

Allan de Oliveira de Oliveira

**SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE DE SISTEMAS COSTEIROS  
ABRIGADOS À OSCILAÇÃO POSITIVA DO NÍVEL DO MAR: ESTUDO DE  
CASO LAGOA DA CONCEIÇÃO/SC.**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do grau de Doutor em Geografia - Área de Concentração Utilização e Conservação de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Jarbas Bonetti Filho

Florianópolis, SC.  
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

De Oliveira, Allan de Oliveira  
Susceptibilidade e vulnerabilidade de sistemas  
costeiros abrigados à oscilação positiva do nível do mar:  
estudo de caso Lagoa da Conceição/SC. / Allan de Oliveira  
De Oliveira ; orientador, Jarbas Bonetti Filho -  
Florianópolis, SC, 2016.  
203 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa  
de Pós-Graduação em Geografia.

Inclui referências

1. Geografia. 2. Sistemas Costeiros Abrigados. 3.  
Susceptibilidade Física. 4. Vulnerabilidade Social. 5.  
Índice de Vulnerabilidade Costeira. I. Bonetti Filho,  
Jarbas. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

Allan de Oliveira de Oliveira

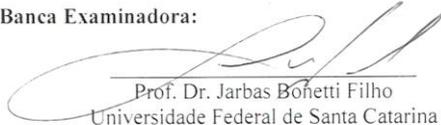
**Suscetibilidade e vulnerabilidade de sistemas costeiros  
abrigados à oscilação positiva do nível do mar: estudo  
de caso Lagoa da Conceição/SC**

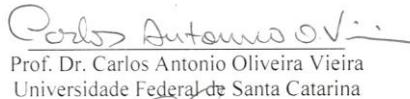
Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do  
Título de "Doutor em Geografia", e aprovada em sua forma  
final pelo Programa de Pós-graduação em Geografia.

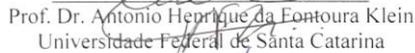
Florianópolis, 29 de setembro de 2016.

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Aloysio Marthins de Araújo Junior  
Coordenador do PPGG/UFSC

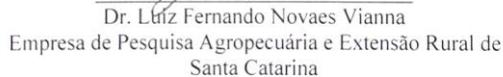
**Banca Examinadora:**

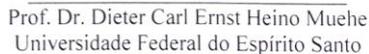
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jarbas Bochetti Filho  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Antonio Oliveira Vieira  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Roney Armanini Tagliani  
Universidade Federal do Rio Grande

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luiz Fernando Novaes Vianna  
Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de  
Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Dieter Carl Ernst Heino Muehe  
Universidade Federal do Espírito Santo

## AGRADECIMENTOS

Gostaria, antes de agradecer a todas as pessoas que de alguma maneira me auxiliaram ao longo destes anos de pesquisa, lembrar que a elaboração desta tese só foi possível a partir dos investimentos em educação e pesquisa definidos nos governos de Luiz Inácio Lula da Silva e Dilma Rousseff.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jarbas Bonetti pelas considerações e críticas ao longo da pesquisa.

A Profa. Dra. Elisa Helena Leão Fernandes, do Laboratório de Oceanografia Costeira e Estuarina da Universidade Federal do Rio Grande (LOCOSTE/FURG), por aceitar minha participação no seu grupo de pesquisa e utilizar o Modelo Telemac-3D para modelagem hidrodinâmica da Lagoa da Conceição e projetar os cenários de subida do nível do mar.

A Oceanógrafa MSc. Heline Alves de Oliveira que me deu todo suporte necessário para conseguir realizar a modelagem hidrodinâmica, me incentivando e cobrando. ‘Zinza’, muito obrigado por ter me ajudado a seguir com a minha ideia, meu agradecimento e respeito por ti são enormes.

Aos professores do Laboratório de Oceanografia Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina (LOC/UFSC) – Prof. Dra. Carla Van Der Haagen Custodio Bonetti e Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein.

Aos professores e técnicos do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Pelotas (DEGEO/UFPel).

A todos os pesquisadores envolvidos nos projetos “Metodologia para quantificação de riscos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras do litoral norte da Ilha de Santa Catarina e regiões de entorno” e “Análise de Riscos Costeiros a Eventos Atmosféricos Extremos devido as Mudanças Globais nas regiões Sul e Sudeste do Brasil”, destacando que a pesquisa desta tese está inserida neste último projeto, e o mesmo forneceu a bolsa de pesquisa CAPES.

A toda minha família, em especial a minha irmã Márcia e Dinda Rosane, amo e respeito muito vocês.

Ao meu amigo Luciano, por fazermos parte de um mesmo universo geográfico desde a graduação; pelo apoio, incentivo, e por saber que posso sempre contar contigo. Valeu irmão!

Ao meu amigo Beto, por fazermos parte de um mesmo universo ético e das boas risadas. Valeu irmão!

A minha família 'Satolep' - Moisés, Hudson, Roberto, Leandro, Gabriele - que me proporciona momentos maravilhosos. Esta família é muito especial para mim. Amo vocês!

Aos colegas e amigos que foram parceiros ao longo da pesquisa: Arthur, Charline, Mariela, Michel (Gaúcho), Paula, Priscila, Rafael (Jaca) – LOC/UFSC – Gustavo, Pablo, Paulo, Roberto, Tatiana - LOCOSTE/FURG).

Aos amigos Samuel, Mário, Frank, Ilo, Mel, Rossana, Raquel Dumith, Ádrio, Ederson.



## RESUMO

Oscilações positivas do nível do mar e seus efeitos em sistemas costeiros são avaliados através de metodologias integradoras para determinar a susceptibilidade física e a vulnerabilidade social destas áreas. Estas oscilações podem estar relacionadas a processos contínuos, eventos extremos ou projeções de aumento do nível do mar por mudança climática, colocando em perigo as comunidades costeiras e, dependendo da intensidade destes eventos, gerando riscos à vida humana e aos meios de subsistência nas zonas costeiras. Esta pesquisa apresenta uma proposta metodológica integrada de análise espacial em Sistemas de Informações Geográficas para elaborar um Índice de Vulnerabilidade Costeira da Lagoa da Conceição à oscilação positiva do nível do mar. Foram realizados mapeamentos da cobertura das terras e de áreas marginais inundadas, elaborados índices de Vulnerabilidade Social (IVSo), de Susceptibilidade Física a partir de modelagem hidrodinâmica e por último o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC). O mapeamento da cobertura das terras mostrou que em 22,85% dos terrenos que possuem cotas altimétricas de 1 a 10m existem Núcleos Urbanos Mistos, áreas mais planas e com declives suaves que poderão ser impactadas com as oscilações positivas do nível do mar, e seus efeitos na LC. O IVSo mostrou a desigualdade social na área de estudo, com habitantes possuindo renda inferior a 1 salário mínimo, enquanto outros com até 20 salários. Através da análise por multicritérios nenhum segmento costeiro possui Vulnerabilidade Social Muito Baixa. As projeções de cenários de subida do nível do mar determinaram que o sistema é susceptível a elevação do nível do mar. Porém, existem áreas com maior susceptibilidade, quer sejam elas por maior influência das marés (Canal da Barra), quer seja por ação dos ventos que causam desnível no sistema (setores Norte e Sul). O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), que integrou os resultados obtidos ao longo da pesquisa, determinou que 47,68% das margens lagunares possuem Vulnerabilidade Muito Alta a Alta, com o Canal da Barra e Setor Sul possuindo as maiores extensões.

**Palavras-Chave:** Sistemas Costeiros Abrigados, Susceptibilidade Física, Vulnerabilidade Social, Índice de Vulnerabilidade Costeira.

## ABSTRACT

Fluctuations in sea level and its effects on coastal systems are evaluated by integrating methodologies to determine the physical susceptibility and social vulnerability of these areas. These fluctuations may be related to continuous processes, extreme events or projections of rising sea level by climate change. These changes generate hazards for coastal communities and, depending on the intensity of these events, creating risks to human life and livelihoods in coastal areas. This research presents an integrated methodological approach of spatial analysis in Geographic Information Systems. The goal is to develop a Coastal Vulnerability Index for the Lagoa da Conceição to the positive oscillation of sea level. The following maps were generated: land cover, flooded marginal areas, Social Vulnerability Index (SoVI), Susceptibility Physics from hydrodynamic modeling, and Coastal Vulnerability Index (CVI). The land of coverage mapping showed that in 22.85% of the land have elevations of 1 to 10m are Urban Centers. Are flatter areas with gentle slopes that may be impacted by the positive oscillation of sea level. The SoVI showed social inequality in the study area, with residents having income less than one minimum wage, while others with up to 20 minimum wages. Through analysis for advanced no coastal segment has Social Vulnerability Very Low. The projections of sea level rise scenarios determined that the system is susceptible to rising sea level. There are areas with greater susceptibility, whether by greater tidal influence (Canal da Barra da Lagoa), whether by action of the winds that cause unevenness in the lagoon system (North and South Sectors). The Coastal Vulnerability Index (CVI) determined that 47.68% of the marginal areas of lagoon have Vulnerability Very High to High. The Canal da Barra and South Sector having the largest extensions.

**Key-Words:** Coastal Lagoon, Physical Susceptibility, Social Vulnerability, Coastal Vulnerability Index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo .....	10
Figura 2. Curvas de variação do nível relativo do mar entre Itajaí e Laguna, Santa Catarina, durante os últimos 7.000 anos (1 - reconstrução de níveis marinhos pretéritos; 2 - terraços de construção marinha; e 3 - idades de sambaquis). .....	15
Figura 3. Variações no NM médio global a partir de dados altimétricos de satélites computados de 1993 a 2005 entre as latitudes 65°N e S. Os pontos são estimativas para 10 dias (vermelho – TOPEX/Poseidon; verde – Jason). A linha azul corresponde a uma suavização.....	16
Figura 4. Fluxograma com as etapas para elaboração do mapeamento de cobertura das terras da BHLC.....	23
Figura 5. Gráfico exemplificando o princípio da Máxima Verossimilhança. ....	31
Figura 6. Delimitação da BHLC e o MDT. ....	34
Figura 7. <i>Scree Plot</i> para a matriz de dados mostrando a necessidade de utilizar apenas as componentes principais 1 e 2. ....	35
Figura 8. Índice de Vegetação NDVI para a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. ....	37
Figura 9. Porcentagem por classe de cobertura mapeada. ....	39
Figura 10. Mapa de cobertura dos solos da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. ....	40
Figura 11. Formação arbórea natural (topo de morro) intercalada com formações herbáceas. ....	41
Figura 12. Parque Estadual do Rio Vermelho - área de reflorestamento. ....	42
Figura 13. Campo de dunas. ....	43
Figura 14. Lagoa da Conceição (setor central), margeada por formações de terras baixas (abaixo) e formações submontana com remanescentes da Mata Atlântica/vegetação de morro (acima).....	44
Figura 15. Perímetro urbano na Barra da Lagoa, mostrando também de cima para baixo: formação submontana, corpo lagunar, formação de terras baixas, formação arbórea/reflorestamento, áreas alteradas/formação herbácea, perímetro urbano, Canal da Barra da Lagoa, perímetro urbano junto à formação arbórea/submontana. ....	45
Figura 16. Cobertura das terras por intervalo altimétrico. ....	45
Figura 17. Fluxograma com as etapas para mapeamento das variações de áreas inundáveis na Lagoa da Conceição. ....	49
Figura 18. Maior variação de inundação através da primeira análise. ....	56
Figura 19. Menor variação de inundação através da primeira análise. ....	57
Figura 20. Maior variação de inundação através da segunda análise.....	58
Figura 21. Menor variação de inundação através da segunda análise. ....	59
Figura 22. Acumulado de precipitação mensal para o período de análise. ....	60

Figura 23. Acumulado de precipitação mensal e o IOS para os respectivos meses..	60
Figura 24. Banda 2 mostrando a variação que ocorre na margem leste da laguna nos anos de 1986, 1992 e 1994, onde segmentos praias diminuem (Praia das Rendeiras) ou são completamente inundados (setor central e norte). .....	62
Figura 25. Reflectância dos alvos na faixa do visível/banda 2 (esquerda) e no infravermelho próximo/banda 4 (direita). .....	65
Figura 26. Fluxograma com a estrutura metodológica para criação do IVS. ....	68
Figura 27. Localização dos setores censitários por distrito utilizados para o cálculo do IVS. ....	76
Figura 28. Índice de Vulnerabilidade Social para Pessoas Residentes.....	78
Figura 29. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator número de domicílios. ....	80
Figura 30. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator média de moradores por domicílio.....	81
Figura 31. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator Renda Domiciliar Média Per Capita. ....	83
Figura 32. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator % de domicílios com renda de até 1/2 salário mínimo. ....	84
Figura 33. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator % de domicílios com renda de até 1/4 salário mínimo. ....	85
Figura 34. Índice de Vulnerabilidade Social para área de estudo.....	87
Figura 35. Fluxograma metodológico para estruturação do modelo hidrodinâmico da Lagoa da Conceição. ....	92
Figura 36. Contornos líquidos e superficiais considerados para a modelagem numérica da LC. ....	98
Figura 37. Grade batimétrica utilizada para a modelagem numérica (A), detalhe da Ilha de Santa Catarina (B) e da Lagoa da Conceição (C). ....	100
Figura 38. Campo de salinidade utilizado como condição inicial. ....	102
Figura 39. Comparação entre nível lagunar observado e simulado entre agosto e novembro de 2013. ....	108
Figura 40. Localização dos pontos de amostragem ao longo do Canal da Barra....	110
Figura 41. Comportamento da variação do nível d'água ao longo do canal. ....	111
Figura 42. Comportamento da variação do nível d'água ao longo do canal. ....	111
Figura 43. Comportamento do nível do canal total, astronômico e meteorológico nos pontos P01 e P08. ....	112
Figura 44. Situação sinótica próxima ao dia 24/09/2013. ....	113
Figura 45. Carta sinótica para o dia 24/09/2013. ....	114
Figura 46. Rosa dos ventos com os dados de reanálise para 2013 (velocidade e direção). ....	115
Figura 47. Correlação entre variação de nível lagunar no setor norte e vento longitudinal. ....	116

Figura 48. Correlação entre variação de nível lagunar no setor central e vento longitudinal.....	117
Figura 49. Correlação entre variação de nível lagunar no setor sul e vento longitudinal.....	117
Figura 50. Variações de nível lagunar a partir do modelo calibrado e com condições de maré astronômica e ventos diferentes.....	119
Figura 51. Fluxograma com as etapas para elaboração do Índice de Susceptibilidade Física.....	123
Figura 52. Gráfico mostrando as projeções de elevação do nível do mar de acordo com o IPCC.....	124
Figura 53. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,21 m.....	129
Figura 54. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,25 m.....	131
Figura 55. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,44 m.....	133
Figura 56. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,73 m.....	135
Figura 57. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P01 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	137
Figura 58. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P02 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	137
Figura 59. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P03 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	137
Figura 60. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P04 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	138
Figura 61. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P05 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	138
Figura 62. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P06 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.....	138
Figura 63. Análise em porcentagem do grau de susceptibilidade das margens do sistema canal/laguna.....	140
Figura 64. Mapa de Susceptibilidade Física do sistema lagunar à elevação do nível do mar.....	141
Figura 65. Área urbana com núcleos residenciais no setor norte da LC.....	143
Figura 66. Área urbana com núcleos residenciais no setor sul da LC.....	144
Figura 67. Área urbana com núcleos residenciais no setor central (Avenida das Rendeiras) da LC.....	145
Figura 68. Área urbana com núcleos residenciais no setor central da LC e as margens do Canal da Barra da Lagoa.....	146
Figura 69. Comportamento hidrodinâmico com projeção de subida do nível do mar para o Canal da Barra da Lagoa.....	146
Figura 70. Fluxograma com as etapas para elaboração do Índice de Vulnerabilidade Costeira para a Lagoa da Conceição.....	151

Figura 71. IVC para o Canal da Barra. ....	160
Figura 72. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Canal da Barra da Lagoa. ....	161
Figura 73. IVC para o Setor Sul Lagunar. ....	164
Figura 74. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Sul. ....	165
Figura 75. IVC para o Setor Central Lagunar. ....	168
Figura 76. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Central. ....	169
Figura 77. IVC para o Setor Norte Lagunar. ....	172
Figura 78. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Norte. ....	173
Figura 79. Índice de Susceptibilidade e Vulnerabilidade Costeira da Lagoa da Conceição/SC. ....	176

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.....	32
Tabela 2. Matriz de confusão.....	36
Tabela 3. Classe de cobertura na área de estudo. ....	39
Tabela 4. Metadados das imagens utilizadas.....	50
Tabela 5. Inundação e emersão nas áreas marginais da Lagoa da Conceição entre 1986 e 2011. ....	54
Tabela 6. Definição dos índices de vulnerabilidade por variável através dos percentis. ....	72
Tabela 7. Definição dos intervalos de classe e suas respectivas nomenclaturas. ....	73
Tabela 8. Escala de comparadores de Saaty (1977). ....	74
Tabela 9. Matriz de comparação pareada entre os fatores. ....	75
Tabela 10. Peso calculado para cada fator na análise do índice vulnerabilidade social.....	75
Tabela 11. Parâmetros padrão utilizados na calibração do modelo. ....	106
Tabela 12. Parâmetros variáveis utilizados para testes de calibração do modelo. ....	106
Tabela 13. Coeficientes indicativos da qualidade dos resultados a partir do RMAE. ....	107
Tabela 14. Tabela com a definição dos cenários de elevação do nível do lagunar. ....	125
Tabela 15. As variáveis definidas para determinação do IVC da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar. ....	157
Tabela 16. Resumo do mapeamento realizado no Canal da Barra da Lagoa a partir de todas as variáveis.....	159
Tabela 17. Resumo do mapeamento realizado no setor sul a partir de todas as variáveis.....	163
Tabela 18. Resumo do mapeamento realizado no setor central a partir de todas as variáveis.....	167
Tabela 19. Resumo do mapeamento realizado no setor norte a partir de todas as variáveis.....	171
Tabela 20. Resumo do mapeamento realizado para a Lagoa da Conceição/SC.....	174

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO .....	IV
ABSTRACT .....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	X
SUMÁRIO.....	XI
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA .....	2
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.2.1 OBJETIVO GERAL .....	6
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
1.3 PERGUNTAS NORTEADORAS E HIPÓTESE.....	7
1.4 ESTRUTURA DA TESE .....	8
1.5 ÁREA DE ESTUDO .....	9
1.5.1 FISIOGRAFIA.....	9
1.5.2 HIDRODINÂMICA LAGUNAR.....	11
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>12</b>
2.1 LAGOAS COSTEIRAS E BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	12
2.2 FLUTUAÇÕES DO NÍVEL DO MAR POR MUDANÇA CLIMÁTICA.....	14
2.3 SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE COSTEIRA.....	19
<b>3 MAPEAMENTO DA COBERTURA DAS TERRAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO .....</b>	<b>22</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	22
3.2 METODOLOGIA .....	22
3.2.1 SISTEMA DE REFERÊNCIA ESPACIAL .....	23
3.2.2 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA.....	24
3.2.3 MAPEAMENTO DA COBERTURA DAS TERRAS .....	25
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
3.3.1.1 DESCRIÇÃO DAS COBERTURAS .....	41
3.3.1.1.1 FORMAÇÕES ARBÓREAS – FLORESTA NATURAIS (SUBMONTANA).....	41
3.3.1.1.2 FORMAÇÕES ARBÓREAS – FLORESTAS NATURAIS (TERRAS BAIXAS) .....	41
3.3.1.1.3 FORMAÇÕES ARBÓREAS – REFLORESTAMENTO .....	42
3.3.1.1.4 FORMAÇÕES HERBÁCEAS – CAMPOS .....	42

3.3.1.1.5	FORMAÇÕES HERBÁCEAS – VEGETAÇÃO DAS DUNAS MÓVEIS E SEMI-FIXAS.....	43
3.3.1.1.6	DEPÓSITOS ARENOSOS.....	43
3.3.1.1.7	CORPOS D'ÁGUA .....	44
3.3.1.1.8	PERÍMETROS URBANOS.....	44
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	46
4	MAPEAMENTO DE ÁREAS MARGINAIS INUNDADAS NA LAGOA DA CONCEIÇÃO.....	48
4.1	INTRODUÇÃO.....	48
4.2	METODOLOGIA.....	48
4.2.1	MAPEAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO.....	49
4.2.2	VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS .....	52
4.2.3	INFLUÊNCIA DO IOS .....	52
4.3	RESULTADOS.....	52
4.3.1	VARIAÇÃO DA ÁREA LAGUNAR: INUNDAÇÃO E EMERSÃO.....	52
4.3.2	PRECIPITAÇÃO E IOS.....	60
4.4	DISCUSSÃO .....	61
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
5	VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO RESIDENTE ÀS MARGENS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO FRENTE À ELEVÇÃO DO NÍVEL DO MAR .....	67
5.1	INTRODUÇÃO.....	67
5.2	METODOLOGIA.....	67
5.2.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	75
5.2.1.1	POPULAÇÃO RESIDENTE .....	77
5.2.1.2	DOMICÍLIOS PARTICULARES E MÉDIA DE MORADORES .....	79
5.2.1.3	RENDA DOMICILIAR .....	82
5.2.1.4	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIAL .....	86
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	90
6	MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO .....	91
6.1	INTRODUÇÃO.....	91
6.2	METODOLOGIA.....	91
6.2.1	MODELO HIDRODINÂMICO TELEMAT .....	92
6.2.1.1	O MODELO 3D.....	93
6.2.1.2	FRICÇÃO DE FUNDO .....	94
6.2.1.3	CISALHAMENTO DO VENTO .....	95
6.2.1.4	TERMOS DE FLUTUABILIDADE .....	96
6.2.1.5	TRANSPORTE DE TRAÇADORES.....	97
6.2.1.6	FRONTEIRAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	97
6.2.2	MODELO HIDRODINÂMICO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO .....	98
6.2.2.1	DADOS BATIMÉTRICOS E DOMÍNIO NUMÉRICO .....	98

6.2.2.2	CONDIÇÕES INICIAIS NOS CONTORNOS LÍQUIDOS.....	101
6.2.2.2.1	TEMPERATURA, SALINIDADE, VELOCIDADE DE CORRENTE E NÍVEL D'ÁGUA .....	101
6.2.2.2.2	MARÉ ASTRONÔMICA.....	103
6.2.2.2.3	VENTO E TEMPERATURA DO AR .....	103
6.2.2.2.4	VAZÃO FLUVIAL - RIO JOÃO GUALBERTO SOARES .....	104
6.2.2.3	CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA .....	104
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	109
6.3.1	CONDIÇÃO ATUAL NO NÍVEL DO MAR.....	118
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
7	DETERMINAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO À SUBIDA DO NÍVEL DO MAR .....	122
7.1	INTRODUÇÃO .....	122
7.2	METODOLOGIA .....	122
7.2.1	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM SIMULADOS.....	123
7.2.1.1	PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	124
7.2.2	SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA .....	126
7.3	RESULTADOS .....	128
7.3.1	CENÁRIOS DE ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR.....	128
7.3.2	SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA .....	138
7.4	DISCUSSÃO .....	142
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	148
8	APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE INTEGRADOR PARA A SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE DA LAGOA DA CONCEIÇÃO/ILHA DE SANTA CATARINA À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA (IVC) ...	149
8.1	INTRODUÇÃO .....	149
8.2	METODOLOGIA .....	149
8.2.1	VARIÁVEIS ESTRUTURAIS .....	151
8.2.1.1	GEOLOGIA.....	151
8.2.1.2	DECLIVIDADE DA COSTA.....	152
8.2.2	VARIÁVEL DE PROCESSO .....	153
8.2.2.1	ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE COSTEIRA.....	153
8.2.3	DESCRITORES SOCIOECONÔMICOS.....	154
8.2.3.1	COBERTURA DAS TERRAS/URBANIZAÇÃO .....	154
8.2.3.2	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIAL.....	154
8.2.4	CÁLCULO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA (IVC).....	155
8.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	158
8.3.1	CANAL DA BARRA DA LAGOA .....	158
8.3.2	SETOR SUL.....	161
8.3.3	SETOR CENTRAL .....	165
8.3.4	SETOR NORTE.....	169

8.3.5	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA .....	174
8.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	178
9	CONCLUSÃO .....	180
9.1	INTRODUÇÃO.....	180
9.2	CONCLUSÕES .....	180
9.3	LIMITAÇÕES .....	182
9.3.1	COTAS DE INUNDAÇÃO .....	182
9.3.2	ESCALAS DOS MAPEAMENTOS - VARIÁVEIS ESTRUTURASIS .....	182
9.4	RECOMENDAÇÃO .....	183
10	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	184

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão entre os assuntos mais discutidos no meio científico e imprensa em geral, devido aos riscos que podem representar à vida humana e aos meios de subsistência nas zonas costeiras de todo o mundo. As alterações climáticas podem ter impactos sobre muitas sociedades humanas e variar de região para região. Esses impactos incluem, entre outros (MICHAELOWA, 2001; DARWIN et al., 2001): a) Elevação do nível do mar, com consequente inundação; b) Derretimento de geleiras; c) Enchentes devido à mudança no padrão de precipitação; d) Secas; e) Mudanças na intensidade de tempestades.

Quase metade dos 6,7 bilhões de pessoas no mundo reside na zona costeira e próxima ao litoral, tornando-se vulnerável às tempestades e elevação do nível do mar (TITUS, 2009). Embora nem todas as zonas costeiras estejam habitadas, pode-se dizer que existem muitas cidades, de médio a grande porte, distribuídas nestas áreas ao longo de todo o planeta. Os gestores costeiros tendem a adotar uma visão de curto prazo em pesquisas sobre as alterações da zona costeira, não estando preparados para alterações de médio a longo prazo (PETHICK, 2001), caso dos possíveis impactos gerados pelas alterações no cenário climático.

Localmente a elevação do nível do mar local poderá ser diferente da média global devido a muitos fatores, incluindo: condições climáticas locais, características físicas dos ambientes costeiros locais, os ciclos de marés locais. IPCC (2014). Entretanto, de acordo com Sterr (2008) durante os últimos 100 anos, o nível global do mar subiu 1-2,5 mm/a, e baseado em dados do IPCC, estima-se que haverá uma subida no nível do mar da ordem de 21 a 86 cm até o ano de 2100, com uma melhor expectativa de 49 cm.

Em escala global, a avaliação da susceptibilidade costeira ao aumento do nível do mar pode servir de base para que as sociedades costeiras em geral entendam os riscos pelos quais possam passar, e em escala regional permitir identificar as peculiaridades que determinadas áreas têm (NICHOLLS e MIMURA, 1998). De acordo com o IPCC (2014) os impactos esperados em escala global poderão exceder a capacidade de adaptação de algumas regiões e nações costeiras. Já em escalas nacional e local a análise da susceptibilidade e vulnerabilidade das

costas é necessária para identificar determinadas áreas e setores que poderão ser impactados, a fim de refletir sobre as estratégias que deverão ser tomadas para lidar com os impactos negativos, tais como inundações e erosão.

A coleta de dados e a criação/definição de metodologias para análise destes impactos possibilitam identificar, caracterizar e avaliar a susceptibilidade e vulnerabilidade costeira frente aos impactos relacionados à mudança climática, além de testar métodos e metodologias. Isto permite o refinamento dos mesmos e a identificação dos que melhor se adéquam a determinadas áreas, possibilitando aos órgãos públicos responsáveis pelo planejamento e gestão replicar estas mesmas técnicas (ou ainda adaptá-las). Assim, é possível elaborar as estratégias mais adequadas para mitigar e prevenir os impactos causados pela elevação do nível do mar em sistemas costeiros com ou sem interferência antrópica (NICHOLLS e HOOZEMANS, 2000).

No Brasil, como discute Muehe (2010), existe uma variedade de formas costeiras ao longo do litoral, que irão ter uma resposta diferente a elevação do nível do mar. Ainda de acordo com Muehe (2010) a ocupação da zona costeira brasileira não é contínua, e os riscos estão concentrados nas áreas urbanas, sendo as inundações os maiores impactos esperados com a mudança climática. Através das características físicas e da ocupação das áreas adjacentes destas formas costeiras é possível identificar que existe graus diferentes de susceptibilidade e vulnerabilidade ao longo da zona costeira brasileira. Dentre estas formas estão os sistemas lagunares, localizados em áreas abrigadas, que possuem características hidrodinâmicas diferentes das áreas marinhas abertas.

## **1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA**

As zonas costeiras em todo mundo são reconhecidas por seus atrativos geomorfológicos e também por seu grande potencial socioeconômico. Estas áreas possuem recursos naturais que geram atrativos para o desenvolvimento de atividades portuárias ou formação de balneários lagunares e marinhos voltados ao turismo e veraneio. O aumento da demografia populacional e, conseqüentemente, a expansão de núcleos urbanos muitas vezes não respeita a dinâmica dos ecossistemas locais, modificando assim seu funcionamento.

Do ponto de vista científico existem grupos de pesquisa que desenvolveram metodologias para definição de diversos riscos costeiros, como erosão, inundação e derramamento de óleo, a fim de determinar um índice de vulnerabilidade costeira. Existem dois trabalhos pioneiros desenvolvidos por Gornitz e Kanciruk (1989) e Gornitz (1991) que desenvolveram um Índice de Vulnerabilidade Costeira para a costa dos Estados Unidos, índice também criado para o mesmo país com alterações propostas por Thieler e Hammar-Klose (1999). Estes trabalhos utilizaram variáveis estruturais dos ambientes costeiros marinhos abertos (geologia, geomorfologia, altimetria), assim como variáveis processos (maré astronômica, meteorológica, ondas). A partir das argumentações metodológicas destes autores outros trabalhos foram desenvolvidos em diversas zonas costeiras, como na Irlanda (CARTER, 1990), África do Sul (YAMADA et al., 1995), Canadá (SHAW et al., 1998), Grécia (DOUKAKIS, 2005), Índia (KUMAR e KUNTE, 2012), e Brasil (BOORI, 2010; BONETTI et al, 2013; MULER e BONETTI, 2014, BONETTI et al., 2015).

Na leitura dos trabalhos acima citados, assim como os que aplicam metodologia semelhante, destaca-se uma problemática bem evidente, a de determinar qual será a resposta da linha de costa marinha a elevação do nível do mar. O cálculo da variação da linha de costa é uma das principais variáveis processos, pois permite identificar trechos da linha de costa que estão em erosão, além de prever o seu comportamento no futuro, ao aplicar uma regressão linear. Além disso, estes estudos também têm no comportamento das ondas, principalmente a altura significativa, uma das variáveis processos em suas pesquisas. Em trabalhos mais recentes a inserção de novas variáveis, como dados socioeconômicos e de infraestrutura, estão sendo incorporadas as pesquisas.

Outra constatação nestes trabalhos é a de que todos tem em comum a zona costeira marinha aberta como área de estudo, que possui dinâmica diferente dos sistemas costeiros abrigados. Estudos sobre variação da linha de costa e altura significativa das ondas nestes sistemas, como os lagunares, não são usuais. Para estes sistemas costeiros é constatada a utilização de modelos numéricos para compreender o comportamento hidrodinâmico, os quais utilizam principalmente dados de maré astronômica, velocidade de corrente e

velocidade/direção dos ventos (CASTELÃO e MÖLLER, 2003; FERNANDES et al., 2007; MARQUES et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2015).

Bonetti e Woodroffe (*in press*) discutem que a seleção de variáveis, ou descritores, leva em consideração as suas representatividades a fim de sintetizar as características físicas e processos dinâmicos da costa. Para sistemas costeiros abertos a base conceitual e os modelos para definição de índices de vulnerabilidade já estão difundidos, mas para sistemas abrigados ainda é necessário preencher esta lacuna. Logo, é necessário analisar as características físicas e processos costeiros associados em sistemas abrigados, o que permitirá identificar quais serão as variáveis necessárias para criar um índice de susceptibilidade e vulnerabilidade costeira, assim como o melhor modelo.

Nas pesquisas com enfoque em mudanças climáticas estão sendo gerados cenários de oscilação positiva do nível do mar e sua influência em sistemas costeiros abrigados. Fortunato et al. (2013) utilizaram modelo numérico como metodologia para gerar cenários de elevação do nível do mar e seus efeitos em Ria de Aveiro (Portugal), assim como Oliveira (2013) para o sistema lagunar de Saquarema, no Brasil. Entretanto, ainda são poucos os estudos aplicando uma abordagem metodológica para definição de um Índice de Vulnerabilidade Costeira em sistemas costeiros abrigados, integrando variáveis estruturais, de processos e socioeconômicas.

Do ponto de vista de gestão é o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC) que visa orientar a utilização dos recursos na zona costeira, de forma a contribuir para elevar a qualidade de vida de sua população, e a proteção do seu patrimônio natural, histórico, étnico e cultural, foram definidas ferramentas para o planejamento e gestão da zona costeira brasileira. O Zoneamento Ecológico-Econômico Costeiro, o Sistema de Informações do Gerenciamento Costeiro e Marinho, o Sistema de Monitoramento e o Relatório de Qualidade Ambiental da Zona Costeira, o Plano de Ação Federal para a Zona Costeira e o Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima são essas ferramentas de apoio ao planejamento da zona costeira (DIEDERICHSEN et al., 2013).

Com isso, nas três esferas do poder público (federal, estadual e municipal) é possível monitorar e subsidiar informações pertinentes

para o planejamento da zona costeira, criando medidas corretivas para os locais que apresentam graves alterações ambientais, e preventivas para aqueles que ainda conservam certa característica natural da paisagem. Com a inserção do tema mudanças climáticas, soma-se aos estudos de curto prazo, conduzidos por órgãos gestores e de pesquisa, a necessidade de entender os efeitos do aquecimento global em médio e longo prazo na zona costeira. O processo de inundação da zona costeira é o maior impacto esperado com a mudança climática (MUEHE, 2010), que pode ser causado por subida do nível do mar, por aumento da intensidade de tempestades e elevação dos índices pluviométricos.

De acordo com a publicação “Auditorias de natureza operacional sobre políticas públicas e mudanças climáticas - Adaptação das zonas costeiras brasileiras” do Tribunal de Contas da União (TCU, 2009) alguns pontos foram constatados a partir de três questões levantadas: 1) o Governo Federal tem identificado as principais vulnerabilidades das zonas costeiras e os riscos potenciais decorrentes das mudanças climáticas em diferentes cenários? 2) o Governo Federal tem formulado ações em resposta aos possíveis impactos das mudanças climáticas nas zonas costeiras? e 3) como o Governo Federal se estruturou para implementar as políticas públicas definidas?

As respostas encontradas foram: 1) o país não possuía, até o momento, um estudo da vulnerabilidade da costa brasileira frente aos impactos decorrentes das mudanças climáticas em escala nacional; 2) os dados disponíveis no país são insuficientes para a construção de cenários de impactos nas zonas costeiras decorrentes das mudanças climáticas; 3) o Governo Federal não avaliou os impactos e riscos das mudanças climáticas nas zonas costeiras nos diferentes cenários; 4) o plano nacional de mudanças climáticas não estabelece ações e metas para a implementação de políticas públicas voltadas à adaptação de zonas costeiras, e 5) as ações nos diversos setores que podem ser afetados pelos impactos das mudanças climáticas nas zonas costeiras são incipientes.

Após esta publicação, Nicolodi e Petermann (2010) apresentaram um estudo que mostra, em escala nacional, o grau de vulnerabilidade da costa brasileira frente às mudanças climáticas. Este mapeamento foi possível com base em uma combinação de critérios ambientais, sociais e tecnológicos, definidos quando da publicação do

Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha por parte do Ministério do Meio Ambiente em 2008. Em Santa Catarina foram encontrados trechos que apresentam desde um grau baixo de vulnerabilidade até muito alto.

Entretanto, este estudo não levou em consideração o quão vulnerável, nem suscetível, a costa de Santa Catarina está frente aos cenários propostos pelo IPCC (2014) para níveis de elevação do nível do mar, como já destacado anteriormente. Ou seja, na análise em meso e microescala quantos quilômetros quadrados de costa iriam ser influenciados pela elevação do nível do mar? Iria ocorrer alteração da inundação destas zonas pela ação de eventos extremos somados a elevação do nível do mar? Quais áreas seriam inundadas? Qual o número de pessoas dentro desta zona de risco? Quais tipos de ambientes seriam modificados e/ou perdidos?

As respostas para estas e outras perguntas permitiriam a elaboração de planos mais específicos voltados para prevenir os efeitos causados pelas mudanças climáticas. De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2008) a resposta mais recomendável aos efeitos das mudanças climáticas é o estabelecimento de ações para o Gerenciamento Costeiro Integrado, que incluía:

- A condução de monitoramento ambiental permanente (longo prazo);
- A proposição de ordenamentos municipais para ocupação urbana;
- A efetivação de políticas estaduais de gerenciamento costeiro;
- O disciplinamento do uso dos solos;
- O direcionamento de esforços da ação federal;
- O planejamento prévio e a priorização de estudos para as formas clássicas de respostas (recoo, acomodação e proteção).

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo é determinar a Susceptibilidade Física e a Vulnerabilidade Social da Lagoa da Conceição à oscilação positiva do nível do mar, a fim de criar um o Índice de Vulnerabilidade

Costeira utilizando metodologia integrada de análise espacial em Sistemas de Informações Geográficas.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Mapear os tipos de cobertura das terras existentes na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, identificando e estimando as alterações que podem ocorrer a partir dos cenários de subida do nível do mar propostos pelo IPCC;
- b) Mapear, através de imagens de satélite e rotinas de geoprocessamento, as variações do nível lagunar em escala decadal;
- c) Criar, a partir de dados do Censo Demográfico do IBGE, um Índice de Vulnerabilidade Social para a Lagoa da Conceição estimando o grau de vulnerabilidade socioeconômica da população local;
- d) Caracterizar o comportamento hidrodinâmico da Lagoa da Conceição a partir da elaboração de um modelo numérico calibrado, a fim de estimar setorialmente o impacto dos cenários de oscilação positiva do nível do mar propostos pelo IPCC;
- e) Determinar a Susceptibilidade Física da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar, levando em consideração suas características hidrodinâmicas;
- f) Criar um Índice de Susceptibilidade e Vulnerabilidade Costeira que integre variáveis estruturais, de processo e parâmetros socioeconômicos.

### **1.3 PERGUNTAS NORTEADORAS E HIPÓTESE**

O desenvolvimento desta tese partiu da formulação de duas perguntas norteadoras, sendo elas:

a) A utilização de técnicas que envolvem modelagem numérica e espacial, tão difundidas e utilizadas para determinar a susceptibilidade/vulnerabilidade à oscilação positiva do nível do mar de costas marinha exposta, também pode ser aplicada aos sistemas lagunares, em específico para a Lagoa da Conceição?

b) Considerando a baixa disponibilidade de dados pré-existentes, e/ou de séries temporais curtas de nível do mar, é possível a proposição de um modelo que represente de modo eficiente à

susceptibilidade/vulnerabilidade à oscilação positiva do nível do mar para a Lagoa da Conceição?

A partir destas duas perguntas norteadoras, e levando em consideração as características da Lagoa da Conceição, foi formulada a seguinte hipótese:

- A Lagoa da Conceição, a partir das projeções de subida do nível do mar, terá seu nível lagunar aumentado na mesma proporção que o observado na região oceânica adjacente, e a avaliação da variabilidade local dos impactos decorrentes poderá ser efetuada a partir da aplicação de um modelo de análise espacial de susceptibilidade/vulnerabilidade.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi dividida em 8 capítulos, sendo o conteúdo apresentado da seguinte forma:

- A problemática da pesquisa e o referencial teórico e conceitual adotado, assim como as características da Lagoa da Conceição, são apresentados nos **capítulos 1 e 2**, que contextualizam o trabalho realizado;

- As investigações parciais realizadas no âmbito da tese, e que contemplam os objetivos específicos propostos, encontram-se distribuídas entre os **capítulos 3, 4 e 6**, sendo apresentadas de forma individualizada. Ao longo da tese a metodologia aplicada nas diferentes investigações é descrita em cada um dos capítulos;

- A vulnerabilidade da população da Lagoa da Conceição foi determinada no **capítulo 5**, sendo ali igualmente descritos os procedimentos específicos adotados e feita uma discussão relativa à representatividade dos dados selecionados;

- A determinação da susceptibilidade da Lagoa da Conceição a oscilação positiva do nível do mar, tendo como base a modelagem numérica presente no capítulo 6, será apresentada no **capítulo 7**, assim como os procedimentos específicos adotados e a discussão relativa à representatividade dos dados;

- O Índice de Susceptibilidade e Vulnerabilidade Costeira da Lagoa da Conceição a oscilação positiva do nível do mar, obtida pela integração dos dados de vulnerabilidade (**capítulo 5**) e susceptibilidade

(**capítulo 7**), além da aplicação de uma estratégia analítica específica, será apresentado no **capítulo 8**, assim como os procedimentos específicos adotados e discussões;

- O capítulo 9 apresenta as conclusões gerais da tese, fazendo um fechamento do trabalho.

## **1.5 ÁREA DE ESTUDO**

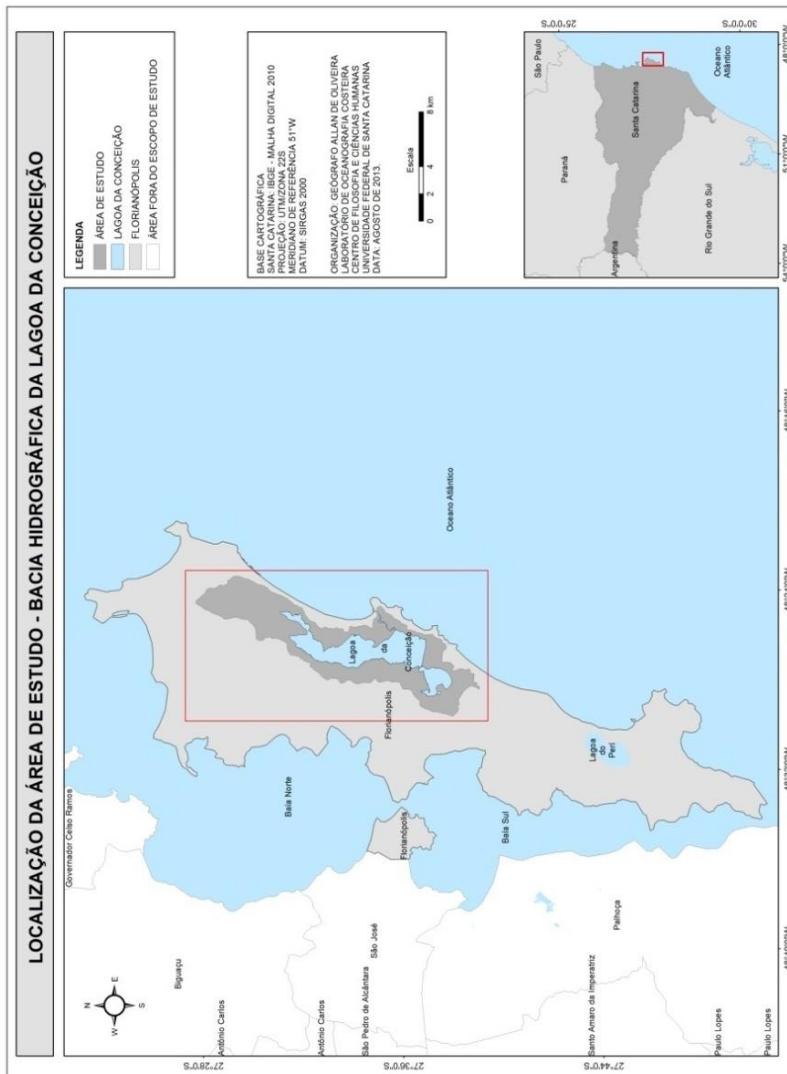
A seguir serão apresentadas algumas características fisiográficas e hidrodinâmicas da Lagoa da Conceição.

### **1.5.1 FISIOGRAFIA**

A Lagoa da Conceição, localizada na porção leste da Ilha de Santa Catarina, município de Florianópolis (SC), é o corpo d'água de maior superfície na ilha e situa-se entre os paralelos de 27°30' e 27°37' de Latitude Sul e entre os meridianos de 48°25' e 48°29' de Longitude Oeste (Fig. 1). Fisiograficamente é uma laguna por possuir ligação com o Oceano Atlântico através de um canal, o Canal da Barra da Lagoa, e por ser preenchida por águas mixohalinas. A laguna ocupa uma área de 20,65 km<sup>2</sup>, extensão de 13,5 km no sentido Norte-Sul, largura variável entre 0,15 e 2,5 km e profundidade média de 1,7m com máxima de 8,9m (BAUER NETO, 2007; GODOY, 2009). Sua forma alongada em paralelo à linha costeira é irregular e recortada por dunas e morros que formam três subsistemas popularmente conhecidos como Lagoa Central, do Norte e do Sul ou simplesmente Lagoa do Meio de Cima e de Baixo (MUEHE e CARUSO Jr, 1999).

A Lagoa da Conceição está inserida em uma bacia hidrográfica de 78,13 km<sup>2</sup>, com área terrestre de 57,33 km<sup>2</sup>, apresentando aproximadamente 35 córregos e dois canais de drenagem afluentes no corpo lagunar (BARBOSA, 2003). O principal aporte de água doce é o rio João Gualberto Soares, localizado para porção norte, e de acordo com Dutra (1991) possui a uma bacia de drenagem de 4 km<sup>2</sup>. Existem ainda, na borda Oeste, córregos que nascem no Embasamento Cristalino adjacente, como o rio Cachoeiras, porém estes com pequena vazão. Na parte Sul, segundo Odebrecht e Caruso Jr. (1999), ocorre aporte de água doce através de infiltração pelo subsolo, além do aporte de água marinha através do Canal da Barra da Lagoa.

Figura 1. Localização da área de estudo.



O Canal da Barra da Lagoa é um canal com aproximadamente 3 km de extensão e média de 20 a 40 m de largura. De acordo com Pereira (2004) ao longo do canal são encontrados seis meandros de diferentes extensões, ângulos e larguras até a praia da Barra da Lagoa. Os efeitos das marés no interior da lagoa são reduzidos devido à

característica morfológica do canal. Sua circulação foi intensificada a partir de 1982 com a retilinização, dragagem e construção dos molhes que fixaram o fluxo do canal, anteriormente obstruído em períodos de deposição de areia pelo mar em sua desembocadura (ANDRADE, 2001).

### **1.5.2 HIDRODINÂMICA LAGUNAR**

Um dos primeiros estudos sobre a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição foi realizado por Andrade (2001) que definiu o comportamento deste corpo lagunar em relação às marés. De acordo com o autor as marés possuem maior contribuição no setor central e menor no sul e norte, sendo que o vento é o principal responsável pelo escoamento e trocas de águas no interior da laguna. O Canal da Barra pode causar redução das marés astronômicas em até 95% e em 85% quando das marés meteorológicas, desde a desembocadura do canal até o início da laguna (ANDRADE e ROSMAN, 2004).

Estas reduções tendem a proporcionar variações de 0,05 m e 0,20 m no nível da laguna quando da atuação das marés astronômicas e meteorológicas, respectivamente. Logo, as maiores variações na laguna são observadas quando ocorrem marés meteorológicas. Além disso, as variações no interior da laguna ocorrem com atraso de 4 horas em relação à preamar na entrada do canal, e a entrada e saída d'água na laguna ocorre sem defasagem significativa entre os níveis em seu interior (ANDRADE, 2001).

Em outro estudo realizado por Koefender (2005), foi identificado que mudanças abruptas do perfil batimétrico exercem grande influência na circulação hidrodinâmica da laguna, principalmente o canal intralagunar e o canal da Barra da Lagoa. Isto ocorre devido à perda de energia por atrito nas áreas de menor profundidade, o que gera conseqüentemente maiores velocidades de fluxo.

De acordo com Rocha (2007), pela característica alongada da laguna e a posição do Canal da Barra da Lagoa, ocorre dificuldade na troca d'água nas extremidades da Lagoa da Conceição. Entretanto, o rio João Gualberto Soares é o responsável pela manutenção da qualidade da água no setor norte, ou seja, possui influência na circulação hidrodinâmica, diferente do setor sul que não possui cursos d'água com capacidade para renovação das águas e, conseqüentemente, maior circulação d'água no seu interior.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 LAGOAS COSTEIRAS E BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Lagunas costeiras são corpos d'água orientados paralelamente à linha de costa, separados do oceano por uma barreira, conectado a ele por um ou mais canais de características intermitentes ou não, além de apresentar baixas cotas batimétricas (KJERFVE, 1994). Quando estas lagoas possuem ligação(ões) permanente(s) com o oceano pode ocorrer forte influência de águas salinas, e a mistura destas com as provenientes do escoamento superficial continental formam um ambiente mixohalino, que pode ser considerado um estuário do ponto de vista hidrodinâmico (BIRD, 1994).

Cameron e Pritchard (1963 apud VALLE-LEVINSON, 2010) definem estuário como um corpo d'água semifechado, com comunicação para o oceano, no qual as águas oceânicas são diluídas pela água doce proveniente do continente. Ainda de acordo com os autores a água continental ao entrar em uma baía semifechada estabelece gradientes de densidade longitudinais, que deslocam, em longo prazo pela superfície, a água doce em direção ao oceano e a água marinha por baixo em direção ao continente.

Knoppers e Kjerfve (1999) discutem que a maior parte das lagunas brasileiras está localizada ao longo de 3000 km de costa, em trechos com maré inferior a 1 m (micromaré), desde o delta do Parnaíba do Sul até a as proximidades da fronteira com o Uruguai. Estas lagoas ocorrem nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sobre terrenos quaternários e graníticos, de acordo com Diegues et al. (1992 apud KNOPPERS e KJERFVE, 1999).

Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul possuem juntos mais de 60 lagoas costeiras, a maioria sendo caracterizada como sistemas de pequena dimensão, caso da Lagoa da Conceição em Santa Catarina e lagoas Tramandaí e do Peixe no Rio Grande do Sul. Entretanto, existe um grande sistema lagunar no Rio Grande do Sul, o Patos-Mirim, sendo a Lagoa dos Patos a maior sistema lagunar do mundo (Knoppers e Kjerfve, 1999).

Os sistemas lagunares brasileiros foram formados como resultado das elevações do nível do mar que ocorreram durante o Quaternário, destacando-se a de 123.000 A.P e a transgressão de 5.100

A.P. (KNOPPERS e KJERFVE, 1999). A primeira equivale ao Pleistoceno Superior, em que o nível do mar chegou a  $8\pm 2$ m acima do nível atual, e a segunda ao Holoceno, com 5m em média acima do nível atual. Os processos marinhos durante a subida do nível do mar retrabalharam os sedimentos disponíveis na plataforma continental formando sistemas do tipo laguna-barreira, e com o recuo do nível do mar as lagoas foram formadas.

As principais forçantes que regulam um sistema lagunar são as descargas de águas continentais, a tensão de cisalhamento do vento e as marés astronômicas e meteorológicas. Kjerfve (1986 apud KJERFVE, 1994) divide lagunas em três tipos geomorfológicos de acordo com as trocas de água com o oceano: lagunas sufocadas, lagunas restritas e lagunas vazadas.

Lagunas Sufocadas (*Choked Lagoons*) possuem uma série de células elípticas que se conectam e a ligação deste corpo d'água com o oceano ocorre por um único canal. São típicas de ambientes costeiros com alta energia de ondas e acentuada corrente litorânea. Nestas lagunas os efeitos da maré astronômica são fortemente reduzidos quando comparado a região adjacente (95%). Logo, a força dominante é a do vento e eventos de estratificação intermitentes são observados devido à radiação solar e escoamento superficial do continente para a laguna.

As Lagunas Restritas (*Restricted Lagoons*) são corpos d'água de grandes dimensões, paralelos à costa, com dois ou mais canais de ligação com o oceano. Assim como as lagunas estranguladas estes corpos d'água são influenciados pela ação dos ventos, porém se diferem quanto à circulação por ação da maré, que é muito bem definida. Esta maior interação com o oceano através da maré permite a formação de um ambiente verticalmente bem misturado.

Lagunas Vazadas (*Leaky Lagoons*) são corpos d'água alongados paralelos à costa e diversos canais de ligação com o oceano. Esta característica permite que as correntes de maré se sobreponham à ação das ondas e deriva litorânea, superando então a tendência de fechamento dos canais. Além disso, esta troca mais acentuada e longa entre continente e oceano resulta em valores de salinidade próximas às do oceano, situação oposta à das lagunas sufocadas.

Através do tipo de laguna, da característica da bacia hidrográfica e do clima é possível estimar o processo de circulação, dispersão e estratificação dominante de um ambiente lagunar. De acordo com Kjerfve e Magill (1989) o fluxo de água misturando e transportando material ocorrerá como resultado das marés, do escoamento superficial, do clima, episódios de tempestade, ondas geradas por vento, gradientes de densidade, oscilações do nível do mar e mudanças no balanço precipitação/evaporação.

A dinâmica de uma laguna costeira com uma bacia hidrográfica pequena é muito diferente, quando comparada a um sistema lagunar localizado em área sob influência de uma grande bacia hidrográfica. Primeiramente a área de drenagem continental e o número de rios perenes permite identificar o quanto de fluxo de escoamento superficial tende a influenciar a circulação lagunar, permitindo as trocas com o oceano. Algumas lagoas, como a Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul, uma das maiores do mundo, recebe uma descarga muito grande dos rios deste mesmo estado, e alguns com alto valor de vazão média (ex. rio Jacuí com 710 km de extensão e vazão média de 1900 m<sup>3</sup>/s).

## **2.2 FLUTUAÇÕES DO NÍVEL DO MAR POR MUDANÇA CLIMÁTICA**

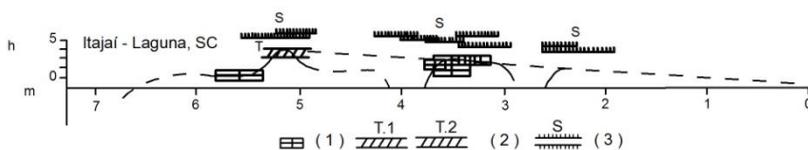
A elevação do nível do mar global é determinada pelo equilíbrio dinâmico entre a massa de gelo e a massa de água em bacias oceânicas, ambas influenciadas pela temperatura atmosférica da Terra. Durante os últimos 800 mil anos, o nível global do mar tem subido e descido em resposta ao acúmulo e derretimento alternados das grandes camadas de gelo continental (WILLIAMS et al., 2009). Entretanto, na última Era Glacial há cerca de 18.000 anos, o mar recuou abaixo dos 120 m em comparação ao nível atual, em consequência do aumento do volume das geleiras, devido à diminuição da temperatura média global (OESCHGER e MINTZER, 1992).

De acordo com dados geológicos, a ascensão mais rápida do nível do mar em escala global ocorreu entre 15.000 e 6.000 anos antes da nossa Era, na taxa média aproximada de 10mm/ano (WILLIAMS et al., 2009). Ainda de acordo com estes dados, a ascensão eustática do nível do mar, que corresponde a uma variação do volume dos oceanos, ocorreu nos intervalos médios de 0,1 a 0,2mm/ano durante os últimos 3.000 anos. No Brasil, reconstruções de antigas posições do nível

relativo do mar, acompanhadas de mais de 700 datações por radiocarbono ao longo do seu litoral, permitiram identificar as flutuações do nível relativo do mar nos últimos 7.000 anos, associadas a modificações climáticas no decorrer do Quaternário (SUGUIO et al., 1985).

De acordo com Suguio et al. (1985) a linha de costa no Brasil foi submetida à transgressão até cerca de 5.150 anos A.P., seguido de regressão. Martin, Suguio e Flexor (1986) mostraram que há 5.600 A.P. o mar em Santa Catarina estava em ascensão e situava-se cerca de 1 m acima do atual e a 5.100 A.P. chegou ao seu primeiro máximo no Holoceno (3.5m). Até a atualidade o mar teria subido novamente mais duas vezes, uma em 3.600 anos A.P. ( $2.5\pm 0.5$  m) e outra a cerca de 2.500 anos A.P. ( $2.0\pm 0.5$  m), e na Ilha de Santa Catarina há cerca de 3.620 anos o nível relativo do mar situava-se aproximadamente 2,6 m acima do atual (Fig. 2).

Figura 2. Curvas de variação do nível relativo do mar entre Itajaí e Laguna, Santa Catarina, durante os últimos 7.000 anos (1 - reconstrução de níveis marinhos pretéritos; 2 - terraços de construção marinha; e 3 - idades de sambaquis).



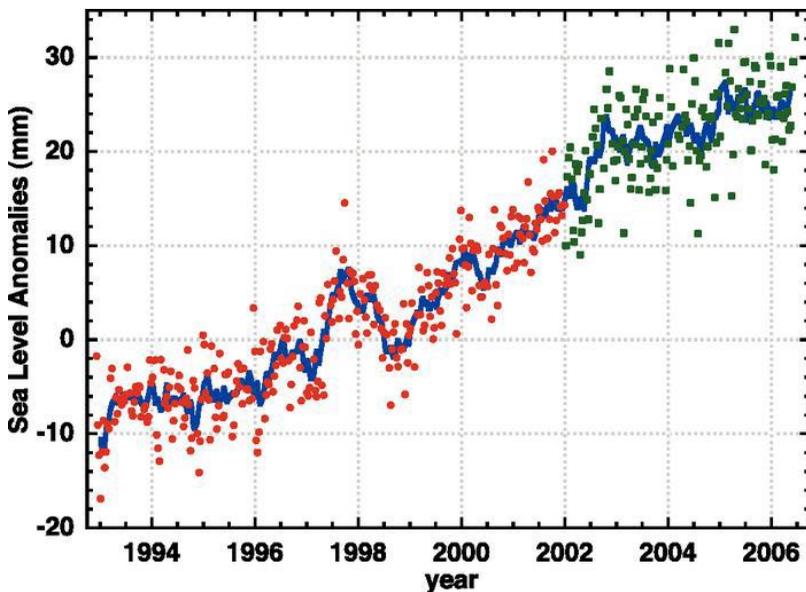
Fonte: Martin, Suguio e Flexor (1986).

A partir do último século, baseado em dados de marégrafo, constatou-se que o Nível Médio do Mar (NMM) está aumentando em todo mundo, na ordem de 1,0 a 2,0mm/ano, sendo constatado que esta taxa de ascensão foi mais elevada no século XX do que no XIX. Dados altimétricos disponibilizados pelos satélites TOPEX/POSEIDON e Jason entre as latitudes 65° N e S registrados desde 1992 também permitiram identificar este aumento, como mostra a figura 3 (NEREM e MITCHUM, 2001 apud IPCC, 2007). Junto a esta elevação Barnett et al., (2005) e Gille (2002) observaram que a temperatura dos oceanos está em ascensão em profundidades de até 3000 m. Este aquecimento pode levar tanto à maior estratificação do oceano, causando um enfraquecimento na circulação termohalina global, assim como na expansão térmica da água dos mares, contribuindo para a elevação do

nível destes, que também se deve ao derretimento de geleiras, calotas e camadas de gelo (HEGERL e BINDOFF, 2005; IPCC, 2007).

Devido às alterações observadas na climatologia mundial, em 1988 foi criado o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) a fim de permitir uma melhor compreensão dos aspectos referentes às mudanças climáticas, incluindo a observação de evidências e a previsão de cenários, com proposição de alternativas para mitigação dos efeitos impostos, esforço este da UNEP (*United Nations Environment Programme*) e WMO (*World Meteorological Organization*). Em 2014, após a realização do *Working Group I*, a publicação do relatório de previsões indicou que haverá aumento na temperatura global entre 0,3° e 4,8°C até 2100, usando como base dados entre 1986-2005 (IPCC, 2014).

Figura 3. Variações no NM médio global a partir de dados altimétricos de satélites computados de 1993 a 2005 entre as latitudes 65°N e S. Os pontos são estimativas para 10 dias (vermelho – TOPEX/Poseidon; verde – Jason). A linha azul corresponde a uma suavização.



(Fonte: IPCC, 2007).

De acordo com o IPCC (2014) o nível médio global do mar subiu 0,17-0,21 m entre 1901 a 2010. Já as projeções até 2100 mostram que

ocorrerá uma oscilação positiva do nível médio do mar entre 0,26-0,55 m (cenário otimista) e de 0,45-0,82 m (cenário pessimista) (Church et al., 2013). Entretanto, é importante ressaltar que o aumento do nível do mar não deverá ser uniforme para todas as áreas, mas, de acordo com Relatório de Avaliação do IPCC, cerca de 70% das áreas litorâneas do mundo estão propensas a passar por uma mudança do nível do mar dentro de  $\pm 20\%$  da média global.

Os impactos que a elevação do nível do mar pode causar serão diferentes ao longo de todas as zonas costeiras, pois estas possuem características geomorfodinâmicas específicas que influenciarão na resposta da costa à subida do mar. Nicholls (1995) publicou uma síntese de todos os estudos sobre este tema e constatou que, até aquela data, 22 países estavam agregando esforços para analisar os efeitos da elevação do NMM nas suas zonas costeiras. Além disso, o mesmo autor estimou que cerca de 180 milhões de pessoas serão afetadas por este fenômeno, além da perda de 150.000 Km<sup>2</sup> de terra emersa.

A partir da identificação em escala nacional dos trechos costeiros que poderão ser mais influenciados pela subida do mar, pesquisas em escala local começaram a ser realizadas. Entretanto, até então o Brasil havia realizado seus estudos apenas em escala nacional (MUEHE e NEVES, 1994, NEVES e MUEHE, 1994). De acordo com Nicholls (1995) dos sete passos para a avaliação da vulnerabilidade das zonas costeiras a elevação do nível do mar estipulados pela *Coastal Zone Management Subgroup* (CZMS, 1991) apenas o primeiro, que compreende a delimitação da área de estudo e as especificações de avaliação do aumento do nível do mar e mudanças climáticas, haviam sido realizados no Brasil.

Na última década este cenário foi modificado com diversos trabalhos sendo realizados em escala regional e local, envolvendo basicamente modelagem matemática e espacial, sendo alguns deles: avaliação dos efeitos da elevação do nível do mar em setores morfodinamicamente diferentes ao longo da costa do Rio Grande do Sul, com base no princípio da morfodinâmica de evolução costeira (FIGUEIREDO, 2011); análise dos impactos e vulnerabilidades decorrentes das inundações provocadas pela sobrelevação do nível médio do mar no município de Vitória (NALI, 2011); efeitos da subida

do NM no canal de São Francisco na Baía de Sepetiba/RJ (SANTOS, 2012).

No Brasil, em 50 anos observou-se a tendência de aumento do nível do mar da ordem de 4 mm/ano (MESQUITA, 2000). Para Neves e Muehe (1994) quando comparamos o Brasil a outros países com características costeiras similares, constata-se a pouca importância dada às observações do NMM no país. Mesmo com a existência uma rede de instituições realizando medições sistemáticas, apenas 20% das informações disponíveis haviam sido coletadas há menos de 15 anos e cerca de 75% dos registros possuíam duração inferior a 40 dias (NEVES E MUEHE, 1994).

Na maioria dos estudos que analisam os prováveis impactos que o aumento do nível do mar pode causar para as zonas costeiras são apontados a ampliação da erosão praial (DWARAKISH et al., 2009), o risco de branqueamento e mortalidade de corais, os impactos negativos sobre manguezais e áreas úmidas costeiras (SZLAFSZTEIN, 2005), aumento no risco de inundação de áreas de cotas mais baixas (MINURA, 1999; TAGLIANI et al. 2010), afetando, sobretudo, os deltas dos rios (ALPAR, 2009) e as áreas urbanas costeiras (SALES JR., 2009).

Entretanto, estudos com enfoque na resposta dos contornos dos ambientes lagunares à elevação do nível do mar ainda são restritos. A maior parte dos trabalhos foca nos efeitos biológicos de uma possível alteração, tanto para os organismos bentônicos como para a vegetação aquática submersa e/ou marginal. As lagunas possuem risco potencial para inundação devido à elevação do nível do mar e quando há alteração da densidade e intensidade das tempestades, devido à baixa topografia e altitude destes ambientes, este risco se torna ainda maior. Segundo Calliari et al. (1996), sistemas meteorológicos, como ciclones extratropicais de alta intensidade, transferem energia para o mar gerando ondas de alta energia que podem causar perda considerável de suprimento sedimentar (erosão) além de inundação.

De acordo com Gan (1992) o número de ciclones extratropicais que cruzam os Andes em direção à Região Sul do Brasil é maior durante o inverno (8), seguido do outono (6), primavera (4) e verão (3), sendo importantes na intensificação dos vórtices ciclônicos do Atlântico Sul. Gan e Rao (1991) identificaram duas regiões ciclogênicas no Hemisfério Sul, uma na Argentina (42,5°S e 62,5°W) relacionada à

instabilidade baroclínica dos ventos de oeste e outra sobre o Uruguai (em torno de 31,5°S e 55°W) associada à instabilidade baroclínica devido à presença dos Andes. Reboita et al. (2005) por sua vez identificaram uma terceira região de ciclogênese na costa sul e sudeste do Brasil (entre 20° e 35°S).

Estes eventos extremos são os principais causadores de mudanças na zona costeira, principalmente aquelas que estão expostas à ação de ondas. As ondas que chegam até a costa são formadas no meio dos oceanos por ação de ventos, em certo intervalo de duração e ao longo de determinada extensão (pista de vento). Mudanças no regime de ventos, como aumento no número de ciclones extratropicais ou aumento de intensidade dos ventos, certamente trarão mudanças no clima de ondas. Como consequência, ocorrerá mudança no transporte de sedimentos e, por conseguinte, modificação na morfologia das praias, no padrão de circulação em ambientes lagunares, além de produzir esforços sobre estruturas costeiras.

### **2.3 SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE COSTEIRA**

Mecanismos de busca no Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), que reúne e disponibiliza um acervo de mais de 35 mil títulos com texto completo, localizaram em 2012, ao todo, 49 e 79 artigos com os termos exatos de ‘susceptibilidade costeira – *coastal susceptibility*’ e ‘vulnerabilidade costeira – *coastal vulnerability*’, respectivamente. Entre os tópicos discutidos nestes artigos estão mudanças na temperatura global, ecossistemas, adaptação, aquecimento global, biodiversidade, resiliência, gases do efeito estufa, agricultura, gerenciamento ambiental, conservação da vida selvagem, capacidade de adaptação, adaptação às mudanças climáticas, mitigação, saúde pública e conservação. Entre estas publicações os termos “susceptibilidade” e “vulnerabilidade” muitas vezes se confundem, e termos como “perigo” e “risco” também são corriqueiros gerando dificuldade para compreender o significado que a autor está conferindo à terminologia.

De forma geral, a partir das características locais existentes para cada área costeira, grande parte dos trabalhos utiliza a terminologia vulnerável à elevação do nível do mar. De acordo com as Nações Unidas (ISDR, 2002) “vulnerabilidade reflete o estado das condições físicas, socioeconômicas e ambientais, individuais ou coletivas, as quais

são continuamente influenciadas por atitudes, comportamentos culturais, socioeconômicos e política no contexto individual, familiar, comunitário e nação”.

Vários trabalhos utilizam o termo vulnerabilidade para mostrar como a zona costeira pode sofrer impacto frente à elevação do nível do mar. Klein e Nicholls (1999), por exemplo, elaboraram uma proposta para definir a vulnerabilidade costeira à elevação do nível do mar, separando o que é vulnerabilidade natural da socioeconômica. Para os autores isso é necessário, pois para entender a vulnerabilidade socioeconômica deve-se primeiro conhecer a vulnerabilidade do sistema natural, que pode ser dividida em três propriedades: Susceptibilidade – que mostra o potencial de ser afetado pelo fenômeno em questão; Resistência – a habilidade de resistir ao impacto do fenômeno em questão; e Resiliência – a velocidade de recuperação após o impacto do fenômeno em questão.

Para Gallerine et al. (2002) a vulnerabilidade estaria ligada à susceptibilidade e aos perigos da zona costeira em sucumbir e/ou resistir a fenômenos gerados pela elevação do nível do mar. Sendo assim, além de falar em vulnerabilidade cabe destacar o termo risco, que está associado a algo que pode ou não ocorrer (probabilidade), mas ao se cogitar presume-se a existência da valoração de algum bem, seja ele material ou imaterial. Quando se transpõe este pensamento para a zona costeira, fica evidente que a possibilidade de perda pode ser desdobrada em vários aspectos, seja para uma área teoricamente sem e outra com interferência antrópica, neste último caso as cidades, ou simplesmente centros urbanos.

Assim como Gallerine et al. (2002) o terceiro relatório do *International Panel of Climate Change* (IPCC, 2001, p.995) também define vulnerabilidade a partir da noção de susceptibilidade, ao descrevê-la como sendo “*A susceptibilidade de um sistema ou o grau de incapacidade para lidar com os efeitos adversos da mudança climática, incluindo variabilidade climática e extremos. Vulnerabilidade é função da característica, magnitude e taxa de variação climática ao qual um sistema está exposto, sua sensibilidade, e sua capacidade adaptativa*”. Para o Dicionário Aurélio suscetível é algo “*capaz de receber, de experimentar, de sofrer impressões, modificações*”.

Egler (2005) discute que para gerar um índice de vulnerabilidade onde aspectos físicos e socioeconômicos serão utilizados é necessário unir um grande número de variáveis e indicadores. A captura destas informações deve ser capaz de monitorar as interações que se processam em distintos períodos de tempo (curto, médio e longo prazo), além de levar em consideração que os processos físicos e sociais se processam de forma diferente no tempo-espço. Ou seja, a análise de risco que determina a vulnerabilidade é dinâmica, pois leva em consideração aspectos naturais e humanos. Logo, Egler et al. (2005) utilizam os termos vulnerabilidade física e socioeconômica das costas, em que a primeira se combinaria com a fragilidade, resistência e susceptibilidade de determinado ambiente aos perigos e à distribuição espacial da ocupação humana para determinar o risco. Esta abordagem está baseada nas dificuldades de uma integração entre os aspectos físicos e socioeconômicos.

Considerando o exposto, este trabalho utilizará as terminologias susceptibilidade e vulnerabilidade a partir de dois enfoques, a fim de possibilitar um melhor direcionamento para a pesquisa: a primeira estará relacionada ao risco natural, ou comportamento morfodinâmico do sistema (CASTRO et al., 2005) que a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição terá caso a oscilação positiva do nível do mar seja confirmada (susceptibilidade física), e a segunda relacionada ao risco social, ou à condição de vida da população (CASTRO et al., 2005), que os centros urbanos da bacia hidrográfica terão caso a susceptibilidade física seja confirmada (vulnerabilidade social).

### **3 MAPEAMENTO DA COBERTURA DAS TERRAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO.**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

A análise da dinâmica da cobertura e uso das terras está em crescente desenvolvimento devido à necessidade de planejar e gerenciar os recursos existentes na superfície terrestre. Esta necessidade ocorre por analisarmos diariamente se a paisagem próxima a nós está sendo modificada tanto espacial como temporalmente, tendo como foco, na maioria das vezes, a ação do homem.

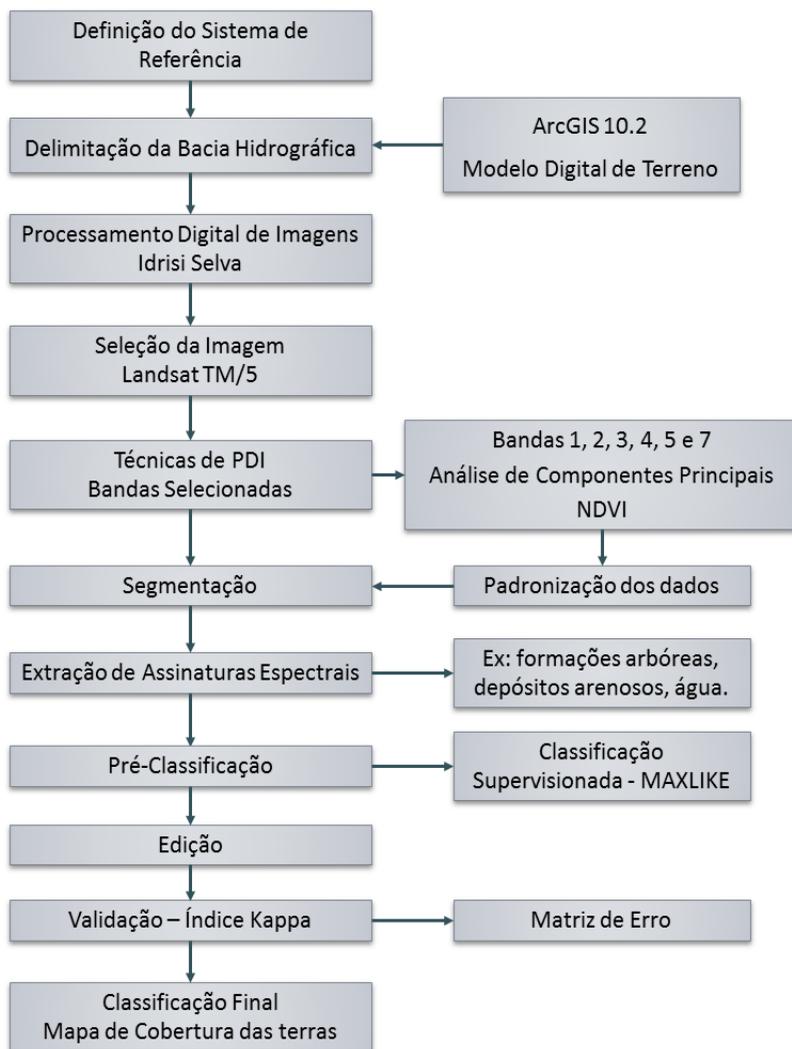
Em sistemas costeiros abrigados podem existir diversas unidades ambientais ao longo das margens lagunares, e também nas áreas mais planas. Oscilações positivas do nível do mar e a resposta do sistema a estas variações podem causar inundação nestas unidades. Logo, mapear as coberturas das terras permite definir em cenários de elevação do nível do mar quais áreas poderão ser atingidas, e assim determinar o grau de susceptibilidade/vulnerabilidade das margens lagunares ou até a perda ambiental.

A utilização de produtos derivados de Sensoriamento Remoto, assim como técnicas de Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas (SIG), são eficazes no fornecimento de informações necessárias para o mapeamento destas unidades (SANTOS, 2006). Neste sentido este capítulo propõe mapear a cobertura das terras na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição/Florianópolis através de imagens TM/Landsat 5.

#### **3.2 METODOLOGIA**

A seguir serão descritas as etapas para determinação do sistema de referência espacial utilizado, delimitação da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição e o mapeamento da cobertura das terras. A figura 4 mostra o fluxograma metodológico com as etapas realizadas para mapear a cobertura das terras.

Figura 4. Fluxograma com as etapas para elaboração do mapeamento de cobertura das terras da BHLC.



(Fonte: autor).

### 3.2.1 SISTEMA DE REFERÊNCIA ESPACIAL

A manipulação de dados espaciais tanto em ambiente SIG como em modelos numéricos só é possível quando há definição de um sistema de referência espacial. Este sistema possui basicamente um

sistema de coordenadas, projetado ou não, que define o datum e a unidade do mapeamento. Quando não projetado o sistema é denominado Sistema de Coordenadas Geográficas, já quando é projetado é denominado de Sistema de Coordenadas Projetadas, sendo a Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) a mais conhecida.

Neste trabalho foi adotada a utilização do Sistema de Coordenadas Projetadas, por permitir dentro do ambiente SIG procedimentos matemáticos como cálculo de distâncias e de área. Em relação ao datum, devido ao modelo numérico e a fonte dos dados utilizados, foi necessário escolher um datum geocêntrico global, e não um datum específico do Brasil. Por isso, o escolhido neste trabalho foi o WGS 1984 (Sistema Geodésico Mundial).

Entretanto, por meio do decreto Nº 5334/2005, assinado em 06/01/2005 e publicado em 07/01/2005 no Diário Oficial da União, foi dada nova redação ao artigo 21 do Decreto Nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Com esta nova redação ficou definido que o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) deve ser o único sistema geodésico de referência (datum) oficialmente adotado no Brasil.

Tanto o datum WGS1984 como o SIRGAS2000 são geocêntricos, ou seja, que definem as coordenadas de objetos da superfície terrestre através da massa central da Terra, além de terem elipsóides considerados idênticos. Deslocamentos de coordenadas de um mesmo ponto nestes dois sistemas de referência são considerados desprezíveis, e eventuais transformações de um datum para o outro nos resultados encontrados neste trabalho não tendem a causar alterações significantes. Logo, todos os resultados gerados em WGS1984 passaram por transformação de datum, passando para o SIRGAS2000.

### **3.2.2 DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA**

De acordo com Cunha e Guerra (2000) a bacia hidrográfica é o elemento básico para a análise ambiental, logo sua delimitação espacial é fundamental. Para isso, fez-se uso do programa ArcGIS 10.2, aplicativo ArcMap, através das funções de análises hidrológicas (*Spatial Analyst/Hidrology Tools*). As ferramentas hidrológicas do ArcGIS 10.2 permitem modelar o fluxo de água utilizando um Modelo Digital de

Terreno (MDT), e assim delimitar a bacia hidrográfica. A seguir são listadas as funções que estão dentro das ferramentas de Hidrologia utilizadas neste trabalho:

- a) *Fill*: preencher a superfície do *raster* removendo pequenas imperfeições;
- b) *Flow Direction*: avaliação de direção de fluxo;
- c) *Flow Accumulation*: cálculo do fluxo acumulado;
- d) *Watershed*: delimitação da bacia;
- e) *Raster to Features*: transformação para polígono.

Para gerar o MDT foram utilizadas curvas de nível de 1 em 1 m disponibilizadas pelo Instituto de Planejamento Urbano da Prefeitura de Florianópolis/SC (IPUF). A transformação de curvas de nível em uma matriz altimétrica, ou MDT, foi realizada utilizando o programa ArcGIS 10.1, aplicativo ArcMap, através da função *Topo to Raster (Spatial Analyst/Interpolation)*.

*Topo to Raster* é um método de interpolação que pode utilizar pontos cotados, curvas de nível e dados de polígonos (lagos, por exemplo), projetado especificamente para a criação de modelos digitais de elevação hidrograficamente consistentes, desenvolvido por Hutchinson (1988) no programa ANUDEM. A resolução espacial do MDT depende das fontes de dados e do objetivo proposto, sendo neste trabalho adotada a resolução de 5x5 m.

### **3.2.3 MAPEAMENTO DA COBERTURA DAS TERRAS**

Antes de descrever as etapas realizadas para o mapeamento da cobertura das terras é necessário definir o que é cobertura das terras. Cobertura das terras pode ser considerada a vegetação (natural ou plantada), água, rochas, areias, construções antrópicas (núcleos urbanos) que ocorrem na superfície da Terra. Ou seja, cobertura das terras é determinada diretamente pela observação da superfície terrestre (FISHER et al, 2005). Esta definição é necessária, pois existe o mapeamento de usos das terras, que se baseia na identificação das operações realizadas pelo homem na cobertura das terras, com a intensão de obter produtos e/ou benefícios através dos recursos terrestres.

Por mais que exista uma ligação entre cobertura e usos das terras, os mapeamentos realizados nestas duas perspectivas terão características diferentes. Fisher et al. (2005) mencionam que vem crescendo esta confusão nos conceitos de cobertura das terras e uso das terras. O mapeamento de usos é identificado como áreas de pastagem, agricultura, desenvolvimento urbano e áreas de extração de madeira. Já no mapeamento de cobertura são identificadas áreas com florestas, zonas úmidas, formações herbáceas e áreas urbanas. Isto, entretanto, não impede a compreensão de que os usos das terras alteram as coberturas, e mudanças na cobertura afetam os usos das terras (RIEBSAME et al., 1994).

Em estudos que utilizam dados de sensoriamento remoto para mapeamento é comum observar interligação entre estes termos, assim como se fossem sinônimos. Por exemplo, uma área urbana formada por concreto (cobertura) pode ter uma utilização residencial e comercial (usos). Em casos como este, onde há uma correspondência relacional direta entre o uso e cobertura das terras, os dois conceitos são essencialmente idênticos. No entanto, esta relação direta nem sempre existe. Por esta razão, distinguir uso de cobertura é necessário, pois permite caracterizar/diferenciar de forma mais correta o que são atributos da dinâmica terrestre e aqueles relacionados à utilização das coberturas (usos antrópicos).

Brown e Duh (2004) discutem a dificuldade em se desenvolver um modelo automatizado que permita traduzir sobre mapeamentos de cobertura das terras os usos que lhes são impostos. Isto ocorre, pois as técnicas de processamento digital de imagens em sensoriamento remoto (classificações supervisionadas e não supervisionadas), aliadas as técnicas de interpretação visual de alvos, não permitem mapear os usos. A etapa de identificação dos usos é realizada posteriormente, através de pesquisas de campo e análise de outras bases de informações (censo agropecuário, planos ambientais, diagnósticos ambientais).

Para o processamento digital da imagem (PDI), a fim de realizar o mapeamento de cobertura das terras, foi utilizado o programa Idrisi Selva® e imagens de satélite do sistema orbital TM/Landsat 5 com órbita 220 e ponto 79, de 02/08/2011 e 0% de cobertura de nuvens sobre a área de estudo. A imagem foi adquirida no site da *U.S. Geological Survey (USGS Global Visualization – <http://glovis.usgs.gov>)*. O

procedimento utilizado seguiu as seguintes etapas: Recorte, Análise de Componentes Principais, Índice de Vegetação NDVI, Padronização dos Dados, Segmentação, Extração de Assinatura, Pré-Classificação, Edição, Validação da Classificação (Índice Kappa) e Classificação Final, que serão descritas a seguir:

a) Recorte: como a imagem já possui correção geométrica (correção Level 1 Terrain - L1T - e ortorretificadas com exatidão superior a 0,8 pixel), foi realizado o recorte da imagem a fim de selecionar apenas a área de interesse deste estudo. Todas as imagens estão com sistema de coordenadas projetadas (Universal Transversa de Mercator - UTM) e datum WGS-1984.

b) Análise de Componentes Principais (ACP): O módulo ACP realiza uma análise de componentes principais para um conjunto de bandas de imagem, fornecendo as duas transformações diretas e inversas. Esta técnica é frequentemente utilizada para a compressão de dados, sendo útil para a compreensão dos dados e a análise de série de dados temporais. Foram utilizadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, calculando diretamente as covariâncias a partir de variáveis não padronizadas.

De acordo com Crosta (1992) a ACP é uma das funções mais poderosa de processamento de imagens. Em PDI a principal função da ACP é determinar a correlação existente entre as bandas espectrais e remover a correlação existente entre as bandas, utilizando uma transformação matemática. A partir do conjunto de imagens de entrada selecionadas neste trabalho (seis bandas espectrais), foi gerado outro conjunto de seis imagens de saída com nenhuma correlação entre si (como são seis bandas são geradas seis componentes principais).

O primeiro conjunto de saída é a primeira componente principal ou CP1, o segundo conjunto a CP2, o terceiro, de CP3, e assim por diante. Na primeira componente principal ou CP1 consta a informação que é comum a todas as bandas originais. Na CP2 consta a feição espectral mais significativa do conjunto. Nas CPs seguintes constam feições espectrais cada vez menos significantes, até a última CP, que possui a informação que sobrar, ou seja, a menos significativa. A ACP não causa perda de informação, mas sim auxilia na identificação dos

aspectos que são mais relevantes no conjunto de dados ou bandas (GUPTA et al., 2013).

c) Índice de Vegetação NDVI: o Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) consiste em uma equação que tem como variáveis as bandas do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP), tendo como resultado uma imagem com valores que podem ir de -1 a 1 (Equação 1):

$$NDVI = \frac{\rho_{ivd} - \rho_v}{\rho_{ivd} + \rho_v} \quad (1)$$

Em PDI existem várias operações aritméticas simples utilizadas para analisar imagens multiespectrais e/ou multitemporais. Uma das principais aplicações dessas operações são os índices de vegetação (IV), que servem como indicadores do crescimento e vigor da vegetação verde, minimizando a variabilidade causada por fatores externos à vegetação (JENSEN, 2004). O NDVI consiste na razão normalizada entre as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo (MOREIRA, 2007). O NDVI torna possível o mapeamento de áreas com diferentes estados de cobertura vegetal e vigor de biomassa verde.

d) Re-escalonamento dos Dados: após as transformações (ACP e NDVI) os produtos destas transformações foram re-escalonados em escala de 0 a 255 utilizando o módulo *Stretch* Linear. Este método permite esticar/alongar os valores que a imagem possui, formando uma nova imagem com valores lineares entre um limite mínimo (zero) e máximo (255) especificados (256 níveis de cinza, como uma imagem padrão do TM/Landsat 5 – 8 bits).

e) Segmentação: segmentação é o processo pelo qual *pixels* são agrupados a partir de similaridade espectral (EASTMAN, 2009). O método empregado neste trabalho utilizou uma abordagem de detecção de bacias hidrográficas para particionar imagens de entrada com base na sua variância.

Para realizar a segmentação utiliza-se uma janela de análise de *pixels* (3x3, 5x5, 7x7) se deslocando e avaliando a similaridade dos *pixels* sobre todas as bandas de entrada. A similaridade é definida a partir de testes (de 0 a 100), sendo que quanto menor for o limiar, mais

homogênea serão os segmentos. Ou seja, um limiar maior irá provocar um resultado com segmentos mais heterogêneos, com menor tempo de processamento.

Pelo módulo *Segmentation* foi formado um grupo de imagens a partir do produto da ACP e NDVI (imagens padronizadas), e segmentadas logo após. Foi utilizada a abordagem do tipo detecção de bacias hidrográficas, índice de similaridade 10 com largura e altura da janela de análise de 3x3.

f) Extração de Assinaturas: a partir da segmentação foram identificadas por análise visual áreas contendo *pixels* homogêneos. Nestas áreas foram identificadas coberturas da terra, e assim selecionadas para criar áreas de treinamento, a fim de criar as assinaturas espectrais. Foram selecionadas as seguintes classes, de acordo com o conhecimento prévio da área de estudo: formações arbóreas naturais, formações herbáceas – campos, formações herbáceas – vegetação de dunas, depósitos arenosos e corpos d’água.

g) Pré-Classificação: foi utilizado o classificador *MAXLIKE* (Máxima Verossimilhança), o qual faz parte do módulo rígido do Idrisi Taiga® que utiliza a máxima probabilidade dos *pixels* pertencerem a uma classe pré-definida a partir das assinaturas espectrais (CRÓSTA, 1992) e que foram extraídas das áreas criadas na segmentação.

O princípio de um classificador de imagens por máxima verossimilhança baseia-se na seguinte regra, de acordo com Richards e Jia (2006): as classes espectrais de uma imagem podem ser representadas por

$$\omega_i, i = 1, \dots, M \quad (2)$$

Onde  $M$  é o número total de classes. Para poder determinar em quais classes os *pixels* da imagem irão pertencer utiliza-se uma probabilidade condicionante

$$p(\omega_i|x), i = 1, \dots, M \quad (3)$$

O vetor  $x$  é uma coluna de valores de intensidade de brilho para os *pixels*. Ele descreve o *pixel* como um ponto num espaço multispectral

com coordenadas definidas pelo brilho. A probabilidade  $p(\omega_i|x)$  dá a probabilidade de que a classe correta é  $\omega_i$  para um *pixel* na posição  $x$ . Assim, a classificação consiste em:

$$x \in \omega_i, \quad \text{se} \quad p(\omega_i|x) > p(\omega_j|x) \quad \text{para todo} \quad j \neq i \quad (4)$$

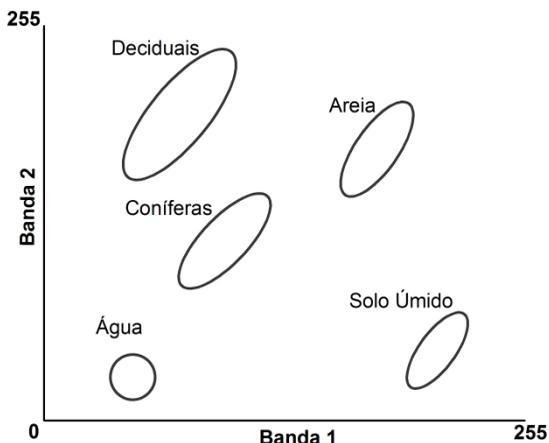
Esta função de probabilidade pode ser expressa de uma forma mais conveniente utilizando-se o Teorema de Bayes:

$$p(\omega_i|x) = \frac{p(x|\omega_i).P(\omega_i)}{p(X)} \quad (5)$$

onde  $P(\omega_i)$  é a probabilidade a priori para a classe  $\omega_i$ ,  $p(\omega_i|x)$  é a probabilidade a posteriori da classe  $i$  e  $p(x|\omega_i)$  é o valor da função de densidade de probabilidade de  $X$  no ponto  $x$  observado e substituindo os parâmetros conhecidos por suas respectivas estimativas de máxima verossimilhança.

Usando as áreas de treinamento com as assinaturas espectrais o método usa a média e variância/covariância das amostras das classes, a fim de estimar a posterior probabilidade que todos os *pixels* da imagem têm de pertencer a alguma das classes de cobertura das terras. A figura 5 mostra um gráfico com o princípio deste classificador, onde a probabilidade é maior na posição média da classe, e cai em um padrão elíptico longe da média.

Figura 5. Gráfico exemplificando o princípio da Máxima Verossimilhança.



Fonte: Modificado de Eastman (2009).

h) Edição: duas classes de cobertura também identificadas na área de estudo não foram utilizadas na etapa f, mas sim na etapa de edição, sendo elas: formações arbóreas – reflorestamento e perímetros urbanos.

i) Validação: a partir do módulo *Sample* foram localizados, de forma randômica, 294 pontos ao longo do mapa gerado na Pré-Classificação, a fim de gerar uma matriz de confusão. A construção da matriz pode ocorrer através de dados de campo, sendo o trabalho de campo realizado não apenas no momento em que dados são coletados, mas também quando o pesquisador, baseado no conhecimento adquirido ao longo de sua jornada de estudos, consegue dar início ao processo de entendimento dos processos responsáveis pelos fenômenos encontrados na superfície terrestre (TRICART, 2006). Entretanto, neste trabalho a matriz de confusão foi criada a partir da identificação da cobertura do solo em imagens de alta resolução espacial do mesmo ano de 2011 e disponíveis no *Google Earth*®. Com a matriz definida utilizou-se o módulo *Errmat* para ser identificado o Índice Kappa da classificação.

O *Errmat* compara duas imagens para fins de avaliação de precisão. É mais particularmente utilizada na avaliação pós-classificação de classificações de cobertura da terra derivados de dados

de sensoriamento remoto. Uma imagem contém o mapa de cobertura da terra interpretado, enquanto a segunda imagem contém a imagem de referência.

O Índice ou Coeficiente Kappa, desenvolvido por Cohen (1960, 1968 apud ROSSITER, 2014), é baseado na diferença entre a concordância observada (diagonal principal da matriz de confusão com a concordância entre a classificação e os dados de referência) e a chance de concordância entre os dados de referência e uma classificação aleatória (produto entre os totais marginais da matriz) (CONGALTON E GREEN, 1999). A equação que fornece o valor de Kappa é dada por:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} + x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} + x_{+i})} \quad (6)$$

Onde:

$r$  = Número de classes

$x_{ii}$  = Número de elementos classificados corretamente

$x_{i+}$  = Total de elementos classificados para uma categoria  $i$

$x_{+i}$  = Total de elementos de referência amostrados para uma categoria  $i$

$N$  = Número total de amostras

Em trabalhos que utilizam o Índice Kappa para avaliar a qualidade da classificação não existe uma bibliografia universal que proponha uma escala de mensuração. Assim, os primeiros trabalhos, como de Landis e Koch (1977 apud CONGALTON, 2005), propõem que para uma classificação ser considerada excelente o Índice Kappa tem que ser de 0,8 a 1,00, assim como de 0,2 a 0 para ruim. A tabela 1 lista os valores de índice e suas nomenclaturas.

Tabela 1. Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.

Valor Kappa	Qualidade da Classificação
<0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

(Fonte: autor).

j) Classificação Final: elaboração do mapa temático de cobertura do solo, realizando o recorte apenas para a área da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

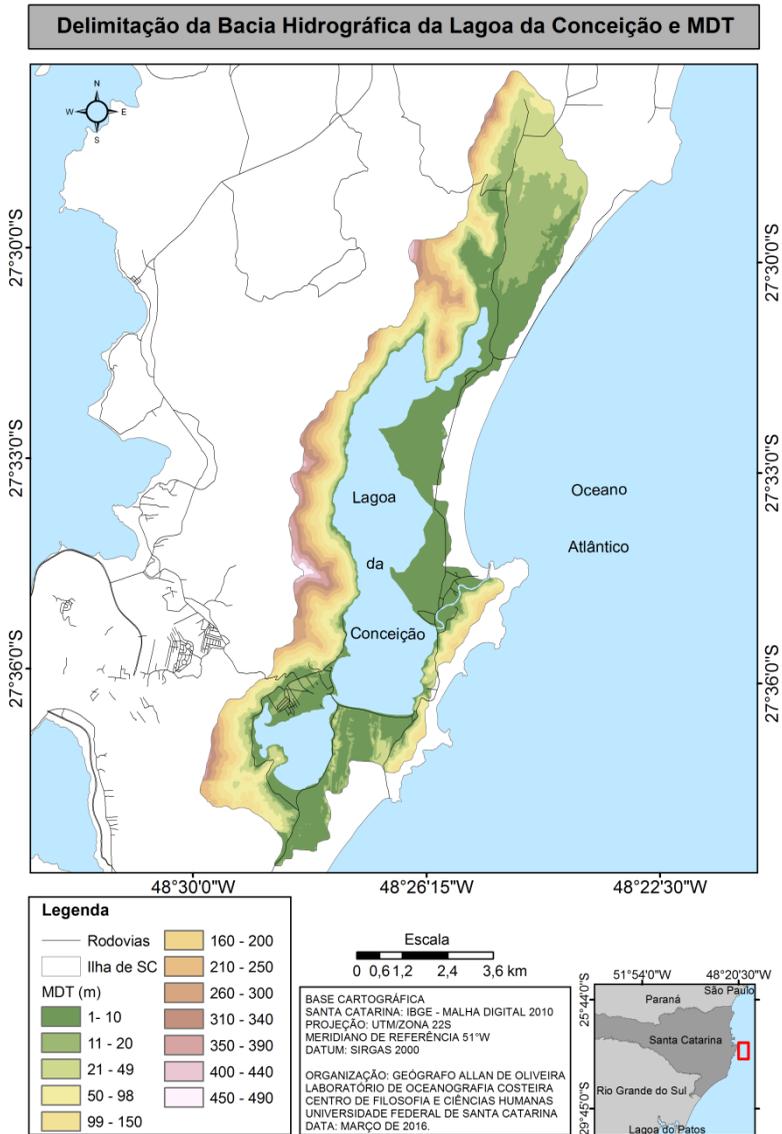
Aplicando a metodologia para delimitação da BHLC foi constatado que a área total da bacia chega a 74,24 km<sup>2</sup>, com 53,40 km<sup>2</sup> de terras emersas e 20,84 km<sup>2</sup> de área lagunar. A topografia da área varia entre 1m e 490m acima do nível do mar, sendo que a maior parte registra altitude entre o intervalo de 1 a 10m (18,16%). O segundo maior intervalo de altitude com porcentagem de área é o de 21m a 54m, com 7,70%. As maiores altitudes, que ficam no intervalo de 410m a 490m, registram apenas 0,29% da área (Fig. 6).

As maiores altitudes estão localizadas na margem oeste da laguna, sobre sienogranitos (predominantes) e monzogranitos de cor rosada, geralmente de textura equigranular grossa, mas raramente púrpura, com fenocristais de feldspato potássico, típicos da Suíte Pedras Grandes formada no Neoproterozóico (RADAMBRASIL, 2004; TOMAZOLLI e PELLERIN, 2014). Esta mesma litologia também é encontrada a SE da laguna, conhecida na região como Parque Municipal da Galheta.

As áreas com menores altitudes estão localizadas a sudoeste, sul, leste e nordeste da laguna. A área a sudoeste, onde está o núcleo urbano centro da Lagoa, possui depósitos pleistocênicos (P) e holocênicos (H), como depósitos marinhos praias (P - com até 19m de altitude), colúvio-aluvionares (H - com até 8m de altitude), flúvio lagunares-lacustres (H - com até 8m de altitude) e lagunares praias (H - em média 2m).

Ao sul da laguna há depósitos pleistocênicos (P) e holocênicos (H), como depósitos eólicos do tipo dunas longitudinais fixas (P - com até 31m de altitude), depósitos eólicos do tipo dunas "climbing" (P - com até 29m de altitude), depósitos eólicos do tipo dunas transversais (H - em média 4m de altitude), flúvio lagunares-lacustres (H - em média 2m de altitude) e lagunares praias (H - em média 1m).

Figura 6. Delimitação da BHLC e o MDT.



(Fonte: autor).

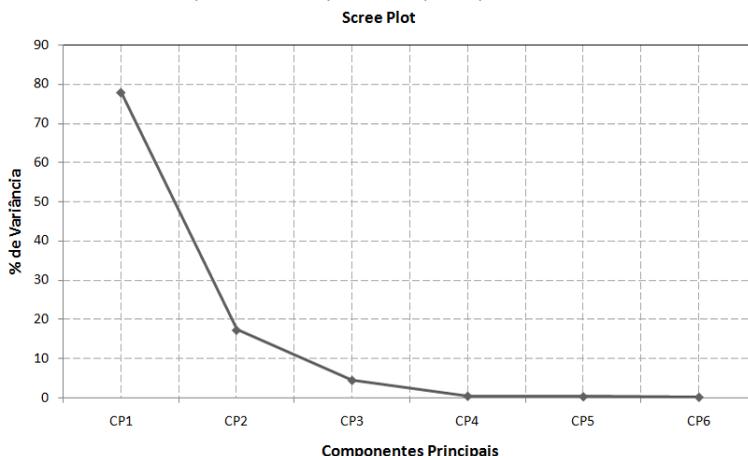
A oeste podem ser encontrados depósitos pleistocênicos (P) e holocênicos (H), como depósitos marinhos praias (P - com até 10m de altitude), flúvio lagunares-lacustres (H - com até 2,5m de altitude) e

lagunares praias (H – em média 2m). Já a nordeste estão os depósitos pleistocênicos (P) e holocênicos (H), sendo eles depósitos eólicos do tipo dunas “climbing” (P - com até 28m de altitude), depósitos marinhos praias (P - com até 19m de altitude), depósitos de leques aluviais (H - com até 19m de altitude), depósitos colúvio-aluvionares (H - com até 6m de altitude) e depósitos paludais (H - com até 5m de altitude).

O resultado da Análise de Componentes Principais (ACP), a partir das 6 bandas do satélite TM/Landsat 5, mostrou que a maior parte das informações necessárias para aplicar a técnica de classificação por máxima verossimilhança, assim como descrito anteriormente, estavam nas Componentes Principais (CP) 1 e 2, como mostra a figura 7. Aplicando a Regra de Jolliffe, onde o menor autovalor deve ser 0,7 vezes a média dos autovalores (JOLLIFFE, 2002), também fica clara a necessidade de utilizar apenas os dois primeiros autovalores da CP.

A análise realizada pelo resultado do NDVI, que é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde com os valores entre 1 e -1 (de 1 a 0 há presença de vegetação, e de 0 a -1 não há vegetação), mostrou uma grande quantidade de *pixels* com valores altos, que na palheta de cor adotada são expressos pela cor verde escuro e representam vegetação densa e arbórea.

Figura 7. *Scree Plot* para a matriz de dados mostrando a necessidade de utilizar apenas as componentes principais 1 e 2.



(Fonte: autor).

O corpo lagunar e a região oceânica ficaram bem definidos, com valores próximos de -1 e na cor avermelhada, com bancos arenosos submersos na coloração vermelho mais intenso. Destacaram-se também as áreas com colorações em tons amarelados, que são áreas formadas por zonas urbanas mistas, as de verde claro com vegetação rasteira (campos) e de tons alaranjados que mostram áreas com depósitos arenosos e zonas de interface água/área insular (Fig.8).

Com a interpretação visual dos resultados obtidos a partir do NDVI e da etapa de classificação por máxima verossimilhança, a matriz de confusão foi gerada (Tab. 2), além do Índice Kappa, para o mapa temático gerado a partir da classificação. O índice calculado mostrou que o mapa temático ficou classificado como excelente (FONSECA, 2000), por apresentar acurácia de 0.82.

Tabela 2. Matriz de confusão.

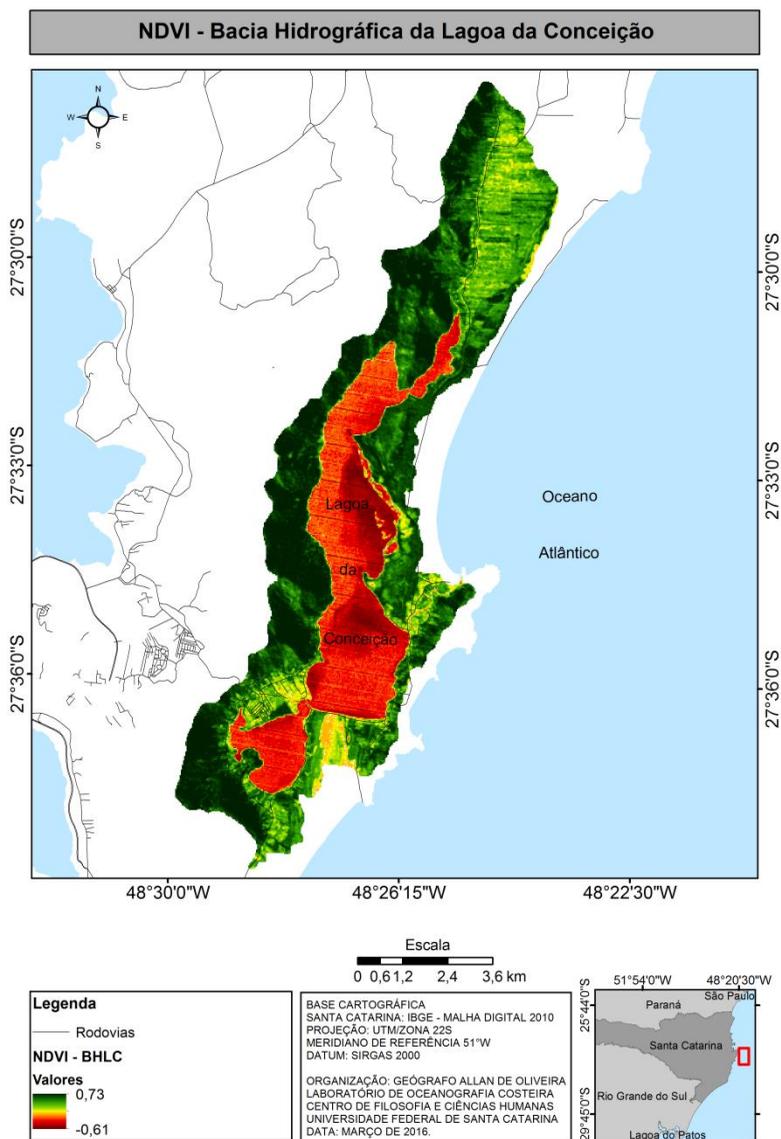
	Classes de Cobertura do solo							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
1	97	1	17	0	0	0	0	115
2	2	11	2	0	0	0	0	15
3	5	0	22	0	0	0	0	27
4	0	1	3	6	0	0	0	10
5	0	0	0	4	12	0	1	17
6	0	0	1	1	0	83	0	85
7	0	0	2	0	0	0	23	25
	104	13	47	11	12	83	24	294
Erro	0,0673	0,1538	0,5319	0,4545	0	0	0,0417	

(Fonte: autor).

1) Formações arbóreas – Submontana e terras baixas, 2) Formações arbóreas – Reflorestamento, 3) Formações herbáceas – Campos, 4) Formações herbáceas – Vegetação de dunas, 5) Depósitos arenosos, 6) Corpos d'água e 7) Perímetros urbanos.

Das classes mapeadas os depósitos arenosos e corpos d'água foram os que apresentaram nenhuma confusão com as demais classes, obtendo 100% de acurácia. Estas duas coberturas possuem extremos de reflectância, o que facilita suas distinções, tanto na interpretação visual para coleta de amostras, a fim de gerar as assinaturas espectrais, como também para o algoritmo separar os *pixels* e não confundi-los com as outras coberturas.

Figura 8. Índice de Vegetação NDVI para a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.



(Fonte: autor).

A água possui valores muito baixos nas bandas do visível (bandas 1, 2 e 3), decrescendo mais ainda à medida que se aproxima dos comprimentos de onda no infravermelho, em que a água absorve praticamente toda energia incidente. Já os depósitos arenosos aumentam sua reflectância com o aumento dos comprimentos de onda, especialmente no infravermelho próximo. Em períodos com precipitação, em que a superfície destes depósitos está úmida, a reflectância diminui e algumas confusões entre classes podem ocorrer, não sendo o caso neste mapeamento.

Entre as classes que apresentaram maior confusão estão formações herbáceas/campos e formações herbáceas/vegetação de dunas. A classe vegetação de dunas apresentou maior confusão com a classe depósitos arenosos. Explica-se esta confusão por causa da proximidade espacial entre as duas classes, já que esta vegetação está fixada sobre depósitos arenosos. Isto dificulta selecionar polígonos formados na segmentação que tenham apenas vegetação de dunas, o que ocasionou a presença de *pixels* que também representavam a classe depósitos arenosos.

A classe campos em determinadas situações foi confundida com a classe formações arbóreas/submontana. Devido a topografia da região, em algumas situações podem ocorrer sombras no relevo, gerando confusões na separação dos *pixels*. Além disso, não há um limite/barreira que defina início e término entre estas duas classes, já que na área de estudo ocorre mistura entre elas.

A cobertura do solo de uma região, principalmente a fitogeográfica, resulta da combinação dos aspectos geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e pedológicos (TAGLIANI, 2002). Na Ilha de Santa Catarina, mais especificamente na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, é identificada esta interação entre atributos que resultaram nas classes descritas na tabela 3, expressa em porcentagem na figura 9 e especializadas na figura 10.

Devido à geomorfologia do local, existem as vegetações típicas das áreas de terras altas, mas precisamente submontana (30 a 400 m de altitude) e as de terras baixas (menores que 30 m). Como o clima da área de estudo é o subtropical, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano (úmido sem estações secas), houve condições necessárias para o desenvolvimento de estratos arbóreos densos, com alturas variadas.

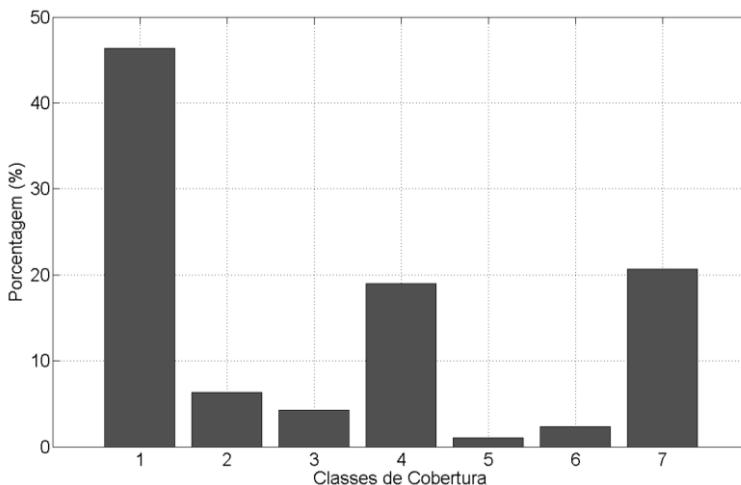
O principal mapeamento já realizado, e que ainda hoje é referência para os demais elaborados, é o do PROJETO RADAMBRASIL/IBGE na década de 80 do século XX. Na década passada deste século o IBGE disponibilizou uma versão atualizada para a Ilha de Santa Catarina na escala de 1:250000 (Folha SG.22 – Z – D MIR-524).

Tabela 3. Classe de cobertura na área de estudo.

Classe de Cobertura	km <sup>2</sup>	Porcentagem (%)
Formações Arbóreas - Submontana	25,31	46,35
Formações Arbóreas - Terras Baixas	3,47	6,36
Formações Arbóreas - Reflorestamento	2,32	4,26
Formações Herbáceas - Campos	10,35	18,96
Formações Herbáceas - Vegetação de duna	0,58	1,07
Depósitos arenosos - Dunas e solo exposto	1,28	2,34
Áreas Urbanas Mistas	11,28	20,67

(Fonte: autor).

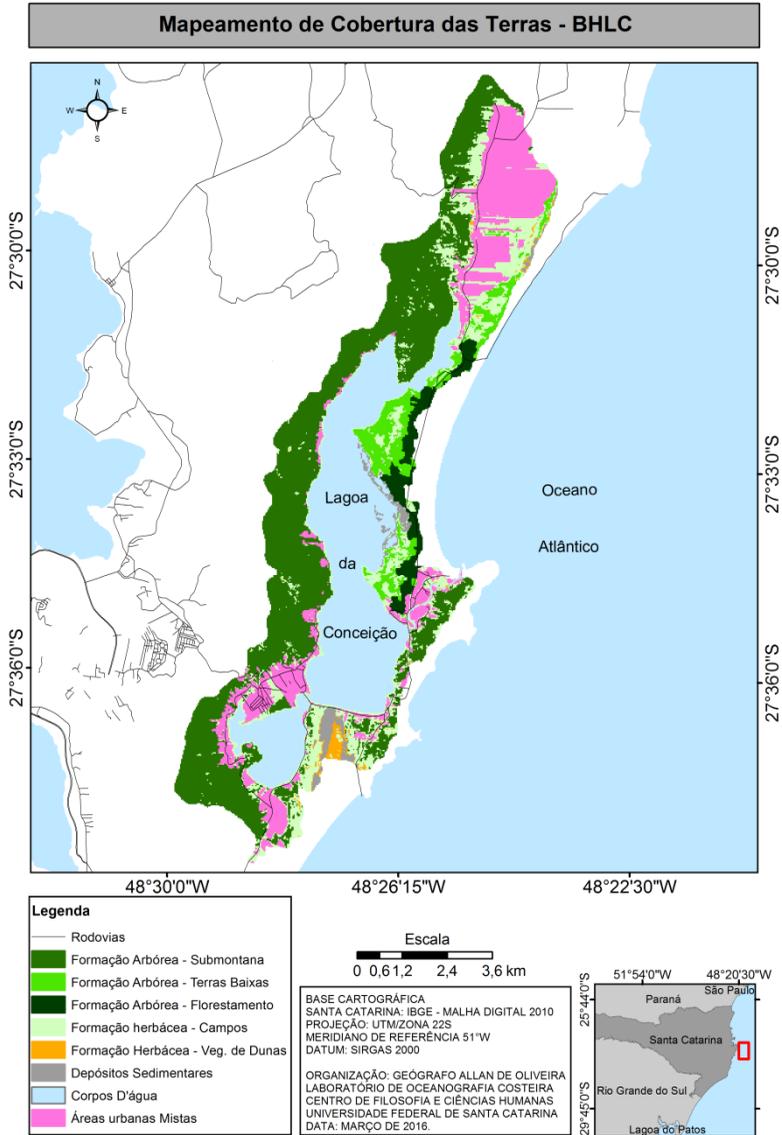
Figura 9. Porcentagem por classe de cobertura mapeada.



(Fonte: autor).

1) Formações arbóreas – Submontana 2) Formações arbóreas - Terras baixas, 3) Formações arbóreas – Reflorestamento, 4) Formações herbáceas – Campos, 5) Formações herbáceas – Vegetação de dunas, 6) Depósitos arenosos, e 7) Perímetros urbanos.

Figura 10. Mapa de cobertura dos solos da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição.



(Fonte: autor).

### **3.3.1.1 DESCRIÇÃO DAS COBERTURAS**

#### **3.3.1.1.1 FORMAÇÕES ARBÓREAS – FLORESTA NATURAIS (SUBMONTANA)**

A maior classe de cobertura verificada está relacionada às áreas de florestas naturais, com 25,31 km<sup>2</sup>, aqui representadas por estratos arbóreos típicos de Mata Atlântica, localizados em topos e vertentes de morros (ombrófila densa submontana) (Fig. 11). De acordo com Caruso (1983 apud FLORIANÓPOLIS, 2004) existem 10 espécies com mais 30 metros de altura e 65 espécies entre 21 e 30 metros de altura, além de epífitas das famílias das Bromeliáceas, Orquidáceas, Aráceas, Piperáceas, (samambaias) e lianas (cipós) das famílias das Bignoniáceas e Sapindáceas (KLEIN, 1978 apud FLORIANÓPOLIS, 2004).

Figura 11. Formação arbórea natural (topo de morro) intercalada com formações herbáceas.



(Fonte: autor, 2016).

#### **3.3.1.1.2 FORMAÇÕES ARBÓREAS – FLORESTAS NATURAIS (TERRAS BAIXAS)**

Esta formação fitoecológica representa 6,36% de toda área de estudo, sendo composta por floresta ombrófila densa e formações pioneiras de influência marinha (mata de restinga). Esta classe está

localizada em uma área de tensão ecológica, principalmente pela pressão do reflorestamento com Pinus.

### **3.3.1.1.3 FORMAÇÕES ARBÓREAS – REFLORESTAMENTO**

A classe reflorestamento ocorre no setor central, no Parque Estadual do Rio Vermelho, criado pelo Decreto nº 308 de 24 de maio de 2007, com plantio de espécies exóticas (Pinus sp. e Eucalyptus) que ocorrera em 1970. Além de estarem em contato com a classe Formações Arbóreas – Terras Baixas (Fig. 12) foi possível constatar que ao longo dos anos (25 anos) a sua área de abrangência variou bastante (DE OLIVEIRA, CARAZZAI, BONETTI FILHO, 2013).

Figura 12. Parque Estadual do Rio Vermelho - área de reflorestamento.



(Fonte: [www.deolhonailha.com.br](http://www.deolhonailha.com.br)).

### **3.3.1.1.4 FORMAÇÕES HERBÁCEAS – CAMPOS**

Correspondem principalmente à vegetação secundária em estágios sucessionais de capoeirinha e pioneiro e pastagens. São observadas nas encostas dos morros da Galheta, do Rio Vermelho e nas áreas de planícies, entre a via principal e a área de dunas. Também ocorre nas áreas do vale de alagamento do rio João Gualberto Soares, devido à influência fluvial (setor norte).

### 3.3.1.1.5 FORMAÇÕES HERBÁCEAS – VEGETAÇÃO DAS DUNAS MÓVEIS E SEMI-FIXAS

A vegetação de dunas móveis e semi-fixas foi identificada onde há depósitos arenosos com cobertura rarefeita. Esta característica ocorre devido ao constante transporte de areia ora por ventos do quadrante sul, ora por ventos do quadrante norte (com predomínio da direção nordeste). A principal representante deste depósito na área de estudo ocorre principalmente no setor sul da área de estudo. De acordo com Brezolin (1979 apud FLORIANÓPOLIS, 2004) a espécie dominante é a *Spartina ciliata*, mas também ocorrendo *Ipormoea péscaprae*, *Canavalia marítima*, *Remirea marítima* e *Scaevola plumieri*.

### 3.3.1.1.6 DEPÓSITOS ARENOSOS

O depósito sedimentar do tipo duna ocorre nos setores nordeste e sul da área de estudo, sendo o último o que apresenta maior área (Fig. 13). É um campo de dunas que se estende desde a Praia da Joaquina até a Avenida das Rendeiras no Bairro Lagoa. No setor central ocorrem depósitos sedimentares parcialmente submersos formando bancos arenosos próximos à margem leste da Lagoa da Conceição. No setor sul existe grande depósito de areias livres e é normal ocorrer migração e/ou perda deste material por suspensão.

Figura 13. Campo de dunas.



(Fonte: <http://www.masterturismo.pt>).

### 3.3.1.1.7 CORPOS D'ÁGUA

Esta classe é representada pela Lagoa da Conceição, que possui ao longo das suas margens formações arbóreas submontana, de terras baixas, formações herbáceas do tipo campos e de dunas móveis e semi-fixas, depósitos arenosos e perímetros urbanos (Fig. 14). Esta última classe vem exercendo forte pressão e diversificados níveis de impacto, principalmente criação de depósitos tecnogênicos (aterros) e queda da qualidade de água pela liberação de esgotamento sanitário.

Figura 14. Lagoa da Conceição (setor central), margeada por formações de terras baixas (abaixo) e formações submontana com remanescentes da Mata Atlântica/vegetação de morro (acima)



(Foto: autor, 2016).

### 3.3.1.1.8 PERÍMETROS URBANOS

Quanto aos perímetros urbanos existem seis na área de estudo (São João do Rio Vermelho, Barra da Lagoa, Joaquina, Lagoa, Canto da Lagoa e Costa da Lagoa) (Fig.15).

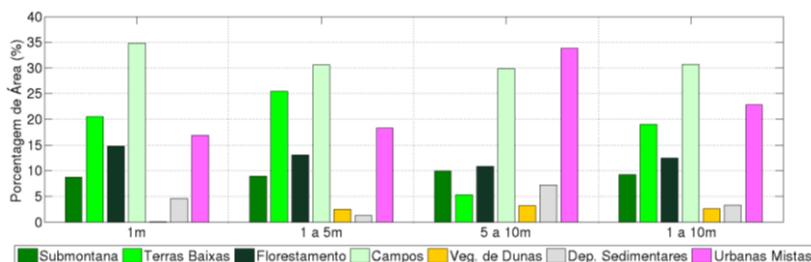
Figura 15. Perímetro urbano na Barra da Lagoa, mostrando também de cima para baixo: formação submontana, corpo lagunar, formação de terras baixas, formação arbórea/reflorestamento, áreas alteradas/formação herbácea, perímetro urbano, Canal da Barra da Lagoa, perímetro urbano junto à formação arbórea/submontana.



(Fonte: autor, 2016).

Através de rotinas de geoprocessamentos foram identificadas as classes de cobertura das terras que estão localizadas nas menores altitudes da BHLC, já destacado como sendo o intervalo com maior porcentagem de área (de 1 até 10 m) (Fig.16). A Formação Herbácea Campos é a principal cobertura nesta área, com 30,64%, seguida de Áreas Urbanas Mistas (22,85%) e Formação Arbórea Terras Baixas (19,01%). A cobertura que possui menor área é a Formação Herbácea Vegetação de Dunas (2,53%).

Figura 16. Cobertura das terras por intervalo altimétrico.



(Fonte: autor).

Também foram identificadas as coberturas das terras presentes em intervalos menores de altitude (até 1m; de 1 a 5m; de 5 a 10m). Em terrenos de até 1m a Formação Herbácea Campos é maioria, com 34,79%, seguida de Formação Arbórea Terras Baixas (20,51%) Áreas Urbanas Mistas (16,92%) e Formação Arbórea Florestamento (14,72%). A cobertura que possui menor área é a Formação Herbácea Vegetação de Dunas (0,08%) (Fig.16).

Em terrenos de 1m até 5m a Formação Herbácea Campos é maioria, com 30,56%, seguida de Formações Arbóreas Terras Baixas (25,46%) e A cobertura que possui menor área é a com Depósitos sedimentares (1,27%). Já no intervalo entre 5 e 10m a cobertura Áreas Urbanas Mistas é maioria (33,78%), seguida da Formação Herbácea Campos (29,88%) e Formação Arbórea Florestamento (10,86%), sendo a menor área coberta pela Formação Herbácea Vegetação de Dunas (3,17%)(Fig.16).

### **3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O mapeamento de coberturas das terras utilizando dados orbitais é muito difundido em trabalhos que visam abordar análises de alteração da paisagem. Além de identificar alterações espaço-temporais, através de sucessivas imagens, ela também permite realizar um inventário das atuais condições de coberturas. Neste capítulo técnicas de processamento digital de imagens orbitais, mais especificamente do TM/Landsat 5, permitiram chegar às seguintes considerações finais:

- Foi possível identificar as coberturas das terras atuais existentes na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, seguindo um padrão acurado necessário para trabalhos científicos. O Índice Kappa de acurácia foi de 82%, evidenciando um excelente resultado do mapeamento.

- A utilização de Componentes Principais e do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para classificação supervisionada, ao invés das bandas espectrais normalmente utilizadas, mostrou ser muito boa. Além disso, aplicar a técnica de segmentação às imagens das componentes CP 1 e CP 2, mais a imagem NDVI, otimizou o tempo de processamento e melhorou a discriminação dos alvos.

- As principais coberturas das terras próximas às margens são as formações herbáceas (campos), áreas urbanas mistas e formações arbóreas submontana. Integrando a esta análise o Modelo Digital de Terreno, observou-se que as formações submontana estão localizadas em áreas de maior altitude, ou seja, em áreas de maior declividade. Já as formações herbáceas (campos) e áreas urbanas mistas estão localizadas em áreas com baixa altitude, principalmente sobre planícies baixas e declives suaves.

- Das coberturas das terras identificadas, as áreas urbanas mistas são as que merecem maior destaque, quando da análise dos impactos de uma subida do nível lagunar.

## **4 MAPEAMENTO DE ÁREAS MARGINAIS INUNDADAS NA LAGOA DA CONCEIÇÃO.**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

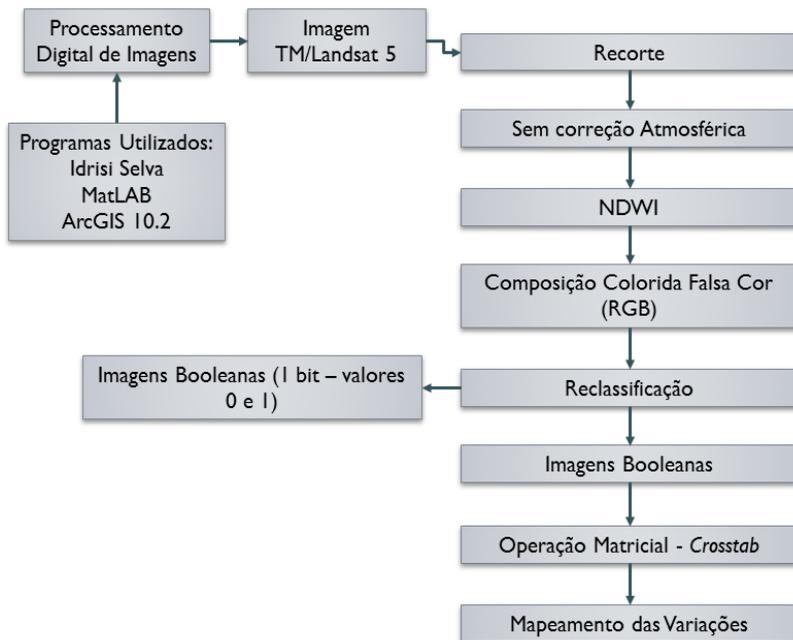
O mapeamento de superfícies de corpos d'água e o monitoramento da dinâmica das unidades ambientais ao longo das margens e áreas planas, utilizando técnicas de sensoriamento remoto, são importantes para determinar áreas susceptíveis/vulneráveis à inundação (JI et al., 2009). Através de séries contínuas de imagens de satélite pode-se gerar uma base de dados que permita identificar o(s) padrão(ões) e/ou alteração de padrão em áreas suscetíveis aos processos de inundação, sendo estes causados por eventos extremos de chuva, ventos ou até indícios de alteração do nível do mar causada por mudanças climáticas (oscilações positivas).

A ausência de séries longas e constantes de níveis do mar e lagunar, que poderiam mostrar alterações no comportamento hidrodinâmico de ambientes abrigados, fortalece a utilização destas imagens para acompanhar possíveis alterações de nível. Este capítulo tem como objetivo identificar e mapear alterações relacionadas ao processo de inundação nas áreas marginais da Lagoa da Conceição, numa escala temporal de 25 anos, utilizando produtos de sensoriamento remoto e técnicas processamento digital de imagens, determinando assim se existe áreas mais susceptíveis/vulneráveis a oscilação do nível lagunar.

### **4.2 METODOLOGIA**

A figura 17 mostra o fluxograma com as etapas realizadas para mapear as variações das áreas inundadas.

Figura 17. Fluxograma com as etapas para mapeamento das variações de áreas inundáveis na Lagoa da Conceição.



(Fonte: autor).

#### 4.2.1 MAPEAMENTO POR SENSORIAMENTO REMOTO

Foram utilizadas imagens de satélite que compõem o Banco de Dados do U.S. Geological Survey (USGS Global Visualization – <http://glovis.usgs.gov>) e capturadas pelos satélites TM/Landsat 5 com órbita 220 e ponto 79. Ao todo foram selecionadas 25 imagens desde 1986 a 2011 (25 anos de análise) que não possuíam cobertura de nuvens, sendo 2008 o único ano sem amostragem, por não haver imagens sem cobertura de nuvens. Analisando os dados de precipitação (acumulada do mês) e as normais climatológicas (1961/1990) buscaram-se imagens que recobriram a área em meses de menor precipitação. Porém, este procedimento não foi possível para todos os anos, quer por questões de alta cobertura de nuvens, quer por falta de imagens para estes meses. A tabela 4 lista todas as imagens utilizadas, com suas respectivas datas e erros de registro.

Tabela 4. Metadados das imagens utilizadas.

Ano	Dia/Mês	Erro Médio Quadrático ( <i>pixel</i> )	Ano	Dia/Mês	Erro Médio Quadrático ( <i>pixel</i> )
1986	<b>12/07</b>	0,253	1999	<b>01/08</b>	0,079
1987	<b>01/09</b>	0,324	2000	<b>31/05</b>	0,101
1988	<b>15/07</b>	0,185	2001	<b>11/02</b>	0,164
1989	<b>18/06</b>	0,140	2002	<b>24/07</b>	0,126
1990	<b>20/05</b>	0,166	2003	<b>12/08</b>	0,092
1991	<b>23/05</b>	0,115	2004	<b>26/05</b>	0,150
1992	<b>19/02</b>	0,263	2005	<b>02/09</b>	0,092
1993	<b>03/09</b>	0,152	2006	<b>01/06</b>	0,139
1994	<b>15/05</b>	0,183	2007	<b>23/08</b>	0,099
1995	<b>16/04</b>	0,106	2009	<b>24/05</b>	0,145
1996	<b>04/05</b>	0,152	2010	<b>18/10</b>	0,192
1997	<b>08/06</b>	0,089	2011	<b>02/08</b>	0,578
1998	<b>11/06</b>	0,103			

(Fonte: autor).

Foram realizadas composições coloridas falsa cor usando a associação RGB 542 (filtro vermelho na banda 5, filtro verde na banda 4 e filtro azul na banda 2), a fim de facilitar a interpretação visual da feição margem lagunar, além do Índice de Normalização Diferenciada da Água (NDWI - *Normalized Difference Water Index*), a fim de identificar um limiar entre água e continente, desta forma mapeando as áreas marginais da laguna. O NDWI utiliza os mesmos princípios do Índice de Normalização Diferenciada da Vegetação (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*). No NDVI (equação 1) duas bandas diferentes, uma na faixa de reflectância do visível vermelho (pv) e outra no infravermelho próximo (pivp), são comparadas para identificar a presença de vegetação terrestre e solo exposto, enquanto que as áreas cobertas por água são suprimidas (MCFEETERS, 1996).

A equação que gera o NDWI (2) seleciona duas bandas diferentes, que registram a reflectância dos alvos na faixa do visível verde (pvd) e no infravermelho próximo (pivp). Nas bandas espectrais do sensor TM do Landsat 5 a reflectância dos alvos na faixa do verde (banda 2 - comprimento de onda 0,52 a 0,60  $\mu\text{m}$ ) mostram vegetação sadia no verde, já no infravermelho próximo (banda 4 - comprimento de onda 0,76 a 0,90  $\mu\text{m}$ ) é possível fazer uma boa diferenciação entre água/continente, pois ela é muito sensível à quantidade de biomassa da vegetação, ao mesmo tempo que a água tem baixa reflectância (XU,

2006 e JENSEN, 2011). De acordo com (MCFEETERS, 1996) o NDWI maximiza a reflectância da água ao utilizar a banda verde, minimiza a reflectância da água no infravermelho próximo e maximiza a reflexão da vegetação e solo no infravermelho próximo.

$$NDVI = \frac{\rho_{ivd} - \rho_v}{\rho_{ivd} + \rho_v} \quad (7)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{vd} - \rho_{ivp}}{\rho_{vd} + \rho_{ivp}} \quad (8)$$

O resultado do NDWI é uma imagem com valores de -1 a 1, onde de zero até o maior valor positivo são indicados pixels de água, já valores negativos até o valor imediatamente inferior a zero indicam não água. Isso cria um limiar entre a Lagoa da Conceição e a área insular, permitindo reclassificar todas as imagens, a fim de criar imagens booleanas (apenas dois valores: - 0 e 1). Todos os pixels da imagem NDWI com valor de 0 a 1 foram reclassificados para 0, representando a área lagunar, e todos os pixels com valores imediatamente inferiores a 0 até -1 reclassificados para 1, representando a área insular. Sem a necessidade de vetorizar a linha de costa lagunar esta técnica permite: 1) calcular a área lagunar para cada ano, identificando aumento ou diminuição; e 2) gerar uma análise de tabulação cruzada.

A análise de tabulação cruzada comparou duas imagens contendo duas variáveis (água e não água) na área de estudo, e o resultado mostrou quatro possíveis resultados: 1) água/água - onde os pixels foram classificados como água na imagem mais antiga e também na mais recente, não ocorreu nem inundação nem emersão; 2) não água/água - se os pixels foram classificados como não água na imagem mais antiga, mas na imagem mais recente foram classificados como água ocorreu inundação; 3) água/não água - se os pixels foram classificados como água na imagem mais antiga, mas na imagem mais recente foram classificados como não água ocorreu emersão; e 4) não água/não água - onde os pixels foram classificados como não água na imagem mais antiga e também na mais recente, não ocorreu nem inundação nem emersão.

Com isso é possível identificar quais áreas eram insulares e tornaram-se lagunares (inundação), assim como eram lagunares e tornaram-se insulares (emersão). Para este procedimento foram realizados dois tipos de análise: a primeira utilizou uma imagem como base para comparação, sendo escolhida a imagem mais antiga (1986), e após esta comparada com todos os anos subseqüente (1986/1987, 1986/1988, 1986/1989,..., 1986/2010, 1986/2011); já a segunda análise não utilizou uma imagem base, e assim todas as tabulações cruzadas foram realizadas de ano em ano (1986/1987, 1987/1988, 1988/1989,...2009/2010, 2010/2011).

#### **4.2.2 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS**

Foram utilizados dados meteorológicos horários, diários e mensais referentes à série histórica da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), especificamente da Estação Meteorológica de Florianópolis (83897), disponíveis no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET. A variável utilizada foi precipitação, sendo observado o seu comportamento diário antes da passagem do satélite para aquisição das imagens utilizadas neste trabalho (1 a 5 dias), assim como o acumulado do mês.

#### **4.2.3 INFLUÊNCIA DO IOS**

Para identificar possível influência de eventos El Niño e La Niña no padrão de precipitação da série histórica acima descrita, além da relação que estes podem ter nas variações de áreas alagadas na região marginal da Lagoa da Conceição, foram utilizados dados do Índice de Oscilação Sul (IOS) disponíveis na página do *Australian Bureau of Meteorology* (<http://www.bom.gov.au/climate/current/soi2.shtml>). O IOS utilizado para quantificar o fenômeno representa a diferença de pressão ao nível do mar entre o Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália), sendo um indicativo de formação e intensidade destes eventos. Valores de índice superiores a -8 indicam formação de El Niño, já acima de +8 La Niña.

### **4.3 RESULTADOS**

#### **4.3.1 VARIAÇÃO DA ÁREA LAGUNAR: INUNDAÇÃO E EMERSÃO**

Com o cálculo das áreas de inundação e emersão lagunar para a primeira análise (Tab. 5) foram identificadas baixas variações ao longo

de 25 anos, mesmo que o período de análise tenha ocorrido no intervalo aproximado de 1 em 1 ano. Em média ocorreu uma inundação de 0,55 km<sup>2</sup>, com desvio padrão de 0,18 km<sup>2</sup>, que mostra uma baixa variação para 25 anos de amostragem. Em relação às áreas de emersão estas foram mais baixas, em média 0,25 km<sup>2</sup> e desvio padrão de 0,10 km<sup>2</sup>. O maior ganho de área inundada em relação a 1986 ocorreu no ano de 1994, com 0,79 km<sup>2</sup>, e a maior emersão ocorreu em 1992 com 0,49 km<sup>2</sup>. Já os valores mais baixos de inundação e emersão ocorreram em 1992 e 1988, com 0,09 km<sup>2</sup> e 0,08 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Na segunda análise, sem o ano base de 1986, também ocorreram baixas variações, porém sem o mesmo padrão identificado na primeira análise (Tab. 5). Em média ocorreu uma inundação de 0,28 km<sup>2</sup>, com desvio padrão de 0,20 km<sup>2</sup>, que mostra uma variação ainda menor, mas com um desvio padrão muito próximo da média. Em relação as áreas de emersão estas também foram baixas, mas com média muito próxima à de inundação (0,26 km<sup>2</sup>), apresentando maior desvio padrão em relação ao da primeira análise e muito próximo da média. O maior ganho de área inundada ocorreu na comparação 1992/1993, com 0,65 km<sup>2</sup>, e a maior emersão ocorreu entre 1991/1992 com 0,82 km<sup>2</sup>. Já os valores mais baixos de inundação e emersão ocorreram em 1991/1992 e 1996/1997, com 0,02 km<sup>2</sup> e 0,05 km<sup>2</sup>, respectivamente.

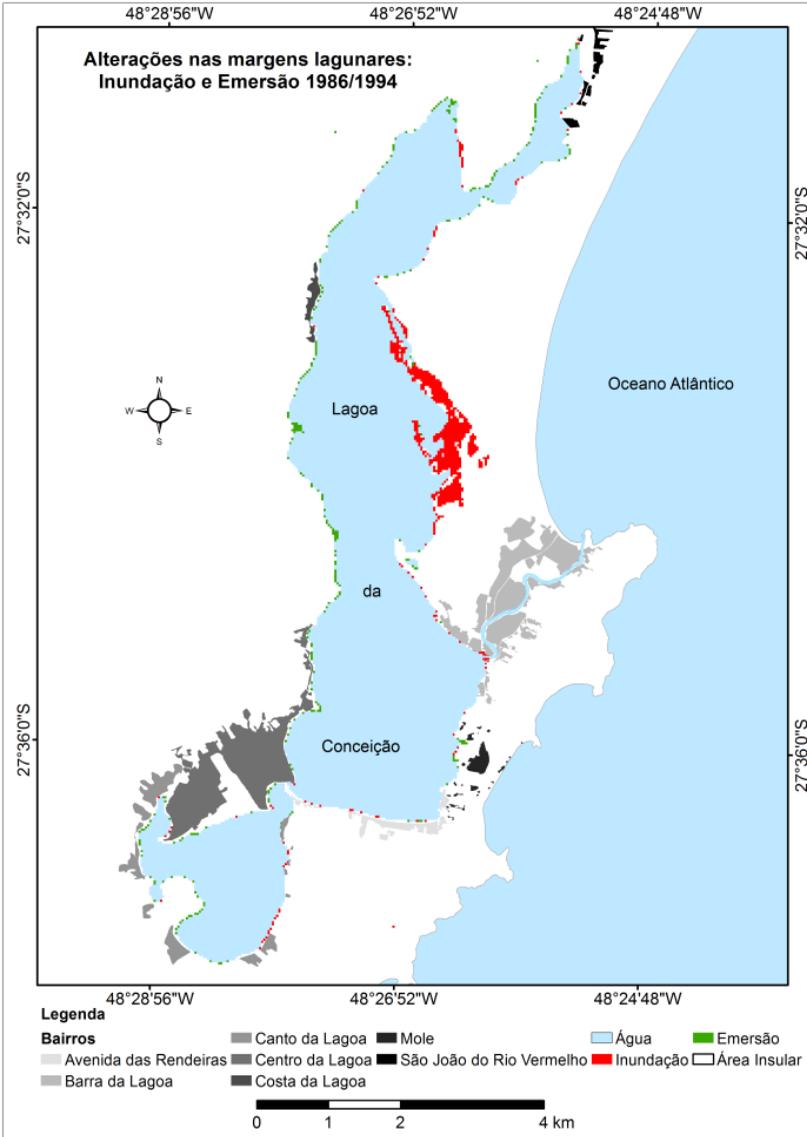
Analisando 1986/2011 e 2010/2011, o período final das duas análises realizadas, verifica-se maior inundação do que emersão. A primeira apresentou inundação de 0,66 km<sup>2</sup> e emersão de 0,27 km<sup>2</sup>, já a segunda 0,43 km<sup>2</sup> de inundação e 0,13 km<sup>2</sup> de emersão. Entre inundação e emersão ocorreu aumento da área lagunar em 2,02% e 1,51% para as duas análises, respectivamente. Aplicando uma análise de regressão linear constatou-se que não há um padrão temporal para as variações observadas nas duas análises, mas sim padrões locais de variação espacial.

Tabela 5. Inundação e emersão nas áreas marginais da Lagoa da Conceição entre 1986 e 2011.

Primeira Análise			Segunda Análise		
Comparação	Inundação (km <sup>2</sup> )	Emersão (km <sup>2</sup> )	Comparação	Inundação (km <sup>2</sup> )	Emersão (km <sup>2</sup> )
1986/1987	0,47	0,22	1986/1987	0,47	0,22
1986/1988	0,78	0,08	1987/1988	0,58	0,13
1986/1989	0,6	0,09	1988/1989	0,22	0,4
1986/1990	0,76	0,18	1989/1990	0,38	0,32
1986/1991	0,54	0,13	1990/1991	0,14	0,31
1986/1992	0,09	0,48	1991/1992	0,02	0,82
1986/1993	0,5	0,33	1992/1993	0,65	0,08
1986/1994	0,79	0,29	1993/1994	0,48	0,16
1986/1995	0,61	0,27	1994/1995	0,15	0,3
1986/1996	0,19	0,34	1995/1996	0,09	0,58
1986/1997	0,62	0,21	1996/1997	0,61	0,05
1986/1998	0,67	0,19	1997/1998	0,16	0,09
1986/1999	0,53	0,21	1998/1999	0,08	0,24
1986/2000	0,62	0,23	1999/2000	0,16	0,08
1986/2001	0,45	0,46	2000/2001	0,05	0,45
1986/2002	0,34	0,25	2001/2002	0,32	0,22
1986/2003	0,74	0,2	2002/2003	0,5	0,05
1986/2004	0,41	0,3	2003/2004	0,04	0,46
1986/2005	0,76	0,3	2004/2005	0,47	0,13
1986/2006	0,67	0,21	2005/2006	0,19	0,18
1986/2007	0,47	0,21	2006/2007	0,16	0,36
1986/2009	0,42	0,3	2007/2009	0,18	0,32
1986/2010	0,43	0,34	2009/2010	0,15	0,17
1986/2011	0,66	0,27	2010/2011	0,43	0,13
Média	0,55	0,25	Média	0,28	0,26
Desvio Padrão	0,18	0,10	Desvio Padrão	0,20	0,19
Máxima Variação	0,79	0,48	Máxima Variação	0,65	0,82
Mínima Variação	0,09	0,08	Mínima Variação	0,02	0,05

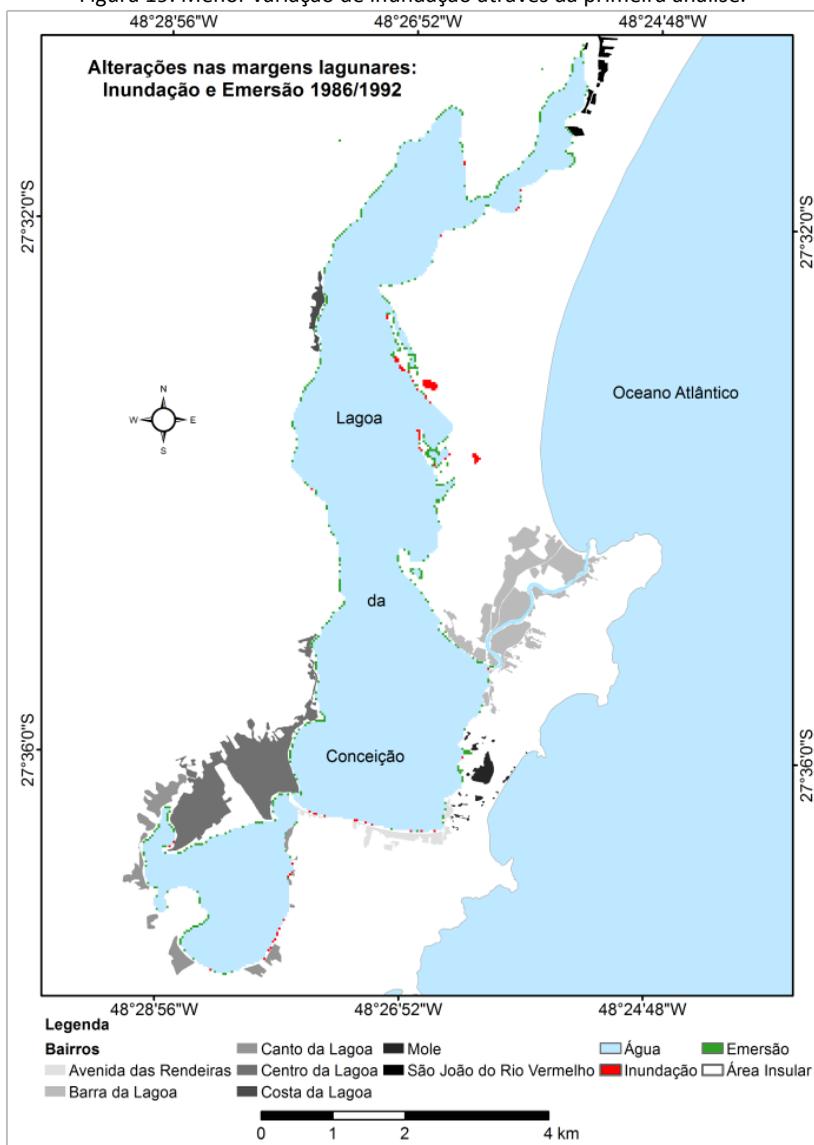
Seguindo a setorização proposta por Muehe e Caruso Gomes Jr. (1999), que divide a laguna em subsistemas sul, central e norte, foi possível identificar que as maiores inundações ocorreram sempre na margem leste e principalmente no subsistema central. Nas áreas próximas aos perímetros urbanos foram poucos os pixels classificados como área emersa e que se tornaram água. Entretanto, foram constatadas algumas alterações próximas a Avenida das Rendeiras e Centro da Lagoa, exatamente as áreas mais urbanizadas. Outra constatação é que a identificação das maiores inundações na margem leste, através das duas análises, foi seguida de emersão na margem oeste, também ocorrendo à mesma situação quando das menores inundações. As figuras 18, 19, 20 e 21 mostram as maiores e menores variações de inundação encontradas pelas duas análises.

Figura 18. Maior variação de inundação através da primeira análise.



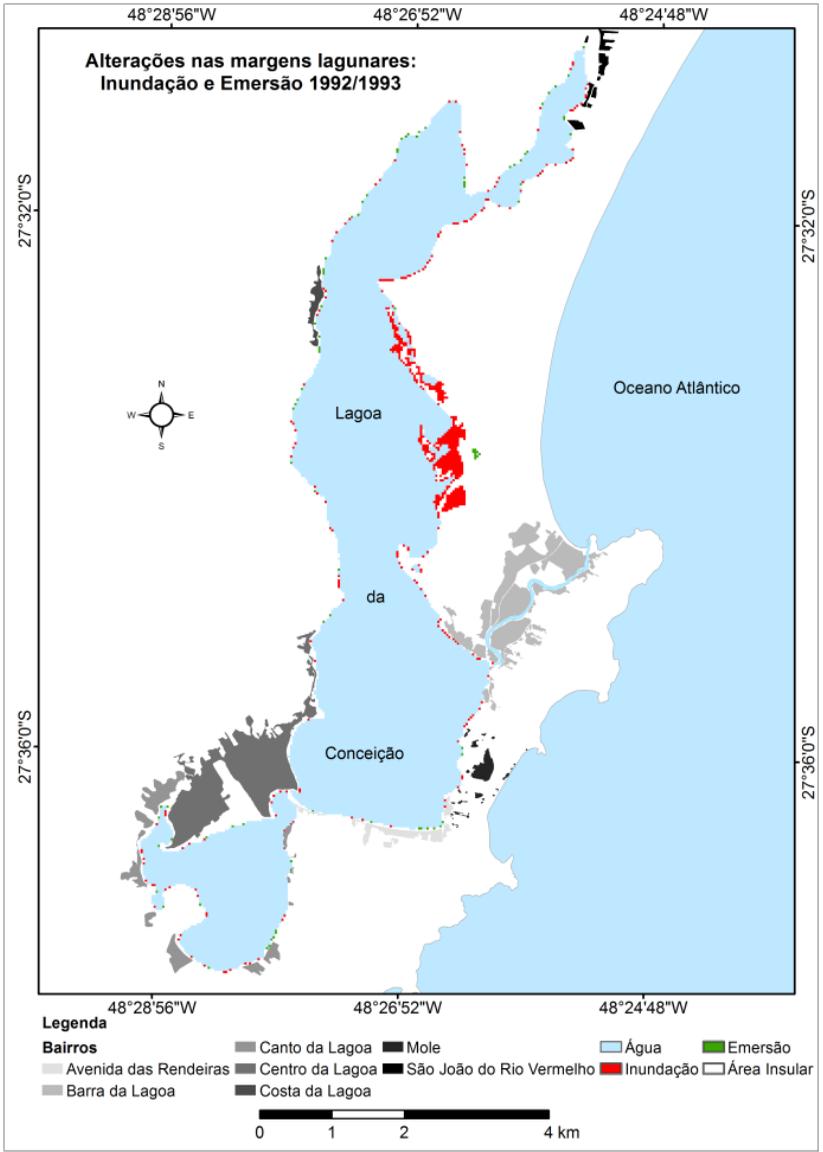
(Fonte: autor).

Figura 19. Menor variação de inundação através da primeira análise.



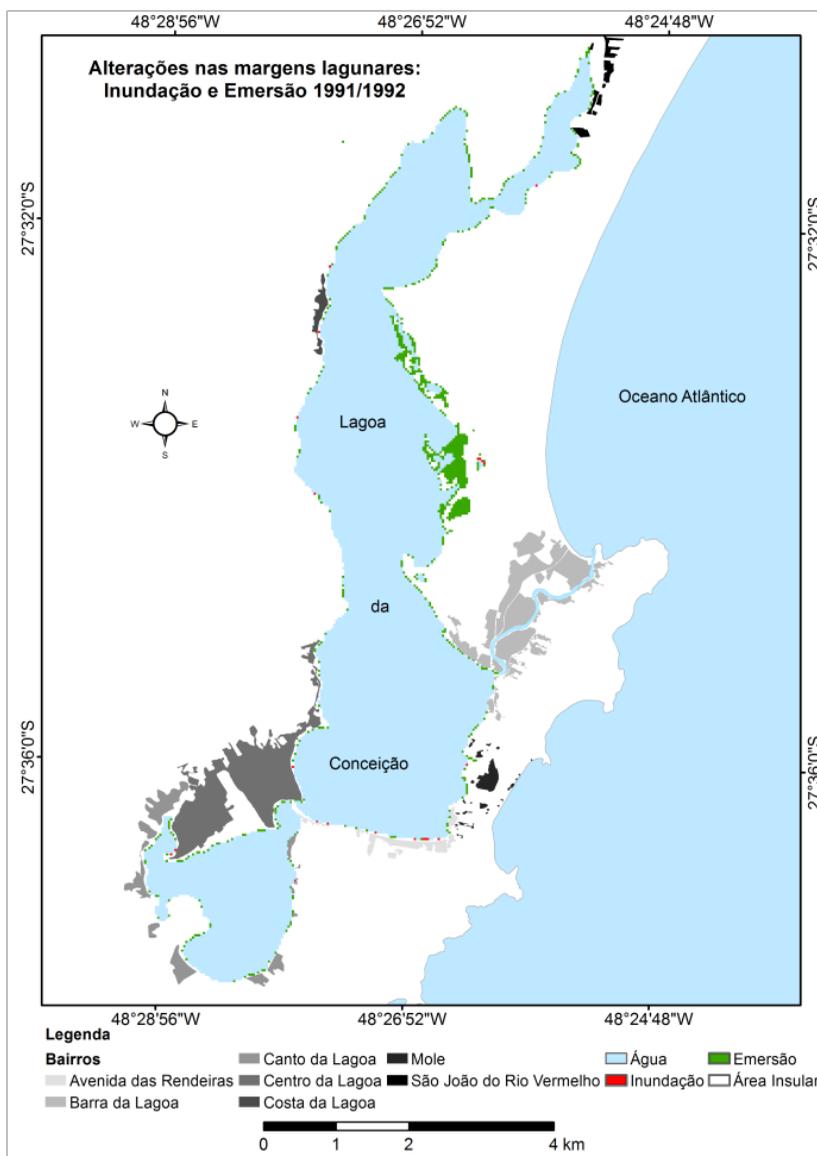
(Fonte: autor).

Figura 20. Maior variação de inundação através da segunda análise.



(Fonte: autor).

Figura 21. Menor variação de inundação através da segunda análise.

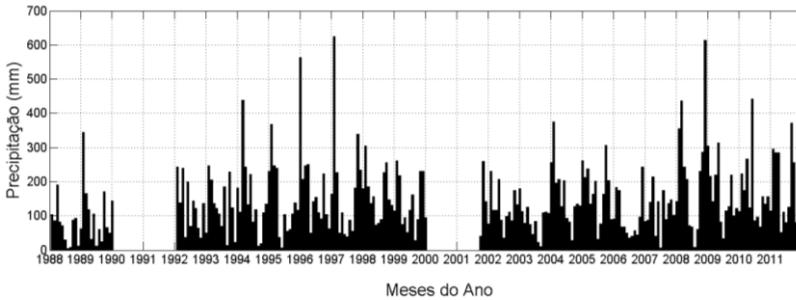


(Fonte: autor).

### 4.3.2 PRECIPITAÇÃO E IOS

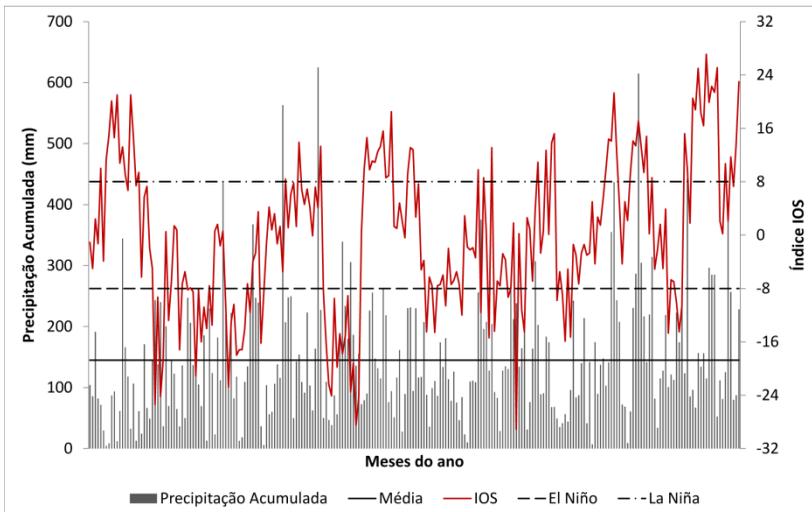
Os dados de precipitação disponibilizados pelo INMET possuíam falhas, não apresentando registro do acumulado diário e mensal para os anos de 1986, 1987, 1990, 1991, 2000 e 2001. Os dados disponíveis estão representados na figura 22. É possível identificar que ocorre menor precipitação nos meses de inverno, a exceção dos anos de 1999, 2007 e 2011. Comparando a série temporal do acumulado de precipitação mensal com os dados de IOS foi possível identificar que 17,3% dos meses de toda a série estavam sob influência de eventos de El Niño ou La Niña, com leve superioridade para El Niño (9,5%) (Fig. 23).

Figura 22. Acumulado de precipitação mensal para o período de análise.



(Fonte: autor).

Figura 23. Acumulado de precipitação mensal e o IOS para os respectivos meses.



(Fonte: autor).

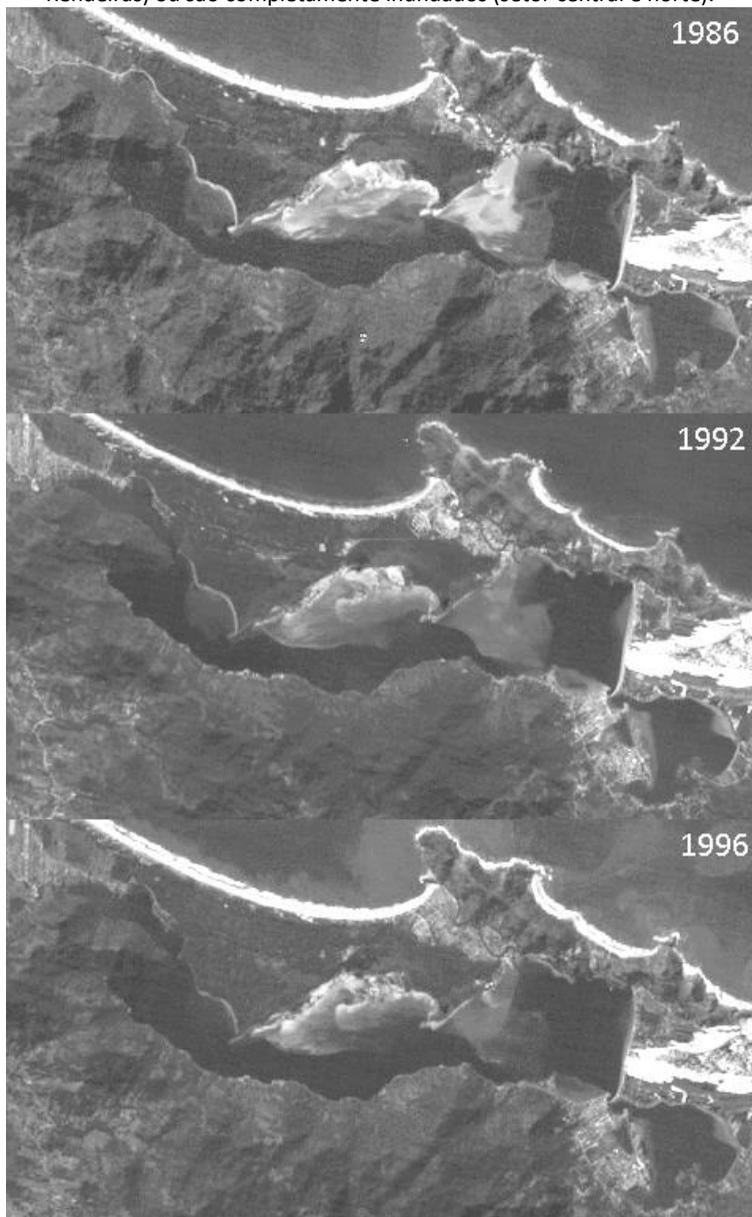
Comparando os dados de IOS com o valor médio acumulado de precipitação constatou-se que os eventos de La Niña causaram mais meses com precipitação acima da média. Dos 29 eventos de La Niña registrados no período a precipitação ficou acima da média em 65% dos casos, já dos 39 eventos de El Niño, 59% registraram acumulados de precipitação acima da média. Ao analisar as condições de precipitação nos meses de passagem do satélite e o IOS determinado ocorreu equiparação entre ocorrência de El Niño e La Niña (8 e 9 eventos, respectivamente).

#### **4.4 DISCUSSÃO**

A falta de dados históricos de nível do mar/lagunar dificulta a identificação de alterações no padrão das águas em corpos abrigados, além de explicações para alterações nas áreas marginais. O processamento digital de imagens orbitais permitiu mapear variações muito pequenas de inundação na região marginal da Lagoa da Conceição, onde foi verificado que o processo ocorreu principalmente no setor central/nordeste e central/sul (praia da Avenida das Rendeiras). Nestas áreas há formação de bancos arenosos e a emersão ou submersão pode estar condicionada a: 1) mínima variação do nível lagunar, e/ou 2) alterações na transparência da água (Fig. 24).

As áreas marginais da laguna possuem profundidades reduzidas, com alguns setores registrando de 0,10 a 1,00 m, além de um fundo lagunar arenoso e coluna d'água muito transparente. A Avenida das Rendeiras é uma destas áreas, possuindo a maior extensão de praia arenosa da área, além de um banco arenoso submerso. Martini et al. (2006), utilizando dados orbitais do satélite Landsat para determinar as concentrações de pigmentos de Clorofila<sub>a</sub> na laguna, precisaram excluir da sua análise as áreas com profundidades da lâmina d'água inferiores a 1m, devido a interferências de reflexão do fundo. Porém, estes autores utilizaram as bandas 1 e 2, em que é possível extrair informações referentes à qualidade da água, o que neste caso realmente interfere na quantificação de Clorofila<sub>a</sub>.

Figura 24. Banda 2 mostrando a variação que ocorre na margem leste da laguna nos anos de 1986, 1992 e 1994, onde segmentos praias diminuem (Praia das Rendeiras) ou são completamente inundados (setor central e norte).



(Fonte: autor).

Ao utilizar a banda do infravermelho próximo, a interferência de depósitos arenosos submersos é reduzida, como pode ser observado na figura 253. Mesmo em áreas com profundidades reduzidas a banda do infravermelho próximo não detecta o banco arenoso submerso, diferente da banda do visível/verde. Já a utilização das bandas do visível/azul e visível/verde permite determinar a concentração de sólidos em suspensão. De acordo com Novo (2001) e Jensen (2011) os sólidos em suspensão, a matéria orgânica dissolvida e os pigmentos fotossintetizantes são os principais componentes que afetam a absorção e o espalhamento da água.

Na Lagoa da Conceição ocorre baixa concentração de sólidos em suspensão, devido ao reduzido aporte de água continental para a laguna. A maior parte da entrada de água fluvial ocorre através de rios efêmeros, a exceção do rio João Gualberto Soares localizado no setor norte. A utilização das bandas do visível azul e verde além de mostrar a baixa concentração de sólidos em suspensão também permite mapear os bancos arenosos. Logo, a interferência na definição do limiar entre água/continente é minimizada pelo uso da banda que compreende a reflectância dos alvos no infravermelho próximo.

No setor sul da laguna os aspectos acima citados (bancos submersos e material em suspensão) não causam tanta influência na determinação das variações. Mesmo que as áreas próximas às margens sejam consideradas um ambiente arenoso com profundidades inferiores a 0,50m (RUDORFF et al., 2005) e a transparência da água também seja alta, este é o setor que possui maior recobrimento de fundo com vegetação. Isto diminui a possibilidade do mapeamento do fundo arenoso submerso.

Quanto a oscilações do nível lagunar, Sierra de Ledo e Soriano-Serra (1999), Andrade (2001) e Pereira (2004) afirmam que o canal que liga a laguna ao oceano possui grande influência na redução dos efeitos da maré na Lagoa da Conceição. Marés tanto de sizígia quanto de quadratura são reduzidas em até 95%, o que ocasiona variações de nível de apenas 0,05m. Além disso, são as marés meteorológicas que causam maior variação de nível (0,20m), mesmo que estas também sofram até 85% de redução.

Medições de nível realizadas em 50 dias consecutivos no ano de 2011 mostraram que o nível interno da laguna variou de -0,25m para

quase 0,30m positivo, uma oscilação de 0,55m (ODRESKI, 2012). São valores baixos, comprovando a forte capacidade que o canal tem em filtrar a onda de maré. Neste caso, a ação eólica é que exerce a função de controladora da hidrodinâmica local, através da geração de ondas superficiais e correntes por tensão de cisalhamento.

No setor central está localizado o trecho de margem lagunar que melhor caracteriza a ação do vento na imersão e emersão de depósitos arenosos. De acordo com Lélis (2006), ao longo dos 2 km da Praia das Rendeiras existem três setores praias, o oeste, o central e o leste. Quando o nível da água na laguna está alto, o pós-praia<sup>1</sup> fica todo submerso e a praia desaparece no setor central. Esta condição de submersão da faixa praial ocorre quando há ventos do Quadrante Norte, já a exposição destes depósitos ocorre quando há vento de Quadrante Sul. Segundo Nordstron (1992), os agentes principais da erosão em praias lagunares são as ondas geradas dentro do próprio sistema através dos ventos locais, das marés, do aumento do nível da água e das correntes induzidas por ondas.

Analisando os dados de IOS e precipitação mensal cogitou-se que pudesse haver uma correlação entre máximas inundações com eventos de El Niño e La Niña. Durante o período de análise ocorreram eventos de El Niño considerados fracos, moderados e fortes, assim como a mesma situação para La Niña. O evento El Niño causa aumento de precipitação para os meses de verão e inverno, além de influenciar a intensidade das ressacas que ocorrem no litoral sul do Brasil. Entretanto, com as baixas variações de inundação na área, além da falta de correlação entre os maiores eventos de precipitação com El Niño, também não foi possível identificar uma relação entre as variações identificadas com precipitação e IOS. Tanto no ano de 1990, com o mais forte El Niño do período, quanto no ano de 1991, com forte Lã Nina, ocorreram baixas variações. Já a maior variação, que ocorreu entre 1992/1993, foi registrada em anos sucessivos com forte Lã Nina.

---

<sup>1</sup> Pós-praia: zona que se estende do limite superior do espriamento até o início das dunas fixadas por vegetação ou qualquer outra mudança fisiográfica brusca (HOEFEL, 1973).

Figura 25. Reflectância dos alvos na faixa do visível/banda 2 (esquerda) e no infravermelho próximo/banda 4 (direita).



(Fonte: autor).

A explicação para a fraca correlação entre IOS e variações de inundação provavelmente ocorre pela resolução temporal do trabalho. A utilização de uma única imagem por ano reduz a tentativa de identificar alterações que possam ocorrer em curta escala, a partir das flutuações de nível lagunar. Além disso, a análise do campo de ventos predominante imediatamente antes da geração de cada imagem poderia auxiliar na compreensão do seu papel na variação de nível, dado o conhecido processo de basculamento das águas promovido pela alternância entre os ventos predominantes, que sopram de quadrantes opostos (Andrade, 2001).

Por fim, deve-se destacar o provável efeito de borda promovido pelo procedimento adotado. Considerando o tamanho do pixel das imagens utilizadas (30 x 30m) não se deve descartar a possibilidade de

algumas das pequenas variações de nível positivo e negativo identificadas ser resultado de artifícios gerados pela dificuldade de uma determinação mais precisa do limite lagunar.

#### **4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este capítulo avaliou o processo de inundação das áreas próximas às margens da Lagoa da Conceição, usando de forma integrada imagens orbitais do TM/Landsat 5 e técnicas de processamento digital de imagens. Os resultados permitiram tecer as seguintes considerações finais:

- O método para determinação das áreas inundadas mostrou ser parcialmente satisfatório, a fim de identificar possíveis alterações em ambientes abrigados quanto à oscilação do nível lagunar.

- A escala temporal geral de 25 anos foi coerente, visto que foram utilizadas imagens dos dias atuais até a década de 80 do século passado.

- Os resultados permitiram identificar baixas variações na área de estudo, inicialmente explicada pela característica hidrodinâmica do sistema lagunar que apresenta baixa variação de nível.

- Não foi possível identificar uma tendência clara de variação de nível próximo aos núcleos urbanos, não obstante um número restrito de pixels esteja sugerindo que isso possa estar ocorrendo.

- No trecho central/nordeste, por ser uma área já alagadiça, o processo de inundação ocorre com relativa facilidade, mesmo com pequenas oscilações de nível.

- Não foi possível definir uma correlação entre variação de áreas inundadas com precipitação e IOS, pois a resolução temporal não foi a mais adequada.

- Dados de vento local e nível da maré nos períodos de geração das imagens poderiam contribuir para uma melhor interpretação dos resultados obtidos.

- Imagens com melhor resolução espacial seriam necessárias para obtenção de um resultado mais efetivo, considerando-se a pequena extensão dos aglomerados urbanos que ocorrem no local.

## **5 VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO RESIDENTE ÀS MARGENS DA LAGOA DA CONCEIÇÃO FRENTE À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

A vulnerabilidade, segundo este trabalho, está relacionada ao risco social, ou à condição de vida da população, que os centros urbanos da bacia hidrográfica terão caso a susceptibilidade da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar ocorra (vulnerabilidade social). Neste capítulo será elaborado um Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo) à elevação do nível do mar, apresentando a metodologia, os resultados e discussão referentes ao processo de modelagem espacial para definição da vulnerabilidade social da Lagoa da Conceição.

### **5.2 METODOLOGIA**

A figura 26 mostra o fluxograma com a estrutura metodológica para criação do Índice de Vulnerabilidade Social. A caracterização populacional e domiciliar são requisitos necessários para identificar como ocorre a distribuição da população na área de estudo, assim como a infraestrutura dos domicílios. Utilizando metodologia específica que permita cruzar variáveis relacionadas a estes tópicos é possível determinar um índice que mensure a vulnerabilidade social a diversos riscos, como a elevação do nível do mar. Para isso uma das principais bases de dados existente no Brasil está disponível no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Neste trabalho os dados do censo demográfico de 2010 do IBGE foram computados a partir da análise das informações disponibilizadas para os setores censitários, considerada a menor unidade territorial, formada por área contínua, integralmente contida em área urbana ou rural do país (IBGE, 2011). Estes dados denominados Resultados do Universo contêm características dos domicílios particulares e das pessoas residentes.

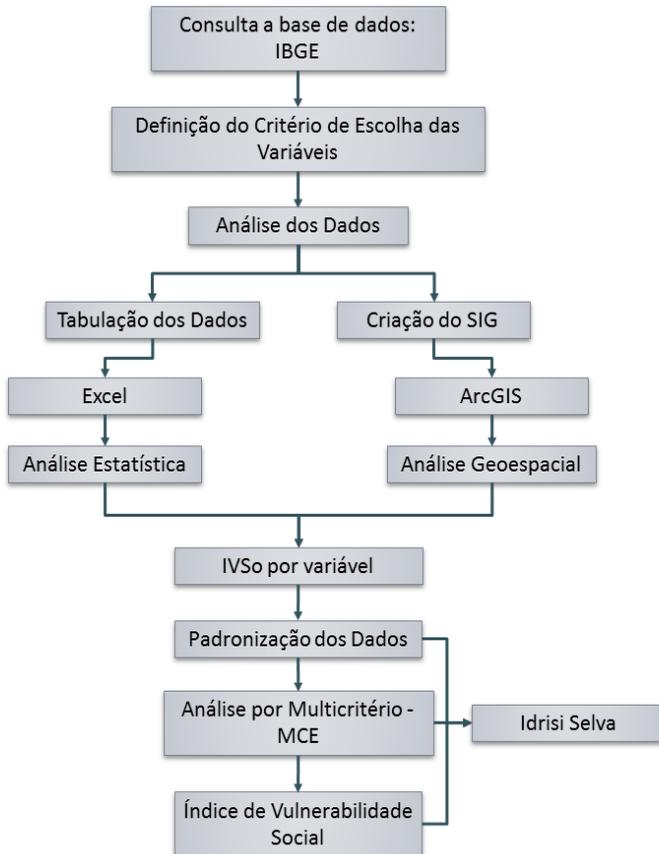
Para determinar quais seriam os setores censitários utilizados na pesquisa primeiramente foram identificados quais distritos<sup>2</sup> estavam

---

<sup>2</sup>São unidades administrativas dos municípios. Sua criação, desmembramento ou fusão dependem de leis municipais, que devem observar a continuidade territorial e os requisitos previstos em lei complementar estadual. Podem ser subdivididos em unidades administrativas denominadas subdistritos, regiões administrativas, zonas ou outra denominação específica (IBGE, 2010).

localizados na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC). Após esta verificação foram identificados e selecionados os setores censitários, e assim tabulados e analisados os dados da Base de informações do Censo Demográfico 2010 (Resultados do Universo por setor censitário). Estes dados ficam disponíveis no site do IBGE ([ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo\\_Demografico\\_2010/Resultados\\_do\\_Universo/xls/Municipios/santa\\_catarina.zip](ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/xls/Municipios/santa_catarina.zip)).

Figura 26. Fluxograma com a estrutura metodológica para criação do IVS.



(Fonte: autor).

Existem diversas variáveis disponíveis para análise no IBGE, sendo necessário definir um critério para escolher quais serão utilizadas, a fim de construir o Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo). Essas variáveis muitas vezes são redundantes, tornando a análise

demorada e sem um resultado mais refinado. De acordo com Yoon (2012) dois questionamentos devem ser realizados antes de criar um IVSo: 1) como devem ser selecionadas as variáveis a fim de criar um índice de vulnerabilidade? e 2) uma vez selecionadas como estas variáveis serão combinadas para formar o índice?

Algumas pesquisas, como as de Cutter (1996) e Cutter et al. (2000) tentaram identificar o que influencia uma determinada parcela da sociedade a um risco eminente, e assim determinar a vulnerabilidade social. Nestas análises a ideia de indivíduos fracos, edifícios fracos e infra-estrutura são levadas em consideração. Com isso, certas características demográficas e habitacionais influenciam na maximização ou redução da vulnerabilidade social.

Para Blaikie et al. (1994), Twigg (2001) e Downing e Patwardhan (2004) a vulnerabilidade social tem que considerar diversos indicadores, como: idade, sexo, renda, desemprego, dependência de serviços sociais, condições de moradia, infra-estrutura (serviços médicos), ocupação, educação, a dicotomia urbano-rural e o crescimento da população. Entretanto, quais indicadores serão utilizados parte de uma análise subjetiva, além da disponibilidade dos dados e de suas precisões.

Além disso, é necessário entender a escala temporal e espacial do evento (KIENBERGER et al., 2013), pois a escolha de variáveis para criação de um IVS a eventos extremos, como furacões, que ocorre numa escala temporal de horas a dias, será diferente para a determinação de um índice de vulnerabilidade social à elevação do nível do mar, que opera numa escala temporal de década a século.

Dentre as diversas variáveis utilizadas em trabalhos publicados sobre IVSo a maioria utiliza o número total de pessoas, número de residências, número de pessoas com acesso diferenciado aos recursos e maior susceptibilidade devido à fraqueza física (faixas etárias específicas, como menores de 5 anos, até 18 anos e acima de 65 anos) e a renda familiar que define a riqueza ou pobreza (CUTTER et al., 2000; YOON, 2012; FELSENSTEIN e LICHTER, 2014; ZHOU et al., 2014).

Com isso, levando em consideração que a escala temporal do trabalho é de década a século, os indicadores definidos para análise neste trabalho foram: população residente total; domicílios particulares permanentes; média de moradores nos domicílios

particulares permanentes; renda domiciliar média per capita no domicílio particular permanente; renda domiciliar entre 1/2 e 1/4 de salário mínimo e renda domiciliar entre 1/4 e 1/8. A identificação da população por faixa etária não foi realizada, pois estas possuem maior relação com eventos extremos que atuam entre escala temporal horária e diária.

Dados de infra-estrutura domiciliar básica, como esgotamento sanitário por rede geral, abastecimento de água por rede geral e energia elétrica, muito utilizados na criação de IVSo, não foram adotados nesta pesquisa. Esta escolha partiu da análise dos dados, mostrando que nem todos os setores censitários possuíam estas informações (setores rurais). Logo, a aplicação de um índice que excluísse estes setores não seria a melhor alternativa.

Com a tabulação dos dados finalizada a próxima etapa consistiu em criar uma base de dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permitisse associar cada informação por setor censitário (dados não espaciais) à sua representação espacial (dados espaciais). Para isso foi utilizada a plataforma ArcGIS, que permite criar e gerenciar dados geográficos, além de criar mapas para análise das informações.

A base cartográfica com os dados espaciais que representam todos os setores censitários da área de estudo (polígonos), e necessária para construir um SIG, já existe no próprio site do IBGE, onde todos os municípios de Santa Catarina estão divididos em setores censitários ([ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas\\_digitais/censo\\_2010/setores\\_censitarios/sc.zip](ftp://geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/censo_2010/setores_censitarios/sc.zip)).

Analisando os setores censitários na BHLC constatou-se as seguintes situações: 1) nem todos possuem ligação direta com a LC; 2) alguns possuem reduzida área de contato com a LC; 3) a área do setor é muito grande, porém apresenta baixa intersecção com a LC. Por esta razão foram adotadas as seguintes estratégias para seleção e edição dos setores censitários: 1) apenas setores censitários que possuem ligação direta com a LC foram selecionados (intersecção); 2) a representação das variáveis foi realizada através da feição linha e não polígono, como são os setores censitários.

A decisão de utilizar a feição linha ao invés do polígono surgiu a partir da proposta de Serafim (2014), por identificar que os polígonos

dos setores censitários na sua área de estudo apresentavam diferentes áreas e formatos, causando maior concentração de área nas adjacências da linha de costa ou maior área deslocada em direção ao interior do continente. Logo, a autora utilizou apenas a parte dos polígonos que estavam em contato com a linha de costa, realizando uma transformação na escala de valores, aplicando a equação (6) que também será aqui reproduzida:

$$y = \frac{x}{a+b} \quad (9)$$

onde y = valor da variável ajustado, x = valor original da variável, a = comprimento do setor censitário em contato com a LC (metros) e b = área do setor censitário.

Após a transformação na escala de valores foi criado um índice de vulnerabilidade para cada variável/fator. Este índice foi definido separando os valores em cinco intervalos a partir do cálculo dos percentis. Por exemplo, para a variável população o primeiro e quinto percentis representam os intervalos com menor e maior número de pessoas, respectivamente, logo sendo definida uma vulnerabilidade muito baixa e muito alta. A única variável que é inversa a esta lógica é a renda, pois o intervalo definido com menor renda é o mais vulnerável, assim como o com maior renda o menos vulnerável. A tabela 6 mostra como os percentis serviram como base para determinar o índice de vulnerabilidade por variável/fator.

Após definidos os índices de vulnerabilidade por variável/fator foi definido o Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo). Para a confecção do mapa de vulnerabilidade foram aplicadas rotinas de apoio à decisão disponíveis no programa Idrisi Selva®. O processo de tomada de decisão em geoprocessamento envolve vários conceitos (HASENACK et al., 1998):

- 1) de decisão - escolha de alternativas baseada em algum critério;
- 2) de critério - alguma base mensurável e avaliável para uma decisão, podendo ser um fator ou uma restrição;
- 3) de fator – realça ou ameniza a aptidão de uma alternativa específica para um propósito em consideração;
- 4) de restrição – limita as alternativas em consideração.

Tabela 6. Definição dos índices de vulnerabilidade por variável através dos percentis.

Percentis	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)
Primeiro	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Baixa
Segundo	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Terceiro	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Quarto	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta	Alta
Quinto	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Alta

(Fonte: autor).

Siglas: (A) População Residente, (B) Domicílios Particulares Permanentes, (C) Média de Moradores por Domicílio Particular Permanente, (D) Renda Domiciliar Média per capita no Domicílio Particular Permanente, (E) % de Domicílios com Renda Domiciliar por Faixa Salarial (de  $\frac{1}{4}$  até  $\frac{1}{2}$ ) e (F) % de Domicílios com Renda Domiciliar por Faixa Salarial (até  $\frac{1}{4}$ ).

Para definir o grau de vulnerabilidade social da LC a elevação do nível do mar foi realizado um procedimento que permitiu combinar os critérios utilizados. Em geoprocessamento é possível atribuir peso aos fatores envolvidos na análise de modo a ponderar a informação de cada variável na análise desejada, o que pode ser feito fácil e rapidamente, diminuindo assim a subjetividade no processo de decisão (HASENACK et al., 1998).

De acordo com Eastman (2010) a avaliação por critérios múltiplos é um método muito utilizado para avaliar e agregar muitos critérios. O método de agregação de critérios múltiplos utilizado foi o de combinação linear ponderada, onde os fatores são padronizados para uma escala contínua que permita mensurar a vulnerabilidade social a elevação do nível do mar. Como existem cinco classes de vulnerabilidade, já descritas na tabela 6, foi aplicada uma técnica para ampliar os valores para uma escala que fosse de 0 a 255. Com isso os dados foram padronizados, permitindo que o modelo pudesse realizar os cálculos necessários. Para isso utilizou-se o módulo *Stretch* do programa Idrisi Selva. Quanto mais próximo de 255 o valor estiver, mais vulnerável determinada parcela do espaço será. Sendo assim, a tabela 7 descreve como foram separados os intervalos de classe a partir da escala de 0 a 255, assim como a nomenclatura de cada classe.

Tabela 7. Definição dos intervalos de classe e suas respectivas nomenclaturas.

Intervalo de Classe	Nomenclatura da Classe
0 a 51	Muito Baixa
52 a 102	Baixa
103 a 153	Média
154 a 204	Alta
205 a 255	Muito Alta

(Fonte: autor).

A combinação linear ponderada permite não apenas reter toda a variabilidade dos dados, mas também a possibilidade dos fatores serem compensados entre si. Um escore de baixa vulnerabilidade em um fator, para uma área qualquer, pode ser compensado por um de alta em outro fator. A forma como ocorre à compensação de um fator com outro foi determinada por um conjunto de pesos dos fatores que indicam a importância relativa de cada variável.

Esta é uma técnica baseada nas médias e que coloca a análise exatamente a meio caminho dos mínimos e máximos, isto é, nenhum risco extremo e nenhum extremo de aversão ao risco como ocorre na análise *booleana* (TAGLIANI, 2002, DE OLIVEIRA, 2005). Para Weber e Hasenack (2000) esta técnica permite criar vários cenários de acordo com o objetivo da pesquisa, o que destaca a potencialidade desta ferramenta na tomada de decisão.

Com os fatores definidos o próximo passo foi utilizar um método de agregação que considerou todos os fatores padronizados ao mesmo tempo, para atingir o resultado final – o mapa de vulnerabilidade social a elevação do nível do mar. O método de combinação linear ponderada (rotina MCE – *Multi-Criteria Evaluation*) do conjunto de apoio à decisão permitiu reter toda a variabilidade dos dados, além da possibilidade de compensação entre os fatores através de um conjunto de pesos que indicam a importância relativa de cada fator (EASTMANN, 2009). Cada elemento da matriz indica quanto o fator da coluna da esquerda é mais importante que o fator correspondente na linha superior. Foi utilizada a técnica *Analytical Hierarchy Process* (AHP), desenvolvida por Saaty (1977), que permite estabelecer relações comparativas entre as

variáveis/fatores. Esta comparação entre as variáveis/fatores leva em consideração a Escala de Saaty (1977), descrita na tabela 8.

Tabela 8. Escala de comparadores de Saaty (1977).

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
(A)	(B)	(C)	(D)	Igual	(A)	(B)	(C)	(D)
Menos Importante					Mais Importante			

(Fonte: autor).

Legenda: (A) Extremamente, (B) Muito Fortemente, (C) Fortemente e (D) Moderadamente.

Para que todos os fatores fossem ponderados utilizou-se a técnica de comparação pareada da rotina Weight, onde cada fator foi comparado aos demais por meio de uma matriz (Tab. 9), levando-se em conta a importância relativa para a vulnerabilidade. Com isso, foi atribuído subjetivamente um peso para cada variável/fator, como pode ser visualizado na tabela 10. Esta técnica AHP é muito utilizada na criação de índices de vulnerabilidade, como por Tagliani (2002), Pereira (2005), Le Cozannet et al. (2013), Murali et al. (2013), Mahapatra et al. (2015) e Nguyen e Woodroffe (2016).

Tabela 9. Matriz de comparação pareada entre os fatores.

Fatores	Pessoas	Domicílios	Média de Moradores	Renda Domiciliar	% Renda até 1/2	% Renda até 1/4
Pessoas	1					
Domicílios	1/3	1				
Média de Moradores	3	3	1			
Renda Domiciliar	3	3	1	1		
% Renda até 1/2	5	5	3	3	1	
% Renda até 1/4	7	7	5	5	1	1

(Fonte: autor).

Tabela 10. Peso calculado para cada fator na análise do índice vulnerabilidade social

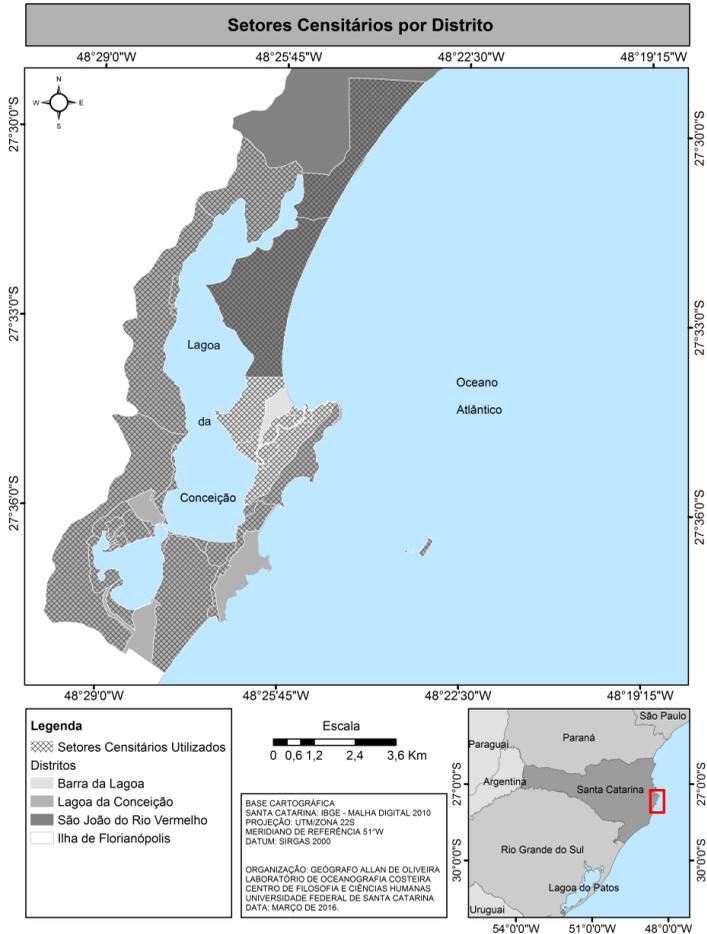
Fatores	Pesos
Pessoas	0,0579
Domicílios	0,0392
Média de Moradores	0,1095
Renda Domiciliar	0,1095
% Renda até 1/2	0,2915
% Renda até 1/4	0,3924

(Fonte: autor).

### 5.2.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o IBGE existem três distritos localizados na BHLC, sendo eles Barra da Lagoa, Lagoa da Conceição e São João do Rio Vermelho. Ao todo, de acordo com a malha municipal elaborada pelo IBGE para estruturação do Censo Demográfico 2010, existem 50 setores censitários na área de estudo, sendo 10 na Barra da Lagoa, 25 na Lagoa da Conceição e 15 em São João do Rio Vermelho.

Figura 27. Localização dos setores censitários por distrito utilizados para o cálculo do IVS.



(Fonte: autor).

Com o cálculo da extensão das margens da LC mais Canal da Barra da Lagoa, que totalizou 51,08 km, foram identificados quais setores censitários possuem contato com a LC (intersecção). Com isso o número de setores censitários foi reduzido para 27, sendo 7 na Barra da Lagoa, 18 na Lagoa da Conceição e 2 em São João do Rio Vermelho. Destes o setor que possui maior contato com a LC está em São João do Rio Vermelho (7,4 km), já o menor na Lagoa da Conceição (0,3 km), demonstrando um alto desvio padrão e a necessidade de aplicar uma

transformação na escala de valores. A figura 27 localiza todos os setores censitários na área de estudo e quais interseccionam a LC.

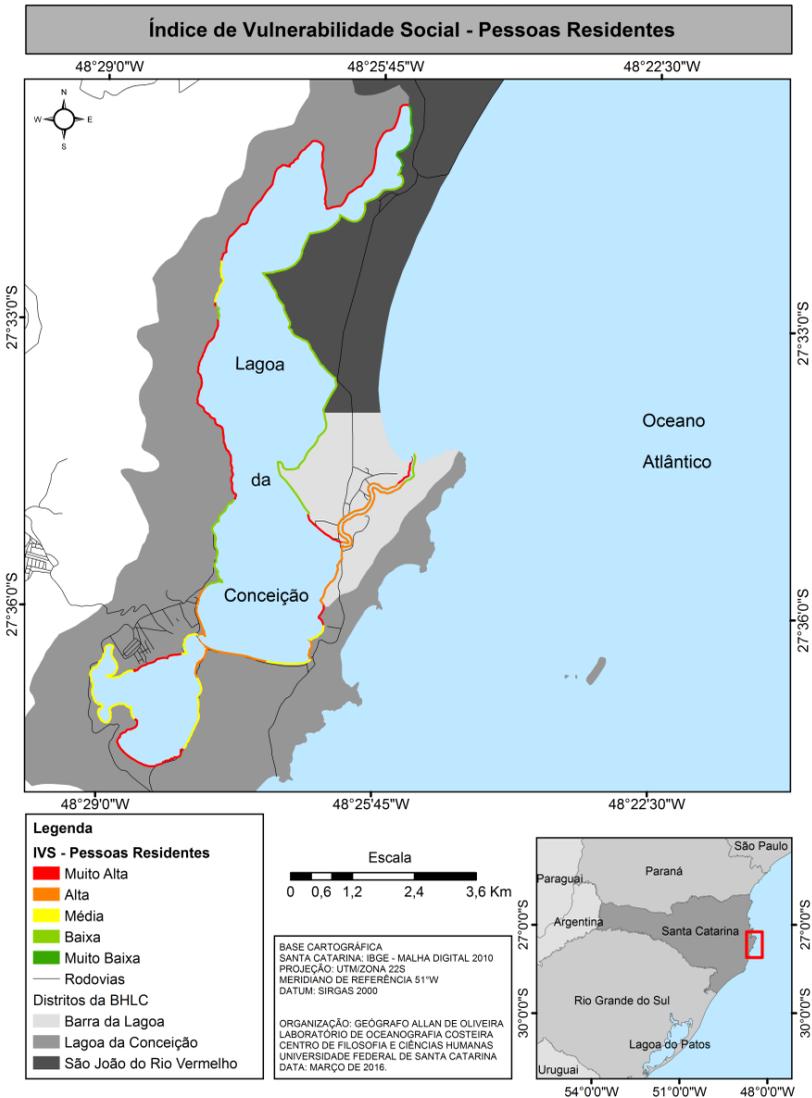
#### **5.2.1.1 POPULAÇÃO RESIDENTE**

Em 2010 a população residente na área da BHLC totalizou 30998 pessoas, que representam 7,4% da população de Florianópolis. Os setores com as maiores concentrações de pessoas nesta área ficam em São João do Rio Vermelho, com 3,18% a 4,69%, já os setores com as menores concentrações ficam na Barra da Lagoa e Lagoa da Conceição (0,01% a 0,58%).

Quando se analisam os setores censitários localizados próximos às margens lagunares, constata-se que no sul da laguna estão os setores censitários com maior número de pessoas, sendo estes do distrito Lagoa da Conceição (1,23% a 3,17%). Já na Barra da Lagoa a maior concentração de pessoas está localizada ao longo das margens de todo canal da Barra da Lagoa, que chegam a ter também de 1,23% a 3,17%.

Analisando o IVS para população residente apenas um setor foi considerado com vulnerabilidade muito baixa, localizado em São João do Rio Vermelho. Este setor é um dos maiores em área territorial, mas com pouca concentração de pessoas. Já com vulnerabilidade muito alta a alta foram identificados treze setores, destes sete com IVS muito alto e seis alto. Quando se analisa os distritos nenhum dos setores de São João do Rio Vermelho apresentou estes índices, e a maioria estava no distrito Lagoa (oito setores) (Fig. 28).

Figura 28. Índice de Vulnerabilidade Social para Pessoas Residentes.



(Fonte: autor).

### 5.2.1.2 DOMICÍLIOS PARTICULARES E MÉDIA DE MORADORES

No censo de 2010 foram identificados ao todo 14957 domicílios na BHLIC. Assim como na população residente, o maior número de domicílios está localizado em São João do Rio Vermelho, também sendo observadas as maiores médias de moradores por domicílio. No Distrito Lagoa da Conceição também foram encontrados setores censitários com as maiores médias de moradores por domicílio, principalmente na região denominada central.

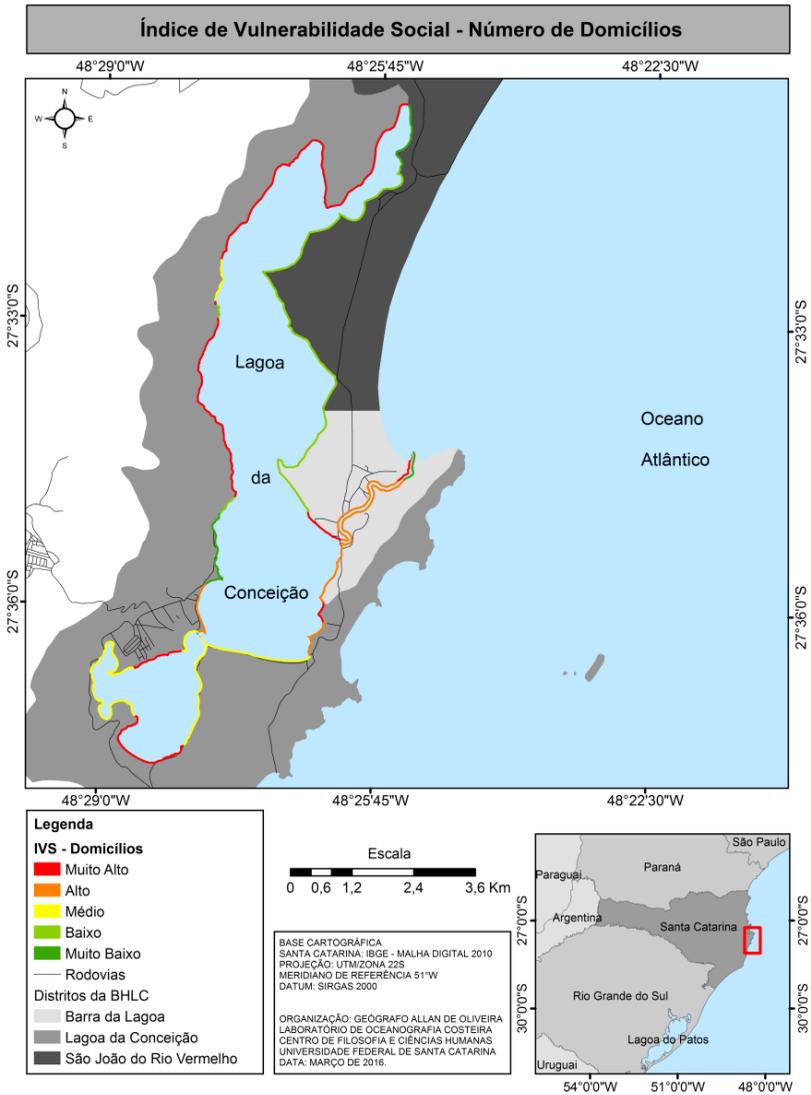
Porém, quando comparamos o número de domicílio com a área dos setores censitários constata-se alteração neste cenário. Na área sul da laguna ocorre o maior número de domicílios, numa faixa que pode ficar entre 25 a 42 (distrito Lagoa da Conceição). Situação semelhante ocorre às margens do canal da Barra da Lagoa, assim como na Avenida das Rendeiras, ambas na área central da laguna.

Analisando o IVS para domicílios ocorre um setor com vulnerabilidade muito baixa para cada distrito, e similar ao IVS para população residente treze setores foram classificados como de muito alta a alta vulnerabilidade (oito no distrito Lagoa e cinco no Barra da Lagoa). Novamente, o distrito de São João do Rio Vermelho não apresentou índices de vulnerabilidade superiores a baixo (Fig. 29).

Quando se analisa a média de moradores por domicílio apenas um setor em toda área de estudo apresentou IVS muito baixo, localizado em São João do Rio Vermelho. Na análise de todos os setores apresentaram IVS muito alto a alto, mas desta vez dez no distrito Lagoa e três na Barra da Lagoa (Fig. 30).

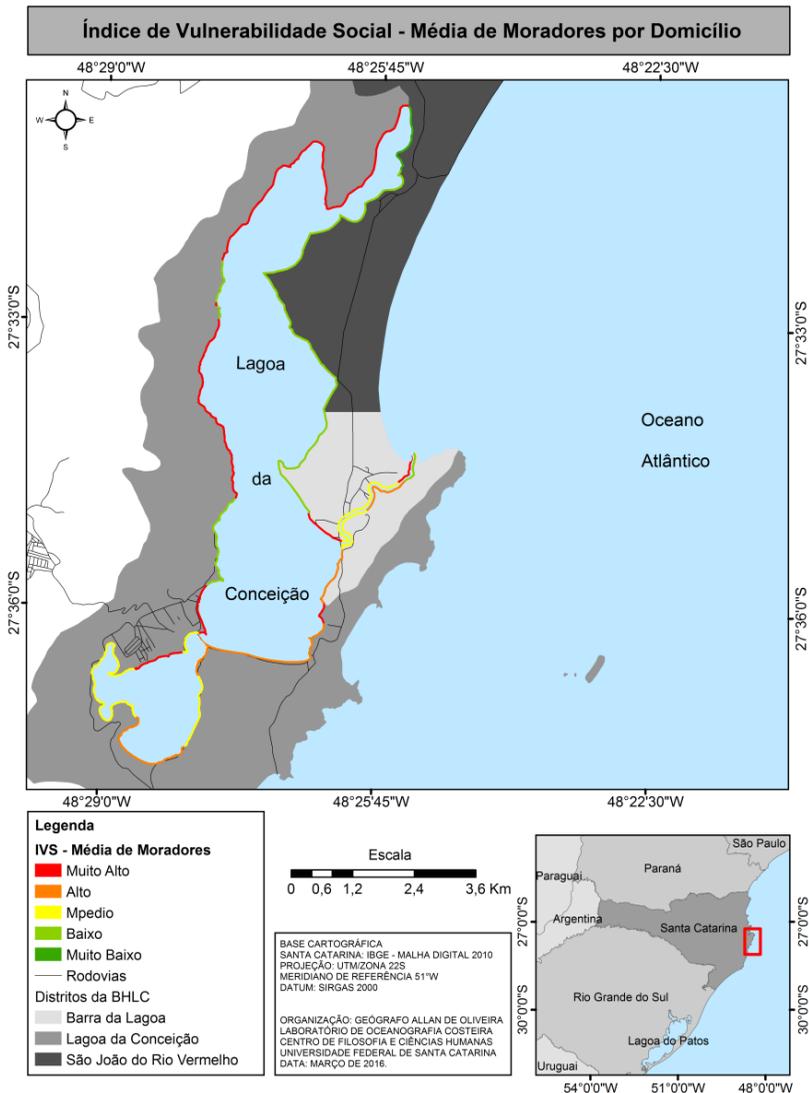
Pode-se observar comparando as figuras 29 e 30 que ao longo das margens do Canal da Barra o IVS para domicílios é alto, porém quando se analisa a média de moradores este índice se torna de média vulnerabilidade, situação inversa para a área da Avenida das Rendeiras. No setor sul da LC também é possível observar que alguns setores com IVS muito alto para o fator domicílios tornam-se de vulnerabilidade média, já alguns setores permaneceram com as mesmas características.

Figura 29. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator número de domicílios.



(Fonte: autor).

Figura 30. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator média de moradores por domicílio.



### 5.2.1.3 RENDA DOMICILIAR

Analisando o rendimento médio per capita dos domicílios por setor censitário constatou-se que em média os domicílios tinham uma renda de R\$2357,00, com valor mais baixo e alto localizado no distrito Lagoa (R\$1688,47 e R\$9758,51, respectivamente). Ao todo, dezoito setores possuíam renda domiciliar acima da média calculada. Destacavam-se, com valores mais elevados, os domicílios localizados as margens da área sul da laguna, assim como na Avenida das Rendeiras e margens do Canal da Barra.

Analisando o IVSo para o fator Renda Domiciliar, e aplicando a transformação na escala de valores, sete setores foram classificados como de vulnerabilidade muito baixa (seis na Lagoa e um na Barra da Lagoa), mesmo número de setores classificados como de alta a muito alta vulnerabilidade (dois em São João do Rio Vermelho, três na Lagoa da Conceição e três na Barra da Lagoa) (Fig. 31).

Porém, ao analisar a porcentagem de domicílios por faixa salarial (IBGE, 2011) foi possível verificar forte desigualdade entre renda média per capita e faixa salarial domiciliar. Foi identificado que a faixa salarial que possuía o maior número de domicílios era a de 1 a 2 salários mínimos, sendo que em 2010 o salário mínimo era de R\$510,00. Esta situação ocorria nos domicílios localizados às margens da área sul da laguna, na Avenida das Rendeiras, margens do Canal da Barra da Lagoa e em São João do Rio Vermelho.

Analisando a porcentagem de domicílios que possuem faixa salarial de até  $\frac{1}{2}$  e até  $\frac{1}{4}$  de salário mínimo, e que por isso caracterizam domicílios com insuficiência de renda, foi possível constatar que toda área de estudo possuía esta má distribuição de renda. Com isso, setores que apresentaram IVSo para renda média per capita baixa a muito baixa tiveram IVSo para faixa salarial domiciliar alta a muito alta, como pode ser observado nas figuras 32 e 33.

Figura 31. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator Renda Domiciliar Média Per Capita.

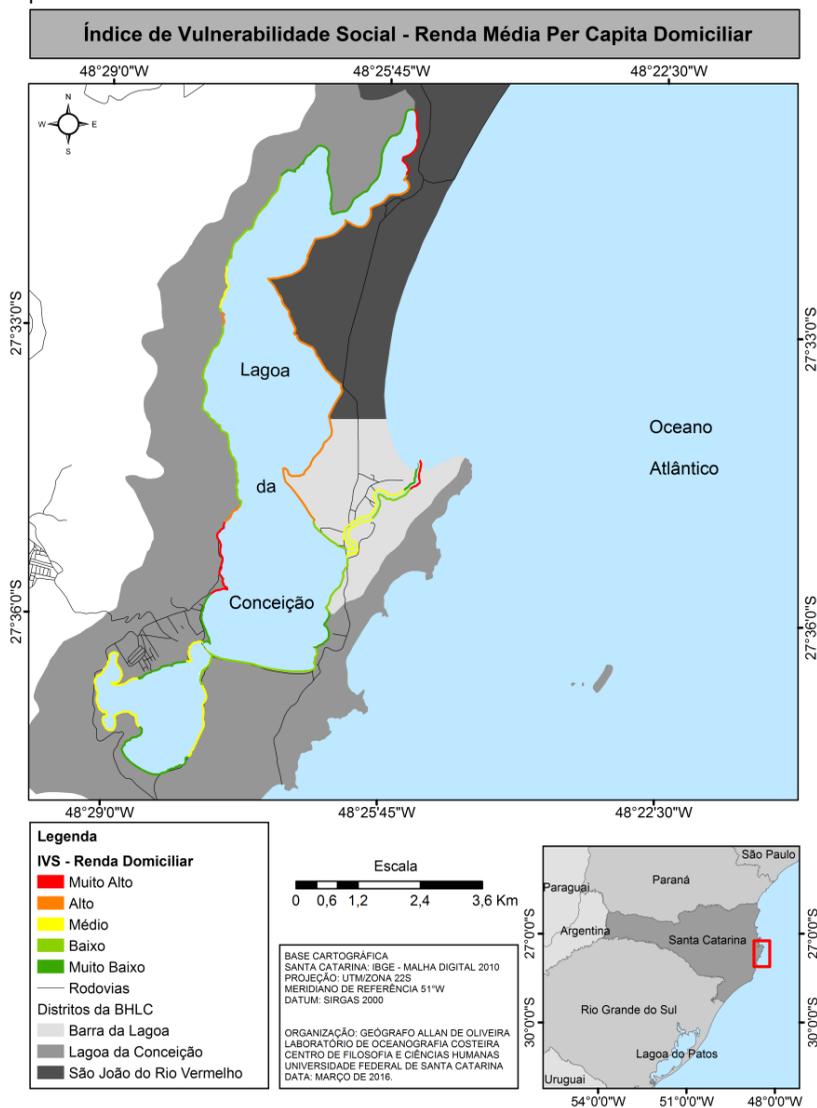


Figura 32. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator % de domicílios com renda de até 1/2 salário mínimo.

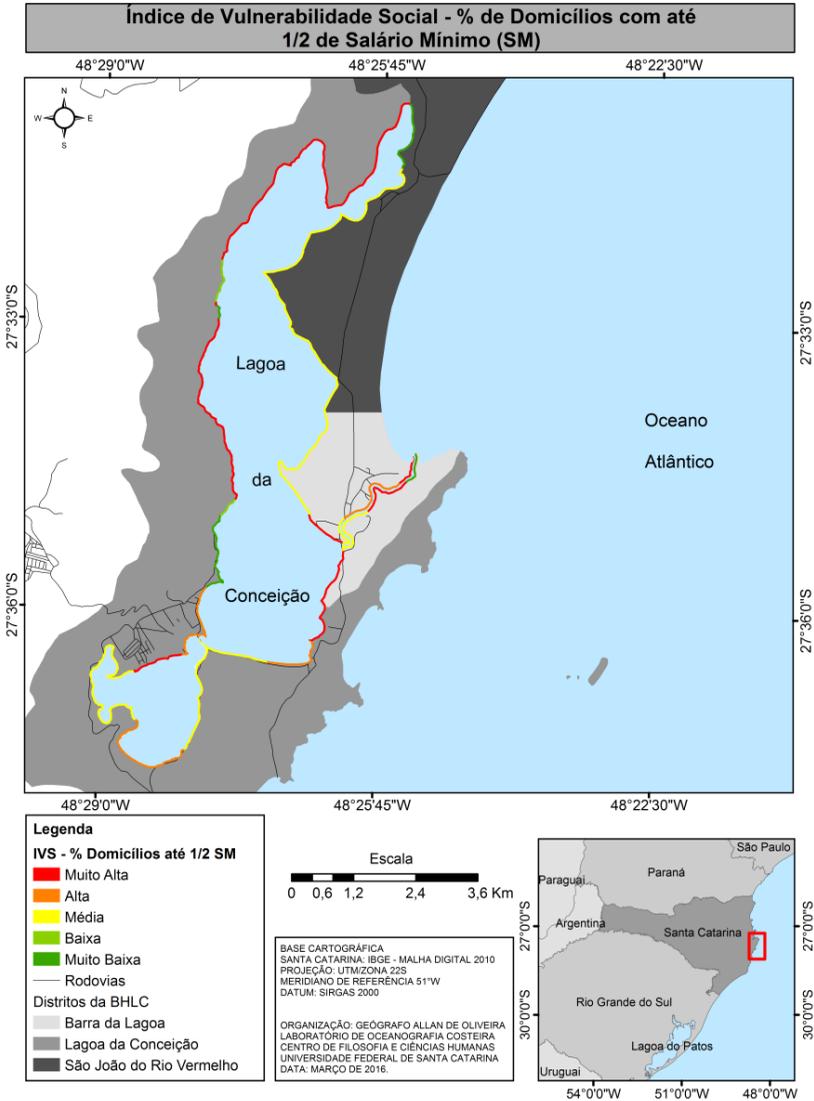
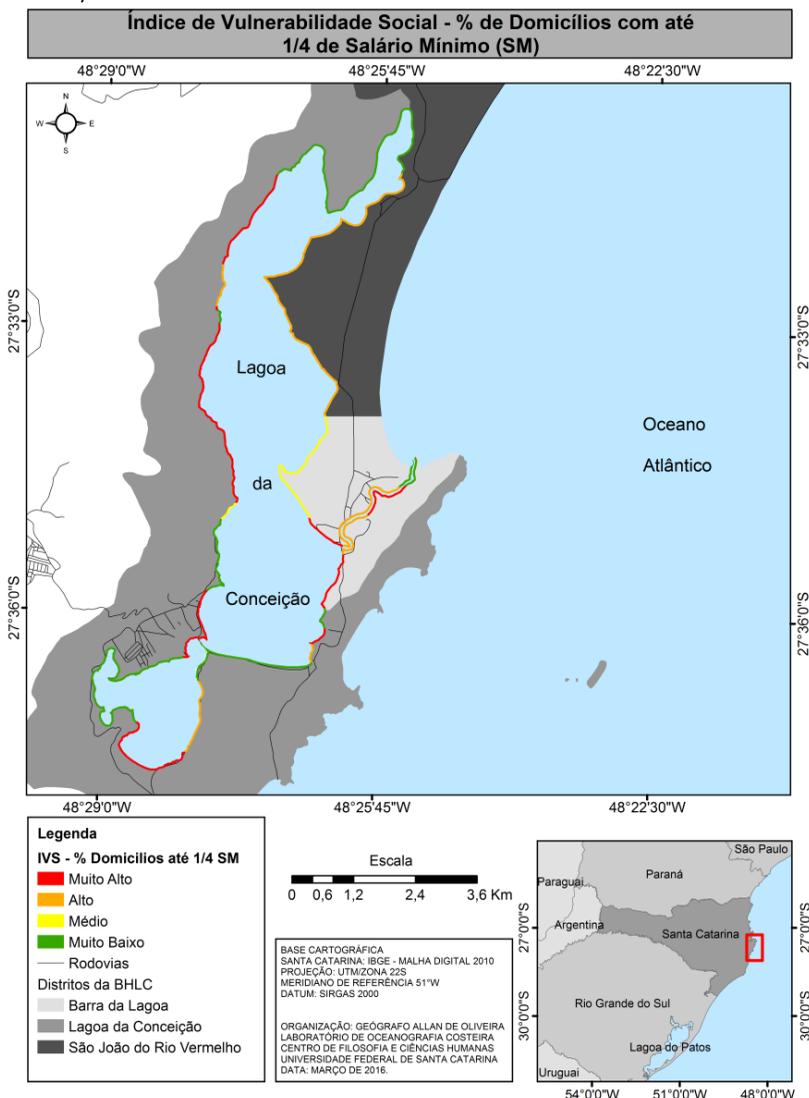


Figura 33. Índice de Vulnerabilidade Social para o fator % de domicílios com renda de até 1/4 salário mínimo.



(Fonte: autor).

#### 5.2.1.4 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIAL

Aplicando a metodologia para avaliação da vulnerabilidade social utilizando análise de multicritério foi constatado que nenhum setor censitário possui vulnerabilidade muito baixa (Fig. 34). Como já mencionado na metodologia, mesmo que em alguns setores ocorresse vulnerabilidade muito baixa para algum dos fatores, estes poderiam ser compensados por valores mais altos que ocorreram em outros fatores, uma das vantagens da análise de multicritério.

Como foi possível observar nas tabelas 9 e 10 os fatores relacionados à renda possuíram maior peso na análise, isso porque são eles que conseguem mensurar qual a capacidade adaptativa que a população residente terá, caso a elevação do nível do mar ocorra realmente. Por mais que a porcentagem de domicílios que possuem faixa salarial de até ou inferior a  $\frac{1}{2}$  salário mínimo seja pequena, isto permite colocar esta população com baixo poder aquisitivo em maior situação de risco.

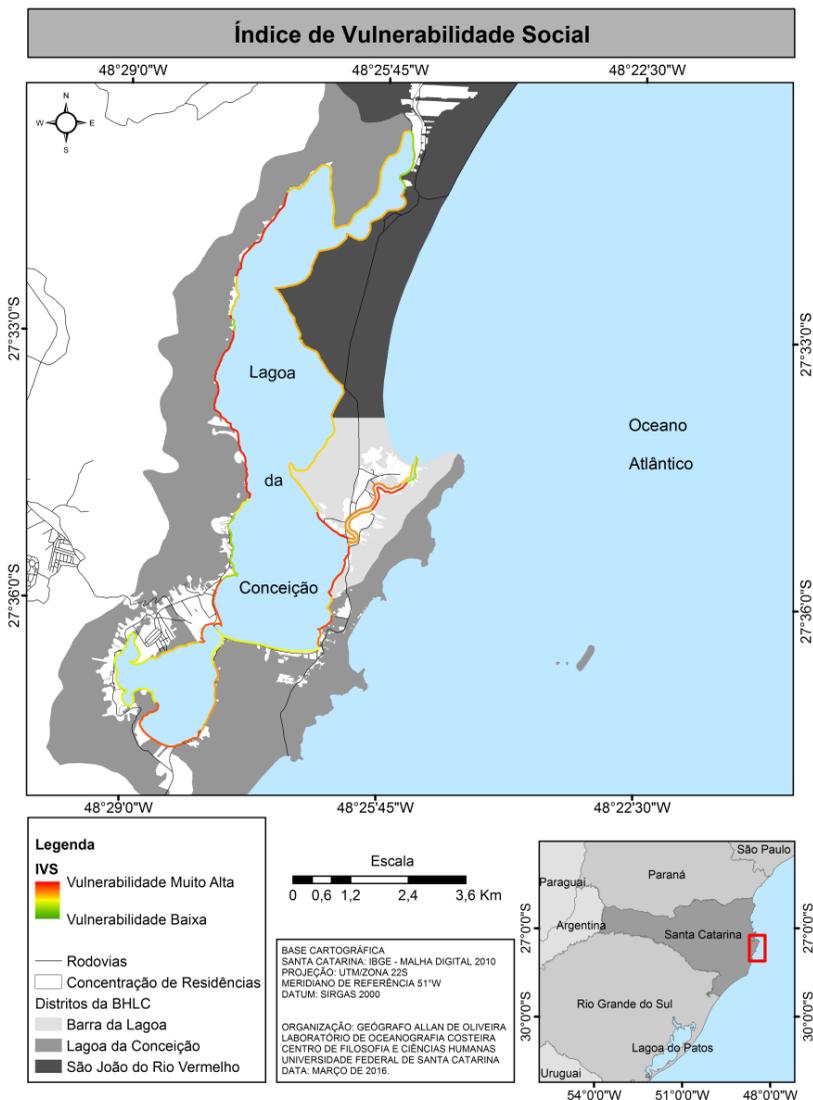
Esta perspectiva, somada aos locais com maior média de moradores por domicílio, torna ainda mais vulnerável determinada área, mesmo que a população residente possa ser menor quando comparada a outras áreas. Estes fatores unidos mostram muitas vezes as diferenças estabelecidas em determinada concentração da população numa sociedade urbana, sendo estas diferenças definidas como desigualdade. Neste caso, a capacidade de resposta frente ao risco em questão tende a ser menor (CUNHA et. al., 2006).

Índices alto a muito alto de vulnerabilidade social são encontrados em quase todo o distrito da Barra da Lagoa, à exceção de dois setores. Neste distrito são identificadas tanto residências de alto padrão como de baixo, mostrando uma população residente com diferenças sociais e econômicas. Esta mesma situação é identificada no setor sul da laguna, no distrito da Lagoa, com alguns setores apresentando vulnerabilidade social média, como ocorre no Canto da Lagoa.

Embora isso pudesse ser esperado, em alguns setores com alta urbanização o IVSo não foi calculado como alto a muito alto, caso da Avenida das Rendeiras, que fica localizada no distrito da Lagoa. Nesta e em outras áreas com concentração de residências (Fig. 34), como parte do setor sul da LC, a porcentagem de domicílios com renda abaixo da

faixa salarial de 1/8 a 1/2 salário mínimo é baixa, além da renda média per capita ser alta. Com isso, mesmo que exista uma alta concentração de pessoas e domicílios o IVSo não ficou alto.

Figura 34. Índice de Vulnerabilidade Social para área de estudo.



Em números, a menor parcela da área de estudo foi classificada como de vulnerabilidade baixa, com 8,42%. Já a maior parcela foi classificada como de vulnerabilidade média, com 37,77%. As áreas com vulnerabilidade alta a muito alta totalizaram 25,66% e 28,15%, respectivamente. Como estes últimos índices representam situações mais extremas de vulnerabilidade, seu somatório ficou em 53,81%, ou seja, mais da metade da área de estudo.

A construção de um índice de vulnerabilidade social tem como objetivo criar uma ferramenta de suporte a decisão. Assim, devido a um risco/perigo à sociedade, poderão ser criadas políticas preventivas e/ou mitigadoras (GALL, 2007). Mesmo existindo várias metodologias para avaliar as características da população e mensurar o quão vulnerável são frente às mudanças climáticas (ADGER, 1999; BJARNADOTTIR et al., 2011; SINGLETON e SPIELMAN, 2013; ALEXIOU e SINGLETON, 2014), foi possível desenvolver neste trabalho um índice de vulnerabilidade social.

No Brasil as zonas costeiras possuem grandes extensões ocupadas, processo este gerado pela urbanização, turismo ou ocupação de “segunda residência” (MORAES, 2007). De acordo com o IBGE (2011) 45,6% dos municípios costeiros brasileiros apresentavam urbanização maior do que 80% em 2010, além de quase 1/4 da população estar concentrada na zona costeira. Estes números tornam-se mais críticos quando se destaca que a zona costeira representa apenas 4,3% do território brasileiro.

Em ambientes abrigados na zona costeira, devido à susceptibilidade natural que estas áreas possuem a inundações (fluvial de baixa energia ou marinha de alta energia), é possível supor a maior vulnerabilidade da população residente (MCLEAN et al., 2001). Além disso, alterações nos padrões naturais por intervenção antrópica tendem a maximizar ainda mais o processo de inundação, como por exemplo, sedimentação e aumento do nível do mar.

Nicolodi e Pettermann (2010) indicam que a área de Florianópolis está inserida num contexto de alta a média vulnerabilidade, com base numa análise que agrupou indicadores de risco natural, social e tecnológico. A explicação para este índice estaria

no alto adensamento urbano localizado em cotas altimétricas inferiores a 10 m.

Para determinar o fator risco social na pesquisa anteriormente citada, os autores utilizaram como dado de fundo o nível de renda em função da parcela da população que recebe até 3 (três) salários mínimos, e também considerando os resultados do Censo Demográfico do IBGE por distritos no ano e 2000. Além disso, dados de coleta de lixo, saneamento básico e destino dos resíduos sólidos também foram utilizados.

A escala de atuação deste trabalho quando comparada a de Nicolodi e Petermann (2010) é diferente, além de considerar fatores distintos. Mesmo assim, a ideia de um risco social que implica em determinado grau de vulnerabilidade está evidenciado em ambas as pesquisas, pois existe uma população que reside nestas áreas. Logo, estas pessoas são influenciadas pela dinâmica costeira e possíveis alterações que venham a ocorrer devido a mudanças climáticas poderão coloca-las em risco, expondo sua menor ou maior vulnerabilidade.

De acordo com Eakin e Luers (2006) esta diversidade de abordagens a fim de estudar a vulnerabilidade muitas vezes é necessária. A complexidade do conceito e as diversas abordagens no estudo de vulnerabilidade social permitem interligar todas as pesquisas e, ao mesmo tempo, complementá-las. Esta mesma ideia pode ser admitida para a escolha das variáveis que cada pesquisa utilizou, conseguindo resultados diferentes.

Para Koks et al. (2015) a gestão dos riscos de inundação devem ser definidas e aplicadas a partir das características socioeconômicas locais. Estudos regionais tendem a homogeneizar a área de abrangência do estudo, quando utilizados dados que quantificam e caracterizam uma parcela da população. Ou seja, a utilização de dados por setor censitário ou até mesmo em maior detalhe permite uma maior eficácia na identificação da vulnerabilidade social e na proposição de planos estratégicos para reduzir os danos.

Deve-se fazer a ressalva, por fim, que os resultados de vulnerabilidade obtidos neste estudo para o trecho onde está localizado o Parque Estadual do Rio Vermelho, na margem leste lagunar, devem ser considerados apenas como indicativos. Essa

unidade de conservação, que ocupa parte dos distritos da Barra da Lagoa e São João do Rio Vermelho, a rigor não possui população residente, sendo um trecho de aplicação restritiva na análise. Todavia, optou-se por mantê-la dada a sua recente recategorização e pela presença de infraestrutura urbana localizada à beira da laguna, onde são desenvolvidas diversas atividades turísticas e recreativas.

### **5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Desde os primeiros estudos desenvolvidos pelo IPCC sobre mudanças climáticas e seus efeitos na oscilação positiva do nível do mar, várias pesquisas foram realizadas para mapear a vulnerabilidade social da população residente na zona costeira. Neste capítulo a vulnerabilidade social foi determinada usando técnicas de geoprocessamento em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, o que já é difundido na literatura. A utilização de dados do Censo Demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e as técnicas de geoprocessamento permitiram chegar as seguintes considerações finais:

- As características sociais são difíceis de serem quantificadas, mas existem algumas variáveis que podem ser utilizadas como indicadores de vulnerabilidade social, e as escolhidas neste capítulo permitiram a definição do IVSO.

- Nenhum segmento da margem lagunar foi classificado com vulnerabilidade muito baixa, visto que existem populações residentes com remuneração salarial abaixo de 1 salário mínimo, e as variáveis relacionadas a este tópico possuíram maior peso na definição do índice.

- As maiores extensões de segmento de costa lagunar com Índice de Vulnerabilidade Social Muito Alto não estão localizadas nos principais núcleos urbanos. Estes segmentos foram identificados na margem oeste lagunar, nos setores Central e Norte da LC.

- Os núcleos urbanos da Barra da Lagoa e Centro da Lagoa possuem maiores extensões de segmento de margem lagunar com vulnerabilidade alta e moderada. Ao longo da Avenida das Rendeiras o segmento de linha de costa é inteiramente moderado.

## **6 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

A utilização de modelos numéricos para compreender o comportamento hidrodinâmico de sistemas costeiros abrigados pode ser identificada em vários trabalhos (CASTELÃO e MÖLLER, 2006; BOURGOYNE, 2010; FERNANDES et al., 2007; MARQUES et al., 2009; FERRARIM et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2015). A modelagem hidrodinâmica de sistemas abrigados também está sendo incorporada na determinação de cenários de oscilação positiva do nível do mar e sua influência nestes sistemas (FORTUNATO et al., 2013; OLIVEIRA (2013).

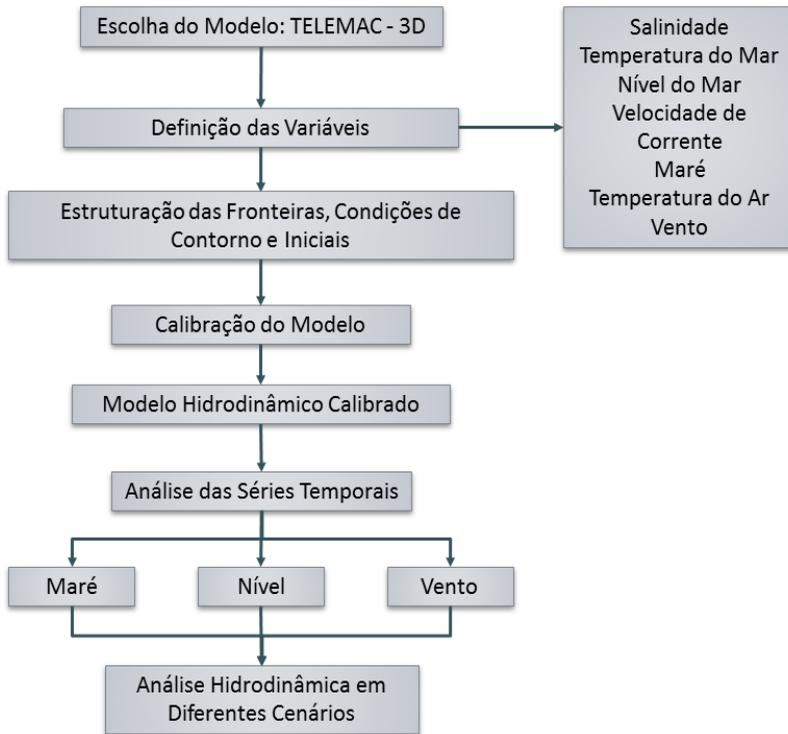
Este capítulo tem como objetivo determinar, através de modelagem numérica, a situação atual da circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição e a interação deste sistema costeiro abrigado com o oceano adjacente. Os resultados encontrados servirão de base para o capítulo subsequente, que projetará cenários de elevação do nível do mar, determinando a susceptibilidade da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar, com elaboração do índice de susceptibilidade lagunar a elevação do nível do mar.

### **6.2 METODOLOGIA**

A metodologia utilizada para avaliar o comportamento hidrodinâmico da Lagoa da Conceição, a fim de permitir, a posteriori, a determinação da susceptibilidade do ambiente lagunar a elevação do nível do mar, partiu do desenvolvimento de um modelo conceitual para compreender os processos físicos e hidrodinâmicos no sistema lagunar e sua interação com o Oceano Atlântico. Para isso foi utilizado o modelo hidrodinâmico TELEMAC-3D tendo o mesmo, após uma série de simulações, sido calibrado para reproduzir a hidrodinâmica lagunar.

A descrição do modelo hidrodinâmico gerado para a Lagoa da Conceição através do TELEMAC-3D, os dados de entrada utilizados e o processo de calibração são descritos a seguir. A figura 35 mostra o fluxograma com os procedimentos metodológicos realizados neste capítulo.

Figura 35. Fluxograma metodológico para estruturação do modelo hidrodinâmico da Lagoa da Conceição.



Fonte: autor.

### 6.2.1 MODELO HIDRODINÂMICO TELEMAC

Para desenvolver o modelo conceitual a fim de compreender os processos hidrodinâmicos da LC foi utilizado o Modelo Hidrodinâmico TELEMAC-3D. Este modelo hidrodinâmico foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional do Meio Ambiente e Hidráulica (*Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE*) do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia de Eletricidade da França (*Research and Development Directorate of the French Electricity Board - EDF R&D*).

O modelo resolve as equações hidrodinâmicas utilizando grades não estruturadas e elementos triangulares. Isto possibilita o ajuste dos elementos às feições existentes na área de estudo, ou seja, permite uma alta resolução em áreas com declividade acentuada e canais

estreitos, assim como baixa resolução em áreas contíguas (HERVOUET, 2007).

A etapa de criação da grade estruturada com elementos finitos ocorreu no programa BlueKenue™ (*Visualization and Analysis for Hydraulic Modelling/Canadian Hydraulics Centre/National Research Council*). Neste mesmo programa também foram definidas as condições de contorno, assim como a verificação dos resultados das simulações e extração de séries temporais para análise de nível lagunar. A análise das séries, criação dos gráficos e elaboração de algumas figuras ocorreram no MATLAB® (*MATrix LABoratory*), e as figuras com os mapas finais de nível lagunar no ArcMap 10.3®.

A descrição do modelo TELEMAC-3D que será descrita nos próximos subitens foi originalmente apresentada por Hervouet (2007), Giordano (2008), Marques (2009), Delgado (2011), Oliveira (2012), Peixoto (2012) e Oliveira (2013).

#### 6.2.1.1 O MODELO 3D

No TELEMAC-3D as equações utilizadas e resolvidas pelos algoritmos do modelo são as de Navier-Stokes, considerando a hipótese hidrostática ou não hidrostática. O que diferencia uma da outra é a simplificação da componente vertical da equação de Navier-Stokes no balanço entre o gradiente de pressão vertical e a aceleração da gravidade, permitindo a representação da pressão em um ponto como a soma do peso da coluna de água mais a pressão atmosférica (eq. 12).

Nas componentes horizontais do gradiente de pressão, a simplificação consiste na aproximação da densidade por um termo de primeira ordem representado pelas variações de densidade ( $\Delta\rho$ ) e densidade média ( $\rho_0$ ), aproximações que simplificam as equações de Navier-Stokes na forma hidrostática das componentes na direção  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  e  $\vec{k}$ , nas equações 10 e 11.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = g \frac{\partial n}{\partial x} + v \nabla^2 u + F_x \quad (10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = g \frac{\partial n}{\partial x} + v \nabla^2 v + F_y \quad (11)$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g(n - z) + \rho_0 g \int_z^n \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz \quad (12)$$

A equação da conservação de massa é simplificada à equação da continuidade (eq. 13), considerando que nos fluidos geofísicos a variação de densidade no tempo e espaço não são mais expressivas do que as variações relativas do campo de velocidade. Assim, a equação da continuidade completa as equações que possibilitam resolver o sistema para as variáveis da velocidade ( $u$ ;  $v$  e  $w$ ) e pressão ( $p$ ).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Nas equações de Navier-Stokes o efeito associado às forças de cisalhamento do vento, atrito de fundo, da força de Coriolis e de flutuabilidade, estão incorporados aos termos fonte ou sumidouro ( $F_x$  e  $F_y$ ).

### 6.2.1.2 FRICÇÃO DE FUNDO

A simulação hidrodinâmica considera as forças da fricção de fundo atuando no sentido oposto do deslocamento do fluido, conceitualmente definida pela tensão de cisalhamento de Newton (eq. 14).

$$\vec{\tau} = -\mu \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \quad (14)$$

Na determinação da tensão de cisalhamento é necessário o conhecimento das velocidades do fluido próximas ao fundo, fornecidas pelo modelo de turbulência no TELEMAC-3D (HERVOUET, 2007). A análise dimensional da tensão de cisalhamento de fundo leva a uma segunda representação da equação de fricção de fundo (eq. 15), que é dependente do conhecimento do campo de velocidades próximo ao fundo ( $\vec{V}$ ) e do coeficiente adimensional de fricção ( $C_f$ ).

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{V} \quad (15)$$

O modelo TELEMAC-3D oferece opções para definir os coeficientes adimensionais de fricção, entre as possibilidades estão o coeficiente segundo Chézy (16), Strickler (17) e Manning (18). Os coeficientes de fricção são dependentes da gravidade ( $g$ ), da espessura da coluna de água ( $h$ ) e dos respectivos coeficientes ( $C$ ,  $S$  e  $m$ ).

$$C_f = \frac{2g}{C^2} \quad (16)$$

$$C_f = \frac{2g}{h^{1/3} S^2} \quad (17)$$

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (18)$$

### 6.2.1.3 CISALHAMENTO DO VENTO

A representação da influência do vento na transferência de momento do vento é semelhante à apresentada na transferência de momento da fricção de fundo. O cisalhamento do vento é parametrizado através da lei quadrática da tensão da velocidade do vento. A importância de cada componente do vento na transferência de momento é representada pelas equações 19 e 20.

$$\tau_x = \rho_{ar} C_w W_{x10} |W_{10}| \quad (19)$$

$$\tau_y = \rho_{ar} C_w W_{y10} |W_{10}| \quad (20)$$

Nas equações tem-se a densidade do ar ( $1.3 \text{ Kg.m}^{-3}$ ), o coeficiente adimensional do vento  $C_w$  e a magnitude do vento  $|W_{10}|$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) para as respectivas componentes  $W_{x10}$  e  $W_{y10}$ . O coeficiente adimensional do vento contém ambas as informações quanto à relação entre o tempo e a área de atuação do cisalhamento na superfície.

### 6.2.1.4 TERMOS DE FLUTUABILIDADE

Os termos de flutuabilidade são considerados nas variáveis  $F_x$  e  $F_y$ , das equações horizontais de Navier-Stokes (eq. 21 e 22). Os termos de flutuabilidade são originados da aplicação do termo de primeira ordem que representa as variações de densidade nas componentes das variações horizontais de pressão (eq. 21 e 22).

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial x} \quad (21)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \cong -\frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \frac{\partial p}{\partial y} \quad (22)$$

A aplicação da equação da componente vertical de Navier-Stokes na forma hidrostática (eq. 12) nas equações 23 e 24, resulta nos termos que representam as acelerações geradas pelas forças associadas aos escoamentos devido às variações de flutuabilidade (eq. 19 e 20), nos quais o primeiro termo é chamado de barotrópico e o segundo de baroclínico.

$$-\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{\partial n}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left( \int_z^n \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (23)$$

$$-\frac{\Delta\rho}{\rho_0} \frac{\partial n}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_z^n \frac{\Delta\rho}{\rho_0} dz \right) \quad (24)$$

Isto é, os termos de flutuabilidade surgem do gradiente de pressão e estão integrados nas variáveis  $F_x$  e  $F_y$ . A estimativa da densidade ( $\rho$ ) permite calcular os termos de flutuabilidade. A salinidade ( $S$ ) e temperatura ( $T$ ) são os traçadores considerados no cálculo da densidade (eq. 25).

$$\rho = \rho_{ref} \left[ 1 - \left( 7(T - T_{ref})^2 - 750S \right) 10^{-6} \right] \quad (25)$$

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$0 \text{ g/l} < S < 42 \text{ g/l}$$

$T_{ref}$  é a temperatura de referência de 4 °C e  $\rho_{ref}$  (999,972 kg/m<sup>3</sup>) a densidade de referência para esta temperatura quando a salinidade é zero.

### 6.2.1.5 TRANSPORTE DE TRAÇADORES

Além da solução do campo de velocidades e pressão, o TELEMAC-3D também resolve o transporte de traçadores que podem ser agrupados em duas categorias: os traçadores ativos (salinidade e temperatura) que modificam a densidade da água e o momento de inércia do fluxo, e os traçadores passivos que não afetam o momento de inércia e são meramente transportados. A evolução dos traçadores no domínio tridimensional quer seja ativo ou passivo, são calculados através da equação 26.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = v_T \nabla^2 T + Q \quad (26)$$

onde:

T traçador ativo ou passivo

$v_T$  coeficiente de difusão do traçador (m/s<sup>2</sup>)

t tempo (s)

u, v e w componentes da velocidade  $\vec{V}$  (m/s)

Q fonte ou sumidouro do traçador

### 6.2.1.6 FRONTEIRAS E CONDIÇÕES DE CONTORNO

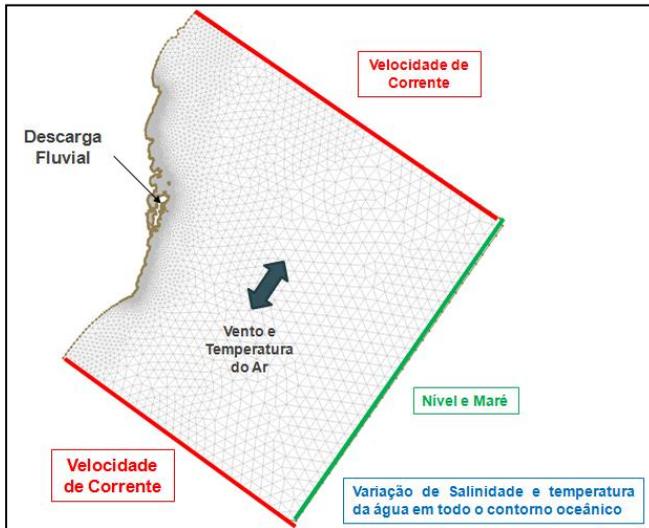
Existem dois tipos de contorno, o fechado e o aberto. Para os contornos fechados, ou fronteiras sólidas, o TELEMAC-3D considera que: 1) não há fluxo de massa através das faces laterais fechadas e do fundo; 2) a condição de atrito no fundo é variável, podendo o usuário determinar o coeficiente de atrito; 3) a superfície é livre, e a condição de contorno de superfície é a tensão calculada a partir da velocidade do vento e do coeficiente da influência do vento.

Nestes contornos sólidos são utilizadas para as velocidades uma condição de não-deslizamento, ou seja, elas são impermeáveis, não

permitindo o deslocamento de fluxos. Estas fronteiras, no caso deste trabalho, são as linhas de costa oceânica e lagunar do domínio numérico.

Nos contornos líquidos ou fronteiras abertas é possível determinar para cada variável principal ( $h$ ,  $U$ ,  $V$  e  $T$ ) um valor prescrito ou se os valores são livres em cada ponto da grade do referido contorno. Nestas fronteiras são prescritas as velocidades de corrente, descarga fluvial, nível, salinidade e temperatura da água. A figura 36 mostra as fronteiras sólidas e abertas.

Figura 36. Contornos líquidos e superficiais considerados para a modelagem numérica da LC.



Fonte: autor.

## 6.2.2 MODELO HIDRODINÂMICO DA LAGOA DA CONCEIÇÃO

### 6.2.2.1 DADOS BATIMÉTRICOS E DOMÍNIO NUMÉRICO

O primeiro dado necessário para implementar o modelo hidrodinâmico da Lagoa da Conceição é o batimétrico. Este dado permite criar uma grade batimétrica, a fim de realizar as simulações e cenários de elevação do nível do mar. Para isso foram utilizadas as cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a

área oceânica<sup>3</sup> e o levantamento batimétrico da Lagoa da Conceição realizado pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF)<sup>4</sup>.

Após a estruturação dos dados em um arquivo do tipo xyz estes foram interpolados no programa BlueKenue™. A interpolação foi realizada a partir de um domínio numérico também gerado previamente no programa BlueKenue™. Este domínio é uma grade não-estruturada, com elementos triangulares, que permite representar as morfologias existentes na área de estudo, inclusive as mais complexas (ex. conexão entre oceano/Canal da Barra/Lagoa da Conceição).

A partir de uma estatística baseada na distância entre o valor batimétrico existente (arquivo xyz) e os nós do domínio numérico foi possível atribuir um valor batimétrico para cada nó do domínio. Entre os dois métodos existentes no programa utilizou-se o Vizinho mais Próximo (CRÓSTA, 1993). Sua utilização no BlueKenue™ para criar uma grade batimétrica consiste em assegurar que o valor determinado para cada nó seja um dos valores existentes no arquivo batimétrico original, ou seja, como discutido por Franke (1982) não serão gerados novos valores.

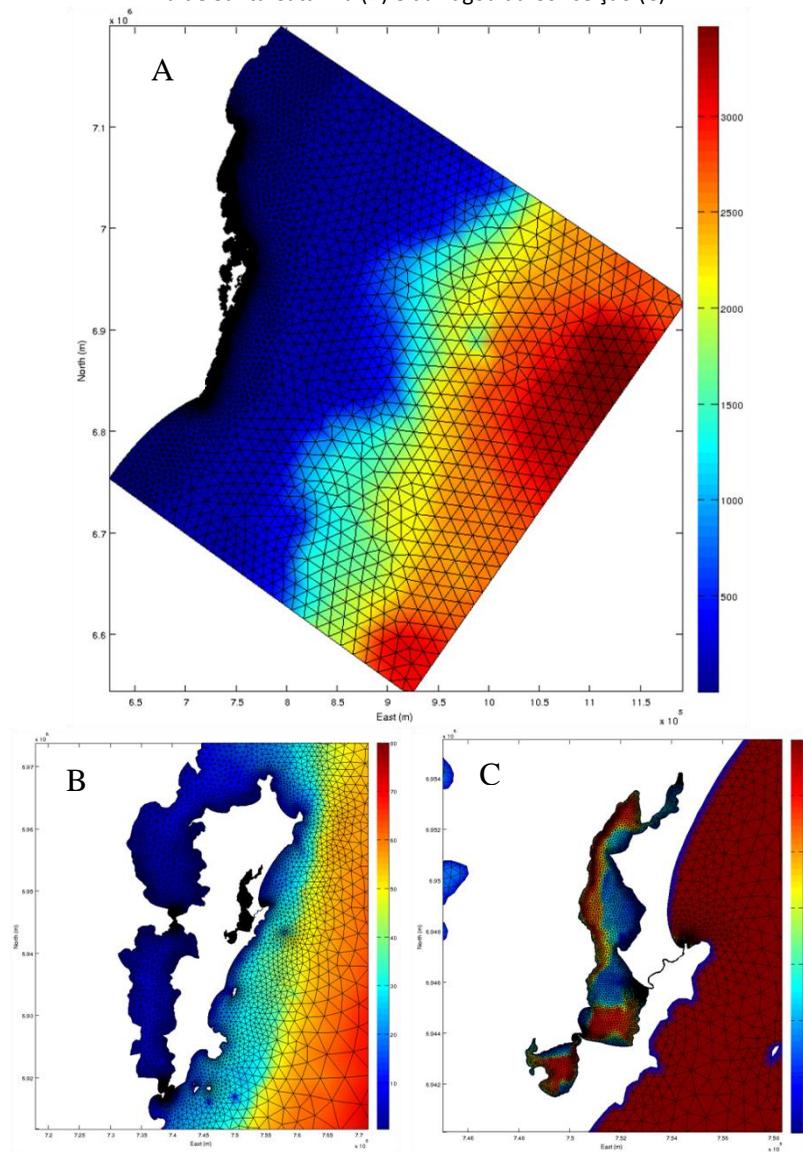
Para as simulações foi gerada uma grade numérica de alta resolução, com 22745 nós e 42145 elementos, entre as latitudes de 25°17'44" S e 31°10'53" S, e longitudes de 044°03'02" W e 049°42'41" W. A figura 37 mostra o domínio numérico gerado e interpolado com os dados batimétricos.

---

<sup>3</sup> Os dados foram vetorizados e disponibilizados pelo Projeto Sistema de Modelagem Costeira (SMC Brasil).

<sup>4</sup> Os dados foram vetorizados de cartas batimétricas na escala de 1:2000 e disponibilizados pelo Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC.

Figura 37. Grade batimétrica utilizada para a modelagem numérica (A), detalhe da Ilha de Santa Catarina (B) e da Lagoa da Conceição (C).



Fonte: autor.

### 6.2.2.2 CONDIÇÕES INICIAIS NOS CONTORNOS LÍQUIDOS

O ano de 2013 foi escolhido para realizar a calibração do modelo, pois neste mesmo ano foi instalado um medidor de nível na Lagoa da Conceição. A partir da definição do ano é necessário utilizar dados de salinidade, temperatura da água, maré, nível, velocidade de corrente, vento, temperatura do ar e vazão média fluvial para inicializar o modelo TELEMAC-3D. A seguir serão descritas as fontes de cada um dos dados e como os mesmos foram tratados/utilizados.

#### 6.2.2.2.1 TEMPERATURA, SALINIDADE, VELOCIDADE DE CORRENTE E NÍVEL D'ÁGUA

Os dados de temperatura, salinidade, velocidade de corrente e nível d'água foram inseridos como condição de contorno e obtidos do projeto *Ocean Circulation and Climate Advanced Modelling (OCCAM)* e prescritos de forma tri-dimensional em todo domínio numérico. O OCCAM é um modelo oceânico global conduzido atualmente por pesquisadores do *National Oceanography Centre* da *Southampton University* em colaboração com a *East Anglia University* e *Edinburgh University*.

O modelo utiliza a variável temperatura, salinidade e velocidade de corrente para conduzir a evolução de um oceano, em que a equação de *momentum* permite as mudanças de velocidade e a equação de advecção-difusão mudanças de temperatura e salinidade. Como em outros modelos o OCCAM realiza três aproximações importantes:

1) assume, na equação da continuidade, que o oceano é incompressível;

2) assume, na equação do *momentum* vertical, que a velocidade vertical é pequena e que os termos envolvidos nela podem ser negligenciados; e

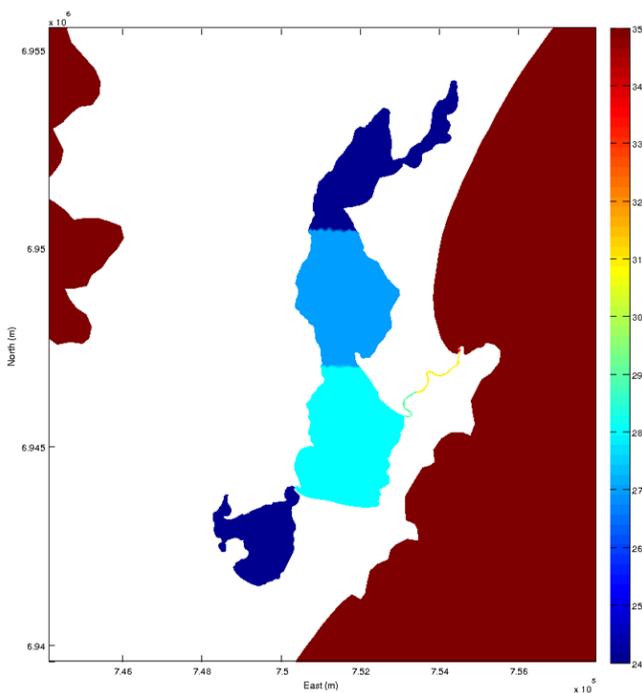
3) assume, na equação de *momentum* horizontal, que pequenas alterações na densidade podem ser negligenciadas, exceto onde afetam o gradiente de pressão horizontal.

Além dos dados de contorno também é possível inserir condições iniciais, baseadas ou nos dados da OCCAM ou em dados

medidos *in situ*. De acordo com Odreski (2012) os trabalhos sobre modelagem na LC até aquela data não levaram em consideração variações de densidade dentro da laguna, sendo ele o primeiro a propor esta abordagem. Laurenti (2011 apud ODRESKI, 2012) compôs séries históricas de dados ambientais, entre eles salinidade, a partir de trabalhos elaborados na LC.

Com isso, Odreski (2012) utilizou em seu trabalho um mapa de condições iniciais de salinidade para a LC (Fig. 38). O autor realizou uma discretização da área, separando a LC em 4 setores e o Canal da Barra da Lagoa 3 setores. Após, realizou uma média dos campos de salinidade amostrados, que foram publicados em 11 anos de pesquisa, mais a média de salinidade marinha proposta por Assad et al. (2009 apud ODRESKI, 2012).

Figura 38. Campo de salinidade utilizado como condição inicial.



Fonte: autor.

Os dados de modelagem disponibilizados pelo projeto OCCAM para as condições de contorno são para o período de 1994 a 2004 (10

anos). Como o ano escolhido para simulação neste trabalho foi 2013 optou-se por realizar uma climatologia para estas variáveis. O procedimento foi realizado no programa MATLAB® através do cálculo das médias para temperatura, salinidade, velocidade de corrente e nível para cada mês. Com isso foi possível definir uma climatologia mensal.

#### **6.2.2.2.2 MARÉ ASTRONÔMICA**

Dados de amplitude e fase das cinco principais componentes da maré na área de estudo foram calculadas pelo *Grenoble Model FES95.2 (Finite Element Solution - v.95.6)*. Como o tempo de simulação são 365 dias (1 ano) as oscilações da maré são definidas como uma soma de funções cossenoidais calculadas para cada ponto da fronteira aberta oceânica em cada passo de tempo da simulação.

#### **6.2.2.2.3 VENTO E TEMPERATURA DO AR**

Os dados de vento e temperatura do ar foram extraídos do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, disponíveis no site <http://apps.ecmwf.int/datasets/>. Estes dados são uma reanálise gerada a partir de um modelo numérico de previsão, e mesmo sendo limitado pelo fato do modelo não conseguir representar perfeitamente as leis da física que regulam a atmosfera, são adequados para implementar o modelo hidrodinâmico da área de estudo.

Sendo a variabilidade espacial do vento uma importante forçante hidrodinâmica da área de estudo, buscou-se utilizar dados desta variável com a maior resolução espacial possível. Com isso, os dados de vento possuem uma resolução espacial de  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ . Já os de temperatura do ar, utilizados para inserir na modelagem a troca de calor com a atmosfera, não precisavam da mesma resolução da variável vento, baixando para  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ .

Esta diminuição de resolução também permitiu menor tempo de processamento para interpolação dos dados. A interpolação ocorreu no programa MATLAB e o método utilizado foi o de interpolação cúbica e prescritos em todos os nós e contornos superficiais do domínio numérico.

#### **6.2.2.2.4 VAZÃO FLUVIAL - RIO JOÃO GUALBERTO SOARES**

A caracterização da área de estudo mostrou que existe na Lagoa da Conceição um único rio considerado perene, o rio João Gualberto Soares. No domínio numérico a desembocadura de um rio é considerada um contorno líquido continental, em que devem ser prescritos dados de vazão média ou uma série temporal referente ao período simulado.

Mesmo sendo considerado um rio perene não existe uma série temporal extensa de vazão que permita realizar um cálculo médio para o João Gualberto Soares, e tão pouco foi instalado um equipamento no ano de 2013 para realizar medições de vazão para gerar uma série temporal. Entretanto, Dutra (1991) propôs uma vazão média de  $1\text{m}^3/\text{s}$ , obtido através de monitoramento de precipitação, sendo esta vazão utilizada como forçante na fronteira líquida continental.

#### **6.2.2.3 CALIBRAÇÃO HIDRODINÂMICA**

A utilização de modelos numéricos para reproduzir as condições hidrodinâmicas de ambientes marinhos, lagunares e fluviais precisa passar por processo de calibração. A calibração de um modelo determina se este consegue representar de forma mais realística possível os processos que estão sob investigação. Para isso, é necessário que os resultados do modelo sejam comparados a dados gerados por observação ou por resultados de outros modelos que já tenham sido previamente calibrados.

A calibração do modelo hidrodinâmico para a LC foi realizada utilizando a série temporal de nível lagunar medido ao longo de 2013 pelo Laboratório de Oceanografia Costeira da Universidade Federal de Santa Catarina (LOC/UFSC). Buscou-se nesta série identificar quais meses possuíam dados contínuos, a fim de eliminar da análise aqueles com falhas de coleta, sendo definidos os meses de agosto a novembro (quatro meses) para calibração do modelo. Os níveis lagunares foram medidos de 10 em 10 minutos, mas foram calculadas médias horárias e após de 3 em 3 horas, pois os dados de modelo possuem uma saída de 3 em 3 horas.

A calibração de um modelo numérico consiste em uma série de simulações teste, alterando o valor de algumas constantes utilizadas pelo modelo, a fim de comparar qual dos resultados simulados mais se

assemelha com os dados coletados *in situ*. Foram realizadas várias simulações com estes parâmetros alterados, sendo eles: Lei de Fricção de fundo, Coeficiente de Difusão Vertical e Coeficiente do Vento. As tabelas 11 e 12 listam, respectivamente, os parâmetros utilizados de forma padrão para todas as simulações e os alterados nos testes realizados para calibrar o modelo.

Foram utilizados dois métodos para verificar o erro entre o dado medido e o simulado: a) qualitativo, e b) quantitativo. A análise qualitativa partiu da análise visual do gráfico que compara a série temporal medida *versus* a simulada para todos os testes realizados. Após esta análise foi realizada a análise quantitativa a partir de um teste estatístico, calculando o *RMAE* (*relative mean absolute error*) e o *RMSE* (*Root mean square error*) (Sutherland et al., 2001; Van Rijn et al., 2003).

O *RMAE* é baseado no erro existente entre o valor médio absoluto do vetor com dados de nível medido ( $X$ ) e do vetor com dados de nível simulado ( $Y$ ), sendo eles:

$$\langle |X| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n| \quad (27)$$

$$\langle |Y| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_n| \quad (28)$$

onde os colchetes angulares indicam a média e  $|x|$  é o módulo de  $x$ , assim como  $|y|$  é o módulo de  $y$ , respectivamente. Com isso é possível calcular o erro médio absoluto (*MAE – mean absolute error*):

$$MAE = \langle |Y - X| \rangle \quad (29)$$

De acordo com Sutherland *et. al.* (2004) a utilização do módulo torna a estatística não-analítica e, portanto, mais difícil de trabalhar do que o erro médio quadrático (*RMSE*). No entanto, o *MAE* não é fortemente influenciado por *outliers* como o *RMSE*, (Hedges, 2001, apud Sutherland *et. al.*, 2004). A qualidade da modelagem pode ser identificada a partir do valor do *RMAE*, levando em consideração os valores descritos na tabela 13.

$$RMAE = \frac{\langle |Y-X| \rangle}{\langle |X| \rangle} = \frac{MAE}{\langle |X| \rangle} \quad (30)$$

Tabela 11. Parâmetros padrão utilizados na calibração do modelo.

Passo do tempo	60s
Nível Inicial	0,70m
Vazão fluvial	1 m <sup>3</sup> /s (constante)
Coefficiente de Coriolis	-7.70 x 1 <sup>-5</sup> N m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Modelo de turbulência horizontal	Smagorinsky
Modelo de turbulência vertical	<i>Mixing length</i>
Lei de Fricção de fundo	Manning

Fonte: autor.

Tabela 12. Parâmetros variáveis utilizados para testes de calibração do modelo.

Teste	Lei de Fricção	Coefficiente de Fricção	Coefficiente de difusão vertical	Coefficiente do vento
Teste 1	Manning	0,04	0,1	1.E-5 m/s
Teste 2	Manning	0,04	0,1	4.E-5 m/s
<b>Teste 3</b>	<b>Manning</b>	<b>0,04</b>	<b>0,1</b>	<b>5.E-5 m/s</b>
Teste 4	Manning	0,04	0,1	6.E-5 m/s
Teste 5	Manning	0,03	0,1	1.E-5 m/s
Teste 6	Manning	0,03	0,1	4.E-5 m/s
Teste 7	Manning	0,03	0,1	5.E-5 m/s
Teste 8	Manning	0,03	0,1	6.E-5 m/s
Teste 9	Manning	0,04	1,0	1.E-5 m/s
Teste 10	Manning	0,04	1,0	4.E-5 m/s
Teste 11	Manning	0,04	1,0	5.E-5 m/s
Teste 12	Manning	0,04	1,0	6.E-5 m/s

Fonte: autor.

Tabela 13. Coeficientes indicativos da qualidade dos resultados a partir do RMAE.

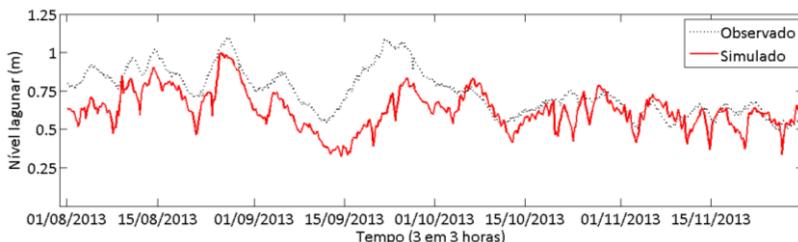
<b>Qualidade dos Resultados</b>	<b>Coeficiente</b>
Excelente	$RMAE < 0,2$
Boa	$0,2 > RMAE < 0,4$
Razoável	$0,4 > RMAE < 0,7$
Pobre	$0,7 > RMAE < 1,0$
Ruim	$RMAE > 1,0$

Fonte: autor.

Após a realização de todos os testes variando os parâmetros, e a realização da calibração qualitativa e quantitativa, um dos testes mostrou melhor correlação com os dados de nível lagunar medidos ao longo de 2013. Este teste é o que está hachurado na tabela 12, o qual utilizou um coeficiente de fricção de fundo de 0,04, coeficiente de difusão vertical de 0,1 e coeficiente de vento de  $5.E-5$  m/s. Tanto o RMSE quanto o RMAE obtiveram valores de 0,17, e segundo a tabela 1.3 caracterizam um excelente resultado, além de uma boa correlação ( $r=0,73$ ). A figura 39 mostra a comparação visual (calibração qualitativa).

A utilização da climatologia para os dados de entrada do modelo permitiu reproduzir as condições hidrodinâmicas do sistema lagunar e como este interage com a região oceânica adjacente. Os dados de reanálise para condições atmosféricas, principalmente vento, também permitiram demonstrar a influência do vento na circulação lagunar. Como destacado por Andrade (2001), Pereira (2004), Rocha (2007) e Godoy (2009) o vento tem forte influência na circulação hidrodinâmica lagunar.

Figura 39. Comparação entre nível lagunar observado e simulado entre agosto e novembro de 2013.



Fonte: autor.

Por não existir uma série temporal de vazão do rio João Gualberto Soares, e sendo este a principal fonte de água fluvial do sistema (DUTRA, 1991), além de importante fonte para circulação hidrodinâmica no setor norte da LC (ROCHA, 2007), foi utilizado uma vazão constante para todo período de simulação. Mesmo que o valor constante tenha sido muito pequeno ( $1\text{m}^3/\text{s}$ ), isto não impediu a calibração do modelo, e assim conseguir reproduzir a hidrodinâmica lagunar. Entretanto, cabe destacar que o marégrafo instalado na LC, o qual gerou a série temporal de nível para calibração, estava localizado em área afastada do setor norte.

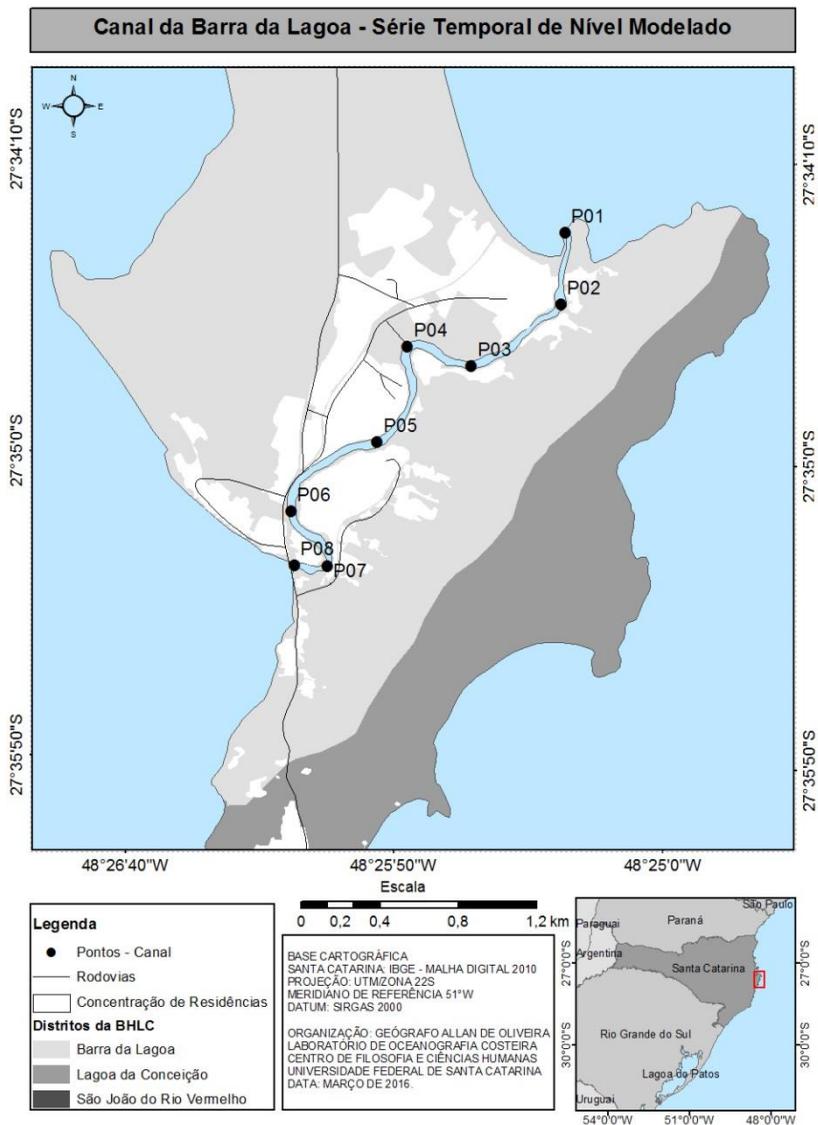
A fim de distinguir e separar baixa e alta frequência da série de dados de nível gerada pelo modelo a cada 3 horas (oito simulações a cada 24 horas/1 dia), aplicou-se o filtro de Lanczos passa-baixa com janela de 40 horas no domínio do tempo. As marés astronômicas apresentam-se como ruídos de alta frequência e fenômenos de longo período, gerados por forçantes meteorológicas, estão registrados nas baixas frequências. Logo, o filtro passa-baixa utilizado permitiu atenuar as componentes astronômicas, preservando os sinais de baixa frequência.

Trabalhos de Walters e Heston (1982), Dottori e Castro (2009) e Valentim et. al. (2013) indicaram que o filtro passa-baixa de Lanczos é eficiente no tratamento das séries temporais. Valentim (2013) descreve que Duchon (1979) demonstrou a simplicidade da utilização deste filtro quando comparado a outros tipos de filtro. Ainda demonstrando a simplicidade do processo, neste trabalho para se conseguir identificar a alta frequência (maré astronômica) foi subtraída do nível registrado no modelo a baixa frequência calculada.

### **6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

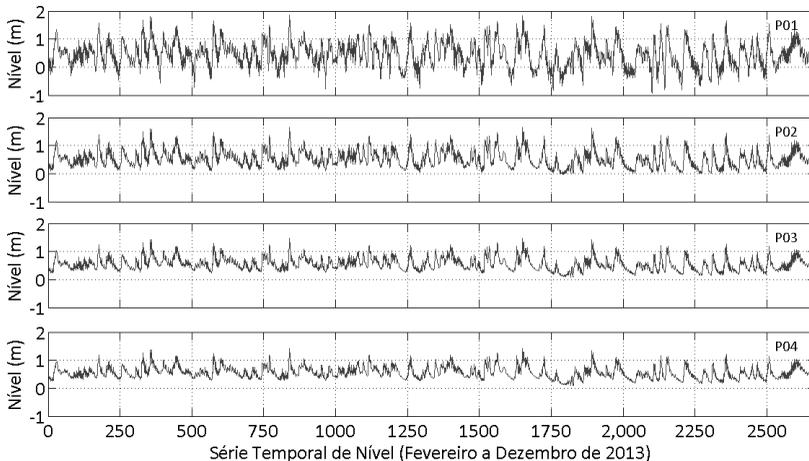
Foram amostrados a partir do resultado do modelo, ao longo do Canal da Barra da Lagoa e da Lagoa da Conceição (LC), pontos amostrais a fim de identificar as variações de nível. No Canal da Barra da Lagoa foram selecionados oito pontos de amostragem e na LC mais seis pontos, representados nas figuras 40 (Canal da Barra da Lagoa) e figura 10 (LC). No Canal da Barra da Lagoa ocorre redução na amplitude de variação de nível na medida em que os pontos de coleta estão mais afastados do oceano, como pode ser observado nos gráficos das figuras 41 e 42.

Figura 40. Localização dos pontos de amostragem ao longo do Canal da Barra.



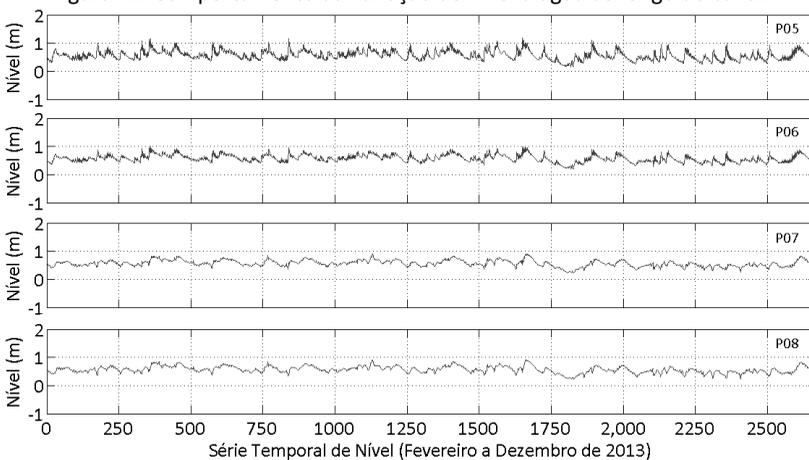
Fonte: autor.

Figura 41. Comportamento da variação do nível d'água ao longo do canal.



Fonte: autor.

Figura 42. Comportamento da variação do nível d'água ao longo do canal.



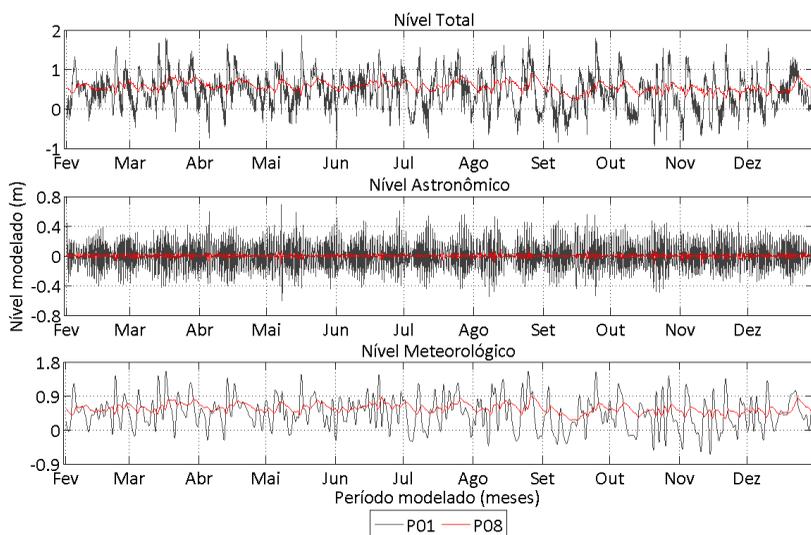
Fonte: autor.

A figura 43 mostra o comportamento do nível d'água nos extremos do canal (P01 e P08), sendo possível observar uma forte filtragem tanto na maré astronômica quanto na meteorológica. Comparando as variações de nível entre os pontos é possível identificar que no P01, ponto mais próximo do oceano, os efeitos meteorológicos possuem forte atuação nas oscilações positivas e negativas, além da influência dos efeitos astronômicos. Já no P08, ponto extremo mais

próximo da LC, os efeitos astronômicos são muito reduzidos, com as oscilações positivas e negativas registradas no nível meteorológico.

Andrade (2001), Pereira (2004), Rocha (2007) e Godoy (2009) mostraram em seus estudos que o Canal da Barra da Lagoa consegue filtrar até 85% da maré astronômica que incide na desembocadura. Ainda de acordo com Rocha (2007), ao separar a série temporal de nível simulado em diferentes bandas de frequência, isolando períodos menores que 36 horas (domínio da maré astronômica) e maiores que 36 horas (domínio da maré meteorológica), foi possível identificar a importância da maré meteorológica no padrão hidrodinâmico da LC. A onda de maré, que possui comportamento semi-diurno, com duas preamares e duas baixa-mares, é uma das forças responsáveis pela circulação na LC.

Figura 43. Comportamento do nível do canal total, astronômico e meteorológico nos pontos P01 e P08.



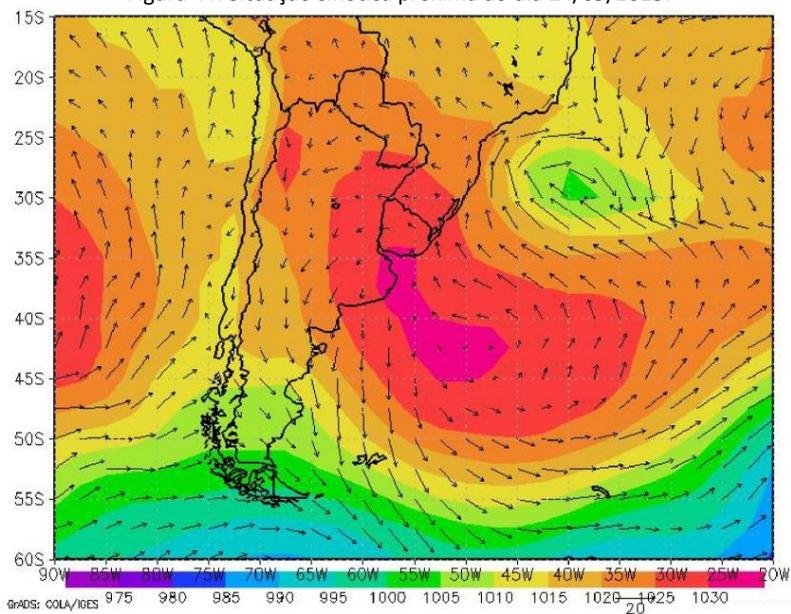
Fonte: autor.

Foram analisados os principais picos de nível meteorológico no P01, a fim de identificar quais padrões meteorológicos ocorreram (direção e intensidade do vento). Ao todo foram seleccionados 12 eventos, sendo cinco em situação de maré de quadratura e sete em

sizígia. Em todos os eventos em que o nível meteorológico foi alto, seja em quadratura ou sizígia, os ventos foram de quadrante Sul.

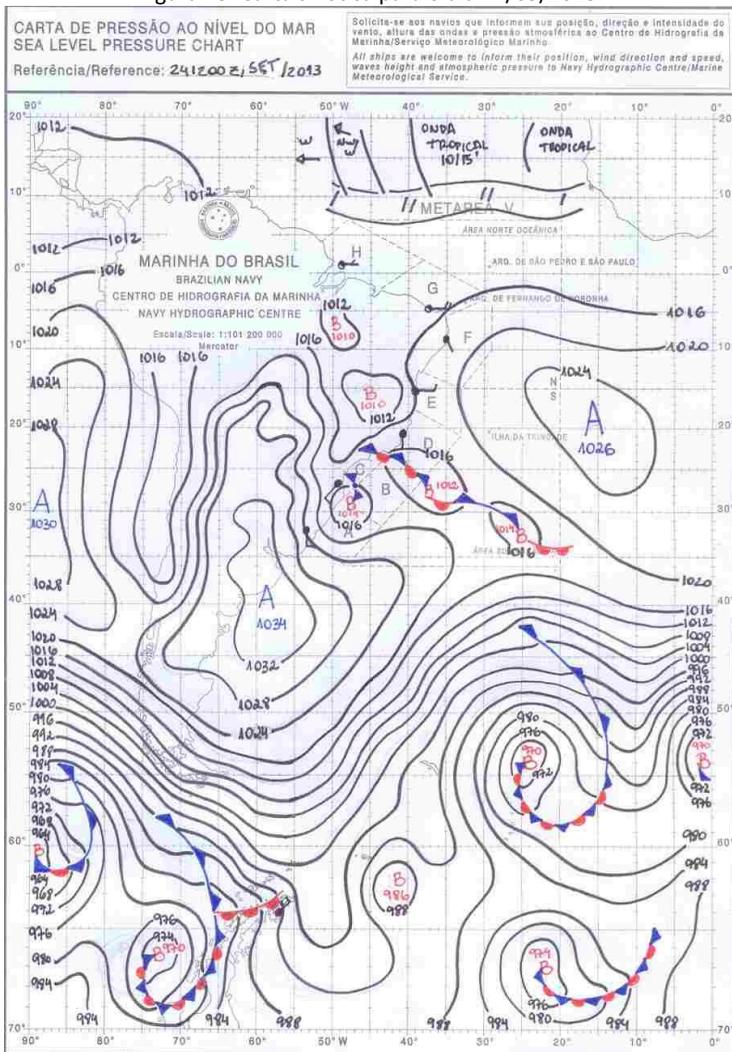
Para estes períodos analisados os níveis na LC foram maiores quando ocorreu vento de quadrante Sul, gerando um forte desnível no sistema lagunar. No dia 24/09, um dos períodos selecionados, ocorreu forte desnível (1,65m), com maior nível no setor lagunar norte. Neste período o regime de maré era de sizígia e os ventos no sentido SSO com intensidade de até 10 m/s (dados de vento por reanálise). Nesta data ocorreu a formação de um centro de alta pressão, cuja dimensão compreendia a área continental da Argentina/Uruguai/Brasil e também zona oceânica adjacente destes mesmos países. Além deste centro de alta pressão também havia um centro de baixa pressão em zona oceânica adjacente aos litorais sul e sudeste do Brasil (Figs. 44 e 45).

Figura 44. Situação sinótica próxima ao dia 24/09/2013.



Fonte: autor.

Figura 45. Carta sinótica para o dia 24/09/2013.



Fonte: DHN (2016).

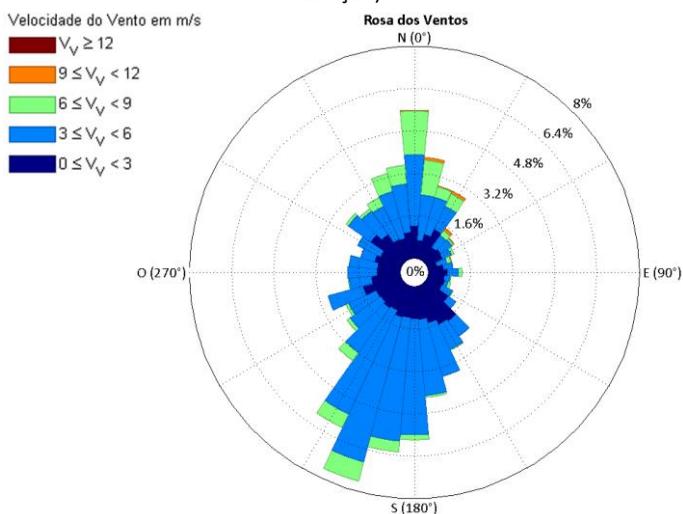
A série temporal de vento para 2013 nos três setores lagunares apresentaram características semelhantes quanto à direção e intensidade. As direções predominantes são de quadrante Norte e Sul, prevalecendo o sentido SSO. Entretanto, é possível observar através do gráfico da rosa dos Ventos (Fig. 46) que os ventos de Norte são mais intensos, com alguns registros ficando entre 9 e 12m/s, o que não

ocorre com os ventos de quadrante Sul. Além disso, há uma maior quantidade de ventos de quadrante Norte com velocidade entre 6 e 9m/s quando comparado aos de ventos de Sul, que possuem maior intensidade no intervalo de 3 a 6m/s.

Andrade (2001) identificou em estudo sobre a circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição que os ventos possuem forte influência sobre a circulação na laguna. Esta influência fica mais evidente nos setores norte e sul, com ventos de norte gerando escoamento para o setor sul, e ventos de sul para o setor norte. Estas condições ocorreram em cenários simulados por este autor com e sem influência de maré astronômica, ratificando a forte relação entre variação de nível e incidência do vento.

Mesmo que a rosa dos ventos indique que os ventos de quadrante Norte são mais intensos, os ventos de quadrante Sul é que causam maior variação de nível lagunar, assim como desnível entre os setores. Além do dia 24/09 os outros onze eventos analisados também chegaram a causar desníveis entre setores de 1,12m (16/03), 1,08m (25/08), 0,95m (04/02 e 22/02), 0,93m (21/11), 0,92m (13/04), 0,88m (27/11) e 0,80m (16/05). Os dias 19/06, 10/12 e 13/03 registraram desníveis inferiores a 0,60m.

Figura 46. Rosa dos ventos com os dados de reanálise para 2013 (velocidade e direção).

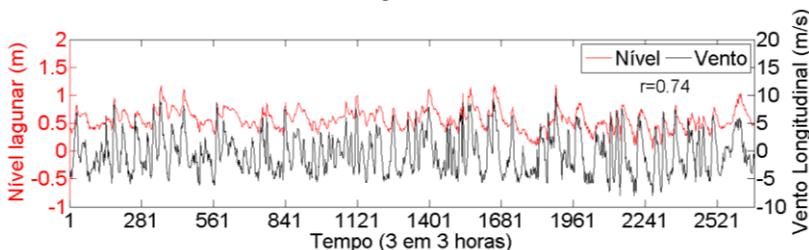


Fonte: autor.

Aplicando uma correlação cruzada entre nível *versus* vento, já que a tensão por cisalhamento do vento é um forte fator responsável pela variação de nível lagunar, foram observadas as mesmas características entre vento longitudinal e variações de nível por setor lagunar, assim como os desníveis calculados entre os setores norte e sul. A figura 47 mostra a série temporal de vento longitudinal de reanálise (em preto) e o nível lagunar simulado para o setor norte (em vermelho), ocorrendo uma boa correlação positiva entre as variáveis ( $r=0,74$ ).

Os valores positivos para o vento longitudinal indicam que estes sopram do quadrante Sul, já negativos do quadrante Norte, ou seja, os níveis neste setor tornam-se mais altos quando ocorrem ventos do quadrante Sul, já quando ocorrem ventos de Norte os níveis são reduzidos. Separando as duas séries por meses (nível e vento), outubro e novembro apresentaram as mais fortes correlações (0,80 e 0,83, respectivamente), e o mês de junho o único com correlação abaixo de 0,70 (0,68).

Figura 47. Correlação entre variação de nível lagunar no setor norte e vento longitudinal.

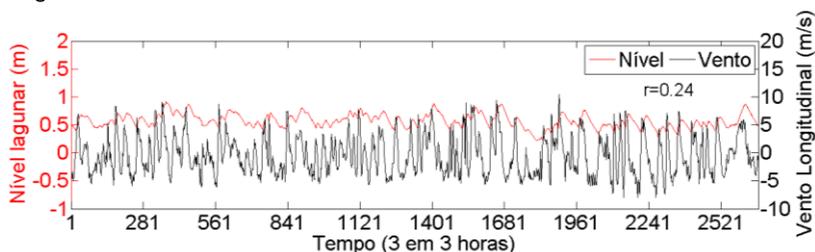


Fonte: autor.

O setor central dentre todos os setores foi o que apresentou a correlação mais fraca (0,24) (Fig. 48). Em nenhum dos meses foi registrado correlação, com todos os meses ficando abaixo de 0,40. O mês com a correlação mais fraca foi setembro (0,11). Castelhão e Möller Jr. (2003) mostraram que a circulação em área central/mediana de ambiente lagunar forçada por vento, no caso a Lagoa dos Patos (Rio Grande do Sul/Brasil), funciona como um ponto nodal do sistema, o que talvez explique as menores variações de nível neste setor, além da baixa correlação entre variação de nível *versus* vento.

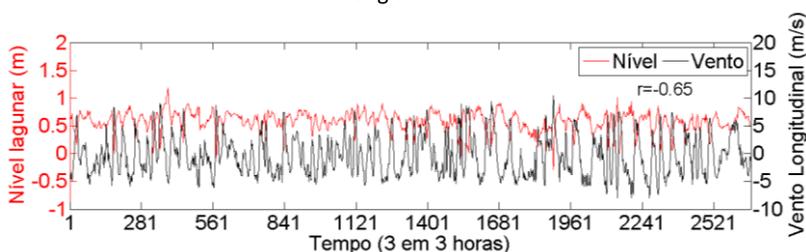
No setor sul a correlação entre as variáveis é mediana e inversa ( $r=-0,65$ ) (Fig. 49). Os níveis neste setor tornam-se mais altos quando ocorrem ventos do quadrante Norte, já quando ocorrem ventos de Sul os níveis são reduzidos. Também adotando o mesmo procedimento de separar as séries temporais por mês, em outubro e novembro a correlação inversa foi forte ( $-0,83$  e  $-0,84$ , respectivamente), e o mês de agosto ( $-0,77$ ) e março ( $-0,71$ ) também registraram correlação.

Figura 48. Correlação entre variação de nível lagunar no setor central e vento longitudinal.



Fonte: autor.

Figura 49. Correlação entre variação de nível lagunar no setor sul e vento longitudinal.



Fonte: autor.

Considerando as características descritas anteriormente, os resultados encontrados para cada simulação de elevação do nível do mar foram analisados em períodos com marés astronômicas diferentes (sizígia e quadratura), com influência tanto de ventos do quadrante Norte quanto de quadrante Sul. Sendo assim, para cada cenário de elevação do nível do mar foram identificados e analisados quatro situações diferentes (Maré de Sizígia/Vento NE, Maré de Sizígia/Vento SE, Maré de Quadratura/Vento NE e Maré de Quadratura/Vento SE).

### 6.3.1 CONDIÇÃO ATUAL NO NÍVEL DO MAR

Foram selecionadas datas na simulação que representam condições de maré de quadratura, são os dias 18 de agosto (vento NE) e 30 de setembro (vento SSO). Já os cenários para maré de sizígia foram selecionados para as datas de 26 de agosto (vento S) e 06 de setembro (vento NNE), todos para o ano de 2013. Os gráficos mostrando a variação do nível lagunar por setor irão destacar as datas selecionadas, bem como a evolução para o cenário escolhido. Isto irá compreender um período de 15 de agosto até 05 de outubro de 2013.

Em regime de maré de quadratura com ventos de NE foi observado desnível na LC de até 0,62 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 0,99 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,37 m. No setor central os níveis variaram entre 0,64 m e 0,99 m, um desnível de 0,35 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,19 m e 0,81 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,62 m (Figura 50A).

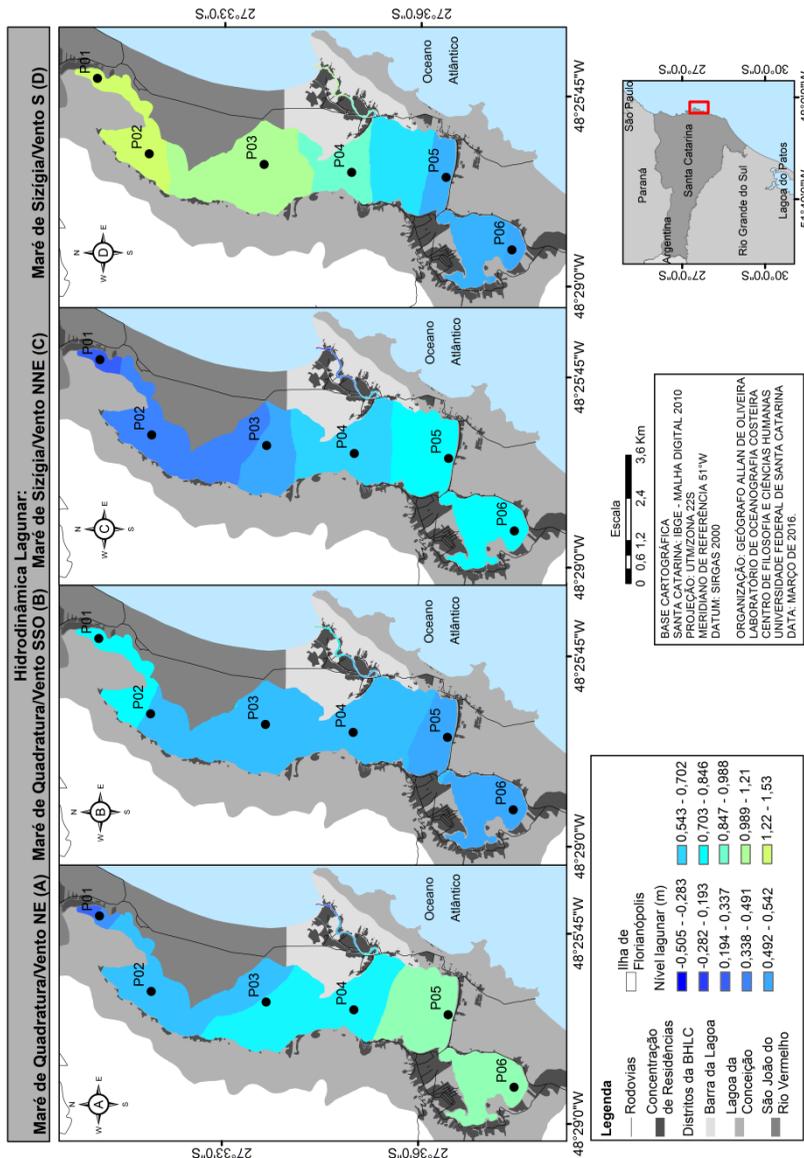
Com ventos de SE em regime de maré de quadratura foi observado desnível na LC de até 0,35 m, menor do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 0,84 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,49 m. No setor central os níveis variaram entre 0,49 m e 0,72 m, um desnível de 0,23 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,76 m e 0,57 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,19 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 50B).

Em regime de maré de sizígia com ventos de NE foi observado desnível na LC de até 0,76 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 0,85 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,09 m. No setor central os níveis variaram entre 0,40 m e 0,85 m, um desnível de 0,45 m. Ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre -0,50 m e 0,69 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 1,19 m (Figura 50C).

Com ventos de SE em regime de maré de sizígia foi observado desnível na LC de até 1,04 m, maior do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,53 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,49 m. No setor central os níveis variaram entre 0,61 m e 1,3 m, um desnível de 0,69 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 1,3 m e 0,84 m, da

desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,46 m, menor do que o observado com vento de NE (Figura 50D).

Figura 50. Variações de nível lagunar a partir do modelo calibrado e com condições de maré astronômica e ventos diferentes.



Fonte: autor.

O vento, assim como já observado por Andrade (2001), possui uma forte função na circulação da LC, função esta também identificada no modelo hidrodinâmico calibrado. Além de causar variação positiva de nível, o vento também é responsável por um forte desnível lagunar, causando variação no nível ao longo dos três setores em situações de maré meteorológica.

A partir da setorização da LC proposta por Muehe e Caruso Jr. (1999) as maiores variações positivas no nível lagunar ocorreram no setor norte. Além do efeito do vento neste setor também há o rio João Gualberto Soares, o qual foi considerado constante na modelagem, com uma vazão de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . A falta de uma série temporal com a vazão para todo 2013, e assim a discriminação de valores verdadeiros de vazão, podem estar subestimando os valores máximos de nível lagunar simulados, caso vazões maiores ocorram no rio.

#### **6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A partir do modelo hidrodinâmico desenvolvido neste capítulo para a Lagoa da Conceição, e que servirá de base para determinar o Índice de Susceptibilidade Física à elevação do nível do mar, foi possível chegar as seguintes considerações:

- O modelo hidrodinâmico reproduziu as condições hidrodinâmicas da LC, uma vez que o processo de calibragem obteve uma RMAE de 0,17, o que classifica a modelagem como excelente.

- Neste trabalho, assim como em outros sobre modelagem hidrodinâmica já realizados na LC, e citados ao longo do texto, observou-se que a maré astronômica é filtrada conforme penetra no sistema. Seus efeitos ficam muito reduzidos, diferente dos efeitos da maré meteorológica, que possuem forte função no processo de circulação lagunar.

- Como já discutido por outros autores em trabalhos sobre modelagem hidrodinâmica na LC o vento é o fator que mais contribui para a circulação lagunar.

- Os ventos de Norte causam depressão no Setor Norte e elevação no Setor Sul, já no Setor Central as variações são mínimas provavelmente por ser um ponto nodal do sistema.

- O setor Norte da LC é o que possui maiores variações de nível e também o que registra os níveis mais altos, possuindo correlação com ventos do Quadrante Sul.

- Durante ventos de Sul as correntes geradas causam a entrada de água marinha para o sistema lagunar, contribuindo ainda mais para elevação do nível no Setor Norte. Além disso, a descarga do rio João Gualberto Soares também pode auxiliar para este resultado.

- Em condições de maré de sizígia e ventos de quadrante Sul foram observadas as maiores variações de nível no Setor Norte, quando comparado à situação de maré de quadratura e ventos de quadrante Sul.

- No Setor Sul existe uma menor tendência de correlação entre variação de nível *versus* vento. Neste setor são os ventos de Norte que causam variações, como pode ser observado em alguns meses com correlação acima de -0,70.

- Com ventos de quadrante Norte as correntes geradas causam a saída de água do sistema lagunar, contribuindo para as menores variações de nível no Setor Sul, quando estas são comparadas as variações do Setor Norte.

- No Setor Sul, diferente do Setor Norte, foi observado que em maré de quadratura com vento de Norte o nível foi maior do que em maré de sizígia com vento de mesmo quadrante.

## **7 DETERMINAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA DA LAGOA DA CONCEIÇÃO À SUBIDA DO NÍVEL DO MAR**

### **7.1 INTRODUÇÃO**

A susceptibilidade, como definida neste trabalho, está relacionada ao risco natural, ou comportamento morfodinâmico do sistema caso ocorra subida do nível do mar. Neste capítulo será apresentada a metodologia, os resultados e discussão referentes ao comportamento do nível lagunar a partir das simulações com variações positivas do nível do mar, bem como a definição/elaboração de um Mapa de Susceptibilidade Física da LC à elevação do nível do mar.

### **7.2 METODOLOGIA**

Para determinar o grau e a variabilidade da Susceptibilidade Física da LC à subida do nível do mar, e assim atender a um dos objetivos específicos da tese, foi necessário primeiramente desenvolver um modelo conceitual para sistematizar os processos físicos e hidrodinâmicos no sistema lagunar e sua interação com o Oceano Atlântico. Para isso foi desenvolvido o modelo hidrodinâmico apresentado no capítulo anterior que, após uma série de simulações, foi calibrado e pode reproduzir a hidrodinâmica lagunar.

Com esse modelo calibrado foram geradas simulações em que o nível do mar estaria acima do nível atual, baseadas nos projeções de subida do nível do mar propostas pelo IPCC (2014). A partir do modelo hidrodinâmico e dos cenários de elevação do nível do mar, com a resposta do sistema lagunar a estas novas condições de nível marinho, foi determinada a susceptibilidade da Lagoa da Conceição à esse perigo costeiro. A figura 51 mostra o fluxograma com as etapas para elaboração dos cenários elevação do nível do mar e elaboração do Mapa de Susceptibilidade Física à elevação do nível do mar.

Figura 51. Fluxograma com as etapas para elaboração do Índice de Susceptibilidade Física.



Fonte: autor.

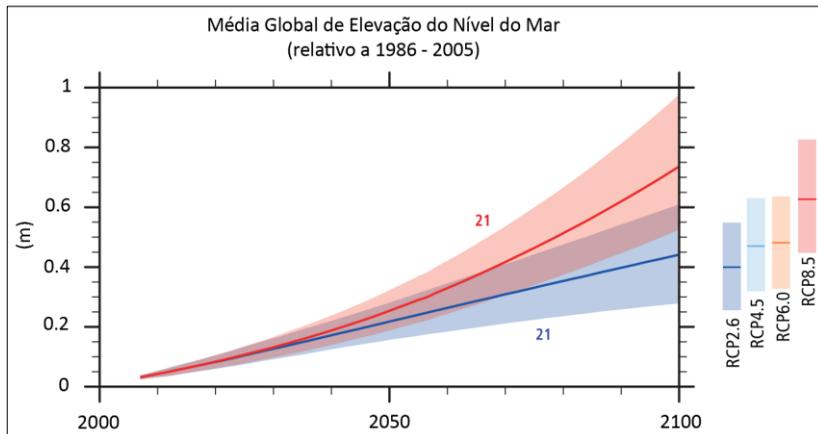
### 7.2.1 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS A SEREM SIMULADOS

Os cenários de elevação do nível do mar foram definidos a partir das propostas formuladas pelo IPCC (2014). As projeções de mudança no clima, que irão influenciar no nível médio do mar, permitiram a definição de quatro cenários de elevação do nível do mar, com seus desvios de incerteza para mais e para menos (**RCP2.6**, RCP4.5, RCP6.0 e **RCP8.5**).

Dos quatro cenários de elevação do nível do mar propostos pelo IPCC (2014) apenas dois foram simulados neste trabalho, o **RCP2.6** e **RCP8.5**, por serem considerados otimista (RCP2.6) e pessimista (RCP8.5). De acordo com a metodologia do IPCC as projeções de elevação do nível do mar se estendem para o período de 2005 até 2100 (Fig. 52). Porém optou-se por gerar apenas as previsões para os anos

de 2050 e 2100, sem levar em consideração os desvios de incerteza para cada cenário.

Figura 52. Gráfico mostrando as projeções de elevação do nível do mar de acordo com o IPCC.



Fonte: Modificado de IPCC (2014).

Com o modelo hidrodinâmico foram geradas novas simulações com os mesmos parâmetros definidos no teste 3 da tabela 12, e mesmos dados de entrada, a exceção dos dados de contorno para nível d'água. Os dados de nível d'água utilizados nas simulações de elevação do nível do mar foram os mesmos utilizados no capítulo anterior, porém foi adicionado o valor previsto para elevação do nível do mar. Com isso, foram geradas quatro simulações de elevação do nível do mar, duas para 2050 (uma otimista e outra pessimista) e duas para 2100 (também uma otimista e outra pessimista), sendo elas:

- 0,21m acima do nível atual (média da otimista em 2050);
- 0,25m acima do nível atual (média da pessimista em 2050);
- 0,44m acima do nível atual (média da otimista em 2100);
- 0,73m acima do nível atual (média da pessimista em 2100);

### 7.2.1.1 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Assim como no capítulo anterior, os resultados das projeções de elevação do nível do mar foram analisados levando em consideração períodos com marés astronômicas diferentes (sizígia e quadratura) sob

influência de ventos dos quadrantes Norte e Sul. Sendo assim, para cada cenário de elevação do nível do mar foram identificadas e analisadas quatro situações diferentes (Maré de Sizígia/Vento NE, Maré de Sizígia/Vento SE, Maré de Quadratura/Vento NE e Maré de Quadratura/Vento SE) como mostra a tabela 14.

Tabela 14. Tabela com a definição dos cenários de elevação do nível do lagunar.

Ano	Elevação do Nível lagunar	Maré	Vento	Identificador do Cenário
2050	0,21 m	Quadratura	NE	A1
2050	0,21 m	Quadratura	SE	A2
2050	0,21 m	Sizígia	NE	A3
2050	0,21 m	Sizígia	SE	A4
2050	0,25 m	Quadratura	NE	B1
2050	0,25 m	Quadratura	SE	B2
2050	0,25 m	Sizígia	NE	B3
2050	0,25 m	Sizígia	SE	B4
2100	0,44 m	Quadratura	NE	C1
2100	0,44 m	Quadratura	SE	C2
2100	0,44 m	Sizígia	NE	C3
2100	0,44 m	Sizígia	SE	C4
2100	0,73 m	Quadratura	NE	D1
2100	0,73 m	Quadratura	SE	D2
2100	0,73 m	Sizígia	NE	D3
2100	0,73 m	Sizígia	SE	D4

Fonte: autor.

As datas selecionadas na simulação que representam condições de maré de quadratura são os dias 18 de agosto (vento NE) e 30 de setembro (vento SSO). Já os cenários para maré de sizígia foram selecionados para as datas de 26 de agosto (vento S) e 06 de setembro (vento NNE), todos para o ano de 2013. Os gráficos mostrando a variação do nível lagunar por setor irão destacar as datas selecionadas, bem como a evolução para o cenário escolhido. Isto irá compreender um período de 15 de agosto até 05 de outubro de 2013.

## 7.2.2 SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA

O modelo hidrodinâmico elaborado para a LC, assim como as simulações de elevação do nível do mar realizadas, criaram séries temporais de variação do nível lagunar para 365 dias, com oito leituras diárias. Ao todo existem 2920 dados de nível lagunar para cada nó da malha. Isso permitiu, através de análise estatística simples, identificar quais foram as maiores variações observadas ao longo de todo o período, levando em consideração os efeitos de maré astronômica, maré meteorológica e ação de vento.

Para identificar a Susceptibilidade Física da LC primeiramente foram comparados todos os cenários de elevação do nível do mar com o modelo hidrodinâmico. Para isso foram selecionados pontos amostrais ao longo da LC e extraídas séries temporais de nível utilizando o programa BlueKenue (6 pontos). A comparação permitiu identificar se existe um padrão nas variações, ou se dependendo do cenário de elevação ocorrem alterações na circulação hidrodinâmica. A análise das séries temporais, bem como a elaboração dos gráficos, foi realizada no programa MATLAB.

Analisadas as séries temporais de nível, e utilizando a ferramenta *Tools/Extract Surface/Temporal Maximums* do programa Bluekenue, foi gerado um domínio numérico expressando a máxima variação de nível para cada nó da malha. Esta máxima variação foi obtida a partir do trigésimo segundo dia de simulação, que compreende o dia 1º de fevereiro (passo do tempo 249), até o dia 31 de dezembro, que compreende o passo de tempo 2920 (todo mês de janeiro foi excluído da análise por compreender o período em que o modelo está estabilizando as condições hidrodinâmicas).

A partir da malha estruturada foram identificados e selecionados os nós que abrangessem apenas a LC e parte do oceano adjacente (9394 nós), a fim de criar um arquivo de texto simples (formato txt) com os resultados obtidos. Este arquivo possui três colunas informando as coordenadas de todos os nós ('x' e 'y') e o valor de nível registrado para cada coordenada. Este arquivo de texto foi exportado para o *Office Excel*, convertendo-o para um arquivo tipo tabela (formato xls), que permitiu criar um arquivo geoespacial do tipo ponto no programa ArcGIS 10.3 através da ferramenta *Create Feature Class/From XY Table*.

No programa ArcGIS 10.3 foi criada uma superfície contínua com as informações de máximos valores de nível lagunar. Para isso foi utilizado o interpolador Vizinheiro Natural, a partir da ferramenta *Spatial Analyst Tools/Interpolation/Natural Neighbour*. Este interpolador utiliza a Triangulação de *Delaunay*, a fim de descobrir uma vizinhança mais apropriada para determinar o valor que cada célula (*pixel* do arquivo matricial) terá na superfície gerada. Além disso, não há extrapolação de valores, resolvendo a interpolação somente para o interior do domínio dos dados. Neste trabalho o tamanho da célula (x,y) foi de 1x1m.

Depois dos dados interpolados foi executada uma análise estatística sobre a superfície contínua, separando os valores de nível máximo em percentis. Assim como no capítulo de vulnerabilidade social, apresentado anteriormente, a susceptibilidade lagunar à elevação do nível do mar foi definida utilizando a análise estatística por percentis. No primeiro percentil estão os menores valores de máxima variação de nível, compreendendo as áreas com menor susceptibilidade, e o último percentil com os maiores valores das máximas variações, representando as áreas com maior susceptibilidade.

Utilizando a ferramenta *Spatial Analyst Tools/Reclass/Reclassify* a superfície contínua foi reclassificada, separando os valores em cinco intervalos definidos pelos percentis. Após, utilizando a ferramenta *Conversion Tools/From Raster/Raster to Polygon*, a matriz foi convertida em um arquivo vetorial do tipo polígono. Utilizando a linha de costa lagunar e o produto criado a partir da conversão do arquivo matricial em vetorial aplicou-se a ferramenta *Analyst Tools/Extract/Clip*.

A ferramenta *Clip* permite extrair informações contidas em um arquivo e transportá-la para outro arquivo, desde que haja sobreposição espacial. Neste caso foram extraídas informações presentes no arquivo vetor-polígono, que possui as classes de variação máxima de nível e separadas por percentis, e transportadas para o arquivo que possui a representação da linha de costa lagunar. Logo, ao final do processo foi possível verificar o grau de susceptibilidade das margens da LC à elevação do nível do mar.

## 7.3 RESULTADOS

### 7.3.1 CENÁRIOS DE ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

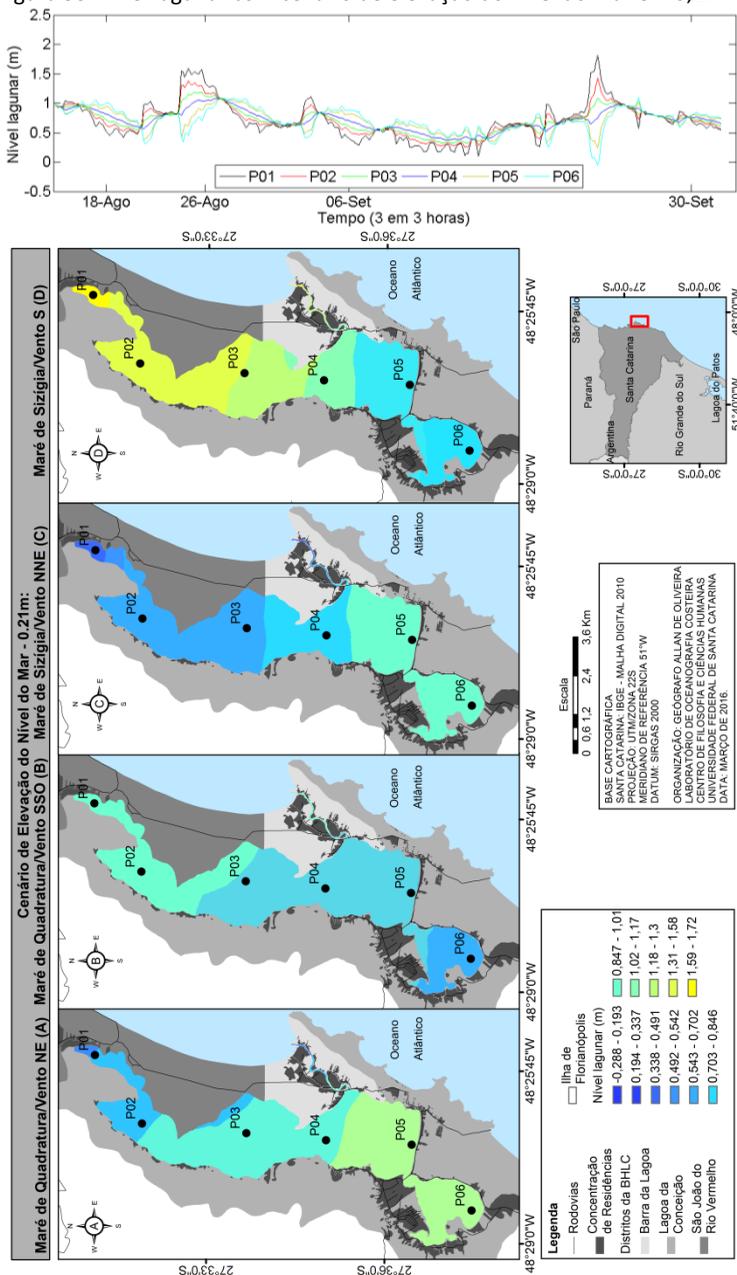
Foram gerados quatro cenários de elevação do nível do mar baseados nas projeções do IPCC (2014). A projeção otimista de elevação do nível do mar para 2050 é de 0,21 m e seu efeito pode ser observado nas figuras 53A, 53B, 53C e 53D. Em regime de maré de quadratura com ventos de NE (cenário A1) foi observado desnível na LC de até 0,51 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,17 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,66 m. No setor central os níveis variaram entre 0,83 m e 1,09 m, um desnível de 0,26 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,40 m e 1,00 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,60 m (Figura 53A).

Com ventos de SE em regime de maré de quadratura (cenário A2) foi observado desnível na LC de até 0,34 m, menor do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,01 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,67 m. No setor central os níveis variaram entre 0,71 m e 0,86 m, um desnível de 0,15 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,71 m e 1,01 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,30 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 53B).

Em regime de maré de sizígia com ventos de NE (cenário A3) foi observado desnível na LC de até 0,70 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,00 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,30 m. No setor central os níveis variaram entre 0,59 m e 1,00 m, um desnível de 0,41 m. Ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre -0,29 m e 0,86 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 1,15 m (Figura 53C).

Com ventos de SE em regime de maré de sizígia (cenário A4) foi observado desnível na LC de até 0,98 m, maior do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,72 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,74 m. No setor central os níveis variaram entre 0,85 m e 1,39 m, um desnível de 0,54 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,96 m e 1,61 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,65 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 53D).

Figura 53. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,21 m.



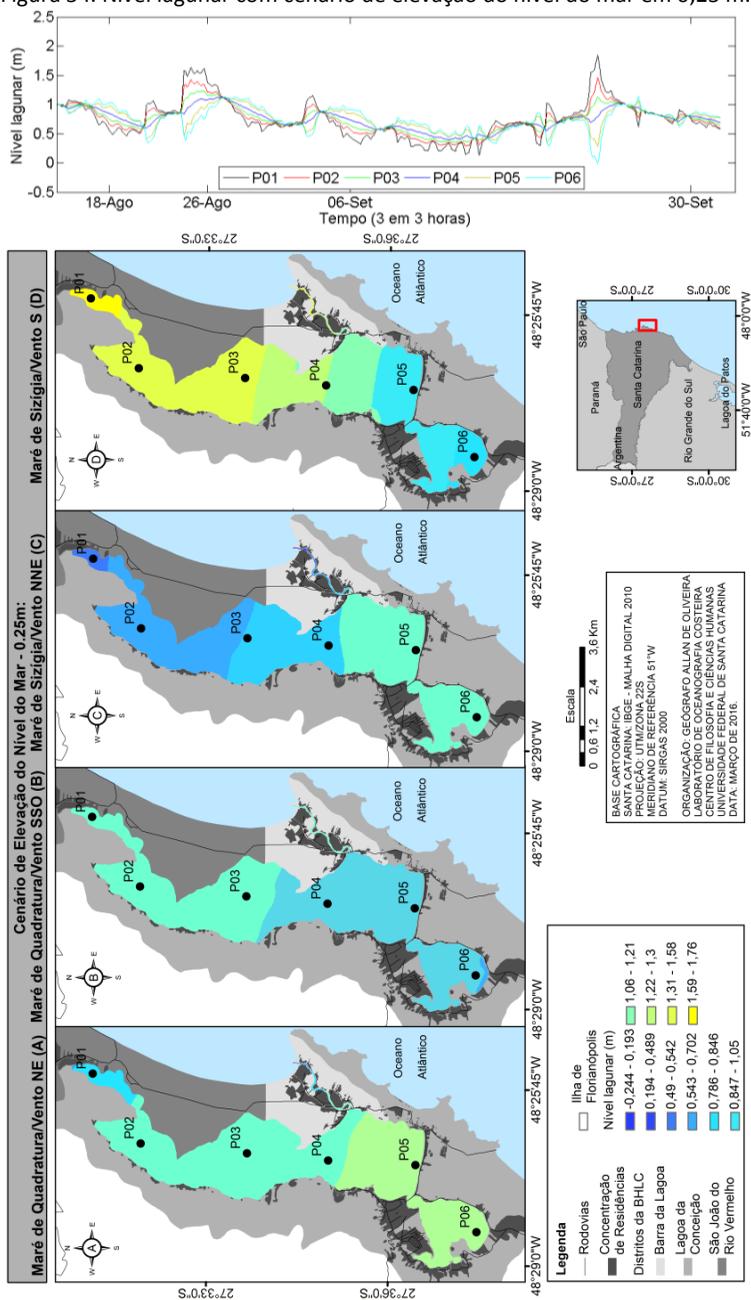
Comparando os resultados encontrados entre o modelo numérico e o cenário com elevação do nível do mar em 0,21 m é possível identificar que a diferença entre os valores mínimo e máximo ficaram muito próximos de 21 cm. No modelo o valor mínimo foi de -0,505 m e aumentando o nível do mar em 0,21m o valor mínimo passou a ser -0,288 m, uma diferença de 0,217 m. Para o valor máximo a diferença de valores foi de 0,19 m, sendo registrado no modelo o valor de 1,53 m e no cenário com aumento do mar o valor de 1,72 m.

A projeção pessimista de elevação do nível do mar para 2050 é de 0,25m e seu efeito pode ser observado nas figuras 54A, 54B, 54C e 54D. Em regime de maré de quadratura com ventos de NE (cenário B1) foi observado desnível na LC de até 0,51 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,21 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,70 m. No setor central os níveis variaram entre 0,87 m e 1,21 m, um desnível de 0,34 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,45 m e 1,04 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,59 m (Figura 54A).

Com ventos de SE em regime de maré de quadratura (cenário B2) foi observado desnível na LC de até 0,35 m, menor do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,05 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,70 m. No setor central os níveis variaram entre 0,70 m e 0,94 m, um desnível de 0,24 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,78 m e 1,05 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,27 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 54B).

Em regime de maré de sizígia com ventos de NE (cenário B3) foi observado desnível na LC de até 0,71 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,04 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,33 m. No setor central os níveis variaram entre 0,61 m e 1,04 m, um desnível de 0,43 m. Ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre -0,24 m e 0,90 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 1,14 m (Figura 54C).

Figura 54. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,25 m.



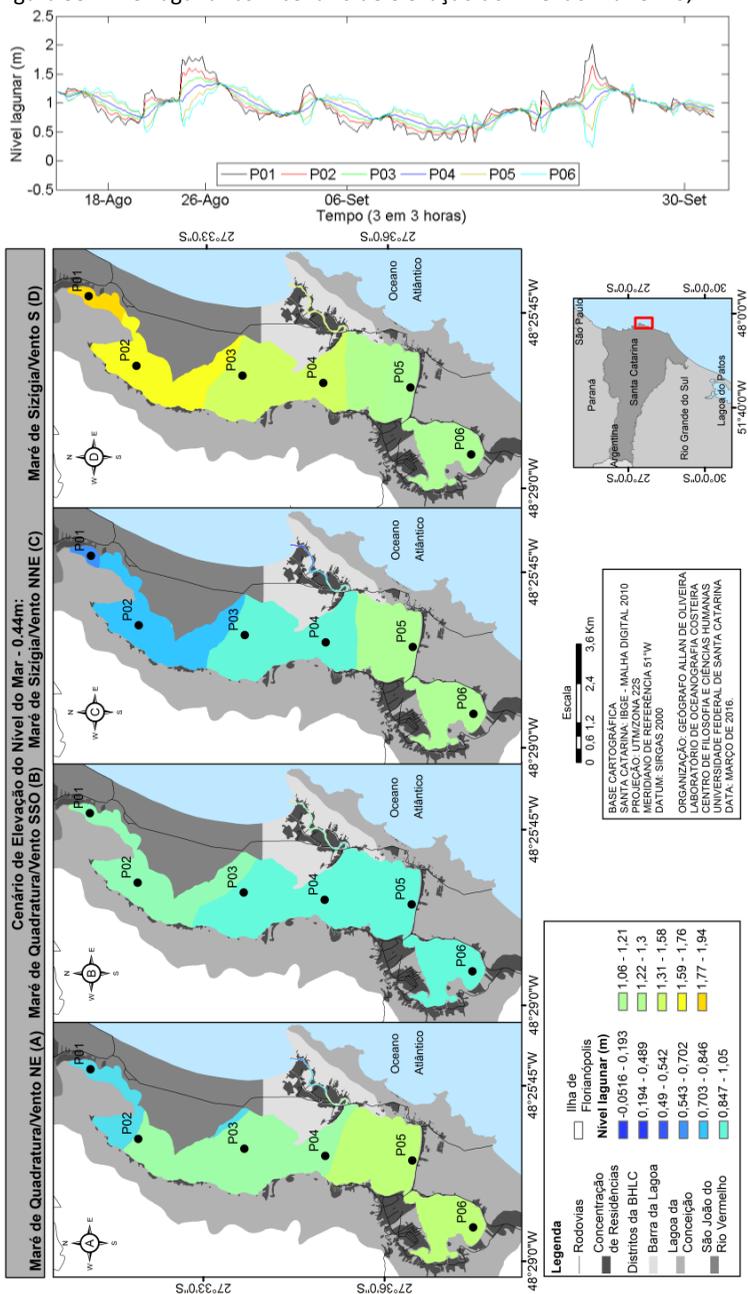
Com ventos de SE em regime de maré de sizígia (cenário B4) foi observado desnível na LC de até 0,97 m, maior do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,76 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,79 m. No setor central os níveis variaram entre 0,89 m e 1,44 m, um desnível de 0,55 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 1,01 m e 1,54 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,53 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 54D).

Comparando os resultados encontrados entre o modelo e o cenário com elevação do nível do mar em 0,25 m é possível identificar que a diferença entre os valores mínimo e máximo ficaram muito próximos de 25 cm. No modelo hidrodinâmico o valor mínimo foi de -0,505 m e aumentando o nível do mar em 0,21 m o valor mínimo passou a ser -0,244 m, uma diferença de 0,261 m. Para o valor máximo a diferença de valores foi de 0,23 m, sendo registrado no modelo o valor de 1,53 m e no cenário com aumento do mar o valor de 1,76 m.

A projeção otimista de elevação do nível do mar para 2100 é de 0,44m e seu efeito pode ser observado nas figuras 55A, 55B, 55C e 55D. Em regime de maré de quadratura com ventos de NE (cenário C1) foi observado desnível na LC de até 0,51 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,17 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,66 m. No setor central os níveis variaram entre 0,83 m e 1,09 m, um desnível de 0,26 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,40 m e 1,00 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,60 m (Figura 55A).

Com ventos de SE em regime de maré de quadratura (cenário C2) foi observado desnível na LC de até 0,34 m, menor do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,01 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,67 m. No setor central os níveis variaram entre 0,71 m e 0,86 m, um desnível de 0,15 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,71 m e 1,01 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,30 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 55B).

Figura 55. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,44 m.



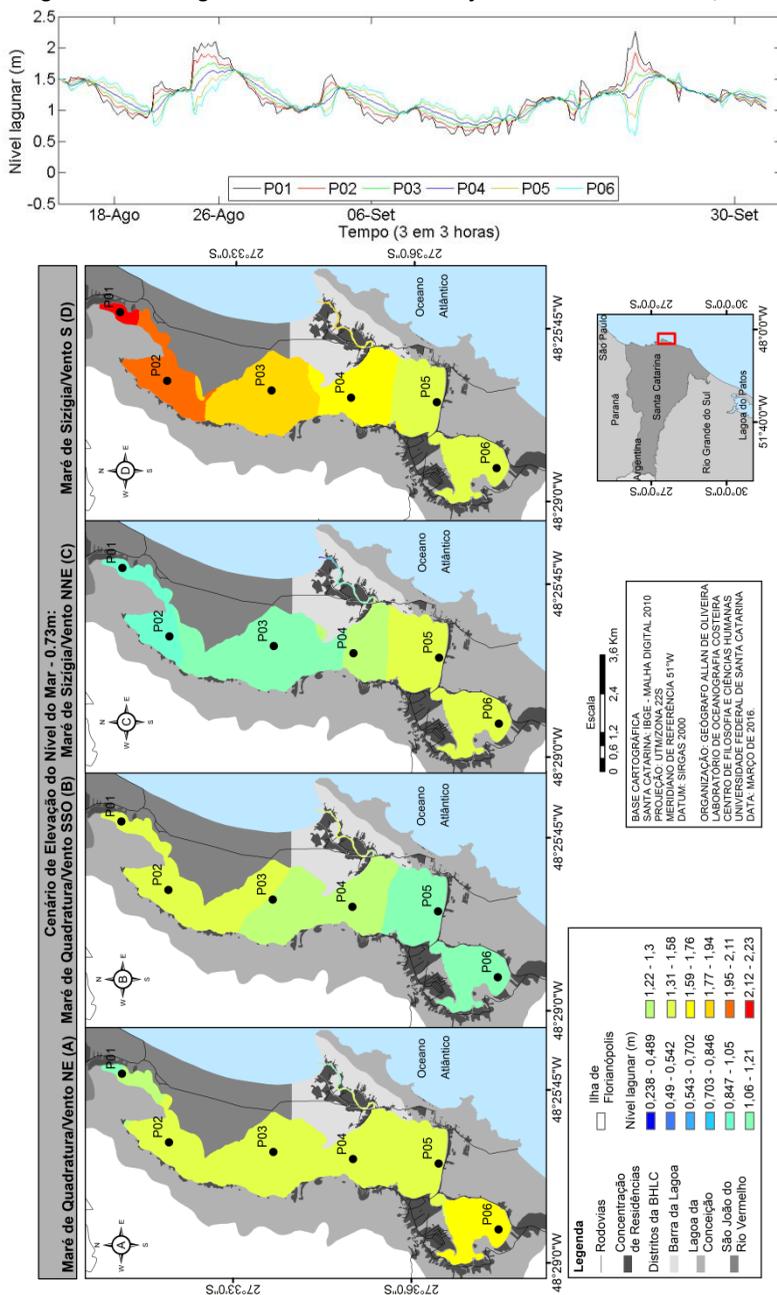
Em regime de maré de sizígia com ventos de NE (cenário C3) foi observado desnível na LC de até 0,70 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,00 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,30 m. No setor central os níveis variaram entre 0,59 m e 1,00 m, um desnível de 0,41 m. Ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre -0,29 m e 0,86 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 1,15 m (Figura 55C).

Com ventos de SE em regime de maré de sizígia (cenário C4) foi observado desnível na LC de até 0,98 m, maior do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,72 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,74 m. No setor central os níveis variaram entre 0,85 m e 1,39 m, um desnível de 0,54 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,96 m e 1,61 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,65 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 55D).

Comparando os resultados encontrados entre o modelo hidrodinâmico e o cenário com elevação do nível do mar em 0,44 m é possível identificar que a diferença entre os valores mínimo e máximo ficaram muito próximos de 44 cm. No modelo o valor mínimo foi de -0,505 m e aumentando o nível do mar em 0,44 m o valor mínimo passou a ser -0,052 m, uma diferença de 0,453 m. Para o valor máximo a diferença de valores foi de 0,41 m, sendo registrado no modelo o valor de 1,53 m e no cenário com aumento do mar o valor de 1,94 m.

A projeção pessimista de elevação do nível do mar para 2100 é de 0,73m e seu efeito pode ser observado nas figuras 56A, 56B, 56C e 56D. Em regime de maré de quadratura com ventos de NE (cenário D1) foi observado desnível na LC de até 0,51 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,17 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,66 m. No setor central os níveis variaram entre 0,83 m e 1,09 m, um desnível de 0,26 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,40 m e 1,00 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,60 m (Figura 56A).

Figura 56. Nível lagunar com cenário de elevação do nível do mar em 0,73 m.



Com ventos de SE em regime de maré de quadratura (cenário D2) foi observado desnível na LC de até 0,34 m, menor do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,01 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,67 m. No setor central os níveis variaram entre 0,71 m e 0,86 m, um desnível de 0,15 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,71 m e 1,01 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,30 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 56B).

Em regime de maré de sizígia com ventos de NE (cenário D3) foi observado desnível na LC de até 0,70 m. No setor sul foi registrado o maior nível lagunar, com 1,00 m, no setor norte o nível mais baixo registrado foi de 0,30 m. No setor central os níveis variaram entre 0,59 m e 1,00 m, um desnível de 0,41 m. Ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre -0,29 m e 0,86 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 1,15 m (Figura 56C).

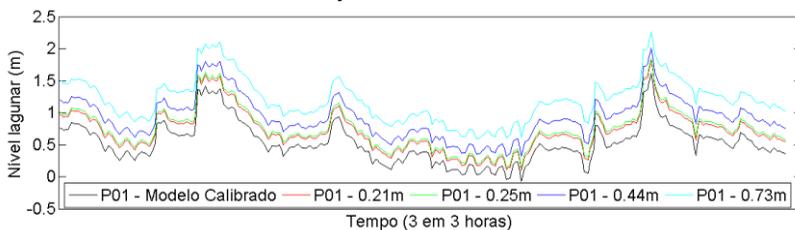
Com ventos de SE em regime de maré de sizígia (cenário D4) foi observado desnível na LC de até 0,98 m, maior do que com vento NE. No setor norte foi registrado o maior nível lagunar, com 1,72 m, no setor sul o nível mais baixo registrado foi de 0,74 m. No setor central os níveis variaram entre 0,85 m e 1,39 m, um desnível de 0,54 m. Já ao longo do Canal da Barra os níveis variaram entre 0,96 m e 1,61 m, da desembocadura em direção a LC, conferindo um desnível de 0,65 m, também menor do que o observado com vento de NE (Figura 56D).

Comparando os resultados encontrados entre o modelo e o cenário com elevação do nível do mar em 0,73 m é possível identificar que a diferença entre os valores mínimo e máximo ficaram muito próximos de 73 cm. No modelo o valor mínimo foi de -0,505 m e aumentando o nível do mar em 0,73 m o valor mínimo passou a ser 0,238 m, uma diferença de 0,743 m. Para o valor máximo a diferença de valores foi de 0,70 m, sendo registrado no modelo o valor de 1,53 m e no cenário com aumento do mar o valor de 2,23 m.

A partir dos seis pontos selecionados ao longo da LC foi possível analisar o comportamento hidrodinâmico nos quatro cenários de elevação do nível do mar. Os gráficos das figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 mostram que mesmo aumentando os valores de nível do mar nas condições de contorno, o Canal da Barra continuou filtrando a maré astronômica e meteorológica com as mesmas condições de contorno

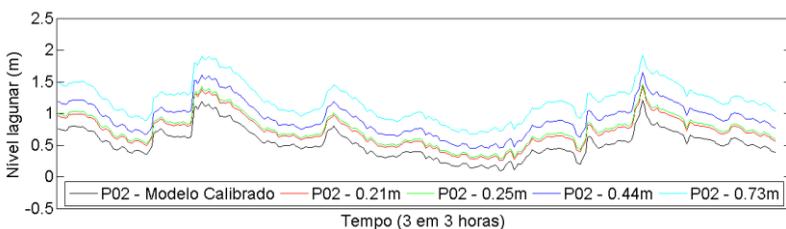
de maré, salinidade, temperatura da água e velocidade de corrente, além das trocas com a atmosfera (vento e temperatura do ar) foram prescritas no modelo.

Figura 57. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P01 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



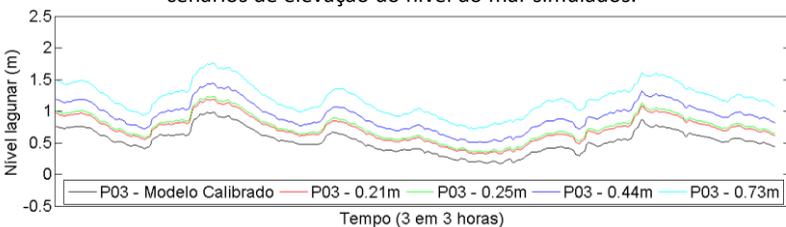
Fonte: autor.

Figura 58. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P02 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



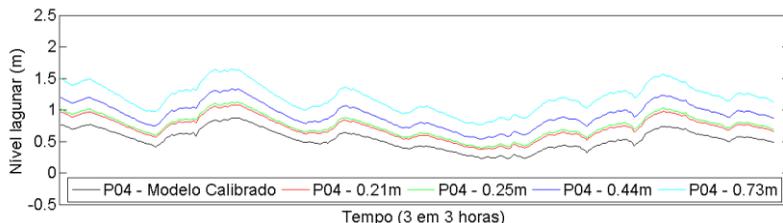
Fonte: autor.

Figura 59. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P03 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



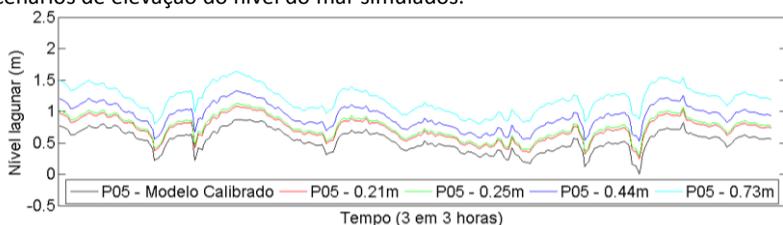
Fonte: autor.

Figura 60. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P04 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



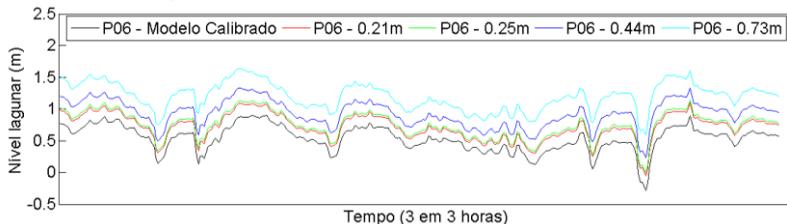
Fonte: autor.

Figura 61. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P05 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



Fonte: autor.

Figura 62. Comportamento do aumento do nível do mar no ponto P06 em todos os cenários de elevação do nível do mar simulados.



Fonte: autor.

Os resultados também mostraram que as variações ocorreram apenas quando as condições de contorno com nível do mar foram alteradas. Em todos os locais selecionados o nível lagunar aumentou na mesma proporção que o nível do mar aumentou, mostrando que o Canal da Barra não impediu a subida do nível lagunar a partir da interação com o Oceano Atlântico.

### 7.3.2 SUSCEPTIBILIDADE FÍSICA

A partir do critério utilizado para criar o Mapa de Susceptibilidade Física à elevação do nível do mar foi possível

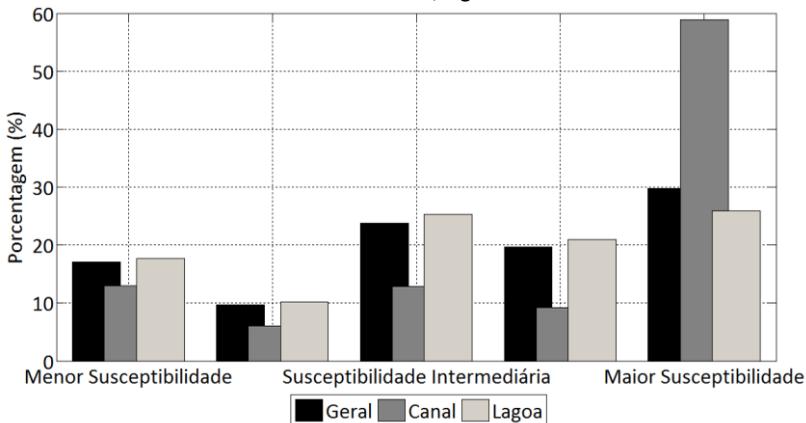
identificar que duas condições determinaram o índice criado: maré astronômica e maré meteorológica. Estas condições criaram duas áreas principais para discussão das causas que geraram tais diferenças nas variações máximas do nível lagunar, e assim sua susceptibilidade: o Canal da Barra da Lagoa e todo corpo lagunar.

Aplicando-se o método dos percentis, no Canal da Barra a susceptibilidade à elevação do nível do mar é maior nas margens que estão mais próximas da área oceânica, diminuindo à medida que afasta do oceano. Ao todo 58,88% das margens possuem maior susceptibilidade à elevação do nível do mar, que compreende uma distância de até 1,81 km no sentido oceano/laguna. No outro extremo, 12,99% das margens possuem menor susceptibilidade, estando estas localizadas na área mais próxima da laguna e com extensão de 0,40 km. Com grau intermediário de susceptibilidade estão 12,84% das margens, compreendendo uma extensão de 0,41 km.

Na LC as margens lagunares com maior susceptibilidade à elevação do nível do mar estão localizadas nos extremos da laguna, sendo que as maiores extensões estão no setor norte. Em 25,85% das margens lagunares ocorre uma maior susceptibilidade, que equivale a 11,62 km de extensão, 9,76 km no setor norte e 1,86 km no setor sul. Já a maior parte das margens com menor susceptibilidade está localizada no setor central da LC, principalmente nas margens leste e próximas do Canal da Barra e em direção ao norte da LC, totalizando 17,66% das margens.

No geral, 49,40% das margens de todo sistema (canal/laguna) registaram susceptibilidade à elevação do nível do mar acima de um padrão intermediário, e 29,79% foram enquadradas com maior susceptibilidade. Abaixo do padrão intermediário ficaram 26,79% das margens, sendo que 17,09% foram consideradas de menor susceptibilidade. No padrão intermediário ficaram 23,81% das margens. A figura 63 mostra a porcentagem com o grau de susceptibilidade na laguna, canal e geral.

Figura 63. Análise em porcentagem do grau de susceptibilidade das margens do sistema canal/laguna.

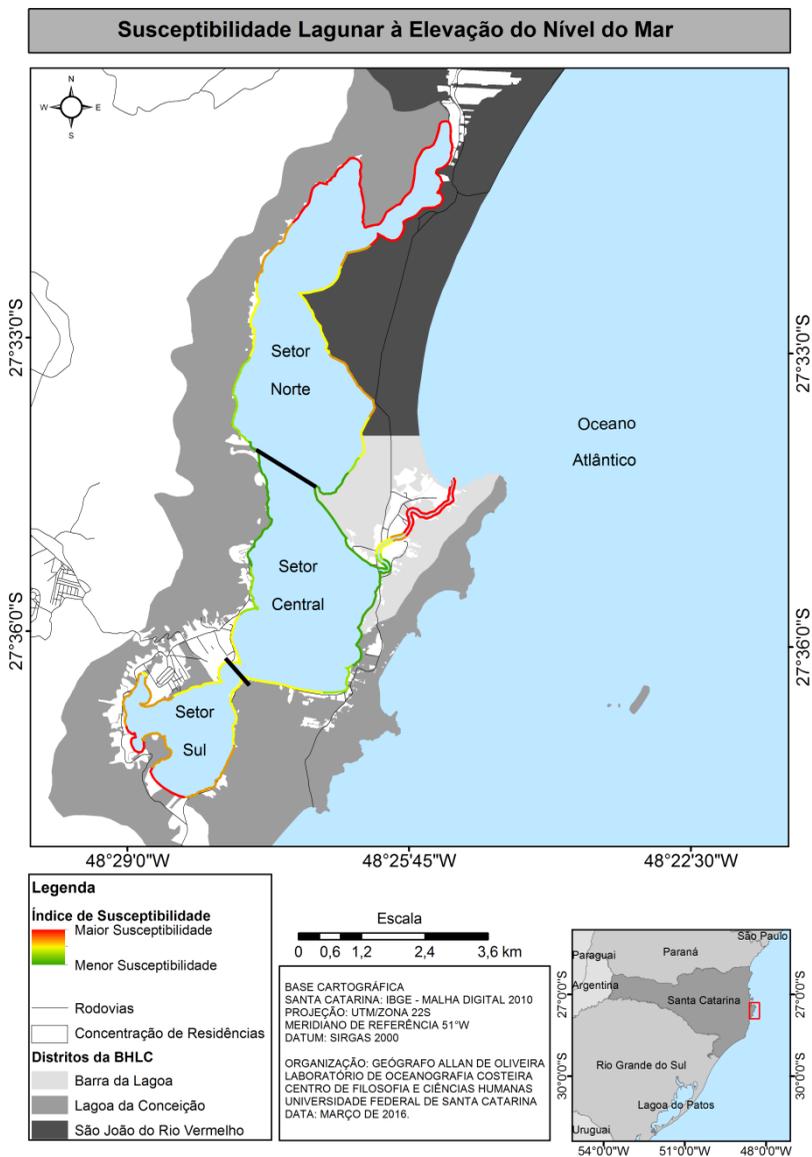


Fonte: autor.

Realizando a análise das margens da LC por setor, o Setor Sul possui 24,85% da extensão geral, o Setor Central 26,91% e o Setor Norte 48,23%. O Setor Sul não apresentou nenhuma margem com susceptibilidade abaixo do grau intermediário. Dos 11,17 km de extensão de margens, apenas 1,86 km na porção mais meridional do setor apresentou o maior grau de susceptibilidade, 3,61 km ficaram com grau intermediário e 5,7 km entre o maior grau e o intermediário (Fig. 64).

No Setor Central estão as maiores extensões de margens com o menor grau de susceptibilidade, ao mesmo tempo em que não existem margens com maior grau de susceptibilidade (Fig. 64). Ao todo 6,74 km das margens possuem menor susceptibilidade, estando estas localizadas principalmente na margem leste da laguna (4,22 km). Na porção mais meridional do Setor Central, principalmente ao longo da Avenida das Rendeiras, estão as margens com grau intermediário de susceptibilidade (1,80 km de extensão).

Figura 64. Mapa de Susceptibilidade Física do sistema lagunar à elevação do nível do mar.



Fonte: autor.

No Setor Norte ocorre as maiores extensões de margens com maior susceptibilidade à elevação do nível do mar, e também é o setor em que são detectados todos os graus de susceptibilidade (Fig. 64). Na porção mais setentrional deste setor verifica-se a maior extensão em quilômetros de margens com maior susceptibilidade, 9,76 km (45% das margens deste setor). Com Susceptibilidade Intermediária estão três segmentos de margem lagunar, que totalizam 4,75 km de extensão, sendo que a maior parte está na margem leste da LC (3,92 km). Com menor susceptibilidade está 1,20 km de margem lagunar.

#### **7.4 DISCUSSÃO**

Lagunas rasas são importantes ecossistemas em termos de suas altas relevâncias ecológicas, sendo particularmente vulneráveis à mudança climática global. A tentativa de identificar o comportamento hidrodinâmico destes ambientes e os efeitos da subida do nível do mar foi realizado a partir das projeções de elevação do nível do mar propostas pelo IPCC (2014). Valentim et.al. (2013) utilizaram o modelo numérico MOHID, projetado para aplicações em ambiente estuarino e costeiro de águas rasas, a fim de simular a condição hidrodinâmica atual e uma projeção de elevação do nível do mar proposta pelo IPCC. Fortunato et. al (2013) desenvolveram mapas detalhados de inundação para a área de Aveiro (Portugal), para diferentes cenários de subida do nível do mar e períodos de retorno.

Os resultados encontrados e apresentados neste trabalho mostraram que as simulações hidrodinâmicas com nível do mar mais elevado no Oceano Atlântico causam, na mesma proporção, uma elevação do nível lagunar na Lagoa da Conceição (Figs. 47, 48, 49 e 50). A partir dos procedimentos para análise dos resultados foi constatado que em condição de maré de sizígia com vento de S ocorreram as maiores variações positivas de níveis lagunares registradas na LC.

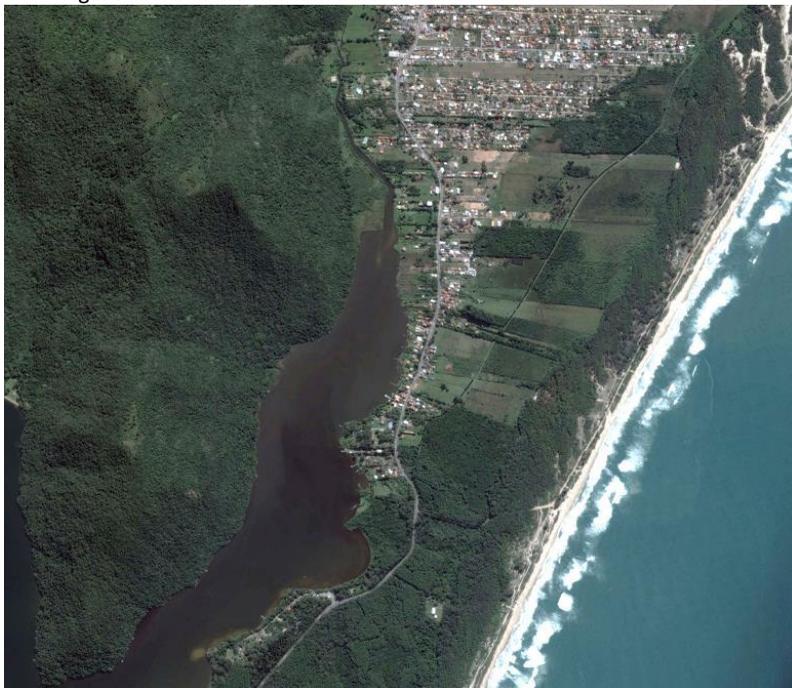
O vento, assim como já observado por Andrade (2001), possui uma forte função na circulação da LC, função esta também identificada no modelo hidrodinâmico implementado. Além de causar variação positiva de nível o vento também é responsável por um forte desnível lagunar, causando variação no nível ao longo dos três setores em situações de maré meteorológica.

A partir da setorização da LC proposta por Muehe e Caruso Jr. (1999) as maiores variações positivas no nível lagunar ocorreram no

Setor Norte, assim como as maiores extensões de margens lagunares com maior grau de susceptibilidade. Além do efeito do vento neste setor também há o rio João Gualberto Soares, o qual foi considerado constante na modelagem, com uma vazão de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . A falta de uma série temporal com a vazão para todo 2013, e assim a discriminação de valores verdadeiros de vazão, podem estar subestimando os valores máximos de nível lagunar simulados, caso vazões maiores ocorram no rio.

Quando se analisam as manchas urbanas com concentração de residências por setor lagunar, o Setor Norte não é o que apresenta maior número de residências em contato com a margem lagunar. Mesmo que este setor não possua alta concentração de residências as baixas altitudes dos terrenos no extremo setentrional/margem leste tendem a deixar a população residente em maior situação de vulnerabilidade (Fig. 65), exatamente onde as margens foram classificadas como de maior grau de susceptibilidade.

Figura 65. Área urbana com núcleos residenciais no setor norte da LC.



Fonte: Google Earth Pro.

Nos Setor Sul, em que maré de sizígia com vento de NNE causou as maiores variações positivas de nível lagunar, há maior concentração de residências. O núcleo urbano do Centro da Lagoa da Conceição é o que possui maior número de residências e o mapa de susceptibilidade mostra que as margens possuem grau intermediário. O maior grau de susceptibilidade à elevação do nível do mar ocorre no extremo meridional deste setor, já que de acordo com a modelagem nesta área ocorrem as maiores variações positivas de nível lagunar quando incide maré de sizígia e vento de NNE, porém com menor concentração de residências (Fig. 66).

Figura 66. Área urbana com núcleos residenciais no setor sul da LC.



Fonte: Google Earth Pro.

No Setor Central as principais aglomerações urbanas estão localizadas na Avenida das Rendeiras (Fig. 67). Analisando o ponto de análise P05, localizado próximo à Avenida das Rendeiras, apenas em maré de quadratura com vento de SSO é que os valores foram mais

baixos. Com maré de quadratura/vento NE e sizígia/vento S os valores foram mais altos, com leve superioridade para o primeiro caso. A maior parte das margens em contato com esta avenida foi classificada com susceptibilidade intermediária.

Figura 67. Área urbana com núcleos residenciais no setor central (Avenida das Rendeiras) da LC.

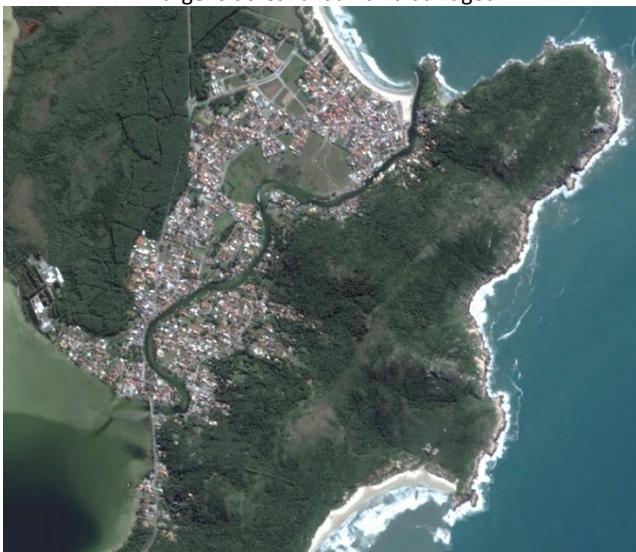


Fonte: Google Earth Pro.

Ao longo do Canal da Barra da Lagoa existem diversas residências em ambos os lados do canal (Fig. 68). A maior variação positiva ocorreu em situação de maré de sizígia/vento S, seguido de maré de quadratura/vento SSO (Fig. 69). Isto mostra que o vento de quadrante Sul possui forte influência para as variações de nível nesta área. O mapa de susceptibilidade mostrou que a maior parte das margens possui uma maior predisposição para elevação do nível d'água, pois as marés astronômica e meteorológica possuem maior amplitude nas áreas próximas ao oceano.

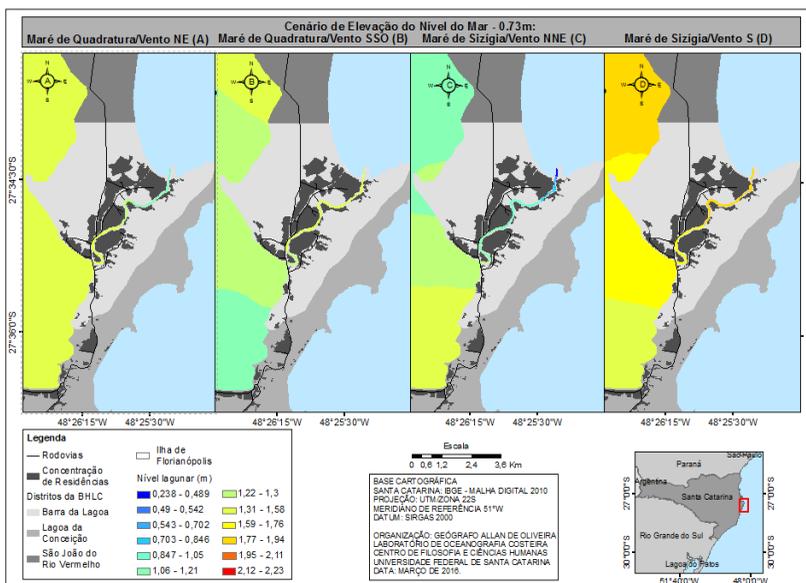
Nos sistemas lagunares em que as marés meteorológicas causam maior alteração no nível lagunar, como ocorre na LC, os processos de inundação e erosão tendem a ser intensificados. Por mais que ainda não se tenha comprovações sobre alterações na frequência e intensidade das tempestades, existem alguns estudos que indicam algumas alterações no padrão de formação dos sistemas ciclogênicos do Atlântico Norte nos últimos 40 anos, assim como também no Oceano Pacífico (EMANUEL, 2005; WEBSTER et al. 2005; HOLLAND e WEBSTER 2007; MANN et al. 2007).

Figura 68. Área urbana com núcleos residenciais no setor central da LC e as margens do Canal da Barra da Lagoa.



Fonte: Google Earth Pro.

Figura 69. Comportamento hidrodinâmico com projeção de subida do nível do mar para o Canal da Barra da Lagoa.



Fonte: autor.

Em lagoas costeiras de Portugal os efeitos causados pela subida do nível do mar já podem ser observados, como Ria de Aveiro e Ria Formosa, as maiores lagoas costeiras da costa portuguesa. Em pequenas lagoas no mesmo litoral também foram constatadas alterações. Estudos sobre modelagem de inundação por mudança climática/elevação do nível do mar também foram realizados na Austrália, como na Lagoa de Narrabeen/Austrália. Estudos nesta lagoa já ocorrem desde a década de 1980, com posterior estudo em 1990, já tentando identificar algum efeito do aumento do nível do mar (JONES, 2008).

O aumento no assoreamento, tanto por sedimentos fluviais quanto marinhos, já são detectados em pequenas lagoas costeiras de Portugal (ex., Esmoriz, Óbidos, Albufeira, S. Torpes, Melides, e Alvor). As causas apontadas para o processo de assoreamento nestas lagoas são as atividades humanas (agricultura) e a elevação do nível do mar (FERREIRA et. al., 2008).

Diferente do que já ocorre na Lagoa de Narrabeen/Austrália e nas lagoas Esmoriz, Óbidos, Albufeira, S. Torpes, Melides, e Alvor, não existem estudos que consigam demonstrar tais alterações em lagunas costeiras do Brasil. No capítulo 4 sobre áreas inundadas, em que foram utilizados dados de sensoriamento remoto para identificar alterações de áreas marginais inundadas na LC, não foram constatadas modificações que possam servir como base para comprovar variações positivas de nível lagunar. A partir do método de pesquisa utilizado, e do período de dados disponíveis, apenas foi constatado que as áreas do Setor Central são as mais suscetíveis às variações lagunares.

De acordo com Haines e Thom (2007) elevação do nível do mar gera uma importante alteração para o sistema lagunar, que será o aumento no nível da maré baixa. Observando os cenários gerados a partir das projeções de elevação do nível do mar para a LC constata-se que o nível de água da LC não vai estar próximo das condições existentes. Este efeito será mais visível e com maior repercussão nas áreas marginais com baixa altimetria, principalmente onde ocorre a formação de vegetação tolerante a estas variações de nível, além das áreas urbanizadas (Avenida das Rendeiras, Centro da Lagoa, Canto da Lagoa e Barra da Lagoa).

## 7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de um modelo hidrodinâmico para simular cenários de elevação do nível do mar, e assim definir graus de susceptibilidade para as margens lagunares, mostrou ser uma metodologia adequada para gerar um Índice de Susceptibilidade à elevação do nível do mar. Os resultados encontrados permitiram as seguintes considerações finais:

- Todos os cenários de elevação do nível do mar geraram elevações correspondentes no nível lagunar, sendo também observado que o canal continua filtrando as marés astronômica e meteorológica.

- Os mesmos desníveis entre os setores Sul e Norte foram observados, como o Setor Central registrando as menores oscilações positivas de nível.

- Os setores Canal da Barra da Lagoa e Norte apresentaram as maiores extensões de segmentos de margem lagunar com índice Muito Alto de susceptibilidade. No Canal da Barra da Lagoa este índice tem forte relação com as oscilações causadas por efeito de maré astronômica e meteorológica, já no setor Norte a ação do vento e a vazão do rio João Gualberto Soares são os responsáveis pelo resultado.

- No Setor Sul a ação do vento também pode ser constatada como um dos fatores responsável pelo índice Muito Alto de susceptibilidade na porção meridional do setor e Alto da maior parte da área.

- No Setor Central estão localizados os segmentos de margem lagunar com menores índices de susceptibilidade, pois as oscilações de nível lagunar são pequenas pela ação de maré (astronômica e meteorológica) e por ação do vento.

## **8 APLICAÇÃO DE UM ÍNDICE INTEGRADOR PARA A SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE DA LAGOA DA CONCEIÇÃO/ILHA DE SANTA CATARINA À ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR – ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA (IVC)**

### **8.1 INTRODUÇÃO**

A integração de variáveis que permitam determinar a susceptibilidade e vulnerabilidade da zona costeira a processos de inundação por elevação do nível do mar estão difundidas em pesquisas por todo o mundo. Entre as técnicas mais utilizadas está a elaboração de índices, como o Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC (*Coastal Vulnerability Index* – CVI) (GORNITZ e KANCIRUK, 1989; THILER e HAMMAR-KLOSE, 1999; PETHICK e CROOKS, 2000; PENDLETON et al., 2004; DOUKAKIS, 2005; DIEZ et al., 2007; DWARAKISH et al., 2009; MAHENDRA et al., 2011; KUNTE et al., 2014) e o Índice de Susceptibilidade Costeira - CSI (CARTER, 1990; SHAW et al., 1998; ABUODHA e WOODROFFE, 2010). Assim como discute ABUODHA (2009) o que diferencia os dois índices é a utilização de variáveis sociais na construção do IVC.

No capítulo 2 deste trabalho foram discutidos os conceitos de susceptibilidade e vulnerabilidade. Como definido, susceptibilidade está relacionada ao risco natural, ou comportamento morfodinâmico do sistema caso a oscilação positiva do nível do mar seja confirmada (Susceptibilidade Física). Já vulnerabilidade está relacionada ao risco social, ou à condição de vida da população nos centros urbanos caso a susceptibilidade física seja confirmada (Vulnerabilidade Social). A integração dos resultados encontrados ao longo deste trabalho, que incluem análises de susceptibilidade e vulnerabilidade, será proposta como elemento de integração e síntese da pesquisa. Logo, o objetivo deste capítulo é propor um índice que mensure estes dois aspectos, aqui denominado Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).

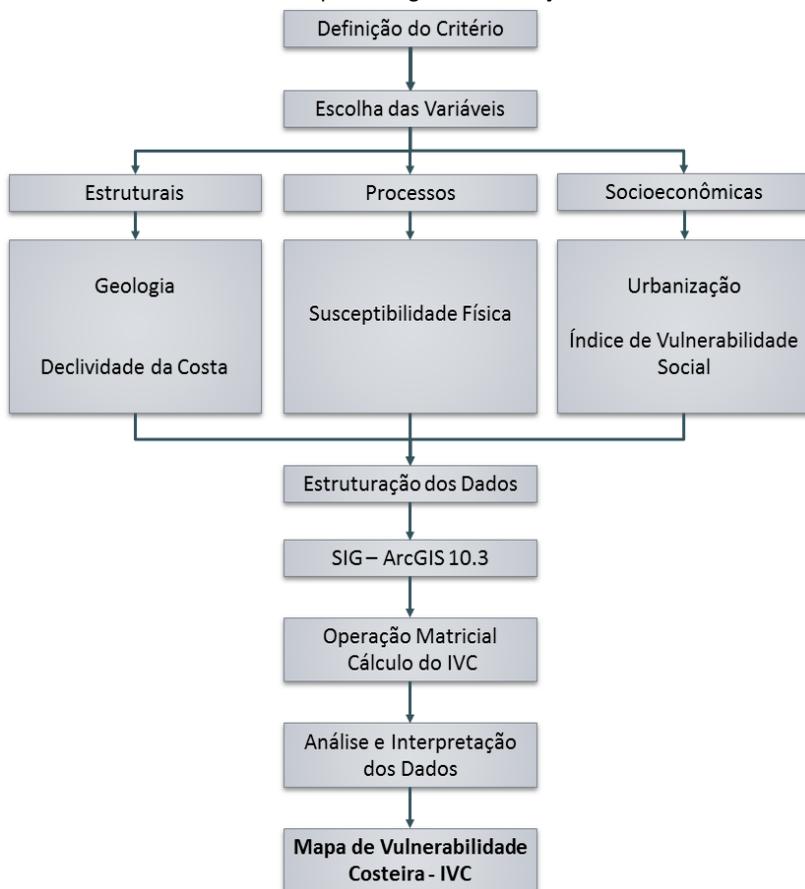
### **8.2 METODOLOGIA**

A criação do IVC seguiu as bases conceituais de Gornitz e Kanciruk (1989), Gornitz (1991) e Abuodha e Woodroffe (2010). Nas argumentações metodológicas destes autores ficou clara a necessidade de utilizar variáveis que conseguissem expressar a vulnerabilidade/susceptibilidade estrutural dos ambientes costeiros,

assim como também os processos atuantes. Quando ocorre sua integração com dados populacionais, isto se dá pela necessidade de entender os efeitos e a dimensão dos desastres naturais, permitindo determinar o potencial impacto sobre a sociedade frente ao perigo analisado (MURALI et al., 2013).

Sendo assim, baseado nos trabalhos citados anteriormente, buscou-se adotar uma abordagem que unisse variáveis estruturais, de processo e descritores socioeconômicos, o que culminou na utilização das seguintes variáveis: a) estruturais: Geologia e Declividade da Costa; b) processo: Índice de Susceptibilidade Costeira (maré e vento); e c) descritores socioeconômicos: Índice de Vulnerabilidade Social (população residente total; domicílios particulares permanentes; média de moradores nos domicílios particulares permanentes, renda domiciliar média per capita no domicílio particular permanente, renda domiciliar entre 1/2 e 1/4 de salário mínimo e renda domiciliar entre 1/4 e 1/8). A figura 70 mostra o fluxograma com as etapas para elaboração do Índice de Vulnerabilidade Costeira que integrará variáveis estruturais, de processo e descritores socioeconômicos.

Figura 70. Fluxograma com as etapas para elaboração do Índice de Vulnerabilidade Costeira para a Lagoa da Conceição.



Fonte: autor.

## 8.2.1 VARIÁVEIS ESTRUTURAIS

### 8.2.1.1 GEOLOGIA

Foram utilizados dados geológicos de mapeamentos pretéritos realizados pelo IBGE. São mapeamentos na escala de 1:250000 que integraram informações do Projeto RADAMBRASIL e do Projeto Sistematização das Informações Sobre Recursos Naturais. A carta de Geologia foi elaborada pela equipe de Geologia da Gerência de

Recursos Naturais e Estudos Ambientais da Unidade Estadual do IBGE em Santa Catarina, publicada em 2004.

A geologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC), localizada na Província Costeira de Santa Catarina, é dividida, em síntese, nos domínios do Escudo Catarinense e Sedimentos Quaternários. Na porção compreendida pelo Escudo Catarinense ocorre a Suíte Intrusiva Pedras Grandes (Éon Proterozóico/Período Neoproterozóico), com granitos, granitoides e riolitos, em algumas situações cortados por diques de diabásio. De acordo com o RADAMBRASIL (2004) o domínio geomorfológico sobre essas áreas é a Serra do Leste Catarinense, com relevos dissecados por ação fluvial sem obedecer nenhum controle estrutural.

Nas áreas com sedimentos quaternários existem depósitos holocênicos e pleistocênicos, de origem marinha, lagunar e eólica. Os depósitos marinhos e eólicos retrabalhados são depósitos pleistocênicos com areias quartzosas castanho-avermelhadas. Os depósitos holocênicos eólicos possuem areias quartzosas cor creme e os lagunares areais síltico-argilosas inconsolidadas com coloração cinza a creme. A maior parte dos depósitos formam planícies marinhas, remodelados pelo vento, com presença de dunas. Também ocorrem planícies flúvio-marinhas, resultante de processos fluviais associados à dinâmica marinha.

Com as características geológicas acima descritas optou-se por agrupar estas duas variáveis. As áreas em que ocorrem rochas do embasamento cristalino em contato com as margens lagunares (Norte/Noroeste/Oeste, parte do Sudoeste e Sudeste) receberam o Índice Muito Baixo de Susceptibilidade. Quanto aos depósitos sedimentares recentes, sejam eles holocênicos ou pleistocênicos, todos foram agrupados na classe de Susceptibilidade Muito Alta. A separação de intervalos de geologia seguiu os mesmos critérios definidos por Abuodha e Woodroffe (2010) para a classe Tipo de Rocha utilizada pelos autores.

### **8.2.1.2 DECLIVIDADE DA COSTA**

A declividade da costa foi uma das variáveis utilizadas para definir o IVC, pois esta permite identificar quais áreas podem ser inundadas mais facilmente com a elevação do nível lagunar. De acordo com Rao et al. (2008) este é o fator principal a ser considerado na

estimativa do impacto da elevação do nível do mar. Costas pouco íngremes tendem a passar de forma mais acentuada por processos de inundação, e por isso possuem maior susceptibilidade. No outro extremo, que são as costas íngremes, o processo de inundação tende a ser restrito ou quase inexistente, o que configura uma menor susceptibilidade a efeitos de inundação por elevação do nível lagunar.

Para determinar a declividade da costa foi utilizado o Modelo Digital de Terreno (MDT) elaborado para delimitar a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição no capítulo 3 desta tese, Mapeamento da cobertura das terras na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição/SC. A partir do MDT a declividade foi calculada utilizando a ferramenta *Slope* na extensão *Spatial Analyst/Surface Tools* do programa ArcGIS. Assim como Abuodha e Woodroffe (2010) foi adotada a medida de inclinação em graus.

A separação de intervalos de declividade seguiu os mesmos critérios definidos por Abuodha e Woodroffe (2010) e Mahapatra et al. (2015). Estipulou-se uma distância para análise, neste trabalho de 50m, em que de 0° a 6,0° estão as planícies baixas, de 6,1° a 10° as encostas suaves, de 10,1° a 20,0° os declives moderados, de 20,1° a 45,0° as encostas íngremes e acima de 45° escarpas. A partir destes intervalos de declividade determinou-se que as costas possuem índice Muito Alto, Alto, Moderado, Baixo e Muito Baixo quanto à Susceptibilidade à Inundação, respectivamente.

## **8.2.2 VARIÁVEL DE PROCESSO**

### **8.2.2.1 ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE COSTEIRA**

Um Índice de Susceptibilidade Física à elevação do nível do mar para a Lagoa da Conceição foi proposto no capítulo 7. Este índice, que levou em consideração efeitos de maré astronômica, maré meteorológica e ação do vento na superfície lagunar identificou segmentos costeiros com maior e menor grau de susceptibilidade à elevação do nível do mar.

Este é um índice criado a partir de variáveis que explicam os processos físicos do sistema lagunar. Em sistemas costeiros marinhos as variáveis altura média da onda e amplitude média da maré são as mais utilizadas. Para o sistema lagunar estudado a amplitude média da maré e a ação do vento foram as variáveis utilizadas na elaboração do

índice. A modelagem hidrodinâmica implementada permitiu identificar que os efeitos da maré são minimizados, pois o canal funciona como um filtro natural, o que já havia sido identificado também por Andrade (2001), Pereira (2004), Godoy (2007) e Rocha (2007).

A ação do vento, variável importante para definir o Índice de Susceptibilidade Física da LC, é a principal responsável pela circulação lagunar, causando desníveis no sistema. Com ventos de Sul os níveis são mais altos no Setor Norte da laguna, e com ventos de Norte mais altos no Setor Sul. Entretanto, os níveis lagunares mais altos são registrados no Setor Norte. Os resultados obtidos sugerem que o vento é a principal forçante na circulação lagunar, sendo que no Canal da Barra da Lagoa os efeitos de maré possuem maior influência no nível da água quanto mais próximo do oceano adjacente.

Como a modelagem numérica possui dados de variação de nível por ação de maré astronômica e por ação do vento para onze meses sucessivos (fevereiro a dezembro de 2013), não foram gerados índices separados para as duas variáveis, como realizado em outros trabalhos (ABUODHA e WOODROFFE, 2010; KUMAR e KUNTE, 2012; YIN et al., 2012; APPEANING ADDO, 2013; MAHAPATRA et al., 2015). Sendo assim, foram identificadas as máximas variações ao longo do período de análise, e logo após separou-se estas máximas variações nos seguintes intervalos: maior susceptibilidade, susceptibilidade moderada e menor susceptibilidade.

### **8.2.3 DESCRITORES SOCIOECONÔMICOS**

#### **8.2.3.1 COBERTURA DAS TERRAS/URBANIZAÇÃO**

O mapeamento da cobertura das terras apresentado no capítulo 3 permitiu identificar quais áreas possuem residências próximas às margens. Assim foram determinados os graus de urbanização, identificados como denso, rarefeito ou não urbanizado. Foram utilizadas estas três classificações urbanas, associadas às seguintes classes de susceptibilidade: Muito Alta, Moderada e Muito Baixa, respectivamente.

#### **8.2.3.2 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIAL**

Nesta pesquisa foi elaborado inicialmente o Índice de Vulnerabilidade Social, descrito no capítulo 5, separado do Índice de

Susceptibilidade Física, levando em consideração a discussão de Egler et al. (2005), que mencionam a dificuldades de uma integração entre os aspectos físicos e socioeconômicos na elaboração de índices de vulnerabilidade. A caracterização populacional e domiciliar são requisitos necessários para identificar como ocorre a distribuição da população na zona costeira, assim como a infraestrutura dos domicílios. No capítulo 5, utilizando metodologia de análise espacial de dados, foi definido o Índice de Vulnerabilidade Social à elevação do nível do mar para a LC.

Blaikie et al., (1994), Cutter (1996), Twigg (2001) e Downing e Patwardhan (2004) justificam o uso de algumas variáveis, sendo neste trabalho utilizadas as seguintes: População Residente, Domicílios Particulares Permanentes, Média de Moradores por Domicílio Particular Permanente, Renda Domiciliar Média per capita no Domicílio Particular Permanente, Porcentagem de Domicílios com Renda Domiciliar por Faixa Salarial (de  $\frac{1}{4}$  até  $\frac{1}{2}$ ), e Porcentagem de Domicílios com Renda Domiciliar por Faixa Salarial (até  $\frac{1}{4}$ ).

Para definir o grau de vulnerabilidade social da LC à elevação do nível do mar foi realizada uma análise multicritério. O método de agregação de critérios utilizado foi o de combinação linear ponderada, onde os fatores são padronizados para uma escala contínua que permita mensurar a vulnerabilidade social à elevação do nível do mar. A combinação linear ponderada permite reter toda a variabilidade dos dados e também possibilita a compensação entre os fatores. De acordo com Tagliani (2002) e De Oliveira (2005) esta técnica permite a eliminação dos riscos extremos, como ocorre na análise *booleana*.

A partir da integração dos dados, e realizando a separação dos resultados a fim de criar os intervalos de classe, foi possível identificar quatro classes de vulnerabilidade social, sendo elas: Muito Alta, Alta, Moderada e Baixa. A metodologia aplicada não permitiu identificar nenhum setor com vulnerabilidade social Muito Baixa, visto que com a combinação linear ponderada e aplicação da matriz de comparação pareada (AHP) o extremo mais baixo foi suprimido.

#### **8.2.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA (IVC)**

O cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira levou em consideração as cinco variáveis anteriormente discutidas. Todas as informações estão representadas por segmentos de linha, linha esta

que representa o limite entre água/área emersa na Lagoa da Conceição. Esta linha de representação da margem lagunar foi segmentada a partir das características e índices acima discutidos. Para cada classe ou índice foi atribuído um valor de 1 a 5, em que 1 é a menor susceptibilidade/vulnerabilidade e 5 a maior susceptibilidade/vulnerabilidade, como mostra a tabela 15.

O IVC adotado neste trabalho segue as mesmas características do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) criado por Gornitz e Kanciruk (1989). A adaptação do IVC já foi realizada em outros trabalhos, como no de Abuodha e Woodroffe (2010), que criaram o Índice de Susceptibilidade Costeira (ISC). Como já descrito, o IVC utilizou duas variáveis estruturais, uma de processo e duas de descritores socioeconômicos, sendo aplicada na equação 31:

$$ISVC = \sqrt{\frac{a * b * c * d * e}{5}} \quad (31)$$

Onde *a* (geologia), *b* (declividade costeira), *c* (cobertura das terras/urbanização), *d* (Índice de Susceptibilidade Física) e *e* (Índice de Vulnerabilidade Social).

Para realizar o cálculo todas as linhas de costa com as variáveis individuais foram rasterizadas, processo que consiste em transformar um vetor numa matriz. Ao realizar este procedimento a linha passa a ser representada por *x pixels*, sendo cada um a menor parcela de uma imagem digital. Isso permite a utilização de uma ferramenta do ArcGIS denominada *Raster Calculator*, presente na extensão *Spatial Analyst Tools/Map Algebra*. Esta ferramenta cria e executa uma álgebra de mapas simples, muito semelhante a uma calculadora. Ao invés de números são indicados os arquivos que representam as variáveis de entrada, aplicando-lhes a equação acima descrita.

Tabela 15. As variáveis definidas para determinação do IVC da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar.

Ranqueamento para determinação do IVC						
ID	Variável Classe	1 Muito Baixo	2 Baixo	3 Moderado	4 Alto	5 Muito Alto
<b>a</b>	Geologia	Rocha				Sedimento
<b>b</b>	Declividade da Costa		Encosta Íngreme	Declive Moderado	Encosta Suave	Planícies Baixas
<b>c</b>	Cobertura Urbanização	Não Urbanizado		Rarefeito		Urbanizado
<b>d</b>	Susceptibilidade Física	Menor	↔	Moderada	↔	Maior
<b>e</b>	Vulnerabilidade Social	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta

Fonte: autor.

O resultado do cálculo foi então dividido em intervalos de percentis, a fim de destacar as diferentes vulnerabilidades ao longo da linha de costa lagunar, assim como realizado por Abuodha e Woodroffe (2010). No primeiro percentil estão os segmentos costeiros com IVC Baixo, no segundo percentil os segmentos costeiros com IVC Moderado, no terceiro percentil os segmentos costeiros com IVC Alto e no quarto percentil os segmentos costeiros com IVC Muito Alto. Através da ferramenta *Reclassify* presente na extensão *Spatial Analyst Tools/Reclass* os segmentos foram reclassificados para os valores 2 (primeiro percentil), 3 (segundo percentil), 4 (terceiro percentil) e 5 (quarto percentil), definindo assim os IVC Baixo, Moderado, Alto e Muito Alto, respectivamente.

## **8.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **8.3.1 CANAL DA BARRA DA LAGOA**

O mapeamento no Canal da Barra da Lagoa para cada uma das variáveis está resumido na tabela 16 e pode ser visualizado na figura 71. Ao longo dos 6,07 km de margens no canal 3,86 km possuem susceptibilidade muito alta para a variável Geologia, ou seja, 63,51% de sua extensão e 7,56% das margens de todo o sistema lagunar. No outro extremo estão as margens com índice muito baixo, que totalizam 2,21 km (36,49%). Cada um dos dois índices possui dois segmentos de linha.

Como a maior parte das margens do canal são recobertas por sedimentos inconsolidados, a declividade da costa em sua maior parte fica entre 0° e 6°, configurando uma planície baixa, por isso uma susceptibilidade muito alta. Isso representa 4,49 km de extensão, 74,01% das margens do canal e 8.81% das margens de todo o sistema lagunar. O índice com a segunda maior extensão de margens do canal é o moderado, cuja declividade de 10,1° a 20,0° (declive moderado) possui 1,20 km, ou 19,79% de extensão de margens. Ao todo 76,66% das margens possuem declividades com susceptibilidade alta a muita alta, e apenas 3,55% declividades com susceptibilidade baixa.

Quando se analisa a urbanização ao longo do canal é possível perceber a alta concentração de residências, o que gera um índice de susceptibilidade Muito Alto para 100% da área. As margens foram classificadas como densamente urbanizadas, o que se explica pelas reduzidas declividades da costa, formando planícies baixas, propícias para o desenvolvimento de núcleos urbanos. Entretanto, mesmo nas áreas com maior declividade também há urbanização.

No índice de susceptibilidade hidrodinâmica existem os cinco intervalos de classe. Isto ocorre devido à ação das marés na área, tanto astronômica quanto meteorológicas. No sentido oceano/laguna a maré vai sendo filtrada, e por isso os efeitos de variação de nível são maiores próximos ao oceano. Ao todo 4,14 km de margem do canal possuem o maior grau de susceptibilidade, que representa 68,2% de toda área. As menores susceptibilidades estão nas margens próximas à laguna, com um total de 18,94% (1,15 km).

Para 4,81 km das margens do canal existe população em situação de vulnerabilidade Alta a Muito Alta, que representa 79,25%

das margens de toda a área do canal e 9,43% das margens de todo o sistema lagunar. Com população residente em situação de baixa vulnerabilidade existem 0,60 km de linha de costa, representando 9,85% da área do canal e 1,18% do todo o sistema lagunar. Em situação de moderada vulnerabilidade estão 0,66 km de linha de costa, ou 10,79%.

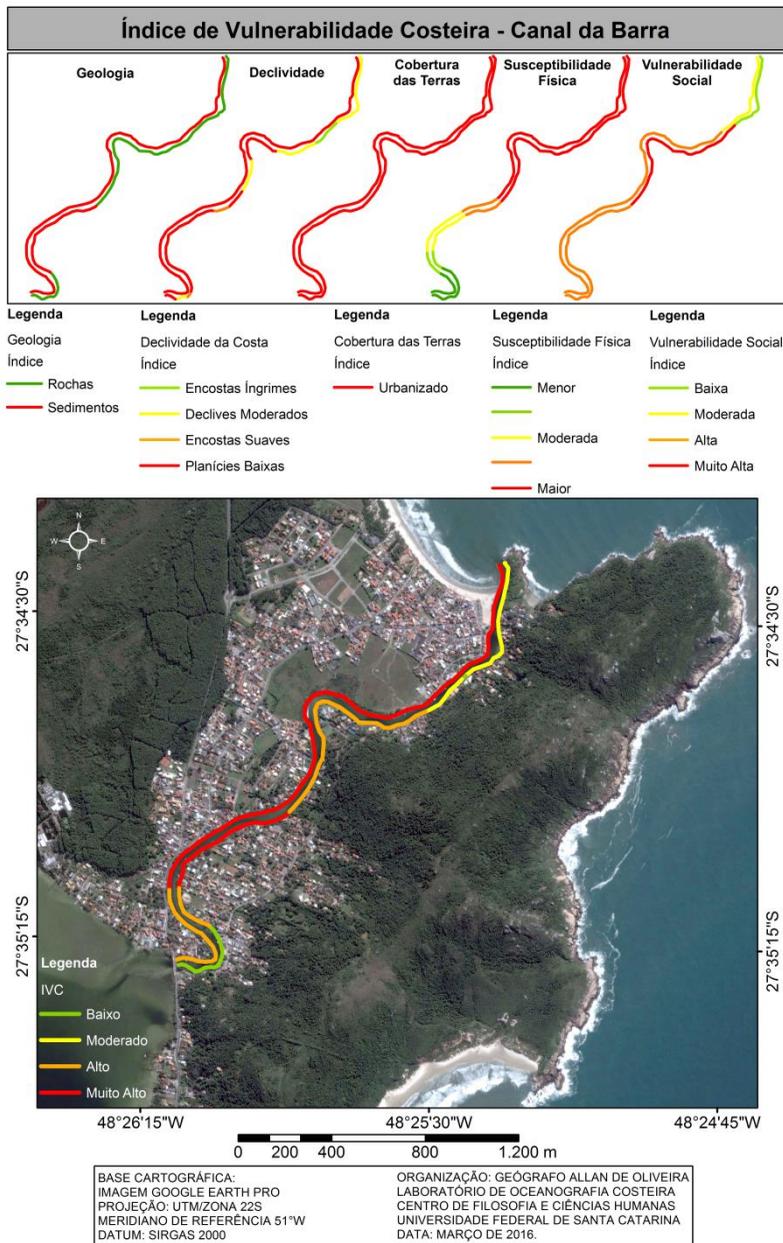
Tabela 16. Resumo do mapeamento realizado no Canal da Barra da Lagoa a partir de todas as variáveis.

Variável/Classe	ID	Nº de Segmentos	Extensão (km)	Extensão (% Canal)	Extensão (% Total)
Geologia	1	2	2,22	36,49	4,34
	5	2	3,86	63,51	7,56
Declividade da Costa	2	1	0,22	3,55	0,42
	3	4	1,20	19,79	2,35
	4	2	0,16	2,65	0,32
	5	5	4,49	74,01	8,81
Urbanização	5	2	6,07	100,00	11,90
Susceptibilidade Física	1	2	0,78	12,90	1,53
	2	2	0,37	6,04	0,72
	3	2	0,78	12,86	1,53
	4	2	0,56	9,23	1,10
	5	2	3,58	58,97	7,02
Vulnerabilidade Social	2	1	0,60	9,95	1,18
	3	1	0,66	10,79	1,29
	4	2	3,57	58,87	7,00
	5	1	1,24	20,38	2,43

Fonte: autor.

O IVC calculado para o Canal da Barra apresentou intervalo de valores que caracterizaram a área com índices Baixo até Muito Alto. O gráfico da figura 72 mostra que a porcentagem de margens com índices Alto e Muito Alto é superior aos índices moderado e baixo. O somatório entre Muito Alto e Alto ficou em 80,72%, sendo 50,69% para Muito Alto e 30,04% para Alto. Já os índices moderado e baixo obtiveram 12,83% e 6,45%, respectivamente.

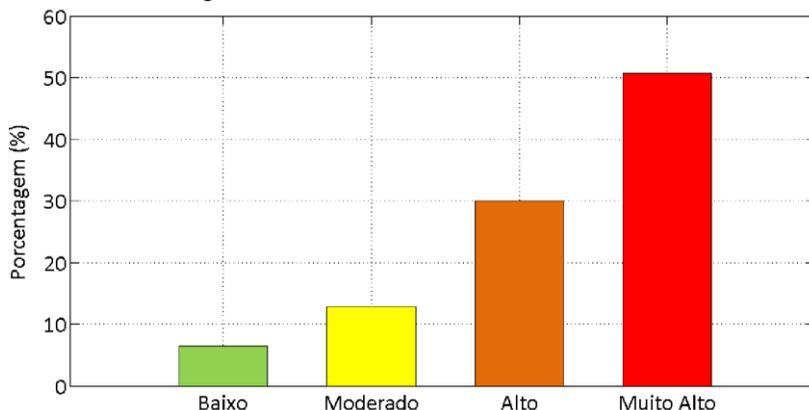
Figura 71. IVC para o Canal da Barra.



Fonte: autor.

A área compreendida pelo Canal da Barra da Lagoa foi a que apresentou maior porcentagem de margens com índice Muito Alto e Alto. Todas as variáveis utilizadas registraram grandes extensões de margens com susceptibilidade e vulnerabilidade altas e muito altas. Por ser uma área de planície costeira, formada durante o Holoceno, e com declividade muito baixa, é possível compreender sua susceptibilidade muito alta. Além disso, essas características físicas permitiram o desenvolvimento dos núcleos urbanos no bairro Barra da Lagoa.

Figura 72. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Canal da Barra da Lagoa.



Fonte: autor.

As flutuações de nível no canal por influência das marés astronômica e meteorológica, variáveis estas de processo, também causaram a definição de um IVC Alto a Muito Alto. Como já citado anteriormente, na porção mais próxima do oceano esses efeitos são destacados quando comparados às áreas mais próximas da laguna, além dos demais setores lagunares. A classificação de um trecho de costa com IVC baixo (0,39 km) só ocorreu quando havia substrato rochoso, declividade alta a moderada, com efeitos de maré reduzidos, exatamente na área mais próxima da laguna.

### 8.3.2 SETOR SUL

O mapeamento no Setor Sul para cada uma das variáveis está resumido na tabela 17 e pode ser visualizado na figura 73. Ao longo dos 11,17 km de margens no setor 9,19 km possuem susceptibilidade muito alta para a variável Geologia, ou seja, 82,27% de sua extensão e 18,01%

das margens de todo o sistema lagunar. No outro extremo estão as margens com índice muito baixo, que totalizam 1,98 km (17,73%). Os índices possuem dois e um segmentos, respectivamente.

Como a maior parte das margens do setor são recobertas por sedimentos inconsolidados, a declividade da costa em sua maior parte ficou entre 0° e 6°, configurando uma planície baixa, por isso uma Susceptibilidade Muito Alta. Isso representa 7,83 km de extensão, 70,11% das margens do setor e 15,35% das margens de todo o sistema lagunar. O índice com a segunda maior extensão de margens do setor é o Moderado, cuja declividade de 10,1° a 20,0° (declive moderado) possui 1,99 km, ou 17,79% de extensão de margens. Ao todo 82,21% das margens possuem declividades com Susceptibilidade Alta e Muita Alta, com nenhum trecho costeiro deste setor apresentando declividades com Susceptibilidade Baixa.

Quando se analisa a urbanização ao longo do setor também é possível perceber a alta concentração de residências, assim como ao longo do Canal da Barra da Lagoa. Entretanto, existem três segmentos costeiros que foram classificados como urbanização rarefeita, não sendo atribuída uma Susceptibilidade Muito Alta para 100% da área. A extensão das margens com urbanização rarefeita totaliza 2,96 km e as densamente urbanizadas 8,21 km, o que representam 26,47% e 73,53% da área, respectivamente.

No Índice de Susceptibilidade Física existe três intervalos de classe, do maior ao moderado. Com os efeitos de maré reduzidos a ação do vento é que regula a circulação neste setor, com ventos do quadrante Norte elevando o nível e do quadrante sul reduzindo. Na porção meridional do setor estão as margens com maior grau de susceptibilidade, com 1,86 km de extensão (16,67% do setor e 3,65% de todo sistema). Com grau moderado de susceptibilidade estão 3,61 km de margens (32,33% e 7,08% do setor e de todo sistema). O restante das margens, que totaliza 51% da área (5,70 km) também possui alta susceptibilidade hidrodinâmica.

Quanto à Vulnerabilidade Social 59,66% das margens foram classificadas com o Índice Moderado, que representa 6,66 km de extensão. Esta extensão de margens representa 13,06% de todo o sistema lagunar. O restante das margens possui índices Alto e Muito Alto, sem a presença de nenhum trecho com Vulnerabilidade Social

Baixa. Para 1,49 km das margens do canal existe população em situação de Vulnerabilidade Alta, que representa 13,32% das margens de toda a área do setor e 2,92% das margens de todo o sistema lagunar. Margens do setor com Vulnerabilidade Muito Alta somam 3,02 km, que representa 27,02% do setor e 5,92% de todo sistema.

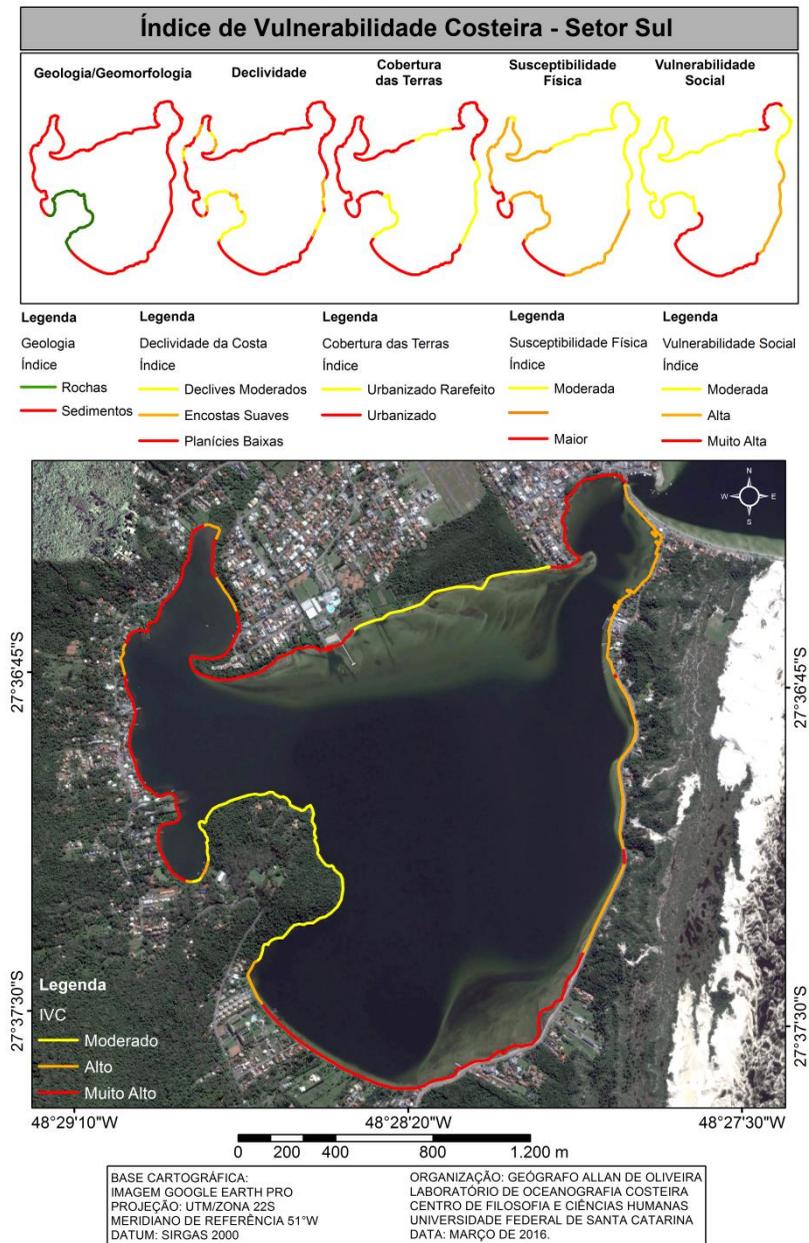
Tabela 17. Resumo do mapeamento realizado no setor sul a partir de todas as variáveis.

Variáveis/Classe	ID	Nº de Segmentos	Extensão (km)	Extensão (% Setor)	Extensão (% Total)
Geologia	1	1	1,98	17,73	3,88
	5	2	9,19	82,27	18,01
Declividade da Costa	3	7	1,99	17,79	3,90
	4	12	1,35	12,10	2,65
	5	8	7,83	70,11	15,35
Urbanização	3	4	2,96	26,47	5,80
	5	4	8,21	73,53	16,10
Susceptibilidade Física	3	3	3,61	32,33	7,08
	4	4	5,70	51,00	11,17
	5	2	1,86	16,67	3,65
Vulnerabilidade Social	3	2	6,66	59,66	13,06
	4	1	1,49	13,32	2,92
	5	2	3,02	27,02	5,92

Fonte: autor.

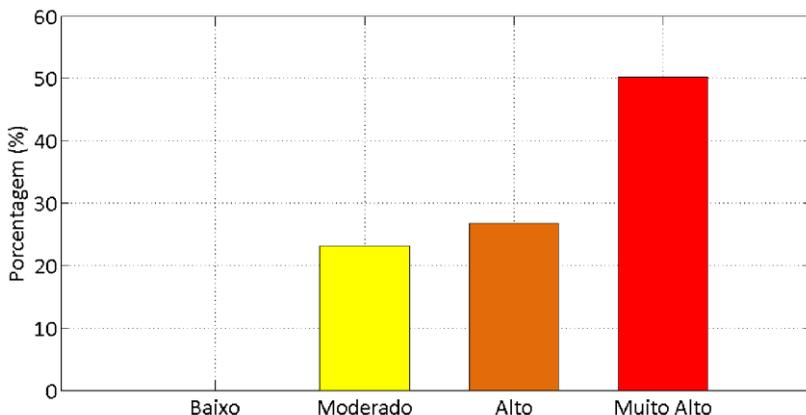
O IVC calculado para o Setor Sul apresentou intervalo de valores que caracterizaram a área com índices Moderado até Muito Alto, com nenhum trecho de margem registrando Índice Baixo. O gráfico da figura 74 mostra que 50,18% das margens foram classificadas com índice Muito Alto de IVC, e se somado com os 26,77% do Índice Alto representam 76,95% de todo setor. Já o Índice Moderado obteve 23,05% de todo setor. Essas porcentagens representam 5,61 km, 2,99 km e 2,58 km de margem lagunar, respectivamente.

Figura 73. IVC para o Setor Sul Lagunar.



Fonte: autor.

Figura 74. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Sul.



Fonte: autor.

A área compreendida pelo Setor Sul foi a que apresentou a segunda maior porcentagem de margens com índice Muito Alto e Alto. A variável Geologia, Declividade da Costa e Urbanização foram as que apresentaram maiores extensões de margem lagunar com índice Muito Alto de susceptibilidade, já a variável Susceptibilidade Física foi a que apresentou menor extensão. Por ser uma área também com planície costeira e declividade muito baixa, é possível compreender sua susceptibilidade muito alta nas duas primeiras variáveis. Assim como no caso do Canal da Barra, essas características físicas também favoreceram o desenvolvimento de núcleos urbanos.

### 8.3.3 SETOR CENTRAL

A figura 75 e a tabela 18 ilustram e descrevem, respectivamente, o mapeamento no Setor Central para cada uma das variáveis. Ao longo dos 12,10 km de margens no setor, 6,83 km possuem Susceptibilidade Muito Alta para a variável Geologia, ou seja, 56,47% de sua extensão e 13,39% das margens de todo o sistema lagunar. No outro extremo estão as margens com Índice Muito Baixo, que totalizam 5,27 km (43,53%).

Na porção meridional e oriental do setor estão localizadas as maiores extensões de planícies baixas, com declividades entre 0° e 6°,

recobertas por sedimentos inconsolidados, por isso uma Susceptibilidade Muito Alta. Ao todo existem 6,50 km de linha de costa com este índice, que representa 53,70% do setor e 12,73% de todo o sistema. O índice com a segunda maior extensão de margens do canal é o Moderado, cuja declividade de 10,1° a 20° (declive moderado) possui 3,62 km, ou 29,88% de extensão de margens. Ao todo 66,87% das margens possuem declividades com Susceptibilidade Alta a Muita Alta, e apenas 3,25% declividades com Susceptibilidade Baixa.

A urbanização neste setor apresentou os três intervalos definidos na metodologia, sendo que existem três segmentos de linha de costa densamente urbanizados. Estes três setores ocupam 5,71 km de extensão de linha de costa, que representa 47,16% do setor e 11,19% de todo sistema. Muito próximo deste valor estão as áreas com urbanização rarefeita, que totaliza 5,32 km de extensão (44% do setor e 10,44% de todo sistema), ocorrendo principalmente na margem lagunar oeste. A extensão das margens sem urbanização totaliza 1.07 km, o que representa 8,84% do setor e 2,10% da área lagunar, localizada apenas na margem leste.

No Índice de Susceptibilidade Física existem três intervalos de classe, sem registro de segmentos costeiros com maior susceptibilidade. A maior parte das margens registrou o menor índice de susceptibilidade, uma extensão de 6,74 km, que representa 55,69% do setor e 13,21% de todo o sistema. Agrupando os dois índices de menor susceptibilidade, há 9,10 km da margem lagunar, uma porcentagem de 75,19% das margens do setor. Com índice moderado estão 3 km de margem lagunar, que representam 24,82% do setor e 5,89% de todo sistema.

Em relação à Vulnerabilidade Social ocorrem índices Muito Alto a Baixo, sendo que a maior extensão de linha de costa lagunar possui Vulnerabilidade Muito Alta (5,29 km – 43,71% do setor). O segundo índice com maior extensão de margem lagunar foi o Moderado, com 4,43 km, que representa 36,6% do setor. Dos 12,10 km de margem lagunar no setor apenas 1,83 km, que representa 15,10%, possuem Vulnerabilidade Social Baixa. Ao todo, unindo os índices Muito Alto e Alto, há 5,84 km de margem lagunar, representando 48,29% do setor.

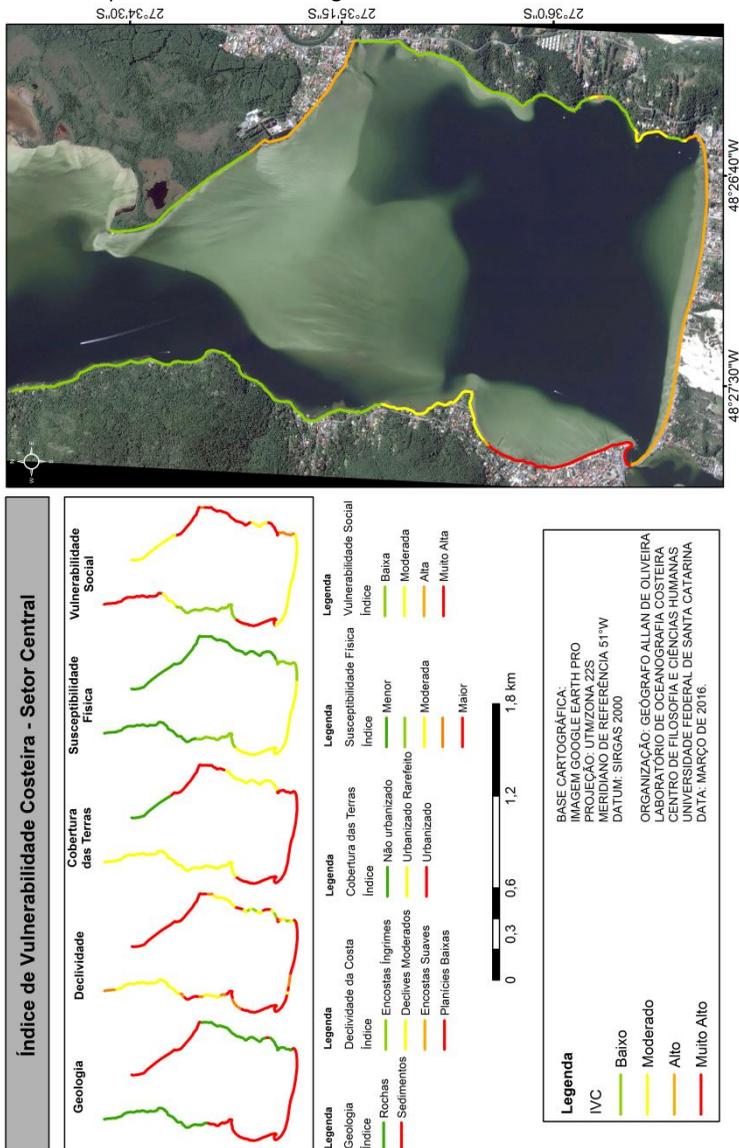
Tabela 18. Resumo do mapeamento realizado no setor central a partir de todas as variáveis.

Variáveis/classes	ID	Nº de Segmentos	Extensão (km)	Extensão (% Setor)	Extensão (% Total)
Geologia	1	3	5,27	43,53	10,32
	5	5	6,83	56,47	13,39
Declividade da Costa	2	4	0,39	3,25	0,77
	3	11	3,61	29,88	7,09
	4	12	1,59	13,17	3,12
	5	11	6,50	53,70	12,73
Urbanização	1	1	1,07	8,84	2,10
	3	2	5,32	44,00	10,44
	5	6	5,71	47,16	11,19
Susceptibilidade Hidrodinâmica	1	3	6,74	55,69	13,21
	2	2	2,36	19,49	4,62
	3	2	3,00	24,82	5,89
Vulnerabilidade Social	2	1	1,83	15,10	3,58
	3	4	4,43	36,60	8,68
	4	2	0,56	4,59	1,09
	5	5	5,29	43,71	10,37

Fonte: autor.

O IVC calculado para o Setor Central apresentou intervalo de valores que caracterizaram a área com índices Baixo até Muito Alto. O gráfico da figura 76 mostra que 49,41% das margens foram classificadas com índice baixo de IVC, sendo o setor lagunar que apresentou o maior percentual de margens com IVC Baixo. O somatório das extensões das margens com índice Alto e Muito Alto chegam a 4,69 km, ou 38,76% do setor e 9,19% de todo o sistema lagunar. Com IVC Moderado estão 1,43 km de linha de costa, que representa 11,84% do setor e 2,81% de todo o sistema.

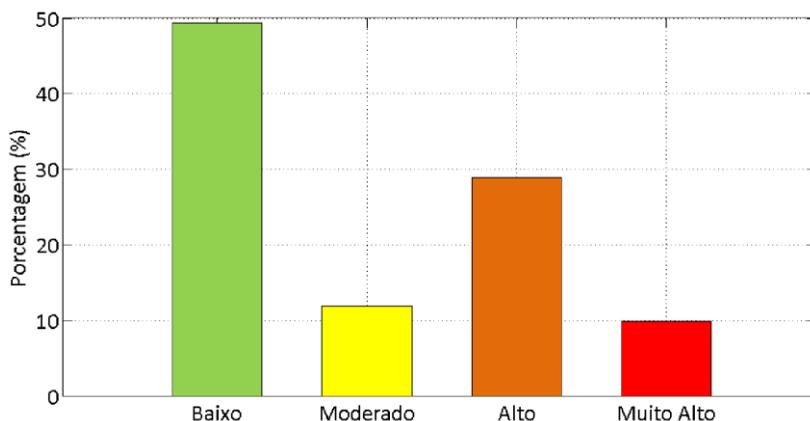
Figura 75. IVC para o Setor Central Lagunar.



Fonte: autor.

Analisando todas as variáveis apenas a Susceptibilidade Física não possui nenhum trecho de costa com índice Muito Alto. Mesmo que as demais variáveis tenham extensões de linha de costa com índice Muito Alto de Susceptibilidade e Vulnerabilidade Social foi o índice de Susceptibilidade Física que reduziu o valor do IVC deste setor. Nas áreas em que a declividade da costa é menor, mesmo com Susceptibilidade Física menor, o IVC foi Alto. Isto também é explicado pela Susceptibilidade Muito Alta definida nas variáveis Geologia e Urbanização densa.

Figura 76. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Central.



Fonte: autor.

Diferente do que ocorre no setor anterior a ação dos ventos gera menor influência nas flutuações de nível no Setor Central, variável esta de processo. Não há correlação entre vento e variação de nível neste setor, o que não ocorre no setor norte, por exemplo. Este é um setor que além da influência do vento também possui influência de maré, mas esta com forte redução, como já discutido no setor Canal da Barra da Lagoa. Logo, isto faz com que a Susceptibilidade Física seja menor neste setor, quando comparado aos demais.

#### 8.3.4 SETOR NORTE

A tabela 19 resume o mapeamento no Setor Norte para cada uma das variáveis, que pode ser visualizado na figura 77. Ao longo dos 21,69 km de margens no setor houve o maior equilíbrio, dentre todos

os setores, a variável Geologia. Do total da área 10,96 km apresentaram Susceptibilidade Muito Baixa, representando 50,55%, e totalmente inserida na margem oeste. O restante das margens, que somam 10,72 km, a Susceptibilidade é Muito Alta, ou 49,45%, totalmente inserida na margem leste. Por ser o setor com maior extensão de margens lagunares estes trechos costeiros representaram, respectivamente, 21,49% e 21,02% em todo o sistema lagunar.

Como toda margem lagunar leste é formada por sedimentos inconsolidados, há formação de planícies baixas, tanto com depósitos holocênicos como pleistocênicos. Por isso a susceptibilidade por declividade é muito alta, totalizando 11,37 km (52,44% do setor e 22,29% de todo o sistema). Já na margem oeste existem formações rochosas com declividades variando entre 0° e 45°. Por isso, existem áreas com Susceptibilidade Baixa (encostas íngremes) até pequenas planícies baixas. Costas com declive moderado totalizam a segunda maior porcentagem de área, com 20,87% (4,53 km), seguido de encostas íngremes (14,05% - 3,05 km) e encostas suaves (12,63% - 2,74 km).

Quanto à variável urbanização o setor apresenta a maior extensão de margem lagunar sem assentamentos. São três segmentos que totalizam 13,34 km, representando 61,53% do setor e 26,15% de todo o sistema, o maior localizado na margem leste. Também na margem leste, mas na porção mais setentrional do setor, está localizado o único segmento classificado como densamente urbanizado, e por isso com Susceptibilidade Muito Alta. Sua extensão é de 1,46 km, representando 6,73% do setor e 2,86% de todo o sistema. Já na margem oeste ocorre uma urbanização rarefeita, por estar inserida em áreas de encosta com presença de vegetação arbórea. Este índice possui 6,88 km de costa, 31,74% do setor e 13,49% de todo o sistema.

No índice de Susceptibilidade Física existe os cinco intervalos de classe. Neste setor a influência dos ventos de quadrante tanto Norte quanto Sul é mais evidente no processo de elevação do nível lagunar, assim como rebaixamento. Na porção mais setentrional estão margens com maior susceptibilidade, que também são as de maior extensão. São 9,76 km de linha de costa, ou 45% do setor. No outro extremo do índice, estão 1,20 km de linha de costa com a menor susceptibilidade, ou 5,53% do setor. Ao todo, 62,29% do setor possui as maiores

susceptibilidades e 15,81 as menores, com 21,91% em situação moderada.

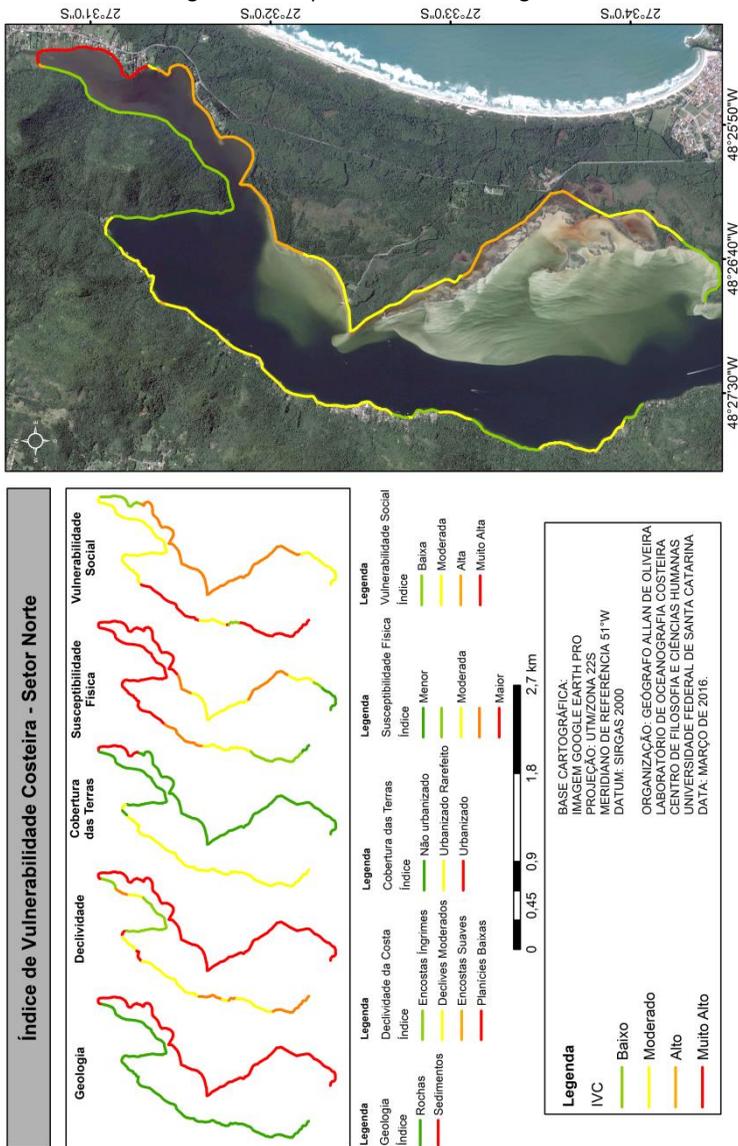
Tabela 19. Resumo do mapeamento realizado no setor norte a partir de todas as variáveis.

Variáveis/classes	ID	Nº de Segmentos	Extensão (km)	Extensão (% Setor)	Extensão (% Total)
Geologia	1	1	10,96	50,55	21,49
	5	1	10,72	49,45	21,02
Declividade da Costa	2	2	3,05	14,05	5,97
	3	6	4,53	20,87	8,87
	4	4	2,74	12,63	5,37
	5	3	11,37	52,44	22,29
Urbanização	1	3	13,34	61,53	26,15
	3	2	6,88	31,74	13,49
	5	1	1,46	6,73	2,86
Susceptibilidade Hidrodinâmica	1	2	1,20	5,53	2,35
	2	3	2,23	10,28	4,37
	3	3	4,75	21,91	9,31
	4	3	3,75	17,28	7,35
	5	1	9,76	45,00	19,13
Vulnerabilidade Social	2	2	1,74	8,02	3,41
	3	3	7,89	36,36	15,46
	4	1	7,40	34,15	14,51
	5	3	4,66	21,48	9,13

Fonte: autor.

Para 12,06 km das margens do setor existe população em situação de Vulnerabilidade Social Alta a Muito Alta, que representa 55,62% das margens de todo o setor e 23,64% das margens de todo o sistema lagunar. Com população residente em situação de baixa vulnerabilidade existem 1,74 km de linha de costa, representando 8,02% da área do setor e 3,41% do todo o sistema lagunar. Em situação de moderada vulnerabilidade estão 7,89 km de linha de costa, ou 36,36% do setor.

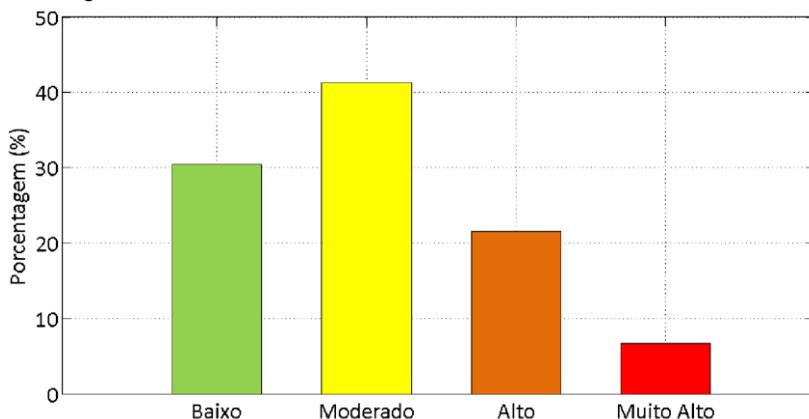
Figura 77. IVC para o Setor Norte Lagunar.



Fonte: autor.

O IVC calculado para o Setor Norte apresentou intervalo de valores que caracterizaram a área com Índices Baixo até Muito Alto, como ocorreu nos demais setores, a exceção do Setor Canal da Barra. O gráfico da figura 78 mostra que a maior parte do setor possui IVC Moderado, com 41,23%, que representa 17,52% do sistema lagunar. Os índices Muito Alto e Alto somam 6,15 km, que representam 28,35% do setor e 12,05% do sistema lagunar. Com Índice Baixo está a segunda maior extensão da área, com 6,6 km, ou 30,42% do setor e 12,93% do sistema lagunar.

Figura 78. Gráfico com a distribuição em porcentagem do IVC para as margens do Setor Lagunar Norte.



Fonte: autor.

A área compreendida pelo Setor Norte foi a que apresentou a menor porcentagem de margens com IVC Muito Alto. O substrato rochoso e as declividades mais elevadas na margem oeste foram fundamentais para que o IVC fosse Moderado a Baixo, mesmo que existam núcleos urbanos e existam segmentos de linha de costa com Índice de Vulnerabilidade Social Muito Alto. Apenas a porção mais setentrional do setor possui um IVC Muito Alto, pois as áreas próximas às margens são recobertas por sedimentos, declividade muito baixa, densa urbanização e as variações de nível lagunar são as maiores de todo o sistema.

Na margem leste, mesmo que existam áreas próximas recobertas por sedimentos e declividade muito baixa (planícies baixas) não há núcleos urbanos. Assim, a variável Urbanização foi que reduziu o IVC para o setor, independente que no estudo realizado no capítulo

4. No mapeamento de áreas marginais inundadas na Lagoa da Conceição/SC por variação de nível lagunar a partir do uso de imagens orbitais ficou constatado que as áreas próximas à margem leste são mais susceptíveis à variação do nível lagunar, mesmo que estas sejam pequenas. Ou seja, com variações maiores estas áreas passarão por processos mais intensos de inundação.

As flutuações de nível no setor são influenciadas por ação dos ventos. Ventos do quadrante Sul são responsáveis pela elevação do nível e do quadrante Norte redução. As margens mais próximas do Setor Central possuem variações menores de nível lagunar, e como estas áreas são mais íngremes com urbanização rarefeita (margem oeste), assim como sem urbanização (margem leste), causam redução do IVC.

### 8.3.5 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA

A tabela 20 e a figura 79 detalham o mapeamento Do Índice de Vulnerabilidade Costeira da Lagoa da Conceição à elevação do nível do mar. A linha de costa lagunar ficou dividida em 62 segmentos de IVC, a maior parte dos quais foram incluídos na classe Moderado (26,90%). A segunda maior porcentagem de segmentos foi a classe Alto (25,47%), seguido da classe Baixo (25,42%). A menor porcentagem de segmentos ficou na classe Muito Alto.

Tabela 20. Resumo do mapeamento realizado para a Lagoa da Conceição/SC.

	ID	Classe	Nº de Segmentos	Extensão (km)	Extensão (%)
<b>Lagoa da Conceição</b>	2	Baixo	14	12,97	25,42
	3	Moderado	17	13,73	26,90
	4	Alto	19	12,99	25,47
	5	Muito Alto	12	11,35	22,21
<b>Total</b>		-	62	51.04	100

Fonte: autor.

Somando os segmentos classificados com IVC Alto e Muito Alto há 24.34 km de margem lagunar em situação de maior vulnerabilidade à elevação do nível do mar, o que representa 47.68% da área de estudo, ou seja, quase a metade da área. Com IVC Muito Alto estão principalmente os setores Sul e Canal da Barra, em que as áreas marginais possuem declividades muito baixas, recobertas por

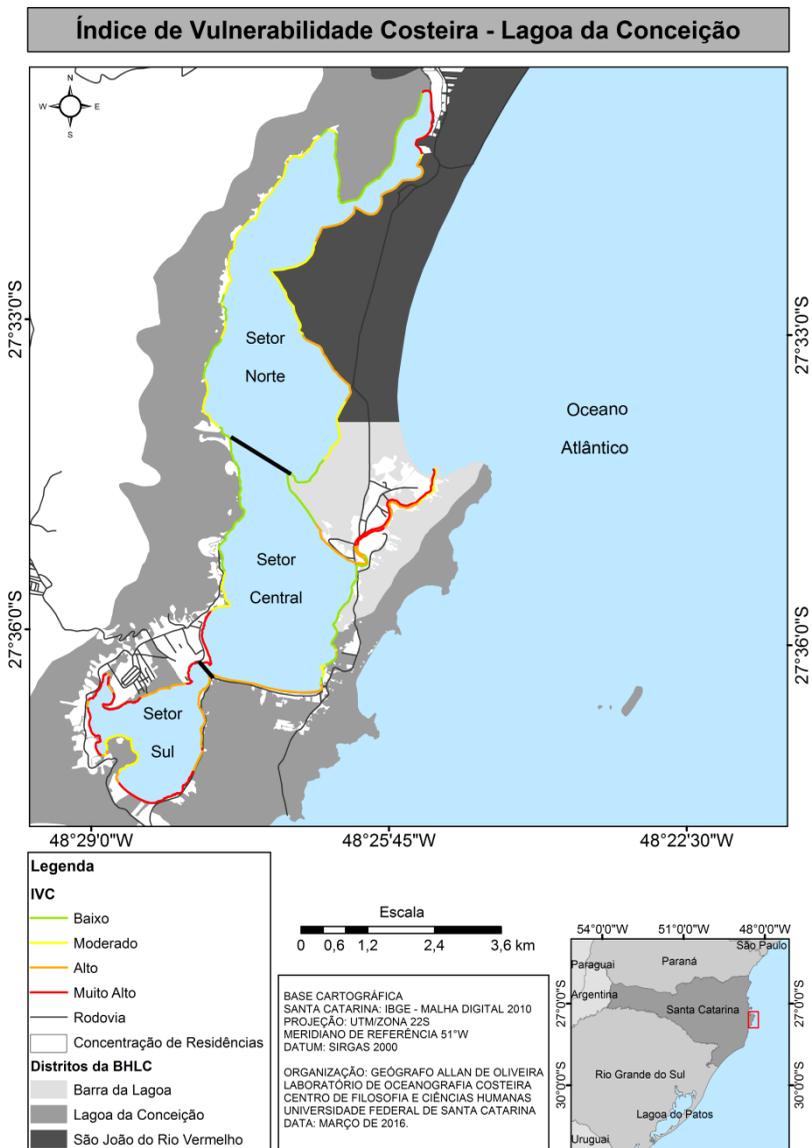
sedimentos inconsolidados, tanto holocênicos quanto pleistocênicos, com densa urbanização e apresentando as maiores variações de nível da coluna d'água.

Os segmentos com IVC Alto também ocorrem principalmente nos setores Sul e Canal da Barra, mas os que ocorrem no Setor Central merecem ser destacados. Na porção mais meridional deste setor está a Avenida das Rendeiras, um trecho costeiro urbanizado em quase toda sua extensão, com uma faixa praial estreita, utilizada pelos moradores locais e turistas para prática de banhos e esportes aquáticos. Pequenas variações do nível lagunar representam maior estreitamento desta faixa arenosa, e com elevação do nível do mar este processo tende a ser intensificado.

Outro segmento também com IVC Alto no Setor Central é o que está localizado próximo ao Canal da Barra. Neste segmento de 1,06 km a costa possui declividade muito baixa, é recoberta por sedimentos inconsolidados, com densa urbanização, além de empreendimentos comerciais. Mesmo que o Índice de Susceptibilidade Física tenha sido classificado como menor, pequenas oscilações podem não causar graves processos de inundação. Porém, caso os cenários mais pessimistas de elevação do nível do mar propostos pelo IPCC sejam concretizados, os processos de inundação serão intensificados.

Na margem oeste do Setor Central é possível observar três segmentos com IVC diferentes, desde Muito Alto até Baixo. Além de possuírem declividades diferentes, há também grau de urbanização diferenciado. O trecho nesta margem com IVC Muito Alto está mais próximo do Setor Sul, uma área com declividade muito baixa e densa urbanização. A vulnerabilidade Social neste trecho é Muito Alta, devido à média de moradores por domicílio ser muito alta e por ocorrer as maiores porcentagens de domicílios com renda de até  $\frac{1}{4}$  de salário mínimo, mesmo que a renda média per capita seja alta. Ou seja, é um segmento de costa com forte desigualdade social.

Figura 79. Índice de Susceptibilidade e Vulnerabilidade Costeira da Lagoa da Conceição/SC.



À medida que o segmento de costa da margem oeste se afasta do Setor Sul o IVC diminui. Além dos processos hidrodinâmicos causarem oscilações positivas menores na variação de nível lagunar com o distanciamento do Setor Sul, a declividade da costa também aumenta e a urbanização se torna mais rarefeita. A interação entre variáveis estruturais e de processo geraram segmentos com IVC Moderados até chegar ao IVC Baixo, quando este está ainda mais distante do Setor Sul e, por conseguinte, mais próximo do Setor Norte. Mesmo que a Vulnerabilidade Social aumente com a proximidade do Setor Norte, o IVC não foi Alto, pois os índices de Geologia e o de Susceptibilidade Física são Baixos.

Embora o Setor Central tenha a menor extensão de segmento de linha de costa definido com IVC Muito Alto, é o Setor Norte que possui o menor percentual de linha de costa nesta classe. Apenas 6,73% da área possui IVC Muito Alto, localizado na porção mais setentrional do setor. É uma área em que apenas a Vulnerabilidade Social é baixa, com as demais variáveis apresentando os valores de índice mais altos. O núcleo urbano do São João do Rio Vermelho desenvolvido próximo à margem lagunar, sobre uma planície baixa, onde as condições hidrodinâmicas são coordenadas pela ação dos ventos e vazões do rio João Gualberto Soares tornam esta área muito susceptível à elevação do nível do mar.

As condições descritas acima classificaram este segmento do Setor Norte com um IVC Muito Alto, pois oscilações positivas no nível lagunar podem causar inundação destas áreas de planícies baixas. Quando são somados os processos ação de ventos do quadrante Sul e descarga fluvial maior que  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor de vazão constante definido para a modelagem hidrodinâmica (capítulo de modelagem hidrodinâmica da Lagoa da Conceição), o processo de inundação pode ser ainda maior. Destaca-se que na modelagem hidrodinâmica foi utilizada uma vazão constante por não haver uma série temporal de mesmo período de simulação, o que pode ter causado uma subestimação dos efeitos fluviais na laguna.

Nos segmentos com IVC Alto, que ocorrem quase que totalitariamente na margem leste, foram a urbanização e as características hidrodinâmicas que reduziram o índice. Esta porção do Setor Norte apresenta planícies baixas recobertas por sedimentos, que facilitam o deslocamento horizontal das águas, quando de uma

oscilação positiva no nível lagunar. Situação diferente da margem oeste, cujos segmentos com IVC Moderado a Baixo foram assim classificados devido às declividades mais elevadas da área de estudo, e apresentando substrato rochoso. Nestes últimos segmentos a declividade da costa reduz o deslocamento horizontal da água, situação que não ocorre na margem oposta.

Em todos os setores, de forma geral, as variáveis Geologia e Declividade da Costa estão correlacionadas. Além disso, a exceção do setor central e norte, as áreas de planícies baixas possuem densa urbanização, que apresentam variáveis socioeconômicas que tornam estes núcleos urbanos vulneráveis, como por exemplo, a má distribuição da renda. Todos estes fatores agrupados já tornam estas áreas susceptíveis a variações positivas do nível lagunar, seja por mudança climática proposta pelo IPCC (2014), seja por eventos meteorológicos atuais. Entretanto, se a hidrodinâmica lagunar próxima a estas áreas causa maior variação positiva de nível, há sim uma intensificação da susceptibilidade a inundação.

Assim como em toda Ilha de Santa Catarina, a Lagoa da Conceição é um importante destino de turistas. Os núcleos urbanos dos três distritos estão próximos tanto da laguna quanto de praias marinhas (Praia da Joaquina, Praia Mole, Praia da Galheta, Praia da Barra da Lagoa e Praia do Moçambique). A infraestrutura existente na área urbanizada, com hotéis, pousadas, albergues, casas de aluguel para turistas, bares, restaurantes e casas noturnas tornam a procura por esta área ainda maior. A inserção de dados turísticos para desenvolver o IVC, como realizado por Kunte et al. (2014) seria importante, pois é uma das principais fontes econômicas da região.

#### **8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise conjunta de variáveis estruturais, de processo e descritores socioeconômicos proposta neste capítulo, permitiram a análise integrada dos resultados obtidos no âmbito desta tese. Com base nos resultados obtidos neste capítulo integrador é possível se fazer as seguintes considerações:

- Esta pesquisa foi a primeira tentativa para aplicar o índice de vulnerabilidade costeira para o sistema costeiro da Lagoa da Conceição, utilizando metodologia adotada primeiramente para sistemas costeiros abertos nos Estados Unidos.

- Por ser uma metodologia desenvolvida para análise integrada de variáveis em sistemas costeiros abertos, foi necessário adaptar alguns procedimentos, introduzindo, por exemplo, variáveis extraídas de modelagem numérica.

- Os setores Canal da Barra da Lagoa e Sul foram os que apresentaram maiores extensões de linha de costa com IVC Muito Alto, por serem áreas com planícies baixas e com densa urbanização, mas com processos hidrodinâmicos diferenciados. Enquanto no primeiro setor os efeitos de maré são os principais responsáveis pelas oscilações positivas do nível d'água, no segundo os efeitos da ação dos ventos é que são os responsáveis por tais variações.

- No Setor Central as extensões de linha de costa com IVC Muito Alto são menores, pois existem grandes extensões de áreas com declividades maiores (encostas suaves a íngremes) e com urbanização rarefeita. Estas características unidas a menores oscilações positivas do nível lagunar favoreceram a definição de uma menor susceptibilidade e vulnerabilidade costeira.

- O Setor Norte foi o que registrou menor porcentagem de área com IVC Muito Alto. Assim como no Setor Central, existem núcleos urbanos rarefeitos localizados em terrenos com declividades maiores (encostas suaves a íngremes), assim como margens sem urbanização. Na única área em que estas características não ocorrem, localizada na porção mais setentrional, o IVC foi Muito Alto.

- De forma geral ocorreu similaridade na extensão dos segmentos por intervalo do IVC. Porém, somando os índices Muito Alto e Alto ficou caracterizado que quase metade da área possui forte susceptibilidade e vulnerabilidade à elevação do nível do mar.

- O IVC forneceu uma indicação da susceptibilidade relativa, discriminando desde segmentos costeiros mais resistentes (costões rochosos) a planícies costeiras mais susceptíveis a eventos de variação de nível lagunar. Integrando a estas características físicas os descritores socioeconômicos pode-se estender como a Lagoa da Conceição está vulnerável à oscilações positivas do nível do mar.

## **9 CONCLUSÃO**

### **9.1 INTRODUÇÃO**

Os capítulos anteriores demonstraram o desenvolvimento e implementação de metodologias para mapear a cobertura das terras e áreas marginais inundadas, avaliar a Vulnerabilidade Social e Susceptibilidade Física da Lagoa da Conceição a oscilação positiva do nível do mar, assim como uma abordagem metodológica integrando estas avaliações, o que permitiu determinar o Índice de Vulnerabilidade Costeira. Este capítulo descreve as conclusões da pesquisa, resume as contribuições da tese, identifica as limitações da pesquisa, e fornece uma recomendação para futuros estudos.

### **9.2 CONCLUSÕES**

O impacto das mudanças climáticas, especificamente a oscilação positiva do nível do mar no sistema costeiro Lagoa da Conceição (LC), foi avaliado calculando o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC). Buscou-se adequar esta metodologia aplicada amplamente para sistemas costeiros abertos a fim de permitir a análise integrada de indicadores de Susceptibilidade Física e de Vulnerabilidade Social, calculados nesta tese. Esta metodologia integradora também permitiu incorporar a pesquisa informações de cobertura das terras, no caso os núcleos urbanos, além de variáveis estruturais (Geologia e Declividade da Costa).

O mapeamento da cobertura das terras mostrou que na faixa de 1 a 10m de altitude, ou planícies baixas e declives suaves, ocorrem preferencialmente formações herbáceas do tipo Campos, Núcleos Urbanos Mistos e Formações Arbóreas de Terras Baixas. Em 22,85% desta faixa de altitude estão os Núcleos Urbanos Mistos, que compreendem residências, hotéis, pousadas, albergues, casas de aluguel para turistas, bares, restaurantes e casas noturnas. São as áreas mais planas e com declives suaves que poderão ser impactadas com as oscilações positivas do nível do mar, e seus efeitos na LC. Todos os setores possuem núcleos urbanos mistos, mas a maior parte está localizada no Canal da Barra e setores Sul e Central.

Para definir a Susceptibilidade Física do sistema lagunar foi elaborado um modelo numérico, já empregado por outros pesquisadores em diferentes sistemas costeiros abrigados. Utilizando-

se desta ferramenta para compreender os processos costeiros responsáveis pela variação do nível lagunar em situação atual, e como este sistema irá se comportar em cenários de oscilação positiva do nível do mar, foi possível determinar que o sistema é susceptível a elevação do nível do mar. Porém, através do critério adotado, existem áreas com maior susceptibilidade, quer sejam elas por maior influência das marés (Canal da Barra), quer seja por ação dos ventos que causam desnível no sistema (setores Norte e Sul).

Ao comparar as metodologias que definem a Susceptibilidade Física em sistemas costeiros abertos e abrigados, constata-se que há um avanço maior nas pesquisas para os sistemas abertos. Nesta tese o critério adotado partiu de uma abordagem que utiliza modelo numérico, também empregada em outras pesquisas citadas na tese, mas somando-se uma nova estratégia até então não identificada. A utilização da máxima variação de nível lagunar ao longo de quase um ciclo anual de modelagem hidrodinâmica foi o critério adotado para definir a Susceptibilidade Física da LC. Entende-se que esta metodologia pode ser utilizada em outros sistemas abrigados com características hidrodinâmicas similares, ou seja, com a circulação controlada pela ação do vento, baixo número de descargas fluviais e maré astronômica e meteorológica bastante filtrada.

O Índice de Vulnerabilidade Social (IVSo) determinado nesta tese, e que identifica as características populacionais que influenciam o grau dos riscos sociais, mostrou que não existem segmentos costeiros com Vulnerabilidade Muito Baixa. Em todos os setores censitários na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, e que estão em contato com as margens lagunares, existem habitantes com renda inferior a 1 salário mínimo, caracterizando um poder aquisitivo abaixo do mínimo estipulado pelo governo. Este descritor recebeu o maior peso na determinação do IVSo, e ao compara-lo com os demais descritores, principalmente os relacionados a renda, mostrou a desigualdade social na área de estudo.

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) proposto na tese, integrando os resultados obtidos ao longo dos capítulos da tese, determinou que 47,68% das margens lagunares possuem Vulnerabilidade Muito Alta a Alta. Todos os setores possuem segmentos costeiros com estes índices, mas o Canal da Barra e Setor Sul são os que possuem maiores extensões. Terrenos com baixa

declividade, cobertos por sedimentos inconsolidados, com núcleos urbanos estruturados e maior Susceptibilidade Física às oscilações de nível lagunar são as causas para o IVC Muito Alto e Alto.

De modo geral se conclui que a proposta metodológica de avaliação da Vulnerabilidade Costeira apresentada e aplicada na tese contribuiu para nortear as pesquisas voltadas para esta temática, ao unir duas metodologias consolidadas para sistemas costeiros, sendo uma para sistemas abrigados (modelo numérico) e outra para sistemas abertos (Índice de Vulnerabilidade Costeira - IVC). Com isso, foi possível identificar os segmentos costeiros mais vulneráveis a oscilação positiva do nível do mar.

### **9.3 LIMITAÇÕES**

A seção a seguir descreve algumas limitações detectadas ao longo da pesquisa.

#### **9.3.1 COTAS DE INUNDAÇÃO**

Mesmo após determinar através de modelagem numérica a situação atual da circulação hidrodinâmica da LC, e projetar cenários de elevação do nível do mar, não foi possível simular até quais cotas altimétricas ocorreria inundações. A integração entre os dados das simulações de subida do nível lagunar com os dados topográficos da Bacia Hidrográfica da LC implica na utilização de uma base única, sendo que os mesmos possuem datums verticais distintos.

#### **9.3.2 ESCALAS DOS MAPEAMENTOS - VARIÁVEIS ESTRUTURAIS**

Em todas as pesquisas que determinaram um Índice de Vulnerabilidade Costeira foi utilizada a variável estrutural Geomorfologia. Dependendo da escala da pesquisa, como a realizada nesta tese, são necessários mapeamentos geomorfológicos em que as formas de relevo tenham classificações ou taxonomia mais detalhadas. Os dados geomorfológicos existentes para a área de estudo compreendiam mapeamentos pretéritos realizados pelo IBGE. São mapeamentos na escala de 1:250000 que integraram informações do Projeto RADAMBRASIL e do Projeto Sistematização das Informações Sobre Recursos Naturais. Mesmo que os dados geológicos utilizados aqui tenham sido também realizados pelo IBGE, com mesma escala de 1:250000, ocorreu uma generalização, baseada na proposta de

Abuodha e Woodroffe (2010) que utilizaram apenas a designação Tipo de Rocha. Entretanto, esta generalização não seria condizente para a variável geomorfologia.

#### **9.4 RECOMENDAÇÃO**

Em pesquisa futura, assim como realizado por Silva (2014), poderia ser realizada uma correção dos valores de batimetria ou topografia e, conseqüentemente, uma aproximação para a união das bases de dados batimétricos e topográficos em um mesmo referencial vertical. Através da verificação da acurácia e precisão desta transformação de referência de nível, seria possível gerar cenários de inundação a partir dos cenários de elevação do nível lagunar elaborados nesta tese.

## 10 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABUODHA, P.A.O. Application and evaluation of shoreline segmentation mappings approaches to assessing response to climate change on the Illawarra Coast, South East Australia. PhD Thesis, School of Earth and Environment Sciences. University of Wollongong. 306p. 2009.

ABUODHA, P.A.O.; WOODROFFE, C.D. Assessing vulnerability to sea-level rise using a coastal sensitivity index: a case study from southeast Australia. *Journal of Coastal Conservation*, 14:189–205. 2010.

ADGER, W.N. Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam. *World Development*, v.27, n.2: 249–269. 1999.

ALEXIOU, A.; SINGLETON, A. The Role of Geographical Context in Building Geodemographic Classifications. Department of Geography and Planning, University of Liverpool: 6p. 2014.

ALPAR, B. Vulnerability of Turkish coasts to accelerated sea-level rise. *Geomorphology*. Vol. 107: 58–63. 2009.

ANDRADE, R.C. Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição - SC. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação de Engenharias/Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 134p. 2001.

ANDRADE, R.C.; ROSMAN, P.C.C. Análise das Trocas de Massas D'água na Lagoa da Conceição – SC Através de Modelagem Computacional. In: Congresso Brasileiro De Oceanografia - XVI Semana Nacional de Oceanografia Univali – Itajaí (SC). 2004.

APPEANING ADDO, K. Assessing Coastal Vulnerability Index to Climate Change: the Case of Accra – Ghana, Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 1892-1897. 2013.

BARBOSA, T.C.P. ECOLAGOA: um breve documento sobre a ecologia da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição / Ana Cristina José, Juliana Rezende Torres – Florianópolis, Agnes. 2003.

BARNETT, T.P.; PIERCE, D.W.; ACHUTARAO, K.M.; GLECKLER, P. J.; SANTER, B. D.; GREGORY, J. M.; WASHINGTON, W.M. Penetration of Human-Induced Warming into the World's Oceans. *Science*, 309: 284 – 287. 2005.

BAUER NETO, V. Caracterização geomorfológica da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC - Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC Florianópolis, SC. 2007.

BIRD, E.C.F. Physical setting and geomorphology coastal lagoons. In: KJERFIE, B. 1994 (eds.). *Coastal lagoon processes*. Elsevier Oceanography Series, 60. P: 9-40. 1994.

BJARNADOTTIR, S.; LI, Y.; STEWART, M.G. Social vulnerability index for coastal communities at risk to hurricane hazard and a changing climate. *Natural Hazards*, v.59: 1055 -1075. 2011.

BLAIKIE, P., CANNON, T.; DAVIS, I.; WISNER, B. *At Risk: Natural Hazards, People, Vulnerability, and Disasters*. Routledge, London, UK. 1994.

BONETTI, J.; KLEIN, A.H.F.; MULER, M.; DE LUCA; C.B., SILVA, G.V., TOLDO JR., E.E.; GONZALEZ, M. Spatial and numerical methodologies on coastal erosion and flooding risk assessment. In: Finkl, C. (Ed.), *Coastal Hazards*. Chapter 16. Coastal Research Library Series. Springer, Dordrecht, pp. 423-442. 2013.

BONETTI, J.; SERAFIM, M.B.; ABOUDHA, P.; WOODROFFE, C.D. Multicriteria indices for coastal susceptibility assessment: a comparative study of embayed Brazilian and Australian coasts. In: *CoastGIS 2015 – The International Symposium for GIS and computer Cartography for Coastal Zone Mnagement*. Cape Town. Proceedings. Durban: CSRI, p. 36-40. 2015.

BONETTI, J.; WOODROFFE, C.D. Spatial Analysis on GIS for Coastal Vulnerability Assessment. In: Bartlett, D.; Celliers, L. (eds.). *Geoinformatics for Marine and Coastal Management*. Chapter 20. Taylor & Francis, p. 369-397. (*in press*)

BOORI, M.S. Coastal vulnerability, adaptation and risk assessment due to environmental change in Apodi-Mossoro estuary,

Northeast Brazil. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, Vol, 1, n, 3: 620-638. 2010.

BOURGOYNE, M. Hydrodynamic Modeling of San Elijo Lagoon, California. Master of Science in Civil Engineering. Louisiana State University, Baton Rouge. 115p. 2010.

BROWN, D.G.; DUH, J.D. Spatial simulation for translating from land use to land cover. *International Journal for Geographical Information Science*, 18, p: 35 - 60. 2004.

CALLIARI, L.J.; TOZZI, H.A.M.; KLEIN, A.H.F. Erosão associada a marés meteorológicas na costa sul-riograndense. (COMEMIR/OSNLR). *Anais (4) – Simpósio: XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia*, 430-434. 1996.

CARTER, R.W.G. The impact on Ireland of changes in mean sea level; programme of expert studies in climate change 2, Department of the Environment, Dublin 128. 1990.

CASTELÃO, R.M.; MOLLER Jr, O.O. Sobre a circulação tridimensional forçada por ventos na Lagoa dos Patos. *Revista Atlântica*, Rio Grande, 25(2): 91-106. 2003.

CASTRO, C.M.; PEIXOTO, M.N.O.; RIO, G.P. Riscos Ambientais e Geografia: Conceituações, Abordagens e Escalas. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. Vol. 28-2, p. 11-30, 2005.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Mudanças do clima no Brasil: vulnerabilidade, impactos e adaptação. *Revista Parceria Estratégicas*, Brasília, n. 27. 2008.

CHURCH, J.A.; CLARK, P.U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J.M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M.A.; MILNE, G.A.; NEREM, R.S.; NUNN, P.D.; PAYNE, A.J.; PFEFFER, W.T.; STAMMER D.; UNNIKRISSNAN, A.S. Sea level change. In: *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX. V.; MIDGLEY, P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137-1216. 2013.

CONGALTON, R.G. Putting the map back in map accuracy assessment. In: LUNETTA, R.S.; LYON, J.G. (orgs.). Remote sensing and GIS accuracy assessment. CRC Press. Boca Raton London New York Washington, DC. 1 – 15. 2005.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New York: Lewis Publishers, 136p. 1999.

CRÓSTA, A.P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas, SP: IG/UNICAMP, 170p. 1992.

CUTTER, S.L. Vulnerability to environmental hazards. Progress in Human Geography, v.20: 529–539. 1996.

CUTTER, S.L.; MITCHELL, J.T.; SCOTT, M.S. Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina. Annals of the Association of American Geographers, v.90, n.4: 713–737. 2000.

DARWIN, R.; RICHARDS, T.J.; TOL, R. Estimates of the Economic Effects of Sea Level Rise. In: Environmental and Resource Economics, 19: 113-129. 2001.

DELGADO, A.L.S.A.P. Caracterização hidrodinâmica e sedimentar do estuário do rio Minho. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Dissertação de mestrado. 175p. 2011.

DE OLIVEIRA, A.O. Subsídios para o planejamento do balneário do Mar Grosso, São José do Norte, RS: avaliação de aspectos geomorfológicos e morfodinâmicos com auxílio de geotecnologias. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS. 138p. 2005.

DE OLIVEIRA, A.O.; CARAZAI, D.; BONETTI FILHO, J. Alterações de usos e ocupação da terra na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição/Florianópolis através de imagens Landsat TM/5. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguacu, PR, Brasil: 7024-7031. 2013.

DIEDERICHSEN, S.D.; GEMAEL, M.K.; HERNANDEZ, A.O.; DE OLIVEIRA, A.O.; PAQUETTE, M; SCHMIDT, A.D.; SILVA, P.G.; SILVA, M.S.; SCHERER, M.E. Gestão costeira no município de Florianópolis, SC, Brasil: Um diagnóstico. *Revista da Gestão Costeira Integrada*. , v.13, p.499 - 512, 2013.

DIEZ, P.G.; PERILLO, G.M.E.; PICCOLO, M.C. Vulnerability to sea-level rise on the coast of Buenos Aires province. *Journal of Coastal Research*, 23: 119-126. 2007.

DOUKAKIS, E. Coastal vulnerability and risk parameters. *European Water*, 11/12: 3-7. 2005.

DOWNING, T.E.; PATWARDHAN, A. Assessing vulnerability for climate adaptation, Technical Paper 3. In: *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures* [Lim, B. and E. Spanger-Siegfried (eds.)]. United Nations Development Programme and Cambridge University Press, New York, NY: 67-89. 2004.

DUCHON, C.E. Lanczos Filtering in One and Two Dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18: 1016-1022. 1979.

DUTRA, S.J. Caracterização geoambiental da Bacia de drenagem do rio João Gualberto, Ilha de Santa Catarina, SC. Monografia do curso de Geografia, UFSC, Florianópolis, SC. 53p. 1991.

DWARAKISH, G.S.; VINAY, S.A.; NATESAN, U.; ASANO, T.; KAKINUMA, T.; VENKATARAMANA, K.; JAGADEESHA PAI, B.; BABITA, M.K. Coastal vulnerability assessment of the future sea level rise in Udupi coastal zone of Karnataka state, west coast of India. *Ocean and Coastal Management*. Vol. 52: 467–478. 2009.

EAKIN, H.; LUERS, A.L. Assessing the vulnerability of social environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, v.31: 365–394. 2006.

EASTMAN, J.R. *IDRISI Selva Guide to GIS and Image Processing*. Worcester, Clark University. 342p. 2009.

EGLER, C.A.G. As Cartas de Risco Ambiental, Social e Tecnológico do Novo Macrodiagnóstico da Zona Costeira. In: *I Encontro Temático:*

Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e da Zona Costeira. Ministério do Meio Ambiente. Itajaí, SC, Brasil. CD-ROOM. 2005.

EGLER, C.A.G.; LINS-DE-BARROS, F.M.; BENCHIMOL, M.F.; MATTOS, M.M.; VOIVODIC, R.A.A.; MARCELINO, V.M. Dinâmica Territorial e Gestão Costeira no Brasil. 2005.

EMANUEL, K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature* 436:686-688. 2005.

FELSENSTEIN, D.; LICHTER, M. Social and economic vulnerability of coastal communities to sea-level rise and extreme flooding. *Natural Hazards*, v.71: 463–491. 2014.

FERNANDES, E.H.L.; MOLLER JR, O.O.; CASTAING, P.; LAZURE, P. Tidal frequency dynamics of a Southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. *Estuaries*, v. 30, p. 311-320, 2007.

FERRARIN, C.; UMGIESSER, G.; SCROCCARO, I.; MATASSI, G. Hydrodynamic modeling of the Lagoons of Marano and Grado, Italy. *GEO-ECO-MARINA* 15: 13-19. 2009

FERREIRA, O.; DIAS, J.A.; TABORDA, R. Implications of sea level rise for continental Portugal. *Journal of Coastal Research*, 24, 317-324. 2008.

FIGUEIREDO, S.A. External forcing and internal controls on coastal response to climate change at Rio Grande do Sul, Southern Brazil. Thesis of Doctor of Philosophy in Science, University of Sydney. 150p. 2011.

FISHER, P.; COMBER, A.; WADSWORTH, R. Land Use and Land Cover: Contradiction or Complement. In: FISHER, P.; UNWIN, D.J. (orgs.). *Re-presenting GIS*. John Wiley & Sons, p: 85 – 98. 2005.

FLORIANÓPOLIS. IPUF. Atlas do município de Florianópolis. Coordenação de Maria das Dores de Almeida Bastos. Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 166p. 2004.

FONSECA, L.M.G. Processamento digital de imagens. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 105p. 2000.

FORTUNATO, A.B.; RODRIGUES, M.; DIAS, J.M.; LOPES, C.; OLIVEIRA, A. Generating inundation maps for a coastal lagoon: A case study in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ocean Engineering* 64: 60–71. 2013.

FRANKE, R. Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods, *Mathematics of Computations*, v. 33, n. 157, p. 181-200. 1982.

GALL, M. Indices of social vulnerability to natural hazards: a comparative evaluation. Department of Geography, University of South Carolina. Thesis of Doctor of Philosophy, South Carolina, USA, 250p. 2007.

GALLERINE, G.; DE DONATIS, M.; DEVOTI, S.; GABELLINI, M.; NISI, M.F.; SILENZI, S. An integrated GIS method to evaluate susceptibility and hazard of sea level rise in coastal plains: The Versilia Plain. In: Fifth International Symposium on GIS and Computer Cartography for Coastal Zone Management. Proceedings... Disponível em: <http://www.gisig.it/coastgis/papers/gallerini.htm>. 2002.

GAN, M.A. Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE/TD, 183p. 1992.

GAN, M.A.; RAO, B.V. Surface cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 293-302. 1991.

GILLE, S.T. Warming of the southern ocean since the 1950s. *Science*, 295: 1275 – 1277. 2002.

GIORDANO, P.B. Modelagem hidrodinâmica do Saco do Arraial, estuário da Lagoa dos Patos, RS. Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de mestrado. 91p. 2009.

GODOY, F.B. Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 91p. 2009.

GORNITZ, V. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 89:379–398. 1991.

GORNITZ, V.; KANCIRUK, P. Assessment of global coastal hazards from sea-level rise. *Proceedings of the 6th Symposium on Coastal and Ocean management, ASCE*, July 11-14 1989, Charleston, SC. 1989.

GUPTA, R.P.; TIWARI, R.K.; SAINI, V.; SRIVASTAVA, N. A Simplified Approach for Interpreting Principal Component Images. *Advances in Remote Sensing*, v.2, p: 111-119. 2013.

HAINES, P.E.; THOM, B.G. Climate change impacts on entrance processes of intermittently open/closed coastal lagoons in New South Wales, Australia. *Journal of Coastal Research* S150: 242-246. 2007.

HASENACK, H.; WEBER, E.; VALDAMERI, R. Análise da Vulnerabilidade de um Parque através de módulos de apoio a decisão em Sistemas de Informação Geográfica. 1998. Fator GIS 04/98. Disponível em: <http://www.fatorgis.com.br>

HEGERL, G.C.; BINDOFF, N.L. Warming the world's oceans. *Science*, 309: 254 – 255. 2005.

HERVOUET, J. M. *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons. 360 p. 2007.

HOEFEL, F.G. *Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas: uma revisão bibliográfica*. Itajaí, Editora da Univalli. 92 p. 1973.

HOLLAND, G.J.; WEBSTER, P.J. Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 365:2695-2716. 2007.

HUTCHINSON, J.N. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides* (Ed: Bonnard, C.), 1, p: 3-35. 1988.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário. Centro de Documentação e Disseminação de

Informações/IBGE/Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, RJ. 201p. 2011.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil/Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 176p. 2011.

INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION – ISDR. *Living with risk. A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. United Nations, Inter Agency Secretariat. Preliminary version, Geneva, Switzerland. 384p. 2002.

IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [HOUGHTON, J.T., Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL, C.A. JOHNSON (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881p. 2001.

IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, USA. 996p. 2007.

IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, USA. 1535p. 2013.

IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014.

JENSEN, J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 2<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall. 526 p. 2004.

JENSEN, J.R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres; tradução: José Carlos Neves Epiphânio et al.(coord.). São José dos Campos: Parêntese. 589 p. 2011.

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 75, Nº. 11, p. 1307–1317. 2009.

JOLLIFFE, I.T. Choosing a Subset of Principal Components or Variables. In: JOLLIFFE, I.T. *Principal Component Analysis*. Springer Series in Statistic, 2ª edição, cap. 6, p: 111-149. 2002.

JONES, C. The implications of sea level rise for Sydney's coastal planning and management. 91p. 2008.

KIENBERGER, S.; BLASCHKE, T.; ZAIDI, R.Z. A framework for spatio-temporal scales and concepts from different disciplines: the 'vulnerability cube'. *Natural Hazards*, v. 68:1343–1369. 2013.

KJERFVE, B. Coastal lagoon processes. In: KJERFVE, B. 1994 (eds.). *Coastal lagoon processes*. Elsevier Oceanography Series, 60. P: 1-8. 1994.

KJERFVE, B.; MAGILL, K.E. Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88: 187-199. 1989.

KLEIN, R.; NICHOLLS, R. Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio* 28 (2): 182-187. 1999.

KNOPPERS, B.; KJERFVE, B. Coastal Lagoons of Southeastern Brazil: Physical and Biogeochemical Characteristics. In: PERILLO, G.M.E.; PICCOLO, M.C.; PINO-QUIVIRA, M. (eds.). 1999. *Estuaries of South America: their geomorphology and dynamics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. P: 35-66. 1999.

KOEFENDER, F. Análise Numérica da Influência Batimétrica no Padrão de Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Trabalho Conclusão do Curso. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2005.

KOKS, E.E.; JONGMAN, B.; HUSBY, T.G.; BOTZEN, W.J.W. Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environment Science Policy*, 47: 42–52. 2015.

KUMAR, A.A.; KUNTE, P.D. Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, 64:853–872. 2012.

LE COZANNET, G.; GARCIN, M.; BULTEAU, T.; MIRGON, C.; YATES, M.L.; MENDEZ, M.; BAILLS, A.; IDIER, D.; OLIVEROS, C. An AHP-derived method for mapping the physical vulnerability of coastal areas at regional scales. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 1209–1227, 2013.

LÉLIS, R.J.F. Aspectos morfossedimentares da praia das Rendeiras, Laguna da Conceição (Ilha de Santa Catarina - SC). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. 133p. 2006.

MAHAPATRA, M.; RAMAKRISHNAN, R.; RAJAWAT, A.S. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India. *Natural Hazards*, 76: 139–159. 2015.

MAHENDRA, R.S.; MOHANTY, P.C.; BISOYI, H.; SRINIVASA, K.T.; NAYAK, S. Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the Cuddalore–Villupuram, east coast of India using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management*, 54(4): 302-311. 2011.

MANN, M.E.; EMANUEL, K.A.; HOLLAND, G.J.; WEBSTER P.J. Atlantic tropical cyclones revisited. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 88(36):349-350. 2007.

MARQUES, W.C. Estudo da dinâmica da pluma costeira da Lagoa dos Patos. Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande. Tese de doutorado. 284p. 2009.

MARQUES, W.C.; FERNANDES, E.H.L.; MONTEIRO, I.; MOLLER JR, O.O. Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, v. 29, p. 556-571, 2009.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; FLEXOR, J. M. Relative sea level reconstruction during the last 7000 years along the states of Paraná and Santa Catarina coastal plains: Additional information derived from shell-middens. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 4. Balkema, Rotterdam, pp. 219-236. 1986.

MARTINI, L.C.P.; MATTOS, D.S.; BARBOSA, D.F.; RECH, A.I.B. Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de clorofila<sub>a</sub> na Lagoa da Conceição - Florianópolis, SC. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 11, p. 318-324. 2006.

MCLEAN, R.F.; TSYBAN, A.; BURKETT, A.; CODIGNOTTO, J.O.; FORBES, D.L.; MIMURA, N.; BEAMISH, R.J.; ITTEKKOT, V. Coastal zones and marine ecosystems. In: McCarthy, J.J.; Canziani, O.F.; Leary, N.A.; Dokken, D.J.; White, K.S. (Eds.), *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 343–380. 2001.

McFEETERS, S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, pp. 1425–1432. 1996.

MESQUITA, A.R. Sea level variations along the Brazilian coast: A short review. *Brazilian Symposium on Sandy Beaches*: 15 p. 2000.

MICHAELOWA, A. Mitigation versus Adaptation: The Political Economy of Competition Between Climate Policy Strategies and the Consequences for Developing Countries. *Institute of International Economics*. Paper 153. 2001.

MIMURA, N. Vulnerability of island countries in the South Pacific to sea level rise and climate change. *Clim Res* 12:137–143. 1999.

MORAES, A.C.R. Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do Litoral Brasileiro. São Paulo: Annablume, 232p. 2007.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 3ª ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

MUEHE, D. Brazilian coastal vulnerability. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(2): 173-183. 2010.

MUEHE, D.; CARUSO Jr. Batimetria e Algumas Considerações Sobre a Evolução Geológica da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina. In: Sierra de Ledo, B., SorianoSerra, E. J. (eds). *O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 15-24. 1999.

MUEHE, D.; NEVES, C.F. The Implications of Sea-Level Rise on the Brazilian Coast: A Preliminary Assessment. *Journal of Coastal Research*, Special Issue Nº 14: 54-78. 1994.

MULER, M.; BONETTI, J. An Integrated Approach to Assess Wave Exposure in Coastal Areas for Vulnerability Analysis. *Marine Geodesy*, 37:2, 220-237, 2014.

MURALI, R.M.; ANKITA, M.; AMRITA, S.; VETHAMONY, P. Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India using analytical hierarchical process. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1 (2): 509 -559. 2013

NALI, J.O. Elevação do nível do mar no município de Vitória-ES: vulnerabilidades, impactos e possíveis ações de resposta. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental*. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória/ES. 144p. 2011.

NEVES, C.F.; MUEHE, D. Potential impacts of sea level rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. *Journal of Coastal Research*, Special Issue Nº 14: 116-131. 1994.

NEVES, C.F.; MUEHE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. Rio de Janeiro: COPPE/UF RJ, 38p. 2004.

NGUYEN, T.T.X.; WOODROFFE, C.D. Assessing relative vulnerability to sea-level rise in the western part of the Mekong River Delta in Vietnam. *Sustainability Science*, 11: 645-659. 2016.

NICHOLLS, R.J. Synthesis of vulnerability analysis studies. *Proceedings of WORLD COAST '93 Coastal Zone Management Centre Rijkswaterstaat*. The Netherlands: 1-41. 1995.

NICHOLLS, R.J.; HOOZEMANS, F.M.J. *Global Vulnerability Analysis*. Encyclopedia of Coastal Science. 17p. 2000.

NICHOLLS, R.J.; MIMURA, N. Regional issues raised by sea-level rise and their policy implications. *Climate Research* 11(1): 5-18. 1998.

NICOLODI, J.L.; PETERMANN, R.M. Mudanças Climáticas e a Vulnerabilidade da Zona Costeira do Brasil: Aspectos ambientais,

sociais e tecnológicos. Revista da Gestão Costeira Integrada, v.10, n.2: 3-29. 2010.

NORDSTRON, K.F. Estuarine Beaches: an introduction to the physical and human factors affecting use and management of beaches in estuaries, lagoons, bays and fjords. New York, Elsevier Science Publishers Ltd, 225 p. 1992.

NOVO, E.M.L.M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J. da S. (Org.). Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais. Brasília: ed. UnB; Planaltina: Embrapa Cerrados, p.203-222. 2001.

ODEBRECHT, C.; CARUSO Jr. Hidrografia e Matéria Particulada em Suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. In: SIERRA DE LEDO, B., SORIANOSERRA, E. J. (eds). O Ecossistema da Lagoa da Conceição, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 35-61. 1999.

ODRESKI, L.F.R. Influência hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 120p. 2012.

OESCHGER, H., MINTZER, L.M. Lessons from the Ice Cores: Rapid Climate Changes During the Last 160.000 Years. In Mintzer, I. M. {Ed.}, Confronting Climate Change: Risks, Implications and Responses. UK, Cambridge U. Press. pp. 55-64. 1992.

OLIVEIRA, G.Q. Alteração do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande – Implicações Ambientais. Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de mestrado. 102p. 2012.

OLIVEIRA, H.A. Estudo do comportamento hidrodinâmico da Lagoa Mirim e dos processos de troca com a Lagoa dos Patos via canal de São Gonçalo. Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de mestrado. 81p. 2013.

OLIVEIRA, H.A.; FERNANDES, E.H.L.; MÖLLER, O.O; COLLARES, G.L. Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, p. 34-45, 2015.

OLIVEIRA, M.L.P. Análise da hidrodinâmica do sistema lagunar de Saquarema frente às projeções de aumento do nível médio do mar. Programa de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado. 102p. 2013.

PEIXOTO, J.F.M. Modelação hidrodinâmica tridimensional do estuário do rio Douro. Pós Graduação em Engenharia Civil - Perfil de Hidráulica e Ambiente. Universidade do Minho. Dissertação de mestrado. 85p. 2012.

PENDLETON, E.A.; THIELER, E.R.; WILLIAMS, S.J. Coastal vulnerability assessment of Cape Hettaras National Seashore (CAHA) to sea level rise. USGS Open File Report 2004, 1064. 2004.

PEREIRA, M.L.M. Estudo da dinâmica das águas do Canal da Barra/Barra da Lagoa – Florianópolis, SC. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado. 144p. 2004.

PEREIRA, P.S. Variabilidade da orla oceânica do rio grande do sul e suas implicações na elaboração de planos de contingência: aspectos morfodinâmicos, sedimentológicos e geomorfológicos. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica. Instituto de Oceanografia. Universidade Federal do Rio Grande. Dissertação de mestrado. 160p. 2005.

PETHICK, J. The Anglian coast. In: Science and Integrated Coastal Management. Von Bodungen, B.; Turner, R.K. (eds.). Dahlem University Press, Berlin, pp. 121-134. 2001.

PETHICK, J.S.; CROOKS, S. Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. Environmental Conservation 27 (4): 359–367. 2000.

KUNTE, P.D.; JAUHARI, N.; MEHROTRA, U.; KOTHA, M.; HURSTHOUSE, A.S.; GAGNON, A.S. Multi-hazards coastal vulnerability assessment of Goa, India, using geospatial techniques. Ocean & Coastal Management, 95: 264-281. 2014.

RADAMBRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Carta Geológica Folha SG.22-Z-D (MIR-524)/Florianópolis. 2004.

RADAMBRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística/Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Carta Geomorfológica Folha SG.22-Z-D (MIR-524)/Florianópolis. 2004.

RAO, N.; SUBRAELU, K.P.; RAO, V.T.; MALINI, H.B.; RATHEESH, R.; BHATTACHARYA, S.; RAJAWAT, A.S.; AJAI. Sea-level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast, India through remote sensing and GIS. *Journal of Coastal Conservation*, 12:195–207. 2008.

REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P. E AMBRIZZI, T. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. In: IX CONGREGMET, Congresso Argentino de Meteorologia, Buenos Aires, AR, Outubro 3-7. 2005.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. Remote sensing digital image analysis: an introduction. Fourth Edition. New York: Springer Verlag, 431p., 2006.

RIEBSAME W.E.; MEYER, W.B.; TURNER, B.L. Modeling Land-Use and Cover as Part of Global Environmental Change. *Climate Change*. 28, 45. 1994.

ROCHA, C.B.M. Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição - SC. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado. 80p. 2007.

ROSSITER, D.G. Statistical methods for accuracy assesment of classified thematic maps. Department of Earth Systems Analysis University of Twente, Faculty of Geo-Information Science & Earth Observation. 43p. 2014.

RUDORFF, F.M.; BONETTI, J.; PEIXOTO, J.R.V.; DE OLIVEIRA, U.R.; BONETTI, C. Setorização do Subsistema Sul da Lagoa da Conceição, Santa Catarina. *Braz. J. Aquat. Sci. Technol.*, 9(2):49-56. 2005.

SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v.15: 234-281. 1977.

SALES JR. R.F.M. Vulnerability and adaptation of coastal communities to climate variability and sea-level rise: Their implications for integrated coastal management in Cavite City, Philippines. *Ocean and Coastal Management*. Vol. 52: 395–404. 2009.

SANTOS, J.R. Avanços das pesquisas e aplicações de sensoriamento remoto no monitoramento da paisagem: contribuições aos estudos do Pantanal. 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Brasil, p: 675-683. 2006.

SANTOS, R.T.F. Mudanças climáticas e a zona costeira: uma análise do impacto da subida do nível do mar nos recursos hídricos – o caso do Canal de São Francisco – Baía de Sepetiba – RJ. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação de Engenharias/Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. 112p. 2012.

SERAFIM, M.B. Aplicação de um índice multicritério de vulnerabilidade a eventos extremos para praias do estado de Santa Catarina através de análise espacial. Monografia de conclusão de curso. Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 119p. 2014.

SHAW, J.; TAYLOR, R.B.; FORBES, D.L.; RUZ, M.H.; SOLOMON, S. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, 505: 1-79. 1998.

SIERRA DE LEDO, B.; SORIANO-SERRA, E.J. A Coastal Ecosystem Management and its Effects in a Subtropical Climate: the Conceição Lagoon". In: Siera de Ledo, B., Soriano-Serra, E. J; (eds). *O Ecossistema da Lagoa da Conceição*, NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA, pp. 371 - 383. 1999.

SINGLETON, A.D.; SPIELMAN, S.E. The Past, Present and Future of Geodemographic Research in the United States and United Kingdom. *The Professional Geographer*. *The Professional Geographer*, 66(4): 558–567. 2013.

STERR, H. Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. *Journal of Coastal Research*, 24(2): 380-393. 2008.

SUGUIO, K.; MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; FLEXOR, J. M.; AZEVEDO, A. E. G. Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira. *Revista Brasileira de Geociências*, 15(4): 273-286. 1985.

SUTHERLAND, J.; HALL, L.J.; CHESHER, T.J. Evaluation of the coastal area model PISCES at Teignmouth (UK). MR Wallingford Report TR 125. 2001.

SUTHERLAND, J.; WALSTRA, D.J.R.; CHESHER, T.J.; VAN RIJN, L.C.; SOUTHGATE, H.N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51: 119 – 142. 2004.

SZLAFSZTEIN, C.F. Climate change, Sea-level rise and Coastal Natural Hazards: A GIS-Based Vulnerability Assessment, State of Pará, Brazil. In: International Workshop - Human Security and Climate Change. 31p. 2005.

TAGLIANI, C.R.A. A mineração na porção média da Planície Costeira do Rio Grande do Sul: estratégia para a gestão sob um enfoque de Gerenciamento Costeiro Integrado. Curso de Pós-graduação em Geociências, UFRGS. Tese de Doutorado. Porto Alegre, RS, 252p. 2002.

TAGLIANI, C.R.A.; CALLIARI, L.J.; TAGLIANI, P.R.; ANTIQUEIRA, J.A. Vulnerability to sea level rise of an estuarine island in southern Brazil. *Quaternary and Environmental Geosciences*. Vol. 02(1):18-24. 2010.

TCU – Tribunal de Contas da União. Auditorias de natureza operacional sobre políticas públicas e mudanças climáticas - Adaptação em Zonas Costeiras. Relator Ministro Aroldo Cedraz – Brasília. 62 p. 2009.

THIELER E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S. National assessment of coastal vulnerability to sea level rise: preliminary results for the U.S. Atlanta coast. USGS, Open File Report 99, 593. 1999.

TITUS, J.G. Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: Synthesis and Assessment Product 4.1. Report by the U.S. Climate Change Science Program. 320p. 2009.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J.R.G.M. Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina. 1ª edição. 2014.

TRICART, J. O campo na dialética da Geografia. Revista do Departamento de Geografia, 19, p: 104-110. 2006.

TWIGG, J. Sustainable Livelihoods and Vulnerability to Disasters. Benfield Greig Hazard Research Centre, Disaster Management Working Paper 2, BGHRC, UCL, London UK. 2001.

VALENTIM, J.M.; VAZ, L.; VAZ, N.; SILVA, H.; DUARTE, B.; CAÇADOR, I.; DIAS, J.M. Sea level rise impact in residual circulation in Tagus estuary and Ria de Aveiro lagoon. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 1981-1986. 2013.

VALLE-LEVINSON, A. Definition and classification of estuaries. In: VALLE-LEVINSON, A. (eds.). 2010. Contemporary issues in estuarine physics. Cambridge University Press. P:1-11. 2010.

VAN RIJN, L.C.; WALSTRA, D.J.R.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S.; SIERRA, J.P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. Coastal Engineering, 47: 295 - 327. 2003

WEBER, E.; HASENACK, H. Avaliação de áreas para instalação de aterro sanitário através de análises em SIG com classificação contínua dos dados. VI Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento da América Latina. Salvador/BA. 2000.

WEBSTER, P.J.; HOLLAND G.J.; CURRY J.A.; CHANG H.R. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. Science 309: 1844-1846. 2005.

WILLIAMS, S.J.; GUTIERREZ, B.T.; TITUS, J.G.; GILL, S.K.; CAHOON, D.R.; THIELER, E.R.; K. ERIC ANDERSON, K. Sea-Level Rise and Its Effects on the Coast. In: Coastal Sensitivity to Sea-Level Rise: Synthesis and Assessment Product 4.1. Report by the U.S. Climate Change Science Program, p: 11-24. 2009.

XU, H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 27, nº. 14, p. 3025–3033. 2006.

YAMADA, K., NUNN, P.D., MIMURA, N., MACHIDA, S. AND YAMAMOTO, M. Methodology for the assessment of vulnerability of South Pacific island countries to sea-level rise and climate change. *Journal of Global Environmental Engineering*, vol 1, pp: 101-125. 1995.

YIN, J.; YIN, Z.; WANG, J.; XU, S. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *Journal of Coastal Conservation*, 16:123–133. 2012.

YOON, D.K. Assessment of social vulnerability to natural disasters: a comparative study. *Natural Hazards*, v.63: 823–843. 2012.

ZHOU, Y.; LI, N.; WENXIANG, W.; WU, J.; SHI, P. Local Spatial and Temporal Factors Influencing Population and Societal Vulnerability to Natural Disasters. *Risk Analysis*, v. 34, n. 4: 614-639. 2014.