

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

Júlia Costa Silva

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS APORTES
FLUVIAIS E ANTRÓPICOS SOBRE A HIDRODINÂMICA
RESIDUAL E A QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA
CONCEIÇÃO – FLORIANÓPOLIS - SC**

Florianópolis
2013

Júlia Costa Silva

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS APORTES
FLUVIAIS E ANTRÓPICOS SOBRE A HIDRODINÂMICA
RESIDUAL E A QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA
CONCEIÇÃO – FLORIANÓPOLIS - SC**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Davide
Franco

Florianópolis
2013

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

Silva, Júlia Costa

Análise numérica da influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica residual e a qualidade da água da Lagoa da Conceição [dissertação] / Júlia Costa Silva; orientador, Davide Franco - Florianópolis, SC, 2013. 134 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. hidrodinâmica. 3. modelagem numérica. 4. *E. coli*. 5. Lagoa da Conceição. I. Franco, Davide. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Júlia Costa Silva

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DOS APORTES
FLUVIAIS E ANTRÓPICOS SOBRE A HIDRODINÂMICA
RESIDUAL E A QUALIDADE DA ÁGUA DA LAGOA DA
CONCEIÇÃO – FLORIANÓPOLIS – SC**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA).

Florianópolis, 18 de outubro de 2013.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
Coordenador do Curso

Prof. Davide Franco, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Prof.^a Nadia Bernardi Bonumá, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Hamilton Pospissil Garbossa, Dr.
Epagri/SC

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo carinho e pelo apoio na superação dos desafios que a vida nos trás.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Davide Franco, por toda a sua dedicação, empenho e orientação. Sou muito grata por poder aprender um pouco mais a cada dia com este profissional. Um grande mestre.

À toda equipe do LaHiMaR, lugar que me inspirou a seguir o meu caminho profissional desde os meus primeiros dias na graduação em Engenharia Ambiental.

Ao grande amigo e colega profissional Felipe Odreski, que além de me ajudar com questões técnicas foi um grande incentivador para superar as dificuldades. Agradeço também por me aguentar e me inspirar mesmo nos dias mais difíceis, dias em que tudo pareceu dar errado, até mesmo os cálculos.

Ao amigo Ale que sempre me ajudou de forma direta ou indireta através de boas conversas.

À todos os meus colegas de trabalho, em especial Davi e Edney, que sempre me compreenderam e me deram apoio e incentivo para realizar este trabalho.

Ao Eng. Dr. Fabio Nascimento e a equipe do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica da COPPE, UFRJ, pela disponibilização de alguns equipamentos utilizados neste estudo.

Aos membros da banca, Luis Garbossa, Prof. Pedro e a Profa. Nádia pela sua atenção e dedicação ao trabalho.

Aos amigos que participam da minha vida ativamente e que me fornecem apoio emocional e espiritual.

RESUMO

A Lagoa da Conceição, localizada na Ilha de Santa Catarina, é um ambiente estuarino de usos múltiplos, como pesca, turismo, navegação, atividades esportivas e recepção da carga poluidora. Várias evidências apontam a decrescente qualidade da água decorrente da ocupação humana. Para compreender a distribuição e a variabilidade da concentração de poluentes na água é preciso conhecer os padrões de circulação hidrodinâmica e identificar os aportes de poluentes. Estudos hidrodinâmicos sobre este corpo hídrico já foram realizados a fim de avaliar seus padrões de circulação. No entanto, pouco se sabe de que forma as bacias hidrográficas contribuintes e suas ocupações afetam os padrões de qualidade da água da Lagoa da Conceição. Visando preencher essa lacuna, o presente estudo avaliou a influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica e a balneabilidade da Lagoa da Conceição. A análise de balneabilidade se deu através da estimativa de aporte de coliformes termotolerantes lançados no corpo hídrico e da concentração desta bactéria na interior da laguna em diferentes condições ambientais e hidrodinâmicas. As análises hidrodinâmicas e de qualidade da água foram realizadas através do modelo MOHID Water. O estudo mostrou que o deslocamento das águas internas da laguna ocorre em direção ao canal e que a laguna tende a exportar água. A análise de diversos cenários permitiu verificar a influência da vazão fluvial sobre a circulação hidrodinâmica. Em período de baixa vazão fluvial os níveis médios de água são inferiores aos níveis médios mesmo com nível maregráfico elevado. Os cenários que apresentaram níveis internos mais elevados foram àqueles de vazões elevadas. Os resultados mostraram ainda que a laguna exporta água somente quando o nível marítimo está próximo ou abaixo da média. Em períodos de maré elevada a laguna importa água da região marítima mesmo com vazões fluviais elevadas. Além disso, o estudo identificou regiões que possuem diferentes níveis de poluição quanto ao recebimento de efluentes sanitários. As regiões da laguna com piores indicadores de balneabilidade localizam-se próximo às sub-bacias com populações superiores a 3.000 habitantes. A variação espacial das concentrações de *E. coli* ao longo da laguna aponta que a contaminação fecal média na laguna fica restrita às proximidades dos pontos de lançamento de efluentes sanitários.

Palavras-Chave: Lagoa da Conceição; Modelagem Hidrodinâmica; Modelagem de Qualidade da água; *E. Coli*; Sistema de Modelagem de Água *MOHID*.

ABSTRACT

Lagoa da Conceição, located in Santa Catarina Island, is an estuary environment of multiple uses, such as fishing, tourism, navigation and water sports. It is also a receiver water body of the area's wastewaters. Some evidences indicate that the decreasing water quality originates from human occupation. In order to understand the distribution and the variability of pollutant concentration in the water, it is necessary to know the patterns of hydrodynamic circulation and to identify the contribution of pollutants. Some hydrodynamic studies of this water body were carried out, so as to evaluate its patterns of circulation. However, little is known about the way the contributing watersheds and their occupation affect the water quality standards in Lagoa da Conceição. For this reason, the present study evaluated the influence of the river flows and human contribution on the patterns of hydrodynamic and water quality. The balneability analysis has been performed through the estimate of thermotolerant coliforms contribution thrown in the hydric body and through the concentration of these bacteria inside the lagoon under different environmental and hydrodynamic conditions. The hydrodynamic and water quality analyses have been done through the MOHID Water model. The study showed that the internal water displacement occurs towards the channel and that the lagoon tends to export water. The analysis of several scenarios allowed to verify the influence of stream flow over the hydrodynamic circulation. In periods of low streamflow the lagoon's water levels are inferior to the mean, even with high tidal levels. The scenarios which presented the higher internal levels were those with increased streamflow. The results also shown that the lagoon exports water only when the sea level is near or below the average. In high tides periods, the lagoon imports water from the sea even with low stream flow. Besides that, the study identified regions of different pollution levels regarding the receiving of wastewater. The regions of the lagoon with worse rates of balneability are located next to the subwatersheds with population over 3.000 inhabitants. The spatial variation of the *E. coli* concentration along the lagoon indicates that the average fecal contamination is restrict to the areas close to the points of sanitary wastewater throwing.

Key-Words: Lagoa da Conceição, Hydrodynamic Modeling; Water Quality Modeling, *E. coli*; Water Modeling System *MOHID*.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição do sedimento na Lagoa da Conceição.....	10
Figura 2: Campo de velocidades médias sem descarga hídrica.	15
Figura 3: Campo de velocidades médias com descarga do João Gualberto.....	15
Figura 4: Campos de salinidade média.	18
Figura 5: Localização da área de estudo.	24
Figura 6: Sub-bacias da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.....	26
Figura 7: Bairros na região da Lagoa da Conceição.	27
Figura 8: Ocupação urbana em 2001 e em 2010.....	28
Figura 9: Batimetria da Lagoa da Conceição.....	34
Figura 10: Fluxograma do estudo.	36
Figura 11: Elemento de volume finito do modelo MOHID Water.	38
Figura 12: Precipitação, vazão, nível interno e maré meteorológica inseridos no modelo.	44
Figura 13: Série temporal da maré meteorológica e vazão fluvial imposta e do nível interno medido nos diferentes cenários.....	45
Figura 14: Constituintes harmônicas utilizada no período de calibração - Ilha do Arvoredo.	50
Figura 15: Maré inserida no modelo.....	51
Figura 16: Local das medições de campo.	52
Figura 17: Rosa dos ventos do período de dados obtidos.	53
Figura 18: Localização das bacias perenes.	55
Figura 19: Vazão e nível do Rio João Gualberto e vazão fluvial total imposta no modelo.	56
Figura 20: Pontos de monitoramento de balneabilidade da FATMA.	58
Figura 21: Fluxograma metodológico da determinação de aporte de E. coli...	59
Figura 22: Radiação solar para o período simulado.....	60
Figura 23: Radiação solar média ao longo dia para o período simulado.	61
Figura 24: Nível inicial das simulações.	62
Figura 25: Ponto de instalação do Digilevel.	63
Figura 26: Estrutura do Digilevel.....	63
Figura 27: Medição de nível interno na laguna.....	63
Figura 28: Agrupamentos dos pontos semelhantes de balneabilidade da FATMA.	66
Figura 29: Carga de E. coli produzida na região de monitoramento durante a baixa temporada – 2010.....	67

Figura 30: Carga de E. coli produzida na região de monitoramento durante a alta temporada – 2010.....	67
Figura 31: Relação entre carga de E. coli e o percentual de amostras impróprias nos grupos 1A, 1B e 2.....	68
Figura 32: Carga de E. coli produzida na Lagoa da Conceição durante a baixa temporada – 2010.....	69
Figura 33: Carga de E. coli produzida na Lagoa da Conceição durante a alta temporada – 2010.....	69
Figura 34: Pontos de lançamento de esgoto e a ocupação urbana de 2010.....	71
Figura 35: Nash-Sutcliffe x Rugosidade.....	73
Figura 36: Série astronômica medida x simulada - Período de Calibração.....	73
Figura 37: Comparação entre nível medido e simulado.....	74
Figura 38: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 37 da FATMA.....	74
Figura 39: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 38 da FATMA.....	75
Figura 40: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 39 da FATMA.....	75
Figura 41: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 41 da FATMA.....	75
Figura 42: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 43 da FATMA.....	76
Figura 43: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 61 da FATMA.....	76
Figura 44: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 62 da FATMA.....	76
Figura 45: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 66 da FATMA.....	77
Figura 46: Variação do nível no período de aquecimento - Região Central. ...	79
Figura 47: Variação do nível no período de aquecimento – Região Sul.....	79
Figura 48: Variação do nível no período de aquecimento – Região Norte.	79
Figura 49: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Central.....	80
Figura 50: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Sul..	80
Figura 51: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Norte.....	80
Figura 52: Campo de nível médio do período de simulação.....	84
Figura 53: Campo de nível C1- 0 hr.....	85

Figura 54: Campo de nível C1- 4hrs.....	85
Figura 55: Campo de nível C1- 11hrs.....	85
Figura 56: Campo de nível C1 - 19hrs.....	85
Figura 57: Campo de nível C1 - 24hrs.....	85
Figura 58: Nível de água ao longo do Cenário 1 nas diferentes regiões da laguna.....	86
Figura 59: Campo da diferença de nível médio - C1.....	88
Figura 60: Nível de água ao longo do Cenário 2 nas diferentes regiões da laguna.....	88
Figura 61: Campo da diferença de nível médio - C2.....	90
Figura 62: Nível de água ao longo do Cenário 3 nas diferentes regiões da laguna.....	90
Figura 63: Campo da diferença de nível médio – C3.....	92
Figura 64: Nível de água ao longo do Cenário 4 nas diferentes regiões da laguna.....	93
Figura 65: Campo da diferença de nível médio – C4.....	94
Figura 66: Nível de água ao longo do Cenário 5 nas diferentes regiões da laguna.....	95
Figura 67: Campo da diferença de nível médio – C5.....	96
Figura 68: Campo de intensidade da velocidade média de todo o período de simulação.....	97
Figura 69: Circulação residual do período total simulado na laguna sul.....	98
Figura 70: Circulação residual do período total simulado na laguna central... ..	98
Figura 71: Circulação residual do período total simulado na laguna norte.....	99
Figura 72: Circulação residual do período total simulado no canal e na área externa à laguna.....	99
Figura 73: Campo da razão da velocidade média – C1.....	100
Figura 74: Circulação média na laguna sul – C1.....	101
Figura 75: Circulação média na laguna central – C1.....	101
Figura 76: Circulação média na laguna norte – C1.....	102
Figura 77: Campo da razão da velocidade média – C2.....	103
Figura 78: Circulação média na laguna sul – C2.....	104
Figura 79: Circulação média na laguna central – C2.....	105
Figura 80: Circulação média na laguna norte – C2.....	105
Figura 81: Campo da razão da velocidade média – C3.....	106
Figura 82: Circulação média na laguna sul – C3.....	106
Figura 83: Circulação média na laguna central – C3.....	107
Figura 84: Circulação média na laguna norte – C3.....	107

Figura 85: Campo da razão da velocidade média – C4.....	108
Figura 86: Circulação média na laguna sul – C4.	109
Figura 87: Circulação média na laguna central – C4.	109
Figura 88: Circulação média na laguna norte – C4.....	109
Figura 89: Campo da razão da velocidade média – C5.....	110
Figura 90: Circulação média na laguna sul – C5.	111
Figura 91: Circulação média na laguna central – C5.	111
Figura 92: Circulação média na laguna norte – C5.....	112
Figura 93: Campo de salinidade média do período de simulação.....	113
Figura 94: Campo da diferença de salinidade média – C1.....	114
Figura 95: Campo da diferença de salinidade média – C2.....	115
Figura 96: Campo da diferença de salinidade média – C3.....	116
Figura 97: Campo da diferença de salinidade média – C4.....	117
Figura 98: Campo da diferença de salinidade média – C5.....	118
Figura 99: Campo de E. coli médio do período de simulação.	119
Figura 100: Campo da razão de E. coli média – C1.....	121
Figura 101: Campo da razão de E. coli média – C2.....	121
Figura 102: Campo da razão de E. coli média – C3.....	122
Figura 103: Campo da razão de E. coli média – C4.....	123
Figura 104: Campo da razão de E. coli média – C5.....	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Climatologia de Florianópolis.....	25
Tabela 2: Percentual das classes de uso e ocupação do solo em 2001 e 2010.	28
Tabela 3: Área urbana dos bairros em 2001 e 2010.....	29
Tabela 4: Área urbana das sub-bacias da Lagoa da Conceição em 2001 e 2010.	30
Tabela 5: População por bairros em 2001 e 2010.	32
Tabela 6: Salinidade média da Lagoa da Conceição (PSU).....	35
Tabela 7: Descrição dos períodos simulados	43
Tabela 8: Descrição dos cenários ambientais do período de simulação.....	44
Tabela 9: Dados utilizados	47
Tabela 10: Valores de rugosidade absoluta.....	49
Tabela 11: Relação entre as sub-bacias e as bacias perenes definidas por Odreski (2012).	55
Tabela 12: População na baixa e na alta temporada em 2010 nas sub-bacias (SB).....	64
Tabela 13: Percentual de amostras impróprias e com concentração máxima detectável nos períodos de alta e baixa temporada de 2002 a 2010.	65
Tabela 14: Vazão de esgoto imposta no modelo.....	70
Tabela 15: Erro Quadrático Médio (EQM) das simulações de qualidade da água.....	77
Tabela 16: Concentrações de E. coli inseridas no modelo.....	78
Tabela 17: Média das forçantes dos cenários ambientais impostos no modelo.	82
Tabela 18: Síntese dos resultados.	124

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

BH – Bacia Hidrográfica

FATMA – Fundação do Meio Ambiente

FEMAR – Fundação dos Estudos do Mar

GPS – Global Positioning System

IPUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis

JG – João Gualberto

LaHiMaR – Laboratório de Hidráulica Marítima

MARETEC - Marine Environment & Technology Center

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

E. coli. – *Escherichia coli*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1	LAGUNA COSTEIRA	7
3.2	COMPONENTES AMBIENTAIS E ANTRÓPICAS	7
3.2.1	<i>Morfologia das lagunas</i>	7
3.2.2	<i>Características batimétricas</i>	8
3.2.3	<i>Características sedimentológicas</i>	9
3.2.4	<i>Maré 10</i>	
3.2.5	<i>Vento</i>	12
3.2.6	<i>Aportes fluviais</i>	13
3.2.7	<i>Densidade</i>	16
3.2.8	<i>Qualidade da água e a contribuição antrópica de efluentes domésticos</i> 18	
3.3	MODELAGEM	21
4	ÁREA DE ESTUDO	24
4.1	CLIMA	25
4.2	HIDROGRAFIA	25
4.3	BAIRROS	26
4.4	USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	27
4.5	POPULAÇÃO	32
4.6	BATIMETRIA	33
4.7	SALINIDADE E TEMPERATURA DAS ÁGUAS	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS	36
5.1	SISTEMA DE MODELAGEM HIDRODINÂMICA MOHID	37
5.1.1	<i>Módulo Bathymetry</i>	37
5.1.2	<i>Módulo Geometry</i>	37
5.1.3	<i>Modelo Hidrodinâmico</i>	38
5.1.4	<i>Modelo euleriano de qualidade da água</i>	42
5.2	DESCRIÇÃO DOS PERÍODOS SIMULADOS	43
5.2.1	<i>Calibração</i>	43
5.2.2	<i>Simulação Final</i>	44
5.3	DADOS UTILIZADOS	47
5.3.1	<i>Contorno da laguna e linha de costa</i>	48
5.3.2	<i>Grade batimétrica</i>	48

5.3.3	<i>Campo de Rugosidade</i>	49
5.3.4	<i>Maré</i> 50	
5.3.5	<i>Vento</i>	51
5.3.6	<i>Salinidade e temperatura</i>	53
5.3.7	<i>Vazões fluviais</i>	54
5.3.8	<i>Balneabilidade</i>	56
5.3.9	<i>Vazões de efluentes sanitários</i>	58
5.3.10	<i>Radiação solar</i>	60
5.3.11	<i>Condições iniciais das simulações</i>	61
5.3.12	<i>Nível interno na laguna</i>	62
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
6.1	APORTE DE EFLUENTES SANITÁRIOS POR SUB-BACIA	64
6.1.1	<i>População por sub-bacia</i>	64
6.1.2	<i>Monitoramento de balneabilidade</i>	65
6.1.3	<i>Relação entre a população por sub-bacia e a balneabilidade</i>	67
6.1.4	<i>Pontos de lançamento de esgoto inseridos no modelo</i>	70
6.2	MODELAGEM	71
6.2.1	<i>Calibração dos níveis</i>	71
6.2.2	<i>Calibração das concentrações de entrada de E. coli</i>	74
6.2.3	<i>Aquecimento</i>	78
6.2.4	<i>Resultados</i>	81
7	CONCLUSÕES	124
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	129

1 INTRODUÇÃO

Os estuários, além da importância ambiental, possuem grande significado social, sendo relevantes na história do desenvolvimento humano devido a sua riqueza biológica e ao seu potencial econômico. Historicamente uma das funções primárias dos estuários é a dispersão dos poluentes devido a sua capacidade natural de renovação periódica de águas sob a influência das ações oceânicas.

A Lagoa da Conceição, localizada na porção centro-leste da Ilha de Santa Catarina, é um ambiente estuarino e é definida como uma laguna costeira, cuja ligação com o mar é garantida por apenas um canal, o Canal da Barra. A Lagoa da Conceição pode ser considerada um recurso natural de usos múltiplos, como pesca, turismo, navegação, atividades esportivas ou mesmo como corpo receptor da carga poluidora incidente, conferindo grande importância econômica e ambiental à região. Possui ainda relevância social por estar intimamente ligada com a história e com o desenvolvimento regional, além de possuir uma forte identificação com a comunidade local.

A ocupação humana na região da Lagoa da Conceição nos últimos anos foi gradativa e bastante expressiva, o que aumenta a pressão antrópica sobre o corpo de água e regiões adjacentes. E em decorrência da ocupação humana desordenada no local e a falta de infraestrutura tem impactado a qualidade de água deste corpo hídrico. Como consequência dos impactos ambientais sofridos, a balneabilidade e a pesca estão comprometidas em várias porções do corpo da laguna.

O equilíbrio hidrodinâmico e a qualidade da água estão diretamente ligados à capacidade de renovação das águas e ao aporte de material orgânico no corpo de água. Segundo Miranda *et al.* (2002) a renovação das águas de um estuário, e a sua capacidade de depuração dependem de uma série de processos de natureza física, química, biológica e geológica, os quais, por sua vez, interagem entre si de forma bastante complexa. Estudos interdisciplinares sobre tais processos e sua implicação na qualidade da água ainda são muito incipientes nesta região e necessitam de maior investigação. Os processos que afetam a distribuição e a variabilidade de propriedades físicas, a concentração de substâncias naturais (salinidade, nutrientes dissolvidos e sedimentos em suspensão) e dos organismos biológicos, bem como a concentração de poluentes, devem ser estudados em pesquisas interdisciplinares, abrangendo o estuário como um todo e envolvendo as variáveis

ambientais que afetam as características hidrodinâmicas e de qualidade da água.

Nesse contexto, o Laboratório de Hidráulica Marítima (LaHiMar) vem desenvolvendo estudos na Lagoa da Conceição desde 2005, com a finalidade de compreender a circulação e dispersão deste corpo lagunar, como descritos a seguir.

O estudo realizado por Koefender (2005) avaliou a influência da batimetria sobre a hidrodinâmica utilizando dados levantados em períodos distintos. Lino (2005) estudou a influência relativa das componentes astronômica e meteorológica da maré sobre a hidrodinâmica da laguna e constatou a maior relevância das variações do nível em períodos maiores de um dia. Além disso, o mesmo autor concluiu que a hidrodinâmica da laguna é pouco sensível à distribuição espacial da resistência do fundo.

Em 2005, deu-se início a operação de uma estação meteorológica na Barra da Lagoa e a partir de 2006 foram realizadas medições de nível e corrente na laguna. Estas campanhas possibilitaram que Rocha (2007) realizasse a calibração de um modelo 2DH hidrodinâmico.

Com o objetivo de caracterizar a bacia hidrográfica que circunda a laguna alguns estudos foram realizados: Godoy (2007) elaborou um mapa temático identificando os diferentes tipos de uso e cobertura do solo; Odreski (2007) avaliou as alterações da cobertura do solo entre 1998 e 2004 e detectou um crescimento no espaço urbano de 15% neste período; e Bauer (2007) apresentou as características geomorfológicas da bacia hidrográfica e o detalhamento das suas sub-bacias.

Posteriormente alguns estudos de circulação da laguna consideraram a componente hidrológica (vazão) em seus estudos além da componente oceanográfica. Godoy (2009) estudou a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição incluindo a componente hidrológica. O objetivo do trabalho de Godoy (2009) foi avaliar o amortecimento da onda de maré no Canal da Barra em função de diferentes cenários de vazões do rio João Gualberto. Silva (2010) avaliou a influência deste mesmo rio sobre a variação do nível, o padrão de correntes e o fluxo no interior do corpo lagunar. Odreski (2012) estudou a influência do rio João Gualberto e as demais sub-bacias consideradas perenes sobre a hidrodinâmica. Os três últimos trabalhos citados acima apontaram a relevância dos aportes fluviais sobre a hidrodinâmica da Lagoa da Conceição.

No entanto, nenhum dos estudos citados acima analisou os aspectos qualitativos da contribuição da bacia hidrográfica e suas

implicações sobre os padrões de qualidade da água da Lagoa da Conceição. O presente trabalho avaliou a influência da componente hidrológica e antrópica sobre a hidrodinâmica e a qualidade da água no interior da Lagoa da Conceição. Para isso, foram analisadas as vazões naturais dos rios e as vazões dos efluentes de origem antrópica, além de outras variáveis ambientais, como batimetria, sedimento, variação de nível maregráfico, vento, salinidade, temperatura e radiação solar.

A falta de um sistema de coleta e tratamento de esgoto doméstico eficiente na região resulta no lançamento de efluentes sanitários no corpo hídrico. Esses efluentes domésticos são gerados pela ocupação urbana presente nas sub-bacias da região e chegam até o corpo hídrico de forma pontual e difusa.

No que se refere à qualidade da água, o presente estudo avaliou a balneabilidade da Lagoa da Conceição a partir do lançamento de efluentes domésticos na laguna. A análise de balneabilidade se deu através da estimativa de aporte de *Escherichia coli* lançados no corpo hídrico e a concentração desta bactéria no interior da laguna em diferentes condições ambientais e hidrodinâmicas. Dentre o grupo de coliformes fecais, a bactéria *E. coli* é o organismo mais comumente utilizado como indicadores de contaminação fecal e por isso foi o organismo avaliado neste estudo.

As análises hidrodinâmicas e de qualidade da água foram realizadas através modelagem. A utilização de ferramentas de modelagem vem sendo usada de forma crescente na descrição detalhada do escoamento em corpos d'água e dispersão de poluentes, pois além de facilitar a compreensão dos corpos d'água, possibilita avaliar a sensibilidade do ambiente de estudo em cenários hipotéticos e reais.

O modelo utilizado no presente estudo foi o MOHID, modelo gratuito e de código aberto desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Tecnologias Marinhas e Ambientais (MARETEC), pertencente à Universidade Federal de Lisboa, Portugal. O sistema MOHID Water vem sendo aplicado em zonas costeiras e em ambientes estuarinos em várias regiões do mundo.

O resultado deste estudo auxilia na compressão hidrodinâmica da Lagoa da Conceição e na sua influência sobre os padrões de balneabilidade em diferentes condições ambientais. Além disso, o presente estudo direcionará o aprofundamento de outros estudos sobre as interações da ocupação humana e a qualidade da água da laguna, visando à determinação das cargas poluentes advindas das sub-bacias.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente estudo foi analisar a influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre a hidrodinâmica e a qualidade da água da Lagoa da Conceição.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar de que forma a contribuição hidrológica e sua variação no tempo modificam o cenário hidrodinâmico;
- Estimar a carga contribuinte de *E. coli* por sub-bacia;
- Avaliar de que forma os efluentes sanitários afetam a balneabilidade da Lagoa da Conceição;
- Avaliar a influência de diferentes condições ambientais sobre os padrões de dispersão e decaimento de *E. coli*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados embasamentos prévios dos principais tópicos discutidos ao longo do presente trabalho.

3.1 Laguna Costeira

Segundo Miranda *et al.* (2002) lagunas costeiras são corpos de água rasos, com profundidade entre 1 à 10 metros, geralmente orientados paralelo a costa e que se comunicam com o mar através de um ou mais canais, podendo ser intermitentes ou perenes.

As lagunas costeiras são ambientes transitórios e nelas ocorrem importantes processos de mistura da água continental e oceânica (Krug e Noernberg, 2005). Os processos de circulação interna nas lagunas e a troca de água com o oceano são aspectos relevantes para o equilíbrio desses ecossistemas (Rocha, 2007) e, além disso, o equilíbrio ecológico está ligado também à pressão urbana da bacia hidrográfica sobre os seus recursos hídricos.

Os processos hidrodinâmicos que regem a dispersão dos poluentes neste ambiente costeiro são afetados pela variação do nível do mar, pela descarga de água doce, pelo gradiente de pressão devido à influência termohalina da salinidade sobre a densidade, pela circulação na plataforma continental e pelo vento agindo diretamente sobre a superfície livre. Essas forçantes variam no espaço e no tempo e atuam simultaneamente sobre o corpo de água (Godoy, 2009).

3.2 Componentes Ambientais e Antrópicas

As principais componentes ambientais que interferem na hidrodinâmica e na qualidade da água nas lagunas costeiras são: a morfologia da laguna; as características batimétricas e sedimentológicas; a maré meteorológica e, em menor intensidade, a maré astronômica; a tensão de cisalhamento do vento; o gradiente de densidade devido à variação de temperatura e salinidade; os aportes fluviais; e os lançamentos de efluentes antrópicos.

3.2.1 Morfologia das lagunas

A morfologia da laguna e do canal que liga a laguna ao mar tem forte influência sobre a hidrodinâmica e a troca de água (Rocha, 2007). Segundo Miranda *et al.* (2002) as lagunas costeiras podem ser

classificadas de acordo com a quantidade de troca de água com o oceano e com a intensidade da ação da maré no seu interior, que estão dinamicamente relacionadas com as condições dos canais e aberturas para o oceano, ficando assim divididas em:

- Lagunas Sufocadas: ambiente costeiro formado por células elípticas, conectado ao mar por somente um canal estreito que funciona como um filtro, atenuando as oscilações de maré dentro da laguna.

- Lagunas Restritas: ambiente costeiro amplo com dois ou mais canais estreitos e a circulação é forçada pela maré bem definida.

- Lagunas vazadas ou abertas: sistema marinho alongado com entradas múltiplas onde as amplitudes de maré são moderadas ou grandes.

De acordo com a classificação estabelecida anteriormente, a Lagoa da Conceição pode ser enquadrada como laguna sufocada, formada por células elípticas, conectada ao mar por somente um canal estreito que funciona como um filtro, atenuando as oscilações de maré dentro da laguna.

Após a construção dos moles do Canal da Barra, Sierra de Ledo *et al.* (1999) verificou que o volume de água que entra durante a preamar contribui com cerca de 4% da taxa de renovação da água da Lagoa.

3.2.2 Características batimétricas

A caracterização batimétrica afeta o escoamento das águas, a circulação residual e a qualidade da água dos estuários (Duarte & Vieira, 1997).

Koefender (2005) realizou análise numérica da influência batimétrica no padrão de circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição comparando levantamentos topobatimétricos de dois períodos diferentes. Em seu trabalho, ele concluiu que as modificações bruscas do perfil batimétrico lagunar são os principais responsáveis nos processos hidrodinâmicos locais, causando perda de energia por atrito e aumento das velocidades de escoamento.

Conforme Porto Filho (1993) cerca de 50% da área e 53,50% do volume encontra-se em profundidades menores que 2 metros. O autor citado acima considera que os movimentos da água que condicionam a dinâmica do fundo na Lagoa da Conceição ocorrem de forma aperiódica e circulam parcial ou totalmente na coluna d'água em função principalmente dos fatores de energia e forma.

Porto Filho (1993) utilizou em seu estudo alguns parâmetros para caracterizar diferentes setores da laguna, como energia, forma e declividade. Com isso obteve a seguinte categorização:

- Área de transporte e erosão: relativa às zonas marginais da laguna com alta turbulência, até as profundidades em torno de 1,36 e 1,50 metros. Nesta região predomina sedimentos grosseiros

- Zona de Talude Superior: corresponde à faixa de profundidade entre 1,36m a 3,20m, onde predomina a acumulação de material. As correntes são geradas pelo vento, marés e entradas de rios e córregos. Esta zona constitui-se uma zona transicional.

- Zona de Talude Inferior: compreende uma faixa de profundidade entre 3,2m e 5,0m, onde são encontrados em grande maioria sedimentos finos. Nessa faixa atuam correntes de fundo, marés e densidade. É considerada também uma zona de transição.

- Zonas de Acumulação: está compreendida em profundidades acima de 5 metros, onde predominam materiais muito finos, depositados por suspensão.

3.2.3 Características sedimentológicas

A distribuição de sedimento de fundo é utilizada na estimativa dos valores de coeficiente de rugosidade absoluta, usado no modelo hidrodinâmico para calcular o atrito de fundo. A definição do valor de rugosidade de fundo é um passo chave na montagem do modelo uma vez que a calibração do modelo é realizada alterando principalmente o valor desse parâmetro.

As diferenças relativas entre os efeitos da distribuição da rugosidade do fundo foi tema de alguns trabalhos no LaHiMar, como Koefender, 2005; Lino, 2005; e Godoy *et al.*, 2009. Com estes estudos realizados até hoje se sabe que a região do canal da barra é a mais sensível quanto ao reflexo da rugosidade de fundo sobre a hidrodinâmica.

Andrade (2001), Godoy (2009), Silva (2010) e Odreski (2012) adotaram para o canal da Barra da Lagoa o valor de amplitude de rugosidade equivalente de 0,04m e os seguintes valores para a distribuição da amplitude da rugosidade equivalente para a região de estudo: areia: $\epsilon = 0,03$ m; areia siltosa: $\epsilon = 0,025$ m; silte arenoso: $\epsilon = 0,02$ m; silte: $\epsilon = 0,015$ m; silte argiloso: $\epsilon = 0,01$ m.

A Figura 1 apresenta o mapa de distribuição do sedimento utilizada pelos estudos citados acima.

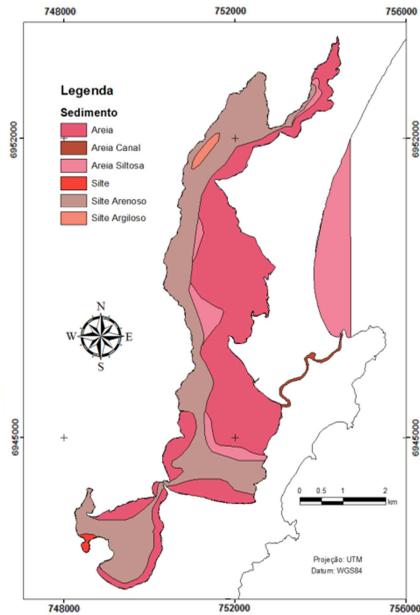


Figura 1: Distribuição do sedimento na Lagoa da Conceição.
 Fonte: Odreski (2012).

Uma vez que os coeficientes de rugosidade são os parâmetros alterados no processo de calibração, os valores apontados acima serão discutidos posteriormente no item 6.2.1.

3.2.4 Maré

Segundo Miranda *et al.* (2002) o nível do mar sofre variações com diferentes escalas de tempo, que podem ser em segundos (ondas geradas pelo vento), horas (ondas geradas pela maré astronômica), dias (ondas geradas pela maré meteorológica), meses (meandros e vórtices das correntes oceânicas), anual (variações sazonais nos processos de interação oceano-atmosfera, nível estérico do mar, ondas geradas pela maré astronômica) e interanual (alterações climáticas geradas por processos globais do tipo El Niño), sendo que todas exercem influência com diferentes intensidades sobre o comportamento hidrodinâmico dos estuários.

Devido ao período de análise deste estudo as variações de maré que realmente são perceptíveis na escala temporal são aquelas que ocorrem ao longo de horas e dias, como maré astronômica de alta e média frequência e maré meteorológica.

As mudanças de maré astronômica em um determinado local são o resultado da mudança de posição do Sol e da Lua em relação à Terra somados aos efeitos da rotação da Terra, da batimetria dos oceanos e dos contornos continentais (Miranda *et al.*, 2002). Podendo ainda ser nomeada como determinística, a maré astronômica está associada aos efeitos astronômicos no nível do mar. A maré meteorológica ou estocástica surge em decorrência de eventos aleatórios, como processos meteorológicos em escala regional.

Estudos anteriores na Lagoa da Conceição apontam que as componentes de maré com maior período predominam em relação às componentes de menor período. Lino (2005) estudou a influência relativa das variações do nível do mar na faixa astronômica e meteorológica sobre a hidrodinâmica da Lagoa. Suas conclusões relatam que as variações de fluxo e elevações de nível no interior da laguna possuem grande influência da maré meteorológica, da qual se sobrepõe a atuação das ações astronômicas do mar.

De acordo com Rocha (2007) o Canal da Barra funciona como um eficiente filtro em frequência para as oscilações do nível d'água do oceano até a Lagoa da Conceição. As componentes com período menor de 36hs (maré astronômica) são sensivelmente mais atenuadas que as com período maior de 36hs (nível meteorológico), havendo uma atenuação de 92% e 31%, respectivamente, fazendo com que na desembocadura interna do Canal da Barra a energia se concentre em 87% na baixa frequência (13% na alta frequência).

O estudo realizado por Godoy (2009) mostrou a predominância da maré meteorológica na desembocadura interna do canal, representada por 98,8% da variância da onda de maré que penetra o canal. Conforme o autor, o nível na desembocadura externa depende exclusivamente do oceano. Godoy (2009) conclui ainda que a atenuação do nível total entre a desembocadura externa e a desembocadura interna foi da ordem de 88 %, compatíveis aos resultados encontrados por Andrade (2001), Pereira (2004) e Rocha (2007).

Para Andrade (2001) as elevações máximas no interior da Lagoa ocorrem com um atraso de aproximadamente 4 horas em relação à preamar na entrada do canal. O mesmo autor ainda observou que o enchimento e o esvaziamento da Lagoa da Conceição ocorrem sem

defasagem significativa entre os níveis em seu interior, ou seja, esta se comporta como um “pistão”, enchendo-se uniformemente durante a entrada de água no canal e esvaziando-se da mesma forma durante a saída.

Godoy (2009) afirma que as porções Norte e Centrais do corpo lagunar não apresentam alterações significativas de níveis, podendo-se observar, porém a filtragem nas oscilações de alta frequência no subsistema Sul. Rocha (2007) analisou os volumes de troca e o tempo de residência na laguna e concluiu que as oscilações de níveis ocorrem sem diferença de amplitude significativa ao longo de toda a Lagoa da Conceição. O pequeno canal de acesso a Lagoa de Baixo não é capaz de influenciar em mudanças na amplitude de variação do nível nesse compartimento e mesmo variações significativas na seção desse canal não influenciam na capacidade de troca d'água desse subsistema. A combinação dos efeitos de filtragem das altas frequências pelo Canal da Barra e curto comprimento do canal pode ocasionar esse padrão.

3.2.5 *Vento*

A ação do vento gera uma tensão na superfície da água (Duarte & Vieira, 1997). O vento é uma forçante que promove a aeração e a mistura das massas de água estuarinas e costeiras, principalmente na entrada dos sistemas abrigados da influência local. Esta forçante também gera ondas e correntes nos estuários com grande área superficial, intensificando a mistura vertical.

O reflexo do vento sobre a hidrodinâmica do estuário depende das características morfológicas do estuário. Segundo Duarte & Vieira (1997) estuários largos e pouco profundos o vento pode gerar correntes com intensidades significativas, condicionadas por diversos fatores, como força do vento e variação da velocidade do vento.

Conforme Porto Filho (1993) no Canal da Barra, onde os ventos parecem não ter influência sobre a hidrodinâmica, a velocidade de escoamento é gerada quase que em sua totalidade pelas variações do nível oceânico, sendo uma importante peça na identificação das principais forçantes que interferem no escoamento da massa de água na Lagoa da Conceição.

Andrade (2001) verificou em seu estudo a grande influência dos ventos sobre os padrões de circulação da Lagoa da Conceição. Esta influência foi mais evidente nos compartimentos Norte e Sul, onde a maré tem uma contribuição menor.

3.2.6 Aportes fluviais

A bacia de drenagem é a origem do sistema de rios que abastece o estuário com água fluvial, sedimentos, substâncias orgânicas, inorgânicas e poluentes. A quantidade e qualidade da água recebida pela bacia dependem das condições climáticas, das características do solo, da cobertura vegetal, das ocupações urbanas, agrícolas e industriais na região.

O balanço entre precipitação, descarga fluvial e evapotranspiração na bacia de drenagem é sempre positiva, isto é, a soma entre as fontes de água (precipitação e descarga fluvial) é sempre maior que a evapotranspiração (Miranda *et al.*, 2002). Condições de equilíbrio entre a entrada de água doce na cabeceira e a saída dessa água na região costeira, em geral, são mantidas em condições meteorológicas normais. Assim, os volumes médios de massa de água transportados no estuário, durante vários ciclos de maré, são praticamente iguais. Os fenômenos de evapotranspiração, precipitação e percolação no próprio estuário tem uma contribuição pequena para o balanço de água doce no sistema (Miranda *et al.*, 2002).

A descarga fluvial e os gradientes longitudinais de salinidade gerados pela diluição da água do mar são fundamentais para a dinâmica do estuário e, em consequência, para os processos de transporte e mistura que ocorrem no seu interior. Além disso, a descarga fluvial é considerada uma variável na abordagem física do estuário e sua determinação é do domínio da hidrologia. Porém, em geral, sua determinação é realizada com a finalidade de compreender algumas questões específicas das bacias hidrográficas de interiores e não especificamente para pesquisas estuarinas, como é o caso do presente estudo. No entanto, alguns estudos hidrodinâmicos em estuários consideram esta forçante.

Vaz *et al* (2009) analisou o comportamento hidrodinâmico no Canal do Espinheiro, Portugal, utilizando o modelo MOHID e considerando além da forçante maregráfica a componente hidrológica. Neste estudo foram simulados 4 períodos distintos, onde a influência da maré e as descargas de água doce apresentaram grande variabilidade, com condições de níveis baixo, médio e alto do rio.

Kenov *et al* (2012) avaliou o tempo de residência das águas no interior do estuário Mondego em Portugal utilizando o modelo MOHID. Neste estudo foi avaliado a influência da componente hidrológica sobre o tempo de residência das águas dentro do estuário. Os resultados

mostraram que o principal fator atuante nos processos de renovação das águas é a vazão do rio no interior do estuário.

O estudo desenvolvido por Fossati *et al* (2012) teve como objetivo analisar os processos de circulação hidrodinâmica no estuarino do Rio de La Plata e na zona costeira de Montevidéu, Uruguai, utilizando o modelo MOHID. O modelo foi calibrado e validado considerando as forçantes maregráficas, as descargas de água doce da bacia hidrográfica e a atuação do vento. Os resultados apontaram que a hidrodinâmica residual do Rio de La Plata é dominada pela vazão fluvial e pela componente maregráfica.

Os estudos realizados por Rocha (2007), Godoy (2009), Silva (2010) e Odreski (2012) apontam a relevância dos aportes fluviais sobre a hidrodinâmica e, conseqüentemente sobre a dispersão de poluentes na Lagoa da Conceição.

Rocha (2007) evidenciou a importância do rio João Gualberto, principal afluente da bacia hidrográfica, sobre a hidrodinâmica e sobre a qualidade das águas. Segundo Godoy (2009) os níveis de água na laguna variam em função do aporte de água doce do rio João Gualberto, principal afluente da bacia hidrográfica. O autor estudou três diferentes cenários, o primeiro deles com vazão fluvial nula, o segundo com vazão fluvial média (constante) e com vazão variável em função do regime pluviométrico.

Assim como feito por Godoy (2009), Silva (2010) também analisou os mesmos três cenários (Vazão Nula, Vazão Constante e Vazão Variável) para avaliar a influência do Rio João Gualberto sobre a hidrodinâmica residual da Lagoa da Conceição. As simulações forçadas somente com o nível externo, avaliadas por Silva (2010), mostraram vórtices de circulação na região central da laguna, como mostra a Figura 2 e a Figura 3. Com a inserção de vazão constante do Rio João Gualberto no modelo, o nível de água se elevou em 3 cm no período simulado. Segundo o estudo de Silva (2010), a circulação residual é bastante modificada com a inclusão da vazão constante, invertendo o sentido da corrente na porção norte da laguna e anulando os dois vórtices que se formam na região central sem a presença da vazão fluvial no modelo. A única região que não teve alteração na hidrodinâmica com a inclusão da vazão do Rio João Gualberto foi a parte sul da laguna. Esta resposta deve-se a distância da parte sul à foz do rio João Gualberto e principalmente pelo fato desta região estar separada do resto do sistema pela presença do Canal das Rendeiras.

O cenário de Vazão Variável analisado por Silva (2010) apresentou acréscimo de aproximadamente 8 cm nos níveis máximos. Segundo o estudo o campo de velocidade média com Vazão Variável foi bastante semelhante àquele obtido no cenário de Vazão Constante. No entanto, este o último cenário citado alterou significativamente as intensidades de velocidades máximas entre o canal da barra e a extremidade norte da laguna, onde se localiza o rio João Gualberto.

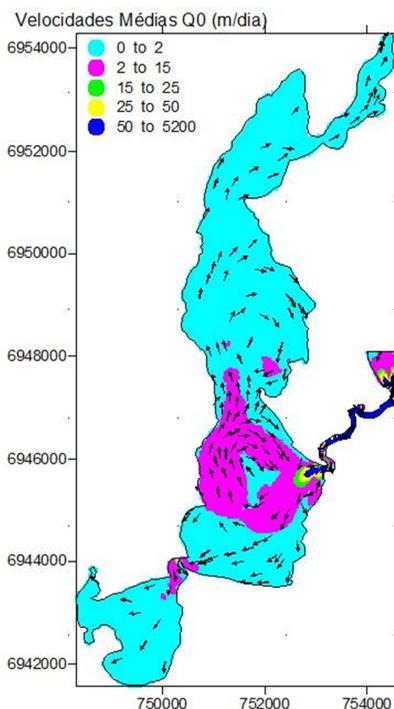


Figura 2: Campo de velocidades médias sem descarga hídrica.
Fonte: Silva (2010).

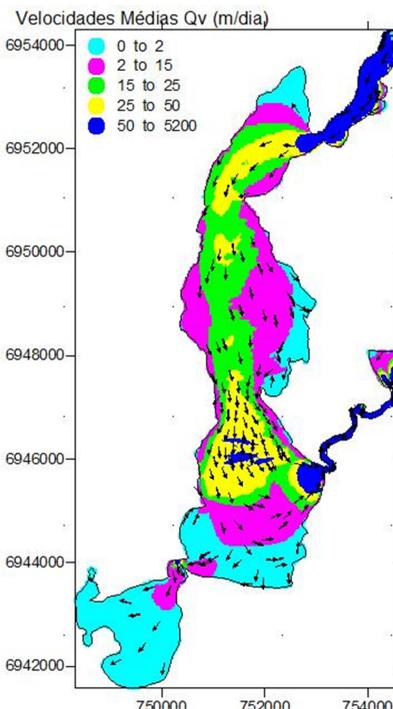


Figura 3: Campo de velocidades médias com descarga do João Gualberto.
Fonte: Silva (2010).

Os trabalhos realizados por Rocha (2007), Godoy (2009) e Silva (2010) avaliaram as componentes hidrológicas e sua influência hidrodinâmica somente a partir da vazão da principal sub-bacia, o Rio João Gualberto. Já o estudo realizado por Odreski (2012) avaliou a influência da vazão da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição

através da contribuição de todas as sub-bacias com rios considerados como perenes.

Odreski (2012) comparou dois cenários distintos de vazão fluvial e sua influência na hidrodinâmica da laguna. O primeiro cenário analisou a hidrodinâmica somente a partir da inclusão de vazão do rio João Gualberto e o segundo deles considerando todas as vazões das sub-bacias com rios classificados como perenes pelo autor. A conclusão do estudo foi que o rio João Gualberto é mesmo a principal descarga de água doce na laguna e é esta forçante que determina o sentido de fluxo principal de água na região norte e centro norte da laguna. No entanto, já na Lagoa de Baixo, o agente hidrológico principal é a descarga a oeste do corpo sul que, somado com outras vazões, consegue superar a força maregráfica.

Assim como evidenciado por Silva (2010), Odreski (2012) também concluiu que os níveis médios apresentam uma uniformidade dentro da laguna. Observou-se que as alterações na cota de água da Lagoa acontecem de maneira simultânea e que o aumento da vazão fluvial se distribui uniformemente no estuário, com leve desvio na Lagoa de Baixo devido ao canal estrangulado que troca suas águas com o corpo central. As sobre-elevações, devido às vazões das bacias perenes, aumenta em quase 2 centímetros o nível no corpo sul e 1 centímetro no corpo central (Odreski, 2012).

Odreski (2012) concluiu ainda que a componente hidrológica afeta diretamente os processos de circulação hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição. Em virtude do exposto acima, os estudos hidrodinâmicos e de dispersão de efluentes na Lagoa da Conceição devem considerar as vazões fluviais e suas variações no tempo.

3.2.7 *Densidade*

A densidade da água é determinada pela temperatura, salinidade e a pressão a que ela está sujeita (Duarte & Vieira, 1997). A mistura de água doce, proveniente dos rios, com a água salgada do mar gera gradientes de densidade que induzem uma circulação adicional típica desses ambientes, denominada circulação estuarina (Rosman, 2001).

O modelo hidrodinâmico utilizado calcula as variações de densidade ao longo do tempo e do espaço à medida que suas variáveis vão oscilando (temperatura e salinidade). Desta forma o gradiente de densidade tem reflexos da determinação da circulação das águas.

Em se tratando de águas oceânicas, umas das principais propriedades físicas é a salinidade. “A salinidade da água oceânica é essencialmente a medida de sais dissolvidos em um quilograma de água” (Pond *et al.*,1995).

Assad *et al* (2009) menciona que a salinidade da água tem uma correlação diretamente proporcional a densidade da água e sua distribuição horizontal é altamente dependente dos processos de precipitação e evaporação. Outro fator de fundamental importância na concentração salina da água, destacando os estuários e zonas costeiras, é o aporte de água doce, do qual faz decrescer seus níveis. Quanto sua variabilidade vertical, pode-se observar em ambientes estuarinos águas fluviais menos densas na superfície e águas salinas mais densas no fundo.

Apesar de alguns trabalhos com modelos numéricos terem estudado o comportamento hidrodinâmico na laguna, apenas o estudo realizado por Odreski (2012) considerou as variações de densidade na laguna até o momento.

O trabalho de revisão bibliográfica realizado por Laurenti (2011) compõe séries históricas relativas a dados ambientais da Lagoa da Conceição coletados *in loco*, como dados de salinidade e temperatura da laguna publicados em trabalhos e artigos desde o ano de 1979 até os dias atuais. Esta revisão bibliográfica realizada por Laurenti (2011) permitiu estimar como temperatura média da água da laguna do verão 25°C.

O estudo realizado por Laurenti (2011) permitiu ainda que Odreski (2012) elaborasse um campo de salinidade média, obtidos a partir da média dos dados coletados a partir do ano de 2001 apontados por Laurenti (2011), como mostra a Figura 4. Este campo de salinidade média foi utilizado como condição inicial de salinidade no trabalho de Odreski (2012) e também no presente trabalho.

Para construir o campo de salinidade Odreski (2012) discretizou os resultados obtidos, separando o interior da Lagoa em 4 partes, o canal da barra em 3 setores e a fronteira externa. Dessa forma, o autor fez uma média dos campos de salinidade amostrados nos últimos 11 anos apontados por Laurenti (2011).

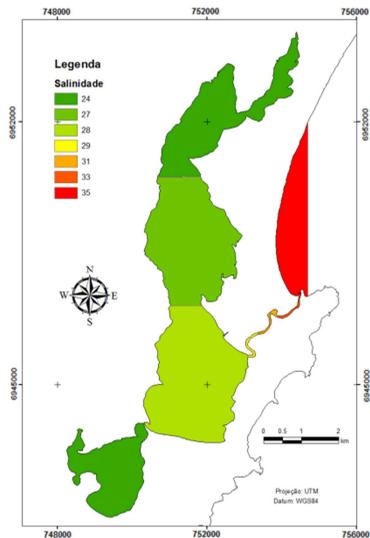


Figura 4: Campos de salinidade média.

Este campo de salinidade média foi utilizado por Odreski (2012) como condição inicial da modelagem. O autor considerou a salinidade das vazões fluviais equivalente a 0 PSU e 35 PSU para as águas oceânicas.

Segundo Odreski (2012) a concentração da salinidade tem grande variabilidade espaço-temporal dentro do estuário, com valores mais próximos a média das águas oceanográficas próximo ao canal, declinando conforme se distancia do mesmo, alcançando seus valores mínimos dentro da laguna, nas proximidades da exutória do João Gualberto.

3.2.8 *Qualidade da água e a contribuição antrópica de efluentes domésticos*

A qualidade da água no interior na laguna está relacionada à contribuição antrópica de contaminantes e ao padrão de circulação das suas águas.

O estudo realizado por Rocha (2007) avaliou a dispersão de contaminantes lançados na laguna através do Rio João Gualberto. Os resultados encontrados por Rocha (2007) apontam que a qualidade da água na região norte da laguna está diretamente relacionada com a

qualidade da água do rio João Gualberto. A inserção do rio contaminado aumentou o nível de contaminação na Lagoa da Conceição em quase 15%, e o rio limpo diminuiu o nível de contaminação em quase 40%. Para o período simulado por Rocha (2007) não houve influência do Rio João Gualberto na porção Sul da laguna.

A carga de efluentes domésticos recebida pela bacia depende das condições características do solo, da cobertura vegetal, das ocupações urbanas, agrícolas e industriais na região. Portanto para analisar a contribuição antrópica de contaminantes que chega à laguna é necessário avaliar a ocupação urbana e sua distribuição ao longo das bacias hidrográficas. Conhecidas as características antrópicas das sub-bacias é possível avaliar a geração de efluente doméstico em cada uma delas e conseqüentemente o seu poder de poluição das águas superficiais.

A partir do final de 2005 os estudos realizados pelo LaHiMar ampliaram-se para a bacia da Lagoa da Conceição, com o objetivo de caracterizar o uso e cobertura das terras na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição e verificar possíveis tendências na caracterização temática. Os trabalhos utilizaram técnicas de geoprocessamento a partir de fotografias aéreas da região referentes ao ano de 2004 (Godoy, 2007) e de 1998 (Odreski, 2007). Foi concluído que o espaço urbano entre 1998 e 2004 sofreu um incremento de aproximadamente 15% de área, tomando regiões onde se verificou a supressão de vegetação que se reduziu cerca de 2% em toda a bacia hidrográfica do estuário.

A ocupação urbana na Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição é predominantemente residencial e comercial, resultando na geração de efluentes apenas com características domésticas, denominadas de efluentes ou esgotos domésticos ou sanitários. Segundo Nuvolari (2003), o esgoto doméstico é constituído de águas servidas, coletadas nas áreas residenciais, comerciais e institucionais.

As características dos efluentes domésticos são bastante variadas em função dos hábitos da população, da situação econômica e social, e das condições climáticas da região. Em geral os esgotos são compostos por 99,9% de água e o restante de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, e microrganismos, como bactérias, fungos, protozoário, vírus e helmintos (Von Sperling, 2005).

A presença de alguns destes microrganismos nos efluentes domésticos podem causar doenças em animais e/ou homes, como: Disenteria bacilar, Enterite, Cólera, Gastroenterite, Leptospirose, Febre paratifoide, Salmonella, Febre tifoide, Hepatite infecciosa, Doenças

respiratórias, Gastroenterite, Meningite, Poliomelite, Disenteria amebiana, Giardíase, Criptosporidiose, Balantidíase, Ascaridíase, Tricuríase (Von Sperling, 2005). Em virtude disso é imprescindível que se conheça as condições sanitárias das águas. A análise de balneabilidade tem por objetivo controlar a qualidade das águas avaliando a presença de indicadores de poluição fecal e o risco potencial de se contrair doenças infecciosas a partir de um contato primário com as águas.

3.2.8.1 Coliformes

As bactérias do grupo coliformes são os organismos mais comumente utilizados como indicadores de contaminação fecal. Isto porque estas bactérias se encontram em grande quantidade nas fezes dos humanos e com grande probabilidade de que sejam detectados após o lançamento nos corpos receptores, pois possuem uma resistência superior à maioria das demais bactérias patogênicas intestinais (Von Sperling, 2005).

Dentre o grupo de coliformes, os coliformes termotolerantes são encontrados em grandes densidades nas fezes de animais de sangue quente, entre eles o homem. No entanto, alguns coliformes termotolerantes podem ocorrer em solos, plantas ou outras matrizes ambientais que não tenham sido contaminados por material fecal.

Dentre os coliformes termotolerantes, o grupo majoritário é representado pela bactéria *Escherichia coli*. Segundo Von Sperling (2005) a *E. coli* é a única bactéria que dá garantia de contaminação exclusivamente fecal, no entanto não é exclusivamente humana, pois está presente também em fezes de outros animais. Feitosa (2007) ressalta ainda que o uso de *E.coli* como indicador de contaminação fecal é pertinente principalmente em águas costeiras tropicais. Por estas razões atualmente a *Escherichia coli* é a bactéria que vem sendo utilizada para detectar a presença de efluentes domésticos em corpos de água naturais e por isso foi utilizada também no presente estudo.

De acordo com Von Sperling (2005), em média, a contribuição *per capita* de *E. coli* pode variar de 10^8 a 10^{11} células/habitante.dia e sua concentração de 10^5 a 10^8 /100ml de esgoto.

Segundo Carvalho (2003) a quantidade e a distribuição de bactérias indicadoras de contaminação fecal no ambiente marinho dependem da advecção e dispersão causadas pela hidrodinâmica, além

de fatores responsáveis pelo decaimento ou crescimento das populações dessas bactérias de origem intestinal.

A sobrevivência dessas bactérias depende de uma combinação de fatores, como salinidade, pH, temperatura, disponibilidade de nutriente, radiação solar e ao estresse de oxidação (Rozen & Belkin, 2001). O estudo realizado por Rozen & Belkin (2001) aponta que a temperatura afeta significativamente a taxa de decaimento. Segundo os autores a temperatura de 27°C é a que mais favorece o crescimento desses microrganismos, no entanto as bactérias demonstraram ser mais resistentes com temperaturas inferiores. Fujioka *et al.* (1981) afirma que a presença de luz solar favorece a taxa de mortalidade das bactérias. O estudo de Troussellier *et al.* (1998) também indicou haver uma relação semelhante de salinidade e taxa de decaimento de bactérias,

Caso a combinação desses fatores ambientais seja desfavorável à manutenção da vida dessas bactérias, sua população decai com o tempo de maneira bastante expressiva. O parâmetro mais usado para avaliar esse decaimento é o T90, definido como o tempo necessário para que haja decaimento de 90% das bactérias. Este é o parâmetro utilizado nas simulações do presente estudo para avaliar a taxa de decaimento bacteriano.

3.3 Modelagem

Sistemas ambientais são compostos por diversos processos interdependentes e com diversas componentes ambientais, como descritos anteriormente. Esta complexidade limita a compreensão sobre estes ecossistemas e mesmo considerando somente aspectos físicos do sistema, como a circulação, há grande dificuldade de se descrever detalhadamente o que ocorre.

Segundo Rosman (2001), os modelos numéricos vêm se mostrando uma ferramenta indispensável aos estudos e projetos, à gestão e ao gerenciamento de corpos de águas naturais, pois permitem integrar informações espacialmente distribuídas, obter informações para regiões nas quais não há medições, ajudar na interpretação de medições, propiciar entendimento da dinâmica de processos e prever situações simulando cenários futuros. Sendo assim as ferramentas de modelagem são indispensáveis aos estudos e projetos, a gestão e ao gerenciamento de corpos de água naturais. A modelagem atualmente é uma ferramenta básica na definição de estratégias para o gerenciamento e de desenvolvimento de corpos de água (Rosman, 1989).

O presente estudo utilizou como ferramenta principal o modelo hidrodinâmico MOHID, elaborado pelo Centro de Pesquisas em Tecnologias Marinhas e Ambientais (MARETEC), pertencente à Universidade Federal de Lisboa (Portugal). O software é uma ferramenta gratuita e de código aberto.

Este modelo é capaz de simular o fluxo da massa de água em zonas costeiras, estuários, lagoas, lagunas e oceanos. Além disso, o modelo permite a modelagem integrada para processos físicos e geoquímicos, em escalas distintas em sistemas estuarinos e bacias hidrográficas.

O sistema MOHID Water vem sendo aplicado em zonas costeiras e em ambientes estuarinos em várias regiões do mundo. Seus resultados mostram ser uma ferramenta eficiente para representar o comportamento hidrodinâmico e de diversas propriedades da água. A descrição do modelo é apresentada no item 5.1.

Campuzano *et al* (2010) aplicou o modelo MOHID para estudar o comportamento hidrodinâmico e de qualidade de água na Ilha da Madeira, Portugal. O estudo avaliou diversos parâmetros de qualidade de água, dentre eles *E. coli*. Diversos conjuntos de dados obtidos em campo foram utilizados para calibrar e validar o modelo, como imagens de satélite e campanhas de coleta e análise da qualidade da água. A correlação entre os resultados do modelo e as medições de campo foi satisfatória e o estudo concluiu que o modelo aplicado foi capaz de simular os principais processos hidrodinâmicos e de qualidade da água.

O MOHID foi utilizado também por Pierini *et al* (2012) para analisar as condições sanitárias do estuário que recebe o esgoto com tratamento primário da cidade Bahía Blanca, localizada na província de Buenos Aires, Argentina. O indicador utilizado no estudo para analisar as condições sanitárias foi a *E. coli*. As análises estatísticas dos resultados mostraram que as concentrações de *E. coli* não apresentaram variações espaciais significativas. O modelo de dispersão de contaminação fecal foi calibrado a partir de uma série de dados obtidos em campo com o objetivo de construir uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão. O estudo concluiu que o modelo MOHID simulou corretamente o transporte *E. coli* nas condições implementadas e os resultados corroboraram com as observações medidas em campo.

O estudo realizado por Sampaio (2010) correlaciona os parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos - São Vicente, através de modelagem numérica utilizando os modelos euleriano e lagrangeano do MOHID Water. Este

estudo buscou avaliar o grau e a extensão da contaminação das águas do Sistema Estuarino de Santos-São Vicente por esgotos domésticos e analisar a capacidade de dispersão e diluição de um importante indicador biológico de qualidade da água, a *E. coli*, presente nas águas residuais urbanas de origem doméstica sem tratamento. O modelo MOHID foi capaz de atender aos objetivos do estudo e de representar de forma satisfatória os resultados obtidos em campo. As análises dos resultados das campanhas medidas e simuladas apontaram elevadas concentrações de coliformes termotolerantes devido às descargas de efluentes urbanos sem tratamento no canal de São Vicente, no Largo da Pompeba e no canal de Santos, com maiores concentrações no verão. Os resultados de modelagem demonstraram que a alta concentração de *E. coli* pode estar associada a habitações que não contam com ligação na rede de esgoto. Além disso, a baixa qualidade microbiológica das águas estuarinas, além de ser responsável pela queda da balneabilidade das águas em todo o estuário, também pode, em marés de sizígia, afetar a qualidade das praias da baía de Santos e de São Vicente.

4 ÁREA DE ESTUDO

A Lagoa da Conceição está localizada na região centro-leste da Ilha de Santa Catarina. A bacia hidrográfica em estudo compreende 77,2 km², sendo que 20,7 km² é ocupado pelo corpo d'água, que possui uma forma alongada no sentido norte-sul, medindo 13,4 km de comprimento e largura variável entre 0,15 e 2,5 km. A Figura 5 aponta a localização da área de estudo.

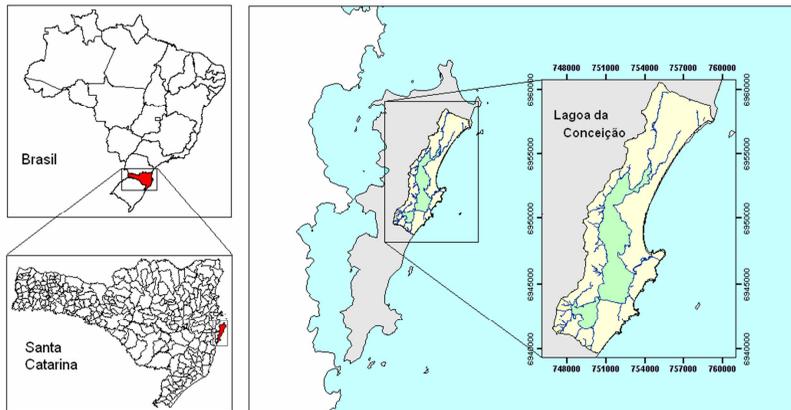


Figura 5: Localização da área de estudo.

Fonte: Silva, 2010.

O corpo lagunar é limitado a oeste por morros, com altitudes entre 400 e 500 metros, e a leste por restingas e por um morro rochoso com altitude de 200 metros. Já ao Sul do espelho d'água encontra-se a maior área de dunas do estado de Santa Catarina.

A laguna é ligada ao mar por um canal longo e estreito que possui aproximadamente 2,8 km de extensão e largura variável entre 20 e 40 metros. Este canal, nomeado de Canal da Barra, tem sua foz em mar aberto, na praia da Barra da Lagoa. Em 1982 o canal foi retificado com a construção dos molhes e com isso a laguna, que anteriormente era intermitente, passou a apresentar comunicação estável com o oceano, regulando o nível da água e a troca de substâncias entre a laguna e o oceano.

4.1 Clima

A região de estudo caracteriza-se pelo predomínio do clima mesotérmico e grande umidade. Além disso, a região apresenta certa uniformidade climática com estações bem definidas.

De acordo a classificação de Köppen, o clima na região é Mesotérmico Úmido de zona intermediária subtropical. A região sul possui elevados índices pluviométricos, com precipitações significativas e bem distribuídas ao longo do ano com oscilação de 172,4 mm e 74,1 mm. A Tabela 1 apresenta as normais climatológicas observadas em Florianópolis.

Tabela 1: Climatologia de Florianópolis.

Mês	Tp Méd °C	Tp. Máx Abs °C	Tp. Mín Abs °C	Prec. Total (mm)	Prec. Máx em 24h (mm)	Dias de Chuva (n°)	Umid Relat. (%)	Vel Vento (m/s)	Dir Vento Pred.
Jan.	24.5	38.2	10	196.7	56.8	14.8	80.9	3.5	N
Fev.	24.6	38.8	14.8	186.7	58.8	14.6	81.5	3.6	N
Mar.	24.1	36.9	10.2	170	52.8	14.2	81.7	3.4	N
Abr.	21.8	35.4	7.7	128.8	40.2	11.2	81.6	3.1	N
Mai.	19.4	33.5	3.3	107.2	46.5	8.9	82.4	2.8	N
Jun.	17.4	32	1.7	85.2	29.5	8.4	83.3	2.9	N
Jul.	16.3	32.7	1.4	82.6	30	8.8	83.1	3.1	N
Ago.	16.8	35	1.3	94.3	32	9.1	82.5	3.6	N
Set.	17.8	32.9	4.9	117.1	37.6	11.6	82.8	3.8	N
Out.	19.4	32.5	7.8	132.4	39.6	12.8	81.4	4.1	N
Nov.	21.2	37.5	9.4	131.8	46.5	12.5	79.6	4.2	N
Dez.	23	38.2	12.5	141.9	46.3	13.1	79.5	4	N
Anos Obs.	90	72	71	90	70	62	90	78	58

Fonte: EPAGRI (2007)

Legenda: Tp = Temperatura; Méd = Média; Máx = Máxima; Mín = Mínima; Abs = absoluta; Prec. = Precipitação; Umid = Umidade; Relat. = Relativa; Vel = Velocidade; Pred. = Predominantes.

4.2 Hidrografia

Através dos dados oficiais disponibilizados pelo IPUF (2010) de topografia e hidrografia, foram delimitadas 60 sub-bacias para que seja determinada então a contribuição de água fluvial de cada uma delas e assim inseri-las no modelo. A resolução espacial dessas informações é de 1 metro, na escala de 1:10.000, Projeção UTM e Datum SAD69.

A Figura 6 apresenta as sub-bacias hidrográficas. Dentre as 60 sub-bacias definidas destacam-se a bacia do rio João Gualberto (BH1)

com 12,52 km² de área, equivalente a 20,67% da área contribuinte, e a do Rio Vermelho (BH2) com 8,7km² de área, equivalente a 14,4% da área de contribuição; ambas na porção norte da laguna, totalizando 35% da área territorial da bacia. As áreas das sub-bacias são apresentadas detalhadamente na Tabela 4.

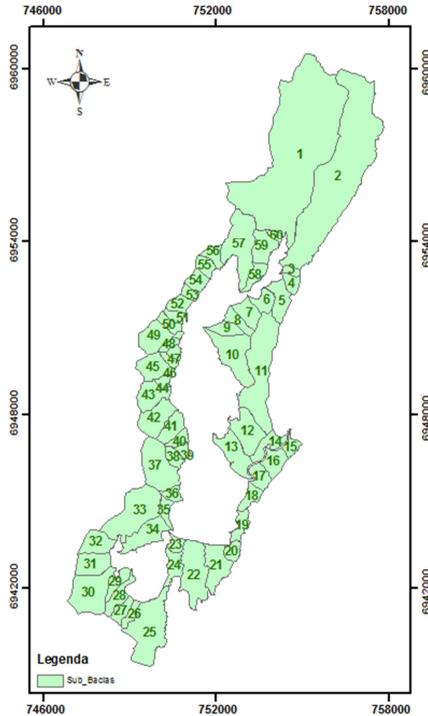


Figura 6: Sub-bacias da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição.

4.3 Bairros

Segundo a classificação de bairros definida pelo IPUF - Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição abrange 19 bairros, como mostra a Figura 7. Entretanto alguns deles não estão totalmente inseridos na bacia hidrográfica de estudo.

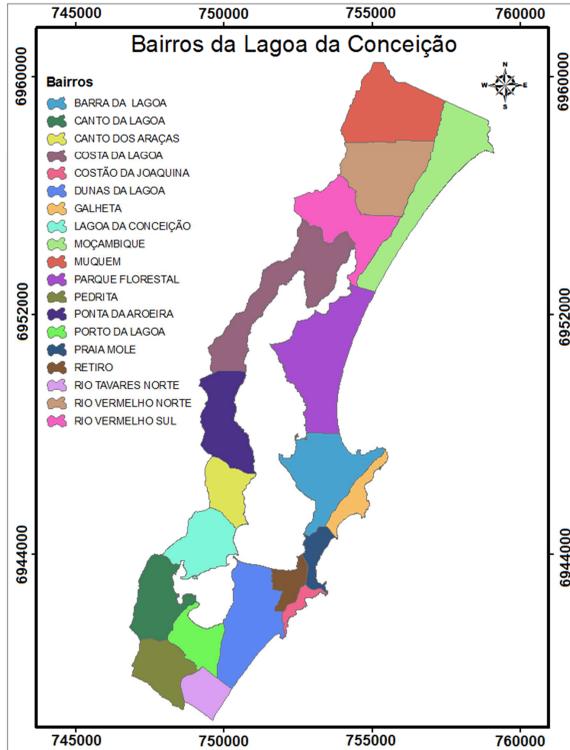


Figura 7: Bairros na região da Lagoa da Conceição.

4.4 Uso e Ocupação do Solo

O LaHiMar estuda a evolução da ocupação humana nesta bacia há alguns anos através da análise de imagens de satélites de diversos anos. O presente trabalho utilizou o mapeamento de uso e ocupação de solo desenvolvido pela equipe de trabalho do LaHiMar a partir de uma imagem de satélite de 2001 e de 2010 (Lemétayer, 2011). O mapeamento do uso e ocupação do solo foi baseada nas imagens de 2001 e 2010 obtidas pelo satélite IKONOS.

O mapeamento de uso e ocupação do solo permitiu calcular o percentual da área urbana na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, tal como mostra a Tabela 2.

Além da área urbana, a área de vegetação arbórea e rasteira também sofreram alteração entre os anos 2001 e 2010. Enquanto que a

área da vegetação arbórea aumentou, a área da vegetação rasteira diminuiu.

Tabela 2: Percentual das classes de uso e ocupação do solo em 2001 e 2010.

Classes	2001		2010	
	Área (km ²)	% da bacia	Área (km ²)	% da bacia
Vegetação Arbórea	31,3	40,5%	33,1	42,8%
Vegetação Rasteira	16,4	21,2%	13,5	17,4%
Corpos d'água	20,7	26,8%	20,7	26,8%
Dunas cobertas	3,5	4,5%	3,5	4,5%
Dunas descobertas	1,0	1,3%	0,9	1,2%
Vias	0,7	1,0%	0,7	1,0%
Urbano	3,6	4,7%	4,8	6,2%
Total	77,2	-	77,2	-

A Figura 8 apresenta as áreas da bacia hidrográfica em 2001 e 2010 em UTM e datum SAD 69, fuso 22S.

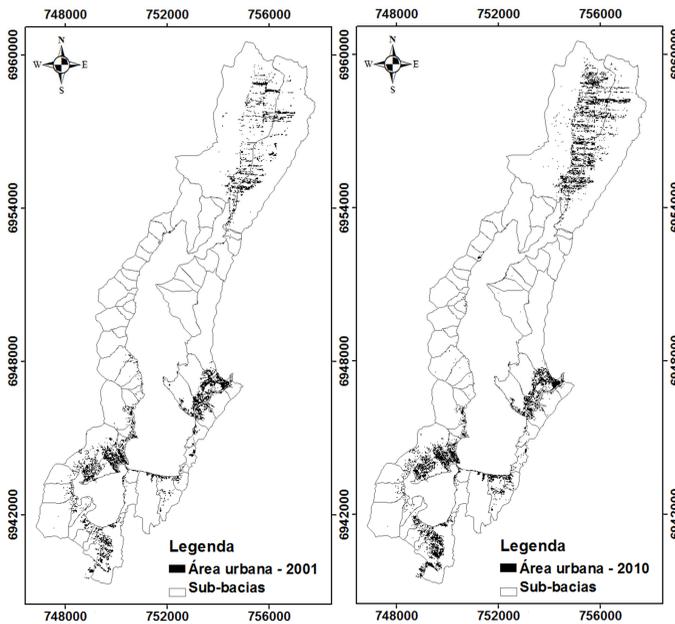


Figura 8: Ocupação urbana em 2001 e em 2010.

A sobreposição das informações de uso e ocupação do solo e a delimitação dos bairros permitiu estimar a área urbana de cada um dos bairros que compõe a bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição, tal como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Área urbana dos bairros em 2001 e 2010.

Distrito	Bairro	Área Urbana 2001 (km²)	% Urbano 2001	Área Urbana 2010 (km²)	% Urbano 2010
São João do Rio Vermelho	Muquem	0.2794	4.5%	0.6953	11.2%
	Rio Vermelho	0.4741	8.0%	0.8873	14.9%
	Rio Vermelho Sul	0.3566	7.3%	0.3927	8.1%
	Moçambique	0.0007	0.0%	0.0005	0.0%
	Parque Florestal	0.0020	0.0%	0.0049	0.1%
Barra da Lagoa	Barra da Lagoa	0.7502	13.8%	0.7447	13.7%
Lagoa da Conceição	Costa da Lagoa	0.0040	0.1%	0.0268	0.4%
	Ponta da Aroeira	0.0379	0.9%	0.0194	0.5%
	Galheta	0.0000	0.0%	0.0000	0.0%
	Canto dos Araçás	0.1306	5.5%	0.0983	4.1%
	Lagoa da Conceição	0.7694	22.1%	0.8564	24.5%
	Praia Molde	0.0283	2.3%	0.0343	3.0%
	Canto da Lagoa	0.0886	2.4%	0.0965	2.6%
	Dunas da Lagoa	0.0967	1.7%	0.1027	1.8%
	Retiro	0.1087	8.8%	0.2144	17.1%
	Costão da Joaquina	0.0000	0.0%	0.0000	0.0%
Campeche	Porto da Lagoa	0.3654	15.4%	0.5009	21.1%
	Pedrita	0.1035	3.5%	0.1324	4.5%
	Rio Tavares Norte	0.0314	1.8%	0.0548	3.1%
Total (Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição)		3,6	4,7%	4,8	6,2%

A partir do resultado do cruzamento das informações acima e a sua sobreposição com a delimitação das sub-bacias pode-se determinar a área urbana de cada sub-bacia. Este processo foi necessário uma vez que os dados populacionais estavam discretizados por bairro, e desta forma pode-se obter, através de proporções de área urbanas, a população por sub-bacia, apresentada no item a seguir. Este processo foi realizado duas vezes, uma para determinar a população por sub-bacia em 2001, a partir do uso e ocupação do solo de 2001, e a população em 2010, a partir do uso e ocupação do solo de 2010.

Além da população fixa foi determinada também a população flutuante. A população total durante a temporada é o somatório da população flutuante com a população fixa. A população flutuante foi definida por Campanário (2007) somente para os distritos e não para os bairros. Logo, tais dados tiveram que ser discretizados primeiramente por bairro e posteriormente por sub-bacia. Este processo foi feito através da relação de população fixa de cada bairro pela população fixa do distrito para os dois períodos 2001 e 2010. Ou seja, admitiu-se que o crescimento da população durante a temporada seja proporcional à população fixa daquele local naquele período.

A Tabela 4 aponta as áreas urbanas das sub-bacias em 2001 e 2010.

Tabela 4: Área urbana das sub-bacias da Lagoa da Conceição em 2001 e 2010.

Sub-bacia	Área Total (km²)	Área Urbana 2001 (km²)	% Urbano 2001	Área Urbana 2010 (km²)	% Urbano 2010
1	12.1059	0.6692	5.53%	1.3353	11.03%
2	8.3028	0.4408	5.31%	0.6399	7.71%
3	0.1725	0.0028	1.63%	0.0016	0.91%
4	0.3073	0.0009	0.29%	0.0003	0.10%
5	0.7441	0.0022	0.30%	0.0013	0.17%
6	0.4568	0.0000	0.00%	0.0001	0.02%
7	0.5964	0.0000	0.00%	0.0001	0.02%
8	0.3689	0.0000	0.00%	0.0004	0.11%
9	0.3966	0.0000	0.00%	0.0014	0.36%
10	1.6288	0.0000	0.00%	0.0012	0.08%
11	3.0328	0.0456	1.50%	0.0531	1.75%
12	1.1663	0.1164	9.98%	0.1047	8.98%
13	1.0595	0.1332	12.57%	0.1258	11.88%
14	0.5543	0.2710	48.89%	0.2452	44.23%
15	0.2774	0.0151	5.43%	0.0170	6.14%
16	0.5958	0.0385	6.46%	0.0310	5.20%
17	0.5016	0.0982	19.58%	0.0922	18.37%
18	0.4073	0.0319	7.84%	0.0149	3.65%
19	0.3989	0.0347	8.71%	0.0278	6.96%
20	0.3271	0.0253	7.74%	0.0572	17.48%
21	1.0627	0.0865	8.14%	0.1577	14.84%
22	1.7271	0.0339	1.97%	0.0340	1.97%
23	0.2415	0.0253	10.50%	0.0282	11.67%
24	0.4749	0.0110	2.32%	0.0115	2.41%

Tabela 4 – Continuação: Área urbana das sub-bacias da Lagoa da Conceição em 2001 e 2010

Sub-bacia	Área Total (km²)	Área Urbana 2001 (km²)	% Urbano 2001	Área Urbana 2010 (km²)	% Urbano 2010
25	2.3701	0.4414	18.62%	0.4598	19.40%
26	0.2611	0.0220	8.42%	0.0376	14.41%
27	0.3742	0.0210	5.62%	0.0264	7.05%
28	0.5225	0.0308	5.89%	0.0481	9.20%
29	0.4078	0.0320	7.85%	0.0139	3.40%
30	1.6773	0.0185	1.10%	0.0127	0.76%
31	0.8247	0.0259	3.14%	0.0213	2.58%
32	0.7332	0.0126	1.71%	0.0166	2.27%
33	2.1598	0.2758	12.77%	0.3184	14.74%
34	0.9974	0.4073	40.83%	0.4207	42.18%
35	0.3050	0.0938	30.77%	0.1172	38.42%
36	0.2585	0.0503	19.44%	0.0316	12.24%
37	1.7078	0.0638	3.74%	0.0469	2.75%
38	0.3267	0.0059	1.80%	0.0023	0.69%
39	0.1820	0.0102	5.62%	0.0013	0.72%
40	0.2769	0.0084	3.04%	0.0011	0.39%
41	0.6018	0.0144	2.39%	0.0022	0.36%
42	1.0243	0.0079	0.77%	0.0047	0.46%
43	0.8138	0.0000	0.00%	0.0004	0.04%
44	0.1753	0.0000	0.00%	0.0005	0.30%
45	0.8122	0.0000	0.00%	0.0003	0.03%
46	0.1764	0.0000	0.00%	0.0001	0.05%
47	0.1829	0.0000	0.00%	0.0063	3.42%
48	0.1859	0.0000	0.00%	0.0023	1.23%
49	0.7980	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%
50	0.3103	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%
51	0.2277	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%
52	0.3688	0.0000	0.00%	0.0003	0.09%
53	0.2174	0.0000	0.00%	0.0082	3.79%
54	0.3973	0.0027	0.68%	0.0010	0.25%
55	0.3568	0.0032	0.90%	0.0004	0.11%
56	0.3272	0.0031	0.96%	0.0002	0.07%
57	1.9673	0.0002	0.01%	0.0002	0.01%
58	0.4078	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%
59	0.7673	0.0000	0.00%	0.0001	0.01%
60	0.1549	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%

4.5 População

O estudo realizado por Campanário (2007) traz uma projeção da população residente por cada bairro de Florianópolis desde 2000 até 2050. Além disso, tal estudo ainda contempla uma estimativa de população flutuante para cada distrito de Florianópolis. A Tabela 5 apresenta a população na baixa e na alta temporada em 2001 e em 2010 segundo Campanário (2007).

Tabela 5: População por bairros em 2001 e 2010.

Distrito	Bairro	População 2001 (hab)	Pop. Total Temporada 2001 (hab)	População 2010 (hab)	Pop. Total Temporada 2010 (hab)
São João do Rio Vermelho	Muquem	1.970	2.737	3.472	4.958
	Rio Ver. Norte	2.172	3.018	3.819	5.454
	Rio Ver. Sul	3.643	5.062	6.665	9.518
	Moçambique	1	1	1	1
	Parque Florestal	1	1	1	1
Barra da Lagoa	Barra da Lagoa	5.689	12.018	7.360	16.590
Lagoa da Conceição	Costa da Lagoa	559	1.074	699	1.397
	Ponta da Aroeira	210	403	285	570
	Galheta	1	2	1	2
	Canto dos Araçás	470	903	603	1.205
	Lagoa da Conceição	6.031	11.585	9.145	18.276
	Praia Molde	165	317	239	478
	Canto da Lagoa	1.184	2.274	1.829	3.655
	Dunas da Lagoa	463	889	633	1.265
	Retiro	1.102	2.117	1.510	3.018
	Costão da Joaquina	1	2	1	2
	Porto da Lagoa	1.471	2.826	2.577	5.150
Campeche	Pedrita	801	1.010	1.194	1.541
	Rio Tavares Norte	1.860	2.345	2.919	3.767
Total		27.794	48.584	42.953	76.848

4.6 Batimetria

O relevo submerso da laguna apresenta um perfil assimétrico devido as diferentes inclinações da margem a oeste e a leste que delimitam o corpo d'água, como pode ser visto na Figura 9. Na margem oeste verificam-se as maiores profundidades, atingindo valores de até 8,7 m. A profundidade média encontrada é de 1,7m, sendo que 44% da área possui profundidade superior a 4,0m e 29%, valores menores que 1,0m.

Sierra de Ledo *et al.* (1999), com base na configuração da laguna propuseram uma subdivisão em três subsistemas, a Lagoa de Cima, a Lagoa do Meio, de onde deriva o Canal da Barra, e a Lagoa de Baixo, sendo esta última isolada das demais devido à presença do canal das Rendeiras entre a Lagoa do Meio e Lagoa de Baixo. A Figura 9 apresenta a divisão proposta por Sierra de Ledo *et al.* (1999) com as seguintes características:

- Lagoa de Cima ou Subsistema Norte: constitui a parte mais rasa da laguna e é nela que há a desembocadura do rio João Gualberto. Está limitada a oeste e noroeste por maciços cristalinos cobertos por matas nativas, e a leste por dunas fixas e reflorestamento com pinheiros.

- Lagoa do Meio ou Subsistema Central: ocupa a maior extensão da laguna e possui um canal intra-lagunar que se estende adjacente e paralelo a sua margem oeste, da qual drenam uma série de pequenos córregos e é feita a conexão com a Lagoa de Cima. Há ainda, nesse subsistema, a comunicação com o mar, através do Canal da Barra.

- Lagoa de Baixo: constitui um corpo semi-fechado com profundidade máxima de 5,5 metros, limitada a leste por campos de dunas e ao sul por maciços cristalinos. Este subsistema recebe os aportes de água da bacia hidrográfica através de quatro pequenos córregos e se comunica com o subsistema central por estreito canal de 3 metros de profundidade.

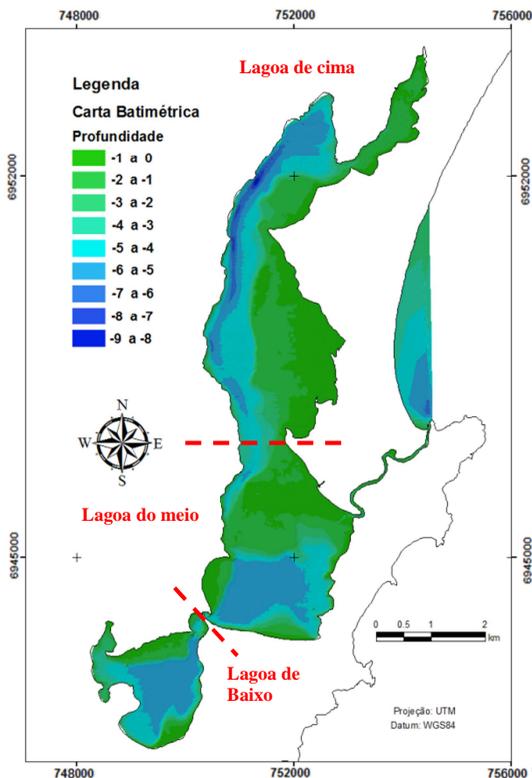


Figura 9: Batimetria da Lagoa da Conceição.

Fonte: Adaptado Odreski (2012).

A Lagoa de cima é estreita e seu fundo é bastante influenciado pela desembocadura do Rio João Gualberto. Próximo ao rio, onde as profundidades são menores, a navegação é bastante difícil. Na margem oeste da Lagoa de Cima encontram-se as maiores profundidades (até 8,7 m), enquanto que na margem leste, por ser uma área deposicional, são observadas profundidades inferiores a 0,50 m.

A Lagoa do Meio apresenta perfis de fundo simétricos com profundidades em torno de 5,0 m. Na margem sul, os sedimentos provenientes das dunas formam um esporão submerso na metade leste.

O mesmo acontece com a Lagoa de Baixo, onde se verifica também um perfil simétrico, com profundidades de até 5,0 m. A margem noroeste é afetada pela formação de bancos de areia, com profundidades em torno de 0,5 m.

4.7 Salinidade e Temperatura das águas

A partir do trabalho de revisão bibliográfica realizado por Laurenti (2011), Oreski (2012) estimou os valores de salinidade média encontrados no verão e no inverno ao longo do corpo lagunar, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Salinidade média da Lagoa da Conceição (PSU)

Região	Verão	Inverno
Lagoa Norte	24,9	27,2
Lagoa Centro-Norte	25,3	28,2
Lagoa Centro-Sul	28,2	30,5
Lagoa Sul	19,2	24,0

A partir do trabalho de Laurenti (2011) foi possível estimar ainda a temperatura média da laguna no verão, correspondente a 25°C.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho aplicou o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água MOHID com o intuito de verificar a influência dos aportes fluviais e antrópicos nos padrões hidrodinâmicos e de qualidade da água da Lagoa da Conceição. O fluxograma da Figura 10 ilustra de maneira simplificada a metodologia aplicada em cada etapa do estudo. Na sequência são apresentadas as descrições do MOHID, principal ferramenta utilizada neste estudo, bem como são apresentadas as descrições das simulações realizadas e dos dados utilizados.

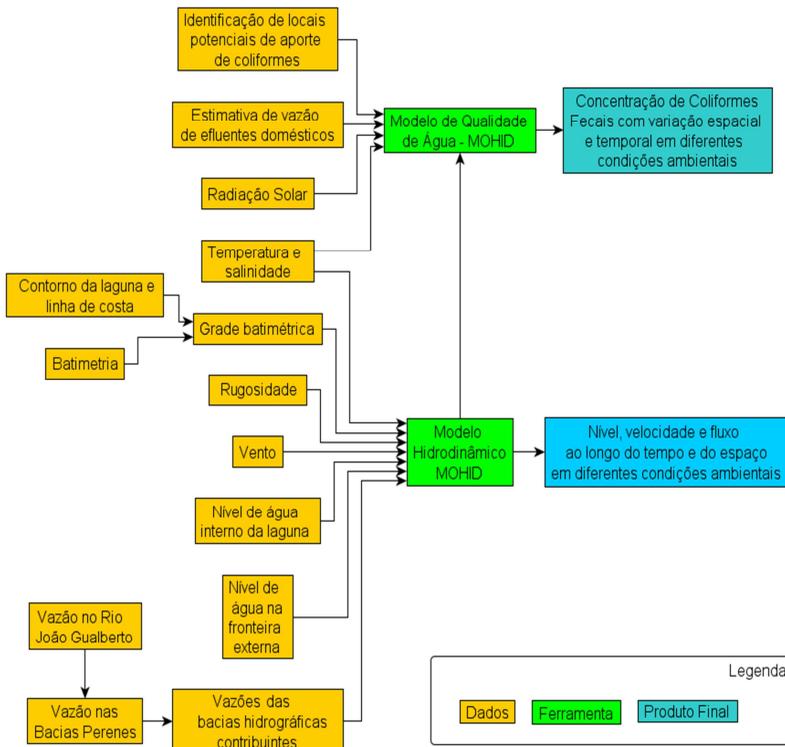


Figura 10: Fluxograma do estudo.

5.1 Sistema de Modelagem Hidrodinâmica MOHID

O presente estudo utilizou como ferramenta principal o modelo hidrodinâmico MOHID. O software é uma ferramenta gratuita e de código aberto.

O MOHID possui 3 ferramentas de simulação: água, terra e solo, que utilizadas de maneira integrada permitem analisar o ciclo da água em uma abordagem integral.

O sistema de modelagem possui 4 grandes categorias de módulos, cada qual com um objetivo específico. Elas estão relacionadas com:

1. Malha computacional de cálculo: destaque para o módulo *Bathymetry*, que carrega os dados de batimetria e os converte em informação matricial;
2. Gerenciamento da entrada e saída de dados numéricos;
3. Condições de fronteira;
4. Variáveis de estado do modelo.

5.1.1 Módulo *Bathymetry*

É um dos módulos iniciais do sistema *MOHID* e sua função é basicamente ler dado de batimetria de um arquivo de entrada ASCII e retransmiti-lo aos outros módulos.

5.1.2 Módulo *Geometry*

Ele calcula as áreas laterais e volumes da grade, baseado na superfície de elevação e no dado batimétrico. A informação é atualizada e retransmitida aos outros módulos.

O modelo MOHID utiliza uma abordagem através de volumes finitos para discretizar as equações governantes e aplica-las a células de controle. O elemento de volume utilizado no modelo MOHID é mostrado na Figura 11.

A grade é cartesiana ortogonal em relação à horizontal. Ela é escalonada na horizontal e as velocidades horizontais estão localizadas no centro das faces oeste e sul, enquanto elevação, magnitudes turbulentas e traçadores são colocados no centro. Também é utilizado um escalonamento em relação à vertical, com velocidade vertical, traçadores e magnitudes verticalmente colocados na parte superior e inferior das faces e velocidades horizontais e elevação no centro do elemento.

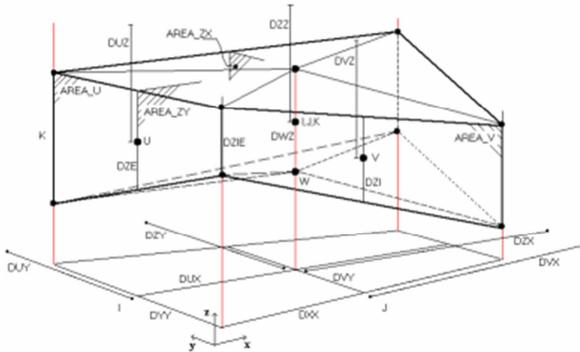


Figura 11: Elemento de volume finito do modelo MOHID Water.

Fonte: (MARETEC, 2012).

5.1.3 Modelo Hidrodinâmico

O módulo hidrodinâmico do sistema MOHID resolve as equações primitivas do movimento no espaço tridimensional. O equilíbrio hidrostático é assumido através das aproximações de Boussinesq e Reynolds. As equações 1 e 2 abaixo descrevem o balanço da quantidade de movimento em coordenadas cartesianas.

$$\begin{aligned} \partial_t u = & -\partial_x(uu) - \partial_y(uv) - \partial_z(uw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \partial_x p \\ & + \partial_x((v_H + \nu) \partial_x u) + \partial_y((v_H + \nu) \partial_y u) + \partial_z((v_t + \nu) \partial_z u) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial_t v = & -\partial_x(vu) - \partial_y(vv) - \partial_z(vw) - fu - \frac{1}{\rho_0} \partial_y p \\ & + \partial_x((v_H + \nu) \partial_x v) + \partial_y((v_H + \nu) \partial_y v) + \partial_z((v_t + \nu) \partial_z v) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde: t é o tempo; u, v, w são as componentes da velocidade; f é o parâmetro de Coriolis; p é a pressão; ρ_0 é a densidade da água; g é a aceleração da gravidade; ν_H e ν_V são as viscosidades cinemáticas turbulenta na horizontal e verticais, respectivamente; ν é a viscosidade cinemática molecular (igual a $1,3 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$).

A evolução temporal da velocidade é o balanço entre o transporte advectivo, força de Coriolis, gradiente de pressão e difusão turbulenta.

A velocidade vertical, w , é calculada pela equação do balanço de massa, equação 3, através da integração entre o fundo e a profundidade z , equação 4.

$$\partial_x u + \partial_y v + \partial_z w = 0 \quad (3)$$

$$w(z) = \partial_x \int_{-h}^z u dx + \partial_y \int_{-h}^z v dy \quad (4)$$

A equação da superfície livre é obtida pela integração da continuidade em toda coluna d'água, entre a elevação da superfície livre $\eta(x,y)$ e fundo $-h$.

$$\partial_t \eta = -\partial_x \int_{-h}^{\eta} u dz - \partial_y \int_{-h}^{\eta} v dz \quad (5)$$

A aproximação hidrostática é obtida através da equação 6, onde g é gravidade e ρ é densidade.

$$\partial_z p + g\rho = 0 \quad (6)$$

As equações são aplicadas a cada volume de controle, onde a velocidade horizontal e vertical são calculadas através da equação da quantidade de movimento e da equação da continuidade, respectivamente.

O módulo Hydrodynamic possui outros módulos integrados que descrevem parâmetros que influenciam na circulação de fluidos, como propriedades da água, atmosfera, interface água e ar, interface água e sedimento e qualidade da água. A seguir, se apresenta uma breve descrição sobre os principais módulos.

a) Módulo WaterProperties

Neste módulo é onde se define as propriedades da água e onde se gerencia a evolução temporal delas ao longo do perfil vertical. Ele está relacionado diretamente com as condições de fronteira, os transportes difusivo e advectivo e com a qualidade da água.

b) Módulo InterfaceSedimentWater

Calcula o fluxo entre a água e o sedimento de contato. Aqui é onde se estabelecem valores de rugosidade de fundo, condição de contorno na superfície de fundo.

c) Módulo Turbulence

Este módulo computa as viscosidades horizontal e vertical, fornecendo para os outros módulos a energia cinética turbulenta e o comprimento de mistura. Para isso, o sistema possibilita a realização dos cálculos através de modelos empíricos, modelos de comprimento de mistura e modelos que resolvem as equações para a energia cinética turbulenta e comprimento de mistura.

d) Módulo Discharges

Módulo onde se impõem descargas de massa ou momento em uma célula ou domínio.

5.1.3.1 *Condição de contorno*

Superfície livre

Todos os fluxos advectivos através da superfície são considerados nulos. O fluxo difusivo do momento através da superfície é imposto explicitamente por meio da tensão do vento na superfície, T_w , apresentada na equação 7.

$$v \frac{\partial v_H}{\partial z} \Big|_{surface} = \vec{\tau} w \quad (7)$$

A tensão do vento é calculada de acordo com a equação 8, onde C_D é o coeficiente de arrasto, que é função da velocidade do vento, ρ é a densidade do ar e W representa a velocidade do vento a uma altura de 10 metros da superfície da água.

$$\vec{\tau} w = C_D \rho_a \vec{W} \Big| \vec{W} \Big|$$

O coeficiente de arrasto C_D é calculado pela seguinte fórmula:

$$V_m = \text{sqrt}(U_{win}(i,j)**2 + V_{win}(i,j)**2) \quad (8)$$

Onde: C_D é 0.0012 para $V_m < 11$; $C_D = (0.00049 + 0.00065 * V_m)$ para $11 \leq V_m \leq 26$; C_D é 0.00218 para $V_m > 26$

Superfície de fundo

Assim como na superfície livre, na superfície de fundo o fluxo de água na superfície de fundo é considerado nulo. Também não há fluxo de salinidade e temperatura na superfície de fundo.

O atrito de fundo pode ser representado por uma função quadrática, equação 9, que depende da velocidade horizontal próxima ao fundo, v , e de C_D é o coeficiente de atrito, calculado pela expressão 10.

$$v \frac{\partial \vec{v}_H}{\partial z} \Big|_{bottom} = C_D \vec{v}_H \left| \vec{v}_H \right| \quad (9)$$

$$C_D = \left(\frac{\kappa}{\log \left(\frac{z + z_0^b}{z_0^b} \right)} \right)^2 \quad (10)$$

Onde, κ é a constante de von Karman e Z_0 é a rugosidade de fundo.

O modelo desta forma possibilita o cálculo do atrito de fundo a partir de valores de rugosidade absoluta.

Contornos laterais

Os limites laterais são delimitados pela terra. Estes são tratados como limites impermeáveis, onde não há fluxo de água e o fluxo difusivo é nulo. As equações abaixo descrevem esta condição.

$$\frac{\partial \vec{v}_H}{\partial \eta} = 0 \quad (11)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0 \quad (12)$$

Contornos abertos

Os limites abertos surgem da necessidade de limitar a região de estudo. Nestes limites são impostos fluxos entre o domínio modelado e a região fora do domínio. Os valores das variáveis nos contornos abertos são introduzidos de modo a garantir que a informação sobre o que está acontecendo fora do domínio entre no domínio, de maneira que a solução desta variável no domínio não seja danificada.

Contornos móveis

Os contornos móveis são fronteiras fechadas que mudam de posição ao longo do tempo. Estando entre as zonas das marés no domínio, alguns pontos podem, alternativamente, ser cobertos ou descobertos pela água, dependendo da elevação das marés. Estes contornos possibilitam representar áreas intertidais em estuários.

5.1.4 Modelo euleriano de qualidade da água

O módulo de propriedades da água especifica os parâmetros que determinam a evolução de diversas propriedades da água utilizando uma abordagem euleriana, incluindo os fluxos advectivos e difusivos, descargas de rios ou fontes antropogênicas, fluxos com o fundo (fluxos de sedimentos) e a superfície (fluxos de calor e de oxigênio) e a sedimentação de material particulado.

Neste estudo o modelo euleriano de qualidade da água foi utilizado para as simulações de densidade e de concentrações de *E. coli* considerando as variações de temperatura e salinidade para as simulações de densidade, e de temperatura, salinidade, radiação solar (fluxo com a superfície) e descargas de rios e fontes antropogênicas para as simulações de *E. coli*. Não estão sendo considerados os fluxos com o fundo e a sedimentação de material particulado nas simulações de coliformes.

O taxa de decaimento da *E. coli* foi estimada através do parâmetro T90 segundo Chapra (1997). Este parâmetro é variável ao longo do tempo por estar associado a variáveis abióticas. Por isso o MOHID utiliza T90 dinâmico, levando em consideração a temperatura, a salinidade e radiação solar, como mostra a equação 12.

$$T90 = 2,303 * K^{-1} \quad (12)$$

Onde K é a taxa de decaimento, que é calculada através da expressão 13.

$$K = [2,533 * 1,04^{(T-20)}] * (1,012^S) * (0,113 * i_z) \quad (13)$$

Onde K é a taxa de decaimento de primeira ordem (dia⁻¹) ou coeficiente de mortalidade, S e T é a salinidade e a temperatura da água e i_z é a radiação solar (W/m²).

5.2 Descrição dos períodos simulados

Para avaliar a influência hidrológica no comportamento hidrodinâmico e da qualidade da água na laguna, foi realizada uma modelagem matemática através do sistema MOHID. Foram simulados dois períodos distintos, tal como mostra a Tabela 7.

Tabela 7: Descrição dos períodos simulados

Período	Calibração	Simulação final
Data inicial	16/08/2012	22/12/2012
Data final	3/10/2012	25/02/2013
Dias de simulação	48	65 x 3 = 195*
Forçantes e condições de contorno	Maré astronômica e campo de rugosidade	Maré, vazão fluvial, vento, radiação, salinidade, temperatura, vazão de efluentes sanitários
Condição Inicial	Campo de nível médio	Campo de nível médio e campo de salinidade média

**Para garantir a estabilidade do modelo de qualidade da água o período de simulação foi triplicado. Ver item 5.2.2.1.*

Os períodos foram escolhidos de acordo com a série de dados medidos em campo. Todos os equipamentos utilizados para as medições de dados contínuos deveriam obrigatoriamente estar medindo concomitante para garantir que a série gerada por cada um deles fosse do mesmo período, o que dificultou a obtenção de longos períodos de dados para simulação.

5.2.1 Calibração

Devido à falta de uma série de dados medidos de maré, a calibração do modelo foi realizada apenas com a imposição de maré astronômica na fronteira aberta, descrita no item 5.3.4.1. A única forçante utilizada no período de calibração foi maré. Vento, vazão e variação de densidade (salinidade e temperatura) não foram impostas no período de calibração.

O período de calibração é de 16/08/2012 à 03/10/2012, totalizando 48 dias, tempo suficiente para realizar o processo de calibração. A condição inicial de nível interno da laguna é apresentada no item 5.3.11.1 *Nível da laguna*. A maré astronômica foi imposta gradativamente a fim de reduzir a instabilidade do modelo, tal como é descrito no item 5.3.11.2 *Maré*.

5.2.2 Simulação Final

O período da simulação foi compreendido entre os dias 22/12/2012 à 25/02/2013, totalizando 65 dias. A Figura 12 mostra a variação temporal no nível maregráfico (maré meteorológica), vazão do Rio João Gualberto, nível da laguna interno medido e precipitação.

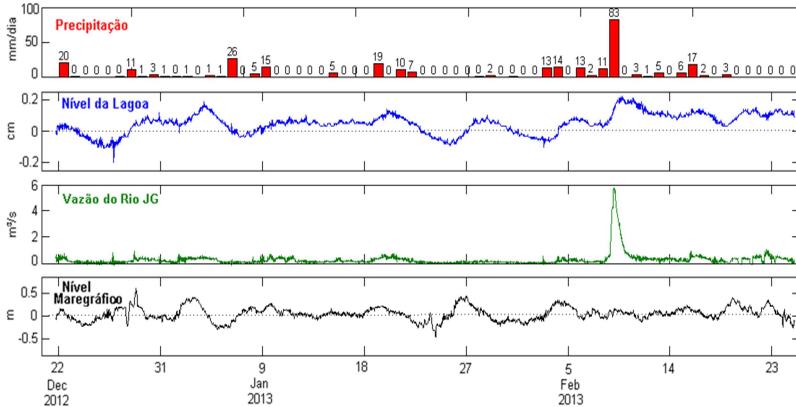


Figura 12: Precipitação, vazão, nível interno e maré meteorológica inseridos no modelo.

Neste período é possível observar diferentes condições ambientais, como mostra a Figura 12. Dentro desse período foram selecionados 5 cenários ambientais com forçantes distintas entre si. Os resultados foram analisados para cada um desses cenários. A Tabela 8 aponta os tempos iniciais e finais e distinção entre as principais forçantes dos cenários.

Tabela 8: Descrição dos cenários ambientais do período de simulação.

Cenário	Maré	Vazão	Vento	Início	Término
1	Alta	Alta	S	2jan13 às 21hs	3jan2013 às 21hs
2	Nula	Baixa	NE	06jan13 às 09hs	07jan13 às 09hs
3	Negativa	Baixa	NE	24jan13 às 05hs	25jan13 às 05hs
4	Alta	Baixa	NE	27jan13 às 12hs	28fev13 às 12hs
5	Nula	Alta	NE	09fev13 às 12hs	10fev13 às 12hs

A Figura 13 apresenta a variação temporal das forçantes e do nível interno medido em cada cenário. Observa-se que há diferença de fase entre os picos de valores máximos e mínimos de nível externo e no ponto de medição de nível interno em virtude da entrada gradual da maré e da descarga fluvial.

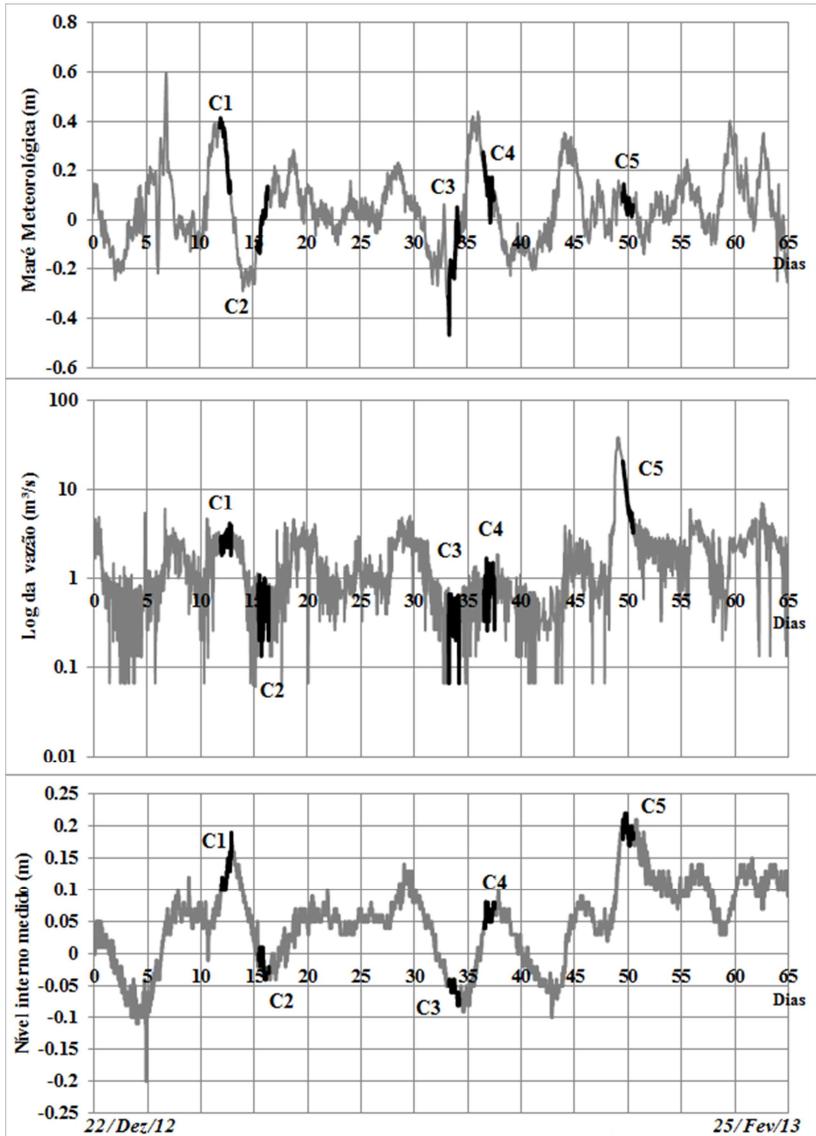


Figura 13: Série temporal da maré meteorológica e vazão fluvial imposta e do nível interno medido nos diferentes cenários.

O Cenário 1 (C1) é caracterizado pelo elevado nível meteorológico e por vazões fluviais significativas devido a passagem de um evento meteorológico associado a presença do vento sul. O nível

maregráfico teve valores variando entre 0,11m a 0,42m, com média 0,29m. A interação entre as vazões fluviais significativas e os elevados níveis externos fez com que o nível interno no ponto de medição da laguna se elevasse ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 13.

O Cenário 2 (C2) apresenta nível maregráfico médio nulo e com valores em ascensão variado entre -0,14m à 0,13m. As baixas vazões presentes no Cenário 2 associadas à presença do vento nordeste fez com que o nível interno da laguna fosse baixando ao longo do tempo.

No Cenário 3 (C3) a vazão fluvial e o nível maregráfico são baixos durante todo o período. O vento atuante no período é nordeste. Este cenário se assemelha ao Cenário 2, no entanto a maré no Cenário 3 é negativa, com média de -0,17 e valor mínimo de -0,46 e máximo de 0,05, enquanto que a maré no Cenário 2 é nula, próxima ao valor médio. O nível externo negativo no Cenário 3 fez com que o nível interno da laguna fosse ainda mais baixo no Cenário 3 se comparado ao cenário anterior e isto é justificado pelo maior gradiente de nível interno e externo presente no Cenário 3.

O Cenário 4 (C4) apresenta baixas vazões e com o nível maregráfico alto, como pode ser visto na Figura 13. O nível maregráfico variou entre 0,27m à -0,01m, com média de 0,14m. O vento predominante no período do Cenário 4 do quadrante norte associado ao térmico de um evento meteorológico. O aumento do nível externo foi responsável pelo aumento do nível interno ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 13.

O Cenário 5 (C5) destaca-se pela presença de elevadas vazões e baixo nível maregráfico, aumentando o nível interno da laguna. Os cenários que apresentam vazões elevadas são apenas o C1 e o C5, no entanto o primeiro caracteriza-se pela maré elevada e o último pela maré nula. Apesar dessa diferença em ambos os cenários o nível interno da laguna é elevado.

Além do Cenário 1 outro cenário que apresenta maré elevada é o Cenário 4, no entanto diferentemente do primeiro, este possui baixas vazões.

5.2.2.1 *Aquecimento*

Com o objetivo de garantir a estabilidade do modelo de qualidade da água o período de simulação foi triplicado, rebatendo os dados de entrada duas vezes, tais como segue abaixo:

- **Aquecimento A:** 14/08/2012 à 18/09/2012 (65 dias). Foram impostos os dados de entrada adquiridos no período de 22/12/2012 à 25/02/2013 (65 dias).
- **Aquecimento B:** 18/09/2012 à 22/12/2012 (65 dias). Foram impostos os dados de entrada adquiridos no período de 22/12/2012 à 25/02/2013 (65 dias) de maneira inversa para minimizar a instabilidade do modelo, já que desta forma não há descontinuidade das condições ambientais.
- **Simulação Final:** 22/12/2012 à 25/02/2012 (65 dias). Foram impostos os dados de entrada adquiridos neste período.

A triplicação do período de simulação teve o objetivo de prolongar o período de aquecimento. Assim, a análise dos resultados finais e conclusivos se deu apenas no período de 22/12/2012 à 25/02/2013, com o modelo já estabilizado.

5.3 Dados utilizados

A elaboração do presente estudo exigiu o levantamento e a consistência de diversos dados ambientais. A Tabela 9 relaciona os dados utilizados com a sua finalidade. Na sequencia são descritos cada um dos dados, indicando a fonte do dado ou sua metodologia para obtenção.

Tabela 9: Dados utilizados

Dado	Utilização	Referência de descrição neste trabalho
Contorno da laguna e linha de costa	Grade batimétrica	5.3.1
Batimetria	Grade batimétrica	5.3.2
Tipo de sedimento de fundo	Rugosidade de fundo no modelo hidrodinâmico	5.3.3
Nível fronteira externa	Forçante do modelo na fronteira aberta	5.3.4
Salinidade e temperatura	Modelagem das propriedades da água: cálculo da densidade e decaimento de <i>E. coli</i> . Utilizadas na condição inicial, nas vazões fluviais e na fronteira externa	5.3.5

Tabela 9 - Continuação: Dados utilizados.

Dado	Utilização	Referência de descrição neste trabalho
Vento	Condição de contorno na superfície livre no modelo hidrodinâmico	5.3.7
Estimativa de vazão e concentração de <i>E. coli</i> nas bacias contribuintes	Dado de entrada do modelo de qualidade da água	5.3.7
Vazão hidrológica	Descargas pontuais impostas no modelo hidrodinâmico	5.3.7
Radiação solar	Modelagem da qualidade da água: decaimento de <i>E. coli</i> .	5.3.9
Campo de nível de água inicial	Condição inicial de nível médio auxiliou na estabilidade do modelo hidrodinâmico.	5.3.11.1
Campo de salinidade	Condição inicial para auxiliar na estabilidade do modelo	5.3.11.3
Nível de água no interior da laguna	Utilizada para calibração do modelo hidrodinâmico	5.3.12

5.3.1 Contorno da laguna e linha de costa

O contorno da laguna foi digitalizado através da imagem de satélite IKONOS, da empresa Americana Geoeye, de 2010. A linha de costa foi complementada a partir das cartas náuticas da região digitalizadas por Silva (2008).

5.3.2 Grade batimétrica

Os dados batimétricos utilizados na grade foram levantados pela AEROCONSULT (2001) juntamente com dados batimétricos levantados pelo LaHiMar no canal e no interior da laguna em 2006, descritos por Rocha (2007). Além disso, na fronteira aberta foram utilizados os dados batimétricos contidos nas cartas náuticas e no trabalho realizado por Silva (2008). A Figura 9, apresentada anteriormente, ilustra a batimetria utilizada para construir a grade batimétrica.

A grade batimétrica constitui a fronteira de fundo que formam os elementos da malha de cálculo. A concepção e confecção da malha de cálculo e sua resolução se dá pela limitação de dados batimétricos, apresentados no item 4.6 do presente trabalho; pelos contornos físicos do corpo hídrico, item 5.3.1, e também pelo esforço computacional requerido.

Usando uma ferramenta de suporte ao Sistema *MOHID*, nomeado de *GridGenerator*, foi construída uma grade de cálculo regular de espaçamento diversificado. Procurando aperfeiçoar o processamento dos cálculos, definiu-se espaçamentos de 100 metros no interior da laguna, que se reduzem gradativamente, para obter uma melhor resolução, com células de 10 metros, no canal de ligação entre os sistemas sul e central da Lagoa e 15 metros no canal da Barra, voltando a crescer na fronteira externa até alcançar 50 metros. A grade construída tem formato retangular com 279 colunas verticais e 177 horizontais.

Ressalta-se que as simulações ocorreram em 2DH, ou seja, não foi imposta a variação na coluna da água, admitindo-se uma coluna vertical única e uniforme.

5.3.3 *Campo de Rugosidade*

A Figura 1 apresentada no item 3.2.3 ilustra a distribuição de sedimentos rugosidade absoluta utilizada no presente estudo. Tanto a distribuição dos sedimentos como os valores de rugosidade utilizados no presente estudo foram baseados nos estudos de Andrade (2001) Godoy (2009), Silva (2010) e Odreski (2012), apresentados também no item 3.2.3. *Características sedimentológicas*. A Tabela 10 apresenta os valores de rugosidade absoluta utilizada no presente estudo. Ressalta-se que o valor de rugosidade do canal está discutido no item 6.2.1.

Tabela 10: Valores de rugosidade absoluta.

Tipo de Sedimento	ϵ (cm)
Areia	0.030
Areia Canal	0.060
Areia Siltosa	0.025
Silte Arenoso	0.020
Silte	0.015
Silte Argiloso	0.010

5.3.4 Maré

5.3.4.1 Calibração

As constituintes harmônicas utilizadas no período de calibração foram as da estação maregráfica localizada na Ilha do Arvoredo, obtidas a partir do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação des Estudos do Mar – FEMAR. A Figura 14 aponta a descrição da estação maregráfica do Arvoredo bem como as suas constituintes.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR *Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras*

Nome da Estação : ILHA DO ARVOREDO – SC					
Localização : No trapiche de desembarque da ilha					
Organ. Responsável : DHN					
Latitude : 27° 17,0' S			Longitude : 48° 21,5' W		
Período Analisado : 01/04/82 a 01/05/82			Nº de Componentes : 26		
Análise Harmônica : Método Almirante Santos Franco					
Classificação : Maré de Desigualdades Diurnas					
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		V H 22 min		Nível Médio (Zo): 57 cm acima do NR.	
Média das Preamares Superiores (MHHW) :		98 cm acima do NR.		Média das Preamares Inferiores (MLHW) : 83 cm acima do NR	
Média das Baixa-mares Superiores (MHLW) :		35 cm acima do NR.		Média das Baixa-mares Inferiores (MLLW) : 11 cm acima do NR.	
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	-	-
Ssa	-	-	N ₂	5,9	150
Mm	-	-	NU ₂	1,1	139
Mf	-	-	M ₂	19,6	071
MTM	-	-	L ₂	-	-
Msf	-	-	T ₂	0,8	063
Q ₁	4,9	066	S ₂	14,2	063
O ₁	10,6	075	K ₂	3,9	062
M ₁	2,2	132	MO ₃	-	-
P ₁	3,2	126	M ₃	2,5	148
K ₁	9,7	130	MK ₃	1,4	051
J ₁	-	-	MN ₄	-	-
OO ₁	-	-	M ₄	2,5	108
MNS ₂	1,0	037	SN ₄	-	-
2N ₂	0,8	229	MS ₄	1,6	188
Referências de Nível: RN-1 situada na rampa de concreto ao lado da garagem de barcos.					
Obs: Não há referências a outros períodos					

Código BNDO. 60241

Figura 14: Constituintes harmônicas utilizada no período de calibração - Ilha do Arvoredo.

5.3.4.2 Simulação final

A componente oceanográfica foi imposta na fronteira aberta do modelo. Devido à falta de dados medidos próximo a fronteira aberta, o nível externo imposto no modelo foi determinado por uma composição

de maré astronômica, componente determinística de maré; e maré meteorológica, componente estocástica da maré.

A maré astronômica foi determinada com base nas constantes harmônicas da estação maregráfica do FEMAR – Fundação de Estudos do Mar, na Ilha do Arvoredo. O uso do pacote T_Tide (Pawlowicz *et al*, 2002) permitiu obter uma série de níveis astronômicos a partir das constituintes harmônicas.

A obtenção de dados de maré meteorológica depende de medições realizadas em campo uma vez que não há como prever esta componente de maré. No entanto, devido à falta de dados para o período de simulação, optou-se por utilizar a maré meteorológica de uma região próxima com medição de nível e com características meteorológicas semelhantes. Para isso foram utilizados os dados de maré medida no porto do Imbituba. A partir dos dados brutos de nível medidos no porto de Imbituba foi extraída uma série da componente meteorológica através da utilização do pacote T_Tide (Pawlowicz *et al*, 2002).

A maré total imposta no modelo então foi composta pela maré astronômica de Florianópolis (Arvoredo) e a maré meteorológica de Imbituba. A Figura 15 apresenta a série temporal da maré meteorológica, astronômica e a maré total imposta no modelo.

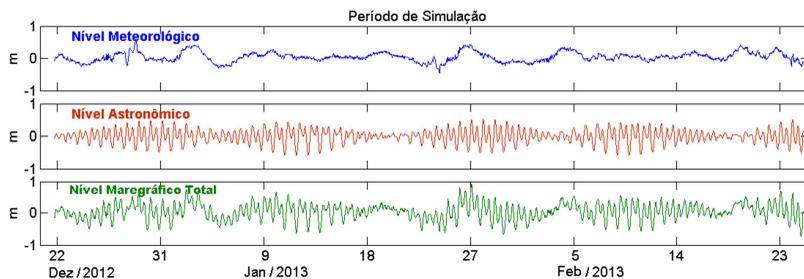


Figura 15: Maré inserida no modelo.

5.3.5 Vento

Andrade (2001) e Rocha (2007) evidenciaram em seus estudos a importância do vento sobre a circulação interna hidrodinâmica na laguna. Em virtude disso, este trabalho utilizou o vento na Lagoa da Conceição para forçar o modelo hidrodinâmico na laguna.

Os dados de direção e magnitude do vento utilizado nas simulações foram obtidos a partir da estação meteorológica automática Davis colocada junto às instalações do Laboratório de Oceanografia da

UFSC localizado na Barra da Lagoa durante o período de 01-08-2012 a 01-03-13, com taxa amostral de 30 minutos. A localização do equipamento pode ser observada na Figura 16.

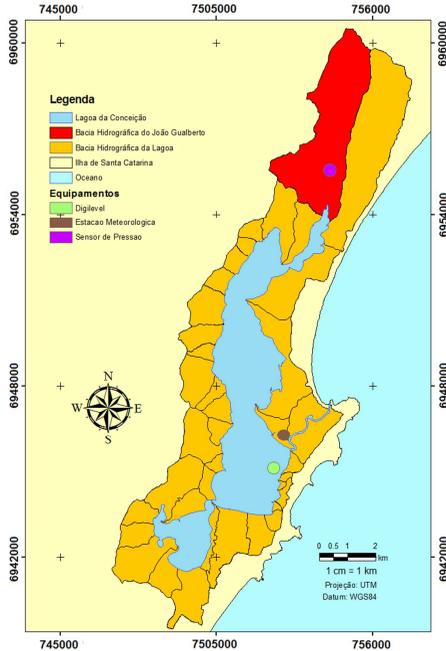


Figura 16: Local das medições de campo.
Fonte: Odreski (2012).

É importante ressaltar que a estação meteorológica se localiza sob influência dos morros de entorno da lagoa. Rocha (2007) utilizou também os dados desta estação em seu trabalho e o autor avaliou a zona de sombra causada pelos morros. Existem morros protegendo toda a laguna dos ventos do quadrante Oeste. Segundo Rocha (2007) a zona de sombra restringe a presença dos ventos de Leste-Oeste. Os ventos do quadrante Leste, no entanto, têm obstáculos somente na região central da laguna e, portanto, espera-se que na região Norte e Sul da laguna devam estar presentes.

A Figura 17 apresenta a rosa dos ventos construída a partir dos dados obtidos. Esta se assemelha com a rosa dos ventos apresentada por Rocha (2007).

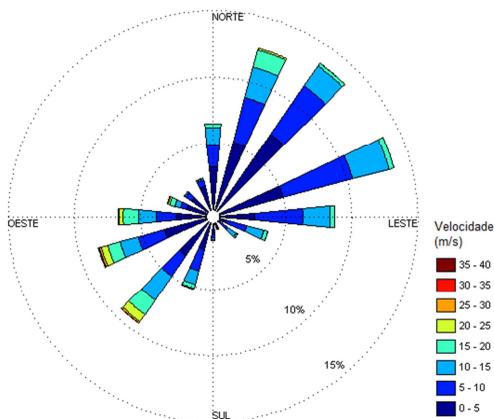


Figura 17: Rosa dos ventos do período de dados obtidos.

5.3.6 Salinidade e temperatura

Seguindo a metodologia aplicada por Odreski (2012), o presente trabalho avaliou a variação da densidade da água ao longo do espaço e do tempo através do aporte de água doce - advindo das vazões das bacias perenes - e através do aporte de água salgada na entrada oceânica do canal.

No modelo a densidade foi considerada homogênea na coluna d'água, ou seja, foi analisada apenas a variação de densidade na horizontal.

O presente trabalho não considerou a variação de temperatura no tempo e no espaço uma vez que a temperatura tem grandes oscilações e depende de diversos parâmetros. A revisão bibliográfica feita por Laurenti (2011) mostrou que há uma grande variação temporal e espacial dos valores de temperatura na laguna. Devido à falta de dados medidos no período de simulação, o presente estudo utilizou um valor de temperatura média das águas da laguna no verão equivalente a 25°C. Esta temperatura foi inserida no modelo como condição inicial e, além disso, este mesmo valor foi imposto na fronteira aberta do modelo e nas vazões fluviais.

Assim como o estudo realizado por Odreski (2012), o presente estudo considerou certa condição inicial de salinidade baseada em dados secundários, e ponderou também a salinidade advinda do mar como 35PSU, e salinidade 0 PSU para as contribuições hidrológicas, conforme Assad *et al* (2009).

O campo de salinidade média construído por Odreski (2012), baseado nos dados secundários levantados por Laurenti (2011), foi utilizado como condição inicial de salinidade no trabalho de Odreski (2012) e também no presente trabalho, apresentado no item 5.3.11.2.

5.3.7 *Vazões fluviais*

Devido ao grande número de sub-bacias, a medição de vazão hidrológica ao longo do tempo em cada uma das sub-bacias se tornou inviável economicamente. Por isso, as vazões hidrológicas foram determinadas a partir dos dados medidos na principal sub-bacia que compõe a bacia hidrológica da Lagoa da Conceição, bacia do rio João Gualberto, destacada na Figura 16 apresentada anteriormente.

Para o período simulado foram obtidos os dados de níveis do rio João Gualberto. A modelagem hidráulica elaborada por Odreski (2012) permitiu obter uma série de vazão a partir da série de nível medida para os períodos simulados. Esta modelagem hidráulica realizada por Odreski (2012) elaborou uma curva-chave do rio João Gualberto excluindo o efeito de maré no ponto de medição. O local de medição do nível do rio João Gualberto está indicado também na Figura 16 e sua posição exata é de 27°30'9.86"S e 48°25'34.714"W, referenciado ao Datum WGS84. A determinação deste local de medição levou em consideração a segurança do equipamento, a acessibilidade e as características da seção, que são conhecidas e de leito imóvel devido à existência de uma ponte no local.

A medição de nível é feita de forma automatizada por um Sensor de Pressão instalado numa seção conhecida do rio e o seu armazenamento se dá por um Datalogger. Este equipamento é da marca Solar Instrumentação, modelo SL2000.

O monitoramento do nível no rio João Gualberto iniciou no dia 17 de junho de 2012 e estendeu-se até o dia 25 de março 2013. No entanto houve algumas interrupções nas medições neste período. Os valores de nível foram medidos com taxa amostral de 10 minutos.

As vazões hidrológicas nas demais sub-bacias foram estimadas por regionalização de vazão através da proporcionalidade de área. Nem todas as 60 sub-bacias apresentadas anteriormente são consideradas perenes e possuem um rio ou córrego bem definido. Por isso, não foi utilizada esta delimitação de sub-bacias para impor a vazão hidrológica. A vazão fluvial imposta no modelo foram aquelas geradas pelas bacias perenes, definidas por Odreski (2012) e apresentadas na Figura 18. A

Tabela 11 apresenta a relação entre as sub-bacias apresentadas anteriormente, no item 4.2 H, e as bacias perenes definidas por Odreski (2012).

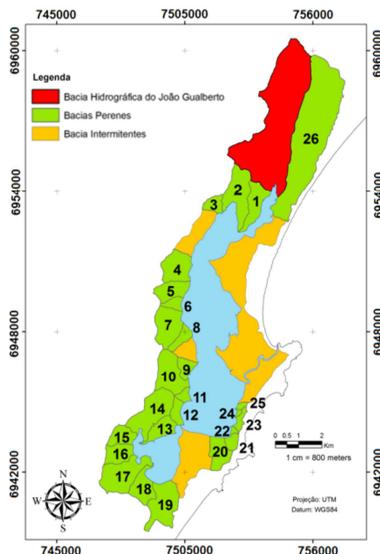


Figura 18: Localização das bacias perenes.

Fonte: Odreski (2012).

Tabela 11: Relação entre as sub-bacias e as bacias perenes definidas por Odreski (2012).

Bacias Perenes Odreski (2012)	Sub-bacias (Figura 6)	Bacias Perenes Odreski (2012)	Sub-bacias (Figura 6)
JG	1, 60	14	33
1	58, 59	15	32
2	57	16	31
3	56, 55	17	30, 29
4	47, 48, 49, 50	18	28, 27, 26
5	46, 45	19	25
6	44	20	21
7	43, 42	21	20
8	41	22	19
9	39, 38	23	19
10	37	24	19
11	36	25	18
12	35	28	2, 3
13	34	-	-

A Figura 19 apresenta a série temporal de nível e vazão para o período de simulação.

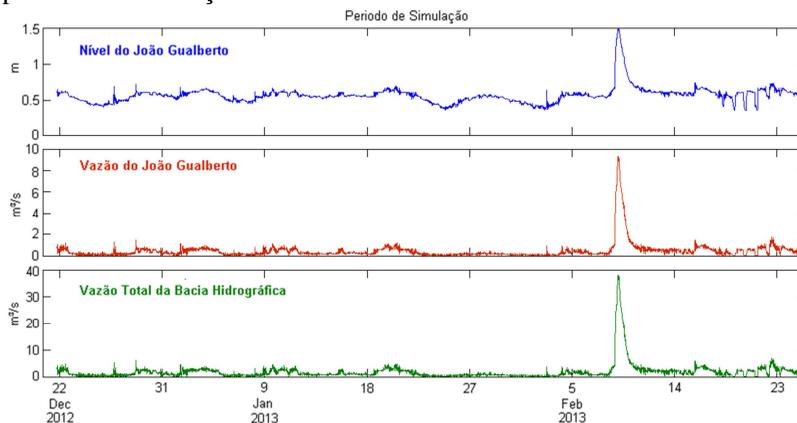


Figura 19: Vazão e nível do Rio João Gualberto e vazão fluvial total imposta no modelo.

5.3.8 Balneabilidade

A Fundação do Meio Ambiente – FATMA, órgão ambiental da esfera estadual do Governo de Santa Catarina, realiza sistematicamente, desde 1976, o monitoramento de balneabilidade das águas em diversos balneários do estado com o intuito de determinar se estão “próprias” ou “impróprias” para o banho (FATMA, 2011). A frequência das análises de balneabilidade é realizada mensalmente de abril a outubro e semanalmente de novembro a março. O parâmetro de qualidade de água utilizado para a classificação da balneabilidade é *E. coli*, organismo indicador de contaminação microbológica das águas, oriundo de fontes pontuais e difusas de efluentes domésticos. A classificação das águas como própria e imprópria é feita pela FATMA seguindo a Resolução CONAMA 274/2000, tal como segue abaixo:

- Própria: quando em 80% ou mais de um conjunto de amostras coletadas nas últimas 5 semanas anteriores, no mesmo local, houver no máximo 800 NMP de *E. coli* por 100 mililitros.
- Imprópria: quando em mais de 20% de um conjunto de amostras coletadas nas últimas 5 semanas anteriores, no mesmo local, for superior que 800 NMP de *E. coli* por 100 mililitros ou quando, na última coleta, o resultado for superior a 2000 *E. coli* por 100 mililitros.

Dentre as praias e lagunas existente no Estado de Santa Catarina, a FATMA monitora 8 pontos na Lagoa da Conceição, mostrados na Figura 20. Todos os pontos localizam-se na região mais ao sul da laguna que se caracteriza pela densidade demográfica mais elevada.

Foram disponibilizados pela FATMA os resultados desde janeiro de 2002 até setembro de 2010. As análises dos resultados de balneabilidade foram feitas a partir da evolução temporal dos valores absolutos de *E. coli* para cada um dos pontos amostrais e outras duas avaliações nas quais se verificou a frequência de ocorrência de um determinado valor de concentração ao longo do tempo, tais como seguem abaixo:

- Ocorrência de condição imprópria: para cada mês de cada ano foi verificado o número de amostras realizadas e o número de amostras que foram consideradas “Impróprias”. A classificação de balneabilidade considera o histórico das últimas cinco amostras, e por isso este parâmetro está relacionado não apenas com o valor absoluto daquela campanha, mas também com os últimos resultados.
- Ocorrência de amostras que alcançaram o limite de detecção máximo: a metodologia de análise e contagem de *E. coli* realizada pela FATMA (2011) limita o valor máximo de detecção em 16.000NMP/mL. Esta limitação dificulta a análise de tendências temporais com base em valores absolutos. Buscou-se então avaliar a evolução temporal e a variação espacial dos percentuais mensais e anuais do número de amostras que ultrapassaram o valor máximo em relação ao número de amostras totais obtidas naquele período.

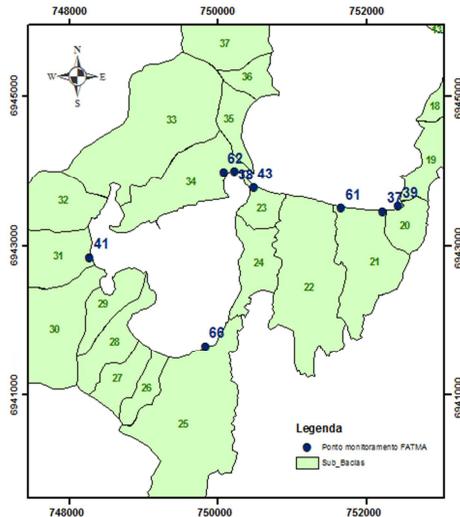


Figura 20: Pontos de monitoramento de balneabilidade da FATMA.

Os resultados do monitoramento foram avaliados para 2010 nos períodos de alta temporada, entre os meses de novembro a abril; e baixa temporada, que compreende o período de maio a outubro. Desta forma foi possível avaliar a influência da população presente na alta temporada sobre a balneabilidade da laguna.

5.3.9 Vazões de efluentes sanitários

O aporte de *E. coli* foi avaliado com base na população de cada uma das sub-bacias e em coeficientes *per capita* de *E. coli* segundo a bibliografia. Segundo bibliografia consultada, Von Sperling (2005), o coeficiente *per capita* de *E. coli* varia de 10^9 a 10^{12} células/habitante.dia e concentração de 10^5 a $10^8/100\text{ml}$ de esgoto. Não foram considerados decaimento ao longo das sub-bacias por estas terem áreas relativamente pequenas.

A vazão de esgoto foi estimada a partir da população presente nas sub-bacias e no coeficiente de produção de esgoto *per capita*. A produção *per capita* de esgoto utilizada no estudo foi de 80% do consumo *per capita* de água, 180L/hab/dia.

A produção de *E. coli* estimada por sub-bacia foi confrontada com os resultados do monitoramento de balneabilidade realizado pela FATMA para o ano de 2010 na baixa e na alta temporada. A correlação

entre a carga de *E. coli* produzida nas sub-bacias com resultados de balneabilidade medidos in loco possibilitou identificar os principais pontos de aporte de *E. coli* na laguna.

Como mostrado anteriormente, a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição foi delimitada em 60 sub-bacias e estas foram analisadas sob o ponto de vista de ocupações urbanas.

A população presente na bacia hidrográfica e o cruzamento espacial das informações de sub-bacia, bairros e área urbana permitiu definir a população residente e flutuante em cada sub-bacia para 2010. A análise espacial dos dados foi realizada com a utilização de ferramentas de SIG – Sistema de Informações Geográficas. A Figura 21 apresenta as etapas de desenvolvimento metodológico para a determinação de aporte de *E. coli* nas sub-bacias. A metodologia apresentada abaixo foi aplicada duas vezes, uma para o ano de 2010.

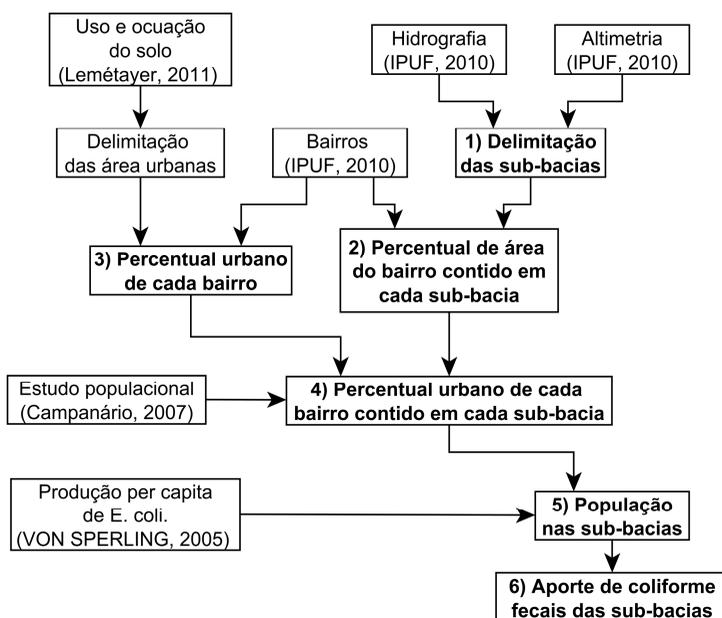


Figura 21: Fluxograma metodológico da determinação de aporte de *E. coli*.

O cruzamento espacial dos limites das sub-bacias e dos bairros possibilitou definir o percentual de área do bairro contido em cada sub-bacia. Já o cruzamento das informações espaciais de uso e ocupação do

solo e bairros permitiu calcular o percentual urbano de cada bairro em 2010.

Com a sobreposição destas informações pode-se determinar o percentual urbano de cada bairro inserido nas sub-bacias para 2010. E assim se estimou a população por sub-bacia em 2010 juntamente com o estudo populacional desenvolvido por Campanário (2007).

5.3.10 Radiação solar

A radiação solar foi imposta no modelo com o objetivo de calcular a taxa de decaimento bacteriano. Os dados foram obtidos da estação meteorológica automática Davis colocada junto às instalações do Laboratório de Oceanografia da UFSC localizado na Barra da Lagoa durante o período de 01-08-2012 a 01-03-13, com taxa amostral de 30 minutos. A localização do equipamento pode ser observada na Figura 16.

A Figura 22 apresenta os dados de radiação para todo o período de simulação (22/12/2012 à 25/02/2013). A Figura 23 apresenta a radiação média ao longo do dia para o período simulado.

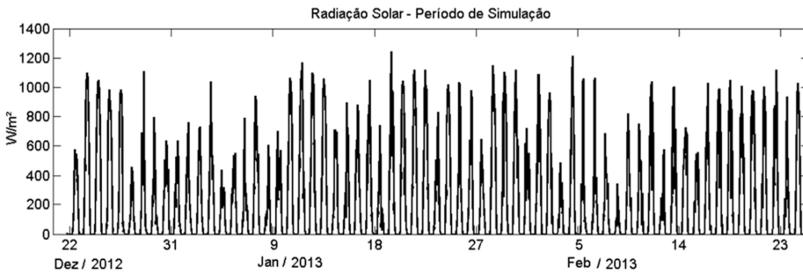


Figura 22: Radiação solar para o período simulado.

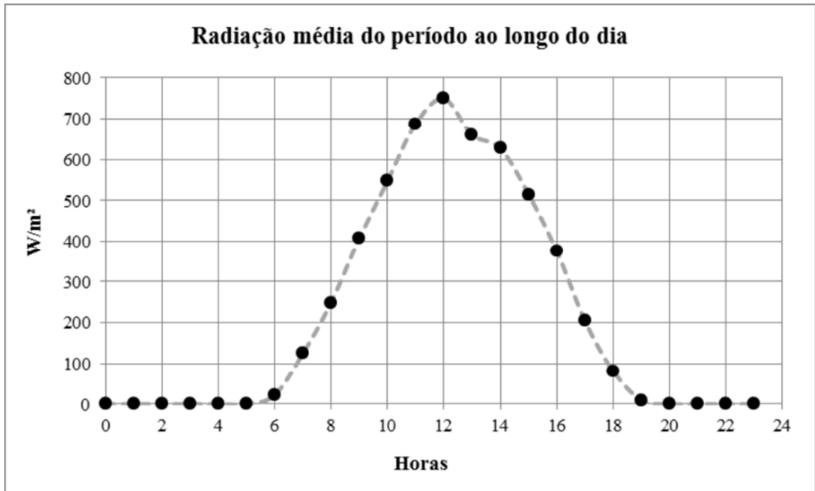


Figura 23: Radiação solar média ao longo dia para o período simulado.

5.3.11 Condições iniciais das simulações

A configuração do modelo MOHID foi feita estabelecendo algumas condições iniciais para o início das simulações. Nela foi inserido o nível interno da laguna, campos de salinidade e a atuação gradativa da forçante maregráfica.

5.3.11.1 Nível da laguna

Para configuração inicial do nível da área de simulação, foi utilizado o valor médio referente às simulações realizadas por Silva (2010). Os níveis médios foram transferidos para o MOHID e interpolados em cima da grade de cálculo usada neste trabalho, sendo inserida no setup inicial do modelo. A Figura 24 ilustra o resultado.

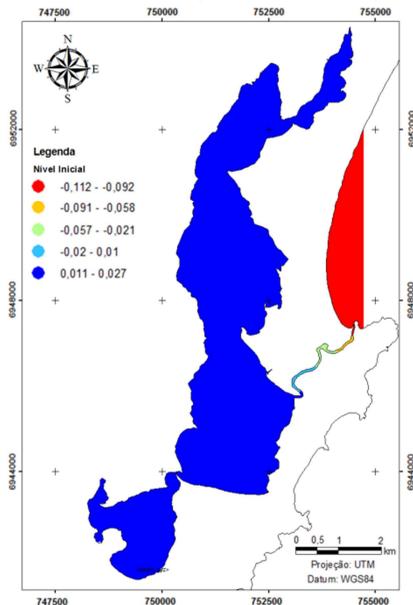


Figura 24: Nível inicial das simulações.

5.3.11.2 Maré

Com o objetivo de reduzir ruídos numéricos no processo de modelagem, a maré foi imposta de maneira lenta na fronteira externa, em forma de rampa, que eleva gradativamente sua intensidade até alcançar seu valor absoluto após um dia de simulação.

5.3.11.3 Salinidade

Como mencionado anteriormente, o campo de salinidade média desenvolvido por Odreski (2012) e apresentado no item 3.2.7 foi utilizado como condição inicial de salinidade.

5.3.12 Nível interno na laguna

A medição de nível interno na laguna foi utilizada para a calibração do modelo. A medição de nível interno foi realizada através da instalação de um marégrafo próximo ao canal da Barra da Lagoa, especificamente nas coordenadas 27°35'35" S e 48° 26'15"W, referenciadas ao Datum WGS84, apontado na Figura 16. O

equipamento foi fixado em um píer de propriedade particular. A Figura 25 e a Figura 26 mostram o equipamento e seu local de instalação.



Figura 25: Ponto de instalação do Digilevel.



Figura 26: Estrutura do Digilevel.

O nível interno da laguna foi monitorado em tempo real, com uma taxa de amostragem de 20 minutos. A Figura 27 apresenta a medição de nível interno da laguna entre 22/12/2012 à 25/02/2013.

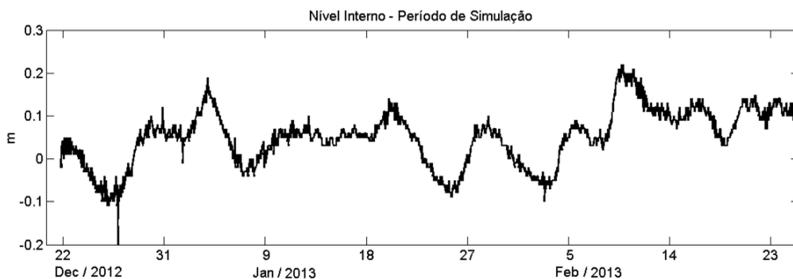


Figura 27: Medição de nível interno na laguna.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Aporte de efluentes sanitários por sub-bacia

A contribuição antrópica de efluentes domésticos baseou-se na carga de *E. coli* produzida pela população de cada sub-bacia, que foi confrontado com os resultados de balneabilidade a fim de se definir os principais pontos de lançamento de efluente doméstico. Estabelecidos os pontos de lançamento, foram definidas as vazões e as concentrações de entrada no modelo.

6.1.1 População por sub-bacia

O aporte de *E. coli* inserido no modelo foi avaliado para cada sub-bacia a partir da estimativa populacional no ano de 2010. A Tabela 12 apresenta as populações fixas e a população de alta temporada, resultante da soma da população fixa (baixa temporada) e população flutuante. A região do monitoramento de balneabilidade da FATMA compreende as bacias hidrográficas 19 a 35. A taxa de crescimento médio na alta temporada foi de 73%.

Tabela 12: População na baixa e na alta temporada em 2010 nas sub-bacias (SB).

SB	Baixa	Alta	SB	Fixa	Flutuante	SB	Fixa	Flutuante
1	8.599	12.297	21	1.096	2.190	41	163	326
2	5.352	7.642	22	201	401	42	243	486
3	25	36	23	166	333	43	10	21
4			24	68	135	44	15	31
5			25	3.582	6.100	45	8	16
6			26	193	385	46	2	5
7			27	135	270	47	218	435
8			28	246	492	48	80	160
9			29	693	1.386	49		
10			30	563	1.124	50		
11	524	1.181	31	755	1.510	51		
12	1.104	2.489	32	466	932	52	12	24
13	1.355	3.054	33	3.401	6.796	53	289	577
14	2.588	5.833	34	7.696	15.381	54	211	421
15	168	379	35	1.243	2.485	55	31	62
16	389	877	36	254	508	56	55	109
17	1.088	2.353	37	404	808	57	16	32
18	194	438	38	22	44	58		
19	320	641	39	38	75	59		
20	402	804	40	81	161	60	2	5

6.1.2 Monitoramento de balneabilidade

A partir dos resultados de monitoramento de balneabilidade da FATMA fez-se uma análise espacial e da evolução temporal entre a baixa e a alta temporada desde 2002 a 2010, período dos dados disponibilizados. A Figura 20 apresentada anteriormente aponta os pontos monitorados pela FATMA.

A Tabela 13 apresenta a variação espacial dos percentuais de amostras impróprias e amostras com concentração máxima detectável ao longo dos períodos de baixa temporada e alta temporada desde 2002 até 2010. A alta temporada compreende o período entre novembro a abril, e a baixa temporada entre maio a outubro. A escala de cores na tabela aponta de forma crescente o percentual de amostras impróprias e com concentração máxima detectável. A escala varia gradualmente de 0 (verde) a 100 (vermelho). As células sem valores indicam percentual nulo.

Tabela 13: Percentual de amostras impróprias e com concentração máxima detectável nos períodos de alta e baixa temporada de 2002 a 2010.

	Baixa temporada										Alta temporada							
	Ponto	37	38	39	41	43	61	62	66	37	38	39	41	43	61	62	66	
Percentual de amostras impróprias (%)	2002		100					60		21	86	47	67	17	35	92	71	
	2003		100	33				100	8	18	100	33	43			100	3	
	2004		100			33			100		8	84	8	56	8	17	92	28
	2005		17	100	17	83	17		100	17		100	20	76	12		100	17
	2006		17	83			50		100	17	4	83	74	62	22	17	100	43
	2007		100	33	83				83	33	33	96	54	85	38	17	100	11
	2008		50	100	83	67	50		100	17	18	100	100	38	23	20	93	
	2009		60	100	80	40			100		24	82	48	33	19	13	100	67
	2010		100	50	17				100	67	38	74	27	24	63	54	87	18
	Percentual de amostras com Cmáx (%)	2002		20								39		6			14	6
2003			33					17			45		8			48	3	
2004			33					50		4	43	4	4		4	44	4	
2005			83					17			32	4	17			40	17	
2006			33					67		4	28	4	12		4	32	4	
2007			33	17				33		21	53	13	8		8	36	3	
2008			17								48	6	11			17		
2009			40								21	42				26	8	
2010			17							14	18	13	12	8	8	8	22	

Legenda: 100% 80% 60% 40% 20% 0%

Os resultados apontam que a concentração de *E. coli* na laguna possuem variação sazonal e espacial. Durante a alta temporada as concentrações de *E. coli* aumentam significativamente na laguna.

A partir dos dados de balneabilidade fez-se uma análise espacial a fim de agrupar pontos com características semelhantes quanto ao percentual de amostras impróprias e ao percentual de amostras com concentração máxima detectável. A similaridade entre os pontos foi avaliada com uma teoria de agrupamento hierárquico usando a distância euclidiana e a regra de ligação foi o vizinho mais distante. A Figura 28 apresenta o resultado da análise de agrupamento. A distância percentual de 50% aponta dois grupos distintos.

O primeiro grupo é composto pelos pontos 37, 39, 41, 43, 61 e 66. Os locais onde esses pontos se localizam são caracterizados pela presença de bares e restaurante ou proximidade a ocupações residenciais. Este grupo apresentou melhores indicadores de balneabilidade.

O segundo grupo é formado pelos pontos de monitoramento 38 e 62. Este grupo apresentou concentrações de *E. coli* mais elevadas, e ambos os pontos se localizam na exutória da sub-bacia hidrográfica da região central da Lagoa da Conceição. Esta região possui elevado adensamento populacional e este grupo destaca-se por estar constantemente com concentrações de *E. coli* elevadas e superiores àquelas preconizados pela legislação.

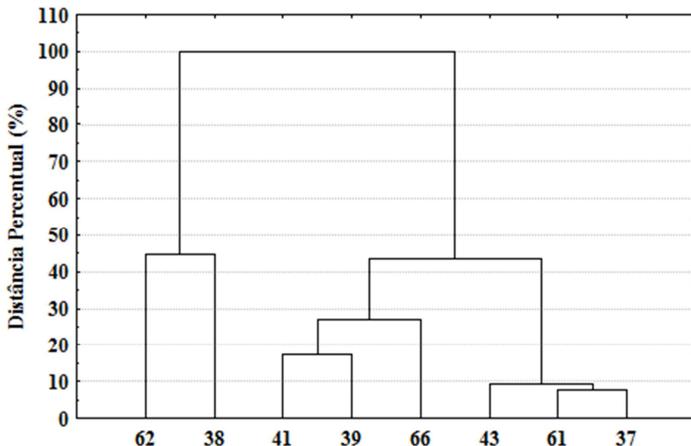


Figura 28: Agrupamentos dos pontos semelhantes de balneabilidade da FATMA.

No entanto, os resultados apontaram que o Grupo 1 ainda pode ser subdividido em dois grupos: Grupo 1A formado pelos pontos 37, 43 e 61; e o Grupo 1B composto pelos pontos 39, 41 e 66. O Grupo 1B apresenta concentrações de *E. coli* mais elevadas que o Grupo 1A, porém inferiores ao Grupo 2.

6.1.3 Relação entre a população por sub-bacia e a balneabilidade

Dentre a área de monitoramento da FATMA, as bacias hidrográficas com maior população se aproximam dos pontos amostrais 38 e 62, que juntos formam o Grupo 2, grupo de maior ocorrência de amostras impróprias e de ocorrência amostras com concentração máxima. Os resultados mostram ainda que os pontos que se localizam próximos às mesmas sub-bacias que tiveram comportamento muito semelhante quanto ao percentual de amostras impróprias e de concentração máxima.

A Figura 29 e a Figura 30 apontam a carga de *E. coli* produzidas nas sub-bacias da região de monitoramento da FATMA a partir das populações presentes na alta e na baixa temporada de 2010. A carga de *E. coli* produzidas nas sub-bacias foi classificada em Baixa, Média, Alta e Muito Alta. As classes foram definidas a partir dos resultados de balneabilidade e são: Baixa (0 à 1×10^{14} Org/dia), Média (1×10^{14} à 3×10^{14} Org/dia), Alta (3×10^{14} à 5×10^{14} Org/dia) e Muito Alta (5×10^{14} à 2×10^{15} Org/dia).

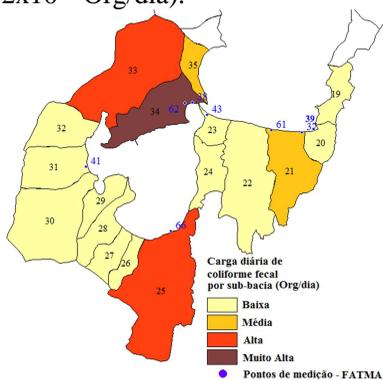


Figura 29: Carga de *E. coli* produzida na região de monitoramento durante a baixa temporada – 2010.

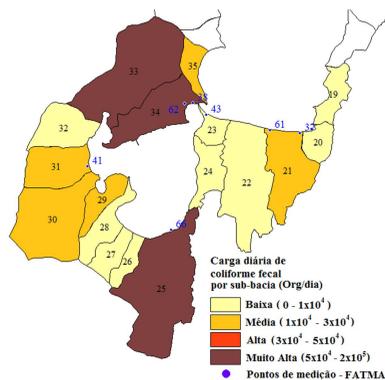


Figura 30: Carga de *E. coli* produzida na região de monitoramento durante a alta temporada – 2010.

A presença turística na alta temporada aumentou significativamente a carga de *E. coli* estimada em algumas sub-bacias, como a 34 e a 35, que se aproximam dos pontos 62 e 38.

A partir da relação de carga média de *E. coli* produzida em cada grupo com o percentual médio de amostras impróprias de cada grupo pode-se perceber dois grandes grupos com diferentes correlações entre população e balneabilidade, como mostra a Figura 31. O primeiro grupo é formado pelos pontos do Grupo 1A e 1B dos resultados de balneabilidade e pelas classes “Baixa” e “Média” de carga de *E. coli* produzida pela população presente nas sub-bacias. O segundo grande grupo é formado pelos pontos do Grupo 2 dos resultados de balneabilidade e pelas classes “Alta” e “Muito Alta” de carga de *E. coli* produzida nas sub-bacias.

A taxa de crescimento de amostras impróprias e carga de *E. coli* é bastante distinta entre os dois grandes grupos. Enquanto a taxa de crescimento é nula no Grupo 2, no primeiro grupo (1A e 1B) o aumento de 1% na ocorrência de amostras impróprias significa o aumento de carga de $6,2 \times 10^{12}$ Org/dia.

A carga de *E. coli* que divide os dois grandes grupos é 3×10^{14} Org/dia, o que corresponde à população de 3.000 habitantes.

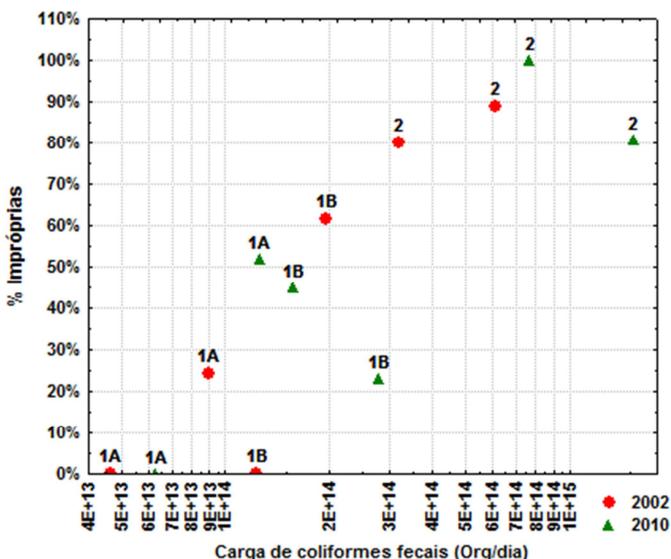


Figura 31: Relação entre carga de *E. coli* e o percentual de amostras impróprias nos grupos 1A, 1B e 2.

Definidas as classes de carga de *E. coli* produzida pela população presente nas sub-bacias na região de monitoramento da FATMA a partir dos resultados de balneabilidade, se estimou a carga produzida nas demais sub-bacias da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição. Após a estimativa de carga de *E. coli* as sub-bacias foram classificadas quanto à carga também em Baixa, Média, Alta e Muito Alta utilizando a classificação definida anteriormente.

Além da região de monitoramento da FATMA, há ainda outros locais com grande produção de carga de *E. coli* na bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, como a região norte, sub-bacias 1 e 2, e a região do canal que liga a laguna ao mar, como pode ser visto na Figura 32 e na Figura 33.

Durante a alta temporada de 2010 as cargas ficam bastante elevadas na região sul, norte e na região do canal.

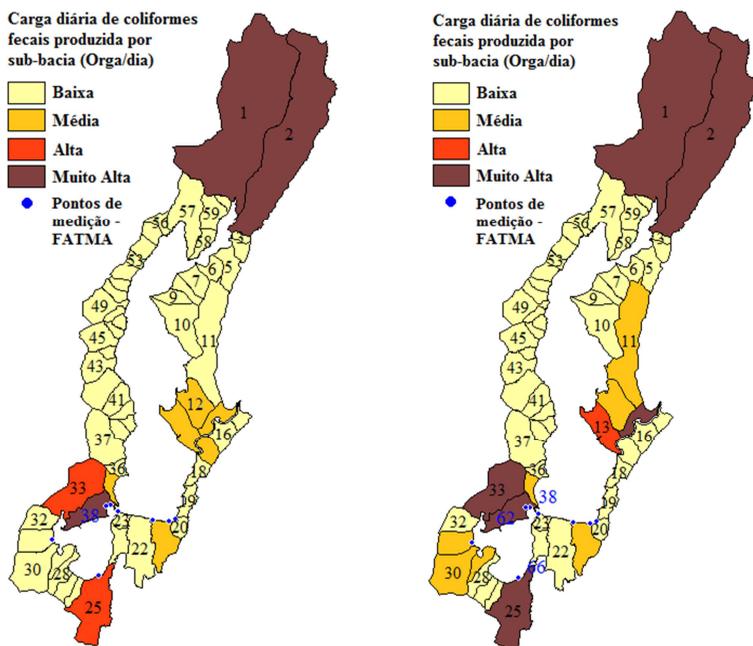


Figura 32: Carga de E. coli produzida na Lagoa da Conceição durante a baixa temporada – 2010.

Figura 33: Carga de E. coli produzida na Lagoa da Conceição durante a alta temporada – 2010.

6.1.4 Pontos de lançamento de esgoto inseridos no modelo

A relação entre população e balneabilidade descrita acima identificou os principais pontos, a vazão e a concentração de lançamento de efluentes sanitários inseridos no modelo.

A Tabela 14 apresenta os pontos de lançamento inseridos no modelo, a respectiva população e a vazão de esgoto. A vazão de esgoto inserida no modelo foi constante no tempo já que sua estimativa se deu através da população. A concentração de entrada em cada um desses pontos de lançamento passou por processo de ajuste a partir de dados medidos, que está apresentada no item a seguir 6.2.2.

Tabela 14: Vazão de esgoto imposta no modelo.

Número	i	j	x	y	População (hab)	Vazão de esgoto (m ³ /s)
1	272	160	754396	6954331	12302	0.0205
2	238	45	750806	6950800	595	0.0010
3	85	44	750701	6945914	673	0.0011
4	59	44	750707	6945205	454	0.0008
5	54	36	750360	6944706	2485	0.0041
6	22	16	749490	6943488	8979	0.0150
7	29	7	748577	6943846	6796	0.0113
8	21	4	748280	6943352	932	0.0016
9	18	5	748310	6943041	1216	0.0020
10	14	6	748472	6942679	1517	0.0025
11	5	11	748949	6941722	1147	0.0019
12	4	19	749813	6941626	6100	0.0102
13	23	58	752135	6943489	2190	0.0037
14	23	61	752469	6943529	806	0.0013
15	89	64	752746	6945984	1699	0.0028
16	149	110	753631	6946815	5287	0.0088
17	163	165	754462	6947078	211	0.0004
18	120	108	753604	6946424	488	0.0008
19	78	88	753308	6945795	1265	0.0021
20	259	146	754171	6952928	7642	0.0127

A Figura 34 apresenta os pontos de lançamento de esgoto. As manchas negras apontam a ocupação urbana de 2010.

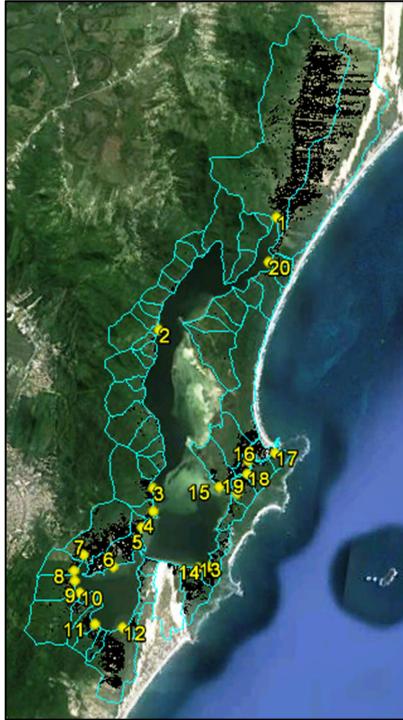


Figura 34: Pontos de lançamento de esgoto e a ocupação urbana de 2010.

6.2 Modelagem

6.2.1 Calibração dos níveis

A calibração é o processo de ajuste de parâmetros do modelo de modo a garantir a melhor concordância possível entre os resultados apresentados pelo modelo e as medições ambientais.

No caso de modelos hidrodinâmicos a calibração do modelo pode ser feita pela alteração dos valores de rugosidade de fundo. Lino (2005) evidenciou que os resultados do modelo da Lagoa da Conceição, com rugosidade constante ou rugosidade variável não apresentam diferenças significativas nos níveis de água. Ou seja, o modelo da laguna foi pouco sensível a pequenas variações de rugosidade ao longo do domínio. A região do canal da barra é a mais sensível quanto à alteração da rugosidade de fundo sobre a hidrodinâmica.

Por isso, o único valor de rugosidade alterado no processo de calibração foi na região no canal da barra. Sendo assim, na calibração do modelo foram feitas diversas simulações com diferentes valores de rugosidade de fundo no canal da barra e para cada campo de nível resultante do modelo foi extraída a série temporal de nível no mesmo local da medição.

A comparação entre os níveis simulados e os níveis medidos no interior da laguna foi realizada apenas pelas componentes astronômicas com períodos menores que 26 horas. O uso do pacote T_Tide (Pawlowicz *et al*, 2002) permitiu obter a série de nível astronômico a partir da série medida e da série simulada.

As diferentes séries astronômicas obtidas através da simulação dos diversos valores de rugosidade no fundo do canal foram comparadas com a série astronômica adquirida da medição de campo. Esta comparação se deu pela avaliação do melhor coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970). O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe pode ser utilizado para avaliar a capacidade de modelos hidrodinâmicos descreverem descargas em escoamentos naturais. Moriasi *et al* (2007) afirma que o coeficiente de Nash-Sutcliffe também pode ser utilizado para analisar outros resultados além de dados de descarga, como, por exemplo, parâmetros de qualidade da água e níveis d'água. Este coeficiente pode ser definido como uma razão entre o erro quadrático médio e a variância das medições de campo.

O coeficiente pode variar de $- \alpha$ a 1 e quanto mais próximo de 1 mais acurado é o modelo. Um resultado de eficiência igual a zero indica que o modelo tem a mesma acurácia da média da série de dados, e menor que zero o modelo é pior que a média.

Para cada valor de rugosidade foi calculado um valor deste coeficiente. A Figura 35 apresenta a relação entre Nash-Sutcliffe e os diferentes coeficiente de rugosidade modelados. A rugosidade equivalente de 0.06 m obteve erro aceitável e o menor erro dentre os outros, e por isso foi a rugosidade utilizada no modelo.

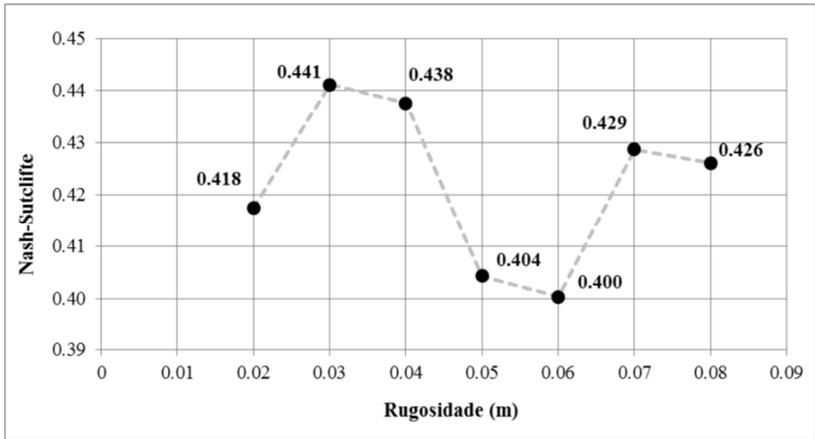


Figura 35: Nash-Sutcliffe x Rugosidade.

A Figura 36 apresenta a série de nível astronômica medida e simulada. As diferenças entre os níveis medidos e simulados são considerados aceitáveis.

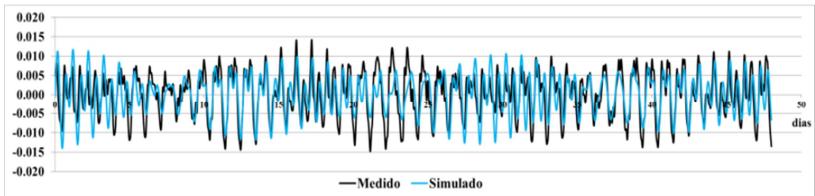


Figura 36: Série astronômica medida x simulada - Período de Calibração.

Este mesmo procedimento foi realizado também por Rocha (2007). No entanto o valor de rugosidade no canal da Barra que obteve a melhor resposta foi 0.032 m. Já nos trabalhos de Godoy (2009), Silva (2010) e Odreski (2012) o valor de rugosidade adotado para o canal foi de 0.04 m.

Como mencionado anteriormente, o período de simulação final (22/12/2012 à 25/02/2013) incluiu a componente meteorológica além da maré astronômica. A Figura 37 apresenta a série de nível medida em campo e a série de nível simulada. Observa-se que o modelo apresenta resposta plausível quanto ao nível de água.

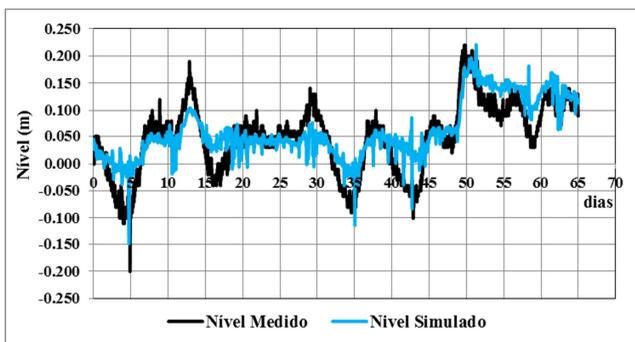
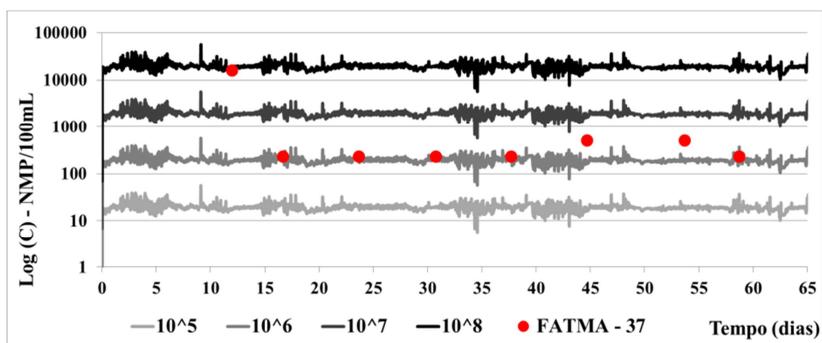


Figura 37: Comparação entre nível medido e simulado.

6.2.2 Calibração das concentrações de entrada de *E. coli*

Os ajustes das concentrações de *E. coli* impostas em cada um dos pontos de lançamento de efluente sanitário foram realizados a partir dos dados de balneabilidade fornecidos pela Fundação do Meio Ambiente – FATMA. Para isso foram realizadas simulações com concentrações desde $10^5/100\text{ml}$ de esgoto até $10^8/100\text{ml}$ de esgoto já com o modelo hidrodinâmico calibrado. Os resultados obtidos no modelo foram comparados aos resultados de campo em cada um dos pontos de monitoramento da FATMA.

A Figura 38 ilustra essa comparação entre os resultados monitorados e simulados no ponto 37 da FATMA. Este procedimento foi realizado para cada um dos pontos monitorados pela FATMA e são mostrados entre a Figura 38 à Figura 39.



*Figura 38: Concentração de *E. coli* - Simulada x Medida no ponto 37 da FATMA.*

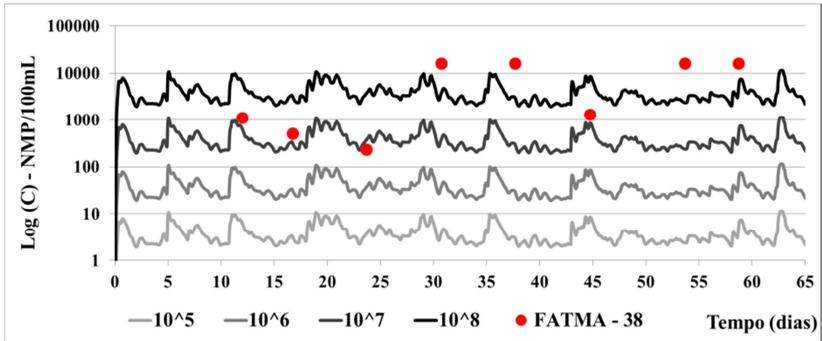


Figura 39: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 38 da FATMA.

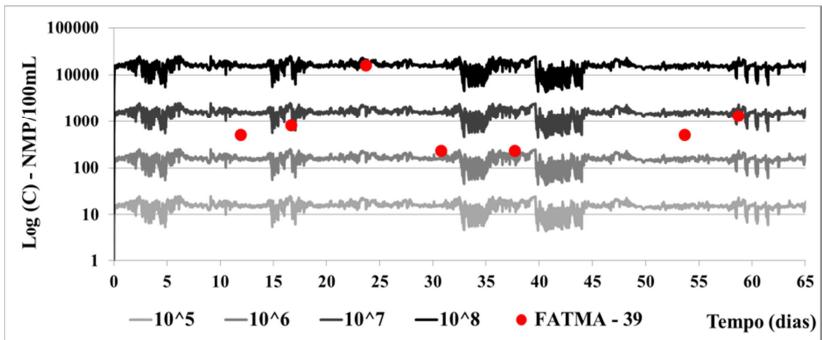


Figura 40: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 39 da FATMA.

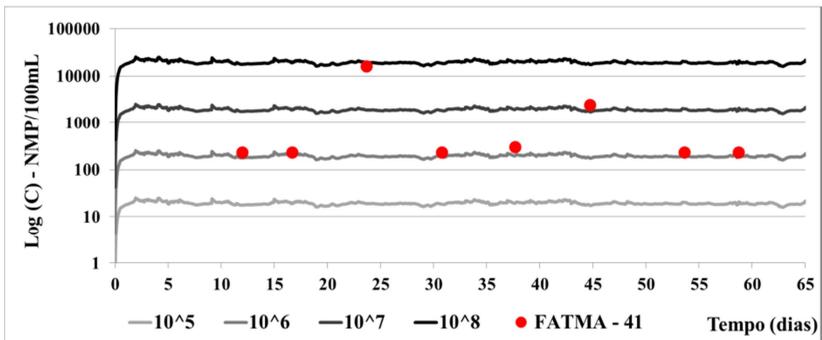


Figura 41: Concentração de E. coli - Simulada x Medida no ponto 41 da FATMA.

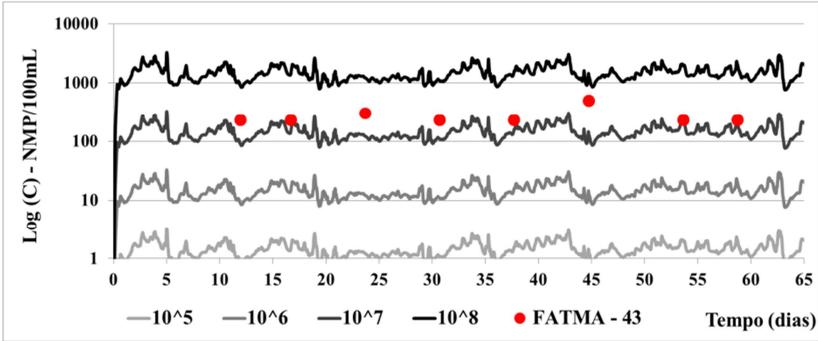


Figura 42: Concentração de *E. coli* - Simulada x Medida no ponto 43 da FATMA.

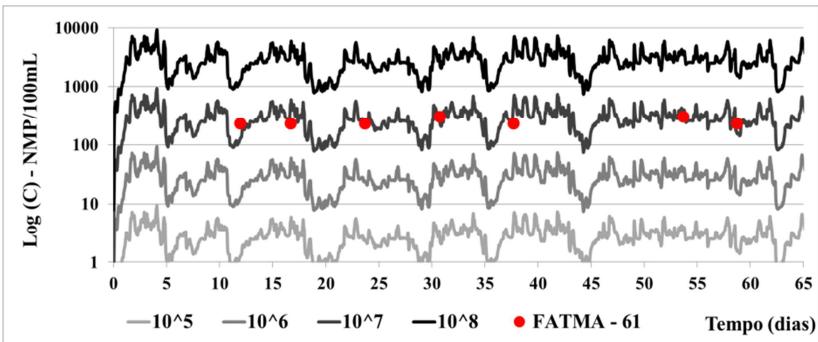


Figura 43: Concentração de *E. coli* - Simulada x Medida no ponto 61 da FATMA.

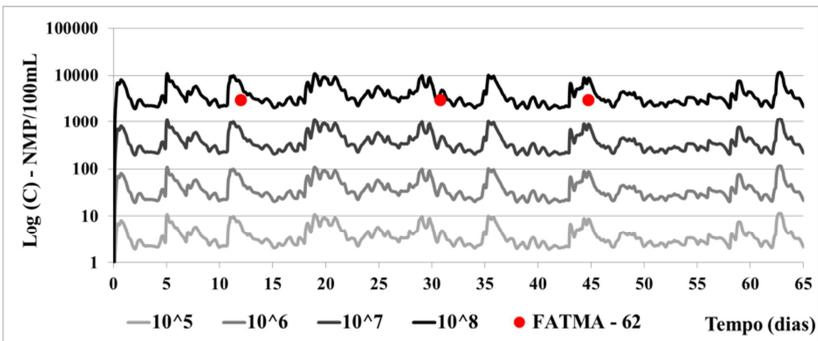


Figura 44: Concentração de *E. coli* - Simulada x Medida no ponto 62 da FATMA.

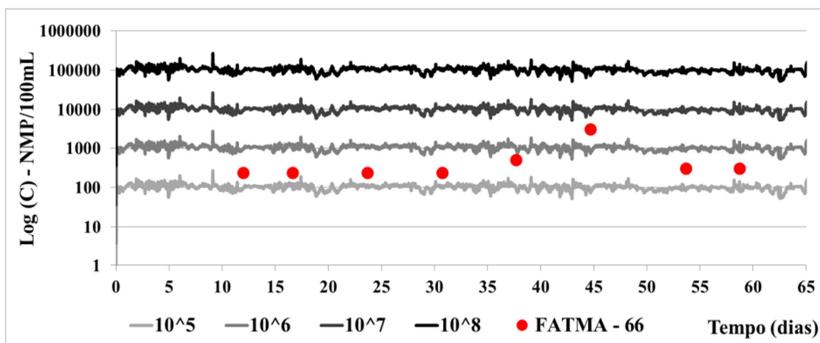


Figura 45: Concentração de *E. coli* - Simulada x Medida no ponto 66 da FATMA.

A comparação entre as concentrações simuladas e medidas foi feita através do cálculo do erro quadrático médio entre o logaritmo do resultado da medição e da simulação, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15: Erro Quadrático Médio (EQM) das simulações de qualidade da água

Ponto	EQM das diferentes concentrações					Conc. com menor EQM (<i>E. coli</i> /100mL)
	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁸	
37	6.1	2.3	0.5	0.8	3.0	10 ⁶
38	15.8	9.0	4.2	1.4	0.7	10 ⁸
39	7.5	3.1	0.8	0.4	2.1	10 ⁷
41	6.8	2.8	0.7	0.7	2.7	10 ⁶
43	10.9	5.3	1.7	0.1	0.5	10 ⁷
61	8.8	3.9	1.0	0.1	1.1	10 ⁷
62	13.6	7.2	2.9	0.5	0.1	10 ⁸
66	2.8	0.5	0.3	2.1	5.9	10 ⁶

A partir do menor valor de EQM foi definida a concentração de *E. coli* nas proximidades de cada ponto de monitoramento da FATMA. A Tabela 16 apresenta as concentrações de *E. coli* inseridas no modelo.

Tabela 16: Concentrações de E. coli inseridas no modelo.

Número	Vazão de esgoto (m³/s)	Valores de E. coli para cada 100mL de esgoto
1	0.0205	10 ⁶
2	0.0010	10 ⁶
3	0.0011	10 ⁶
4	0.0008	10 ⁶
5	0.0041	10 ⁸
6	0.0150	10 ⁸
7	0.0113	10 ⁶
8	0.0016	10 ⁶
9	0.0020	10 ⁶
10	0.0025	10 ⁶
11	0.0019	10 ⁶
12	0.0102	10 ⁶
13	0.0037	10 ⁶
14	0.0013	10 ⁷
15	0.0028	10 ⁶
16	0.0088	10 ⁶
17	0.0004	10 ⁶
18	0.0008	10 ⁶
19	0.0021	10 ⁶
20	0.0127	10 ⁶

6.2.3 Aquecimento

O aquecimento do modelo hidrodinâmico foi de 17 dias para as simulações de calibração hidrodinâmica. Este período foi suficiente para garantir a estabilidade das condições hidrodinâmicas nesta simulação.

No período de simulação final, onde se analisou algumas propriedades da água, como salinidade e *E. coli*, foi necessário um tempo maior para garantir a estabilização dessas propriedades. Estes períodos de aquecimento estão descritos no item 5.2.

As figuras Figura 46 à Figura 48 apresentam a variação de nível no período de aquecimento e da simulação final em diferentes pontos no interior da laguna. Nota-se que a estabilização do nível ocorre já nos 15 dias.

A seguir, nas figuras Figura 49 à Figura 51, são apresentadas as variações de salinidade nos períodos de aquecimento da simulação final.

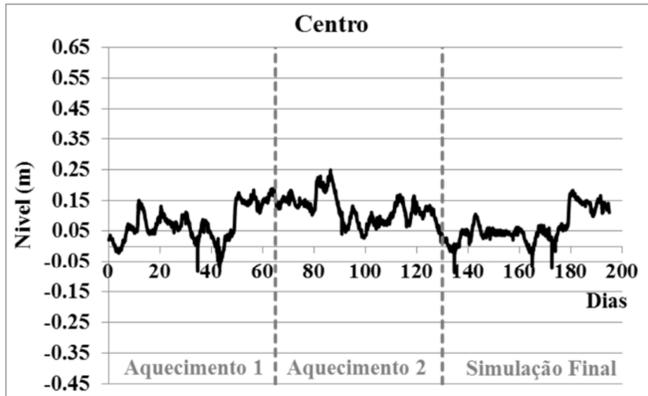


Figura 46: Variação do nível no período de aquecimento - Região Central.

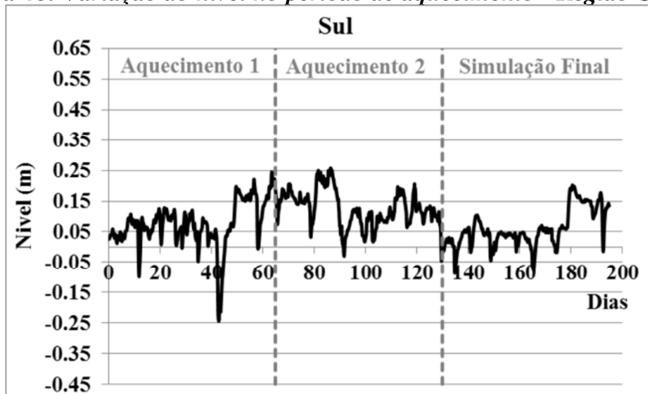


Figura 47: Variação do nível no período de aquecimento – Região Sul.

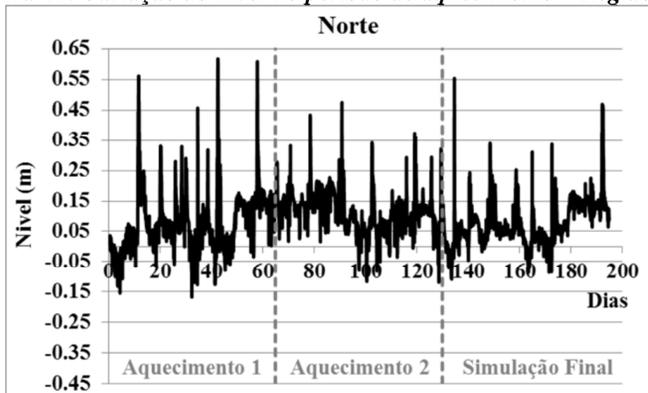


Figura 48: Variação do nível no período de aquecimento – Região Norte.

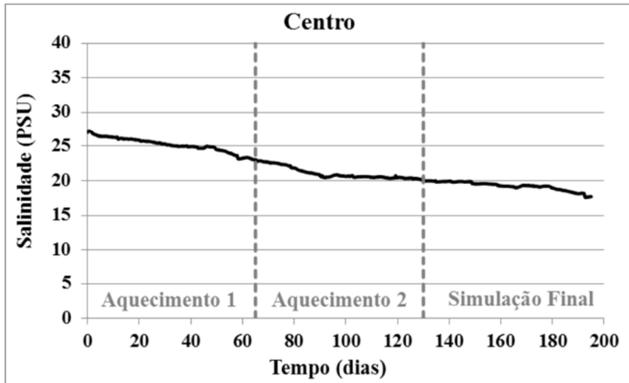


Figura 49: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Central.

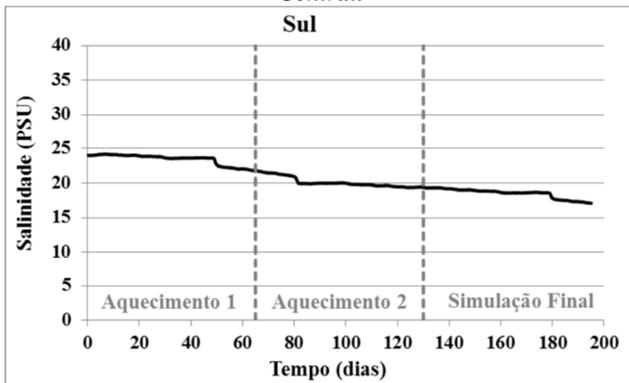


Figura 50: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Sul.

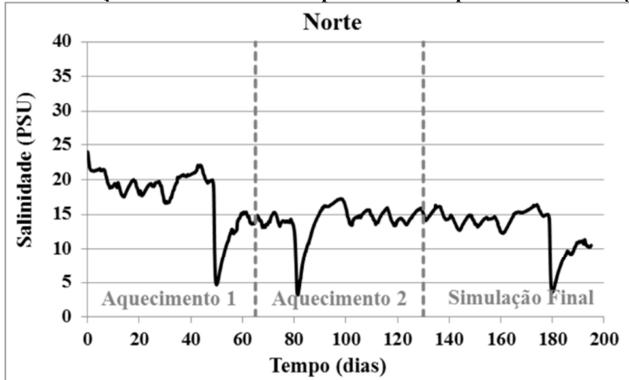


Figura 51: Variação da salinidade no período de aquecimento – Região Norte.

6.2.4 Resultados

Após o aquecimento e a calibração do modelo foram obtidos campos horários de níveis, de correntes, salinidade e concentração de *E. coli* ao longo da extensão do corpo lagunar para o período de simulação final, de 22/12/2012 a 25/02/2013.

A fim de avaliar a influência da contribuição hidrológica e antrópica sobre os padrões hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição e da qualidade da água foram analisados quatro parâmetros físicos: o nível, a velocidade, salinidade e concentração.

A seguir são apresentados os resultados do modelo hidrodinâmicos e de qualidade de água para os quatro parâmetros analisados: o nível, a velocidade, a salinidade e a concentração de *E. coli*. Primeiramente são apresentadas as variações espaciais das médias desses parâmetros para todo o período de simulação final, entre 22/12/2012 à 25/02/2013, definidos como os campos residuais. Estes resultados foram utilizados como os campos de referência para a análise dos diversos cenários.

A análise dos resultados dos cenários foi feita através de animações para verificar variações espaciais e temporais. Além disso, a partir dos campos horários foram calculados os campos médios dos parâmetros analisados para cada um dos cinco cenários descritos anteriormente no item 5.2.2.

Posteriormente, são apresentadas as comparações entre a média de cada um dos cenários com a média de todo o período simulado, o que possibilita avaliar a influência de diferentes condições ambientais sobre os padrões hidrodinâmicos, de dispersão e decaimento de *E. coli*. Esta comparação dos resultados entre a média de cada cenário e a média de todo o período se deu através da diferença ou da razão entre os parâmetros, tal como apresentados abaixo.

Nível

A comparação do nível médio de água foi realizada através da diferença entre o campo de referência e os diversos cenários.

$$WLx = WLcx - WLp$$

Onde WLx é a diferença entre o nível médio do período do cenário analisado ($WLcx$) e o nível médio de todo o período de simulação (WLp). X identifica o número do cenário.

Velocidade

A comparação entre os diferentes campos médios de velocidade dos diversos cenários com o campo de referência se deu através da razão entre as intensidades.

$$UV_x = \frac{UV_{cx}}{UV_p}$$

Onde UV_x é a razão entre a intensidade média de velocidade do período do cenário analisado (UV_{cx}) e a intensidade média de velocidade de todo o período de simulação (UV_p). X identifica o número do cenário.

Com o objetivo de auxiliar a discussão dos resultados apresenta-se a seguir, na Tabela 17, os valores médios de maré na fronteira externa e o somatório de vazão das bacias hidrográficas para cada um dos cenários e para todo o período de simulação. Cada cenário representa uma condição ambiental diferenciada conforme já discutido no item 5.2.2.

Tabela 17: Média das forçantes dos cenários ambientais impostos no modelo.

Cenário	Maré meteorológica (m)			Vazão fluvial
	Máxima	Mínima	Média	(m ³ /s)
Total*	0.6	-0.064	0.04	1.84
1	0.42	0.11	0.29	2.69
2	0.14	-0.13	0	0.57
3	0.05	-0.46	-0.17	0.31
4	0.27	-0.01	0.14	0.86
5	0.14	0,01	0.06	8.63

*Valores médios para o período total da simulação: 22/12/2012 à 25/02/2013.

O Cenário 1 caracteriza-se pelo nível externo elevado e vazão fluvial elevada, com aumento de 46% em relação a vazão do cenário de referência e 625% em relação ao nível médio do cenário de referência conforme a tabela acima.

O Cenário 2 apresenta nível externo nulo, com valor em torno da média e vazão reduzida, redução de 69% da vazão média do cenário de referência. Já o Cenário 3 apresenta nível externo médio 1175% inferior ao cenário de referência e vazão também reduzida.

O Cenário 4 destaca-se pelo elevado nível externo, com aumento de 250%, e baixas vazões. Já o Cenário 5 as vazões estão elevadas, com aumento de 369%, enquanto que o nível externo é próximo à média de referência.

6.2.4.1 *Nível*

Neste item é discutida a variação média do nível em relação à profundidade. O termo “nível” não se refere à altura total da lâmina d’água e nem mesmo a cota da água, mas se refere a variação do nível de água em relação a profundidade da célula de cálculo.

A variação espacial do nível médio de todo o período de simulação, com início em 22/12/2012 à 25/02/2013 é apresentada na Figura 52. O nível médio na região simulada variou de -0,004m a 0,09m.

O nível médio negativo apresentou frequência de 25% e estes valores estão dispostos na área marítima. Os níveis entre 0 a 0,06m se localizam no canal que liga a laguna ao mar e representam 8% do campo modelado. Os níveis de água no canal se elevam à medida que se aproximam da região interna da laguna, com até 0,069m na desembocadura interna.

A variação espacial de nível médio interno na laguna foi de 2,3 cm. Os maiores níveis médios estão na região norte da laguna, onde se localizam as maiores sub-bacias, como do rio João Gualberto e rio Vermelho.

A porção sul da laguna apresentou certa homogeneidade espacial, em torno de 0,07m. A laguna do meio, segundo a classificação apresentada na Figura 9, apresentou nível médio entre 0,066 a 0,073. Este intervalo de valor teve frequência de 44%.

Na região norte o nível médio foi de 0,073 a 0,089m, variação de 1,6 cm. Esta região é a que apresenta maior variação espacial de nível, pois representa aproximadamente 53% da área interna simulada e esta região representa 70% da variação interna de nível médio de toda a laguna que se aproxima a 2,3 cm.

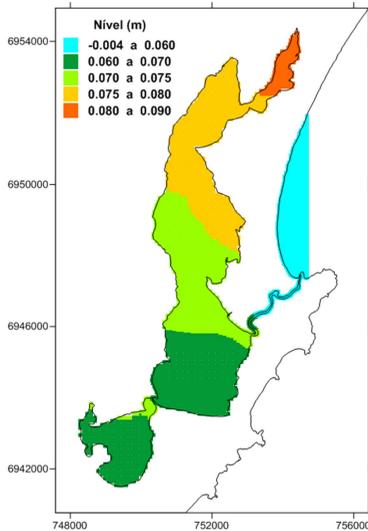


Figura 52: Campo de nível médio do período de simulação.

O gradiente de nível médio entre a região Norte e a região Centro Sul é 0,13 cm/km no sentido Norte para o Sul. Já o gradiente de nível médio entre a região Sul e a região Centro Sul é 0,09 cm/km no sentido de Sul para Norte. No canal o gradiente de nível é de 2,37 cm/km no sentido interno para externo da laguna.

Os gradientes de nível médio de todo o período simulado, cenário de referência, indicam que na média o deslocamento da água acontece da região sul para a região próxima ao canal, da região norte para a região próxima ao canal e que a laguna tem a tendência de exportar água para a região marítima.

6.2.4.1.1 Cenário 1

O Cenário 1 é caracterizado por um evento meteorológico responsável pela elevação do nível maregráfico e da vazão fluvial. O vento atuante é do quadrante sul. Neste cenário o nível interno da laguna está em ascensão.

As figuras Figura 53 à Figura 57 apresentam os campos de nível ao longo do Cenário 1 para os tempos que correspondem aos valores máximo e mínimos de maré. O nível interno na laguna se eleva ao longo do tempo e o aumento ocorre de maneira uniforme na região central e

região norte. Já a porção sul da laguna apresenta nível e variação do nível diferente do restante deste corpo hídrico.

Observa-se também as oscilações diurnas e semidiurnas da maré na fronteira aberta e no canal. O pico de maré nestas regiões ocorre às 8hs do dia 03 de janeiro de 2013.

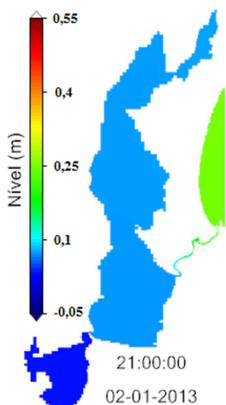


Figura 53: Campo de nível C1- 0 hr.

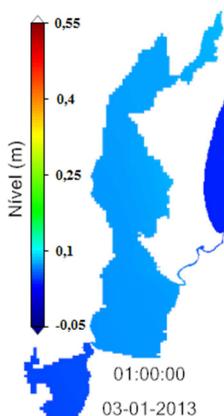


Figura 54: Campo de nível C1- 4hrs.

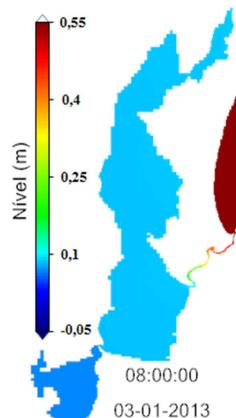


Figura 55: Campo de nível C1- 11hrs.

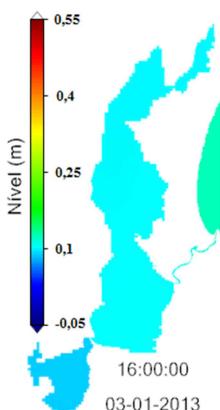


Figura 56: Campo de nível C1 - 19hrs.

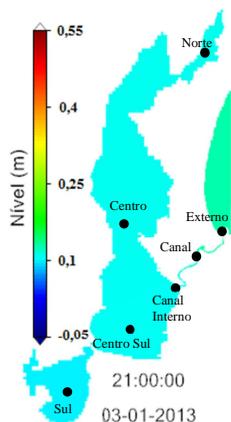


Figura 57: Campo de nível C1 - 24hrs.

Com o intuito de complementar o exposto acima, a Figura 49 ilustra a série temporal de nível ao longo do período em diferentes

pontos da laguna. A localização dos pontos está identificada na Figura 57.

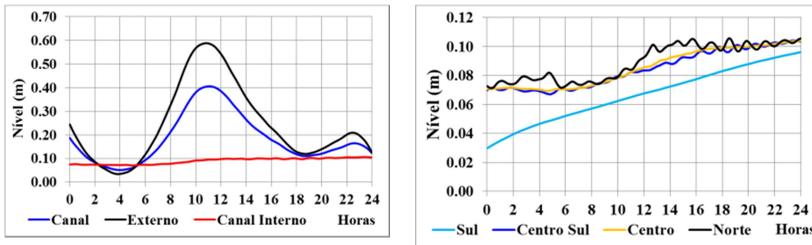


Figura 58: Nível de água ao longo do Cenário 1 nas diferentes regiões da laguna.

A amplitude do nível na região externa da laguna foi de 0,55m no período correspondente ao Cenário 1, com mínima de 0,036m e máxima de 0,59m. Observa-se uma redução da amplitude máxima da maré de 32% entre os pontos Externo e Canal e 85% entre os pontos Externo e Canal Interno. Já nas marés mínimas não há variação significativas entre os diferentes pontos do canal. O nível médio entre a região externa (0,24m) e interna do canal (0,09m) apresenta gradiente de 5,1 cm/km e o deslocamento da água ocorre da região externa para a região interna da laguna. Sendo assim, neste cenário a laguna importa água da região marítima. No ponto interno do canal não há mais oscilações horárias, no entanto, há um aumento de 0,07m do início até o 0,10m no final do período.

A região sul, diferentemente das demais regiões internas da laguna, não apresenta oscilações de níveis horárias. No entanto, o nível de água nesta região é influenciado principalmente pela descarga hidrológica e pela variação meteorológica da maré presente no Cenário 1. No início do período o nível na laguna sul era de 0,03 m enquanto que no final chegou a 0,09 m, aumento de 6 cm em 24hrs.

As regiões Centro sul e Central apresentaram comportamento semelhante de nível. No entanto, a região Centro Sul apresenta oscilação horária da maré um pouco superior à região Central uma vez que a região Central Sul é mais rasa.

Devido às baixas profundidades na região Norte esta sofre grande variação horária de nível. Além disso, a região norte sofreu oscilação de nível em função da componente hidrológica. Ao final do período toda a laguna apresentou nível praticamente homogêneo, com diferença de apenas 1 cm entre a região norte e sul.

O nível médio na região sul é de 0,07 m enquanto que na região norte é 0,09m e na região centro sul é 0,08 m. O gradiente de nível entre a região Norte e Centro Sul é de 0,05 cm/km, ou seja, ocorre no mesmo sentido do cenário de referência, no sentido norte para sul, porém com menor intensidade. O gradiente de nível entre a região Sul e Centro Sul é de -0,56 cm/km com deslocamento no sentido oposto ao do cenário de referência, de norte para sul, e com gradiente bastante superior ao nível de referência.

O nível maregráfico elevado neste cenário faz com que se crie um gradiente negativo e haja entrada de água da região externa para a região interna e todo o deslocamento na região interna ocorra de norte para sul.

A Figura 59 apresenta o campo de diferença de nível médio de todo o período simulado e o nível médio do Cenário 1. A maré média imposta durante a simulação do período correspondente ao Cenário 1, C1, é 25 cm superior em relação à maré média imposta para todo o período de simulação. A vazão fluvial média imposta no período C1 é 2,26 m³/s enquanto que a vazão média de todo o período simulado é de 1,84 m³/s. A medição de nível interno apresentou nível superior de 0,07 m no cenário C1 em relação à média de todo o período.

Os resultados do modelo mostram que o nível médio em C1 foi superior aos valores de referência (campo médio de nível para todo o período de simulação) tanto na região marítima, com diferença de 0,024m, como na região interna da laguna, com diferença superior de 0,02m em relação ao campo médio de referência. Esta diferença de nível de 2 cm superior em toda a região interna da laguna corresponde a um volume de 416.318 m³ de água a mais no Cenário 1.

A região Centro Sul, apresentou diferença de nível ainda maior devido a proximidade com a desembocadura interna do canal. Ao longo do canal essa diferença aumenta até chegar à desembocadura externa.

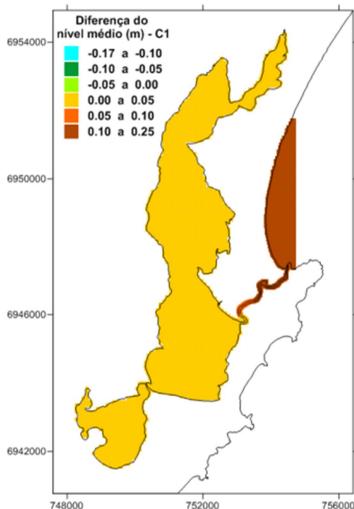


Figura 59: Campo da diferença de nível médio - C1.

6.2.4.1.2 Cenário 2

O Cenário 2 apresenta nível maregráfico médio nulo e vazões fluviiais reduzidas. O nível interno na laguna diminui ao longo do tempo e algumas regiões mostraram oscilações horárias, como a região norte. A Figura 60 apresenta a variação temporal do nível nos diversos pontos da área de estudo. Os pontos são apresentados na Figura 57.

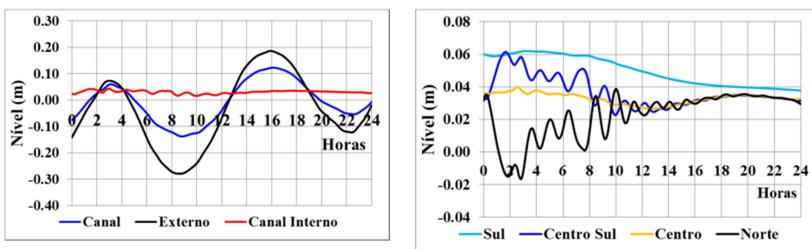


Figura 60: Nível de água ao longo do Cenário 2 nas diferentes regiões da laguna.

Na região externa à laguna o nível oscilou entre -0,28 m e 0,18 m no período do Cenário 2 e com média de -0,04 m. O nível entre a região externa e a região média do canal aumentou 54% no pico inferior de nível e reduziu 33% no pico superior. Já entre a região externa e interna

do canal a redução do nível máximo foi de 83% e o aumento do nível mínimo foi de 107%.

O nível médio entre a região externa (-0,04 m) e interna do canal (0,03 m) apresenta gradiente de 2,3 cm/km e o deslocamento da água ocorre da região interna para a região externa da laguna, ou seja, a laguna exporta água para a região marítima quando o nível maregráfico é nulo e vazão fluvial é baixa.

O nível na laguna sul reduziu gradativamente e não há variação de nível devido as componentes de maré de curtos períodos, como aqueles inferiores a 1 hora. As regiões norte e centro sul apresentam oscilações de alta frequência devido à batimetria destas duas regiões.

O nível médio na região sul é de 0,05 m enquanto na região norte é 0,02 m e na região centro sul é 0,04 m. O gradiente de nível entre a região Norte e Centro Sul é de -0,14 cm/km, ou seja, ocorre no sentido oposto ao cenário de referência, no sentido sul para norte. Isto ocorre devido às baixas vazões presentes neste período. O gradiente de nível entre a região Sul e Centro Sul é de 0,41 cm/km com deslocamento no mesmo sentido do cenário de referência, de sul para norte, porém com gradiente bastante superior ao nível de referência.

O nível maregráfico nulo e as baixas vazões presentes neste cenário fazem com que se crie gradiente positivo e haja saída de água da região central e região sul para fora da laguna e na região centro sul para a região norte o deslocamento de água ocorreu para o extremo norte.

A Figura 61 apresenta a diferença de nível médio entre o Cenário 2 e a média de todo o período de simulação, cenário de referência. Enquanto que no período correspondente ao Cenário 1 a maré e a vazão média imposta foram superiores a média de todo o período simulado, no Cenário 2 a maré média imposta no modelo neste período de simulação foi semelhante à média da maré do cenário de referência e a vazão média das bacias hidrográficas foi 0,85 m³/s a mais que o cenário de referência.

Observa-se que tanto a área interna como a área externa apresentam níveis inferiores ao cenário de referência. A diferença chega no máximo a 5 cm na região externa e interna da laguna, com exceção do extremo norte, que apresentou diferença negativa ainda maior, de até 7 cm inferiores ao cenário de referência. A diferença inferior de nível médio de 5 cm equivale a uma redução no volume de água de 1.040.796 m³.

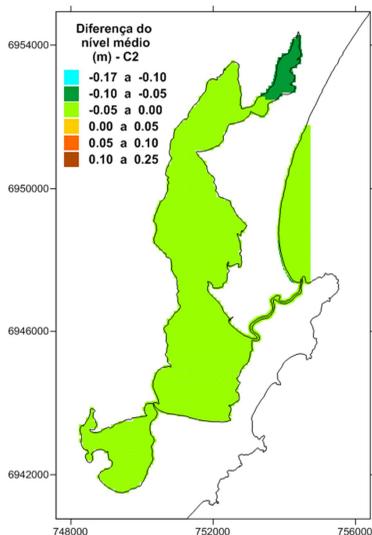


Figura 61: Campo da diferença de nível médio - C2.

6.2.4.1.3 Cenário 3

No Cenário 3 a vazão fluvial e o nível maregráfico são baixos durante todo o período. Este cenário se assemelha ao Cenário 2. No entanto, a maré no Cenário 3 é negativa enquanto que a maré no Cenário 2 é nula, próxima ao valor médio.

A Figura 62 ilustra a série temporal de nível ao longo do Cenário 3 em diferentes pontos da laguna identificados anteriormente.

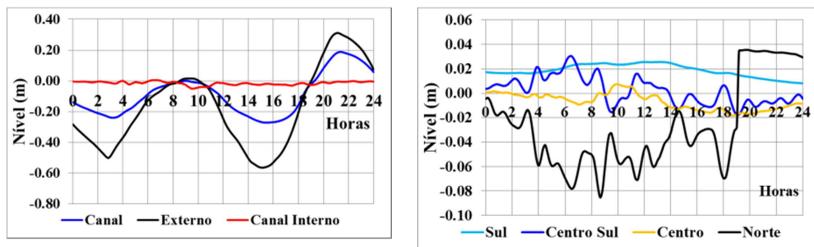


Figura 62: Nível de água ao longo do Cenário 3 nas diferentes regiões da laguna.

A amplitude do nível na região externa da laguna foi de 0,87 m neste cenário, com mínima de -0,56 m e máxima de 0,31 m. O nível entre a região externa e a região média do canal aumentou 51% no pico

inferior de nível e reduziu 38% no pico superior. Já entre a região externa e interna do canal a redução do nível máximo foi de 103% e o aumento do nível mínimo foi de 95%.

O nível médio entre a região externa (-0,17m) e interna do canal (-0,02m) apresenta gradiente de 5,2 cm/km e o deslocamento da água ocorre da região interna para a região externa da laguna, ou seja, a laguna exporta água para a região marítima quando o nível maregráfico é negativo e vazão fluvial é baixa.

O nível médio na região sul é de 0,02 m enquanto que na região norte é 0,03 m e na região centro sul é 0 m. O gradiente de nível entre a região Norte e Centro Sul é de -0,30 cm/km, ou seja, ocorre no sentido oposto ao cenário de referência, no sentido sul para norte. Isto ocorre devido às baixas vazões presentes neste período. O gradiente de nível entre a região Sul e Centro Sul é de 0,51 cm/km com deslocamento no mesmo sentido do cenário de referência, de sul para norte, porém com gradiente bastante superior ao nível de referência.

O nível maregráfico negativo e as baixas vazões presentes neste cenário fazem com que se crie um gradiente positivo e haja saída de água da região central e região sul para fora da laguna e na região centro sul para a região norte o deslocamento de água ocorreu para o extremo norte. Observa-se ainda que os gradientes de nível no canal e na região interna da laguna no Cenário 3 apontam para o mesmo sentido de escoamento do Cenário 2, porém os valores são superiores no Cenário 3, aumentando o força do deslocamento que ocorre da região sul para a região centro sul, da região norte para a região centro sul e da região interna da laguna para a região externa.

A Figura 63 apresenta o campo de diferença de nível médio para todo o período simulado e o nível médio do Cenário 3. No período de simulação correspondente ao Cenário 3 foi imposto maré média de -0,17 m enquanto que em todo o período simulado a maré média foi de 0,04 m, diferença de nível médio -0,13 m no C3. A vazão média imposta no C3 é semelhante à vazão média imposta no C2, com diferença de 0,26 m³/s superior no Cenário 3. No entanto, a vazão média imposta no Cenário 3 é 1,53 m³/s inferior ao cenário de referência.

Por apresentar maré e vazão inferiores ao cenário de referência as diferenças de nível interno e externo foram negativas no Cenário 3. A região sul foi aquela que apresentou menor diferença, com níveis 5 cm abaixo do valor de referência. Já a região centro sul, centro e centro norte tiveram diferenças de até 10 cm, sendo que as maiores diferenças se encontram mais a norte. Estes valores possuem 57% de frequência.

Na região extremo norte a diferença de nível chega a -15 cm próximo à foz do rio João Gualberto. Isto ocorre porque no cenário de referência há sobre elevação do nível nesta região devido à descarga de maiores vazões. Já na fronteira aberta a diferença de nível é ainda maior, chegando a -17 cm.

A diferença negativa do nível médio da laguna em relação ao cenário de referência, 10 cm, equivale aproximadamente a uma redução de 1.873.432 m³ de volume de água a menos na laguna.

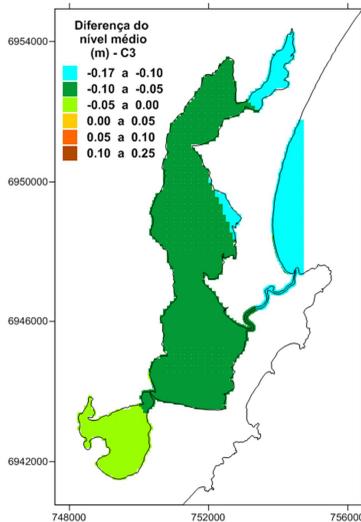


Figura 63: Campo da diferença de nível médio – C3.

6.2.4.1.4 Cenário 4

O Cenário 4 apresenta baixas vazões e com o nível maregráfico alto. A Figura 64 apresenta a variação temporal do nível nos diversos pontos da área de estudo identificados anteriormente.

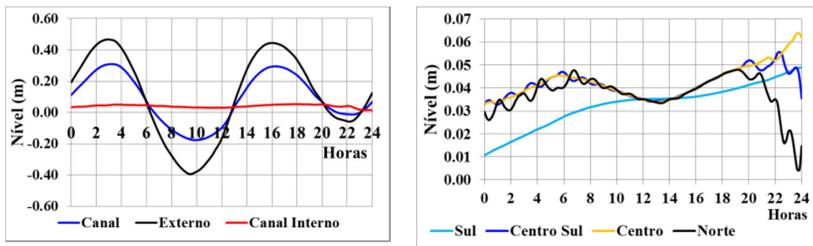


Figura 64: Nível de água ao longo do Cenário 4 nas diferentes regiões da laguna.

Na região externa à laguna o nível oscilou entre -0,38 m e 0,46 m no período do Cenário 4 e com média de 0,11 m. A redução da amplitude máxima do nível entre a região externa e no canal foi de 56% neste cenário. O nível entre a região externa e a região média do canal aumentou 56 % no pico inferior de nível e reduziu 35% no pico superior. Já entre a região externa e interna do canal a redução do nível máximo foi de 107 % e o aumento do nível mínimo foi de 91%.

O nível médio entre a região externa (0,11 m) e interna do canal (0,04m) apresenta gradiente de 2,3 cm/km e o deslocamento da água ocorre da região externa para a região interna da laguna. Sendo assim, neste cenário a laguna importa água da região marítima assim como acontece no Cenário 1, ambos os cenários com nível maregráfico elevado.

O nível médio na região sul é de 0,033 m enquanto que na região norte é 0,037m e na região centro sul é 0,042 m. O gradiente de nível entre a região Norte e Centro Sul é de -0,04 cm/km, ou seja, ocorre no sentido oposto ao cenário de referência, no sentido sul para norte, e com menor intensidade. O gradiente de nível entre a região Sul e Centro Sul é de -0,28 cm/km com deslocamento também no sentido oposto ao do cenário de referência, de norte para sul, e com gradiente bastante superior ao nível de referência.

O nível maregráfico elevado presente neste cenário faz com que se crie um gradiente negativo e haja entrada de água da região externa para a região interna e devido às baixas vazões o escoamento se dá a partir da desembocadura interna do canal para a região sul e para a região norte.

A Figura 65 apresenta a diferença de nível médio entre o Cenário 4 e a média de todo o período de simulação, cenário de referência.

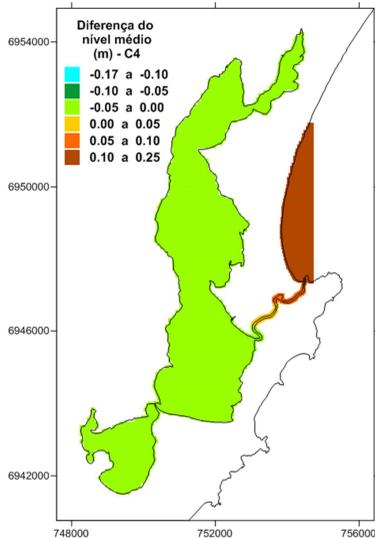


Figura 65: Campo da diferença de nível médio – C4.

No período de simulação correspondente ao Cenário 4 foi imposto maré média de 0,14 m enquanto que em todo o período simulado a maré média foi de 0,04 m, diferença de nível médio 0,1m superior no C4. A vazão média imposta no C4 é 1 m³/s inferior à vazão média imposta no cenário de referência.

Conforme a Figura 65 o nível na região externa modelada e no canal se mostraram superiores ao cenário de referência. Apesar disso, a região interna da laguna o nível foi inferior, em até 5 cm, em toda a laguna. Este fato deve-se ao fato de que as vazões deste cenário são inferiores ao cenário de referência. Este cenário aponta a relevância da componente hidrológica sobre a hidrodinâmica da laguna.

A diferença inferior de nível médio entre o Cenário 4 e o cenário de referência é de 0,03m, o que equivale a um volume de 624.477 m³ a menos no Cenário 4.

6.2.4.1.5 Cenário 5

O Cenário 5 destaca-se pela presença de elevadas vazões e nível maregráfico baixo. A Figura 66 ilustra a série temporal de nível ao longo do Cenário 5 em diferentes pontos da laguna já identificados anteriormente.

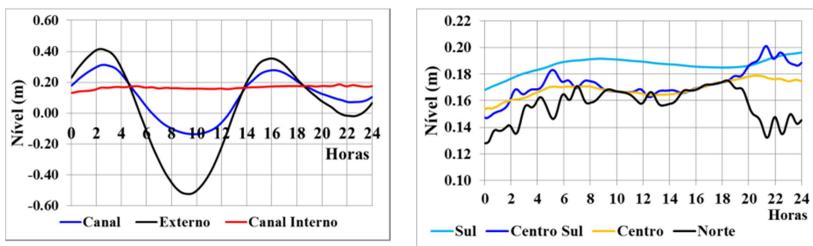


Figura 66: Nível de água ao longo do Cenário 5 nas diferentes regiões da laguna.

A amplitude do nível na região externa da laguna foi de 0,95m no período correspondente ao Cenário 5, com mínima de -0,51 m e máxima 0,41 m. O nível entre a região externa e a região média do canal aumentou 75% no pico inferior. Já entre a região externa e interna do canal o aumento do nível mínimo foi de 131%.

O nível médio entre a região externa (0,034 m) e interna do canal (0,166 m) apresenta gradiente de 4,4 cm/km e o deslocamento da água ocorre da região interna para a região externa da laguna, ou seja, a laguna exporta água para a região marítima também quando o nível maregráfico é nulo e vazão fluvial é bastante elevada.

Todas as regiões apresentaram acréscimo de nível significativo logo nas primeiras 6 horas do período correspondente ao Cenário 5. Isto se deve ao pico do índice pluviométrico que ocorreu 12 horas antes do início do período deste cenário. Passadas às 6 horas a partir do início da simulação os níveis se estabilizam em toda a laguna. Após este período os níveis na região extremo norte, próximo ao rio João Gualberto começam a declinar devido término do evento meteorológico e as águas começam a se deslocar para a região central da laguna.

O nível médio na região sul é de 0,19 m enquanto que na região norte é 0,16m e na região centro sul é 0,17 m. O gradiente de nível entre a região Norte e Centro Sul é de -0,16 cm/km, ou seja, ocorre no sentido oposto ao cenário de referência, no sentido sul para norte. O gradiente de nível entre a região Sul e Centro Sul é de 0,44 cm/km com deslocamento no mesmo sentido do cenário de referência, de sul para norte, porém com gradiente bastante superior ao nível de referência.

O nível maregráfico nulo e as vazões bastante elevadas presentes neste cenário fazem com que se crie gradiente positivo e haja saída de água da região central e região sul para fora da laguna e na região centro sul para a região norte o deslocamento de água ocorreu para o extremo norte. Os gradientes de nível no canal e na região interna da laguna no Cenário 5 são inferiores ao Cenário 3 e superiores ao Cenário 2.

A Figura 67 apresenta o campo de diferença de nível médio de todo o período simulado e o nível médio do Cenário 5. No período de simulação correspondente ao Cenário 5 foi imposto maré média de 0,056m enquanto que em todo o período simulado a maré média foi de 0,04m, diferença de nível médio 0,016m no C5. A vazão média imposta no C5 é bastante superior ao cenário de referência, em torno de 6,79 m³/s superior; e também bastante superior ao outro cenário com vazão elevada, o Cenário 1, com diferença de vazão de 5,94m³/s.

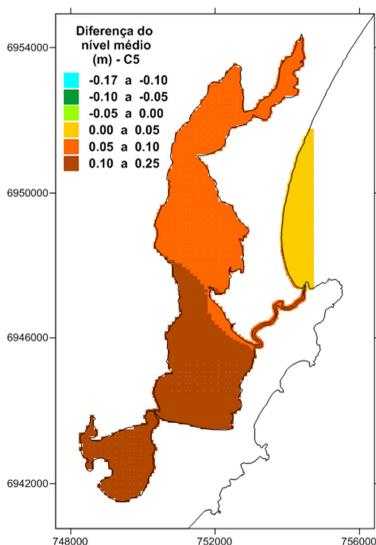


Figura 67: Campo da diferença de nível médio – C5.

Apesar da maré média imposta neste cenário ser inferior aos Cenários C1 e C4, período os níveis na região interna da laguna foram bastante superiores ao cenário de referência devido aos altos índices pluviométricos do período.

Na região do extremo norte a diferença de nível é de 7 cm e esta diferença vai se tornando cada vez maior no sentido sul. Na laguna sul a diferença chega a 12 cm.

A diferença positiva do nível médio da laguna em relação ao cenário de referência, 8 cm, equivale aproximadamente a um aumento de 1.665.237 m³ de volume de água a mais na laguna.

6.2.4.2 Velocidade

O padrão de velocidade das águas na laguna possui variações espaciais bem definidas em função da batimetria de cada uma das regiões. A Figura 68 mostra a intensidade média das correntes para todo o período de simulação.

A região central da laguna sul e a região centro sul da laguna sul apresentam valores bastante baixos e algumas regiões inclusive com velocidades nulas, como a região oeste da laguna sul e o extremo sul da laguna. A região centro sul também apresentou velocidades nulas, principalmente a extremidade sul. Na Figura 68 estão destacados os locais onde as velocidades foram praticamente nulas.

A região centro norte apresenta uma setorização da velocidade devido as maiores profundidades na parte oeste. A parte central leste, onde as profundidades são baixas, apresentou elevadas velocidades com valores de até 1,4 cm/s. As maiores velocidades médias encontradas foram no canal com até 8,4 cm/s.

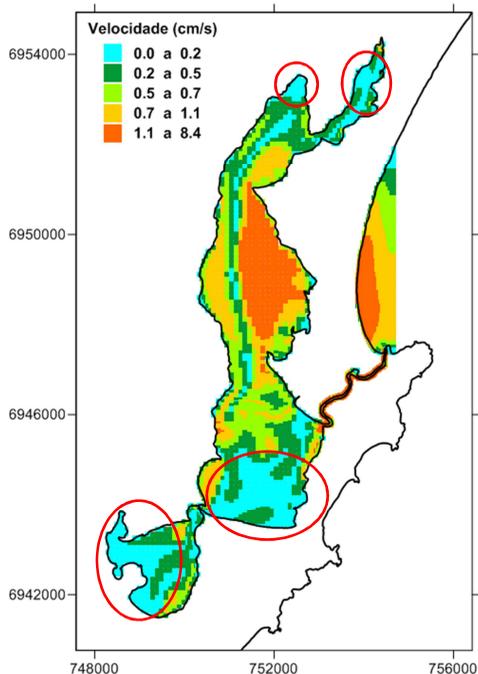


Figura 68: Campo de intensidade da velocidade média de todo o período de simulação.

A seguir são apresentadas, nas figuras Figura 69 à Figura 71, as direções médias das correntes nos diversos setores da laguna. As setas em vermelho apontam as principais direções do escoamento e os vórtices gerados.

Na região sul há um vórtice bem definido em sentido anti-horário com água saindo da região sul para a região centro sul da laguna. Na porção centro sul há três vórtices, um próximo ao canal que liga a parte sul da laguna no sentido horário, outro próximo ao canal que liga ao mar também no sentido horário e o terceiro, menor deles, na região mais ao sul no sentido anti-horário.

Na região centro norte há um pequeno vórtice anti-horário do lado oeste e observa-se que do lado leste a água se desloca de sul para norte e do lado oeste em sentido inverso.

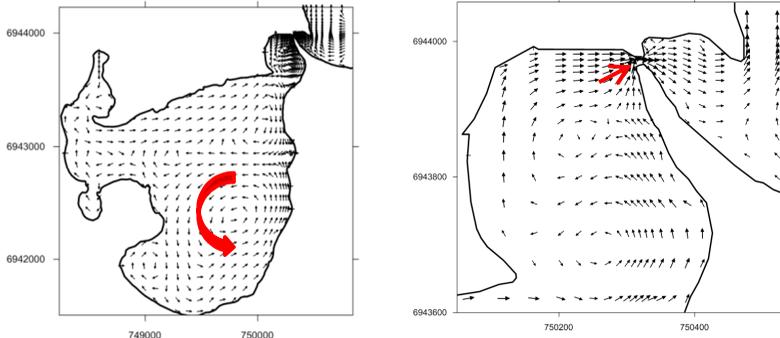


Figura 69: Circulação residual do período total simulado na laguna sul.

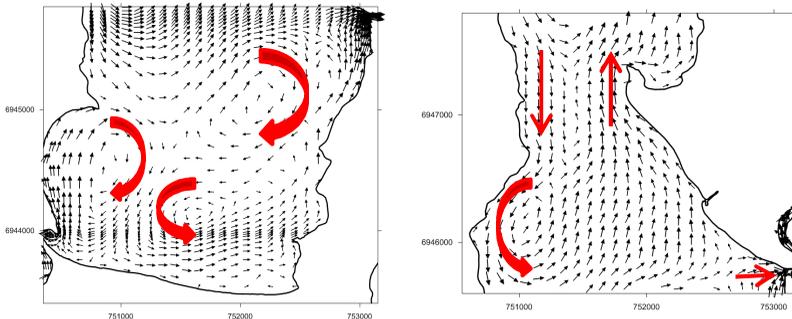


Figura 70: Circulação residual do período total simulado na laguna central.

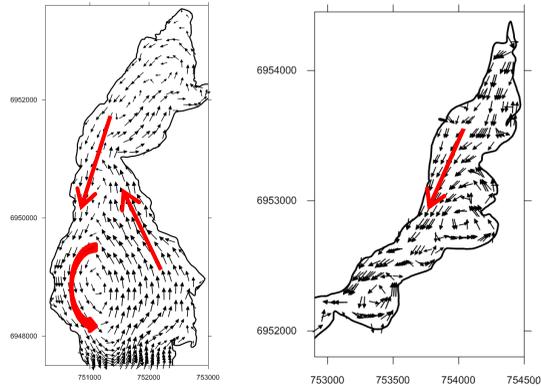


Figura 71: *Circulação residual do período total simulado na laguna norte.*

Na região norte também é possível identificar um vórtice em sentido anti-horário e o deslocamento da água de sul para norte acontece do lado leste enquanto que na parte oeste o sentido da corrente é de norte para sul. Na porção nordeste, braço que deságua o rio João Gualberto, apresenta sentido definido de norte para sul apenas na margem esquerda.

As correntes residuais no canal que liga a laguna ao mar indicam que o sentido médio de deslocamento da água neste período foi do interior da laguna para a região marítima, como pode ser visto na Figura 72.

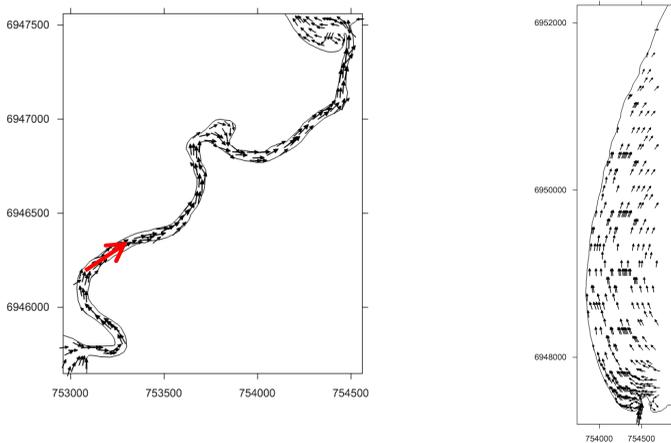


Figura 72: *Circulação residual do período total simulado no canal e na área externa à laguna.*

6.2.4.2.1 Cenário 1

A Figura 73 ilustra a variação espacial da razão entre da intensidade da velocidade média deste cenário pela intensidade média de todo o período simulado, vazão de referência. A laguna sul e região centro sul apresentaram em geral valores bastante superiores à velocidade de referência, com valores até trinta vezes superiores principalmente na região centro sul. As intensidades no canal também apresentaram valores bastante superiores à velocidade residual.

Já a região centro norte apresentou valores equivalentes à metade dos valores encontrados no cenário de referência.

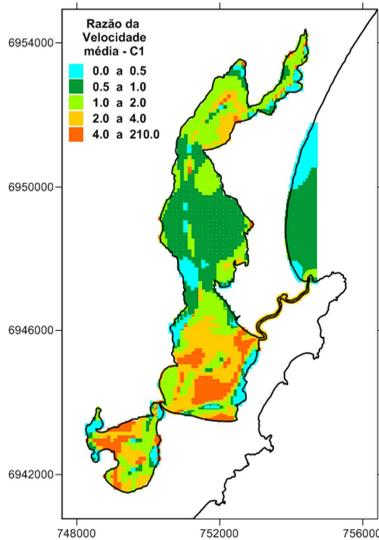


Figura 73: Campo da razão da velocidade média – C1.

As figuras Figura 74 à Figura 76 apresentam a direção das velocidades médias do período correspondente ao Cenário 1. Diferentemente do que foi verificado no cenário de referência, neste cenário a laguna sul apresentou dois vórtices bem definidos, um no sentido horário e outro ainda mais ao sul no sentido anti-horário. As direções das correntes no canal que liga a laguna sul a região centro sul indica que o sentido do deslocamento médio deste período é para o interior da laguna sul. Isto porque a força ocasionada pela maré neste período se sobrepõe a força causada pela vazão fluvial gerada nas sub-bacias da região sul.

Na região centro sul da laguna verifica-se um grande vórtice no sentido horário e outro menor mais ao sul no sentido inverso. Com estas condições ambientais, vazões e maré mais elevada em relação à circulação residual, os dois vórtices maiores presentes no cenário de referência parecem se unir para forma um grande vórtice.

Devido à maré elevada presente neste cenário o sentido do fluxo no canal é da região externa para a região interna da laguna. Isto faz com que a corrente na região central da laguna seja alterada.

A região norte não sofreu grandes alterações de sentido das correntes.

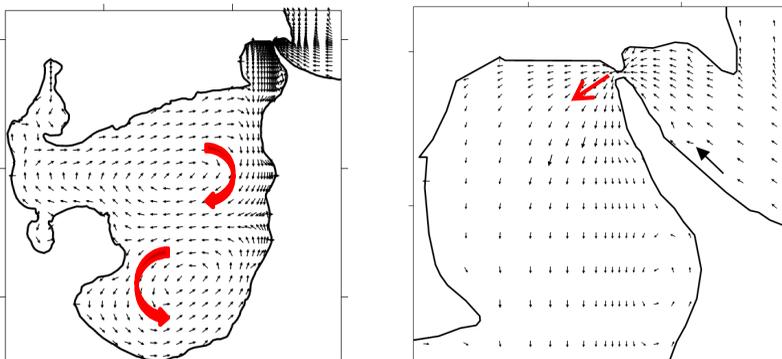


Figura 74: Circulação média na laguna sul – CI.

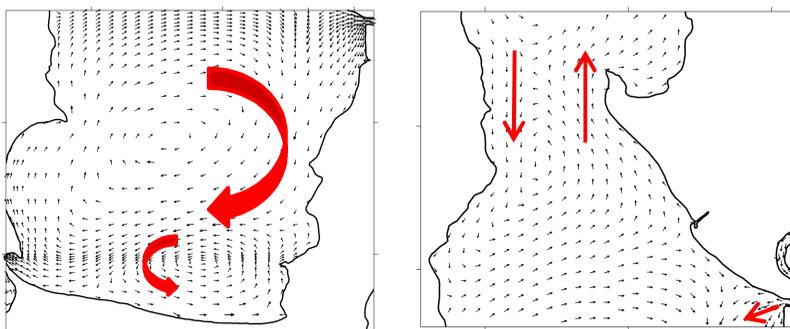


Figura 75: Circulação média na laguna central – CI.

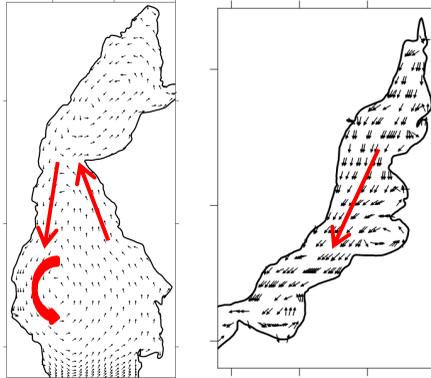


Figura 76: Circulação média na laguna norte – C1.

6.2.4.2.2 Cenário 2

O Cenário 2 apresentou velocidades mais elevadas em relação ao cenário de referência em toda a laguna, desde a laguna sul até a laguna norte. A Figura 77 apresenta a variação espacial da intensidade média da velocidade sobre a intensidade média do cenário de referência.

A laguna centro norte e a região externa apresentaram as menores diferenças, com velocidades até duas vezes superior ao cenário de referência. A frequência correspondente a esta classe de valores é de 52% no campo apresentado abaixo.

A região centro sul e região sul apresentaram as maiores diferenças, sendo que a região sul teve valores de até 11 vezes superior a corrente residual e a região centro sul de até 30 vezes superior a corrente residual.

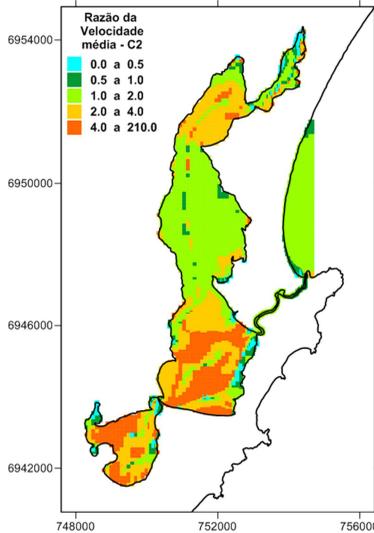


Figura 77: Campo da razão da velocidade média – C2.

Com o nível maregráfico nulo, próximo à zero, e baixas vazões este cenário apresentou direções de velocidades bastante diferentes do cenário de referência e do Cenário 1, em que o nível maregráfico estava elevado e com vazões também superiores. As figuras Figura 78 à Figura 80 ilustram as direções médias do Cenário 2 nas diferentes regiões da laguna.

Na laguna sul o deslocamento de água médio no Cenário 2 ocorre de dentro da região sul para fora enquanto que no Cenário 1 ocorre de maneira inversa. No entanto, no cenário de referência a corrente residual indica que o deslocamento é da laguna sul para região centro sul. Apesar do Cenário 2 apresentar esta semelhança com o cenário de referência a circulação dentro da laguna sul é bastante diferenciada em virtude principalmente da vazão fluvial já que no Cenário 2 esta é bastante baixa. Enquanto que no cenário de referência há apenas um vórtice no sentido anti-horário, no Cenário 2 há dois vórtices semelhantes aqueles verificados no Cenário 1 porém com sentidos opostos.

Da mesma forma que na região sul a região central do Cenário 2 apresentou sentidos opostos ao Cenário 1. No Cenário 2 verifica-se a presença de dois vórtices, um de grande porte e em sentido anti-horário e outro menor no sentido oposto. Esta diferença de sentido entre os cenários 1 e 2 ocorre porque no primeiro cenário o deslocamento médio

de água é do mar para a laguna enquanto que no segundo cenário é da laguna para o mar. Além disso, em virtude das diferenças de vazão fluvial entre o Cenário 2 e o Cenário 1 e cenário de referência as correntes se alteram por toda a laguna.

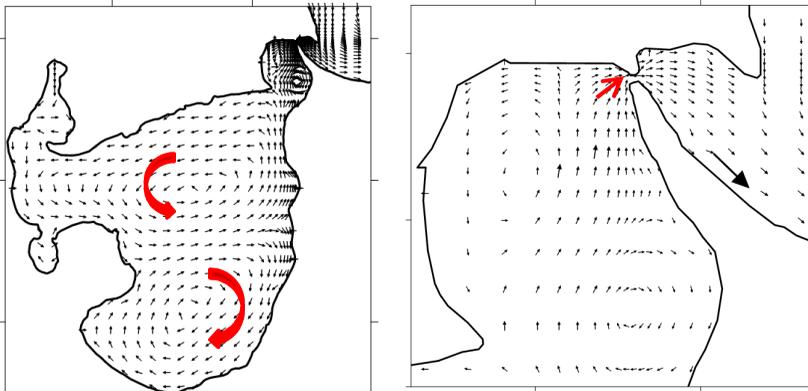


Figura 78: Circulação média na laguna sul – C2.

Na região norte o Cenário 1 e o cenário de referência apresentaram poucas diferenças entre si e isto se deve a pouca variação de vazão média entre estes dois cenários. No entanto, o Cenário 2 apresenta vazões bastante reduzidas e somadas ao baixo nível maregráfico faz com que as correntes sejam alteradas de forma significativa também na região norte. Assim como no cenário de referência no Cenário 1 o sentido da corrente de norte para sul ocorre no lado oeste e a corrente de sul para norte ocorre no lado leste. Já no Cenário 2 este deslocamento ocorre de maneira inversa, com a corrente de sul para norte passando pelo lado oeste e a corrente de norte para sul no lado leste.

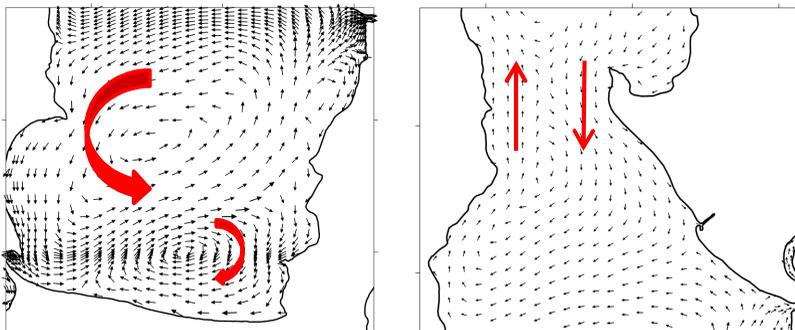


Figura 79: Circulação média na laguna central – C2.

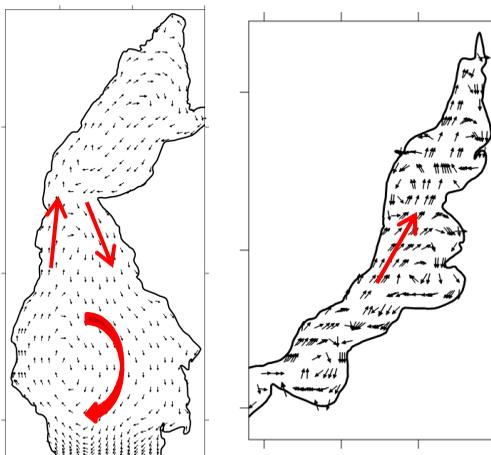


Figura 80: Circulação média na laguna norte – C2.

6.2.4.2.3 Cenário 3

O Cenário 3 se aproxima das condições ambientais do Cenário 2, caracterizado pela vazão baixa e maré baixa. No entanto, a maré no Cenário 3 é negativa enquanto que a maré no Cenário 2 é nula, próxima ao valor médio. A diferença dessas duas condições ambientais fez com que as intensidades das correntes de alterassem, porém as direções média do fluxo no Cenário 3 foram as mesmas encontradas no Cenário 2.

A Figura 81 apresenta a razão entre a intensidade média de velocidade no Cenário 3 e no cenário de referência. Toda a região interna da laguna apresentou velocidade bastante superior àquelas encontradas no cenário de referência. A região sul foi a região que

apresentou maiores intensidades, com velocidades 150 vezes a velocidade residual. A classe definida pelos valores 4 a 210 vezes superior à velocidade residual apresenta 43% de frequência e a classe entre 2 a 4 vezes superior à velocidade residual tem 34% de frequência.

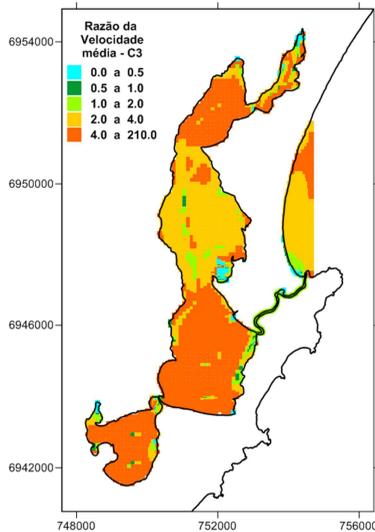


Figura 81: Campo da razão da velocidade média – C3.

As figuras Figura 82 à Figura 84 apresentam as direções médias das velocidades nas diferentes regiões da laguna. Observa-se grande semelhança entre o Cenário 2 e Cenário 3 quanto à direção das correntes média.

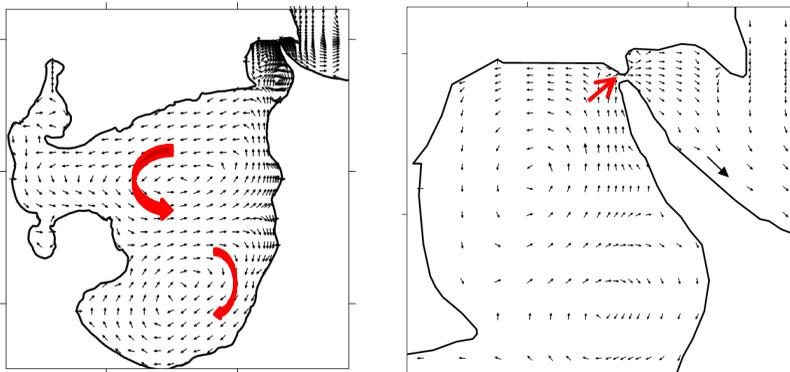


Figura 82: Circulação média na laguna sul – C3.

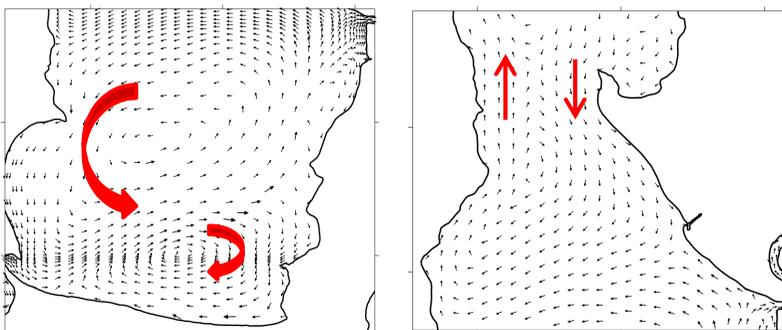


Figura 83: Circulação média na laguna central – C3.

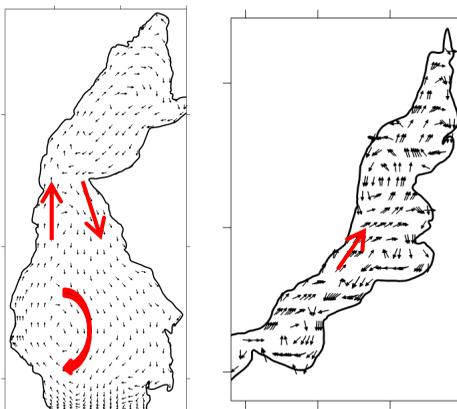


Figura 84: Circulação média na laguna norte – C3.

6.2.4.2.4 Cenário 4

O Cenário 4 é caracterizado pelo nível maregráfico elevado e pelas baixas vazões fluviais. A Figura 85 apresenta a razão entre a intensidade média de velocidade no Cenário 4 e a velocidade média do cenário de referência. Na região interna da laguna apenas a porção centro norte e parte da região extremo norte apresentaram velocidades inferiores às velocidades residuais. Na região centro norte as razões variaram entre 0.1 à 5.3.

A laguna sul e a laguna centro sul apresentaram velocidades superiores até 25 vezes à velocidade residual.

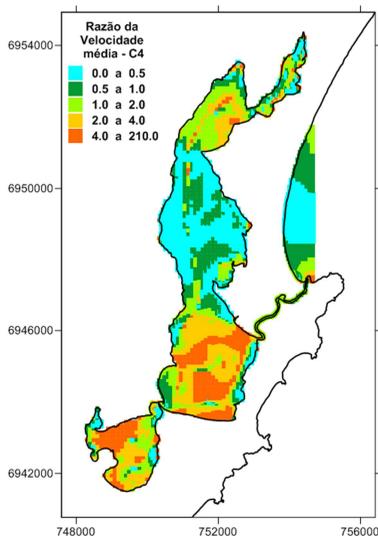


Figura 85: Campo da razão da velocidade média – C4.

As figuras Figura 86 à Figura 88 ilustram a direção da velocidade média no Cenário 4 nas diferentes regiões da laguna. Devido ao alto nível maregráfico o deslocamento médio de água neste cenário ocorre da região externa para dentro da laguna. Na região sul o deslocamento também ocorre desta maneira, com a entrada de água no interior da laguna sul. Este comportamento foi verificado também no Cenário 1, caracterizado também pelo alto nível maregráfico. No entanto no Cenário 1 as vazões são elevadas, enquanto que no Cenário 4 as vazões são baixas. Esta distinção da componente hidrológica faz com que a circulação seja diferente entre os dois cenários.

No Cenário 4 a circulação na laguna sul e na região centro sul é bastante semelhante àquelas encontradas nos Cenários 2 e 3, cenários em que as vazões também foram bastante reduzidas. Já na região centro norte e norte a circulação foi parecida os cenários anteriores 2 e 3 porem com algumas particularidades. No Cenário 4 a região centro norte apresentou um vórtice mais bem definido e na região norte há a formação de um terceiro vórtice.

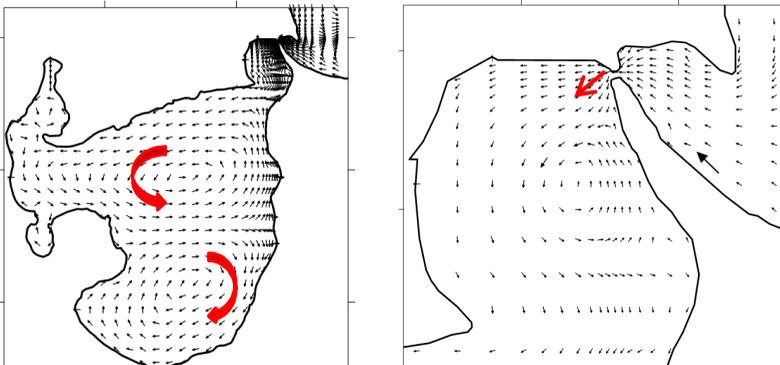


Figura 86: Circulação média na laguna sul – C4.

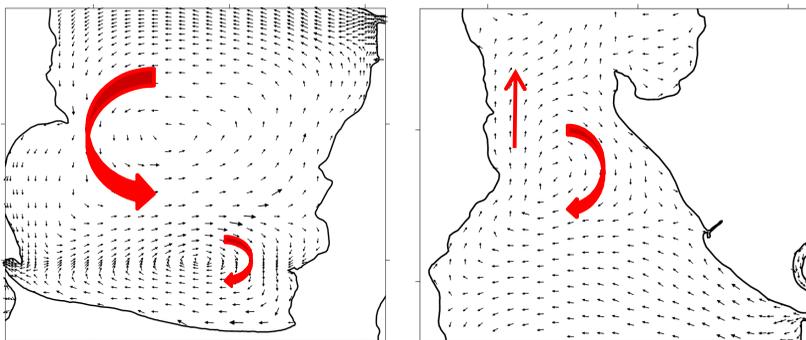


Figura 87: Circulação média na laguna central – C4.

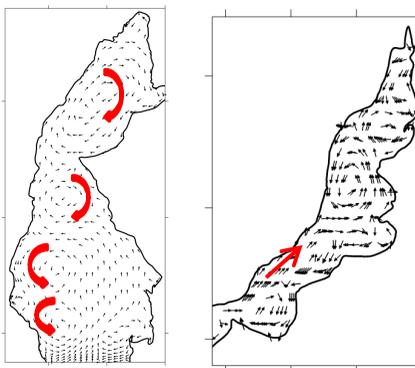


Figura 88: Circulação média na laguna norte – C4.

6.2.4.2.5 Cenário 5

O Cenário 5 é caracterizado pela presença de elevadas vazões e nível maregráfico baixo. As magnitudes de velocidade média deste cenário se assemelham às intensidades do Cenário 2, no entanto este último cenário possui mais regiões com intensidades elevadas. Desde a laguna sul até a laguna central as velocidades no Cenário 5 estão até 50 vezes superior às velocidades residuais. As últimas duas classes de valores apresentadas na Figura 89 representam juntas 35% dos valores deste campo.

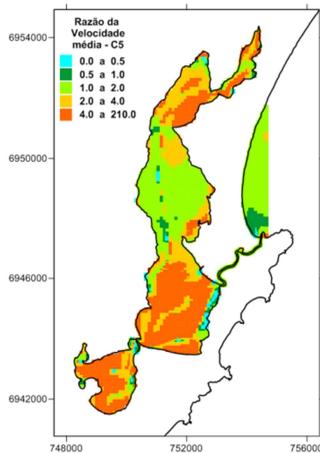


Figura 89: Campo da razão da velocidade média – C5.

A região centro norte também mostrou velocidades acima dos valores residuais, no entanto apenas duas vezes a mais. O mesmo foi observado na região externa. Esta classe de valores corresponde a 42% de frequência no Cenário 5.

As figuras Figura 90 à Figura 92 apontam a direção média do escoamento das águas nas diversas regiões da laguna. Devido às condições ambientais do Cenário 5, nível maregráfico baixo e vazões elevadas, o deslocamento médio ocorre de dentro da laguna para a região marítima.

Apesar das condições ambientais encontradas neste cenário serem diferente das condições ambientais do Cenário 3, o gradiente de nível desses dois cenários é semelhante, com o nível no interior da laguna superior ao nível na região marítima. Em virtude disso as

direções médias de corrente no Cenário 5 são as mesmas àquela encontradas no Cenário 3 em todas as regiões da laguna com exceção da região extremo norte próximo a foz dos principais rios, rio João Gualberto e rio Vermelho.

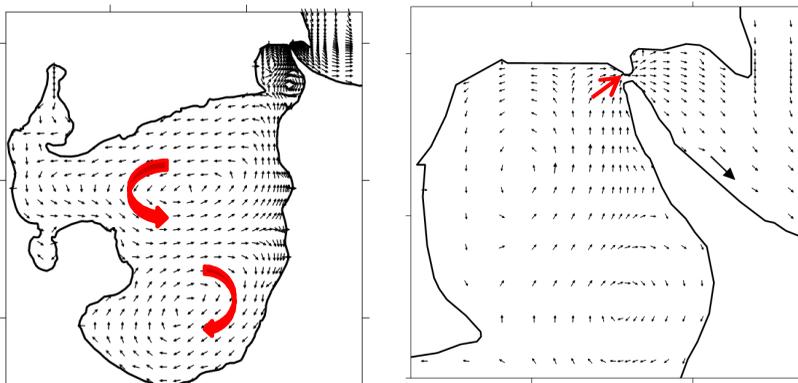


Figura 90: Circulação média na laguna sul – C5.

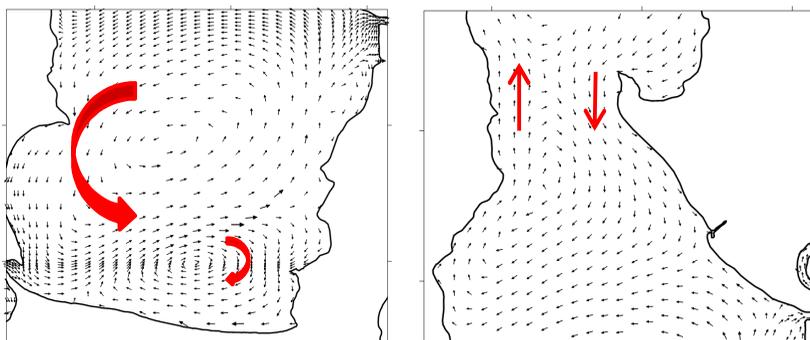


Figura 91: Circulação média na laguna central – C5.

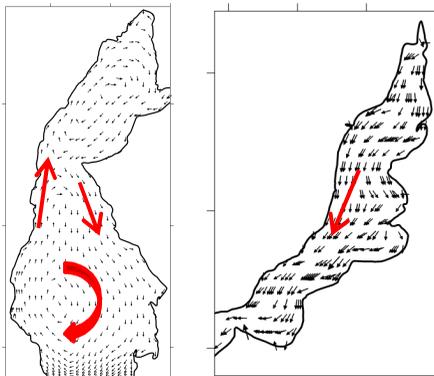


Figura 92: Circulação média na laguna norte – C5.

6.2.4.3 Salinidade

A análise dos resultados das propriedades da água seguiu a mesma linha metodológica dos parâmetros hidráulicos. Inicialmente foi analisada a média para todo o período de simulação final e este como o cenário de referência para a comparação dos cenários.

A Figura 93 ilustra a variação espacial da salinidade média do período de simulação com variação de 10 a 35 PSU. Os maiores valores, com variação de 30 a 35 PSU, localizam-se na área marítima e apresentam frequência 27% na grade de cálculo.

O canal que liga a laguna ao mar tem salinidade média variando de 19 a 30 PSU. Na região sul a salinidade média foi de 16,1 a 17,9 PSU, com variação de 1,8 PSU.

A laguna central apresentou salinidade média de 18,2 até a região ao sul do canal e variação de salinidade média de 18,2 a 17,5 PSU na região a norte do canal.

A região norte da laguna apresentou valores entre 17,5 a 19 PSU até o braço direito a nordeste aonde desaguam as maiores sub-bacias, rio João Gualberto e rio Vermelho. Nesta região os valores de salinidade média chegam próximos a 10 PSU devido ao grande volume de água fluvial que chega a laguna nesta porção. Os valores entre 10 e 16 PSU apresentaram frequência a 8%.

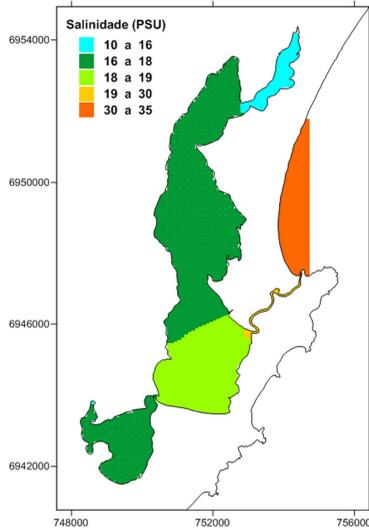


Figura 93: Campo de salinidade média do período de simulação.

A salinidade no interior da laguna não apresenta oscilações horárias. Ao longo do período de um cenário, 1 dia, pode haver leve tendência de acréscimo ou de declínio em função da descarga fluvial e do nível maregráfico. Porém, mesmo estas variações diárias são bastante reduzidas. As variações significativas de salinidade no interior da laguna são percebidas entre os diferentes cenários mostrados a seguir. Já no canal é possível perceber uma oscilação horária, que está relacionada à variação maregráfica.

6.2.4.3.1 Cenário 1

No Cenário 1 a salinidade se mostrou elevada em todo o período na região do canal e com valor típico de água salgada, 35 PSU. As regiões Centro Sul e Sul apresentaram valores intermediários e semelhantes entre si, 20,7 PSU e 19,8 PSU respectivamente, com diferença de 0,9 PSU superior na região Centro Sul. A região Central apresentou valor equivalente à região Centro Sul.

A região com menor salinidade foi a Norte, 13,8 PSU, com diferença de aproximadamente 21 PSU inferior em relação ao Canal. Esta diferença deve-se às descargas fluviais que ocorreram neste período.

A Figura 94 apresenta o campo de diferença de salinidade média do Cenário 1 e de todo o período simulado. A salinidade no interior da laguna foi superior no Cenário 1 em relação ao cenário de referência. Este fato é reflexo do exposto anteriormente, em que a direção média das correntes no Cenário 1 é da região externa para a região interna e no cenário de referência o deslocamento médio se dá de maneira contrária, aumentando assim a salinidade média na laguna no Cenário 1 em relação a salinidade média do cenário de referência.

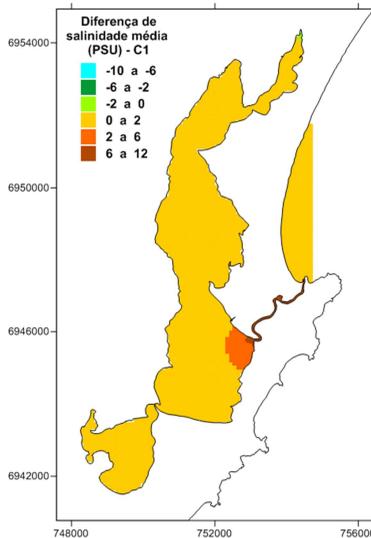


Figura 94: Campo da diferença de salinidade média – C1.

As diferenças máximas de salinidade no interior da laguna ocorreram próximas à desembocadura interna do canal. No canal a diferença de salinidade foi bastante superior, de até 12 PSU.

6.2.4.3.2 Cenário 2

A salinidade na região Centro Sul e na região Sul neste cenário foi praticamente a mesma encontrada no cenário anterior, 20,8 PSU e 19,0 PSU, respectivamente. A região norte apresentou leve acréscimo de salinidade ao longo do tempo, iniciando em 13,62 PSU e no tempo final de simulação o valor chegou a 14,22 PSU. Seu valor médio, 13,9 PSU, foi semelhante ao encontrado no cenário anterior.

A Figura 95 mostra as variações espaciais da diferença entre a salinidade média no Cenário 1 e a salinidade média no cenário de referência.

A salinidade no interior da laguna se mostrou levemente superior à salinidade média do cenário de referência, com diferenças máximas de 1 PSU superior na região centro sul e diferenças de até 1,8 PSU na região extremo norte. Já no canal as diferenças foram negativas, com salinidade até de 3 PSU inferior ao cenário de referência. Este fato deve-se ao deslocamento médio de água que ocorre do interior da laguna para a região marítima.

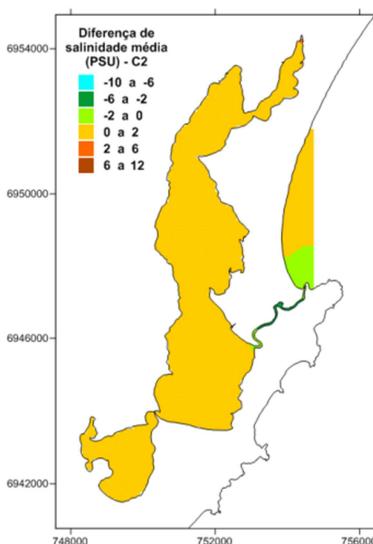


Figura 95: Campo da diferença de salinidade média – C2.

A principal diferença entre o Cenário 2 e o Cenário 1 está na região do canal e nas suas proximidades, onde as salinidades são bastante reduzidas em função da saída de água do interior da laguna para a região marítima.

6.2.4.3.3 Cenário 3

Como mencionado anteriormente o Cenário 3 se assemelha ao Cenário 2 em termos de forçantes médias impostas, porém este último apresenta nível maregráfico negativo enquanto que o Cenário 2 nível maregráfico nulo. Esta diferença maregráfica entre os cenários faz com

que a salinidade média seja alterada principalmente na região central, a qual sofre maior influência do nível maregráfico.

Da mesma forma como nos cenários anteriores, o Cenário 3 oscilou a salinidade apenas na região do canal ao longo de um dia. As regiões sul e norte tiveram pouca diferença em relação aos Cenário 1 e 2. Na região Norte a salinidade média foi de 14 PSU e na região Sul foi de 18,8 PSU.

No entanto, a região centro sul, próxima a desembocadura interna do canal que liga a laguna ao mar, apresentou declínio médio de aproximadamente 1 PSU em relação aos cenário anteriores, com valor médio de 19,6 PSU. Este declínio deve-se a saída de água da região interna para a região externa, que acontece mais intensamente neste cenário devido o maior gradiente de nível existente entre a região interna e externa.

A Figura 96 apresenta a variação espacial da diferença de salinidade média do Cenário 1 em relação a salinidade média de todo o período simulado. A salinidade na região interna da laguna próximo ao canal apresentou valores até 2 PSU inferior ao cenário de referência.

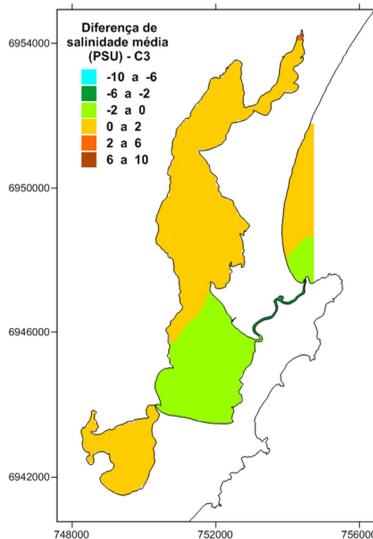


Figura 96: Campo da diferença de salinidade média – C3.

6.2.4.3.4 Cenário 4

O Cenário 4 caracteriza-se pelo nível maregráfico elevado e pelas baixas vazões. Isto faz com que a salinidade se eleve nas proximidades do canal. Além disso, outro local que apresentou elevação da salinidade foi a região norte, que devido a redução do volume de água doce aumentou sua salinidade. Nesta região a salinidade chegou a 15 PSU, 1 PSU superior ao cenário anterior. Na região Sul a salinidade média chegou a 18,6 PSU e na região Centro Sul próxima ao canal foi bastante superior.

A Figura 97 ilustra a diferença de salinidade média entre o Cenário 4 e o cenário de referência. Observa-se que a salinidade é superior no Cenário 4 em toda a laguna devido ao nível maregráfico elevado em relação ao cenário de referência e a vazão abaixo da média no cenário de referência. As regiões com diferença superior de até 2 PSU representam 82% da frequência de valores.

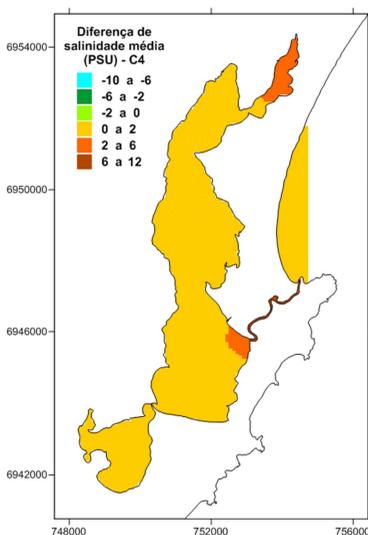


Figura 97: Campo da diferença de salinidade média – C4.

6.2.4.3.5 Cenário 5

O Cenário 5 destaca-se pela presença elevada de vazão e pelo nível maregráfico reduzido, ou seja, neste cenário há um gradiente de nível negativo entre a região interna e externa fazendo com que a água

saia da laguna. Este processo faz com que a salinidade seja reduzida pela presença das elevadas descargas hidrológicas.

A região norte, local com maior descarga de vazão fluvial teve a salinidade média reduzida para 4,3 PSU, redução de 71% em relação ao cenário anterior. No cenário anterior, Cenário 4, o gradiente de nível é o inverso do observado neste último cenário uma vez que no Cenário 4 o nível mareográfico é alto e as vazões fluviais são reduzidas.

Na região Sul a salinidade também foi reduzida, com valor médio de 17,9 PSU.

A Figura 98 apresenta a variação espacial da diferença entre a salinidade média deste cenário com a salinidade média de todo o período simulado. Com exceção da região próxima a área do canal o restante da laguna apresenta salinidade inferior à salinidade média do cenário de referência. A região extremo norte mostrou salinidade até 10 PSU abaixo dos valores encontrados no cenário de referência devido a vazão fluvial do rio João Gualberto e do rio Vermelho.

Na região sul, centro sul e centro norte a variação de salinidade não chegou a 2 PSU abaixo dos valores de referência.

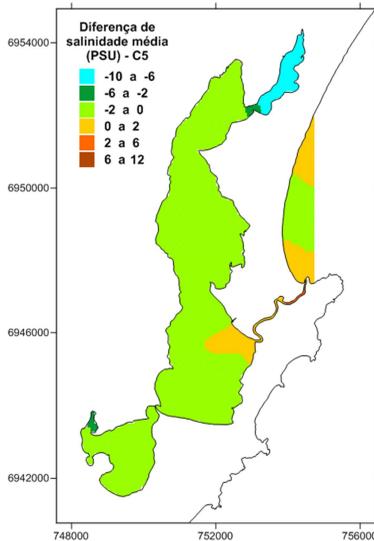


Figura 98: Campo da diferença de salinidade média – C5.

6.2.4.4 *Escherichia coli*

A concentração de *E. coli* média para o período de simulação é apresentada na Figura 99. As concentrações nulas se encontram na região marítima e na região central na laguna onde as bacias contribuintes não apresentam ocupação urbana intensa. Os valores nulos apresentaram frequência de 42% somando as duas regiões.

Os valores entre 10 a 100 NMP/100mL estão presentes nas áreas de transição entre as regiões com concentração nula e as regiões com contaminação fecal. Estes valores representam 28% do campo simulado.

As concentrações entre 100 a 1.000 NMP/100mL estão localizadas nas regiões com baixa ocupação urbana ou próximo a regiões com intensa ocupações urbana e consequentemente com grande contaminação fecal. Estes valores apresentaram frequência de 24%.

Os valores entre 1.000 a 10.000 NMP/100mL estão presentes próximo as regiões com grandes ocupações, como as sub-bacias 1, 2, 34 e 35. Estes valores apresentam 5% de frequência. Os valores superiores a 10.000 NMP/100mL estão presentes apenas numa distância máxima de 280m das fontes de lançamento de *E. coli* nas bacias 34 e 35.

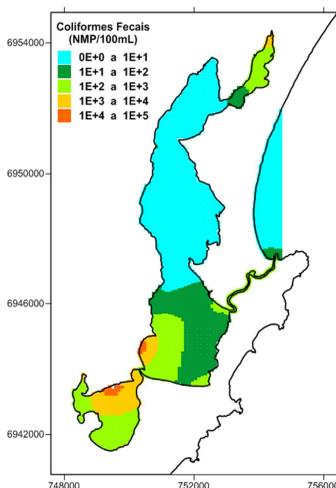


Figura 99: Campo de *E. coli* médio do período de simulação.

Como mencionado anteriormente, as vazões de efluentes sanitários impostas no modelo foram constantes no tempo já que suas

estimativas se deram através da população por sub-bacia. Em função disso, as variações das concentrações de *E. coli* no interior da laguna nos diferentes cenários dependem do comportamento hidrodinâmico encontrado em cada deles, conforme já discutidos acima. A seguir são apresentadas as concentrações de *E. coli* em cada um dos cenários com condições ambientais diferenciadas.

6.2.4.4.1 *Cenário 1*

No Cenário 1, com nível maregráfico elevado e vazões significativas, apresentou níveis em ascensão no interior da laguna. A região sul possui os maiores valores de *E. coli* devido à localização de fontes expressivas de lançamento de efluentes sanitários na região.

A Figura 100 apresenta a razão da concentração média de *E. coli* no Cenário 1 pela a concentração média de *E. coli* de todo o período de simulação. Grande parte da laguna mostrou ter concentrações médias inferiores ao cenário de referência.

Na região leste da porção central norte as análises chegaram a apontar que no cenário de referência as concentrações são superiores ao dobro das concentrações encontradas no Cenário 1. Os valores em que a concentração de *E. coli* foram iguais ou até a metade das concentrações residuais ocorrem por toda a laguna, desde a região norte até a região sul. Esta faixa de valores corresponde aproximadamente 40% da região simulada.

Os valores que se mostraram superiores em até 1,5 vezes à concentração média do cenário de referência se encontram em parte da porção sul e na região central norte. Apenas um local na região central se mostrou estar com concentrações superiores de 1,5 vezes à concentração média do cenário de referência. Este local é próximo ao ponto de lançamento de efluente sanitário número 3 conforme identificado anteriormente.

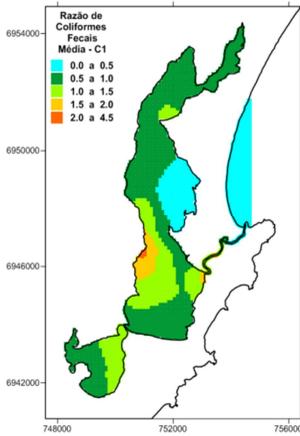


Figura 100: Campo da razão de *E. coli* média – C1.

6.2.4.4.2 Cenário 2

O Cenário 2 é caracterizado pelos níveis maregráficos nulos, vazões baixas e escoamento do interior da laguna para a região externa da laguna. Com tais condições ambientais a concentração de *E. coli* se mostrou inferior às concentrações do cenário de referência em grande parte da laguna. As regiões que apresentaram concentrações mais elevadas estão próximas aos lançamentos de efluentes e a razão entre os valores observados neste cenário e no cenário de referência não chega a 1,5 vezes, como pode ser visto na Figura 101.

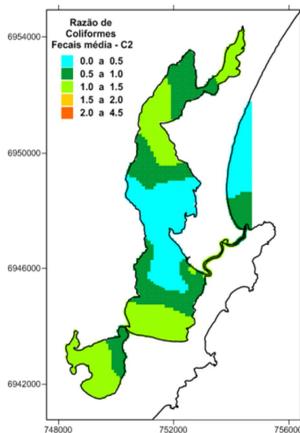


Figura 101: Campo da razão de *E. coli* média – C2.

6.2.4.4.3 Cenário 3

No Cenário 3 onde o nível maregráfico é nulo e as vazões fluviais são reduzidas, o nível de água é inferior ao nível de água no cenário de referência. Isto faz com que em algumas localidades a concentração de *E. coli* seja superior à concentração média de todo o período simulado, como a porção oeste da laguna sul, a região centro sul e centro norte, em que os valores chegaram até 4 vezes superior ao encontrado no cenário de referência, como ilustra a Figura 102. As regiões que tiveram as suas concentrações mais elevadas que o cenário de referência representaram 40% da frequência de valores.

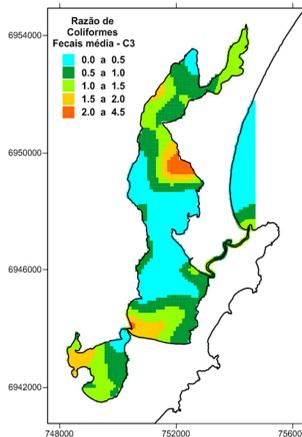


Figura 102: Campo da razão de *E. coli* média – C3.

6.2.4.4.4 Cenário 4

O Cenário 4, caracterizado pelos elevados níveis maregráficos e baixas vazões apresentaram concentrações inferiores ao cenário anterior, Cenário 3, e com variações semelhantes ao Cenário 2. A Figura 103 apresenta a razão de *E. coli*. entre o Cenário 4 e o cenário de referência.

As concentrações de *E. coli* deste cenário foram inferiores às concentrações residuais em grande parte da laguna e representa aproximadamente 80% dos valores encontrados. Além disso, as regiões que apresentaram concentração superior à concentração média de todo o período simulado não chegaram a ter valores superiores a 1,2 vezes à concentração do cenário de referencia. Este fato é um reflexo do elevado nível maregráfico deste período.

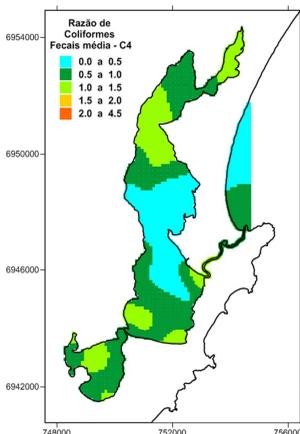


Figura 103: Campo da razão de *E. coli* média – C4.

6.2.4.4.5 Cenário 5

As concentrações encontradas no Cenário 5 se aproximam daquelas encontradas no Cenário 4 apesar do último cenário apresentar níveis mais elevados. No Cenário 5 as concentrações superiores à concentração média de todo o período simulado representam 67% do valores encontrados. As concentrações superiores ao cenário de referencia se localizam próximo a algumas fontes de lançamento de efluente sanitário. A maioria dos valores de *E. coli* superiores no Cenário 5 não chegam a 1,5 vezes às concentrações residuais, como ilustra a Figura 104.

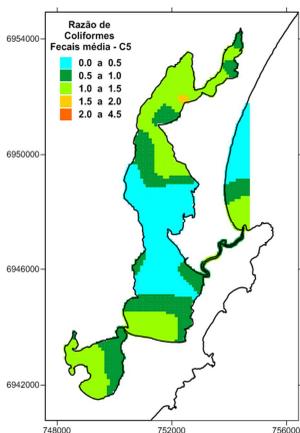


Figura 104: Campo da razão de *E. coli* média – C5.

7 CONCLUSÕES

A metodologia aplicada possibilitou avaliar a influência dos aportes fluviais e antrópicos sobre os padrões de dispersão e de qualidade da água da Lagoa da Conceição em diferentes cenários com condições ambientais distintas.

Assim como apontado no estudo de Sampaio (2010) no estuário de Santos, o presente estudo também evidenciou o impacto da pressão urbana sobre a qualidade de água na Lagoa da Conceição através da análise dos dados de balneabilidade e população. O presente estudo identificou regiões que possuem diferentes níveis de poluição quanto ao recebimento de efluentes sanitários a partir da ocupação urbana nas bacias contribuintes. As regiões da laguna com piores indicadores de balneabilidade localizam-se próximo às sub-bacias com populações superiores a 3.000 habitantes.

A modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água identificou padrões médios de circulação e de qualidade de água para o todo o período analisado. Além disso, a análise de diferentes condições oceanográficas e hidrológica permitiu verificar a influência de cada uma das duas principais forçantes. A Tabela 18 apresenta de maneira resumida os principais resultados encontrados nos diferentes cenários em relação a nível, velocidade, salinidade e *E. coli*.

Tabela 18: Síntese dos resultados.

Cenários		C0	C1	C2	C3	C4	C5
Dados de entrada	Maré (m)	0,04	0,29	0	-0,17	0,14	0,06
	Vazão (m³/s)	1,84	2,69	0,57	0,31	0,86	8,63
Variação do nível (Cx-C0) [m]		-	+	-0,05	-0,10	-0,03	+
Gradiente de nível [cm/Km]	N/CS	0,13	0,05	-0,14	-0,30	-0,04	-0,16
	S/CS	0,09	-0,56	0,41	0,51	-0,28	0,44
	Canal	2,37	-5,10	2,30	5,20	-2,30	4,4
Razão da magnitude da velocidade média (Cx/C0)	N/CS	-	0,5	2	7	0,5	5
	S/CS	-	15	22	43	19	30
Variação da salinidade média no interior da laguna (Cx-C0) [PSU]		-	0,5	0	-0,5	0,6	-2
Razão de <i>E. coli</i> média no interior da laguna (Cx/C0)		-	Até 2,0	Até 1,2	Até 4,0	Até 1,2	Até 1,0

O nível médio de todo o período simulado apontou que na região interna da laguna os níveis são todos positivos variando entre 0,06 à 0,09m. Os maiores valores foram na região norte próximo à foz dos dois principais rios que desaguam na laguna, o rio João Gualberto e o rio Vermelho. Os gradientes de nível médio de todo o período simulado, cenário de referência, indicam que na média o deslocamento da água acontece da região sul para a região próxima ao canal, da região norte para a região próxima ao canal e que a laguna tem a tendência de exportar água para a região marítima.

Os níveis internos da laguna nos cenários 2, 3 e 4 se mostraram inferiores ao nível médio de todo o período simulado. Todos esses cenários são caracterizados pela baixa vazão fluvial. Mesmo o Cenário 4, que apresenta nível maregráfico elevado, apresentou nível interno semelhante ao nível interno do Cenário 2 com o nível maregráfico nulo.

Os cenários que apresentaram nível interno mais elevado foram os cenários 1 e 5, cenários com vazões elevadas. Estes cenários tiveram seus níveis médios superiores ao nível médio do cenário de referência. Apesar do Cenário 1 apresentar nível maregráfico mais elevado em relação ao Cenário 5, o último cenário apresentou níveis internos bastante elevados em relação ao primeiro e em relação ao nível médio do cenário de referência. Este resultado deve-se às elevadas vazões presentes no Cenário 5 evidenciando a importância da componente hidrológica.

O gradiente de nível entre a região norte e a região centro sul apresentou sentido do sul para o norte – oposto ao cenário de referência – nos cenários 2, 3, 4 e 5. Já o gradiente de nível entre a região sul e a região centro sul foi oposta ao cenário de referência, no sentido norte para o sul, nos cenários 1 e 4, cenários de maré elevada.

A análise dos gradientes de nível apontou que a laguna sul importa água do restante da laguna somente quando o nível maregráfico está elevado. Caso contrário, o fluxo ocorre de sul para norte, ou seja, exporta água para o restante da laguna, como acontece no cenário de referência. Além disso, os resultados mostram que, em geral, o escoamento da região norte para a região centro sul acontece neste sentido quando as vazões são elevadas, com exceção do Cenário 5 que é em evento de vazão extremo.

O gradiente de nível ao longo do canal evidenciou que a laguna exporta água no cenário de referência, nível médio de todo o período, com gradiente de 2,37 cm/km. Nos cenários 2, 3 e 5, ou seja, cenários com baixos níveis maregráficos, a laguna também exportou água para a

região externa, porém com gradientes de nível diferentes. O Cenários 2, com nível maregráfico nulo e vazão baixa, apresentou gradiente bastante próximo a gradiente do cenário de referência. Nos cenário 3 e 5 os gradiente foram bastante elevados em relação ao cenário de referência. Ou seja, com condições maregráficas e hidrológicas diferentes estes dois cenários apresentam condições semelhantes quanto à exportação de água da laguna.

Os cenários 1 e 4, que apresentaram níveis maregráficos elevados, mostraram que a laguna importa água da região marítima, mesmo no caso com vazões elevadas como é o caso do Cenário 1. O gradiente de nível inferior no Cenário 4 é decorrente do nível maregráfico inferior ao Cenário 1 que se manteve elevado mesmo com vazões fluviais elevadas. Isto aponta que o nível maregráfico tem maior relevância que a componente hidrológica sobre o gradiente do nível ao longo do canal.

As velocidades residuais apresentaram variações espaciais bem definidas em função da batimetria de cada uma das regiões. A região central da laguna sul e a região centro sul da laguna sul apresentam valores bastante baixos, até 1,4 cm/s, e algumas regiões inclusive com velocidades nulas, como a região oeste da laguna sul e o extremo sul da laguna. A região centro sul também apresentou velocidades nulas, principalmente a extremidade sul. A região centro norte apresenta uma setorização da velocidade devido as maiores profundidades na parte oeste. A parte central leste, onde as profundidades são baixas, apresentou as velocidades mais elevadas na região interna da laguna, com valores de até 1,4 cm/s. As maiores velocidades médias encontradas no canal foram de até 8,4 cm/s.

A análise de variação do nível nos diversos cenários apontou a influência das vazões fluviais sobre os níveis internos da laguna. Os resultados de velocidade por sua vez indicam que a direção do escoamento está diretamente ligado ao gradiente de nível entre a região interna e externa, ou seja, a relação entre o nível maregráfico a componente hidrológica. Nos cenários em que os níveis maregráficos estiveram elevados, Cenário 1 e Cenário 4, o deslocamento médio das águas se deu da região externa para a região interna da laguna, ou seja a laguna importou água da região marítima. Isto foi verificado inclusive no Cenário 1 em que as vazões fluviais foram significativas. Já nos cenários em que o nível maregráfico esteve reduzido o escoamento se deu de dentro para fora da laguna mesmo nos cenários com baixa vazão e nível externo nulo, como o Cenário 2.

Os resultados de salinidade média de todo o período simulado identificaram haver regiões com diferentes características. A laguna central apresentou salinidade mais elevada, de 18,1 PSU à 18,9 PSU, e a região sul apresentou valores de salinidade intermediários, com média de 16,5 PSU. A região norte da laguna apresentou os menores valores de salinidade devido à contribuição hidrológica e à distância com a desembocadura interna do canal, com valores médios em torno de 11,5 PSU.

A variação de salinidade nos cenários é um reflexo da interação entre a componente maregráfica e hidrológica. O cenário que apresentou os menores valores de salinidade foi o Cenário 5, cenário de maior vazão, com salinidade média no interior da laguna de 20,8 PSU. Mesmo no cenário em que a maré foi negativa, Cenário 3, a salinidade não se mostrou tão reduzida. No Cenário 4, cenário com nível mareográfico elevado e baixas vazões, a salinidade média no interior da laguna foram as mais elevadas, com média de 22,5 PSU. A salinidade média no interior da laguna para todo o período simulado é de 21,7 PSU, ou seja, a média entre os dois cenários extremos.

A variação espacial das concentrações de *E. coli* ao longo da laguna aponta que a contaminação fecal média na laguna fica restrita às proximidades dos pontos de lançamento de efluentes sanitários.

As concentrações nulas de *E. coli* no interior da laguna se encontram na região central onde as bacias contribuintes não apresentam ocupação urbana intensa. Os valores entre 10 a 1.000 NMP/100mL estão localizadas nas regiões de transição, com baixa ocupação urbana ou próximo a regiões com intensa ocupações urbana e consequentemente com grande contaminação fecal. Os valores entre 1.000 a 10.000 NMP/100mL estão presentes próximo as regiões com grandes ocupações, como as sub-bacias do norte, rio João Gualberto e rio Vermelho; e as bacias a oeste localizadas entre a região sul e centro sul. Os valores superiores a 10.000 NMP/100mL estão presentes apenas numa distância máxima de 280m das fontes de lançamento de *E. coli* nas bacias da região sul e centro sul.

Não foram identificadas variações significativas na concentração média de *E. coli* entre os diferentes cenários. Apesar disso, as maiores concentrações de *E. coli* foram verificadas no C3, cenário em que o nível interno da laguna foi o mais baixo. Já os resultados do cenário C5, cenário com o nível interno mais elevado, apresentaram os menores valores de *E. coli*. Ou seja, os resultados do modelo apontam relação inversa entre concentração de *E. coli*. e nível interno da laguna.

Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Sampaio (2010). No entanto, recomenda-se que novos estudos sejam feitos com objetivo de calibrar e validar os padrões dispersivos.

O estudo ainda apontou os principais pontos de lançamento de esgoto doméstico na Lagoa da Conceição. Apesar de alguns deles já serem monitorados pela FATMA, algumas regiões do corpo hídrico estão carentes de dados, como a região norte da laguna. Fica como sugestão à FATMA ampliar sua rede de monitoramento no interior da laguna incluindo locais próximos aos seguintes pontos de lançamento e respectiva coordenada UTM datum WGS84, fuso 22S: 1 (X 754396; Y 6954331), 4 (X 750707; Y 6945205), 7 (X 748577; Y 6943846), 15 (X 752746; Y 6945984), 16 (X 753631; Y 6946815) e 20 (X 754171; Y 6952928). Apesar de receberem carga significativa de esgoto estes locais atualmente não são monitorados pela FATMA e alguns deles ainda apresentam baixas velocidades residuais, como os pontos 4, 7 e 20, o que agrava as condições sanitárias desses locais.

Além disso, recomenda-se que em novos estudos de qualidade de água utilizando ferramentas de modelagem considerem outros parâmetros de qualidade de água para avaliar a carga orgânica e de nutrientes. Espera-se que a continuação dos estudos tenha por objetivo contribuir no entendimento do padrão de dispersão dos poluentes na laguna, a fim de construir um modelo calibrado e validado quanto à hidrodinâmica e a qualidade de água, podendo assim servir como uma ferramenta de gestão e auxiliar nas tomadas de decisão.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEROCONSULT – Aerolevantamento e Consultoria – Relatório final da batimetria – distrito administrativo da Lagoa da Conceição e Barra da Lagoa. Florianópolis, SC. 2001.
- ANDRADE, R. C. Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2001.
- ASSAD, L. P. de F.; MANO, M. F.; DECO, H. T. de; TORRES JUNIOR, A. R.; LANDAU, L. Noções básicas de modelagem hidrodinâmica computacional e de dispersão de poluentes. Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- BAUER NETO, V. Caracterização geomorfológica da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.
- CAMPANÁRIO, P. Florianópolis: dinâmica demográfica e projeção da população por sexo, grupos etários, distritos e bairros (1950-2050). IPUF. 2007.
- CAMPUZANO, F.; NUNES, S.; MALHADAS, M.; NEVES, R. Modelling the hydrodynamics and water quality of Madeira Island (Portugal). GLOBEC INTERNATIONAL NEWSLETTER. 2010.
- CARVALHO, J.L.B. Modelagem e análise do lançamento de efluentes através de emissários submarinos. 2003. 173 f. Tese de doutoramento, Departamento de engenharia Oceânica, COOPE/UFRJ, 2003.
- CHAPRA, S. C. Surface Water Quality Modeling. McGraw-Hill Companies, Inc. 1997.

- DUARTE, A. A. L. S.; VIEIRA, J. M. P. Caracterização dos Ambientes Estuarinos. Mistura em Estuários. Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Braga, Portugal. 1997.
- FATMA. Monitoramento da balneabilidade de Santa Catarina de 2002 a 2011. Fundação de Meio Ambiente. Governo de Santa Catarina. Disponível em http://www.fatma.sc.gov.br/index.php?option=com_content&task=view&id=41&Itemid=175. Acesso em outubro de 2011.
- FEITOSA, R. C. Acoplamento de Modelos de Campo Próximo e Campo Afastado com Cinética de Decaimento Bacteriano Variável - Aplicações em Emissários submarinos. Rio de Janeiro: Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 2007.
- FOSSATI, M.; PIEDRA-CUEVA, I. A 3D Hydrodynamic numerical modelo f the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. Applied Mathematical Modelling. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.010>. 2012.
- FUJIOKA R.S.; HASHIMOTO H.H.; SIWAK E.B.; YOUNG R.H. Effect of sunlight on survival of indicator bacteria in seawater. Applied and Environmental Microbiology. Mar; 41(3) :690-6. 1981.
- GODOY, F. B., Caracterização Temática da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis - SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.
- GODOY, F. B. Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2009.
- IUPF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. Hidrografia e levantamento topográfico de Florianópolis. 2010.

- KENOV, I. A.; GARCIA, A. C.; NEVES, R. Residence time of water in the Mondego Estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106, 13-22. 2012.
- KOEFENDER, F. Análise Numérica da Influência Batimétrica no Padrão de Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Dissertação (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2005.
- KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil. Centro de Estudos do Mar – UFPR. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 3077-3084, 2005.
- LAURENTI, A. Plano de Atividades: “Monitoramento e modelagem hidrológica-hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – SC”. Relatório de Projeto de Pesquisa, Florianópolis. 2011.
- LEMÉTAYER, M.; Odreski, L. F. R. Elaboração e análise temporal espacial dos mapas de cobertura do solo da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. 2011.
- LINO, J.F.L. Análise Numérica da Influência de Forçantes Meteorológicas e Oceanográficas sobre a Circulação Hidrodinâmica da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, SC. 2005.
- MATEREC – Marine and Environmental Technology Center. Sistema de Modelagem MOHID 200. Disponível em http://www.maretec.mohid.com/Estuarios/Inicio/frame_page.htm. Acesso em maio 2012.
- MIRANDA, Luiz Bruner de; CASTRO, Belmiro Mendes de; KJERFVE, Björn. Princípios da Oceanografia Física de Estuários. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo, 2002.

- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations", *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885–900. 2007.
- NASH, J. E.; J. V. SUTCLIFFE. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290. 1970.
- NUVOLARI, A. (coord). Esgoto Sanitário – Coleta, Transporte, Tratamento e Reúso Agrícola. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- ODRESKI F. R. Alterações da Cobertura do Solo da Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição. Florianópolis – SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.
- ODRESKI F. R. Influência Hidrológica nos processos hidrodinâmicos da Lagoa da Conceição – Florianópolis – SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina. 2012.
- PAWLOWICZ, R., BEARDSLEY, B., LENTZ, S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers and Geosciences*, 28, pp. 929-937. 2002.
- PEREIRA, M. L. M., Estudo da dinâmica das águas do canal da Barra – Barra da Lagoa – Florianópolis, SC. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Santa Catarina, 2004.
- PIERINI, J. O.; STREITENBERGER, M. E.; BALDINI, M. D. Evaluation of faecal contamination in Bahía Blanca estuary (Argentina) using a numerical model. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. Vol. 47, N°2: 193-202. 2012.

- POND, S; PICKARD, G. L. *Introductory Dynamical Oceanography*. Butterworth-Heinemann, Ltda, Second Edition, Oxford, United States of America, 1995.
- PORTO FILHO, E. *Sedimentologia e Algumas considerações sobre a Biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina*. Dissertação (Mestrado em Geografia), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 1993.
- ROCHA, C. B. M. *Implementação e uso do modelo Mike 21 na análise de cenários hidrodinâmicos na Lagoa da Conceição – SC*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, 2007.
- ROSMAN, P. C. “Modelos de Circulação em corpos de água rasos”. In: Wrobel, L. C.; Eiger, S.; Rosman, P.C.; Tucci, C. E.; Cirillo, J. A.; Cabral, J. P.; Silva, R. V. *Métodos numéricos em Recursos Hídricos I*, ABRH, Capítulo 3, pp 156 a 215. 1989.
- ROSMAN, P. C. *Os Modelos para Recursos Hídricos*. In: Magrini, A., dos Santos, M. A. (eds). *Gestão Ambiental em Recursos Hídricos (Vol. 3), Capítulo 2 (Parte III)*, Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, COPPE/UFRJ. 2001.
- ROZEN, Y. & BELKIN, S. *Survival of enteric bacteria in seawater*. FEMS Microbiology Reviews Volume 25, Issue 5, pages 513–529, December. 2001.
- SAMPAIO, A. F. P. *Avaliação da correlação entre parâmetros de qualidade da água e socioeconômicos no complexo estuarino de Santos - São Vicente, através de modelagem numérica ambiental*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2010.
- SIERRA DE LEDO, B. SORIANO-SERRA E. *O ecossistema da Lagoa da Conceição*. NEMAR/CCB/UFSC, SDM/FEPEMA. Florianópolis, 1999.

- SILVA, J. C. Modelo Numérico do Relevo Submerso da Região Costeira Catarinense. Relatório Final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica PIBIC/CNPq – BIP/UFSC no Projeto *Ilhas da Costa Sul: Biogeografia, Conectividade Ecológica das Populações Marinhas e Efetividade das Unidades de Conservação*. 2008.
- SILVA, J. C. Análise numérica da influência do rio João Gualberto sobre a hidrodinâmica residual da Lagoa da Conceição. Florianópolis – SC. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010.
- TROUSSELLIER, M.; BONNEFONT, J-L.; COURTIES, C.; DERRIEN, A.; DUPRAY, E.; GAUTHIER, M.; GOURMELON, M.; JOUX, F.; LEBARON, P.; MARTIN, Y.; POMMEPUY, M.. Responses of enteric bacteria to environmental stresses in seawater. *Oceanologica Acta* 21, 965–981. 1998.
- VAZ, N.; DIAS, J. M.; LEITÃO, P. C. Three-dimensional modelling of a tidal channel: The Espinheiro Channel (Portugal). *Continental Shelf Research* 29, 29-41. 2009.
- VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 3ª ed. 456 p. 2005.