerabilidade são apresentados na Figura 48.

Observa-se que a vulnerabilidade através da presença quanto ao tipo de vegetação são coerentes, pois na medida em que a vegetação deixa de ser rasteira a vulnerabilidade aumenta, assim como nas áreas que não há vegetação a vulnerabilidade é maior.

Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é

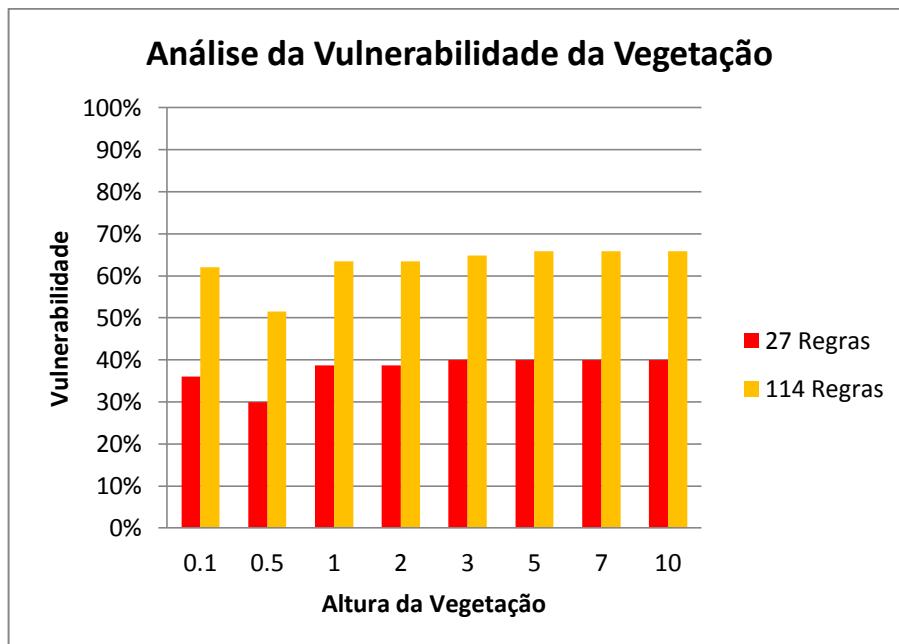
---

respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta). Na medida em que a vegetação torna-se mais rasteira a vulnerabilidade diminui, na medida em que a vegetação nativa é modificada a vulnerabilidade aumenta.

Tabela 19 – Valores adotados para variável Vegetação

Valor Adotado	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
0.1	[0,05 5 5 0.1 0.5 5]	36%	62,1%
0.5	[0,05 5 5 0.5 0.5 5]	29,9%	51,5%
1	[0,05 5 5 1 0.5 5]	38,7%	63,4%
2	[0,05 5 5 2 0.5 5]	38,7%	63,4%
3	[0,05 5 5 3 0.5 5]	40%	64,9%
5	[0,05 5 5 5 0.5 5]	40%	65,8%
7	[0,05 5 5 7 0.5 5]	40%	65,8%
10	[0,05 5 5 10 0.5 5]	40%	65,8%

Figura 48 – Influência da variável Vegetação na Vulnerabilidade



Observando a Tabela 19 e a Figura 48, verifica-se que quando a vegetação 0,1 (ausente) a vulnerabilidade é 36% tendo vulnerabilidade moderada e 62,1% tendo a vulnerabilidade muito alta. Quando a vegetação passa ser rasteira (0,5) a vulnerabilidade é 29,9% (27 regras) e 51,5% (114 regras) pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é

respectivamente moderada e alta. Da vegetação arbustiva (1 a 2) vulnerabilidade é 38,7% (27 regras) e 63,4 % (114 regras) pelo grau de pertinência a vulnerabilidade é respectivamente alta e muito alta. Quando a vegetação é arbórea (3-10) a vulnerabilidade para 27 regras permanece fixa em 40% e para as 114 regras variam de 64,9% a 65,8% pelo grau de pertinência respectivamente a vulnerabilidade é alta e muito alta.

Então, ressalta-se que na medida em que a vegetação nativa é modificada e retirada pelo homem, a vulnerabilidade aumenta.

### 5.2.5 Variável Enrocamento

A Tabela 20 apresenta distintos valores adotados para a influência do enrocamento no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para o enrocamento e os percentuais de vulnerabilidade são apresentados na Figura 49.

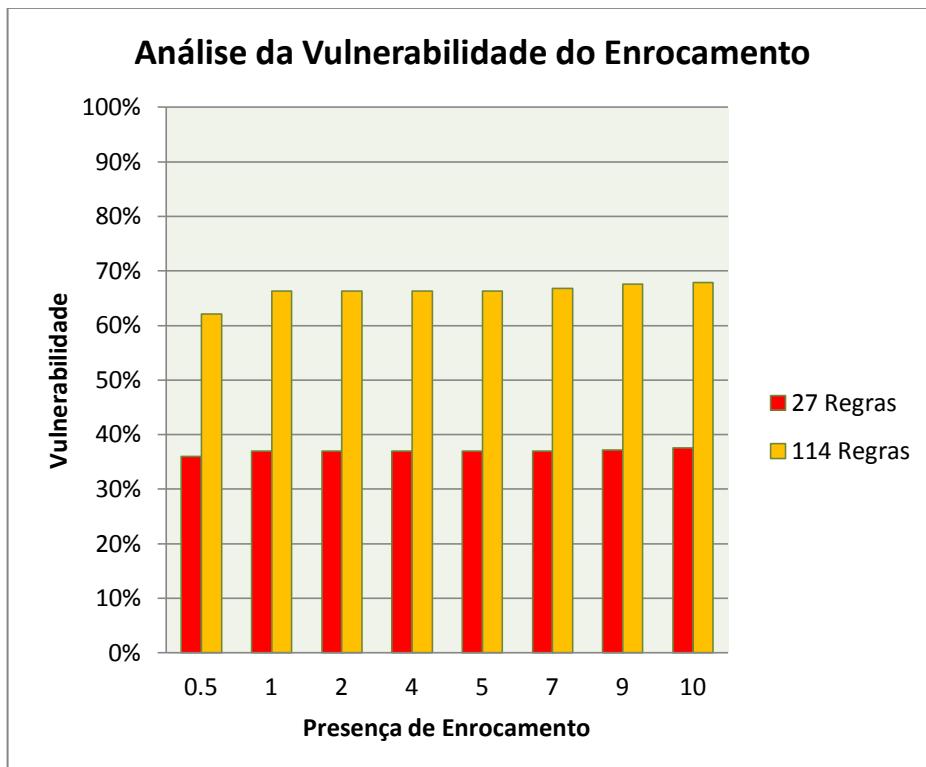
Tabela 20 – Valores adotados para variável Enrocamento

Valor Adotado	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
0,5	[0,05 5 5 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
1	[0,05 5 5 0,1 1 5]	37%	66,3%
2	[0,05 5 5 0,1 2 5]	37%	66,3%
4	[0,05 5 5 0,1 4 5]	37%	66,3%
5	[0,05 5 5 0,1 5 5]	37%	66,3%
7	[0,05 5 5 0,1 7 5]	37%	66,8%
9	[0,05 5 5 0,1 9 5]	37,2%	67,6%
10	[0,05 5 5 0,1 10 5]	37,6%	67,9%

Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é

respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta) pelo grau de pertinência. Na medida em que as construções de enrocamento tornam-se presentes a vulnerabilidade aumenta.

Figura 49 – Influência da variável Enrocamento na Vulnerabilidade



Observando a Tabela 20 e a Figura 49, observou-se que quando o enrocamento é considerado ausente (0,5) a vulnerabilidade é moderada (36%) e muito alta (62,1%) e quando considerado adjacente (1 a 2) a vulnerabilidade é 37% (moderado) e 66,3% (muito alta) pelo grau de pertinência.

Quando o enrocamento torna-se presente (4, 5, 7, 9 e 10) a vulnerabilidade é respectivamente para 27 regras e 114 regras [37% (moderado), 37% (moderado), 37% (moderado), 37,2% (moderado), 37,6% (alto)] e [66,3% (muito alto), 66,3% (muito alto), 66,8% (muito alto), 67,6% (muito alto) e 67,9% (muito alto)].

Observou-se que na medida em que as construções de enrocamento aumentam a vulnerabilidade aumenta.

---

### 5.2.6 Variável Benfeitorias de Lazer

A Tabela 21 apresenta distintos valores adotados para a influência das benfeitorias de lazer no modelo fuzzy, os valores adotados para inserir na caixa input e os percentuais de vulnerabilidade. Estes valores variaram de acordo com os limites e os adjetivos estabelecidos na Tabela 3. Para melhor visualização e interpretação os valores adotados para o enrocamento e os percentuais de vulnerabilidade são apresentados na Figura 50.

Tabela 21 – Valores adotados para variável Benfeitorias de Lazer

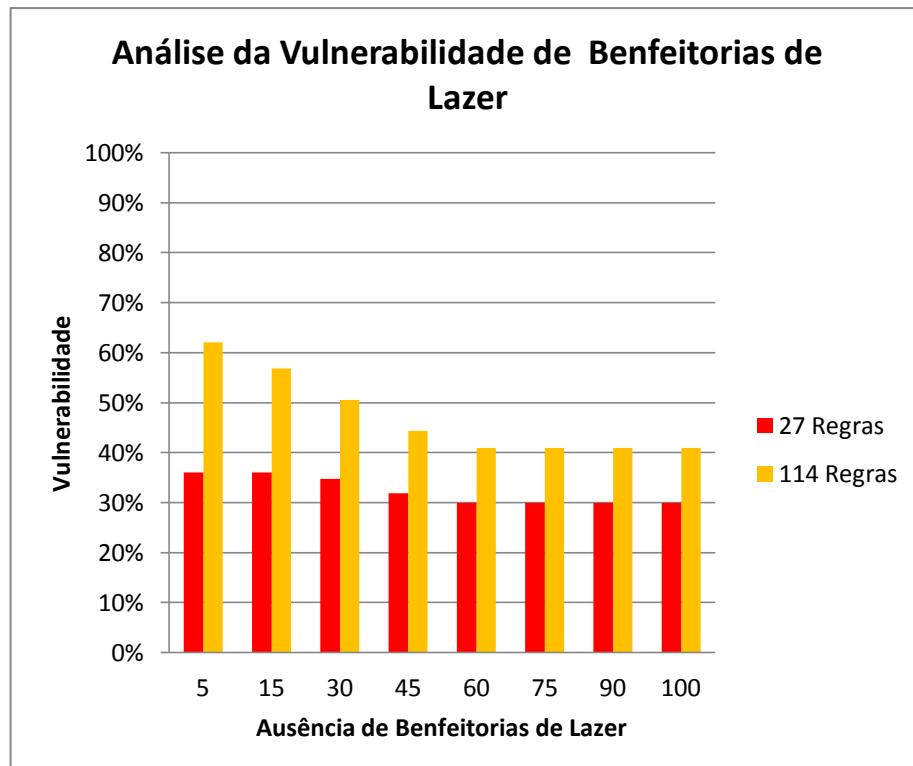
Valor Adotado	Caixa Input	Percentuais de Vulnerabilidade – 27 Regras	Percentuais de Vulnerabilidade – 114 Regras
5	[0,05 5 5 0,1 0,5 5]	36%	62,1%
15	[0,05 5 5 0,1 0,5 15]	36%	56,8%
30	[0,05 5 5 0,1 0,5 30]	34,8%	50,5%
45	[0,05 5 5 0,1 0,5 45]	31,9%	44,3%
60	[0,05 5 5 0,1 0,5 60]	29,9%	40,9%
75	[0,05 5 5 0,1 0,5 75]	29,9%	40,9%
90	[0,05 5 5 0,1 0,5 90]	29,9%	40,9%
100	[0,05 5 5 0,1 0,5 100]	29,9%	40,9%

Através dos valores adotados iniciais para as 27 regras e 114 regras verificou-se que há uma previsão de que a vulnerabilidade é respectivamente 36% (moderada) e 62,1% (muito alta) pelo grau de pertinência. Na medida em que as benfeitorias de lazer tornam-se ausente a vulnerabilidade diminui. Observando a Tabela 21 e a Figura 50, observou-se que quando a benfeitoria de lazer é presente (5,15 e 30) a vulnerabilidade no uso das 27 regras e 114 regras é respectivamente (36% (moderada), 36% (moderada), 34,8% (moderada)) e (62,1% (muito alta), 56,8% (alta/muito alta) e 50,5% (alta)). Quando a benfeitoria de lazer é adjacente a vulnerabilidade é 31,9% (moderada) e 44,3% (alta). Quando as benfeitorias de lazer tornam-se ausente (60 a 100) a vulnerabilidade para as 27 regras é 29,9% (moderada) e para as 114 regras 40,9% (alto) pelo grau de pertinência a vulnerabilidade

---

é alta. Observou-se que na medida em que não há construções de benfeitorias de lazer a vulnerabilidade diminui.

Figura 50 – Influência da variável Benfeitoria de Lazer na Vulnerabilidade



### 5.3 Análises da Modelagem Fuzzy

A partir das análises das variáveis de entrada na seção 5.2 onde realizou-se a verificação da coerência do modelo fuzzy e a influência das variáveis na análise da vulnerabilidade, criaram-se células (quadricula) menores nos setores para a devida classificação da vulnerabilidade à erosão na área de estudo.

A Figura 51 mostra a área costeira e urbana das praias de Boa Viagem e Piedade com as variáveis de entrada além da divisão de células menores com área de 0,25km<sup>2</sup> criadas para análise da vulnerabilidade.

A Figura 52 mostra as variáveis de entrada e os seus termos primários

---

de partição fuzzy que foram utilizados para analisar a modelagem fuzzy.

O Quadro 3 mostra as variáveis de entrada identificadas na área de estudo na Figura 51 e as partições fuzzy identificadas na Figura 52, interpretados quanto a vulnerabilidade.

Figura 51 – Células e variáveis de entrada para análise da Modelagem Fuzzy

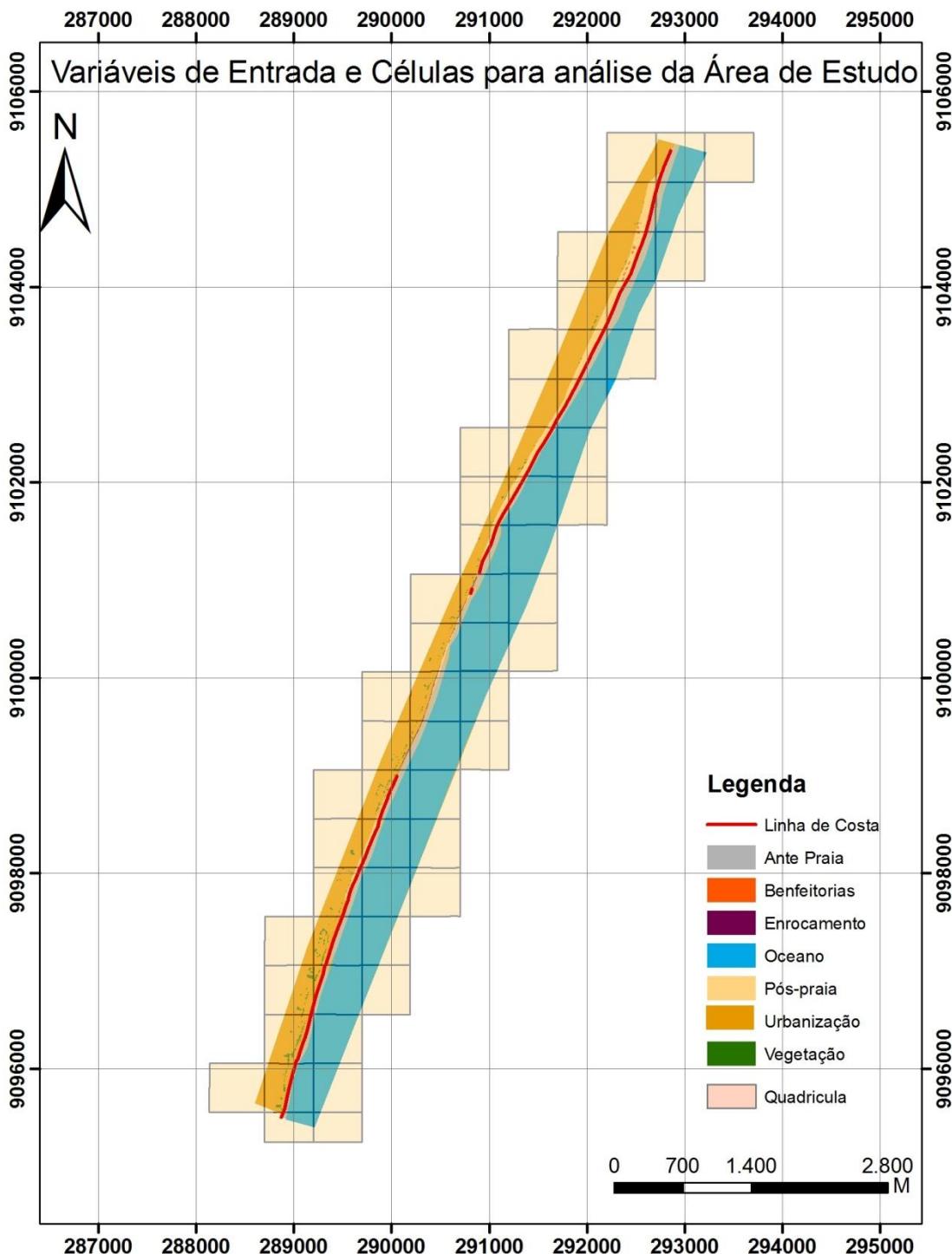
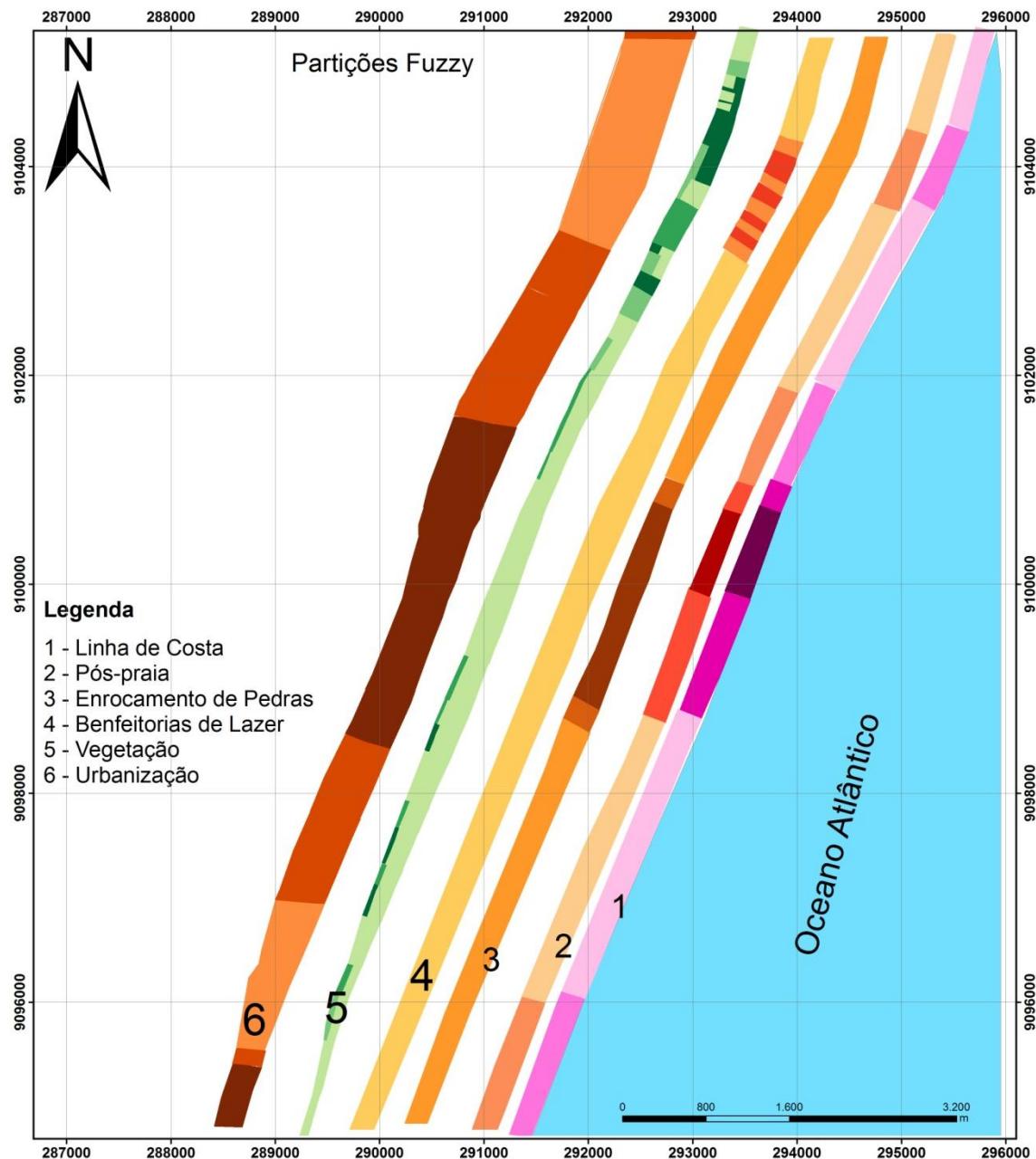


Figura 52 - Variáveis de entrada e os termos primário das partições fuzzy para análise da Modelagem Fuzzy



O Quadro 3 foi criado através da análise das Figuras 51 e 52 identificando as variáveis através do processo de fotointerpretação e quantificadas pelo processo de vetorização para serem utilizadas como entrada na modelagem fuzzy. Foram realizadas a identificação das outras variáveis de entrada que podem ser quantificadas através do processo de vetorização. Os dados do Quadro 3 são as variáveis e os termos primários de

partição fuzzy identificadas em cada linha de célula ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade.

Quadro 3 – Variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade

Variáveis/ Células	Linha de Costa	Pós-praia	Urbanização	Vegetação	Enrocamento	Benfeitoria de Lazer
1	Estável	Ampla	Moderada	Rasteira	Ausente	Ausente
2	Estável	Ampla	Distante	Rasteira	Ausente	Ausente
3	Moderada	Moderada	Distante	Rasteira	Ausente	Presente
4	Moderada	Moderada	Distante	Arbustiva	Ausente	Presente
5	Estável	Ampla	Moderada	Rasteira	Ausente	Adjacente
6	Estável	Ampla	Moderada	Arbórea	Ausente	Ausente
7	Estável	Ampla	Moderada	Arbustiva	Ausente	Ausente
8	Moderada	Moderada	Moderada	Arbustiva	Ausente	Ausente
9	Moderada	Moderada	Próxima	Arbórea	Moderado	Ausente
10	Ausente	Ausente	Próxima	Ausente	Alto	Ausente
11	Ausente	Ausente	Próxima	Ausente	Alto	Ausente
12	Instável	Estreito	Próxima	Ausente	Alto	Ausente
13	Instável	Estreito	Próxima	Arbustiva	Alto	Ausente
14	Moderada	Moderada	Próxima	Rasteira	Moderado	Ausente
15	Estável	Ampla	Moderada	Arbustiva	Ausente	Ausente
16	Estável	Ampla	Moderada	Rasteira	Ausente	Ausente
17	Estável	Ampla	Moderada	Arbustiva	Ausente	Ausente
18	Estável	Ampla	Distante	Ausente	Ausente	Ausente
19	Moderada	Moderada	Distante	Arbórea	Ausente	Ausente
20	Moderada	Moderada	Moderada	Ausente	Ausente	Ausente
21	Instável	Instável	Próxima	Ausente	Ausente	Ausente

Através dos termos primários da partição fuzzy identificados na Figura 52 e construídos no Quadro 3 criou-se as entradas, que foram inseridos nas regras, onde se aplicou a defuzzificação obtendo dados numéricos e assim analisou-se a classificação da vulnerabilidade à erosão através dos percentuais.

A Tabela 22 foi construída através das entradas identificadas em cada célula, e através desta foi aplicado a lógica fuzzy utilizando as 27 regras e obtendo dados numéricos onde se analisou a classificação obtida. Em alguns casos a classificação do modelo fuzzy podem apresentar duas situações, mas pelo grau de pertinência pode-se verificar para qual classe

existe uma maior tendência.

Tabela 22 – Input da Análise das variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade através das 27 regras

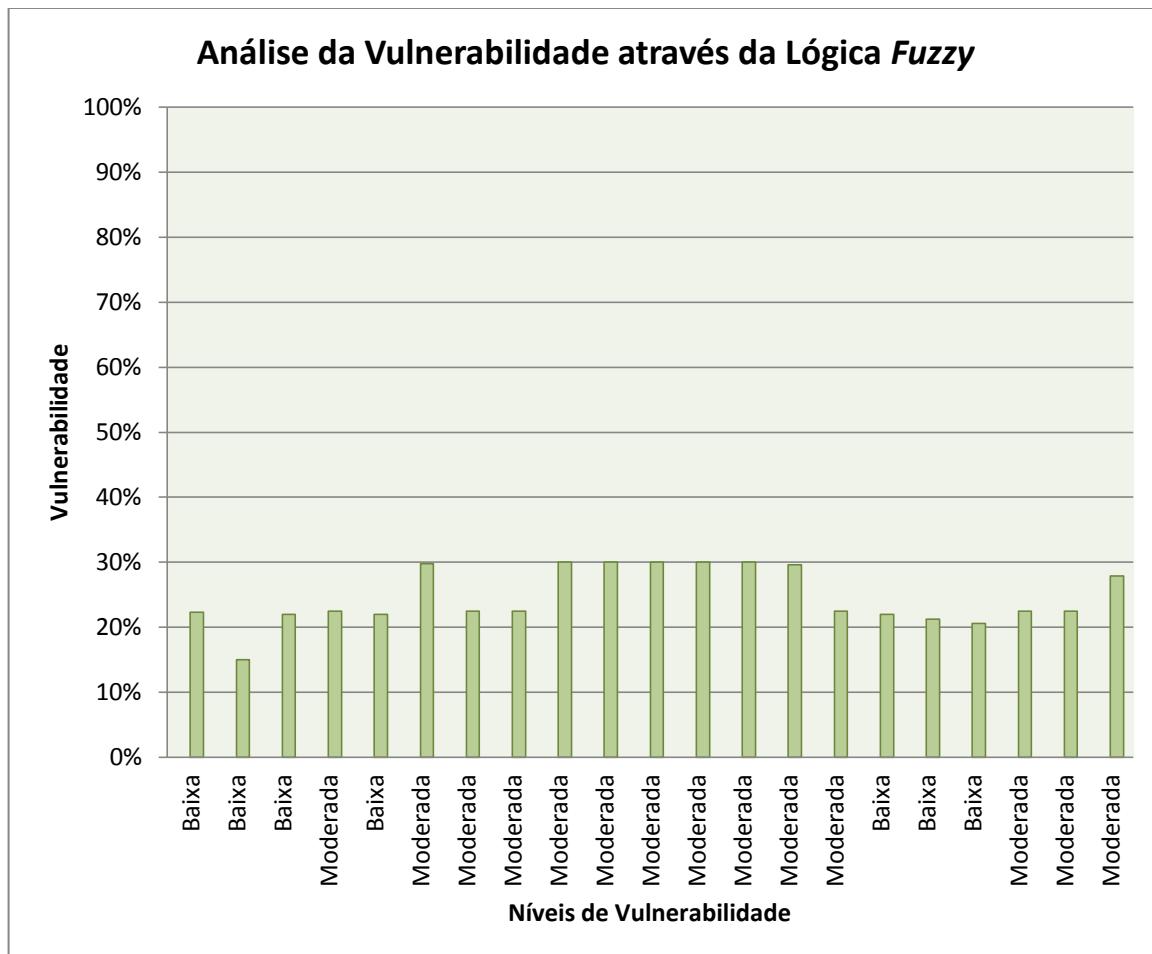
Células	Input	Percentual de Vulnerabilidade	Níveis de Vulnerabilidade	Níveis de Vulnerabilidade (Grau de Pertinência)
1	[0.8 80 60 0.5 0 80]	22,5%	Baixa/Moderada	Baixa
2	[1 100 100 0.5 0 80]	15%	Baixa	Baixa
3	[0.8 80 100 0.5 0 30]	22%	Baixa/Moderada	Baixa
4	[0.6 60 100 1.5 0 30]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
5	[0.6 60 70 0.5 0 40]	22%	Baixa /Moderada	Baixa
6	[0.4 40 60 5 0 50]	30%	Baixa /Moderada	Moderada
7	[0.4 40 50 2 0 50]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
8	[0.4 40 50 1.5 0.5 60]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
9	[0.25 25 40 3 1 60]	30%	Moderada	Moderada
10	[0 0 15 0 9 60]	30%	Moderada	Moderada
11	[0 0 15 0 10 70]	30%	Moderada	Moderada
12	[0.15 15 15 0 10 70]	30%	Moderada	Moderada
13	[0.15 15 15 3 10 75]	30%	Moderada	Moderada
14	[0.4 40 15 0.5 1 75]	29,6%	Baixa /Moderada	Moderada
15	[0.6 60 50 2 0.5 80]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
16	[0.7 70 60 0.3 0 80]	22,5%	Baixa /Moderada	Baixa
17	[0.9 90 70 1 0 80]	21,2%	Baixa /Moderada	Baixa
18	[0.7 70 70 0 0 90]	20,6%	Baixa /Moderada	Baixa
19	[0.5 50 80 1 0 90]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
20	[0.4 40 50 0 0 100]	22,5%	Baixa /Moderada	Moderada
21	[0.25 25 30 0 0 100]	27,9%	Baixa /Moderada	Moderada

A Figura 53 foi construída através dos dados da Tabela 22 onde são mostrados os percentuais e os níveis de vulnerabilidade obtidos a partir do grau de pertinência pela análise fuzzy.

Como pode ser visto na Figura 53 através da análise com as 27 regras verifica-se que a área de estudo apresenta apenas locais com vulnerabilidade baixa e moderada. Observando que a vulnerabilidade das praias tem o menor percentual 15% (baixo) e o maior percentual 30% (moderado).

Os resultados para a modelagem utilizando as 27 regras não forneceram resultados satisfatórios uma vez que todos os setores da área de estudo tiveram apenas classificações baixa e moderada.

Figura 53 – Análise da Vulnerabilidade ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade – 27 Regras



A Tabela 23 foi construída através das entradas identificadas em cada célula, com 114 regras.

A Figura 54 foi construída através dos dados da Tabela 23 que mostra os percentuais e a classificação da vulnerabilidade à erosão obtidas a partir do grau de pertinência pela análise fuzzy.

Como pode ser visto na Figura 54 nas praias de Boa Viagem e Piedade existem locais onde a vulnerabilidade é baixa, moderada, alta e muito alta. Observa-se nesse experimento que a vulnerabilidade das praias tem o menor

---

percentual 15% (baixo) e o maior percentual 61% (muito alto).

Através dos dados do Quadro 3, Tabela 22 e da Figura 53 criaram-se a Figura 55 e 56 através dos dados do Quadro 3, Tabela 23 e da Figura 54 criaram-se as Figura 57 e 58 onde apresenta-se um mapa temático através da modelagem fuzzy das praias de Boa Viagem e Piedade. Utilizaram-se cores distintas para mostrar os níveis de vulnerabilidade da área de estudo.

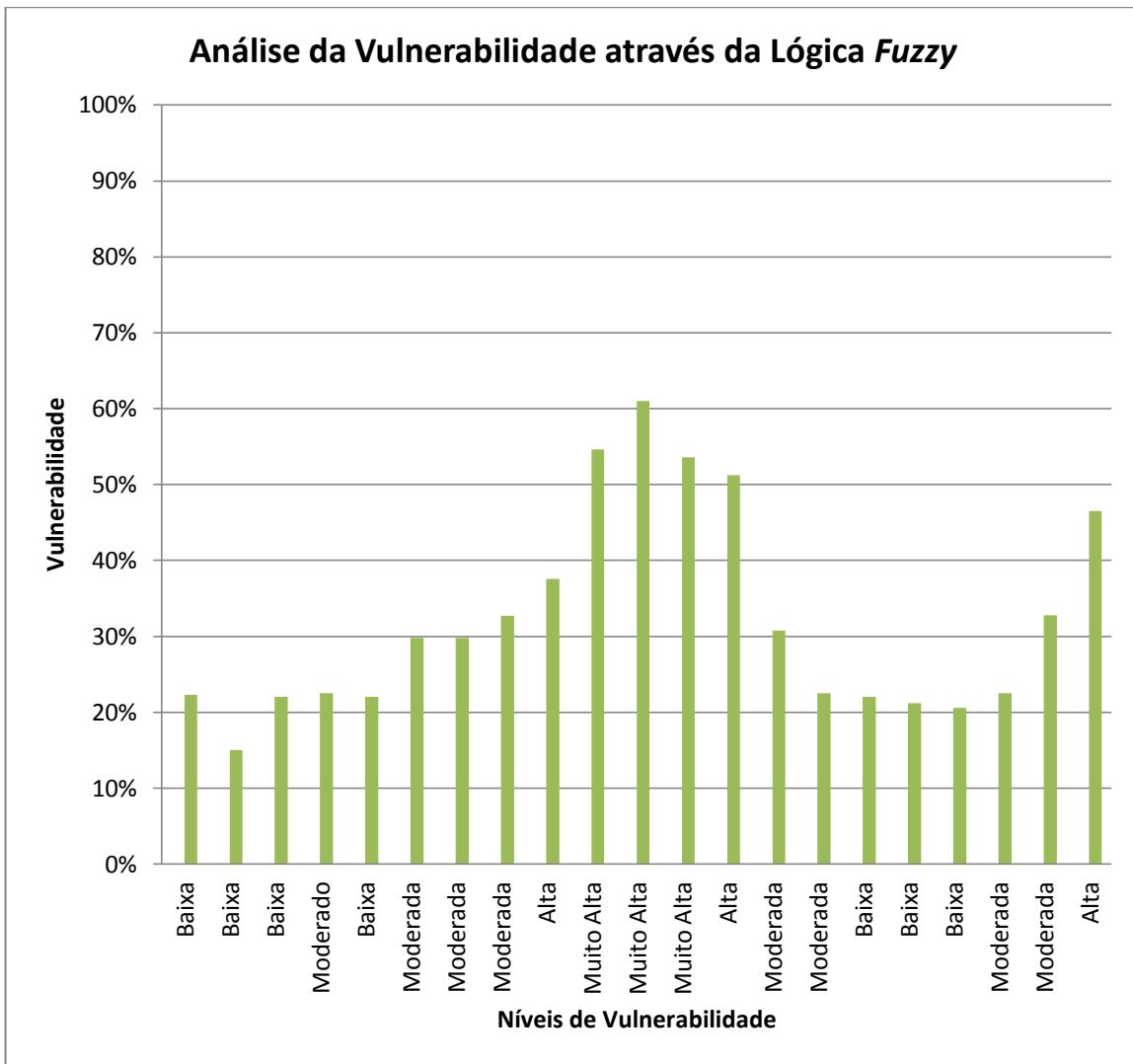
Tabela 23 – Input da Análise das variáveis presentes nas células ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade através das 114 regras

Células	Entrada	Índice de Vulnerabilidade	Níveis de Vulnerabilidade	Níveis de Vulnerabilidade (Grau de Pertinência)
1	[0.8 80 60 0.5 0 80]	22,3%	Baixa/Moderada	Baixa
2	[1 100 100 0.5 0 80]	15%	Baixa	Baixa
3	[0.8 80 100 0.5 0 30]	22%	Baixa/Moderada	Baixa
4	[0.6 60 100 1.5 0 30]	22,5%	Baixa/Moderada	Moderada
5	[0.6 60 70 0.5 0 40]	22%	Baixa/Moderada	Baixa
6	[0.4 40 60 5 0 50]	29,8%	Baixa/Moderada	Moderada
7	[0.4 40 50 2 0 50]	29,8%	Baixa/Moderada	Moderada
8	[0.4 40 50 1.5 0.5 60]	32,7%	Moderada/Alta	Moderada
9	[0.25 25 40 3 1 60]	37,6%	Moderada/Alta	Alta
10	[0 0 15 0 9 60]	54,6%	Alta/Muita Alta	Muito Alta
11	[0 0 15 0 10 70]	63%	Muito Alta	Muito Alta
12	[0.15 15 15 0 10 70]	53,6%	Alta/Muito Alta	Muito Alta
13	[0.15 15 15 3 10 75]	51,2%	Alta/Muito Alta	Alta
14	[0.4 40 15 0.5 1 75]	30,8%	Moderada/Alta	Moderada
15	[0.6 60 50 2 0.5 80]	22,5%	Baixa/Moderada	Moderada
16	[0.7 70 60 0.3 0 80]	22%	Baixa/Moderada	Baixa
17	[0.9 90 70 1 0 80]	21,2%	Baixa/Moderada	Baixa
18	[0.7 70 70 0 0 90]	20,6%	Baixa/Moderada	Baixa
19	[0.5 50 80 1 0 90]	22,5%	Baixa/Moderada	Moderada
20	[0.4 40 50 0 0 100]	32,8%	Moderada/Alta	Moderada
21	[0.25 25 30 0 0 100]	46,5%	Alta/Muito Alta	Alta

Na Figura 55, 56, 57 e 58 encontram-se as 21 células que foram destacadas para análise da modelagem fuzzy. Estas foram construídas através dos 5 setores que foram identificados na divisão setorial da área de

estudo.

Figura 54 – Análise da Vulnerabilidade ao longo das praias de Boa Viagem e Piedade – 114 Regras

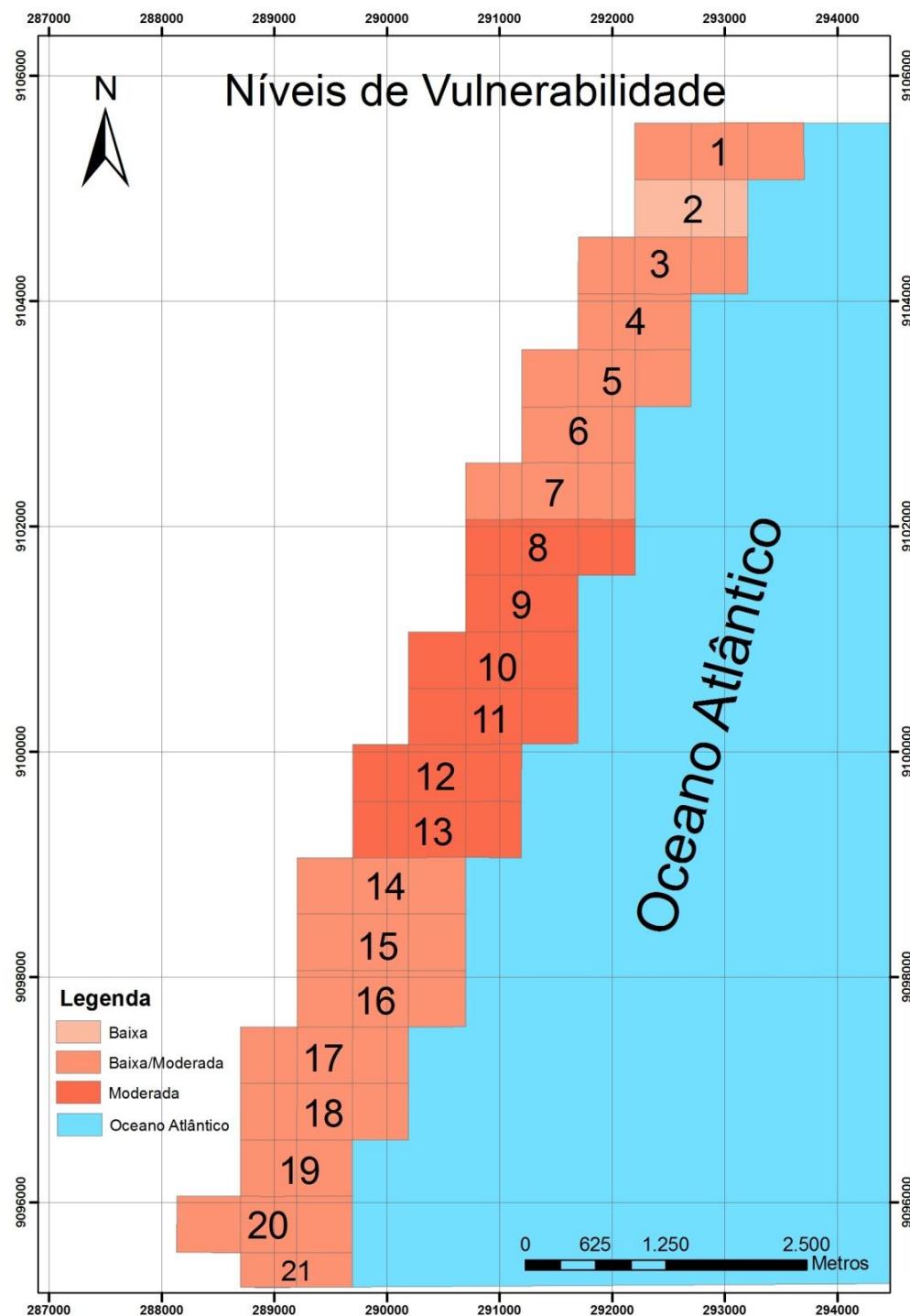


A Figura 55 foi construída através das 27 regras aplicada na lógica fuzzy. Toda a área de estudo tem como nível de vulnerabilidade baixa, baixa/moderada e moderada. Verificaram-se os resultados dos graus de pertinências nas áreas com a classificação baixa/moderada , como mostra a Figura 56.

Analizando a Figura 55 verifica-se que 4,76% da linha de costa tem vulnerabilidade baixa, 71,43% da linha de costa tem vulnerabilidade baixa/moderada e 23,81% da linha de costa tem vulnerabilidade moderada.

---

Figura 55 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 27 regras na Modelagem Fuzzy

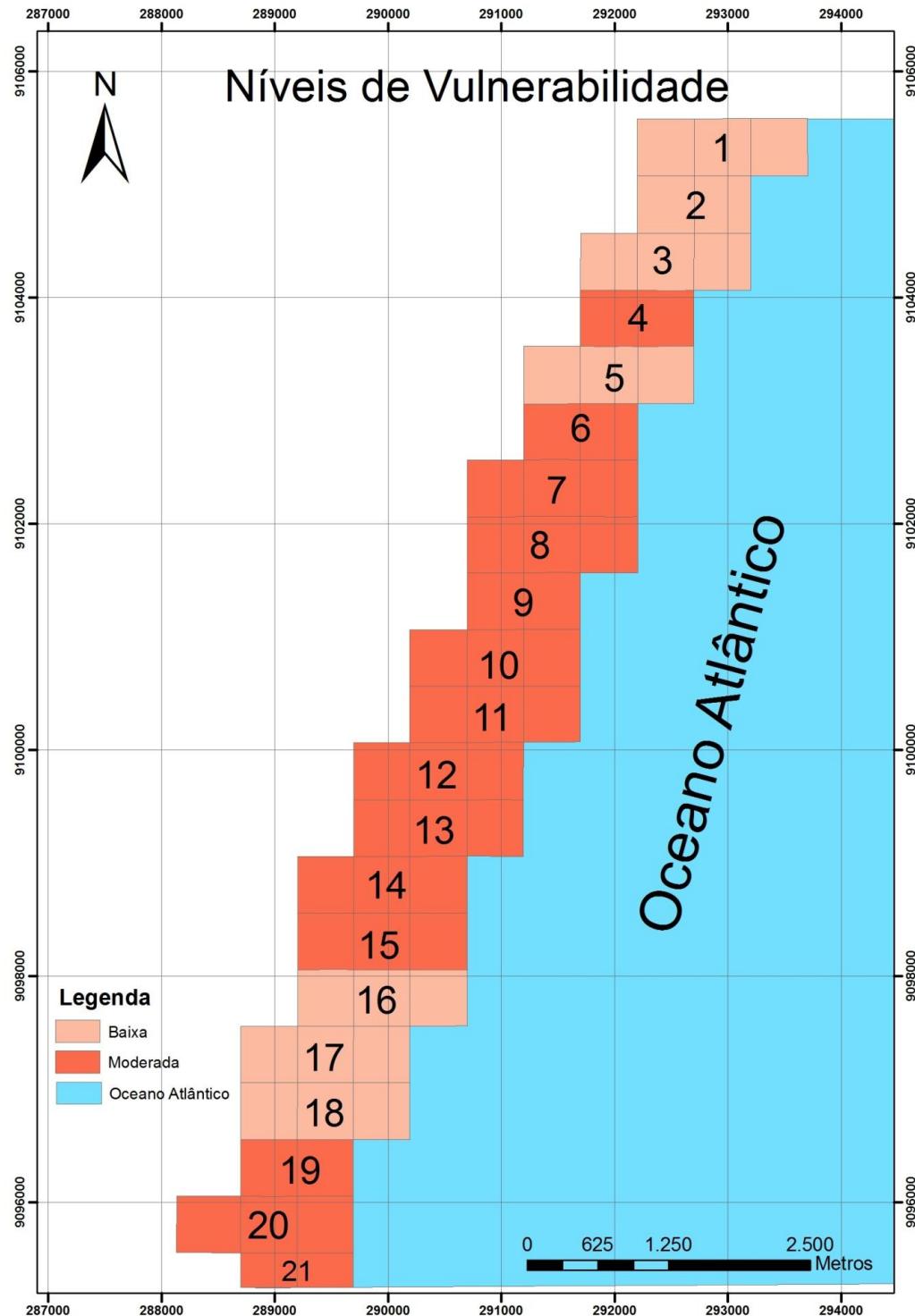


Após a análise da Figura 55 e dos graus de pertinência para verificar a vulnerabilidade à erosão, na Figura 56 observou-se que com apenas as 27 regras o modelo não é condizente com a realidade da área de estudo. Um fato observado para esse experimento é que após a defuzzificação da área

---

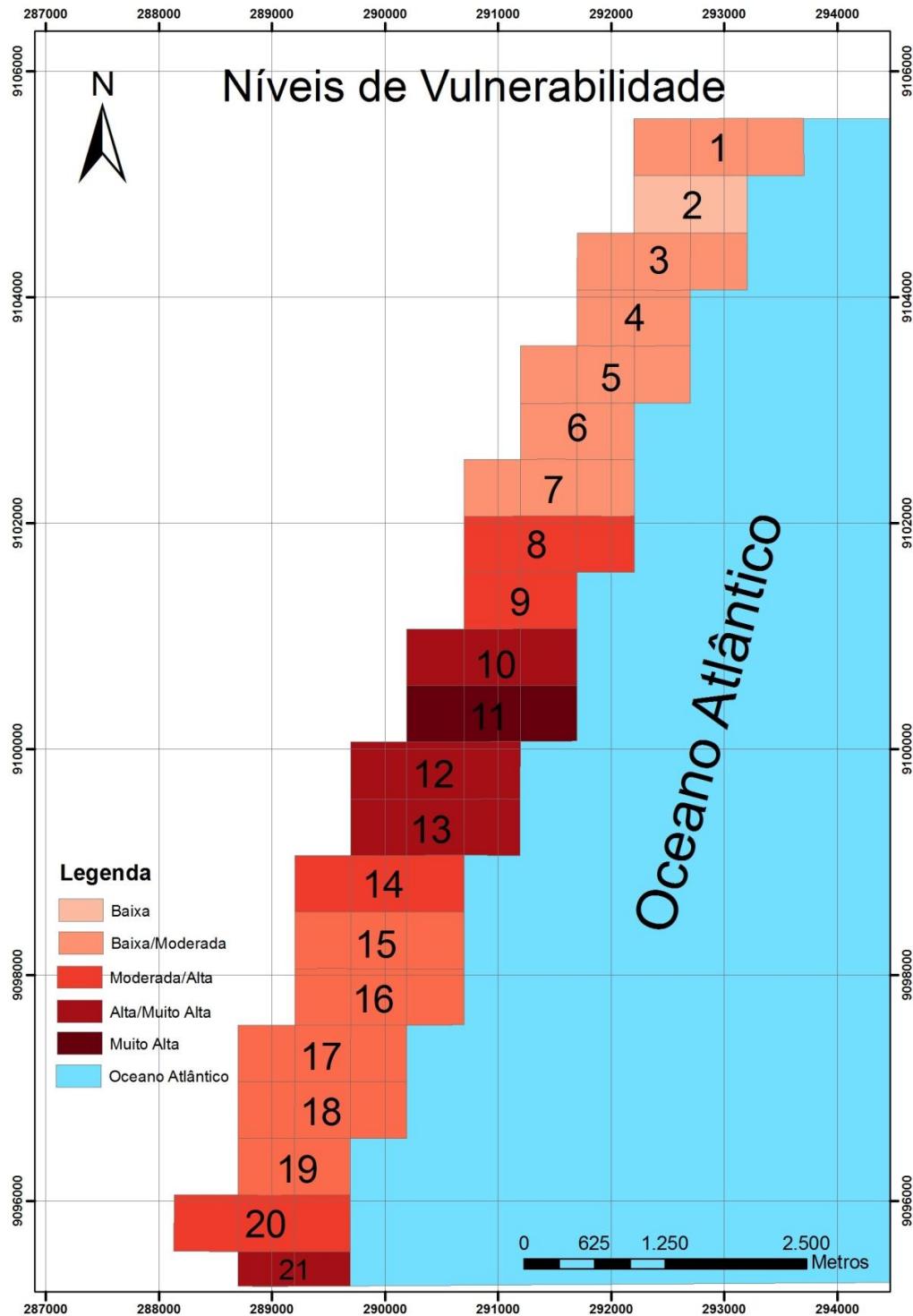
com enrocamento obtiveram-se como resultados uma vulnerabilidade à erosão considerada como moderada, assim como em áreas que existem uma pós-praia ampla e a linha de costa estável.

Figura 56 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 27 Regras na Modelagem Fuzzy após a análise do grau de pertinência



Devido a incoerência dos resultados utilizando as 27 regras foi testada uma nova simulação resultando na Figura 57 utilizando os resultados da modelagem com 114 regras.

Figura 57 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 114 regras na Modelagem Fuzzy



A Figura 57 foi construída através das 114 regras aplicadas na lógica fuzzy. Toda a área de estudo tem como nível de vulnerabilidade baixa, baixa/moderada, moderada/alta, alta/muito alta e muito alta. Verificaram-se os graus de pertinência nas áreas em que se obtiveram baixa/moderada, moderada/alta e alta/muito alta para análise da vulnerabilidade da área de estudo.

Analizando a Figura 57 em relação a vulnerabilidade à erosão da área de estudo obteve-se como resultado que 4,76% da linha de costa tem uma vulnerabilidade baixa e muito alta; 52,38% da linha de costa tem uma vulnerabilidade baixa/moderada e 19,05% da linha de costa tem uma vulnerabilidade moderada/alta e alta/muito alta.

A partir da Figura 57 observa-se que com a utilização das 114 regras a modelagem se aproxima com a realidade da área de estudo. Na Figura 58 utilizou-se o grau de pertinência para verificar a vulnerabilidade à erosão.

Da Figura 58 obteve-se que o setor 1 é formado pelas 6 primeiras linhas de células onde observa-se que 66,67% do setor tem vulnerabilidade baixa e 33,33% do setor tem vulnerabilidade moderada. O setor 2 é formado pelas linhas de célula 7 e 8 onde observa-se que 100% do setor a vulnerabilidade é moderada. O setor 3 é formado pelas linhas de célula 9 e 10, onde observa-se que 50% neste setor os locais tem vulnerabilidade alta e 50% tem vulnerabilidade muito alta.

Nas linhas das células 11 a 13 é o setor onde há construção de enrocamento e nesse local observa-se que 66,67% da vulnerabilidade à erosão é muito alta e 33,33% de vulnerabilidade é alta. O setor 4 é formado pelas linhas de célula 14 a 18, neste setor observa-se que 40% dos locais a vulnerabilidade é moderada e 60% dos locais a vulnerabilidade é baixa. Já o setor 5 é formado pelas linhas das células 19 a 21, observa-se que 66,67% a vulnerabilidade é moderada e 33,33% da vulnerabilidade é alta.

Os percentuais de vulnerabilidade para cada setor, assim como a vulnerabilidade correspondente, codificado em cores podem ser vistos na Tabela 24.

---

Figura 58 – Mapa dos níveis de vulnerabilidade criado através das 114 Regras na Modelagem Fuzzy após a análise do grau de pertinência

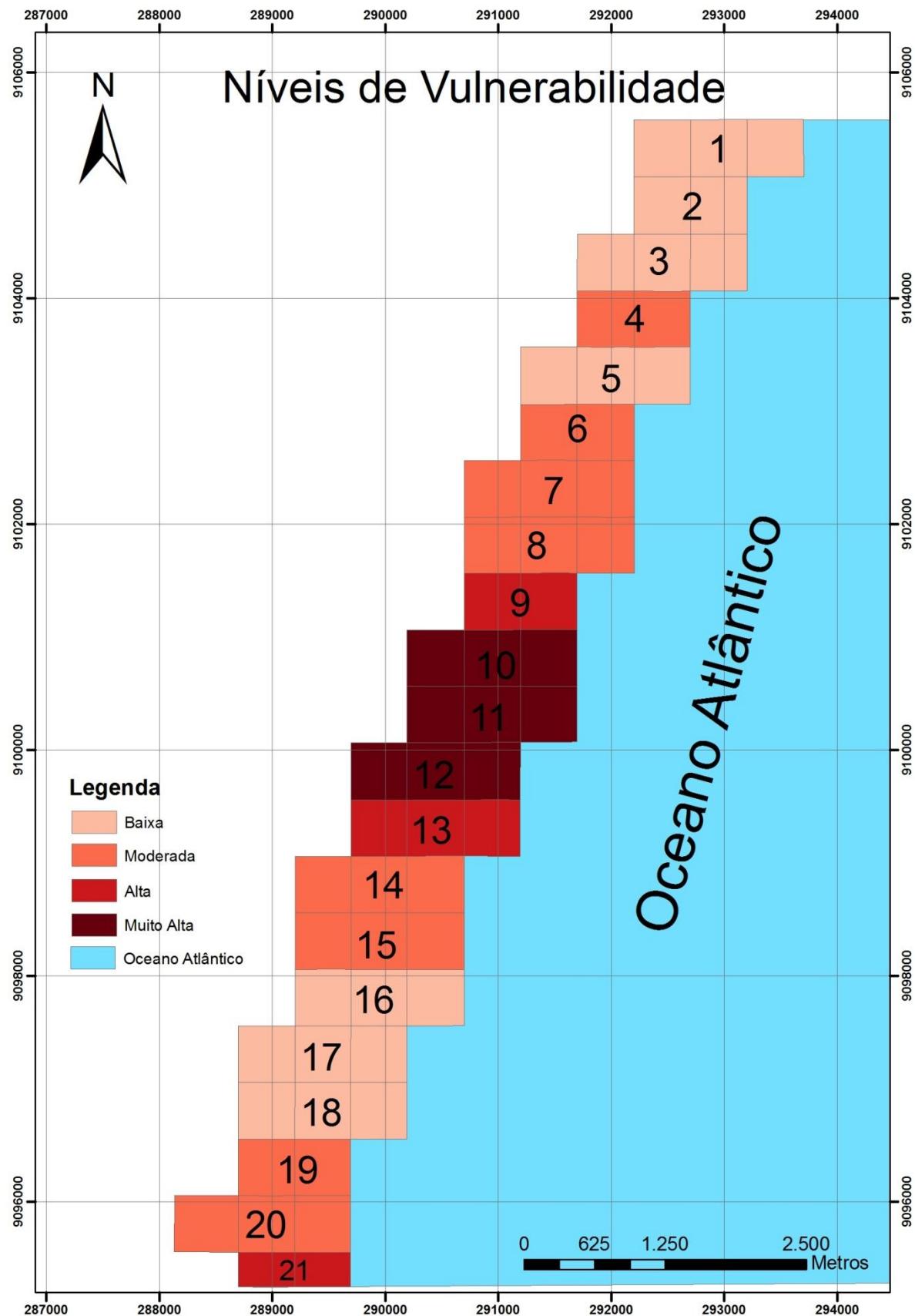
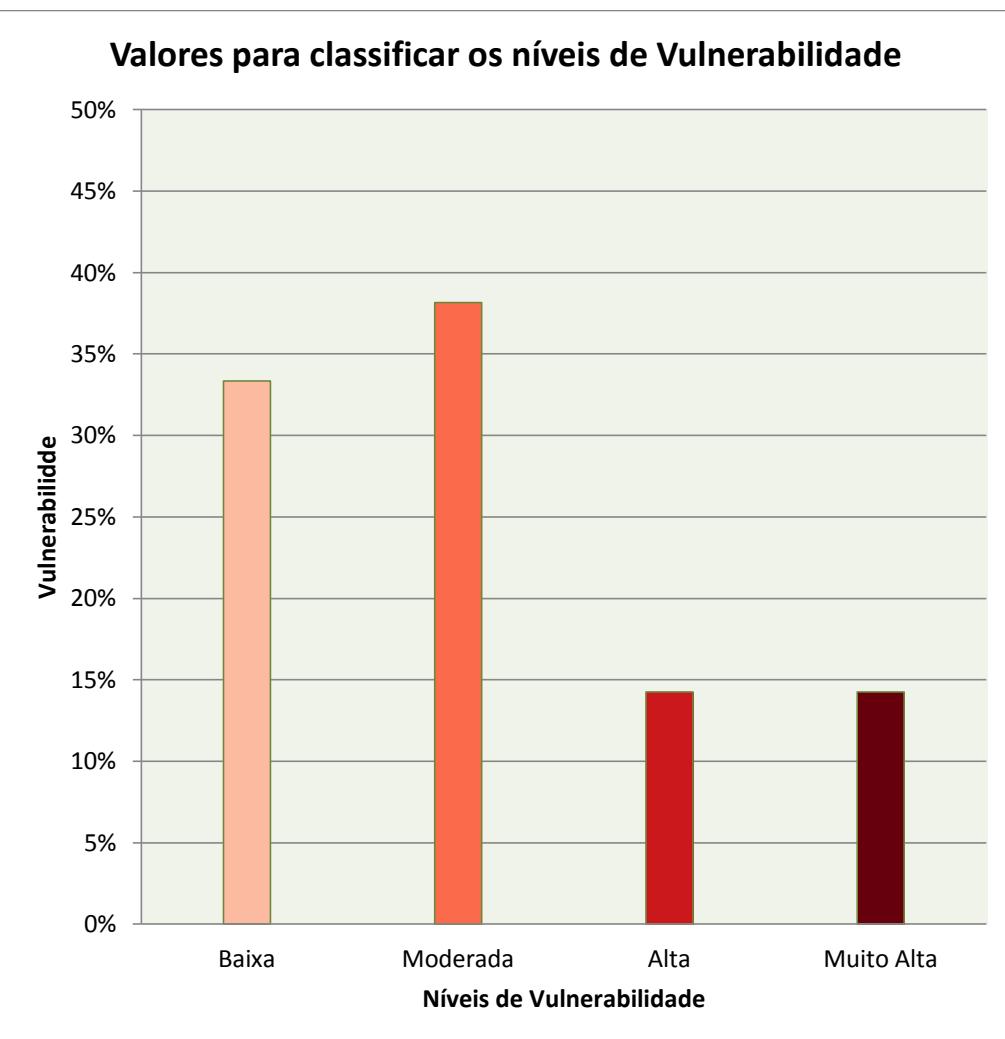


Tabela 24 – Vulnerabilidade em percentual para cada setor estudado

Setores	Segmento	Vulnerabilidade %
1	Praia do Pina (Sul)/ Praia da Boa Viagem (Norte)	66,67
	Praia da Boa Viagem (Norte)	33,33
2	Praia da Boa Viagem (Centro)	100
3	Praia da Boa Viagem (Norte do Enrocamento)	50
	Praia da Boa Viagem (Norte do Enrocamento)	50
Área de Enrocamento	Praia da Boa Viagem	66,67
	Praia da Boa Viagem	33,33
4	Praia da Boa Viagem (Sul)	40
	Praia de Piedade (Norte)	60
5	Praia de Piedade	66,67
	Praia de Piedade	33,33

Figura 59 – Vulnerabilidade em percentual da área de estudo



Aproximadamente 33,3% da linha de costa apresenta vulnerabilidade baixa enquanto 14,26% da linha de costa apresenta vulnerabilidade muito alta. Para os termos intermediários: moderado e alto apresentam respectivamente vulnerabilidade 38,15% e 14,26%, como pode ser visto na Figura 58.

A espacialização dos resultados visto nas Figuras 58 e 59 permitiu a criação do mapa de vulnerabilidade das praias da Boa Viagem, Piedade e um trecho da praia do Pina, Figura 60. Através desta Figura é possível destacar que no segmento ao Norte da construção do enrocamento da área de estudo 57,15% aproximadamente tem vulnerabilidade baixa.

Na análise e divisão dos setores ao longo das praias de Boa Viagem, Piedade e no trecho do Pina obtiveram-se que o setor 1 tem uma faixa de areia ampla e seguindo na direção sul essa faixa vai se estreitando. Observando a Figura 60 há um pequeno trecho em que a vulnerabilidade é moderada.

O setor 2 possui uma faixa de areia com 40m ao observar a Figura 60 nesse setor todo trecho a vulnerabilidade é moderada e isso condiz com a modelagem fuzzy.

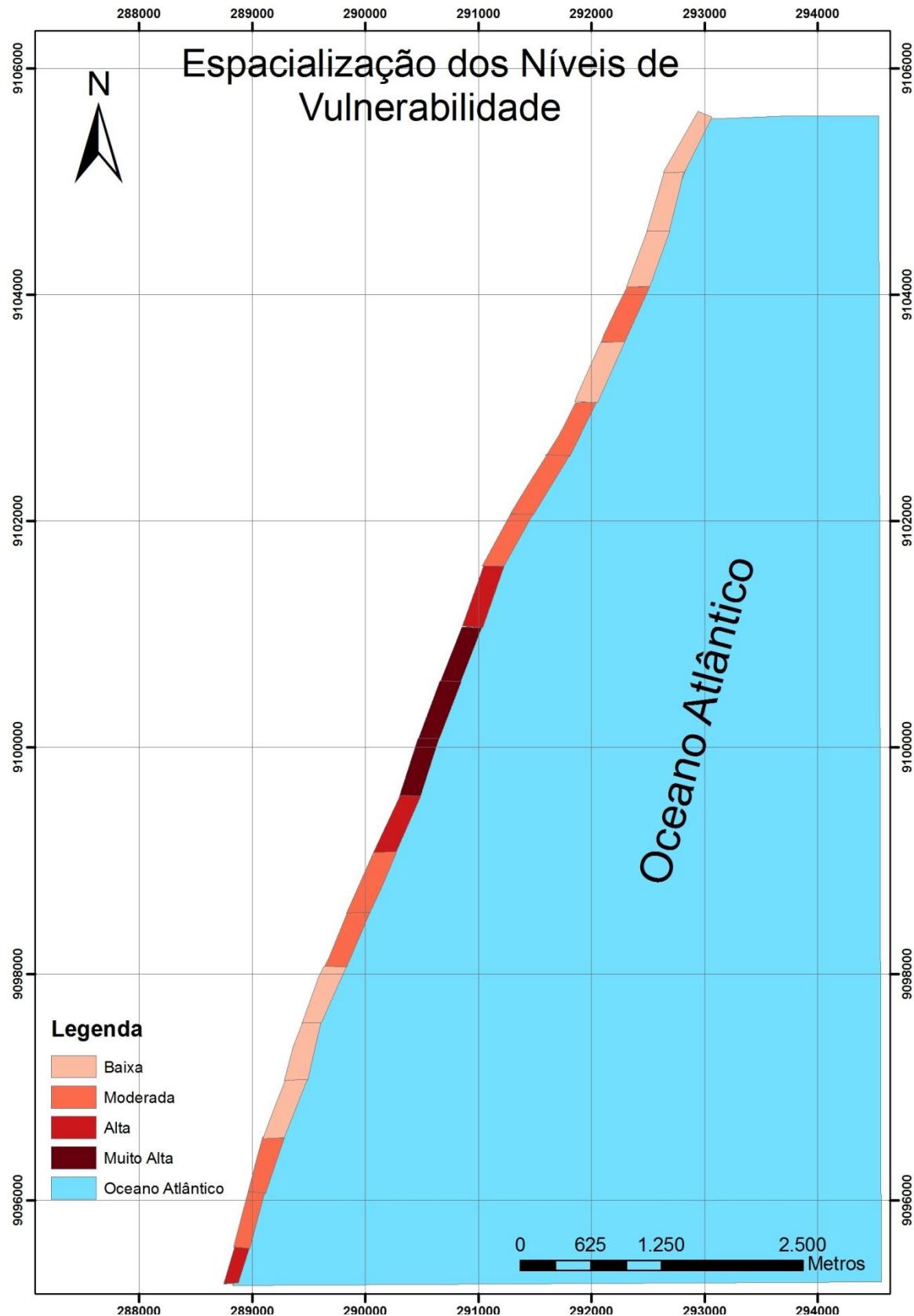
No setor 3 sua faixa de areia é adjacente a construção do enrocamento ao observar a Figura 60 nesse setor a parte mais distante do enrocamento possui vulnerabilidade alta e a parte do setor mais próxima do enrocamento possui vulnerabilidade muito alta.

O setor que há a construção do enrocamento possui uma vulnerabilidade muito alta, pois nesse setor a linha de costa é instável e faixa de areia é estreita.

O setor 4 quando adjacente a construção do enrocamento a vulnerabilidade é alta na medida que se afasta passa a ter vulnerabilidade moderada e quando mais distante a vulnerabilidade é baixa.

O setor 5 a faixa de areia já é bem mais estreita do que no setor 4 apresenta uma vulnerabilidade moderada e na medida que se aproxima da construção do enrocamento passa a ter uma vulnerabilidade alta.

Figura 60 – Mapa de Vulnerabilidade Costeira das praias da Boa Viagem (Recife) e Piedade (Jaboatão dos Guararapes)



## 6. CONCLUSÕES

A vulnerabilidade da linha de costa à erosão estudada foi avaliada com uma metodologia semi-quantitativa utilizada para identificar as mudanças ao longo do ambiente praial. Sua aplicação foi possível através da organização de um sistema de informações geográficas (SIG) a partir de diferentes fontes cartográficas como SR e GNSS que serviram como ferramenta fundamental para a análise e elaboração da modelagem fuzzy.

Em uma análise temporal considerando o ano de 2007 como referência, analisou-se a evolução da linha de costa para os anos de 2009, 2010 e 2012 onde foi possível quantificar os setores que houveram acresção ou erosão.

O setor 1 e o setor 4 apresentaram menor variação no deslocamento da linha de costa para o período monitorado. Estes setores apresentaram uma estabilidade na linha de costa com características de um ambiente praial bem desenvolvido, com uma face da praia plana e extensa. Os setores 2, 3 e 5 apresentaram para todo o período monitorado uma tendência erosiva, com as médias das taxas de deslocamento negativas, embora o setor 3 e 5 tenham apresentados em 2012 valores positivos mesmo assim ambos tiveram tendência erosiva. Principalmente o setor 5, onde foram observadas as maiores recuos da linha de costa. Este setor também apresentou os deslocamentos máximos negativos para todos os anos monitorados.

Foram feitos dois testes importantes variando o número de regras e os resultados destas simulações mostram a importância do conhecimento da área de estudo que foi adquirida através do monitoramento da linha de costa para validação do comportamento da modelagem.

Os resultados dos testes com 27 regras mostraram que o modelo não é condizente com a realidade da área de estudo além de verificar o

---

comportamento quando não são realizadas todas as combinações com as partições *fuzzy*. Um fato observado para esse experimento é que após a defuzzificação da área com enrocamento obtiveram-se como resultados uma vulnerabilidade à erosão considerada como moderada, assim como em áreas que existem uma pós-praia ampla e a linha de costa estável.

Os resultados dos testes utilizando 114 regras foi considerado ideal e desenvolvido utilizando conhecimentos probabilísticos e do conjunto das partes, além da combinação com as partições *fuzzy* de acordo com a realidade da área de estudo. Para validação da modelagem foram realizadas análises paramétricas onde foram atribuídos valores iniciais que variaram de acordo com os intervalos que haviam sido supostos para cada partição *fuzzy*. Estas análises também serviram para verificar o comportamento das seis variáveis utilizadas para a verificação da vulnerabilidade à erosão.

Os segmentos das praias de Boa Viagem e Piedade apresentam características distintas em relação aos fatores determinantes da vulnerabilidade à erosão. Através da modelagem *fuzzy* das variáveis e das partições *fuzzy* foram identificados que 33,33% de linha de costa resultaram em uma classificação da vulnerabilidade à erosão baixa enquanto 14,26% de linha de costa apresentou uma vulnerabilidade muito alta. As classificações da vulnerabilidade à erosão como moderada e alta representam respectivamente 38,15% e 14,26%.

Nas extensões menos vulneráveis foram detectadas uma pós-praia ampla, a linha de costa estável, a vegetação rasteira, a urbanização mais distante das áreas costeira e a ausência de processos antrópicos. Já as áreas mais vulneráveis à erosão relacionam-se com a influência antrópica na faixa de praia além de uma urbanização próxima da linha de costa.

Em uma análise visual da espacialização dos resultados obtidos com a classificação da vulnerabilidade à erosão quando confrontados com o comportamento do deslocamento da linha de costa obtidos através do monitoramento GNSS dão indicativos que a classificação com 114 regras

---

obtiveram os melhores resultados nos testes realizados.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES

Ainda existem muitas questões que precisam ser analisadas e respondidas no que se refere ao diagnóstico e temas ligados a vulnerabilidade à erosão.

Através desta pesquisa percebeu-se que a lógica *fuzzy* possibilita uma alternativa para criar mapas de vulnerabilidade à erosão que pode ser comparada com modelos analíticos clássicos apresentados em outras pesquisas

Nesta pesquisa os dados de entrada que são quantificados identificam numericamente a presença ou ausência de algumas variáveis todavia, acredita-se que este modelo pode ser refinado, com a inserção de outras variáveis como: dados batimétricos, altimétricos, perfil de praia, dados oceanográficos entre outros.

Como sugestão para pesquisas futuras pode-se citar:

- Criação de modelos *fuzzy* para vulnerabilidade de outros tipos de movimentos como rios, área alagadas, lagos. Sendo necessário averiguar as variáveis envolvidas em cada tipo de aplicação.
- Consideração da presença de solos expostos, situação bastante comum quando ocorre a modificação dos tipos de vegetações assim como modificações nos tipos de ocupações e zoneamentos urbanos.

## REFERÊNCIAS

- [1] ADGER, W. N. **Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam.** Great Britain: Elsevier Science, Vol. 27, Nº 2, P. 249-269, 1999.
- [2] ADGER, W. N. **Vulnerability.** Global Environmental Change, East Anglia, Vol. 16, P.268-281, 2006.
- [3] AHMAD, S. J.; LAKHAN, V. C. **GIS-Based Analysis and Modeling of Coastline Advance and Retreat Along the Coast of Guyana.** Marine Geodesy: Taylor & Francis Group, LLC, 35:1–15, 2011.
- [4] ALMEIDA, H.R.R.C. **Séries temporais de imagens suborbitais e orbitais de alta resolução espacial na avaliação da morfodinâmica praial no município do Cabo de Santo Agostinho –PE.** Dissertação de conclusão de curso, (Mestrado em Ciências Geodésicas) UFPE, 2008.124p.
- [5] ALVES, A., MARQUES, M. E SOUZA, F.J. **Análise do potencial erosivo dos solos em bacias hidrográficas: Aplicação da Lógica Nebulosa (Fuzzy) no diagnóstico ambiental.** Pesquisa Agropecuária e Desenvolvimento Sustentável, PESAGRORIO, Vol. 1, Nº 1, p.1-13, 2002.
- [6] ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C.; CENTENO, J. A. S. **Object Oriented Analysis and Semantic Network for high Resolution Image Classification.** Boletim de Ciências Geodésicas. Vol. 9, Nº 2, P. 233-242, 2003.
- [7] ARAÚJO, M.C.B.; SOUZA, S.T.; CHAGAS, A.C.O.; BARBOSA, S.C.T.; COSTA, M.F. **Análise da Ocupação Urbana das Praias de Pernambuco, Brasil.**
-

Revista da Gestão Costeira Integrada. 7(2), P. 97-104, 2007.

- [8] AURELIANO, J. T. **Balneabilidade das praias de Pernambuco: O núcleo Metropolitano.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais), UFPE, 2000. 113p.
- [9] BARBOSA, D. **A Ferramenta de Desenvolvimento e de Aplicação de Lógica Fuzzy.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), UNIFEI , 2005. 126p.
- [10] BARTELT, S. **Manual do ArcCatalog: Detect Shifting Toolbox®,** (2012).
- [11] BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. **Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information.** ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing: Elsevier. Vol. 58, P. 239-258, 2004.
- [12] BILOBROVEC, M. **Sistema Especialista em Lógica Fuzzy para o Controle, Gerenciamento e Manutenção da qualidade em Processo de Aeração de Grãos.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia de Produção), UTFPR – Ponta Grossa, 2005. 74p.
- [13] BOAK, E. H.; TURNER, I. L. **Shoreline Definition and Detection: A Review.** Journal of Coastal Research. 21(4), P. 688-703, 2005.
- [14] BORUFF, B.J.; EMRICH, C.; CUTTER, S.L. **Erosion hazard vulnerability of US coastal counties.** Journal of Coastal Research, 21(5), P. 932–942, 2005.
- [15] BOYD, D.S.; FOODY, G.M. **An overview of recent remote sensing and GIS based research in ecological informatics.** Journal of Ecological Informatics. 6, P. 25-36, 2011.
-

- [16] BRYAN, B.; HARVEY, N.; BELPERIO, T.; BOURMAN, B. **Distributed process modeling for regional assessment of coastal vulnerability to sea-level rise.** Environmental Modeling and Assessment. 6, P.57-65, 2001.
- [17] CALLIARI, L. J.; MUEH, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO Jr., E. **Morfodinâmica pracial: uma breve revisão.** Revista Brasileira de Oceanografia, 2003, P. 63-78.
- [18] CLARK, G. E.; MOSER, S. C.; RATICK, S. J.; DOW, K.; MEYER, W. B.; EMANI, S.; JIN, W.; KASPERSON, J. X.; KASPERSON, R. E.; SCHWARZ, H. E. **Assessing the Vulnerability of Coastal Communities to Extreme Storms: The Case of Revere, MA., USA.** Kluwer Academic Publishers: Printed in the Netherlands. 3, P. 59-82, 1998.
- [19] CORCOLL-SPINA, C. O. **Lógica Fuzzy: reflexões que contribuem para a questão de subjetividade na construção do conhecimento matemático.** Tese de conclusão de curso, (Doutorado em Educação). USP, 2010. 165p.
- [20] CORREA, S. S. C. **Lógica Nebulosa.** V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais. ITA, São José dos Campos – SP. P. c073-c090, 1999.
- [21] COSTA, M.F.; ARAÚJO, M. C. B.; CAVALCANTI, J. S. S.; SOUZA, S. T. **Verticalização da Praia da Boa Viagem (Recife, Pernambuco) e suas Consequências Socioambientais.** Revista da Gestão Costeira Integrada. 8(2): P. 233-245, 2008.
- [22] CUNHA, A. M.; MENNA, L. M.; SANTOS, O. J. S. **Inteligência Artificial.** Curso de Especialização em Análise de Ambiente Eletromagnético. ITA (INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA), 2012.

- [23] DANIEL, H. **Replenishment versus retreat: the cost of maintaining Delaware's beaches.** Ocean & Coastal Management. 44, P. 87-104, 2001.
- [24] DANTE, L. R. **Matemática: Contexto e Aplicações.** São Paulo: Ática, 2011.
- [25] DOODY, J. P. **Shoreline management – conservation, management or restoration?** National Coastal Consultants. P.407-419, 2001.
- [26] Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Sistema Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial**, disponível em Internet: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/geoeye.htm>. Acessado em 25/08/2012.
- [27] FERNANDES, R. T. **Supervisão de um Sistema Híbrido eólico/diesel usando Lógica Fuzzy.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Elétrica), UFMS, 2005. 118p.
- [28] FERNANDES, E.; BASTOS, L. C.; MELLO, R. **Apoio à decisão ao Planejamento do uso do espaço com a utilização de Sistemas de Informações Geográficas e Lógica Difusa.** Revista Brasileira de Cartografia. Nº 62, P. 43-54, 2010.
- [29] FILIPPINI, F. **Metodologias para tomada de decisão a partir de Informações Qualitativas.** Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Ciências da Computação), UFSC, 2003, 82p.
- [30] FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- [31] GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy.** SBA Controle & Automação. Vol. 4, Nº 3, P. 97-115, 1994.
-

- [32] GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHEIT, R. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações.** Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial (DCA), 2009, 38 p.
- [33] GONÇALVES, R. M. **Modelagem de tendência a curto-prazo da linha de costa através de dados geodésicos temporais utilizando regressão linear, estimativa robusta e redes neurais artificiais.** Tese de conclusão de curso (Doutorado em Ciências Geodésicas), UFPR, 2010. 152p.
- [34] GONÇALVES, R. M.; AWANGE, J.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; COELHO, L. S. **A comparison between three short-term shoreline prediction models.** Ocean & Coastal Management, v. 69, p. 102-110, 2012.
- [35] GREGÓRIO, M. N. **Autora de algumas fotografias da Área de Estudo,** 2012.
- [36] GUIERA, A. J. A.; CENTENO, T. M.; DELGADO, M. R.; MÜLLER, M. **Segmentação por Agrupamentos Fuzzy Cmeans em Imagens LiDAR Aplicados na Identificação de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.** Espaço Energia. 3 ed., 2005, 9p.
- [37] HANSON, S.; NICHOLLS, R. J.; BALSON, P.; BROWN, I.; FRENCH, J.R.; SPENCER, T.; SUTHERLAND, W. J. **Capturing coastal geomorphological change within regional integrated assessment: an outcome-driven fuzzy logic approach.** Journal of Coastal Research: West Palm Beach (Florida), 26(5), P. 831–842, 2010.
- [38] HAPKE, C.; PLANT, N. **Predicting coastal cliff erosion using a Bayesian probabilistic model.** Journal of Marine Geology. 278, P. 140-149, 2010.
-

- [39] HARLEY, M. D.; TURNER, I.L.; SHORT, A.D.; RANASINGHE, R. **Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring.** Journal of Coastal Engineering, 2011, Nº58, P. 194-205.
- [40] HESTER, D. B.; NELSON, S. A. C.; CAKIR, H. I.; KHORRAM, S.; CHESHIRE, H. **High-resolution land cover change detection based on fuzzy uncertainty analysis and change reasoning.** Taylor & Francis: International Journal of Remote Sensing. Vol. 31, Nº 2, P. 455-475, 2010.
- [41] IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Mapa de distribuição da população 2010, disponível em Internet: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/mapas\\_doc1.shtml](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/mapas_doc1.shtml) acessado em 13/07/2011.
- [42] JANG. J. S.; MIZUTANI. E.; SUN. C. T. **Neuro – Fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence.** Londres: Prentice Hall, 1997.
- [43] JUANG, C.H., HUANG, X.H., HOLTZ, R.D. E CHEN, J.W. **Determining Relative Density of Sands From CPT Using Fuzzy Sets.** Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, Nº 1, P.1-6. 1996.
- [44] JUNGES, L. C. D. **Introdução a Lógica Fuzzy.** Departamento de Automação de Sistemas Industriais Inteligentes, 2006.
- [45] KERSTING, A. P. B.; CENTENO, J. A. S. **Object Oriented Transmission Line Corridors Classification using LIDAR Technology and a Non-Metric Digital Camera.** Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 13, Nº 2, P. 295-315, 2007.
- [46] KING, C.A.M. **Beaches and Coasts.** Arnold, London, 1959, 403 p.
-

- [47] KOHAGURA, T. **Lógica Fuzzy e suas Aplicações**. Trabalho de conclusão de Curso ( Graduação em Ciência da Computação), UEL, 2007. 61 p.
- [48] KOKOT, R. R.; CODIGNOTTO, J. O.; ELISSONDO, M. **Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de La provincia de Río Negro**. Revista de la Asociación Geológica Argentina. 59(3), P. 477-487, 2004.
- [49] KOMAR, P.D.. **Beach processes and Sedimentation**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1998, 544 p.
- [50] LAZZAROTTO, D. R.; SLUTER, C. R.; DALMOLIN, Q. **Avaliação da qualidade de base Cartográfica por meio de indicadores e Sistema de Inferência Fuzzy**. Boletim de Ciências Geodésicas: Resumos. Vol. 11, Nº 2, P.297-299, 2005.
- [51] LEE, C. C. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller: Parte II**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol. 20, Nº 2, P. 419-435, 1990.
- [52] LEE, D.H.; JUANG, C.H. **Evaluation of failure potential in mudstone slopes using fuzzy sets**. ASCE Geotechnical Special Publication No 31, Stability and Performance of Slopes and Embankments – II. Vol. 2, P. 1137-1151, 1992.
- [53] Lei de Gerenciamento Costeiro do Estado de Pernambuco. Lei Nº 14. 258, de 23 de dezembro de 2010.
- [54] LI, C.; YIN, J.; LIU, L. **Research Overview on Urban Land Use Change Based on Remote Sensing Images**. International Journal of Environmental Science and Development. Vol. 2, Nº1, P. 45-48, 2011.

- [55] LIMA, G. S. **Seleção de Áreas para Implantação de Aterros Sanitários: Uma Proposta Baseada na Análise do Valor e Lógica Fuzzy**. Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Civil). UFRJ, 1995, 153p.
- [56] LIMA, E. L.; CARVALHO, P. C. P.; WAGNER, E.; MORGADO, A.C. **A Matemática do Ensino Médio**. Sociedade Brasileira de Matemática. Rio de Janeiro: SBM, 2005.
- [57] LIZARAZO, I. **Fuzzy image regions for estimation of impervious surface areas**. Taylor & Francis: Remote Sensing Letters. Vol. 1, Nº 1, P.19-27, 2010.
- [58] MACBEAN, E.A., ROVERS, F.A. E FARQHAR, G.J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. PrenticeHall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, USA, 1995, 521p.
- [59] MALLMANN, D. L. B. **“Vulnerabilidade do Litoral Sul de Pernambuco à erosão”**. Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Oceanografia), UFPE, 2008. 152 p.
- [60] MALLMANN, D. L. B.; ARAÚJO, T. C. M. **Vulnerabilidade do Litoral Sul de Pernambuco à erosão**. Tropical Oceanography. V. 38, nº 2, P. 129-151, 2010.
- [61] MANSO, V. A. V.; COUTINHO, P. N.; GUERRA, N. C.; JUNIOR, C. F. A. S. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro: Pernambuco**. Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha – LGGM. Recife: Editorial da Universidade, 2006.
- [62] MARANDOLA JR, E.; HOGAN, D. J. **Vulnerabilidade do lugar vs. Vulnerabilidade sociodemográfica: implicações metodológicas de uma velha questão**. Revista Brasileira de Estudos de População. Vol. 26, Nº 2,
-

P. 161-181, 2009.

- [63] MAZZER, A. M.; DILLENBURG, S. R.; SOUZA, C. R. G. **Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil.** Revista Brasileira de Geociências. 38(2), P.278-294, 2008.
- [64] MENDEL, J. M. **Uncertain rule-based fuzzy logic systems: Introduction and New Directions.** 2001. Londres: Prentice Hall, 2001.
- [65] MENEZES, D. B. **Diagnóstico dos Impactos do Depósito de Resíduos Sólidos de São Carlos no Meio Físico.** Dissertação de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Civil), USP, 1995, 102p.
- [66] MITRA, B., SCOTT, D., DIXON, C. E MCKIMMEY, J. **Application of fuzzy logic to the prediction of soil erosion in a large watershed.** Geoderma, Vol. 86, Nº 4, P.183- 209, 1998.
- [67] MONTEIRO, R. D. V. **Uma proposta de aprendizagem interativa da Lógica utilizando simuladores artificiais inteligentes.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Ciências da Computação), UFSC, 2002. 100p.
- [68] MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S.; CAVALCANTE, A. A.; PAULA, D. P.; SILVA, R. L. **Erosão Costeira em Praias Adjacentes às Desembocaduras Fluviais: O Caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil.** Revista da Gestão Costeira Integrada. 8(2), P. 61-76, 2008.
- [69] MOURA, C. M.; SILVA, E.V.; MOURA,A.C.; ROCHA, F. S. P.; PONTES-NETO, J. G.; CAVALCANTI, K.P. S.; CARVALHO, R. C. X.; JIMENEZ, G. C.; ANJOS, F. B. R.; SOUZA, I. A.; PASSAVANTE, J.Z.O. **Impactos Ambientais decorrentes da erosão costeira na Orla Marítima de Jaboatão dos Guararapes.** V
-

Simpósio Brasileiro de Oceanografia: Oceanografia e Políticas Públicas. Santos - SP, P. 1-5, 2011.

[70] MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

[71] NEVES, C. F.; MUEHE, D. **Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira**. Parcerias Estratégicas. N° 27, 2008, 80 p.

[72] OZYURT, G.; ERGIN, A. **Application of Sea Level Rise Vulnerability Assessment Model to Selected Coastal Areas of Turkey**. Journal of Coastal Research. 56, P.248, 251, 2009.

[73] OZYURT, G.; ERGIN, A. **Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator based methodology for decision makers**. Journal of Coastal Research: Bione Research Evolved. 26(2), 265–273, 2010.

[74] PRADO, F. A.; GALO, M. L. B. T. **Classificação de Imagens Multiespectrais Baseada em Abordagem Fuzzy**. Revista Brasileira de Cartografia. N° 61/03, P.233-244, 2009.

[75] PRADO, F. A.; GALO, M. L. B. T. **Desenvolvimento de um Sistema Hierárquico de Classificação com Aplicação Baseada em Abordagem Fuzzy**. Boletim de Ciências Geodésicas – Curitiba-PR. V. 16, N° 2, P.309-331, 2010.

[76] Projeto MAI: Monitoramento Ambiental Integrado. Relatório Final: Volume I, Recife – PE, 2009.

---

- [77] RAPOSEIRO, P.D.; FERREIRA, J. C. R. **A análise da vulnerabilidade e do risco de inundação como ferramenta de apoio à gestão dos territórios litorâneos sob pressão urbana.** Pluris: Planejamento urbano regional integrado e sustentável. P. 1-12, 2010.
- [78] REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes Fundamentos e Aplicações.** 1<sup>a</sup> ed. Barueri – SP: Manole, 2005.
- [79] REMPEL, C.; PÉRICO, E.; ECKHARDT, R. **Zoneamento Econômico-Ambiental do Vale Taquari.** Disponível em: <http://www.univates.br/files/files/univates//editora/zoneamentoEconomicoAmbientalVT/pagina24-25.pdf>. Acessado em: 23/12/2012.
- [80] ROCHA, C. P.; ARAÚJO, T. C. M.; MENDONÇA, F. J. B. **Aplicação de técnicas de posicionamento GPS tridimensional para localizar linhas de costa: estudo de caso na praia de Boa Viagem, Recife-PE, Brasil.** Revista da Gestão Costeira Integrada. 8(2), P. 127-137, 2008.
- [81] RODRIGUES, S. A.; SANTOS, S. A. **A Lógica Fuzzy na Administração de Empresas.** VII SEMEAD – Administração Geral. P. 1-12, 2004.
- [82] RODRIGUES, F.Z.; SANTOS, S.A. **A Lógica Fuzzy na Administração de Empresas.** VII SEMEAD Administração Geral, 2005, 3 p.
- [83] RYABCHUK, D.; SPIRIDONOV, M.; ZHAMOIDA, V.; NESTEROVA, E.; SERGEEV, A. **Long term and short term coastal line changes of the Eastern Gulf of Finland: Problems of coastal erosion.** J Coast Conserv. Springer Science. P. 1-10, 2010.
- [84] SAENGUPAVANICH, C.; CHONWATTANA, S.; NAIMSAMPAO, T. **Coastal erosion through integrated management: A case of Southern Thailand.**
-

Ocean & Coastal Management: Elsevier, 52, P.307-316, 2009.

- [85] SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications.** Berlin-New York, 2003, 589p. In: Walter de Gruyter. 2<sup>nd</sup> revised edition.
- [86] SHAW, I.S.; SIMÕES, M.G. **Controle e Modelagem Fuzzy.** 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Blücher, 2007.
- [87] SILVA, A. C. F. C.; SOUZA JÚNIOR, C. B.; ARAÚJO, E. V.; SOUZA, G. F. C.; SILVA, S. R. **Bacias Hidrográficas de Pernambuco: Bacia do Rio Capibaribe.** Atlas de Pernambuco, 2006.
- [88] SILVA, M. A. **Aplicação de Lógica Nebulosa para Previsão do Risco de Escorregamentos de Taludes em Solo Residual.** Dissertação de conclusão de curso (Mestrado em Engenharia Civil), UERJ, 2008. 150 p.
- [89] SILVA, V. A. D.; CASTRO, D. B.; SOUSA, G. R.; LAMIM FILHO, P. C. M.; BRITO, J. N. **Estudo Comparativo entre as Funções de Pertinência inseridas na Entrada e na Saída de um Sistema Fuzzy desenvolvido na Plataforma Labview 9.0.** Nono Simpósio de Mecânica Computacional Universidade Federal de São João Del-Rei – MG. P. 1-8, 2010.
- [90] SILVA, L. M. **Modelagem Fuzzy da interface continente e oceano através de dados geodésicos para identificar locais vulneráveis.** Projeto de Qualificação (Mestrado em Ciências Geodésicas), UFPE, 2012, 44p.
- [91] SILVA, L. M. O., GONÇALVES, R. M. **Uma revisão da modelagem fuzzy da interface continente e oceano para identificar locais vulneráveis à erosão.** In: Quinta-Ferreira, M., Barata, M. T., Lopes, F.C., Andrade, A. I., Henriques, M. H., Pena dos Reis, R., Ivo Alves, E. (Coords). Para Desenvolver a Terra. In: Memórias e Notícias de Geociências no Espaço
-

Lusófono. Impressa da Universidade de Coimbra, Cap. 15 (in press), 2012, Vol. 1, P. 100-110.

[92] SILVA, L. M.; GONÇALVES, R. M.; FARIAS, R. D.; MARTINS, T. L. **Detecção de mudanças antrópicas no ambiente praial em Boa Viagem – Recife – PE.** IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, P. 1-7, 2012.

[93] SMITH, R. A. **Beach resorts: A model of development evolution. Landscape and Urban Planning.** Nº21, P. 189-210, 1991.

[94] SUGENO, M.; YASUKAWA, T. **A Fuzzy-Logic-Based Approach to Qualitative Modeling.** IEEE Transactions on Fuzzy Systems. Vol. 1, Nº 1, P.1-25, 1993.

[95] TAKAGI, T.; SUGENO, M. **Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control.** IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. Vol. 15, Nº 1, P. 116-132, 1983.

[96] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – (UEM). **Conjuntos Nebulosos.** Maringá/PR. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ia/intelige/difusa/Historico.htm>. Acesso em: 22 julho 2012, (a).

[97] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – (UEM). **Conjuntos Nebulosos.** Maringá/PR. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ia/intelige/difusa/Aplicacao.htm>. Acesso em: 22 julho 2012, (b).

[98] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – (UEM). **Conjuntos Nebulosos.** Maringá/PR. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ia/intelige/difusa/Ideias.htm>. Acesso em: 22 julho 2012, (c).

[99] UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – (UEM). **Conjuntos Nebulosos.**

---

Maringá/PR. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ia/intelige/difusa/Perspectiva.htm>. Acesso em: 22 julho 2012, (d).

- [100] VAFEIDIS, A. T.; NICHOLLS, R. J.; MCFADDEN, L.; TOL, R. S. J.; HINKEL, J.; SPENCER, T.; GRASHOFF, P. S.; BOOT, G.; KLEIN, R. J. T. **A new Global Coastal Database for Impact and Vulnerability Analysis to Sea-Level Rise.** Journal of Coastal Research: West Palm Beach, 24, 4, P. 917-924, 2008.
- [101] VELLASCO, M. M. B. R. **Lógica Nebulosa.** ICA: Núcleo de Pesquisa em Inteligência Computacional Aplicada PUC - Rio de Janeiro, 2010.
- [102] WU, S.; YARNAL, B.; FISHER, A. **Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA.** Climate Research: Clim Res. Vol. 22, P. 255-270, 2002.
- [103] XIMENES, A. C.; ALMEIDA, C. M.; AMARAL, S.; ESCADA, M. I. S.; AGUIAR, A. P. D. **Modelagem Dinâmica do desmatamento na Amazônia.** Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 14, Nº 3, P. 370-391, 2008.
- [104] ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets, Inform. and Control.** 8, P. 338-353, 1965.

## APÊNDICES

### Apêndice 1 – As 27 regras criadas para o processo de inferência na criação da Modelagem Fuzzy

Regra	1	Linha de Costa	2	Pós praia	3	Urbanização	4	Vegetação	5	Enrocamento	6	Benfeitorias de Lazer	Então	Índice de Vulnerabilidade
1	Se	Estável											Então	Baixo
2	Se	Moderada											Então	Moderado
3	Se	Instável											Então	Alto
4	Se		Ampla										Então	Baixo
5	Se		Moderada										Então	Moderado
6	Se		Estreita										Então	Alto
7	Se				Próxima								Então	Alto
8	Se				Moderada								Então	Moderada
9	Se				Distante								Então	Baixo
10	Se					Rasteira							Então	Baixo
11	Se					Arbustiva							Então	Moderado
12	Se					Arbórea							Então	Alto
13	Se						Ausente						Então	Baixo
14	Se						Adjacente						Então	Moderado
15	Se						Alto						Então	Alto
16	Se							Presente					Então	Alto
17	Se								Adjacente				Então	Moderado
18	Se								Ausente				Então	Baixo
19	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente	Então	Muito Alto
20	Se	Moderada	E	Moderada	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente	Então	Alto
21	Se	Estável	E	Ampla	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente	Então	Alto
22	Se	Instável	E	Estreita	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente	Então	Alto

23	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente	Então	Moderado
24	Se	Estável	E	Ampla	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente	Então	Moderado
25	Se	Instável	E	Estreita	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente	Então	Alto
26	Se	Moderada	E	Moderada	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente	Então	Moderado
27	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente	Então	Moderado

**Apêndice 2 – As 114 regras criadas para o processo de inferência na criação da Modelagem Fuzzy**

Regra	1	Linha de Costa	2	Pós praia	3	Urbanização	4	Vegetação	5	Enrocamento	6	Benfeitorias de Lazer	Então	Índice de Vulnerabilidade
1	Se	Estável											Então	Baixo
2	Se	Moderada											Então	Moderado
3	Se	Instável											Então	Alto
4	Se		Ampla										Então	Baixo
5	Se		Moderada										Então	Moderado
6	Se		Estreita										Então	Alto
7	Se			Próxima									Então	Alto
8	Se				Moderada								Então	Moderado
9	Se				Distante								Então	Baixo
10	Se					Rasteira							Então	Baixo
11	Se						Arbustiva						Então	Moderado
12	Se						Arbórea						Então	Alto
13	Se							Ausente					Então	Baixo
14	Se								Adjacente				Então	Moderado
15	Se								Alto				Então	Alto
16	Se									Presente			Então	Alto
17	Se										Adjacente		Então	Moderado
18	Se										Ausente		Então	Baixo
19	Se	Estável	E	Ampla									Então	Baixo

20	Se	Moderada	E	Moderada									Então	Moderado
21	Se	Instável	E	Estreita									Então	Alto
22	Se	Estável	E						Ausente				Então	Baixo
23	Se	Moderada	E						Adjacente				Então	Moderado
24	Se	Instável	E						Alto				Então	Muito Alto
25	Se	Estável	E						Adjacente				Então	Moderado
26	Se	Moderada	E						Alto				Então	Alto
27	Se	Instável	E						Ausente				Então	Alto
28	Se	Estável	E						Alto				Então	Alto
29	Se	Moderada	E						Ausente				Então	Moderado
30	Se	Instável	E						Adjacente				Então	Moderado
31	Se	Estável	E		Próxima								Então	Moderada
32	Se	Estável	E		Moderada								Então	Moderada
33	Se	Estável	E		Distante								Então	Baixa
34	Se	Moderada	E		Próxima								Então	Alta
35	Se	Moderada	E		Moderada								Então	Moderada
36	Se	Moderada	E		Distante								Então	Moderada
37	Se	Instável	E		Próxima								Então	Muito Alta
38	Se	Instável	E		Moderada								Então	Alta
39	Se	Instável	E		Distante								Então	Moderada
40	Se	Estável	E			Rasteira							Então	Baixa
41	Se	Estável	E			Arbustiva							Então	Moderada
42	Se	Estável	E			Arbórea							Então	Moderada
43	Se	Moderada	E			Rasteira							Então	Moderada
44	Se	Moderada	E			Arbustiva							Então	Moderada
45	Se	Moderada	E			Arbórea							Então	Alta
46	Se	Instável	E			Rasteira							Então	Moderada
47	Se	Instável	E			Arbustiva							Então	Moderada
48	Se	Instável	E			Arbórea							Então	Alta
49	Se	Estável	E						Presente				Então	Moderada
50	Se	Estável	E						Adjacente				Então	Moderada
51	Se	Estável	E						Ausente				Então	Baixa
52	Se	Moderada	E						Presente				Então	Alta
53	Se	Moderada	E						Adjacente				Então	Moderada
54	Se	Moderada	E						Ausente				Então	Moderada

55	Se	Instável	E							Presente	Então	Muito Alta
56	Se	Instável	E							Adjacente	Então	Alta
57	Se	Instável	E							Ausente	Então	Moderada
58	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente
59	Se	Moderada	E	Moderada	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente
60	Se	Estável	E	Ampla	E	Próxima	E	Arbórea	E	Alto	E	Presente
61	Se	Instável	E	Estreita	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente
62	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente
63	Se	Estável	E	Ampla	E	Moderada	E	Arbustiva	E	Moderado	E	Adjacente
64	Se	Instável	E	Estreita	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente
65	Se	Moderada	E	Moderada	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente
66	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E	Rasteira	E	Ausente	E	Ausente
67	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima						Então Muito Alta
68	Se	Moderada	E	Moderada	E	Próxima						Então Alta
69	Se	Estável	E	Ampla	E	Próxima						Então Moderada
70	Se	Instável	E	Estreita	E	Moderada				E	Ausente	Então Alta
71	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada				E	Ausente	Então Moderada
72	Se	Estável	E	Ampla	E	Moderada				E	Ausente	Então Moderada
73	Se	Instável	E	Estreita	E	Distante				E	Ausente	Então Alta
74	Se	Moderada	E	Moderada	E	Distante				E	Ausente	Então Moderada
75	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante				E	Ausente	Então Baixa
76	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E	Rasteira				Então Alta
77	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E	Arbustiva				Então Moderada
78	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E	Arbórea				Então Moderada
79	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E	Rasteira				Então Moderada
80	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E	Arbustiva				Então Moderada
81	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E	Arbórea				Então Alta
82	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E	Rasteira				Então Baixa
83	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E	Arbórea				Então Moderada
84	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E	Arbustiva				Então Moderada
85	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E		Ausente			Então Alta
86	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E		Moderado			Então Alta
87	Se	Instável	E	Estreita	E	Próxima	E		Alto			Então Muito Alta
88	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E		Ausente			Então Moderada
89	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E		Moderado			Então Moderada

90	Se	Moderada	E	Moderada	E	Moderada	E			Alto			Então	Alta
91	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E			Ausente			Então	Baixa
92	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E			Moderado			Então	Moderada
93	Se	Estável	E	Ampla	E	Distante	E			Alto			Então	Moderada
94	Se	Instável	E	Estreita	E			Rasteira	E	Ausente			Então	Moderada
95	Se	Instável	E	Estreita	E			Rasteira	E	Moderado			Então	Moderada
96	Se	Instável	E	Estreita	E			Rasteira	E	Alto			Então	Alta
97	Se	Moderada	E	Moderada	E			Arbustiva	E	Ausente			Então	Moderada
98	Se	Moderada	E	Moderada	E			Arbustiva	E	Moderado			Então	Moderada
99	Se	Moderada	E	Moderada	E			Arbustiva	E	Alto			Então	Alta
100	Se	Estável	E	Ampla	E			Arbórea	E	Ausente			Então	Moderada
101	Se	Estável	E	Ampla	E			Arbórea	E	Moderado			Então	Moderada
102	Se	Estável	E	Ampla	E			Arbórea	E	Alto			Então	Alta
103	Se	Estável	E	Ampla	E			Rasteira	E	Ausente			Então	Baixa
104	Se	Estável	E	Ampla	E			Rasteira	E	Moderado			Então	Moderada
105	Se	Estável	E	Ampla	E			Rasteira	E	Alto			Então	Alta
106	Se	Instável	E	Estreita	E					Ausente			Então	Moderada
107	Se	Instável	E	Estreita	E					Moderado			Então	Alta
108	Se	Instável	E	Estreita	E					Alto			Então	Muito Alta
109	Se	Moderada	E	Moderada	E					Ausente			Então	Moderada
110	Se	Moderada	E	Moderada	E					Moderado			Então	Moderada
111	Se	Moderada	E	Moderada	E					Alto			Então	Alta
112	Se	Estável	E	Ampla	E					Ausente			Então	Baixa
113	Se	Estável	E	Ampla	E					Moderado			Então	Moderada
114	Se	Estável	E	Ampla	E					Alto			Então	Alta

