



Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Estatística e Física
Pós Graduação em Modelagem Computacional

Estudo da hidrodinâmica e do despejo de esgotos no canal São Gonçalo e na região do alto estuário da Lagoa dos Patos

Discente: Marcelo Uarthe Grimmer
Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, 2017

Universidade Federal do Rio Grande
Instituto de Matemática, Estatística e Física
Pós Graduação em Modelagem Computacional

**Estudo da hidrodinâmica e do despejo
de esgotos no canal São Gonçalo e na
região do alto estuário da Lagoa dos Patos**

Discente: Marcelo Uarthe Grimmier

Orientador: Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Dissertação apresentada à banca
examinadora da Universidade Federal
do Rio Grande, como exigência parcial
para obtenção do título de Mestre em
Modelagem Computacional pelo Programa
de Pós-Graduação em Modelagem
Computacional.

Julho de 2017

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela benção da vida, por ter saúde, e uma família que sempre me apóia em minhas decisões.

A minha mãe que sempre me mostrou que apesar da dificuldade tinha uma meta a ser cumprida, aos meus irmãos que sempre se alegram com minhas conquistas.

Ao Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, que aceitou ser meu orientador, demonstrando ter pleno conhecimento sobre os assuntos discorridos e problemas enfrentados durante o mestrado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional por ter oportunizado experiências e troca de conhecimentos entre colegas e demais professores do programa.

A todos os colegas do LANSO (Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos), Pedro, Bruno, Phelype, Carlos, Carol, Amanda, Eduardo, Régis, Juliana, Marcus e os últimos colegas que chegaram, por proporcionarem um ambiente de união, sadio e amigável.

A minha namorada Janine, que em todos os momentos me incentivou a continuar estudando e sempre me auxiliando quando necessário.

Agradeço a todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta importante etapa na minha vida.

Resumo

A água doce é essencial à vida. Desta forma, é imprescindível zelar pela sua conservação, com um mínimo de potabilidade possível, pois sua disponibilidade no planeta é cada vez mais restrita. Um dos principais fatores que contribuem para a degradação dos recursos hídricos é a falta de saneamento básico, efluentes industriais sem tratamento, irrigação, entre outros. Para auxiliar na avaliação do impacto de lançamentos de esgotos domésticos em corpos de água, podem ser utilizados modelos numéricos. Este trabalho investigou o comportamento e o destino final de uma pluma de efluentes domésticos na região do canal São Gonçalo e do alto estuário da Lagoa dos Patos, através da utilização de modelagem computacional utilizando um modelo de circulação oceânica regional. A simulação dos efluentes de esgoto doméstico no canal São Gonçalo, Pelotas-RS, foi realizada através de um modelo numérico tridimensional de advecção – difusão – decaimento, com um sistema de elementos finitos, estruturado em FORTRAN95, e que se encontra acoplado diretamente ao modelo hidrodinâmico TELEMAC3D. A variável utilizada como representação dos efluentes foi a concentração de Coliformes Termotolerantes. As fontes de esgoto consideradas são canais de drenagem que escoam praticamente todo o fluxo de água da chuva. Como o município de Pelotas não dispõe de tratamento total de efluentes, esta carga de poluentes oriunda de esgoto doméstico não tratado é transportadas para os rios e lagoas. Os resultados obtidos indicam que as concentrações de poluentes seguem a hidrodinâmica da região, de maneira que a forma e o padrão de espalhamento da pluma de coliformes é controlado pelo padrão de correntes, principalmente associado a ação dos ventos e da descarga fluvial. O campo médio da concentração de coliformes indica uma maior concentração na região do canal São Gonçalo, além de uma influência significativa na região do alto estuário da Lagoa dos Patos. A estação do ano que a pluma de poluentes possui o maior espalhamento é a estação da primavera e a de menor alcance é a estação do verão. As análises de estratificação mostram poucas variações ao longo da coluna de água. Os transectos mostram que a predominância das correntes na Laguna é no sentido norte/sul, e estas correntes são controladas principalmente pela direção dos ventos, que na maior parte do ano é nordeste. Este estudo constitui de uma contribuição para servir de base para tomadas de decisões de forma a tentar evitar o despejo in natura dos efluentes no canal São Gonçalo e para futuros trabalhos.

Palavras-Chave: Lagoa dos Patos; Coliformes Termotolerantes; Modelagem Hidrodinâmica; TELEMAC3D.

Abstract

Fresh water is essential to life. In this way it is imperative to watch over its conservation with a minimum of possible potability, since its availability on the planet is increasingly restricted. One of the main factors contributing to the degradation of water resources is the lack of basic sanitation, industrial effluents without treatment, irrigation, among others. In order to assist in the assessment of the impact of domestic sewage releases on water bodies, numerical models can be used. This work investigates the behavior and final destination of a domestic effluent plume in the region of the São Gonçalo channel and the upper estuary of the Patos Lagoon, using computational modeling with a regional ocean circulation model. The simulation of domestic sewage effluents in the São Gonçalo channel, Pelotas-RS, was carried out using a three-dimensional advection-diffusion-decay numerical model with a finite element system, structured in FORTRAN95, which is directly coupled to the hydrodynamic model TELEMAC3D. The variable used to represent the effluents was the concentration of thermotolerant coliforms. The sources of sewage considered are drainage channels that virtually drain the entire flow of rainwater. As the Pelotas city does not have total treatment of effluents, this load of pollutants from untreated domestic sewage is transported to the rivers and the lagoon. The results indicate that the concentrations of pollutants follow the hydrodynamics of the region so that the shape and the spreading pattern of the coliform plume is controlled by the currents pattern, mainly associated with the action of the winds and fluvial discharge. The mean concentration of coliforms indicates a higher concentration in the region of the São Gonçalo channel, and a significant contribution to the region of the upper estuary of the Patos Lagoon. The season of the year that the pollutants has the greater spreading is the spring and the one of smaller reach into the estuarine region is summer. The stratification analysis show few variations along the water column. The transects show that the dominance of the currents in the Patos Lagoon estuary occurs in the north / south direction, and these currents are controlled mainly by the direction of the northeast winds for most of the year. This study constitutes a contribution as basis for decision-making in order to avoid the inland discharge of the effluents in the São Gonçalo channel and for future works.

Palavras-Chave: Patos's Lagoon; Thermotolerant Coliforms; Hydrodynamic modeling; TELEMAC3D.

Sumário

1	Introdução	p.1
1.1	Aspectos Físicos da Região de Estudo	p.4
1.1.1	Hidrodinâmica da Lagoa dos Patos	p.4
1.1.2	Hidrodinâmica da Lagoa Mirim	p.6
1.1.3	Hidrodinâmica do Canal São Gonçalo	p.8
1.2	Estado da arte	p.9
1.2.1	Revisão Sobre os Estudos de Qualidade da Água	p.9
1.2.2	Estudos de Modelagem na Região	p.13
1.3	Objetivos	p.15
1.3.1	Objetivos Específicos	p.15
2	Metodologia	p.17
2.0.2	Equacionamento do Modelo	p.18
2.1	Domínio do Modelo	p.26
2.2	Geração da Grade de Elementos Finitos	p.27

2.2.1	Estrutura da Malha Batimétrica	p.27
2.3	Malha Computacional	p.27
2.3.1	Discretização Vertical da Malha	p.28
2.3.2	Transformação Sigma	p.29
2.4	Condições Iniciais e de Contorno Climatológicas	p.30
2.4.1	Modelo do poluente	p.32
3	Resultados e Discussão	p.34
3.0.2	Hidrodinâmica do local de estudo	p.34
3.0.3	Salinidade	p.36
3.0.4	Pluma de coliformes	p.38
3.0.5	Análise do padrão sazonal da pluma de coliformes	p.40
3.0.6	Transectos	p.42
3.0.7	Análise de eventos	p.47
4	Conclusões	p.56
5	Sugestões para trabalhos futuros	p.59

Lista de Figuras

- 1.1 Mapa da cidade de Pelotas e o canal São Gonçalo. O mapa de cores representa a profundidade em metros. p.2
- 1.2 Mapa da Lagoa dos Patos com as cores representando a profundidade em metros. p.4
- 1.3 Mapa da Lagoa dos Mirim com as cores representando a profundidade em metros. p.7
- 1.4 Detalhe na região de conexão do canal São Gonçalo e a região do alto estuário da Lagoa dos Patos. O mapa de cores representa a profundidade em metros. p.8
- 2.1 Domínio computacional utilizado neste estudo. A escala de cores representa a profundidade em metros. p.26
- 2.2 Malha de elementos finitos para análise da hidrodinâmica e transporte de contaminantes na região de estudo. Diferentes áreas são apresentadas de forma a apresentar o refino numérico utilizado. p.28
- 2.3 Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de (Hervouet e Haren, 1996)) p.29
- 2.4 Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica (Hervouet e Haren, 1996) p.30

2.5	Condições iniciais e de contorno utilizadas no sistema de modelagem.	p.31
2.6	Pontos de descarga de efluentes na região do canal São Gonçalo que foram considerados neste estudo.	p.33
3.1	Campo médio da elevação da superfície livre para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro.	p.35
3.2	Campo médio da salinidade na camada de fundo do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro.	p.36
3.3	Campo médio da salinidade na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro.	p.37
3.4	Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro. . .	p.39
3.5	Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de verão.	p.41
3.6	Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de outono.	p.41
3.7	Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de inverno.	p.42
3.8	Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de primavera. . . .	p.43
3.9	Localização dos transectos para a análise do comportamento da pluma de efluentes.	p.43
3.10	Transecto T1 transversal à praia do Larnajal-Pelotas RS com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.	p.44
3.11	Transecto T2 transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.	p.45

- 3.12 Transecto T3 transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro. p.45
- 3.13 Transecto T4 paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro. p.46
- 3.14 Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período de enchente escolhido no dia 09 de abril. p.47
- 3.15 Transecto paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril. p.48
- 3.16 Transecto transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril. p.49
- 3.17 Transecto transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril. p.50
- 3.18 Transecto paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril. p.51
- 3.19 Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período de vazante no dia 25 de junho. p.52
- 3.20 Transecto paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho. p.52
- 3.21 Transecto transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho. p.53

- 3.22 Transecto transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 25 de junho. p.54
- 3.23 Transecto paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho. p.55

Lista de Símbolos

F_x	Termo fonte do momento da equação u
F_y	Termo fonte do momento da equação v
F_z	Termo fonte do momento da equação w
g	Aceleração gravitacional (m/s)
t	Tempo (s)
u	Primeira componente da velocidade (m/s)
v	Segunda componente da velocidade (m/s)
w	Terceira componente da velocidade (m/s)
Z	Elevação da superfície (m)
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática (m/s)
P, p	Pressão
ρ_0	Densidade de referência
$\Delta\rho$	Variação da densidade
S	Elevação da superfície livre do mar
ω	Velocidade angular de rotação da Terra ($7.292 \times 10^5 \text{ rad/s}$)
f	Coefficiente de coriolis
C_f	Coefficiente de fricção adimensional
A	Coefficiente de troca de calor ($Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$)
ν	Viscosidade Cinemática
\vec{W}	Intensidade do vento (m/s)
(ϕ)	Latitude em graus
$\vec{\tau}$	tensão de cisalhamento
T_{ar}	Temperatura do ar
ϵ	Dissipação turbulenta
C_η	constantes do modelo k- ϵ
P_{rt}	constantes do modelo k- ϵ
$C_{1\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ
$C_{2\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ
$C_{3\epsilon}$	constantes do modelo k- ϵ
σ_k	constantes do modelo k- ϵ
σ_ϵ	constantes do modelo k- ϵ
k_C	Taxa de mortalidade
C_o	Concetração de bactérias em ($NMP.100ml^{-1}$)
K_{Ct}	taxa de mortalidade como função da temperatura
K_{Cs}	taxa de mortalidade como função da salinidade
K_{Cb}	taxa associada a deposição dos coliformes junto ao sedimento de fundo
λ	parâmetro empírico

F_{fonte}	Taxa de criação da fonte
q	Fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta
ν_T	Coeficiente de difusão
Q	Fonte ou sumidouro de traçador
a_{vento}	Coeficiente de influência do vento
T	Temperatura (K)
m	Coeficiente de Manning
h	Profundidade da água
z_f	Profundidade local medida na malha
z_s	Elevação da superfície livre
z^*	Sistema Sigma

Lista de Abreviaturas

ANA	Agência Nacional de Águas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CLM	Comissão da Lagoa Mirim
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EPA	Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LEPLAC	Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira
MEF	Método dos Elementos Finitos
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
UNEP	United Nations Environment Programme
USACE	U.S. Army Corps of Engineers

Introdução

Tem aumentado de maneira significativa a preocupação com os recursos hídricos, os quais são afetados por problemas ambientais gerados pela ação antrópica. Em cidades com densidade demográfica acentuada e alto índice de industrialização, os problemas são ainda maiores, pois a atividade humana é mais intensa e gera mais resíduos domiciliares e industriais, causando um grande impacto ao meio ambiente (Gnecco et al., 2005).

A água doce é essencial à vida. Desta forma, é imprescindível zelar pela sua conservação, com um mínimo de potabilidade possível, pois sua disponibilidade no planeta é cada vez mais restrita (Dantas, 2008).

Em torno de 97,5% da água que existe no mundo é salgada, distribuída em sua maior parte nos oceanos, em águas subterrâneas e lagos salgados. Os 2,5% do volume restante de água está distribuído em água salobra, em calotas polares, em águas subterrâneas, lagos, rios e até no solo (ANA, 2012). Seu valor é cada vez maior, dadas as suas diversas utilizações e o custo para manter as condições de potabilidade, fato que a torna prioritária em relação à poluição ambiental.

Um dos principais fatores que contribui para a degradação dos recursos hídricos é a falta de saneamento básico, efluentes industriais sem tratamento, irrigação, entre outros. A cidade de Pelotas (Figura 1.1) situada no sul do estado do Rio Grande do Sul, com uma população de 328.275 habitantes e uma área de 1.610,084 km^2 , está em pleno crescimento urbano (IBGE, 2010). A carga de poluentes domésticos urbanos é coletada

pelo sistema de drenagem pluvial, transportada e descarregada principalmente no canal São Gonçalo.

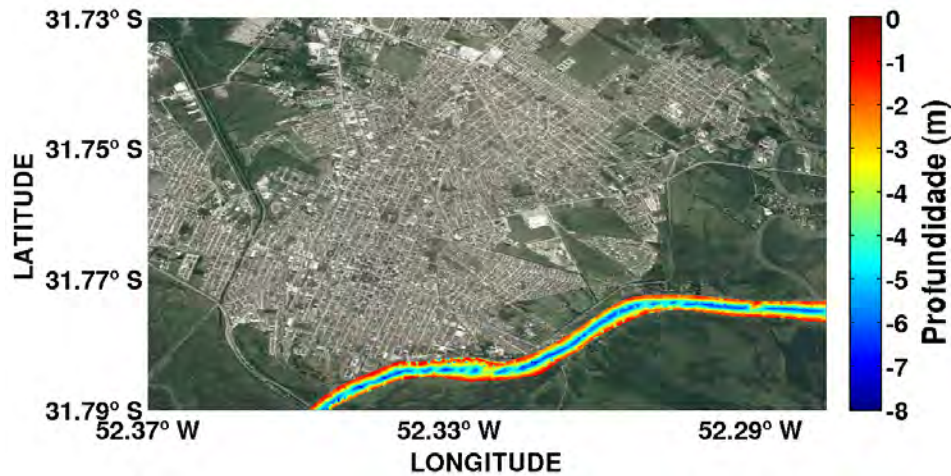


Figura 1.1: Mapa da cidade de Pelotas e o canal São Gonçalo. O mapa de cores representa a profundidade em metros.

O Canal São Gonçalo faz a ligação entre a Lagoa Mirim e a Lagoa dos Patos, e como elemento de ligação entre os dois ambientes, suas águas sofrem influência de ambas as partes (Vieira e Rangel, 1988). Os aportes mais comuns em áreas costeiras são os de origem orgânica, provindos de despejos de esgotos. Como os esgotos apresentam grandes concentrações de nutrientes em sua composição, majoritariamente nitrogênio e fósforo, muitas vezes ocasionam intensa eutrofização do meio onde são depositados (Baptista et al., 2008).

Alterações na qualidade e distribuição de água podem ameaçar a sobrevivência dos seres vivos, estando o desenvolvimento econômico e social dos países, fundamentados na disponibilidade de água de boa qualidade, e na capacidade de sua conservação e proteção dos recursos hídricos (Tundisi, 1999). Pessoas que tenham contato com águas contaminadas com esgoto doméstico ficam submetidas a contraírem doenças devido à presença de enterobactérias contidas nestes dejetos.

Exemplos comuns são: as infecções de olhos, ouvidos e garganta. Tais bactérias são de difícil detecção, por isso comumente se adota como indicador de contaminação fecal, as bactérias do grupo coliformes fecais (Sperling, 1996). A denominação coliformes fecais foi utilizada durante muitos anos para descrever coliformes que fermentavam a lactose com produção de gás à 44,5°C.

A *Escherichia Coli* e algumas cepas de *Klebsiella* e *Enterobacter* apresentam esta característica de termotolerância, porém, somente a *Escherichia Coli* tem como habitat primário o intestino humano e de animais (Guidelines, 2015). *Klebsiella* e *Enterobacter* podem ser encontrados em outros ambientes, como vegetais e solo, onde persistem no meio ambiente por tempo superior ao das bactérias patogênicas de origem intestinal (Doyle e Erickson, 2006).

Portanto, não é correta a relação direta da presença de coliformes termotolerantes em alimentos e água com contaminação de origem fecal, o que levou à necessidade de modificar, na legislação brasileira, a denominação coliformes fecais para coliformes a 45°C (Silva et al., 2006).

O Ministério da Saúde, na Resolução nº 12, de 2 de janeiro de 2001, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2001) adotou a denominação coliformes à 45°C, considerando os padrões “coliformes de origem fecal” e “coliformes termotolerantes” como equivalentes a coliformes à 45°C. Quando em contato com o meio ambiente estas bactérias ficam submetidas a condições adversas à sua sobrevivência. Os fatores que contribuem para tal estão relacionados com o ambiente onde é feito o lançamento dos esgotos.

Para auxiliar na avaliação do impacto de lançamentos de esgotos domésticos em corpos de água, podem ser utilizados modelos numéricos. Estes resultados, aliados ao monitoramento de campo, são uma ferramenta útil para simular os eventos que ocorrem no ambiente, além de permitir um aumento do conhecimento sobre os processos que interferem na qualidade da água, e a simulação de cenários futuros.

O monitoramento de campo é uma etapa importante, pois dados de batimetria, intensidade e direção de velocidade de ventos e correntes, além dos parâmetros de qualidade de água, permitem a determinação das melhores condições de contorno iniciais a serem adotadas na modelagem.

Os modelos de qualidade de água, que relacionam os processos ambientais locais e sua relação com a dispersão dos microrganismos, enfrentam um problema para a computação dos termos relacionados à concentração (densidade) de bactérias, devido às incertezas ligadas a suas taxas de decaimento no meio, além da especificidade do processo dispersivo para cada região. A contribuição da dispersão e da taxa de decai-

mento bacteriano tem sido objeto de diversos estudos, como: Bowie (1992),Monteiro (1992),Roberts e Williams (1992),Canale (1993), entre outros.

Com o avanço computacional, a modelagem numérica surgiu como uma alternativa para prever o comportamento dos escoamentos e dispersão de poluentes. Tais modelos contribuem, por exemplo, em projetos de estações de tratamento de esgoto, na determinação da influência de obras hidráulicas na qualidade da água e vazamentos acidentais de resíduos tóxicos (Oliveira et al., 2015a).

1.1 Aspectos Físicos da Região de Estudo

1.1.1 Hidrodinâmica da Lagoa dos Patos

Uma das maiores lagunas costeiras do mundo, a Lagoa dos Patos (Figura 1.2) é uma laguna estrangulada, localizada na costa sul do Brasil entre 30°S e 32°S. A laguna possui orientação Nordeste - Sudoeste com uma extensão aproximada de 250 *km* e uma largura média de 40 *km*, apresentando uma área 10.360 *km*² (Kjerfve, 1986).

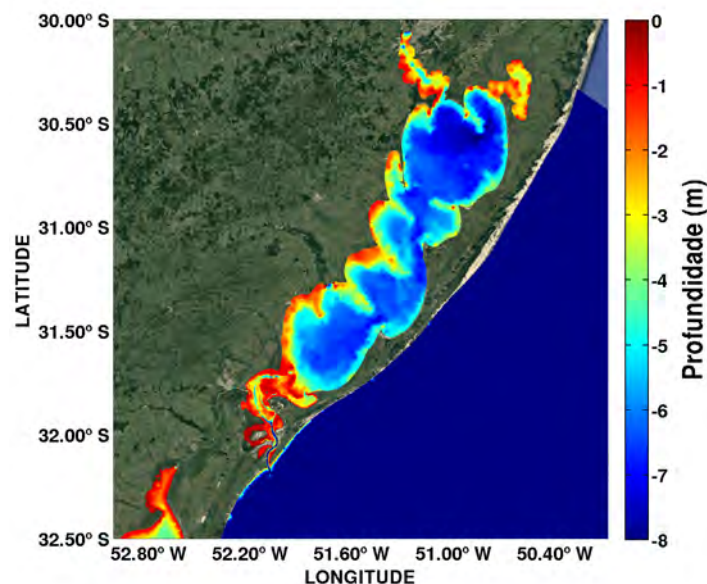


Figura 1.2: Mapa da Lagoa dos Patos com as cores representando a profundidade em metros.

Essa laguna é classificada como rasa, de profundidade média de 5 *m* (Fernandes et al., 2012) com uma conexão com o mar que se dá através de um canal estreito, com

largura de 700 m e com comprimento de aproximadamente 27 km. Por outro lado, o estuário da Lagoa dos Patos se estende por mais de 900 km², na parte mais ao sul da laguna (Seeliger e Cordazzo, 2002).

A região tem clima temperado devido à passagem de frentes meteorológicas de origem polar. Frentes estas que influenciam nas variações de temperaturas, aumento nas taxas de precipitação e no regime de ventos (Möller e Casting, 1999). A precipitação da região sofre influência direta do fenômeno La Niña, que ocasiona uma redução no escoamento de água doce, com um aumento da abundância de espécies no estuário da Lagoa dos Patos. Por outro lado, o fenômeno El Niño intensifica a precipitação e a descarga fluvial, diminuindo a abundância de espécies marinhas no estuário (Garcia et al., 2001).

Dois sistemas meteorológicos influenciam a costa do Rio Grande do Sul, o anticiclone do atlântico sul que ocasiona a circulação de ventos de Nordeste (NE) na maior parte do ano e os ciclones móveis de origem polar, que se dirigem para as zonas de alta pressão (Krusche et al., 2002).

Esta divergência de fontes de massas de ar tropicais e marítimas acaba gerando sobre a área uma circulação de ventos de NE que é predominante durante a maior parte do ano, exceto no outono e inverno (Braga e Krusche, 2000),(Krusche et al., 2002).

Outro importante sistema sub-sinótico da região é o sistema de brisas, estabelecido entre o oceano e a zona costeira. Este sistema é caracterizado pela brisa marinha, que sopra do mar para a terra ao longo do dia e se inverte durante a noite, quando sopra da terra para o mar (Krusche et al., 2002).

As marés tem predominância diurna e são mistas (Fernandes et al., 2004; Möller et al., 1996). O período natural de oscilação da Laguna, que se comporta como um sistema semifechado, é de aproximadamente 24 h, e os seiches têm este período atribuído à combinação de efeitos de brisa e marés diurnas (Möller et al., 2007).

A hidrodinâmica do estuário é controlada pela combinação dos efeitos causados pela ação do vento local sobre a superfície da laguna (mecanismo de elevação/rebaixamento), pela ação do vento não-local agindo na região costeira (transporte de Ekman agindo à 90° para a esquerda da direção do vento), e pela descarga dos rios na região norte da laguna (Fernandes et al., 2002; Möller et al., 2001).

Na maior parte do ano, sob descarga fluvial de baixa a moderada, a circulação é dominada pelo vento (Möller et al., 2001). Ventos de sudoeste (SO) determinam a entrada de água salgada no interior da laguna. Por outro lado, o vento de NE é responsável pela saída de água salgada do interior do estuário em direção à zona costeira.

A Lagoa dos Patos pode ser classificada com um ambiente protegido, pois permanece calma a maior parte do ano, com ondas de energia moderada, exceto em eventos de tempestade e fortes ventos quando são geradas ondas de média energia e curto período (Möller et al., 2007).

Marques (2012), analisou a escala de variabilidade temporal dos ciclos dominantes nas forçantes da circulação, assim como a sua interação com os níveis de água e salinidade dentro da Lagoa dos Patos e na zona costeira adjacente, destacando a importância de ciclos anuais, inter-aneais e decadais.

Os mesmos fatores que controlam a hidrodinâmica do estuário determinam a distribuição propriedades como a salinidade. Esta tem fraca relação com a variabilidade da maré, mas tem alta correlação com a intensidade e a direção do vento, taxa de precipitação e descarga de água doce, em uma escala de horas a semanas (Castello e Möller, 1978; Möller e Casting, 1999). Ventos de nordeste combinados com alta descarga reduzem a salinidade estuarina (Fernandes et al., 2004; Marques e Monteiro, 2011).

1.1.2 Hidrodinâmica da Lagoa Mirim

A bacia da lagoa Mirim possui poucos estudos sobre a sua hidrodinâmica, mas os que existem são de extrema relevância para o presente trabalho. A Lagoa Mirim (Figura 1.3) está localizada entre as latitudes 32°S e 33°S e longitudes 52°W e 53°W e apresenta um área superficial de aproximadamente 3.749 km^2 , dos quais um terço está localizado em território Uruguaio e dois terços em território Brasileiro. Esta lagoa está localizada em uma região complexa, tanto pela sua importância política, por ser uma lagoa binacional, como pelas atividades econômicas ligadas à agricultura, à indústria e à pecuária (Vieira e Rangel, 1984, 1988).

Esta lagoa é o segundo maior corpo hídrico com características lacustres do Brasil, e está ligada à Lagoa dos Patos formando o maior sistema lagunar da América do Sul.

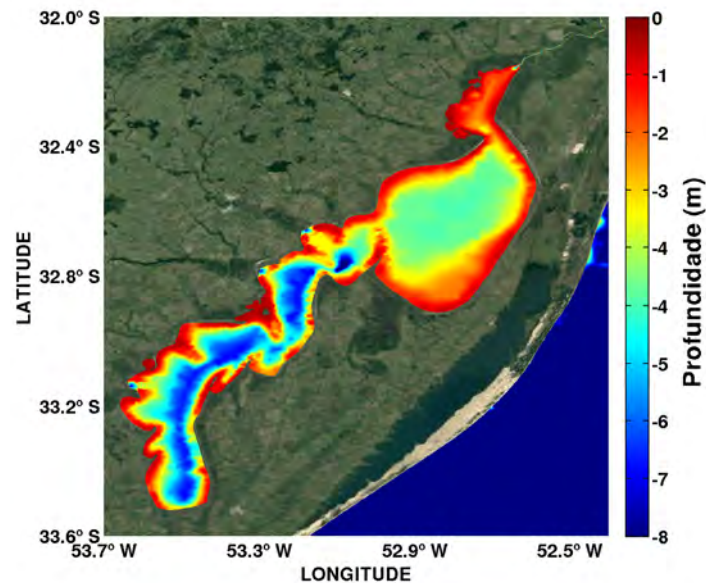


Figura 1.3: Mapa da Lagoa dos Mirim com as cores representando a profundidade em metros.

A conexão entre os dois sistemas ocorre através de um canal natural, chamado de Canal São Gonçalo (Vieira e Rangel, 1984, 1988). A Lagoa Mirim é alimentada por uma ampla malha hidrográfica e por abundantes precipitações na bacia de recepção. Seu volume pode alcançar $17 \times 10^9 \text{ m}^3$, além de variar em função das condições hidrológicas e da vazão do Canal São Gonçalo (Vieira e Rangel, 1988).

Machado (2007) compilou dados de precipitação e calculou séries históricas de vazão, observando que a Lagoa Mirim e o Canal São Gonçalo se alternam entre uma alta disponibilidade hídrica e períodos de deficit hídrico. A Lagoa Mirim por sua vez, recebe aporte de seus afluentes, muito maior que a vazão estimada pelo Canal São Gonçalo para a Lagoa dos Patos, indicando que a Lagoa Mirim atua como um grande reservatório de água doce (Oliveira et al., 2015b).

A ocorrência de um baixo aporte fluvial pode ocasionar a entrada de água salobra da Lagoa dos Patos para a Lagoa Mirim através do canal São Gonçalo, possibilitando a entrada de água salgada e impedindo assim a utilização da água para irrigação e abastecimento público. Diante deste problema, em 1977 foi construída uma Barragem-Eclusa no Canal São Gonçalo, localizada à três quilômetros da cidade de Pelotas, a qual impossibilita a entrada de água salgada em aproximadamente 80% do canal (Gouvêa et al., 2010).

Os processos hidrodinâmicos na Lagoa Mirim são modulados por dois fatores principais, a descarga fluvial de seus afluentes, que determina o volume de água da Lagoa Mirim, e a ação dos ventos, em escala sinótica, que controla a circulação de água neste sistema (Oliveira et al., 2015b). Hirata et al. (2010) mostraram ainda que mudanças de longo período na Lagoa Mirim estão fortemente associadas aos fenômenos de El Niño-Oscilação Sul.

Desta forma, a compilação destes estudos indica uma série de limitações para o entendimento sobre o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da Lagoa Mirim.

1.1.3 Hidrodinâmica do Canal São Gonçalo

O Canal São Gonçalo (Figura 1.4) está localizado na porção oeste-sul do sistema formado pela Lagoa dos Patos e Lagoa Mirim. Este canal se estende por 76 km até se conectar à Lagoa Mirim e se desenvolve no sentido Sudoeste-Nordeste. Este Canal, de origem natural, apresenta um curso sinuoso, com largura variando entre 200 e 300 m e profundidade de até 10 m. A Barragem Eclusa secciona o Canal São Gonçalo a uma distância de 15 km da Lagoa dos Patos e 61 km da Lagoa Mirim (CLM, 1970).

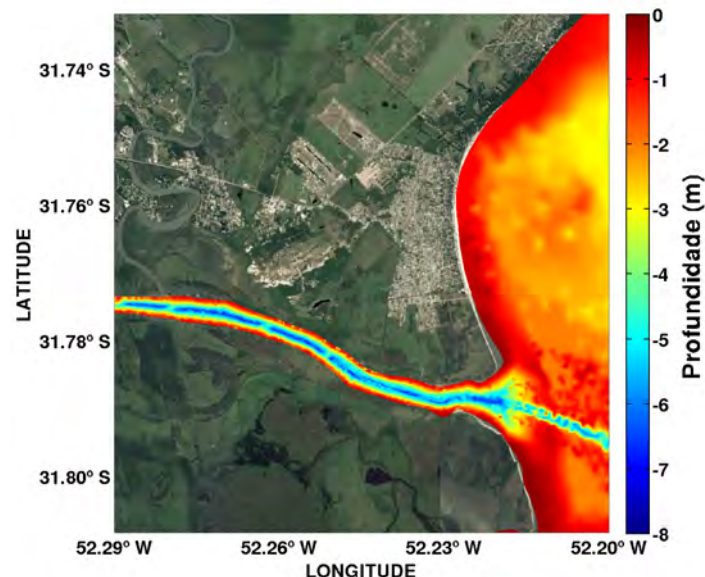


Figura 1.4: Detalhe na região de conexão do canal São Gonçalo e a região do alto estuário da Lagoa dos Patos. O mapa de cores representa a profundidade em metros.

A partir da divisão do canal pela eclusa, se originaram duas regiões classificadas

de acordo com a condição de salinidade. A região límnic está situada a montante (sudoeste) da barragem, na qual a salinidade é impedida de penetrar. Por outro lado, a região estuarina, está situada a jusante (nordeste) da barragem, inserida na região estuarina da Lagoa dos Patos (Seeliger et al., 1996).

O regime natural de escoamento do Canal São Gonçalo é complexo, podendo ocorrer a inversão do seu sentido de corrente, dependendo do desnível e da ação dos ventos, o que lhe designa a denominação de canal (FAO, 1972). A descarga média é de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, sendo a velocidade de fluxo média da ordem de $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (CLM, 1970).

1.2 Estado da arte

1.2.1 Revisão Sobre os Estudos de Qualidade da Água

Na área de meio ambiente, a modelagem computacional vem apresentando diversas aplicações, desde previsões sobre os impactos antrópicos aos ecossistemas até interações ecológicas entre os seres vivos. O estudos de modelagem destes fenômenos, de natureza complexa, vem ganhando destaque na literatura (Bonganha et al., 2007). A aplicação destes instrumentos exige a utilização de técnicas e ferramentas de modelagem e simulação para representar e facilitar tanto a compreensão sobre o seu funcionamento como a tomada de decisão sobre os sistemas ambientais (Saldanha, 2007).

O uso de computadores para a simulação de processos relacionados com a qualidade da água permite diagnosticar problemas sem a necessidade de interferir diretamente no ambiente, examinando fenômenos em um curto período de tempo e com um custo reduzido (Benedini, 2011; Riecken, 1995). Existem diversos modelos desenvolvidos para a simulação da qualidade da água (Azevedo et al., 1998; Benedini, 2011; Cox, 2003; EPA, 2004; Fragoso et al., 2009; Knapik et al., 2011; Riecken, 1995; Sperling, 2007; USACE., 2009), onde a aplicabilidade do modelo depende do uso desejado, da disponibilidade das informações de entrada, além da capacidade dos operadores em aplicar os modelos e interpretar os resultados das simulações (Riecken, 1995).

Segundo Fragoso et al. (2009), o histórico de desenvolvimento de modelos pode ser dividido em fases. Existem os estudos os pioneiros, em que devido à baixa capa-

cidade computacional disponível, os problemas eram resolvidos para trechos de rios com geometria simples. Nas décadas subsequentes, o avanço da capacidade computacional e do conhecimento sobre o tema permitiu o desenvolvimento de modelos para a simulação da qualidade da água em duas e três dimensões, especialmente útil para a avaliação em estuários e lagos.

É de extrema importância o conhecimento prévio dos tipos e magnitudes dos impactos ambientais que podem ocorrer em determinados locais em função do despejo de cargas poluidoras em ambientes aquáticos. Sendo assim, a modelagem computacional é uma ferramenta valiosa no gerenciamento dos recursos hídricos, no estudo da diluição de efluentes, na análise da qualidade da água através do comportamento hidrodinâmico do poluente, e no aperfeiçoamento de projetos de estações de tratamento (Gregório, 2009). A modelagem computacional pode fornecer subsídios, quando acompanhada do monitoramento de campo, para a definição da zona de mistura da pluma de efluentes lançadas no meio marinho (Ortiz et al., 2006).

O emprego de modelos integrados na vertical é aceitável quando, os fluxos são predominantemente horizontais e existe pouca ou nenhuma estratificação no corpo de água a ser estudado. Em função do fenômeno da estratificação produzir reduções substanciais no transporte de massa na direção vertical, o trabalho de modelagem matemática de qualidade da água em lagos e reservatórios tem dependência direta da modelagem de suas estruturas térmicas e salinas (Chapra, 1997; Nogueira, 1991).

Assim, pode ser encontrar na literatura, como em Thomann e Mueller (1987), Nogueira (1991), Chapra (1997) e Tucci (1998), modelos que esquematizam o reservatório estratificado como um sistema de diversas camadas horizontais superpostas, onde as trocas de calor ocorrem por mecanismos de convecção e difusão turbulenta. Além deste, existem os modelos que determinam a posição da termoclina, e em consequência, o epilímio e o hipolímio, com base no equilíbrio entre o efeito desestabilizante da energia cinética turbulenta e o efeito estabilizante da energia potencial da estratificação.

Assim, inúmeros estudos foram realizados no que diz respeito à modelagem hidrodinâmica em lagos, lagoas, estuários e rios. A seguir são citados alguns exemplos destas aplicações.

Babu et al. (2006) utilizaram modelagem numérica para simular a qualidade de

água em torno do emissário submarino de Kochi, oeste da Índia. O modelo utilizado foi o MIKE21 simulando três cenários com descargas diferentes 1, 2.5 e 10 $m^3.s^{-1}$, e taxas de demanda bioquímica de oxigênio de 8640, 21600 e 43200 $kg.dia^{-1}$ ao longo de seis semestre. Os resultados mostraram que a melhor situação para a capacidade de assimilação do ambiente seria considerando o cenário de 10 $m^3.s^{-1}$ com descarga de 8640 $kg.dia^{-1}$, que reduziria bastante a concentração do esgoto dispersado no ambiente.

Uma técnica de análise de fator foi aplicada à grandes conjuntos de dados de qualidade da água na bacia do rio Menderes Buyuk, que se localiza em Anatólia ocidental, oeste da Turquia. Neste estudo foi analisada a contaminação da água de superfície e foram determinadas as correlações entre a qualidade da água e o parâmetros físico-químicos. Segundo Water e Publications (2005), a técnica pode ser uma ferramenta útil na identificação de indicadores de poluição, práticas para delinear a poluição doméstica e agrícola na bacia. Esta técnica também poderia ajudar os gestores locais sobre a adequada gestão da qualidade das águas superficiais no interior da bacia.

Ji et al. (2007) analisaram a qualidade da água do lago Xuanwu, na China, através dos parâmetros de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio. Os resultados obtidos foram razoáveis, o estudo forneceu uma nova abordagem e uma ferramenta prática para a simulação da qualidade da água de fluxo e em lagos rasos.

Rosman et al. (2009), estudaram a hidrodinâmica ambiental para suporte e planejamento da ligação da lagoa Rodrigo de Freitas ao mar, através de dutos afogados no Rio de Janeiro. Os objetivos de tal ligação eram sanar os seguintes problemas: a má qualidade da água em função do excessivo estoque de nutrientes que se acumula em função da incapacidade de exportação, os alagamentos marginais decorrentes de obstruções do canal do Jardim de Alah em épocas de fortes chuvas, o assoreamento do canal do Jardim de Alah e a perda das características estuarinas em função da estagnação e uniformização de suas águas.

Costa e Teixeira (2010) utilizaram um modelo matemático de qualidade de águas superficiais (QUAL-UFMG) para avaliar a qualidade das águas do ribeirão do Ouro, em Araraquara (SP). A partir dos perfis de oxigênio dissolvido e da demanda bioquímica de oxigênio, obtidos ao longo da seção longitudinal do rio, foi possível determinar as zonas de autodepuração e verificar o atendimento aos padrões de qualidade de águas estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005. Os resultados encontrados

comprovaram o significativo impacto da emissão de efluentes pelas indústrias nesse corpo de água.

Palmieri (2006) utilizou o modelo QUAL2E para a previsão da qualidade da água no rio Corumbatá no estado de São Paulo. O trabalho foi realizado com simulação em termos dos parâmetro de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio. Estes dados foram coletados em campo para fornecer uma base de dados para o modelo e assim reproduzir o mais próximo possível da realidade. Os resultados obtidos nas simulações foram satisfatórios e comprovaram a importância da utilização da modelagem na análise do comportamento dos rios para tomadas de decisões.

Um estudo realizado através de modelagem foi aplicado para obter o Índice de Qualidade da Água (IQA) em 10 pontos do rio Turvo Sujo que abrange as cidades de Coimbra, Cajuri, Viçosa, Teixeiras e Guaraciaba, em Minas Gerais, em duas épocas distintas de tempo seco e chuvoso (Nunes, 2008). Neste estudo o autor quantificou o coeficiente de desoxigenação e de reaeração das águas no rio Turvo Sujo, a jusante dos pontos de confluência com seus principais afluentes, e modelou a capacidade de autodepuração do rio.

Os resultados obtidos neste estudo indicaram expressiva melhoria na qualidade da água nos períodos com maior vazão. As variáveis que mais interferiram negativamente no IQA foram: coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio, turbidez e oxigênio dissolvido (Nunes, 2008).

Gobbi et al. (2003) implementaram um modelo hidrodinâmico e de qualidade da água do lago Irai, na Região Metropolitana de Curitiba. Através das simulações foi possível alcançar um modelo capaz de simular processos importantes do reservatório que influenciam o crescimento de algas. Neste estudo também foram simulados cenários onde foram diminuídos ou aumentados a carga de nutrientes nos tributários, de forma a avaliar os impactos na produção de biomassa utilizando um modelo hidrodinâmico bidimensional.

Saldanha (2007), utilizou o modelo SisBAHIA, na região que compreende o trecho final do rio Santa Maria da Vitória e a Baía de Vitória, no Espírito Santo. Através destas simulações foi possível analisar a influência da vazão do rio no comportamento da intrusão salina, correlacionando as condições de vazão fluvial e maré com as concen-

trações geradas na região do estuário da Baía de Vitória. Após a calibração e validação do modelo, foram associadas às características hidrodinâmicas da região à aspectos ligados à qualidade de suas águas, realizando simulações de transporte de constituintes em suspensão.

Machado et al. (2008), descreveram um modelo de circulação tridimensional para simular a dispersão de substâncias solúveis no rio Atibaia, na cidade de Campinas, os quais eram emitidos por uma empresa. Os resultados mostraram que a metodologia proposta é uma boa ferramenta para a avaliação da capacidade de assimilação de cargas de poluentes e do impacto ambiental causado pela emissão de efluentes em rios.

1.2.2 Estudos de Modelagem na Região

A maioria dos estudos aplicados para a Lagoa dos Patos não tiveram como objetivo principal a avaliação da qualidade de suas águas. Em 1986, no projeto “Espinha de Peixe”, foi realizado um levantamento de dados hidrológicos, geológicos e biológicos em 60 estações de amostragem distribuídas ao longo do corpo lagunar.

No ano de 1987, amostras de variáveis físicas, químicas e biológicas foram coletadas mensalmente em 18 estações de amostragem distribuídas ao longo do eixo principal da laguna, no projeto “Laguna dos Patos (Estrutura e Dinâmica do Sistema Lagoa dos Patos)”. Com os dados deste projeto, Vilas Boas (1990) avaliou o comportamento e distribuição de nutrientes, elementos maiores e metais pesados na laguna. Posteriormente, Odebrecht et al. (2005) utilizaram os dados do mesmo projeto para avaliar o comportamento de propriedades pelágicas da laguna, tais como: salinidade, silicato, nitrogênio total (amônia, nitrito +nitrato), fosfato e clorofila-a, em uma situação de seca.

Em 1999, no “Programa para o Desenvolvimento Racional, Recuperação e Gerenciamento Ambiental da Laguna dos Patos/Mirim – Pró Mar de Dentro” variáveis físicas, químicas e biológicas foram novamente levantadas. Os resultados deste projeto foram utilizados por Pereira (2003) para realizar o primeiro estudo dos processos que regem a qualidade da água do sistema através da aplicação da modelagem numérica. Este trabalho utilizou como ferramenta a modelagem numérica, no entanto, o estudo utilizou uma morfologia que não condizia com a configuração e batimetria mais atual

da região estuarina naquele período.

Os resultados mostraram que o modelo foi validado, apresentando bons resultados na simulação da circulação da Lagoa dos Patos. Apesar de alguns desvios terem sido percebidos, não se deveram propriamente ao modelo e sim a ausência de uma melhor distribuição temporal e espacial de dados para as condições de contorno. A avaliação dos parâmetros de qualidade de água indicou que os processos químicos e físicos que ocorrem na Lagoa variam espacialmente e temporalmente, dependendo principalmente das condições meteorológicas da região.

Dados de salinidade, temperatura, material em suspensão, nutrientes dissolvidos, oxigênio e demanda bioquímica de oxigênio foram analisados por (Niencheski et al., 2006) em um levantamento realizado, de agosto a dezembro de 2001, em 16 estações de amostragem distribuídas no eixo principal e áreas marginais da laguna. Os resultados mostraram que no verão há um aumento da contaminação orgânica das águas marginais da laguna, enquanto que, as águas ao longo do eixo, com uma hidrodinâmica mais forte e águas mais profundas, favorecem a capacidade de depuração da laguna.

Posteriormente, no “Programa Costa Sul - Manejo costeiro integrado do baixo estuário da Laguna dos Patos e região costeira adjacente”, Pearson (2007) realizou um novo estudo relacionado à qualidade da água também utilizando a modelagem numérica, no entanto, a autora concluiu que o período de simulação aplicado foi muito curto, impossibilitando a estabilização das variáveis.

Em 2013, utilizando modelagem numérica, Seiler e Fernandes (2013) avaliaram a variação espacial e temporal de nutrientes e biomassa fitoplanctônica ao longo de todo o corpo lagunar em duas situações hidrológicas distintas. Neste trabalho, foram consideradas a nova morfologia da região estuarina da laguna e a estabilização das variáveis no sistema. No entanto, o estudo não focou a abordagem na qualidade da água e não considerou a influência de efluentes de fontes poluidoras.

Xavier (2002) aplicou o modelo numérico SisBAHIA, simulando trocas de massas de água induzidas pelo campo de vento e estimando a dispersão do esgoto sanitário na margem próxima à cidade de Santa Vitória do Palmar.

Entretanto, nada foi feito em relação a modelagem numérica de qualidade de água na Lagoa dos Patos e no canal São Gonçalo que é o objeto de estudo deste trabalho.

Deste modo, pode ser verificada a necessidade de se trabalhar com ferramentas que consigam superar as dificuldades de campo, ao mesmo tempo em que se consiga fornecer uma visão sistêmica dos processos envolvidos.

Os modelos numéricos são ferramentas que, além de suprirem as limitações do procedimento em campo, permitem simular os impactos das atividades humanas no meio e prever a sua subsequente resposta ambiental a curto e longo prazo, auxiliando na preservação e na gestão ambiental (Braga Jr, 1987; Fitzpatrick, 2009; Neves et al., 2001).

Assim, a aplicação da modelagem numérica se apresenta como uma ferramenta indispensável no gerenciamento não só de lagoas costeiras como dos demais corpos hídricos (Gonçalves, 2009). Entretanto, é válido ressaltar que o uso de dados de campo é imprescindível na aplicação de um modelo numérico, uma vez que estes fornecem uma visão discreta do sistema.

A aplicação de modelos numéricos para o entendimento de um sistema real complexo é eficiente e relevante, no entanto, apresenta limitações derivadas das aproximações e constantes aplicadas em seus equacionamentos. Sendo assim, os modelos numéricos podem ser pensados como ferramentas válidas quando são adequadamente calibrados e validados (Precioso et al., 2010).

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar o comportamento e destino final de uma pluma de efluentes domésticos na região do canal São Gonçalo e do alto estuário da Lagoa dos Patos, através da utilização de modelagem computacional.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Identificar a contribuição das principais forçantes para o controle do comportamento da pluma de efluentes;
- Analisar o comportamento médio e o destino da pluma de acordo com as condições ambientais dominantes da região;

- Investigar a estrutura vertical e os processos que controlam a mistura da pluma de efluentes.

Capítulo 2

Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido através da utilização de resultados de modelos globais de circulação atmosférica e oceânica, que foram aplicados como condições iniciais e de contorno em um modelo de circulação oceânica regional. Como estudo de caso, foram obtidas variáveis de interesse na região estuarina da Lagoa dos Patos, Lagoa Mirim e no Canal São Gonçalo abrangendo um período de tempo de 1 ano.

O sistema de modelagem numérica utilizado é o TELEMAC (www.opentelemac.org), através do módulo hidrodinâmico TELEMAC3D. Este módulo é utilizado para estudos de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfícies livres de rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas.

O TELEMAC3D resolve as equações de Navier-Stokes que utiliza o método dos elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet, 2007; Hervouet e Haren, 1996). Para o estudo de um sistema composto por diferentes compartimentos, como a porção lagunar, o estuário e a região costeira adjacente, o método de elementos finitos é o mais adequado, pois, permite: a discretização detalhada da linha de costa, uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, a otimização do tempo computacional e a aplicação de refino diferenciado dentro da grade numérica.

2.0.2 Equacionamento do Modelo

A equação da continuidade (equação 2.1) e as equações de conservação de quantidade de movimento (equações 2.2 e 2.3) são derivadas das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesianas. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC3D considera as aproximações hidrostática e de Boussinesq para as equações de Navier-Stokes.

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade vertical w que possuem pequenas escalas, desprezando assim a difusão, os termos fonte e a aceleração na vertical. Portanto, os termos que consideram as variações da pressão hidrostática (equação 2.4) e da gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento, de forma que a pressão em um ponto depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água.

A aproximação de Boussinesq considera que a diferença na massa específica ($\Delta\rho$) em relação a um valor de referência (ρ_0) é supostamente pequena. Desta forma, como a equação do estado relaciona a massa específica do fluido com a concentração dos traçadores na massa de água, é possível definir a sua influência nas equações hidrodinâmicas.

Neste sentido, é possível criar um conjunto de equações de Navier-Stokes hidrostáticas, que são utilizadas pelo TELEMAC3D para o cálculo da profundidade da água e das componentes da velocidade de corrente em cada ponto do domínio computacional.

Considerando que a massa específica do fluido é denotada por ρ , a pressão por p e o vetor velocidade (u, v, w) , a equação da continuidade e as equações da conservação da quantidade de movimento podem ser escritas em coordenadas cartesianas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla^2(vu) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla^2(vv) + F_y \quad (2.3)$$

Equação da pressão hidrostática:

$$p = \rho_0 g(S - z) + \rho_0 g \int_z^S \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (2.4)$$

Onde, S é a elevação da superfície livre do mar, z é a profundidade local e g a aceleração da gravidade.

Termo Fonte das Equações da Quantidade de Movimento

Fricção com o Fundo

No fundo, a tensão de cisalhamento ($\vec{\tau}$) atuando no fluido se opõe a velocidade de corrente e pode se descrita conforme a equação 2.5:

$$\vec{\tau} = -\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \quad (2.5)$$

O cálculo desta tensão é possível a partir do conhecimento do comportamento do fluxo. Modelos de turbulência podem fornecer esta estimativa, baseado no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo. Através de uma análise dimensional, pode ser obtida a seguinte equação para representar a tensão de cisalhamento como:

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.6)$$

Considerando, as unidades dadas em ($kg.m^{-1}.s^{-2}$), em que C_f é um coeficiente de fricção adimensional. Por definição, esta equação, a qual serve para a determinação da tensão de cisalhamento é baseada na hipótese de que é obtido longe o suficiente

da barreira sólida. Desta forma, juntando as equações anteriores, pode ser obtida a equação 2.7:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.7)$$

A tensão $\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}$ é obtida na formulação variacional dos termos de difusão em elementos finitos. Portanto, qualquer modelo de turbulência irá fornecer uma fórmula para a estimativa desta tensão baseada no conhecimento da rugosidade do fundo e do fluxo na vizinhança da barreira sólida.

Frequentemente, os modelos de turbulência fornecem a expressão para o cisalhamento de velocidade ou o coeficiente de arrasto. Assim, existe uma série de fórmulas para a estimativa do coeficiente de arrasto que podem ser usadas pelo modelo TELEMAC3D, dentre elas, a fórmula do coeficiente de Chézy (equação 2.8), que é utilizada neste trabalho.

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.8)$$

Em que m é o coeficiente de Manning e h é a profundidade da água.

Influência do Vento

A influência dos ventos é considerada no modelo como uma condição bidimensional no contorno superficial. A tensão de cisalhamento gerada pelo vento pode então ser descrita segundo a equação 2.9:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}_H}{\partial n} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{W} |\vec{W}| \quad (2.9)$$

Assim, é descrita a densidade do ar $\rho_{ar} = 129 \text{ kg.m}^{-3}$, \vec{u}_H como a velocidade na superfície do domínio, \vec{W} sendo a intensidade do vento e $|\vec{W}|$ o módulo da intensidade. O coeficiente da influência do vento a_{vento} (adimensional) é dado por (Flather, 1976) como:

$$a_{vento} = 0.656 \times 10^{-3} \quad (2.10)$$

se

$$|\vec{W}| \leq 5 \text{ m.s}^{-1} \quad (2.11)$$

$$a_{vento} = (-0.12 + 0.137|\vec{W}|) \times 10^{-3} \quad (2.12)$$

se

$$5 \text{ m/s} \leq |\vec{W}| \leq 19.22 \text{ m.s}^{-1} \quad (2.13)$$

e

$$a_{vento} = 2.513 \times 10^{-3} \quad (2.14)$$

se

$$|\vec{W}| \geq 19.22 \text{ m.s}^{-1} \quad (2.15)$$

É importante ressaltar que a influência do vento é um fenômeno complexo que depende da rugosidade da superfície livre, da intensidade do vento e da distância na qual a observação é feita a partir da superfície.

Força de Coriolis

Esta força é levada em consideração pelo fato de a Terra ser um referencial não inercial. Ela aparece devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, de forma que, a mesma é somada as equações do movimento em referenciais inerciais. A força de Coriolis em uma certa latitude (ϕ) é dada por F_x (equação 2.16) e F_y (equação 2.17):

$$F_x = 2\omega v \sin\phi = f v \quad (2.16)$$

$$F_y = -2\omega u \sin\phi = -f u \quad (2.17)$$

Trocas de Calor

A potência térmica liberada para a atmosfera por unidade de área P é supostamente proporcional a $T - T_{ar}$, sendo T a temperatura da água na superfície e T_{ar} a temperatura do ar (equação 2.18). Desta forma, pode se definir através de conceitos termodinâmicos que:

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (2.18)$$

Em que, A é o coeficiente de troca de calor em $(W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1})$. Portanto, o fluxo de calor pode ser escrito pela equação 2.19:

$$\phi = -\rho C_p \partial_T \vec{\nabla} \cdot \vec{n} = -\rho C_p \partial_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.19)$$

Considerando o coeficiente de difusão de calor na água $C_p = 4.18 \text{ Kg}^{-1}.^{\circ}C^{-1}$. Pelo agrupamento das duas equações pode se obter a equação das condições de contorno (Equação 2.20):

$$v_T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A}{\rho C_p} (T - T_{ar}) \quad (2.20)$$

O coeficiente A inclui fenômenos como a radiação, convecção do ar em contato com a água e o calor latente produzido pela evaporação da água. (Sweers, 1976) expressa o coeficiente A de acordo com a temperatura da água T e a velocidade do vento W (em m/s) medida no ponto, como descrito na equação 2.21:

$$A = (4.48 + 0.0049T) + 2021.5b(1 + W)(1.12 + 0.018T + 0.0015T^2) \quad (2.21)$$

O parâmetro b varia de acordo com a localização. Seu valor médio para o Atlântico é de 0.0025, e seu valor máximo é encontrado no Mediterrâneo, alcançando 0.0035.

Termos de flutuabilidade e pressão atmosférica

Os termos do gradiente de pressão atmosférica e os termos de flutuabilidade que

aparecem nos termos do gradiente de pressão são integrados com os termos fonte, de forma que, são relativos aos eixos O_x (equação 2.22) e O_y (equação 2.23):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} - g \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz' \right) \quad (2.22)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \approx -\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - g \left(1 - \frac{\Delta \rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_o} dz' \right) \quad (2.23)$$

A salinidade é expressa em $kg.m^{-3}$ e a temperatura T em $^{\circ}C$. A utilização destes traçadores possibilita o cálculo de variações na massa específica para os termos de flutuabilidade.

O modelo TELEMAC3D considera algumas possibilidades de cálculo da massa específica no modelo incorporando os efeitos dos traçadores em conjunto ou separadamente através de equações simplificadas. A massa específica da água pode então ser calculada como função da temperatura e da salinidade.

Modelo K-Epsilon (K- ϵ)

A modelagem de processos turbulentos é um problema que o TELEMAC resolve através de vários métodos. O método escolhido neste trabalho é através da utilização do modelo de turbulência K- ϵ . Este modelo resulta do acoplamento das equações do balanço para K (energia turbulenta) e ϵ (dissipação turbulenta). A aplicação do modelo K- ϵ sempre requer o uso de uma malha bidimensional mais refinada do que as malhas em que os outros modelos de turbulência utilizam, aumentando o tempo computacional. O modelo K- ϵ é representado pelas equações 2.24 e 2.25:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P - G - \epsilon \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_T}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) +$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P + (1 - C_{3\epsilon})G] - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.25)$$

Onde, $k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ representa a energia cinética turbulenta do fluido, $\epsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}$ representa a dissipação da energia cinética turbulenta, $P = \nu_t \left[\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j}$ é o termo de produção da energia turbulenta, $G = -\frac{\nu_t}{Pr_t} \frac{g}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ é o termo fonte devido a forças gravitacionais, sendo Pr_t o Número de Prandtl e ν_T verifica a igualdade: $\nu_T = C_\eta \frac{k^2}{\epsilon}$. Os valores: $C_\eta, Pr_t, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ são constantes do modelo k- ϵ .

Variáveis Escalares - Traçadores

Um escalar pode ser definido como uma substância, partícula ou propriedade presente na água, tal como temperatura, salinidade, sedimentos em suspensão, nutrientes ou não nutrientes. Estes ainda podem ser considerados ativos, quando há interação com a hidrodinâmica, ou passivos quando não interagem com os processos hidrodinâmicos.

A evolução temporal destes escalares depende dos processos advectivos e difusivos, sendo que o primeiro é controlado pelas correntes e ação dos ventos e o último pelos processos turbulentos, fontes de sumidouros. A Equação (2.26) que controla o transporte destes traçadores pode ser escrita em três dimensões em sua forma conservativa como:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} + \text{div}(\rho C \vec{U} + q) = F_{\text{fonte}} \quad (2.26)$$

Onde, C representa a concentração de um traçador arbitrário que pode ser considerada a salinidade, a temperatura ou quaisquer das propriedades relacionadas ao esgoto doméstico. F_{fonte} representa o termo fonte do traçador, a qual pode representar uma taxa de criação ou decaimento, e q o fluxo decorrente da difusão molecular ou turbulenta. A equação 2.27 de advecção e difusão, em sua forma não conservativa pode ser escrita como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\vec{\nabla}C = \text{div}(v_C\vec{\nabla}C) + F_{\text{fonte}} \quad (2.27)$$

Para maiores informações sobre o equacionamento do modelo TELEMAC3D e aplicações para a região de estudo, consultar Marques et al. (2009), Hervouet e Haren (1996) e Hervouet (2007).

Coliformes Termotolerantes

Como indicador do nível de contaminação da água será utilizada a modelagem da concentração de bactérias (coliformes termotolerantes) a partir da utilização de uma equação de advecção e difusão (equação 2.27) e de um termo fonte descrito por uma equação diferencial ordinária (equação 2.28) de acordo com (Kashefipour et al., 2006). A equação que representa o decaimento da concentração de coliformes é dada por:

$$\frac{dC_o}{dt} = -k_C C_o \quad (2.28)$$

Onde, C_o representa a concentração das bactérias coliformes ($NMP.100ml^{-1}$) e k_C representa a taxa de mortalidade (hr^{-1}). A taxa de mortalidade dos coliformes (equação 2.29) é considerada como função da temperatura e da salinidade da água, além de consideração do efeito de decaimento por sedimentação (De Souza, 2008). A taxa de mortalidade dos coliformes pode ser descrita como :

$$k_C = k_{Ct}(k_{Cs} + k_{Cb}) \quad (2.29)$$

Desta forma, K_{Ct} (equação 2.30) representa a taxa de mortalidade como função da temperatura, K_{Cs} (equação 2.31) representa a taxa como função da salinidade e K_{Cb} (equação 2.32) indica a taxa associada a deposição dos coliformes junto aos sedimentos de fundo. As taxas são representadas com as funções descritas abaixo:

$$k_{Ct} = k_{Ct,20}\lambda^{(T-20)} \quad (2.30)$$

$$k_{Cs} = 0.00014S^2 + 0.0024S + 0.0253 \quad (2.31)$$

$$k_{Cb} = \frac{0.04}{H} \quad (2.32)$$

Onde, K_{Ct} representa o coeficiente a uma temperatura de 20 °C, λ é um parâmetro empírico ($\lambda = 1.190$) e H representa a profundidade local da região onde o esgoto está sendo lançado.

2.1 Domínio do Modelo

O domínio do modelo abrange a Lagoa dos Patos, seu estuário, a Lagoa Mirim e a região costeira adjacente até uma profundidade de aproximadamente 3.700 m. A figura 2.1 mostra a área do domínio que se estende entre as latitudes de 30 °S e 36 °S e as longitudes de 47 °W e 54°W.

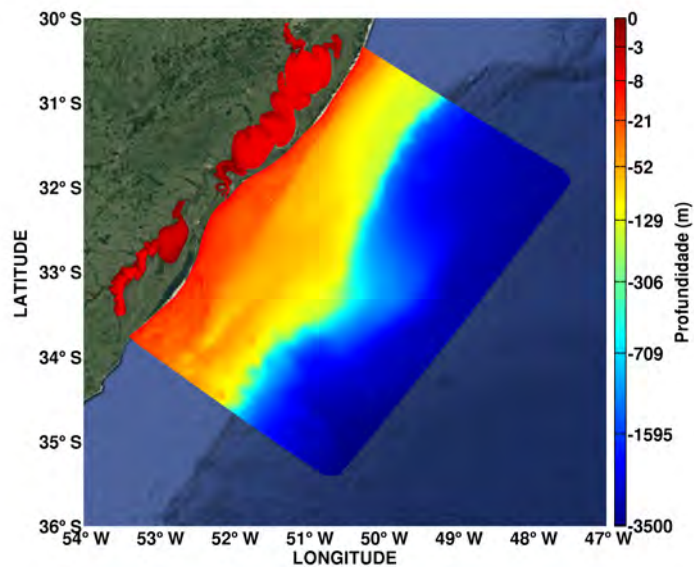


Figura 2.1: Domínio computacional utilizado neste estudo. A escala de cores representa a profundidade em metros.

2.2 Geração da Grade de Elementos Finitos

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo está diretamente relacionada aos dados batimétricos utilizados para a geração da grade numérica. Desta forma, para obter a melhor representação possível das características batimétricas da Lagoa dos Patos, seu estuário e a região costeira adjacente, foi necessário combinar dados batimétricos de diferentes fontes.

Este tipo de grade otimiza a simulação, permitindo representar com resolução adequada as regiões de morfologia complexa, como por exemplo, a região de conexão entre a Lagoa dos Patos e a zona costeira adjacente.

2.2.1 Estrutura da Malha Batimétrica

As diferentes combinações de conjuntos batimétricos ajudaram na realização da criação da grade batimétrica para a realização deste trabalho.

- Foram utilizadas cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a extração dos dados batimétricos da região estuarina:
 - N°2104: Canal São Gonçalo;
 - N°2140: Lagoa dos Patos;
 - N°2350: Pinhal a Rio Grande;
 - N°2112: Rio Grande ao Arroio Chui;
- Os dados das cartas batimétricas na região costeira foram complementados com um levantamento batimétrico realizado pela Marinha do Brasil como parte do projeto Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC).

2.3 Malha Computacional

A integralização dos dados batimétricos foi realizada através do software *Blue Kenue* onde foi gerada a grade numérica de elementos finitos. Este software foi desenvolvido pelo CHC (*Canadian Hydraulic Centre*), sendo recentemente agregado a lista

de programas recomendados para usuários do sistema TELEMAC-MASCARET. Uma das suas funções é de criar malhas de elementos finitos, além da visualização de resultados de saída do modelo. A malha construída para este trabalho possui 159.155 nós (figura 2.2).

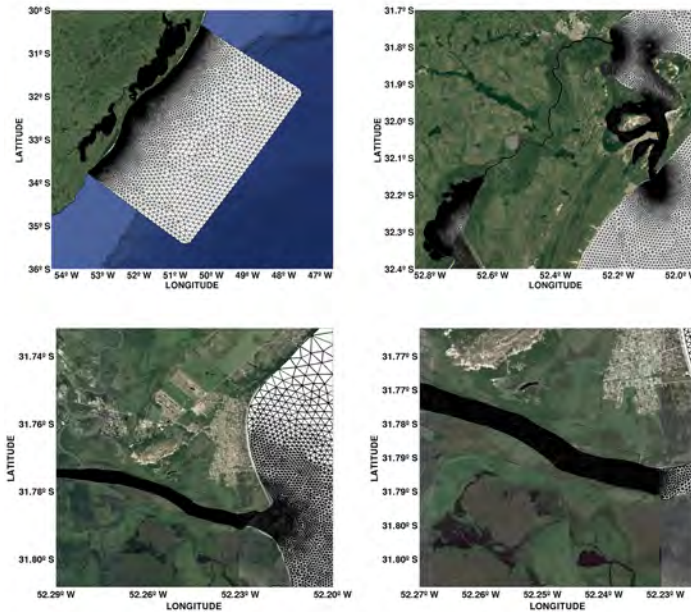


Figura 2.2: Malha de elementos finitos para análise da hidrodinâmica e transporte de contaminantes na região de estudo. Diferentes áreas são apresentadas de forma a apresentar o refinamento numérico utilizado.

2.3.1 Discretização Vertical da Malha

A discretização espacial utilizada está baseada no método de elementos finitos, utilizando prismas com seis nós, de forma que os lados quadrangulares são verticais. Sua projeção horizontal bidimensional é constituída de elementos finitos triangulares com interpolação linear, de forma que é possível construir uma malha tridimensional duplicando os triângulos no domínio Ω quantas vezes se fizer necessário.

Para construir o domínio prismático tridimensional, basta realizar a repetição do domínio bidimensional ao longo da vertical em camadas superpostas (planos).

2.3.2 Transformação Sigma

A transformação sigma clássica utilizada neste trabalho é representada pela relação abaixo:

$$z^* = \frac{z - z_f}{z_s - z_f} \quad (2.33)$$

Onde z_f representa a profundidade local medida na malha e z_s a elevação da superfície livre. Esta transformação é realizada nas equações do movimento e de concentração de traçadores para que seja feita a troca de um sistema de coordenadas (x, y, z) para o sistema de coordenadas (x, y, σ) , que permite acompanhar os limites superficiais e de fundo.

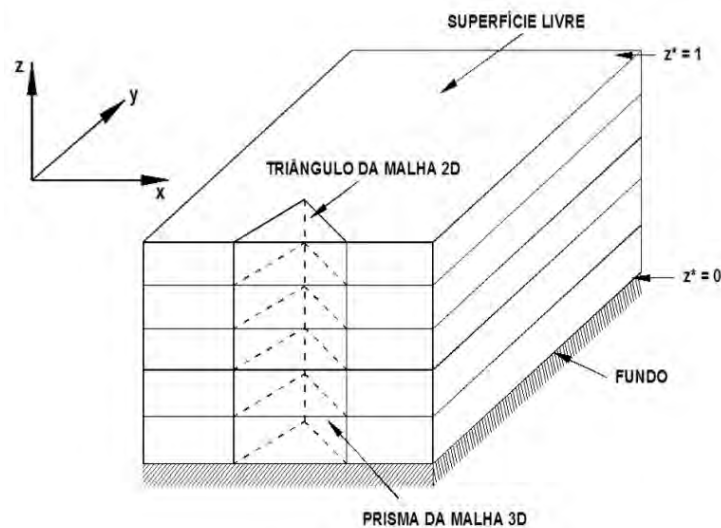


Figura 2.3: Malha tridimensional obtida pela superposição da malha bidimensional de elementos triangulares (modificado de (Hervouet e Haren, 1996))

Neste trabalho são utilizados 15 níveis sigma para a geração de condições iniciais e de contorno, sendo que estes níveis foram distribuídos de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. A figura 2.4 mostra uma visão esquemática da distribuição de 5 níveis sigma ao longo de uma seção transversal de uma malha de altura variando de 0.4 m a -0.2 m.

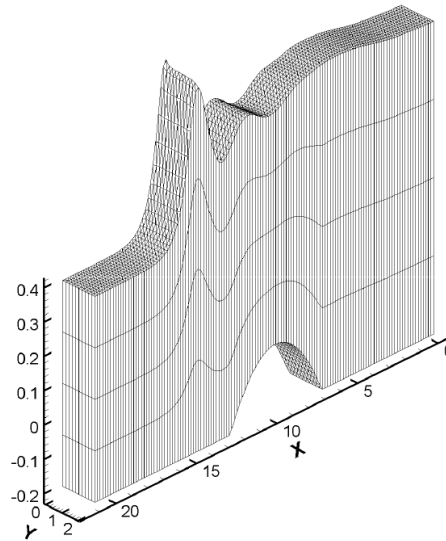


Figura 2.4: Representação tridimensional dos níveis sigma da malha numérica (Hervouet e Haren, 1996)

2.4 Condições Iniciais e de Contorno Climatológicas

A partir do modelo HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), foram obtidos os dados de circulação oceânica, representados pelas componentes da velocidade da corrente, salinidade e temperatura da água do mar. Este modelo resolve as equações primitivas de movimento do oceano e equações de transporte de traçadores ativos. É caracterizado pela utilização de três tipos de sistemas de coordenadas verticais: coordenadas isopicnais, coordenadas sigma e coordenadas cartesianas Z .

Uma das vantagens da utilização do modelo HYCOM é que ele se utiliza de coordenadas verticais adequadas para cada região do oceano. A resolução espacial dos dados que estão sendo utilizados como condições iniciais e de contorno neste trabalho é de 0.083° de latitude e longitude, com escala temporal é de 24 h.

O NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*) é um centro de pesquisa que tem por objetivo compreender o processos físicos da Terra e aprimorar previsões de tempo e clima em escalas globais, regionais, de curto a longo prazos. Os dados de temperatura do ar, pressão atmosférica, intensidade e direção dos ventos obtidos do NCEP/NCAR também foram utilizados como condições iniciais e de contorno neste estudo. A resolução espacial dos dados utilizados no trabalho são de 2.5° , com escala temporal de 24 h.

Os dados de amplitude e fase das cinco principais componentes de maré astronômica da região (K1, M2, N2, O1 e S2) foram calculadas pelo Grenoble Model FES95.2 (Finite Element Solution – v.95.6). O sinal de maré foi representado como uma soma de bases de funções cossenoidais calculadas para cada ponto da fronteira oceânica, em cada passo de tempo da simulação numérica.

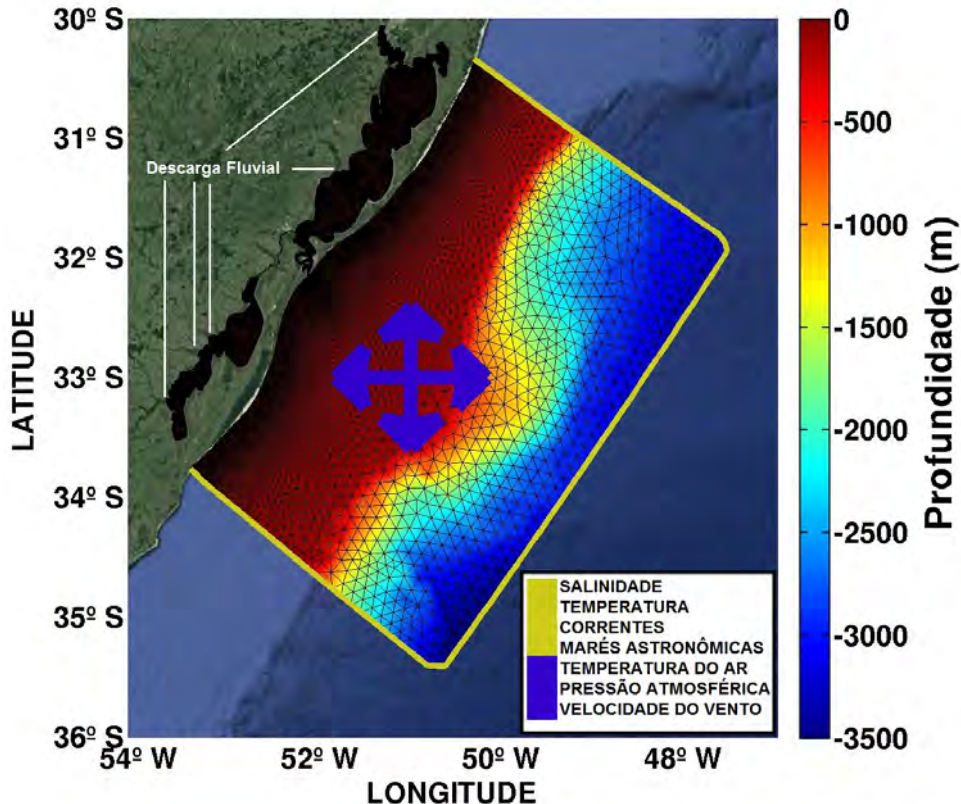


Figura 2.5: Condições iniciais e de contorno utilizadas no sistema de modelagem.

Neste estudo foi considerado o período compreendido entre os anos de 2003 e 2015. Com a utilização destes dados foi calculada uma média de todos os dias compreendidos ao longo destes anos. Desta forma, os resultados obtidos são um conjunto de condições de contorno anuais formadas por dados médios diários que levam em consideração os principais ciclos de variabilidade sazonal e interanual da região de estudo. A partir destes conjuntos de dados foram construídas condições iniciais e de contorno para as variáveis utilizadas como forçantes do modelo numérico (figura 2.5).

O modelo TELEMAC3D é forçado na região oceânica (linha amarela) utilizando dados de marés astronômicas, velocidade de corrente, temperatura e salinidade da

água do mar que são interpolados em cada nó do domínio numérico. Como condições de contorno superficiais (cruz azul) são utilizados dados de temperatura do ar, pressão atmosférica, intensidade e direção dos ventos em cada um dos nós da camada superficial do domínio numérico.

Os principais rios da região de estudo foram forçados com descarga fluvial média nos pontos representados pelas setas brancas. Nestes rios foram utilizados médias de longo período, para o rio Guaíba de $1.080 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ de acordo com (Marques, 2012), do rio Camaquã, de $400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ de acordo com (Vaz, 2006). A descarga dos rios Jaguarão, Tacuarí e Cebolati foram forçadas com valores de $50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, $100 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e $150 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente.

A vazão média total considerada para esta simulação pode ser considerada subestimada para os afluentes da Lagoa Mirim, considerando os resultados obtidos por Oliveira et al. (2015a), que em seu trabalho estimou valores de aproximadamente $600 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ de vazão para o Canal São Gonçalo, proveniente dos afluentes da Lagoa Mirim, para o período de janeiro de 2009 até dezembro de 2011.

Porém, é importante ressaltar que o valor médio obtido no estudo de Oliveira et al. (2015a) considera um período de apenas três anos, e os valores aplicados neste estudo foram adaptados a questões de estabilização do sistema de modelagem aplicado considerando uma primeira aproximação do estudo tridimensional do sistema Lagoa dos Patos - Mirim.

2.4.1 Modelo do poluente

A simulação da dispersão de efluentes de esgoto doméstico no canal São Gonçalo, Pelotas-RS, será realizada através de um modelo numérico tridimensional de advecção – difusão – decaimento, com um sistema de elementos finitos, estruturado em FORTRAN95, e que se encontra acoplado diretamente ao modelo hidrodinâmico TELEMAC3D. Desta forma a variável que será utilizada como representação dos efluentes será a concentração de Coliformes Termotolerantes.

O modelo é alimentado com dados obtidos diretamente nas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), visto a ausência de dados observados diretamente no ambiente. Os pontos escolhidos para as descargas de eflu-

entes foram selecionados através de análise em um aplicativo de mapas (<https://www.google.com.br/map>) com posterior visitação in loco.

Estes locais são canais de drenagem (figura 2.6) que escoam praticamente todo o fluxo de água da chuva. Como o município de Pelotas não dispõe de tratamento total de efluentes, esta carga de poluentes oriunda de esgoto doméstico não tratado é transportada para os rios e lagoas, podendo causar um impacto negativo em diferentes ecossistemas e ambientes aquáticos (Brown e Peake, 2006).



Figura 2.6: Pontos de descarga de efluentes na região do canal São Gonçalo que foram considerados neste estudo.

Neste estudo, foi realizada uma simulação de um ano utilizando uma concentração de coliformes de $10^8 \text{ NMP.100ml}^{-1}$, que representa uma concentração média segundo Metcalf e Eddy (2003). As vazões dos canais de descarga da cidade de Pelotas-RS serão arbitrariamente consideradas com $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e a figura 2.6 mostra as posições na região de estudo onde os locais de descarga de poluentes serão consideradas no canal São Gonçalo.

Capítulo 3

Resultados e Discussão

3.0.2 Hidrodinâmica do local de estudo

É de extrema importância o conhecimento das condições hidrodinâmicas das áreas de estudo, para assim, poder desenvolver uma análise dos processos envolvidos na dispersão de poluentes. Neste sentido, o trabalho foi realizado através da análise direta das simulações hidrodinâmicas e do transporte de contaminantes na área do Canal São Gonçalo e do alto estuário da Lagoa dos Patos.

O período de simulação foi de um ano, sendo este equivalente à média climatológica calculada entre os anos de 2003 a 2014. Os dados de condições iniciais e de contorno para este ano climatológico foram construídos com dados globais atmosféricos da NOAA e oceânicos provenientes do modelo Hycom.

Foram escolhidos seis pontos de descargas de efluentes no canal São Gonçalo para alimentar o modelo e fazer a simulação da dispersão dos efluentes. Para a análise da hidrodinâmica, foram utilizados campos médios da elevação da superfície livre, campo de salinidade e campos de concentrações de coliformes. Também, foram realizadas análises da sazonalidade da concentração de coliformes, bem como, da sua variabilidade temporal, de forma a identificar a dominância no comportamento da pluma de coliformes.

Dentro da escala temporal do estudo, a dinâmica da região é controlada principalmente pela ação dos ventos e da descarga fluvial, as quais condicionam as trocas de

água entre a Lagoa dos Patos e a região costeira adjacente. Por outro lado, os processos de troca entre o Canal São Gonçalo e a região do alto estuário da Lagoa dos Patos são pouco conhecidos, por isso a importância de se realizar o estudo da hidrodinâmica do local.

Conforme se observa na figura 3.1, o campo médio da elevação da superfície livre, mostra que na porção lagunar da Lagoa dos Patos, as médias alcançam até 1 m. Por outro lado, na região costeira, a elevação média do nível do mar não supera os 0,8 m. Este padrão médio de elevação favorece um fluxo residual de vazante em direção ao oceano, na maior para do ano conforme observado por (Möller et al., 2001). Este padrão de fluxo de vazante pode ser modificado pela ação do vento, invertendo o sentido do desague da laguna e proporcionando a entrada de águas costeiras no estuário, conforme já foi observado por (Möller et al., 2001).



Figura 3.1: Campo médio da elevação da superfície livre para o período de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

A porção estuarina sofre influência da ação local e não-local dos ventos, marés e interação dos processos dirigidos com a topografia (Fernandes et al., 2005). A ação não-local dos ventos é relacionada a um mecanismo de desníveis forçados na porção costeira. Seus efeitos são sentidos pelo aumento ou decréscimo dos níveis de água na costa transversalmente a ação dos ventos dominantes. Estes efeitos ocorrem com escalas de tempo que variam entre 2 e 20 dias como resposta a mudança na tensão de cisalhamento do vento, e as respostas da tensão de cisalhamento nos campos de vento são correlacionadas às mudanças no campo de pressão atmosférica (Fernandes et al., 2002; Möller et al., 2001).

3.0.3 Salinidade

Observando a figura 3.2 pode ser observado o padrão típico de salinização encontrado na região do estuário da Lagoa dos Patos. A entrada da água do mar ocorre principalmente pelas zonas mais profundas do canal de navegação em direção ao interior da Lagoa dos Patos. Em média, a entrada de água salgada se estende até os limites do saco da Mangueira, com valores de 25, indicando uma característica média de ambiente polihalino. Os ambientes costeiros possuem características diferentes dos oceanos, em relação à salinidade podem ser classificados como: liminéticos (salinidade entre 0 e 0,5), oligohalinos (salinidade entre 0,5 e 5), mesohalinos (salinidade entre 5 e 18), polihalinos (salinidade entre 18 e 30), euhalinos (salinidade entre 30 e 40) e hiperhalinos (salinidade superior a 40) (Bulger et al., 1998).

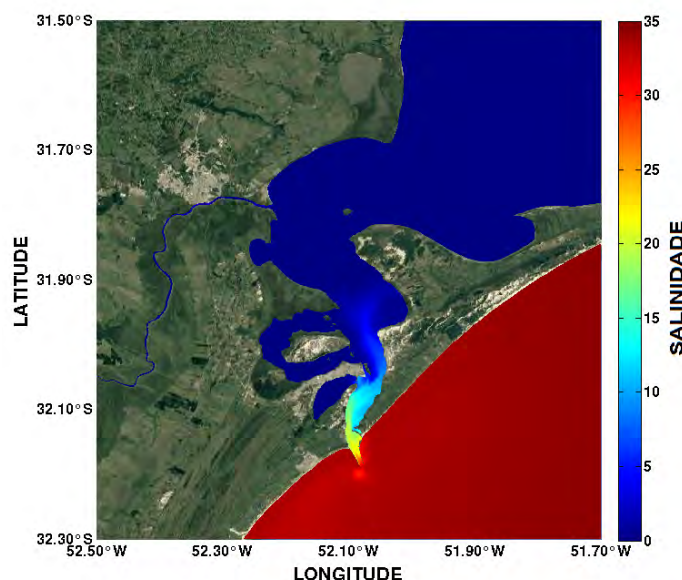


Figura 3.2: Campo médio da salinidade na camada de fundo do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

A Lagoa dos Patos possui uma interface estuário-oceano, que é influenciada diretamente por fatores meteorológicos, tais como: passagens de sistemas frontais e precipitação pluvial (Möller et al., 2007). Mudanças nestes regimes acarretam em anomalias no padrão de entrada de água marinha no estuário e na vazão, refletindo na salinidade da região (D'Incao, 1991). Além de ter um papel importante nos movimentos e na mistura das massas de água, devido ao seu efeito na densidade, a salinidade condiciona a fisiologia de invertebrados e vertebrados (Bulger et al., 1998).

A presença do sal exerce também outros efeitos deletérios sobre os microrganismos. Segundo Frazier e Westhoff (1988), entre estes efeitos pode ser destacado a ionização em solução, que libera o íon Cl e que é tóxico aos microrganismos. Além disso pode ocorrer a redução da solubilidade do oxigênio nas soluções, sensibilização das células ao CO₂ e interferência na atividade de enzimas proteolíticas. Ainda segundo os autores, a ação do NaCl varia diretamente com suas concentrações e com a temperatura.

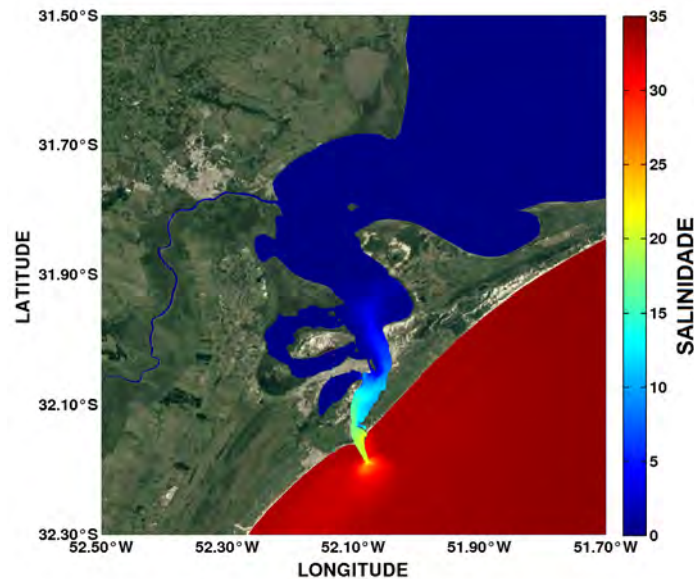


Figura 3.3: Campo médio da salinidade na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

A análise do campo médio de salinidade da superfície (figura 3.3) mostra uma pluma de água doce na região costeira adjacente à Lagoa dos Patos. Nesta região, pode ser observado que em média a Lagoa dos Patos exporta água doce para a zona costeira formando uma pluma de água de baixa salinidade. A descarga da Lagoa dos Patos e a influência de processos de ressurgência sustentam uma grande biomassa de fitoplâncton encontrada na plataforma continental do sul do Brasil Ciotti et al. (1995).

Estas condições contribuem para que a Plataforma Continental do Sul do Brasil seja considerada uma das mais importantes zonas pesqueiras da costa brasileira Castello et al. (1990). A interação da descarga da Lagoa dos Patos e os processos remotos na zona costeira contribuem para a manutenção dos padrões de variabilidade dos nutrientes, material em suspensão e deposição de sedimentos na porção costeira adjacente.

Períodos de moderada a alta descarga fluvial na Lagoa dos Patos promovem uma

maior exportação de águas de origem continental, a manutenção de condições de alta estratificação salina ou circulação típicas de vazante de rio na região da desembocadura da laguna Marques et al. (2010, 2009).

3.0.4 Pluma de coliformes

A pluma de coliformes foi inicialmente analisada pelo seu comportamento médio (figura 3.4). Esta pluma se comporta seguindo as condições hidrodinâmicas da região, de maneira que a forma e o padrão de espalhamento da pluma de coliformes é principalmente controlada pela ação dos ventos e da descarga fluvial. O campo médio da concentração de coliformes indica uma maior concentração na região do canal São Gonçalo (valores maiores que $5 \cdot 10^5 NMP.100ml^{-1}$).

Na região da saída do canal São Gonçalo, junto à região do alto estuário da Lagoa dos Patos, as concentrações médias são de aproximadamente $3,5 \cdot 10^5 NMP.100ml^{-1}$. Esta pluma tem uma tendência de espalhamento médio em direção à região do baixo estuário, com uma tendência de espalhamento junto à margem leste do estuário da Lagoa dos Patos. Além disso, esta pluma mostra um alto potencial de diluição ao longo da região estuarina da Lagoa dos Patos.

A figura 3.4 mostra as proporções de alcance da pluma de coliformes Fecais, a média da extensão desta pluma vai desde a região da saco da mangueira até a praia do Laranjal, em Pelotas. Estes resultados médios indicam que o grau de contaminação do Canal São Gonçalo apresenta índices mais elevados, por outro lado, na região do alto estuário, a porção mais influenciada fica na vizinhança da praia do Laranjal.

Foi verificado nas análises da concentração de coliformes uma pequena diferença entre as camadas superficiais e de fundo, neste sentido, apenas a camada de superfície é apresentada. Para dar maior destaque à estratificação, será apresentado subsequentemente uma análise de transectos nas regiões mais influenciadas pela pluma de coliformes.

Águas costeiras, incluindo sistemas estuarinos, representam recursos naturais de grande valor econômico, apresentando uma diversidade de espécies importantes para a natureza e o homem. A população é atraída para áreas costeiras, e depende fortemente da qualidade ambiental para seus meios de subsistência, alimento, saúde e recreação.

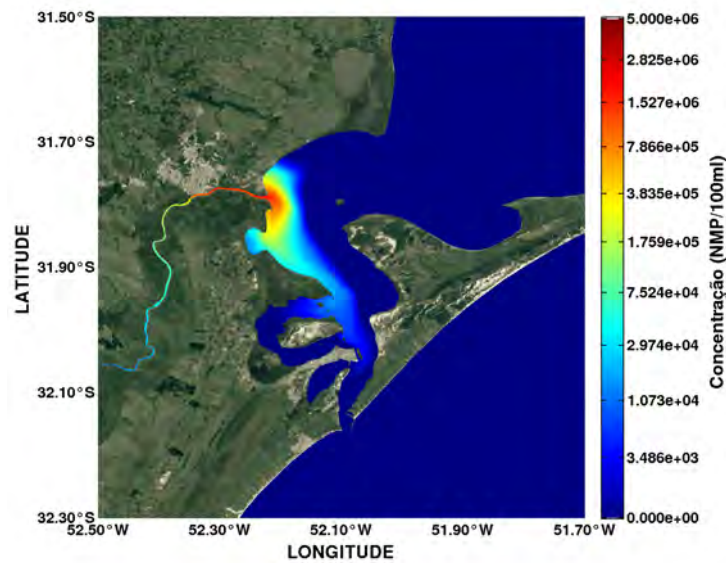


Figura 3.4: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

Na faixa terrestre até 60 *km* da costa habitam mais de 50 % da população mundial Chhabra e Geist (2006).

De acordo com IBGE (2010), 26,6 % da população brasileira reside em municípios da zona costeira, sendo esse número equivalente à 50,7 milhões de habitantes. Juntamente à população residente nestas áreas estão os turistas que todos os anos migram para estas regiões em busca de lazer.

As pressões ambientais resultantes, além das alterações diretas ao longo da costa, afetam fortemente a qualidade das águas costeiras (UNEP, 2002). A saúde pública sofre com a poluição das águas costeiras, as praias que ficam impróprias se tornam um indicativo de perigo para o lazer e os esportes de contato com a água.

Como consequência dessa ocupação e do lançamento indiscriminado de águas residuárias, começaram processos locais de contaminação microbiológica, causados pela elevada presença de organismos patogênicos (Díaz, 2002; Juanes et al., 1997). Os esgotos sanitários, além de conter matéria orgânica em estado dissolvido, coloidal ou particulado, apresentam contagem elevada de organismos, em sua maioria de origem fecal que ao final são lançados ao meio aquático, representando um risco para saúde humana.

Entre os microorganismos, se encontram as bactérias presentes no sistema digestivo dos mamíferos, como os Coliformes Termotolerantes (*Escherichia Coli*) e os Enterococos (*Streptococcus faecalis*), que, devido à sua abundância, servem de indicadores de contaminação por organismos patogênicos (D.W. et al., 2002).

A contaminação microbiana de vírus entéricos e bactérias tem sido relatado como um problema crônico em várias regiões costeiras ao redor do mundo, sendo estimado um impacto econômico de 13 bilhões de dólares em todo mundo e em mais de 2 milhões de pessoas devido as doenças relacionadas com a contaminação marinha (WHO., 2003).

Uma vez alcançado o meio marinho, estes microorganismos, associados, em sua maioria, às partículas em suspensão que transportam os efluentes (Borts e Selvakumar, 2003), terão sua concentração reduzida devido a processos físicos relacionados à diluição inicial (advecção e dispersão) e ao decaimento bacteriano ocasionado por fatores ambientais como a radiação solar, pH, temperatura, salinidade ou predação, podendo provocar a redução de muitos desses microorganismos durante sua dispersão (Canteras et al., 1995; Roberts et al., 2010).

3.0.5 Análise do padrão sazonal da pluma de coliformes

Foi analisado o comportamento médio da pluma de coliformes sazonalmente. Estas plumas se comportam seguindo as condições hidrodinâmicas das estações do ano. Desta forma o padrão de espalhamento da pluma de coliformes é principalmente controlada pelas ações de ventos e descarga fluvial referente a estação analisada.

A figura 3.5 mostra as proporções de alcance da pluma de coliformes Fecais, a média da extensão desta pluma vai desde a região da saco do Silveira até a praia do Laranjal, na estação do ano verão. Este resultado médio sazonal indica que o grau de contaminação do Canal São Gonçalo apresenta um alto índice de concentração, com valores acima de $5 \cdot 10^5 NMP.100ml^{-1}$, com pouco espalhamento da pluma na laguna, o poluente se dispersa mais no sentido Canal São Gonçalo Lagoa Mirim.

A figura 3.6 mostra as proporções de alcance da pluma de coliformes Fecais, a média da extensão desta pluma vai desde a região da saco da Mangueira até a colônia dos pescadores Z3 no bairro Laranjal, no outono. Este resultado médio sazonal indica que o grau de contaminação do Canal São Gonçalo continua apresentando um alto

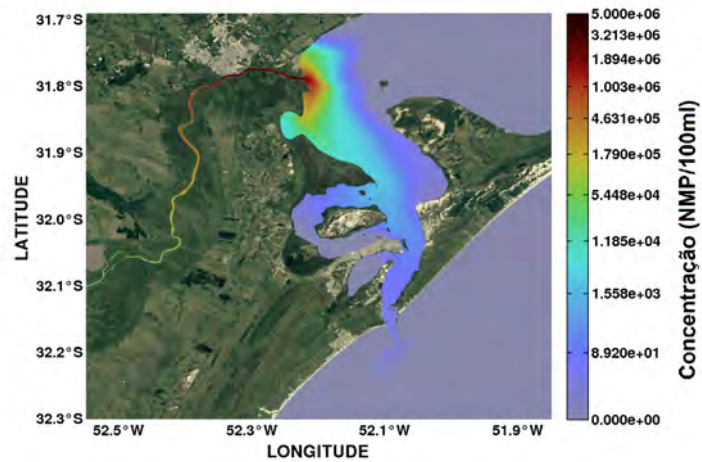


Figura 3.5: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de verão.

índice de concentração, mas com um espalhamento maior da pluma na laguna, o poluente se dispersa nos sentidos do oceano e também no sentido norte da laguna, não mais direcionando para a Lagoa Mirim.

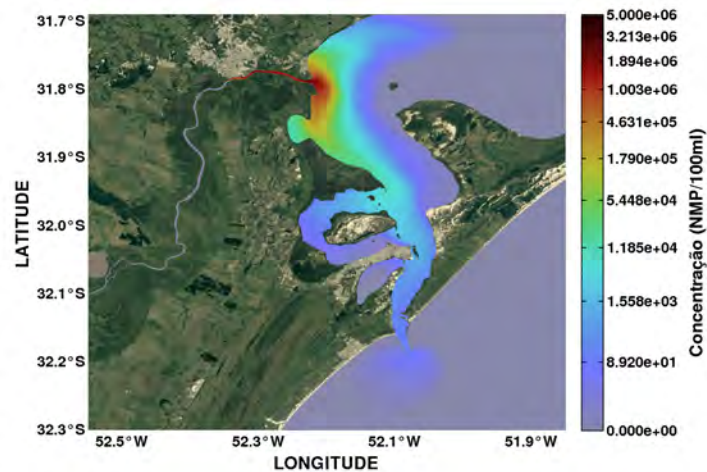


Figura 3.6: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de outono.

A figura 3.7 mostra as proporções de alcance da pluma de coliformes Fecais, a média da extensão desta pluma vai desde a região da saco da Mangueira, podendo

chegar também ao oceano em baixas concentração, até a a praia do Laranjal, na estação inverno. Este resultado médio sazonal indica que a concentração de contaminação do Canal São Gonçalo diminui.

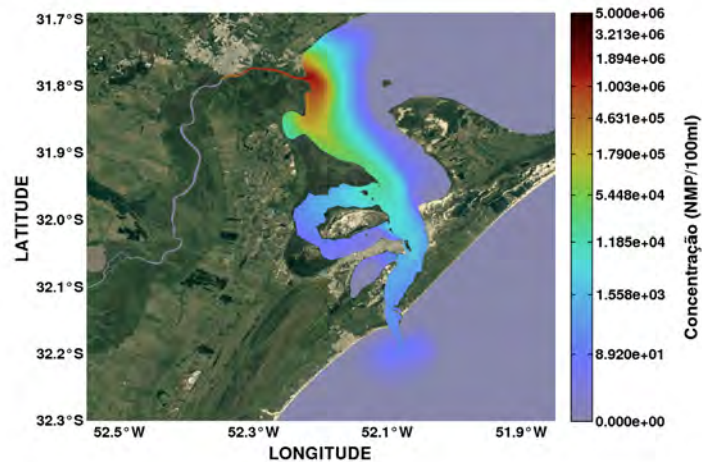


Figura 3.7: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de inverno.

A figura 3.8 mostra as proporções de alcance da pluma de coliformes Fecais na estação primavera, a média da extensão desta pluma é a maior de todas as estações do ano e vai do oceano até a praia do Laranjal. Este resultado médio sazonal indica que o grau de contaminação do Canal São Gonçalo é o menor e apresenta o menor índice de concentração. O espalhamento da pluma na laguna é praticamente todo direcionado no sentido do oceano.

3.0.6 Transectos

A análise da estratificação será apresentada utilizando alguns transectos que são apresentados na figura 3.9, para as regiões mais influenciadas pela pluma de coliformes.

O transecto ortogonal a praia do Laranjal (figura 3.10), mostra que a concentração de coliformes fica mais retida na orla da praia, não se espalhando para o meio da Lagoa dos Patos, por conta do padrão médio de correntes, representadas pelos vetores em preto, que de certa forma represam os contaminantes.

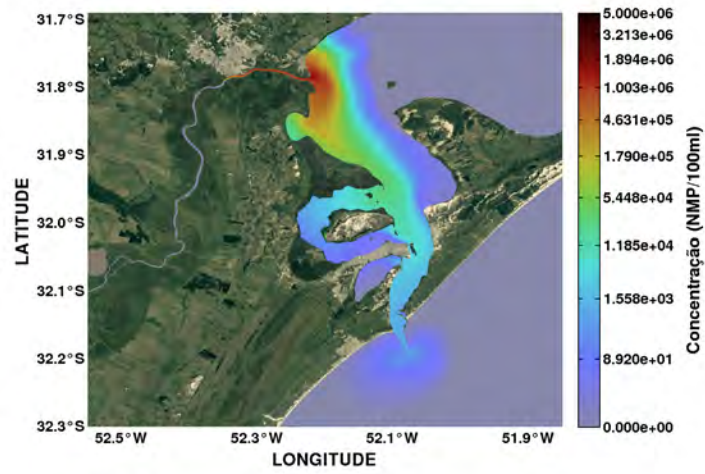


Figura 3.8: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período sazonal de primavera.

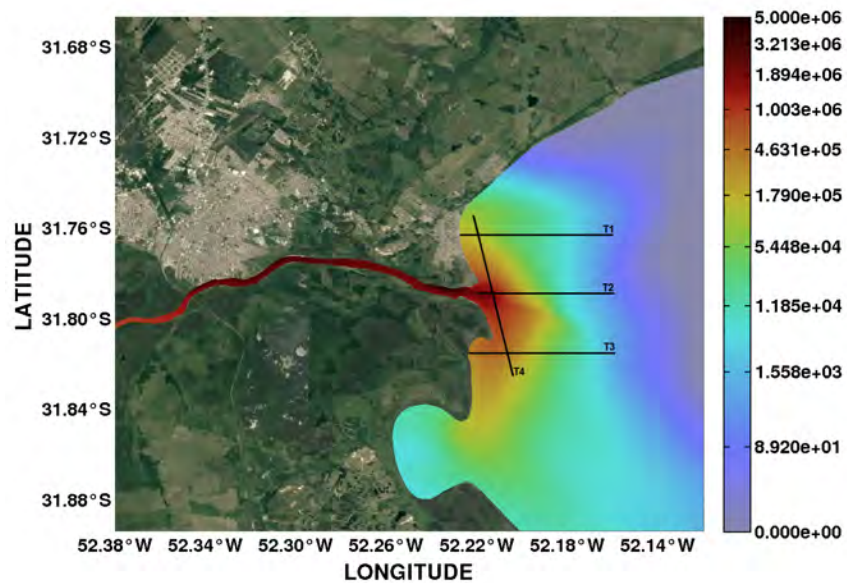


Figura 3.9: Localização dos transectos para a análise do comportamento da pluma de efluentes.

A concentração dos coliformes se encontra pouco estratificada ao longo da coluna de água e dispersa ingualmente nesta região. Esta alta concentração (valores superiores a $1,4 \cdot 10^6 \text{NMP} \cdot 100\text{ml}^{-1}$) na orla favorece uma maior contaminação pelo contato com os seres humanos, já que a praia do Laranjal é um importante local de pratica de banho, esporte e lazer para a população de Pelotas e redondezas, além de ser utilizada para a atividade de pesca que é a garantia de sustento e alimento de muitas pessoas da região.

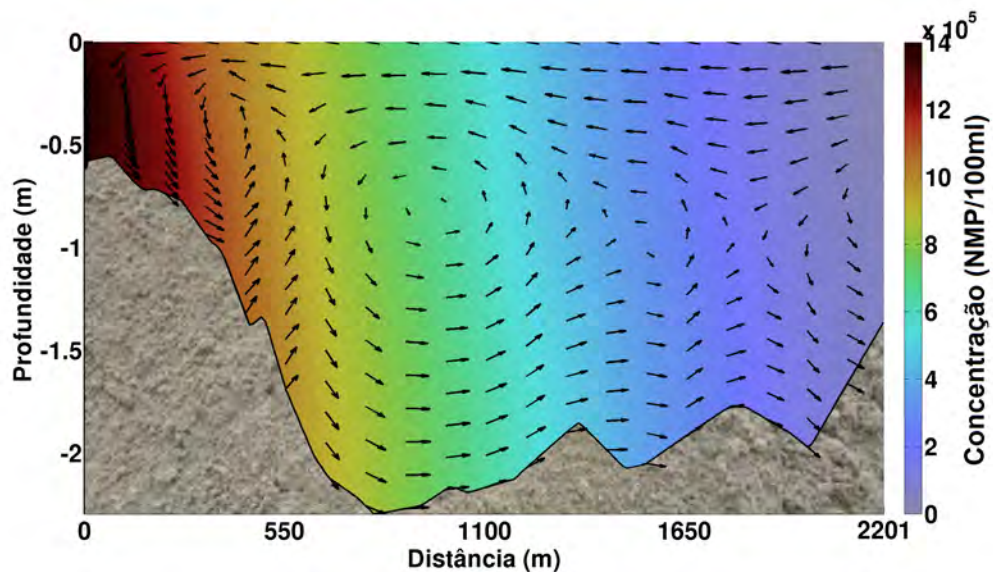


Figura 3.10: Transecto T1 transversal à praia do Laranjal-Pelotas RS com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

O transecto 3.11 mostra o espalhamento e dispersão da concentração de coliformes advinda do Canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos. Pode ser observado que no limite do Canal a concentração é bem elevada (valores superiores a $1,4 \cdot 10^6 \text{NMP} \cdot 100\text{ml}^{-1}$). Conforme esta pluma chega na região do estuário da Lagoa dos Patos, esta concentração vai se diluindo e diminuindo em direção a margem leste do estuário. Esse deslocamento e diluição do poluente, por conta do padrão médio de correntes, fica bem representado pelos vetores em preto na figura 3.11.

O transecto da figura 3.12 mostra a concentração de coliformes mais afastada da encosta da laguna, se espalhado por toda a coluna d'água, da superfície até o fundo. Nessa parte da laguna, a pluma já está sendo levada pelas correntes, de forma que as maiores concentrações (valores superiores a $1,4 \cdot 10^6 \text{NMP} \cdot 100\text{ml}^{-1}$) ocorrem na porção mais central do canal nesta região do estuário, à cerca de 750 m da margem oeste. A figura 3.12 mostra através dos vetores em preto, que o poluente é direcionado pelos

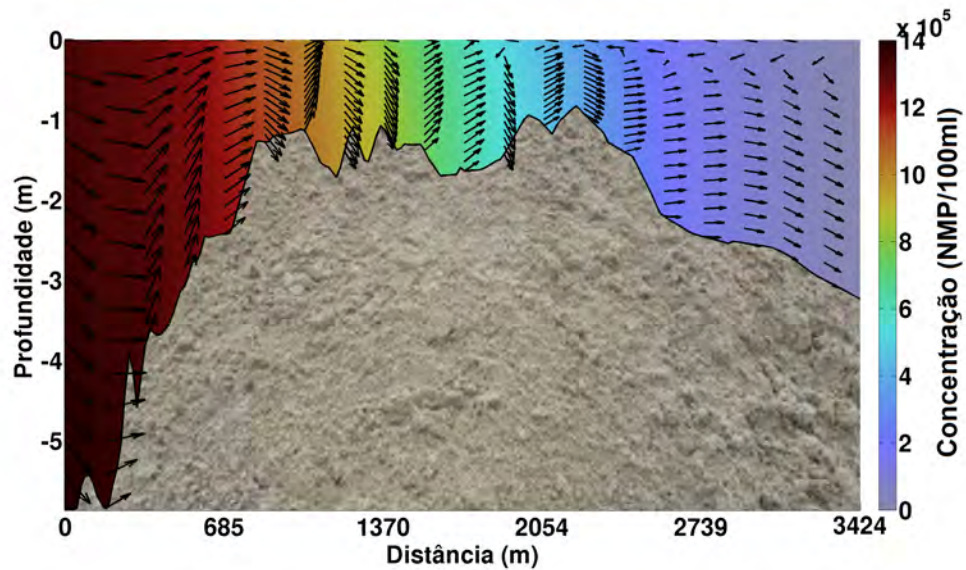


Figura 3.11: Transecto T2 transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

padrões médio de correntes a se concentrar no centro da laguna, limitado por dois vórtices transversais ao canal.

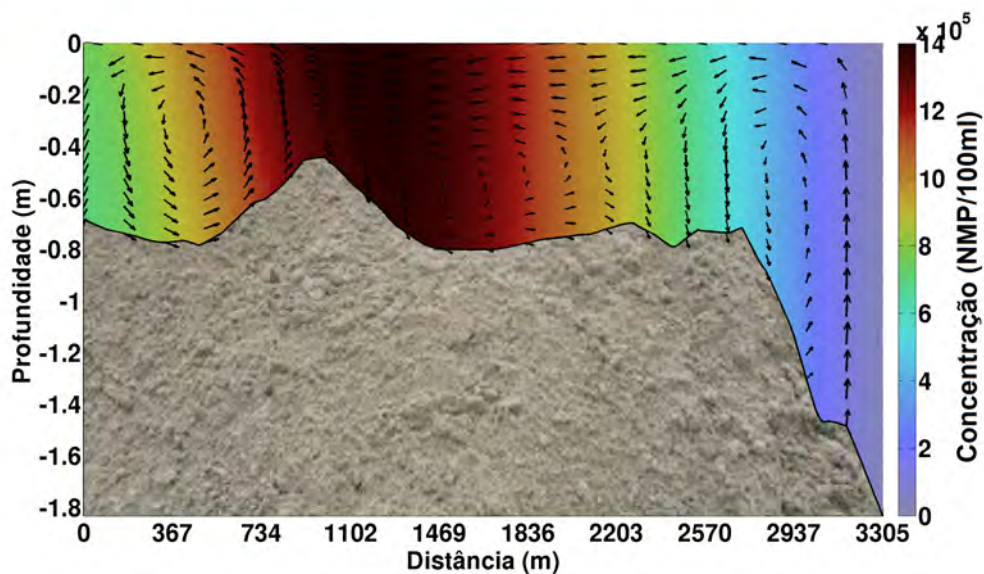


Figura 3.12: Transecto T3 transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

O transecto T4 (figura 3.13), diferentemente dos outros, é paralelo à linha de costa, fazendo intersecção com os outros três transectos anteriores. Este transecto mostra que os coliformes seguem o padrão da hidrodinâmica da região, partindo do Canal São Gonçalo e se espalhando lateralmente na região do alto estuário da Lagoa dos

Patos. A estratificação ao longo da coluna de água é pouco significativa, mantendo a concentração dos coliformes muito similar entre a superfície e o fundo. De forma geral, o espalhamento da pluma é bastante simétrico em torno da desembocadura do canal São Gonçalo, porém existe uma dominância quanto ao transporte médio em direção à desembocadura da Lagoa dos Patos.

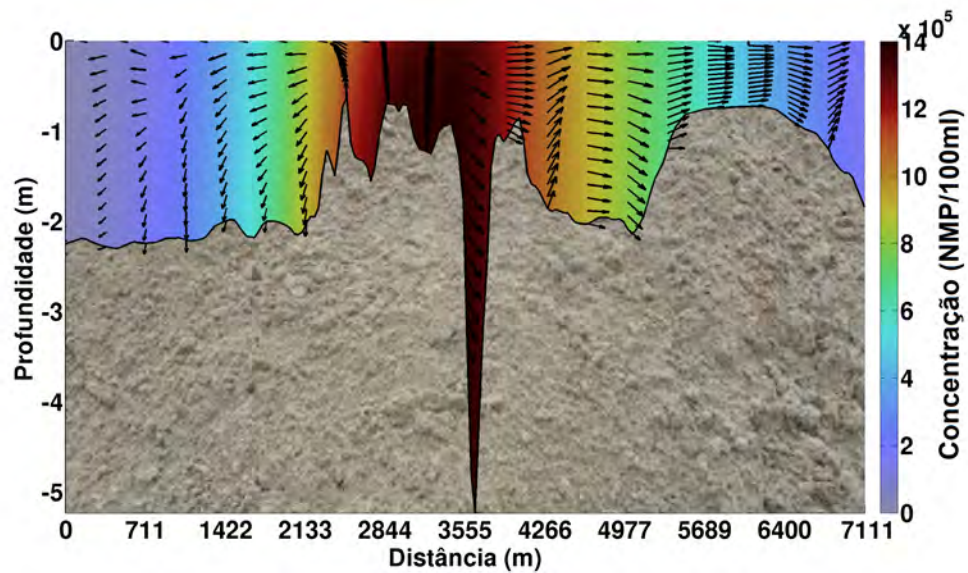


Figura 3.13: Transecto T4 paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes de 01 de janeiro a 31 de dezembro.

3.0.7 Análise de eventos

Segundo (Möller et al., 2001) a Lagoa dos Patos é um ambiente controlado pela competição entre a intensidade da descarga fluvial dos principais rios afluentes e a ação dos ventos. Estes trabalhos mostraram que o padrão de circulação da Lagoa dos Patos é fortemente controlado pela intensidade e direção dos ventos em situações em que a intensidade da descarga fluvial é baixa ou média. Desta forma, condições de eventos de enchente ou vazante do estuário da Lagoa dos Patos podem ocorrer em qualquer época do ano.

Evento de enchente

Os período de enchentes são caracterizados pela entrada de água salgada do oceano em direção ao interior do estuário da Lagoa dos Patos, favorecida pela ação dos ventos de quadrante sul e representam um menor espalhamento da pluma de poluentes. Estas condições de ventos deixam a pluma mais retida na costa oeste da laguna com um sentido de propagação dominante em direção ao interior do estuário (figura 3.14).

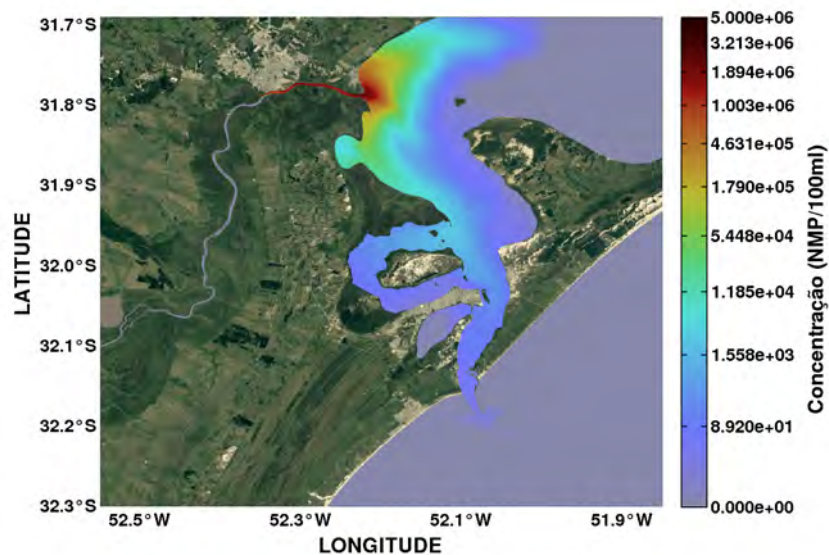


Figura 3.14: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período de enchente escolhido no dia 09 de abril.

A análise da estratificação no período de enchente da Lagoa dos Patos será apresentada utilizando os transectos no dia 09 de abril, que são apresentados na figura 3.9. O transecto ortogonal a praia do Laranjal (figura 3.15), mostra que a concentração de coliformes está sendo forçada a se deslocar ao longo do canal na região do alto estuário. O padrão de circulação transversal mostra que ocorre uma circulação superficial direcionada para a margem oeste do estuário, com um fluxo de retorno em subsuperfície direcionado para a margem leste.

Além disso, os vetores de corrente indicam que este evento de enchente condiciona a formação de vórtices transversais ao canal, que favorecem o aprisionamento da pluma de coliformes junto a região da margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos, nas proximidades da Praia do Laranjal.

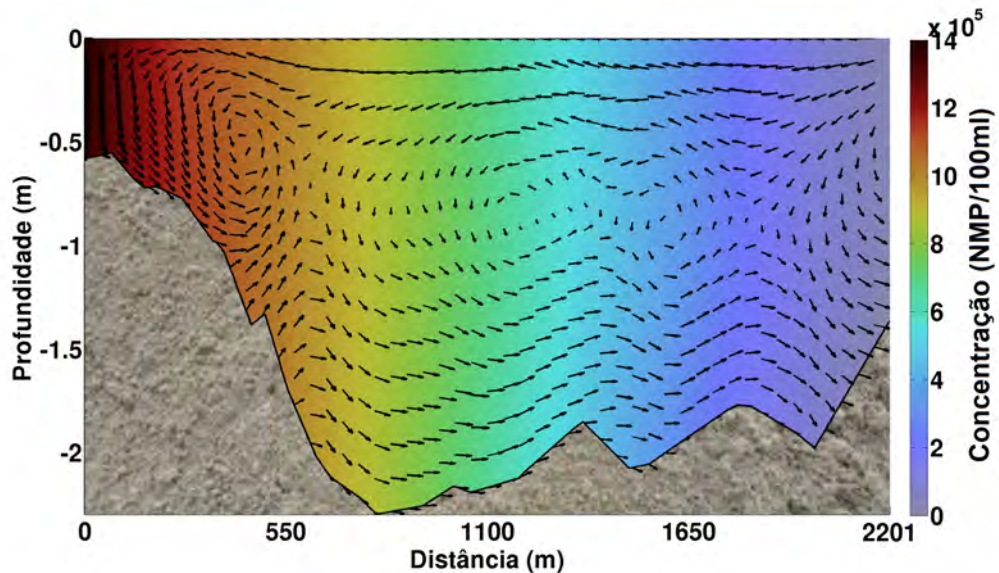


Figura 3.15: Transecto paralelo à costa da praia do Laranjal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril.

O transecto da figura 3.16 mostra o espalhamento e dispersão da concentração de coliformes advinda do Canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos. Pode ser observado que a massa de água oriunda do canal se choca com a massa proveniente da margem leste do canal do alto estuário. Este padrão de circulação é similar ao observado mais ao norte para o transecto da região da praia do Laranjal, porém a maior intensidade da corrente de vazante do canal São Gonçalo favorece a formação de uma zona de frente na camada superficial da região central do canal.

Assim como no transecto localizado mais ao norte, o fluxo de subsuperfície tem direção dominante para a margem leste do estuário. Conforme esta pluma chega na região do estuário da Lagoa dos Patos, esta concentração vai reduzindo em direção à margem leste do estuário. Este deslocamento e diluição do poluente, por conta do padrão de correntes, favorece o aprisionamento da massa de água junto a margem oeste do canal (figura 3.16).

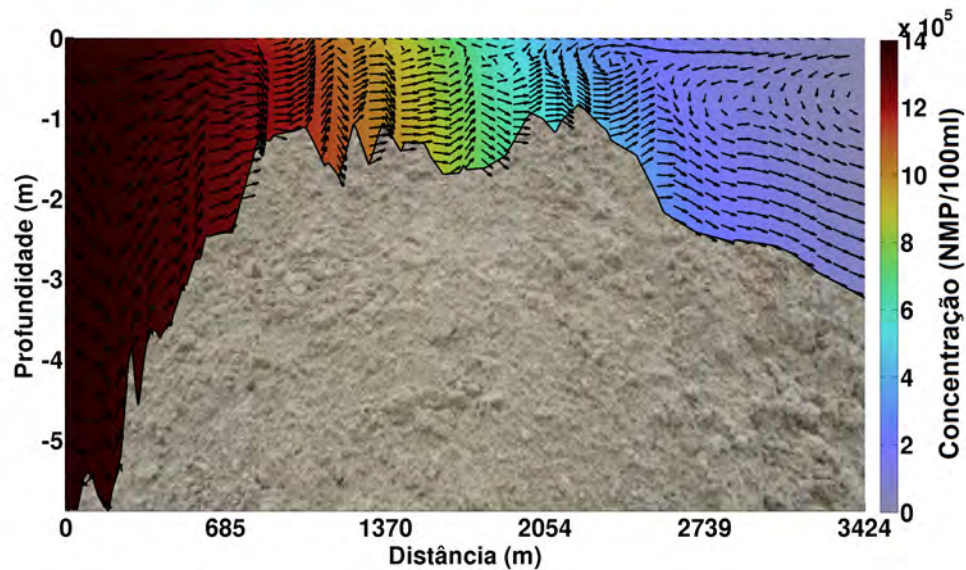


Figura 3.16: Transecto transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 da abril.

O transecto da figura 3.17 mostra a concentração de coliformes bem próxima da encosta da laguna, se espalhado por toda a coluna de água, da superfície até o fundo. A figura 3.17 mostra através dos vetores, que o poluente é direcionado pelos padrões de correntes a se concentrar próximo da costa oeste da laguna, mas com concentrações máximas na porção mais central do estuário. Esta região do estuário, mostra um padrão de circulação transversal bastante dominado por vórtices transversais. O fluxo de superfície mostra uma sensível dominância de transporte em direção a margem oeste do estuário, com o fluxo de retorno em subsuperfície, também direcionado para a margem leste.

Os dois principais vórtices transversais observados nesta região do estuário, favorecem a formação de uma zona de frente na porção mais central do estuário (à cerca de 750 m da linha de costa), onde as maiores concentrações podem ser observadas. Outros pequenos vórtices se formam na região do canal do estuário, e acabam contribuindo

para intensificar o espalhamento e dispersão da pluma de coliformes.

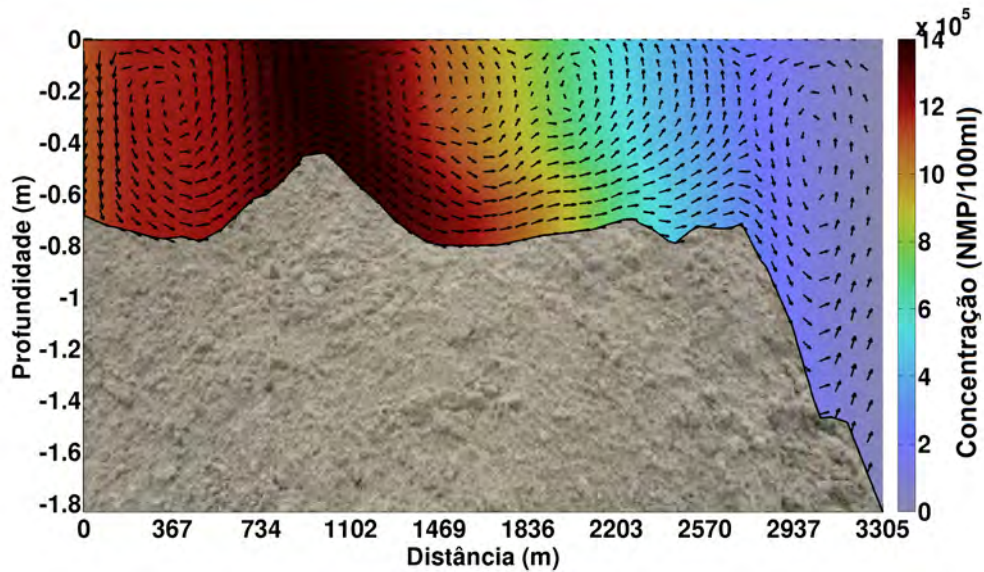


Figura 3.17: Transecto transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril.

O transecto paralelo à linha de costa, que faz intersecção com os outros três transectos anteriores é mostrado na figura 3.18. Este transecto mostra que os coliformes seguem o padrão de circulação típico do evento de enchente na região estuarina da laguna. Os vetores da figura 3.18 mostram a concentração de coliforme se deslocando no sentido da Praia do Laranjal junto a margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos. Além disso, pode ser observado que estratificação ao longo da coluna de água é pouco significativa, mantendo a concentração dos coliformes muito similar entre a superfície e o fundo.

Em função de estar sendo considerado um padrão médio para a descarga dos rios, pode ser observado que o evento de enchente analisado apresenta um padrão de circulação homogêneo ao longo da coluna de água, com o fluxo resultante se deslocando em direção ao norte da laguna, por conta da entrada de água do oceano na Lagoa dos Patos. Além disso, a maior intensidade das correntes na desembocadura do canal São Gonçalo favorecem a formação de uma zona de frente e o aprisionamento das maiores concentrações de coliformes nesta região.

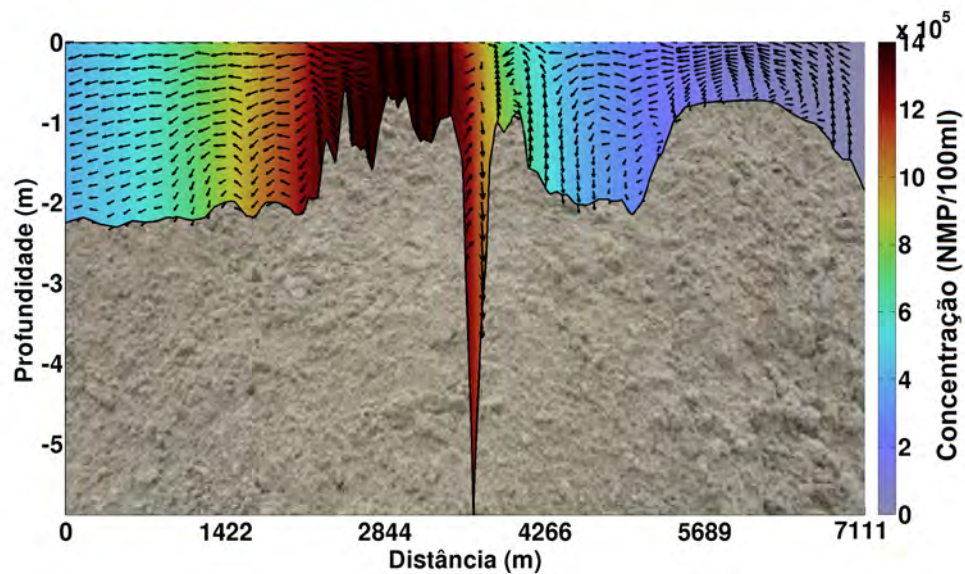


Figura 3.18: Transecto paralelo à costa da praia do Larnajal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 09 de abril.

Evento de vazante

Os eventos de vazantes são as condições dominantes da região estuarina da Lagoa dos Patos segundo Marques (2012). Estes eventos ocorrem associados a ocorrência de ventos de quadrante norte, que acabam intensificando a descarga lagunar e o deslocamento da pluma em direção ao oceano conforme pode ser observado na figura 3.19. Estas condições de ventos também deixam a pluma mais retida na costa oeste da laguna, porém com um sentido de propagação dominante em direção ao baixo estuário da Lagoa dos Patos (figura 3.19).

A análise da estratificação no período de vazante da Lagoa dos Patos também será apresentada utilizando os transectos no dia 25 de junho, que são apresentados na figura 3.9. O transecto ortogonal a praia do Laranjal (figura 3.20), também mostra que a concentração de coliformes está sendo forçada a se deslocar ao longo do canal na região do alto estuário. O padrão de circulação transversal deste evento é muito similar ao que ocorre para o evento de enchente, mostrando que ocorre uma circulação superficial direcionada para a margem oeste do estuário, com um fluxo de retorno em subsuperfície direcionado para a margem leste.

Os vetores de corrente também indicam que este evento condiciona a formação de

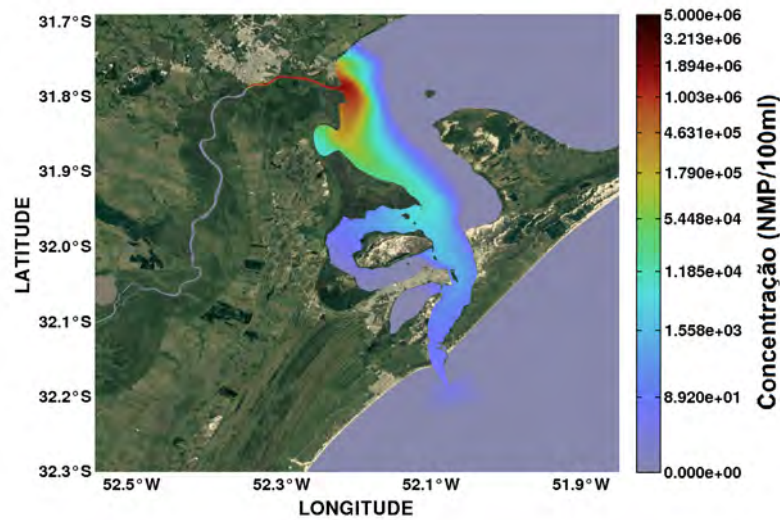


Figura 3.19: Campo médio da concentração de coliformes na camada de superfície do estuário da Lagoa dos Patos no período de vazante no dia 25 de junho.

vórtices transversais ao canal. A maior diferença é que este evento favorece ainda mais o aprisionamento da pluma de coliformes junto a região da margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos, nas proximidades da Praia do Laranjal.

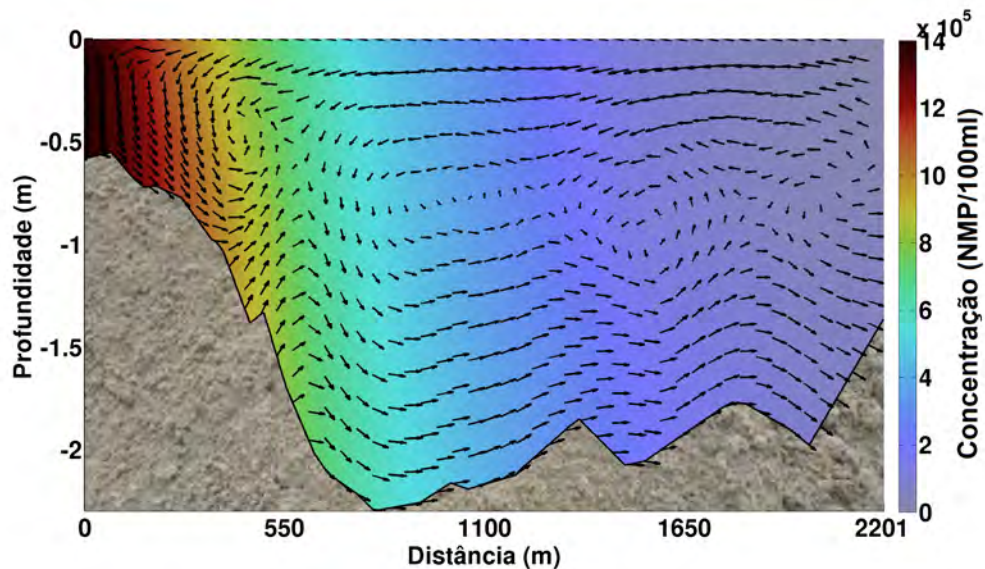


Figura 3.20: Transecto paralelo à costa da praia do Laranjal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho.

O transecto da figura 3.21 mostra o espalhamento e a dispersão da concentração de coliformes advinda do Canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos. Neste evento, pode ser observado que a massa de água oriunda do canal é transportada de forma homogênea em direção à margem leste do canal do alto estuário. Este padrão de circulação é diferente do observado na região mais ao norte, para o transecto da região da praia do Laranjal, e também é diferente do padrão observado nesta mesma região durante o evento de enchente. É importante ressaltar que neste evento não ocorre a formação da zona de frente na camada superficial da região central do canal, como foi observado no cenário de enchente.

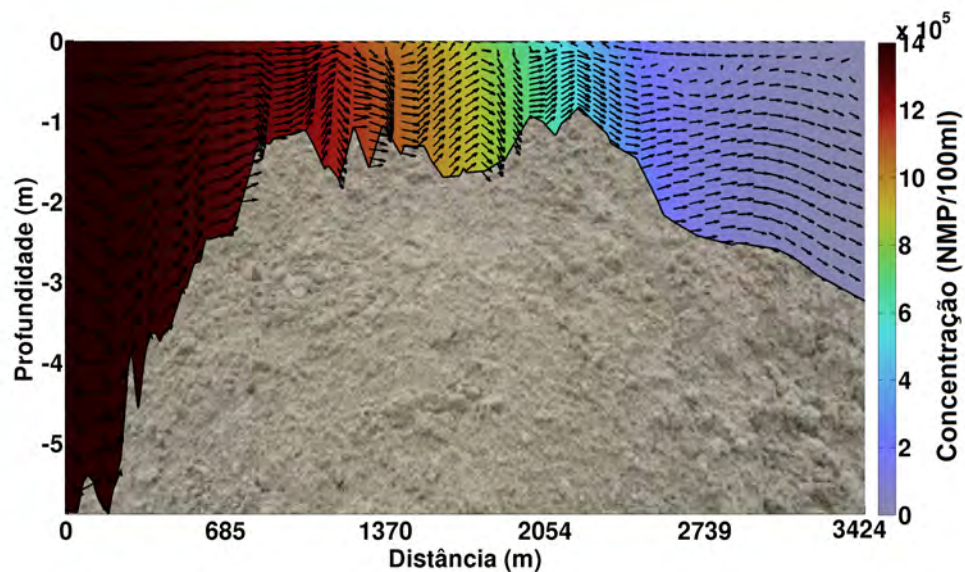


Figura 3.21: Transecto transversal da desembocadura do canal São Gonçalo na Lagoa dos Patos com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho.

O transecto da figura 3.22 mostra a concentração de coliformes próxima da encosta da laguna, se espalhado por toda a coluna de água. A figura 3.22 mostra através dos vetores, que o poluente é direcionado pelos padrões de correntes a se concentrar próximo da costa oeste da laguna, mas com concentrações máximas na porção mais central do canal de acesso. Esta região do estuário, mostra que mesmo durante o evento de vazante, o padrão de circulação transversal é bastante dominado por vórtices transversais. O fluxo de superfície mostra uma maior dominância de transporte em direção a margem oeste do estuário, quando comparado com o evento de enchente. O fluxo de retorno também ocorre em subsuperfície sendo direcionado para a margem leste.

Os principais vórtices transversais observados nesta região do estuário, também favorecem a formação da zona de frente na porção mais central do estuário. Porém esta zona de frente se desloca à cerca de 1200 m da linha de costa, onde as maiores concentrações podem ser observadas. Outros vórtices menores que se formam na região do canal do estuário durante o evento de enchente, não foram observados neste evento, de forma que o padrão de circulação favorece a maior advecção da pluma de coliformes em direção à margem leste do estuário.

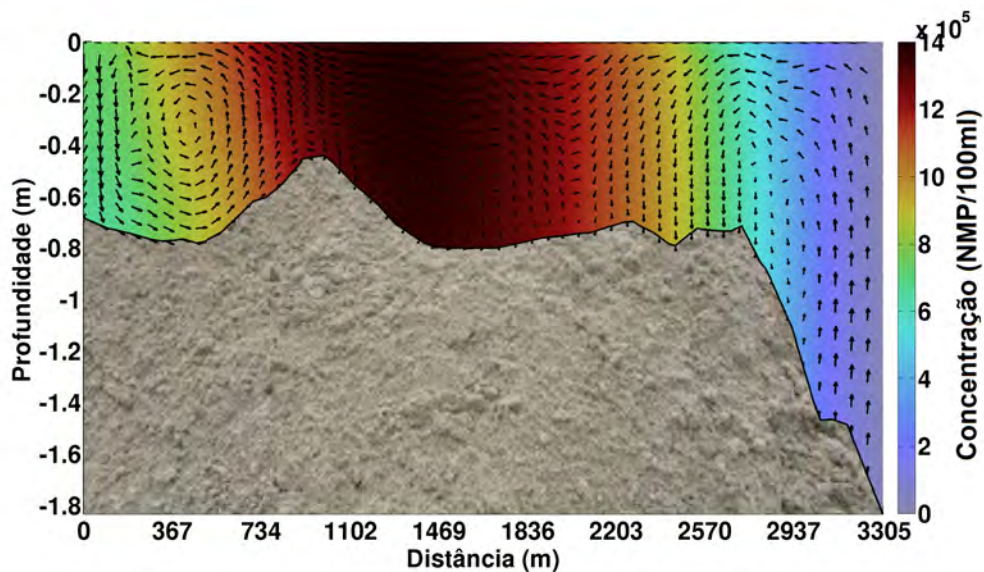


Figura 3.22: Transecto transversal ao Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de enchente no dia 25 de junho.

O transecto paralelo à linha de costa (figura 3.23) mostra que os coliformes seguem o padrão de circulação típico do evento de vazante na região estuarina da laguna. Os vetores mostram a concentração de coliformes se deslocando de forma bimodal em direção à praia do Laranjal e no sentido do Saco do Silveira, junto a margem oeste do estuário da Lagoa dos Patos. A estratificação ao longo da coluna de água também não é muito significiativa, especialmente em direção ao norte do estuário, mantendo a concentração dos coliformes muito similar entre a superfície e o fundo.

Novamente, em função de estar sendo considerado um padrão médio para a descarga dos rios, pode ser observado que o evento de vazante analisado não apresenta um padrão de circulação tão homogêneo ao longo da coluna de água. Na região localizada ao sul da desembocadura do canal São Gonçalo, o fluxo resultante se desloca em direção ao sul da laguna, por conta da influência dos ventos de quadrante norte na

Lagoa dos Patos. Desta forma, a maior intensidade das correntes na desembocadura do canal São Gonçalo, acabam favorecendo a formação de uma zona de frente com uma bifurcação de fluxo e subsequente transporte de maiores concentrações de coliformes na região da praia do Laranjal.

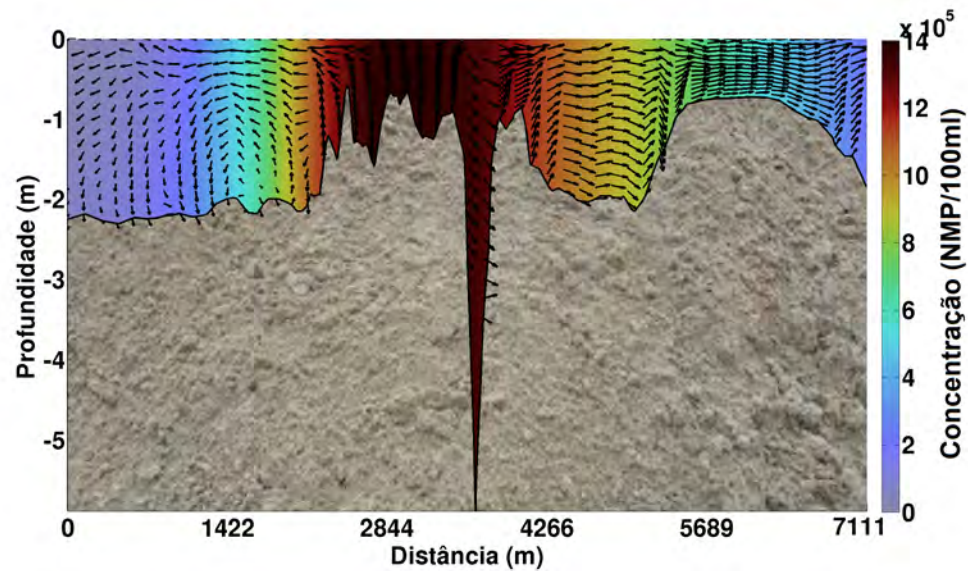


Figura 3.23: Transecto paralelo à costa da praia do Laranjal-Pelotas RS até o Saco do Silveira com a concentração média de coliformes no período de vazante no dia 25 de junho.

Conclusões

Neste trabalho foram desenvolvidas simulações hidrodinâmicas para obter o comportamento e o destino final de uma pluma de efluentes domésticos na região do canal São Gonçalo e do alto estuário da Lagoa dos Patos. No cenário analisado foram escolhidos seis pontos de descargas de efluentes no canal São Gonçalo que foram lançados considerando uma simulação hidrodinâmica tridimensional com condições iniciais e de contorno de um ano climatológico.

Para a análise dos procesos hidrodinâmicos e de transporte do esgoto foram utilizados campos médios da elevação da superfície livre do mar, o campo de salinidade e os campos de concentrações de coliformes. Também, foram realizadas análises de eventos de ocorrência mais significativos do ponto de vista dos processos hidrodinâmicos, de forma a analisar a concentração dos coliformes, bem como, a sua sazonalidade e variabilidade, identificando a dominância no comportamento da pluma de coliformes.

Dentro da escala temporal do estudo, a dinâmica da região é controlada principalmente pela ação dos ventos e da descarga fluvial, as quais condicionam as trocas de água entre a Lagoa dos Patos e a região costeira adjacente, o campo médio da elevação da superfície livre, mostra que na porção lagunar da Lagoa dos Patos, as médias alcançam até 1 *m* e na região costeira, a elevação média do nível do mar não supera os 0,8 *m*.

A análise da salinidade de fundo do modelo demonstra o padrão típico de salinização encontrado na região do estuário da Lagoa dos Patos. A entrada da água do mar

ocorre principalmente pelas zonas mais profundas do canal de navegação em direção ao interior da Lagoa dos Patos.

A análise do campo médio de salinidade da superfície mostra uma pluma de água doce na região costeira adjacente à Lagoa dos Patos. Nesta região, pode ser observado que em média a Lagoa dos Patos exporta água doce para a zona costeira formando uma pluma de água de baixa salinidade.

Com relação a concentração de coliformes, esta pluma se comporta seguindo as condições hidrodinâmicas da região, de maneira que a forma e o padrão de espalhamento é principalmente controlado pela ação dos ventos e da descarga fluvial. O campo médio da concentração de coliformes indica uma maior concentração na região do canal São Gonçalo com valores superiores à $5 \cdot 10^5 NMP.100ml^{-1}$).

Na região da saída do canal São Gonçalo, junto a região do alto estuário da Lagoa dos Patos, as concentrações médias são de aproximadamente $3,5 \cdot 10^5 NMP.100ml^{-1}$ com a tendência da pluma de ter seu espalhamento médio em direção a região do baixo estuário, tendendo a margem leste do estuário da laguna, com alto potencial de diluição ao longo da região estuarina da Lagoa dos Patos.

Já no comportamento médio da pluma de coliformes analisada sazonalmente, ficou evidenciado que se comporta seguindo as condições hidrodinâmicas das estações do ano, assim como os resultados dos campos médios anuais da pluma, são principalmente controlada pelas ações de ventos e descarga fluvial referente a estação analisada.

A estação do ano que a pluma de poluentes possui o maior espalhamento é a estação da primavera e a de menor alcance é a estação do verão. O vento que sopra de nordeste, como efeito local, diminui o nível da água no norte da Lagoa e acumula água na região da Feitoria. Como consequência deste efeito, se reduz o nível da água próximo à boca do estuário, favorecendo a retenção da pluma de poluentes nesta região com posterior deslocamento ao oceano.

As análises de estratificação da pluma de poluentes que foram feitas através de transectos demonstram pouca estratificação dos poluentes ao longo da coluna de água. Os transectos demonstram através dos vetores que o a predominância das correntes na Laguna é no sentido norte/sul, e estas correntes são orientadas pela direção do vento, que na maior parte do ano é nordeste.

O período mais crítico de contaminação para a zona litorânea do município de Pelotas- RS ocorre nos eventos de enchente. Estes eventos se caracterizam pela entrada de água salgada na Lagoa dos Patos e acabam aprisionando a pluma na região da praia do Laranjal, que é um importante local de prática de banho, esporte e lazer para a população.

Por fim, o trabalho obteve com as análises dos resultados o comportamento, alcance e estratificação da pluma de efluentes na laguna, podendo assim servir para auxiliar o poder público em tomadas de decisões, baseadas em dados e gravidade da situação.

Capítulo 5

Sugestões para trabalhos futuros

Após a conclusão deste trabalho, foram identificadas algumas questões que podem servir para desenvolvimentos de estudos futuros. Como a análise de lançamentos de esgoto com concentrações mais altas ou mais baixas de coliformes, assim como a utilização de um banco de dados mais longo para considerar simulações por um período mais longo de tempo.

- **Diferentes Concentrações de Coliformes**

Neste trabalho foi utilizada a concentração de 10^8 $NMP.100ml^{-1}$, sendo considerada uma concentração média segundo (Metcalf e Eddy, 2003). Como estratégia de futuros estudos, podem ser realizadas simulações de anuais, utilizando as mesmas condições iniciais e de contorno, utilizando concentrações de coliformes de 10^7 $NMP.100ml^{-1}$, e 10^9 $NMP.100ml^{-1}$, que representam concentrações fracas e altas, respectivamente (Metcalf e Eddy, 2003).

- **Período mais longo de banco de dados**

Foi utilizado nesse trabalho um período de simulação de um ano, sendo este equivalente à média climatológica calculada entre os anos de 2003 a 2014. Para trabalhos futuros, um período maior de anos para realizar o estudo pode favorecer a obtenção de resultados mais significativos em termos de cobertura temporal e análise de eventos extremos.

Referências Bibliográficas

- ANA (2012). Agência Nacional de Águas.
- ANVISA (2001). Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
- Azevedo, L. G. T., Porto, R. L. L., e Porto, M. F. A. (1998). Sistema de apoio a decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, RS.*, 3(1):21–52.
- Babu, M. T., Das, V. K., e Vethamony, P. (2006). BOD–DO modeling and water quality analysis of a waste water outfall off Kochi, west coast of India. 32:165–173.
- Baptista, N. A., Wallner-Kersanach, M., e Pattchineelam, S. M. (2008). Poluição Marinha. Rio de Janeiro: Interciência.
- Benedini, M. (2011). Water Quality Models for Rivers and Streams. State of the Art and Future Perspectives. *European Water.*, 34:27–40.
- Bonganha, C. A., Guiguer Jr, N., Pereira, S. Y., Oliveira, L., e Ribeiro, M. L. (2007). Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. *Analytica*, 30, 2007.
- Borts, M. e Selvakumar, A. (2003). Particle-associated microorganisms in storm runoff. *Water Research*, 37:215–223.
- Bowie, G. L. (1992). *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modelling.*
- Braga, M. F. S. e Krusche, N. (2000). *Padrão de ventos em Rio Grande, RS, no período de 1992 a 1995.*

- Braga Jr, B. P. F. (1987). Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. *Revista Brasileira de recursos hídricos*, v.3, n.1.:5–19.
- Brown, J. e Peake, B. (2006). Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff. *Science of the Total Environment.*, 359:145 e 155.
- Bulger, A., Hayden, B., Monaco, M., Nelson, D., e McCormick-Ray., M. (1998). Biologically-Based Estuarine salinity zones derived from a Multivariate analysis. *Estuaries*, 16::311–322.
- Canale, R. P. (1993). Modeling fecal coliform bacteria-II. Model development and application. *Water Research*, 27(4):703–714.
- Canteras, J., Juanes, J. A., Pérez, L., e Koev, K. (1995). Modelling the coliforms inactivation in the Cantabrian Sea (Bay of Biscay) from in situ and laboratory determinations of T90. *Water Science and Technology*, 32 (2):27–44.
- Castello, J., Duarte, A., Möller, O. O., Niencheski, F., Odebrecht, C., Weiss, G., Habiaga, R., Bellotto, V., Kitzmann, D., Souto, C., Souza, R., Ciotti, A., F., G., Schwingell, P., Bersano, J., Cirano, M., Freire, K., Lima, I., Mello, R., e Monteiro, A., Resgalla, C., Soares, I., Suzuki, M. (1990). On the importance of coastal and subantarctic waters for the shelf ecosystem off Rio Grande do Sul. *Anais do II Simpósio de Estrutura, Função e Manejo de Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste São Paulo, Brazil.*, pages 112–129.
- Castello, J. P. e Möller, O. O. (1978). *On the relationship between rainfall and shrimp production in the estuary of the Patos Lagoon (Rio Grande, RS)*. 3 edition.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Models*. McGraw-Hill, Inc., EUA.
- Chhabra, A. e Geist, H. (2006). Multiple Impacts of Land Use/Cover Change. In: LAMBIN, E. F. & GEIST, H.(orgs.) *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes and Global Impacts*. Springer Berlin Heidelberg, New York., pages 71– 116.
- Ciotti, A. M., Odebrecht, C., Fillmann, G., e Möller, O. O. (1995). Freshwater outflow and subtropical convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian continental shelf. *Continental Shelf Research.*, 15(14):1737–1756.
- CLM (1970). *Barragem do São Gonçalo: estudo preliminar de viabilidade*.

- Costa, L. J. e Teixeira, D. (2010). Aplicação de Modelo de Autodepuração para a Avaliação da Qualidade da Água do Ribeirão do Ouro, Araraquara-SP. *REVISTA UNIARA*, 13.
- Cox, B. A. (2003). A Review of Currently Available In-Stream Water Quality Models and Their Applicability for Simulating Dissolved Oxygen In Lowland Rivers.
- Dantas, T. N. P. (2008). *Avaliação da qualidade das águas da bacia hidrográfica do Rio Pirangi/RN*. PhD thesis.
- De Souza, S. (2008). *Modelo Matemático de Mortalidade de Bactérias Coliformes em Águas Costeiras*. PhD thesis, Faculdade Nova de Lisboa.
- Díaz, C. (2002). La consideración de la calidad de las zonas de baño en el diseño de los saneamientos litorales. *V Congreso e Exposição Internacional de Praias.Santander, 2002*.
- D'Incao, F. (1991). Pesca e biologia de *Penaeus paulensis* na Lagoa dos Patos, RS. *Revista Atlântica*, 13:159–169.
- Doyle, M. P. e Erickson, M. C. (2006). The fecal coliform assay , the results of which have led to numerous misinterpretations over the years , may have outlived its usefulness. *Microbe*, (April).
- D.W., Y., P., M., e Walker-ColemanOLEMAN, L. (2002). Pathogens in reclaimed Water: the Florida experience. *Water Sources Conference*.
- EPA (2004). BASINS: Better assessment Science integrating point and nonpoint sources.
- FAO (1972). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Desarrollo de la cuenca hidrográfica de la Lagoa Merin. page 86.
- Fernandes, E. H., Möller, O. O., e Marques, W. C. (2012). Avaliação das Condições de Navegabilidade do Canal de Acesso ao Porto de Rio Grande Após as Obras de Modernização. Technical report, Universidade Federal do Rio Grande Instituto de Oceanografia, Rio Grande-RS.
- Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R., e Möller, O. O. (2005). Spatial gradients in the flow of southern Patos Lagoon. *Journal of Coastal Research.*, 20:102–112.
- Fernandes, E. H. L., Dyer, K. R., Möller, O. O., e Niencheski, L. F. H. (2002). *The Patos Lagoon hydrodynamics during an El Niño event (1998)*.

- Fernandes, E. H. L., Mariño-Tapia, I., Dyer, K. R., e Möller, O. O. (2004). *The attenuation of tidal and subtidal oscillations in the Patos Lagoon estuary*.
- Fitzpatrick, J. (2009). Assessing skill of estuarine and coastal eutrophication models for water quality managers. *Journal of Marine Systems*, v. 76:195–211.
- Flather, R. A. (1976). Results From a Storm Surge Prediction Model of the North-West European Continental Shelf for April, November and December 1973.
- Fragoso, C. R., Ferreira, T. F., e Motta, M. (2009). *Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos*. Oficina de Textos, São Paulo.
- Frazier, W. e Westhoff, D. (1988). *Food Microbiology* ., volume 3.
- Garcia, A. M., Vieira, J. P., e K. O. Winemiller (2001). “Dynamics of the shallow-water fish assemblage of the Patos Lagoon estuary (Brazil) during cold and warm ENSO episodes,”. *Journal of Fish Biology*, 59:1218–1238.
- Gnecco, T., Berretta, C., Lanza, L., e Barbera, P. L. (2005). Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research*, 77:60–73.
- Gobbi, E. F., Recksidler, R., Gonçalves, J. E., e Gobbi, M. F. (2003). Implementação de um Modelo Hidrodinâmico e de Qualidade de Água no Reservatório do Irai. In *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. Anais do XV Simpósio Brasileiro, Curitiba*.
- Gonçalves, J. (2009). *Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vensim PLE®*. PhD thesis, USP, São Carlos.
- Gouvêa, T., Zarnot, D. H., e Alba, J. M. F. (2010). *Caracterização geoambiental e histórico do processo de desenvolvimento da bacia da Lagoa Mirim*. Pelotas - RS.
- Gregório, H. P. (2009). *Modelagem Numérica da Dispersão da Pluma do Emissário Submarino de Santos*. PhD thesis, USP.
- Guidelines (2015). Bacteriological quality. *GUIDELINES FOR CANADIAN WATER QUALITY*.
- Hervouet, J. (2007). Compatibility between finite volumes and finite elements using solutions of shallow water equations for substance transport. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.

- Hervouet, J. M. e Haren, L. (1996). Recent advances in numerical methods for fluid flows. *Floodplain processes*, pages 183–214.
- Hirata, F. E., Möller, O. O., e Mata, M. M. (2010). Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. *Pan-American Journal of Aquatics Sciences*, v. 5:254–266.
- IBGE (2010). IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
- Ji, Y., Zhang, J., Yao, Q., e Zhao, D. (2007). Analysis of water quality in shallow lakes with a two-dimensional flow-sediment model. *Journal of Hydrodynamics*, 19(4):501–508.
- Juanes, J., Revilla, J., Nikolov, K., e Álvarez, C. V. y. C. (1997). Ambiental del saneamiento de San Sebastián-Pasajes. *Memorias de las IV Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas. Valencia*.
- Kashefipour, S., Lins, B., e Falconer, R. (2006). Modelling The Fate Of Faecal Indicators in a Coastal Basin. *Water Research*, 40(7):1413–1425.
- Kjerfve, B. C. (1986). *Comparative oceanography of coastal lagoons*.
- Knapik, H. G., Fernandes, C. S., e Porto, M. F. A. (2011). Qualidade da água da Bacia do Rio Iguaçu: Diferenças conceituais entre os modelos QUAL2E e QUAL2K. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16:75–88.
- Krusche, N., Saraiva, J. M. B., e Reboita, M. S. (2002). *Normas Climatológicas provisórias de 1991 a 2000 para Rio Grande, RS*.
- Machado, G. (2007). Demanda e disponibilidade hídrica no sistema Lagoa Mirim-São Gonçalo – Rio Grande do Sul. pages 61–82.
- Machado, M., Furlan, L., Furlan, M., Tomaz, E., e Nunhez, J. (2008). *Software para modelagem de dispersão de efluentes em rios*, volume 13.
- Marques, W. C. (2012). The temporal variability of the freshwater discharge and water levels at the Patos Lagoon, Brazil. *International Journal of Geosciences*.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H., Moller Jr, O. O., Moraes, B. C., e Malcherek, A. (2010). Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research*.

- Marques, W. C., Fernandes, E. H., Monteiro, I. O., e Möller, O. O. (2009). Numerical modeling of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil. *Continental Shelf Research*, 29(3):556–571.
- Marques, W. C. e Monteiro, I. O. (2011). The Exchange Processes in the Patos Lagoon Estuarine Channel, Brazil. 2011(August):248–258.
- Metcalf e Eddy (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill, EUA, 4a edição edition.
- Möller, O. e Casting, P. (1999). *Hydrographical characteristics of the estuarine area of Patos Lagoon (30°S, Brazil)*.
- Möller, O., Casting, P., Fernades, E. H. L., e Lazure, P. (2007). *Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations*.
- Möller, O., Casting, P., Salomon, J. C., e Lazure, P. (2001). *The influence of local and non-local forcing effects on the subtidal circulation of the Patos Lagoon*.
- Möller, O., Lorenzetti, J., e Mata, J. S. & M. (1996). Patos Lagoon summer time circulation and dynamics. *Cont. Shelf. Res*, 16(3):335–351.
- Monteiro, A. J. (1992). Modelling transport and dispersiom of effluent outfall. *Water Science and Technology*. 25:143–154.
- Neves, R., Silva, A., Braunschweig, F., e Leitão, P. C. (2001). *Hidroinformática e otimização da gestão de ecossistemas aquáticos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Seminario sobre a hidroinformática em Portugal. Lisboa.
- Niencheski, L., Baumgarten, M. Z., Cabrera, L., e Juliano, S. (2006). *Patos Lagoon: indicators of organic pollution*. *Journal of Coastal Research*, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. Itajaí, SC, Brazil).
- Nogueira, V. P. Q. (1991). *Qualidade da Água em Lagos e Reservatórios* ., volume 3. Estado de São Paulo, São Paulo, coleção ab edition.
- Nunes, D. (2008). *Modelagem da autodepuração e qualidade da água do rio Turvo Sujo*. PhD thesis, Universidade Federal de Viçosa.

- Odebrecht, C., P.C., A., Möller Jr., O., Niencheski, L., Proença, L., e Torgan, L. (2005). *Drought Effects on Pelagic Properties in the Shallow and Turbid Patos Lagoon, Brasil. Estuaries*. v. 28, n. edition.
- Oliveira, H. A. D., Helena, E., Fernandes, L., Olinto, O., Jr, M., e Collares, G. L. (2015a). Processos Hidrológicos e Hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. 20:34–45.
- Oliveira, R., Quadros, R., Harter, F., e Weymar, G. (2015b). *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*.
- Ortiz, J. P., Arasaki, E., Marcellino, E. B., Da Silva, O. F., e Fortis, R. M. (2006). Modelagem Aplicada à Simulação do Escoamento da Pluma de Efluentes de Emissários Submarinos no Litoral Paulista. In: Emissários submarinos: projeto, avaliação de impacto ambiental e monitoramento. São Paulo: Imprensa Oficial do estado de São Paulo., pages 25–42.
- Palmieri, V. (2006). Qual2e model for the Corumbata´ 1 River. 8:269–275.
- Pearson, M. (2007). *Programa Costa Sul - Manejo costeiro integrado do baixo estuário da Lagoa dos Patos e região costeira adjacente*. Universidade Federal do Rio Grande, RS.
- Pereira, R. S. (2003). *Processos que regem a qualidade da água da Lagoa dos Patos segundo o modelo Delft 3D*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande, RS.
- Precioso, C. H. O., Kalas, F. A., Rodrigues, P. W. G., e Lugon Junior, J. (2010). Avaliação da variabilidade de parâmetros ambientais numa lagoa urbana (Campos dos Goytacazes/RJ) com auxílio do sistema MOHID. pages 185–204. Boletim do edition.
- Riecken, S. A. (1995). Compendium of Water Quality Models. BC Environment. Water Quality Branch. *Government of British Columbia, 1995.*, page 124.
- Roberts, P., Salas, J., Reiff, F., Libhaber, M., Labbe, A., e Thomson, J. (2010). Marine wastewater outfalls and treatment systems. *London:IWA Publishing*, 1.
- Roberts, P. J. W. e Williams, N. (1992). Modeling of oceans outfall discharges. *Water Science and Technology. Water Science and Technology*, 25:155–164.
- Rosman, P. C. C., Rosman, P. A., Lima, L. S., e Paula, T. P. (2009). Estudos de hidrodinâmica para ligação da lagoa Rodrigo de Freitas ao mar via dutos afogados RJ.

- Saldanha, J. C. S. (2007). *Análise da influência do rio Santa Maria da Vitória na baía de Vitória, através da modelagem computacional: Uma contribuição ao processo de enquadramento*. PhD thesis, UFES.
- Seeliger, U., Castello, C., e Odebrecht, J. (1996). No Title subtropical convergence environments: the coast and sea in the Southwestern Atlantic. *New York, Springer Verlag*, page 306.
- Seeliger, U. e Cordazzo, C. V. (2002). *Estuário da Lagoa dos Patos e Costa Adjacente*.
- Seiler, L. M. N. e Fernandes, E. H. L. (2013). Assessment of primary productivity and nutrients for a coastal lagoon in Southern Brazil. *Ocean modelling for coastal management | Case studies with MOHID*. IST Press, Lisboa, Portugal., pages 199– 212.
- Silva, M., Cavalli, D., e Oliveira, T. (2006). Avaliação do padrão coliformes a 45°C e comparação da eficiência das técnicas dos tubos múltiplos e Petrifilm EC na detecção de coliformes totais e *Escherichia coli* em alimentos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 26(2):352–359.
- Sperling, M. V. (1996). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*.
- Sperling, M. V. (2007). *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte. PhD thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Sweers, U. (1976). Monograms to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, 30:375—401.
- Thomann, R. V. e Mueller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper & Row Publishers, Inc., NY.
- Tucci, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade Porto Alegre, RS.
- Tundisi, J. G. (1999). Limnologia do século XXI: perspectivas e desafios. *Suprema Gráfica e Editora, IIE*, page 24.
- UNEP (2002). *Water Supply & Sanitation Coverage in Regional Seas, Need For regional wastewater emission targets?*
- USACE. (2009). *Geospatial hydrologic modeling extension: HEC-GeoHMS user's manual*.

- Vaz, A. (2006). *Sobre a descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos.*, volume 28.
- Vieira, E. F. e Rangel, S. R. S. (1984). Rio Grande do Sul: geografia física e vegetação. Porto Alegre: Sagra.
- Vieira, E. F. e Rangel, S. R. S. (1988). *Planície Costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sócio- demográfica.* Porto Alegre: Sagra, 1988., Porto Alegre - RS.
- Vilas Boas, D. F. (1990). *Distribuição e comportamento dos sais nutrientes, elementos maiores e metais pesados na Lagoa dos Patos, RS.* PhD thesis, Fundação Universidade do Rio Grande.
- Water, E. e Publications, E. W. (2005). Application of Factor Analysis in the Assessment of Surface Water Quality in Buyuk Menderes River Basin. pages 43–49.
- WHO. (2003). Guidelines for safe recreational water environments.
- Xavier, A. S. (2002). *Estudo da circulação hidrodinâmica da Lagoa Mirim, RS.* PhD thesis.