



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ÉLÉONORE PIERRAT

**ESTUDO DA BALNEABILIDADE ATUAL E FUTURA DAS PRAIAS DO LAMI E
BELÉM NOVO EM PORTO ALEGRE (RS)**

COMPARAÇÃO DE MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTE NUMÉRICOS E ANALÍTICOS
EM MEIO AQUÁTICO

Orientador: Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Co-orientador: Rafael Manica

Porto Alegre Novembro 2016

ÉLÉONORE PIERRAT

**ESTUDO DA BALNEABILIDADE ATUAL E FUTURA DAS PRAIAS DO LAMI E
BELÉM NOVO EM PORTO ALEGRE (RS)**

COMPARAÇÃO DE MODELOS DE DISPERSÃO DE POLUENTE NUMÉRICOS E ANALÍTICOS
EM MEIO AQUÁTICO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jorge Rodolfo Silva Zabadal
UFRGS – Departamentode Engenharia
Mecânica, GENUC
Prof. Dr. Cintia Ourique Monticelli
FEEVALE – Departamento de Matemática
Prof. Dr. Renato Letizia Garcia
UERGS – Departamento de Energia e Meio
Ambiente

Trabalho de Conclusão apresentado ao
Curso de Engenharia Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
como parte dos requisitos para aobtenção
do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Co-orientador: Rafael Manica

Porto Alegre Dezembro 2016

Sumário

1	Introdução.....	14
2	Justificativa.....	15
3	Questão de pesquisa.....	16
4	Objetivos.....	16
4.1	Objetivos Gerais.....	16
4.2	Objetivos específicos.....	16
4.3	Estrutura do trabalho.....	17
5	Revisão bibliográfica.....	18
5.1	Legislação sobre o enquadramento das águas brasileiras e os critérios de balneabilidade.....	18
5.1.1	Classes de qualidade das águas Brasileiras.....	18
5.1.2	Balneabilidade das águas Brasileiras.....	19
5.1.3	Critérios legais de balneabilidade na Europa.....	20
5.2	Parâmetros de mapeamento de qualidade da água.....	21
5.2.1	Mapeando a qualidade da água.....	21
5.2.2	Mapear a poluição por esgoto urbano.....	22
5.3	Panorama da situação do esgotamento sanitário em Porto Alegre e particularmente em Belém Novo e Lami.....	23
5.3.1	Infraestrutura de esgotamento.....	23
5.3.2	Qualidade das águas das praias do Lami e Belém Novo situação atual e perspectivas.....	28
5.4	Métodos de simulações de propagação de poluentes.....	31
5.4.1	Métodos numéricos.....	31
5.4.2	Modelos analíticos baseados na aplicação de transformações conformes.....	35
6	Aparato e metodologia.....	42
6.1	O programa DMAEMap para simular a propagação de poluentes em meio aquático.....	42
6.1.1	Apresentação do DMAE-Map.....	42
6.1.2	Interface o programa.....	42
6.2	Dados de entrada do programa.....	45
6.2.1	Tamanho característico da resolução.....	45
6.2.2	Delineamento das feições do corpo hídrico.....	45
6.2.3	Campo de velocidade no corpo hídrico.....	46
6.2.4	Vazões de referência do Guaíba.....	46
6.2.5	Características das fontes emissoras.....	46
6.2.6	Operações computacionais realizadas pelo programa DMAEMap.....	46

6.2.7	Estimativa do desvio na simulação de concentração de coliforme termotolerantes com o programa DMAE-Map.	49
6.3	Cenários de estudo da contaminação da zona sul de Porto Alegre através do DMAE-Map.	49
6.3.1	Cenário de base.	49
6.3.2	Cenário de desvio de carga periférica oriunda do Centro para o emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa.	49
6.3.3	Cenário aumento populacional e desvio de carga.	50
6.4	Legenda dos mapas temáticos.	51
7	Resultados e análise das simulações com o programa DMAE-Map.	52
7.1	Resultados e análise da simulação do cenário de base.	53
7.1.1	Análise dos resultados da simulação do cenário de base.	53
7.1.2	Análise dos resultados da simulação do cenário de base.	54
7.2	Resultados e análise da simulação do cenário de desvio de carga periférica oriunda do Centro para o emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa.	56
7.2.1	Em condição de vazão alta do Guaíba 2400 m ³ /s.	56
7.2.2	Resultados e análise em condição de vazão baixa do Guaíba 600 m ³ /s.	57
7.2.3	Conclusão da análise do cenário de desvio de carga.	58
7.3	Resultados e análise da simulação do cenário de aumento populacional com desvio de carga periférica.	59
7.3.1	Em condição de vazão alta do Guaíba 2400 m ³ /s.	59
7.3.2	Resultados em condição de vazão baixa do Guaíba 600 m ³ /s.	60
7.3.3	Conclusão da análise das simulações de aumento populacional.	61
8	Comparação dos resultados obtidos com o aplicativo DMAE-Map com outros resultados experimentais.	62
8.1	Comparação dos resultados do enquadramento do Guaíba e os resultados de IPH-Eco com os resultados da simulação do cenário de base com DMAE-Map.	62
8.1.1	Enquadramento atual do Guaíba e calibração do modelo de qualidade IPH-Eco.	62
8.1.2	Comparação entre a precisão concentração de coliformes termotolerantes calculada com o aplicativo IPH-Eco e o aplicativo DMAE-Map.	64
8.2	Comparação dos resultados da simulação do Cenário atual com DMAE-Map e IPH-A.	65
8.2.1	Cenário simulado com IPH-A.	65
8.2.2	Análise e comparação com os resultados das simulações com DMAE-Map.	66
8.3	Comparação dos resultados da simulação do cenário atual com DMAE-Map e SIS-Bahia... ..	67
8.3.1	Cenários simulados com SIS-Bahia e resultados.	67
8.3.2	Análise e comparação com os resultados de DMAE-Map.	69
9	Conclusão	70
10	Indicações de trabalhos futuros no mesmo tema.	72
11	Bibliografia.	73

Agradecimentos

Agradeço ao professor Zabadal, que me abriu novos horizontes no âmbito das matemáticas aplicadas. Na definição da abordagem desse estudo, e na redação do texto mesmo, agradeço ao professor Manica, que me apoiou constantemente.

Esse trabalho conclui o curso de graduação em engenharia ambiental, e significa o final do meu intercâmbio como aluna de dupla-diplomação na UFRGS. O Brasil sempre será minha segunda terra, por ter me acolhido quando me joguei no mundo.

Resumo

O Guaíba é o manancial principal da cidade de Porto Alegre, ele tem um papel essencial no saneamento, como corpo receptor dos esgotos urbanos tratados ou não. A poluição orgânica resultante é a causa principal da qualidade degradada da água. Assim, a avaliação dos impactos ambientais do sistema de esgotamento sobre a qualidade das águas do Guaíba permitiria compatibilizar os usos sanitários e turísticos deste corpo hídrico, no presente e no futuro.

Dentro desse contexto se insere a importância de ferramentas computacionais para simular a dispersão de poluentes em meio aquático, de modo a subsidiar a tomada de decisão dos gestores, e garantir a segurança dos usuários frente às doenças veiculadas por água contaminada por esgoto. O trabalho proposto contempla simulações disponíveis na literatura, ou realizadas por pessoas habilitadas ao manuseio do software, para a qualidade da água no Guaíba, avaliada com o critério da concentração de coliformes termotolerantes. A interpretação das simulações focou particularmente nas condições de balneabilidade no Lami e Belém Novo. Foram simulados cenários da situação atual e de possíveis alterações do sistema de esgotamento, sugeridas no Plano de Esgoto do Departamento Municipal de Água e Esgoto, e no Projeto Integrado Socio-Ambiental da prefeitura.

Também, foram avaliadas as simulações de diferentes ferramentas computacionais, com o intuito de fornecer resultados consolidados e consistentes. Os programas IPH-A, IPH-Eco e SIS-Bahía, empregam abordagens numéricas clássicas, enquanto o programa DMAE-Map usa uma abordagem analítica mais atual. Essa última abordagem foi estudada em detalhe e permite resolver a equação advectivo difusiva bidimensional em regime transiente, para obter a distribuição de concentração de poluentes em corpos hídricos de formato complexo. A formulação analítica, baseada em transformações conformes, converte a equação original em um modelo expresso em termos de coordenadas curvilíneas generalizadas, que correspondem à função corrente e ao potencial velocidade para escoamentos invíscidos. A função de variável complexa responsável pela definição da transformação é obtida a partir das equações paramétricas que descrevem as fronteiras do domínio.

Por fim, esse trabalho avaliou o enquadramento e a balneabilidade nas praias do Lami e de Belém Novo, lugares tradicionais de lazer, patrimônio ambiental na cidade de Porto Alegre, com apoio das ferramentas computacionais disponíveis e de revisão bibliográfica. Atualmente, essas praias são balneáveis durante os meses de regime de alta vazão do Guaíba, podendo ter problemas de salubridade durante o período de menor vazão do Guaíba, em particular no balneário de Belém Novo. Como o período de estiagem corresponde a temporada turística de verão, as variações observadas de qualidade da água prejudicam o aproveitamento recreativo das praias, e também, as atividades econômicas de turismo. Uma das estratégias possíveis para melhorar a qualidade das águas do Guaíba próximo ao Centro é a realização de um desvio das cargas periféricas não tratadas oriundas do Centro de Porto Alegre, inicialmente despejadas na Ponta da Cadeia, ou no arroio Dilúvio, para o emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa. O impacto ambiental resultante sobre a balneabilidade da praia do Lami não foi significativo considerando a população de 2010, uma vez que as cargas locais de efluentes tiveram um impacto maior sobre a qualidade das águas, em comparação com as cargas remotas. Em Belém Novo, devido a configuração geográfica é provável que o emissário da Ponta Grossa tenha um impacto ambiental negativo relevante. Porém, esse impacto não apenas resulta do desvio de carga, mas também do desague do arroio do Salso, o qual é bastante contaminado por esgoto. Aplicando um aumento populacional correspondente à situação em 2030,

sem alteração do percentual de coleta e tratamento dos esgotos sanitários em Poto Alegre, a qualidade do Guaíba em todas as estações apareceu como significativamente comprometida; em particular a balneabilidade das praias do Lami e Belém Novo ficou inviável. Globalmente, a partir dos resultados do trabalho, os efeitos do emissário da Ponta Grossa apareceu como de menor relevância em comparação com as cargas locais, a curto como a longo prazo, em relação a balneabilidade das praias de Belém Novo e Lami. Assim, a análise das simulações apontou como fator de maior relevância para a preservação da qualidade das águas nas praias da Zona sul a melhoria das infraestruturas locais de coleta e tratamento de esgoto sanitário.

Abstract

The Guaíba is the main water resource in Porto Alegre. It is used for very diverse purposes and that can trigger environmental conflicts. For instance, the river is the cornerstone of the sanitation politic, both as the final receptor of treated and not treated urban sewage, and the source of drinking water. In that context, assessing the environmental impact of sanitation infrastructures is essential for the community to be able to continue relying on that water resource today and in the future. The focus of the present work is to assess the water quality, especially with respect to the legal quality limits for bathing requirements, in the Lami beach and Belém Novo beach regions, through computational simulations and study of bibliographic references. These regions are particularly relevant for being traditionally dedicated to tourism, and natural preservation in Porto Alegre.

To help decision making and protect the population from diseases linked with water contamination by urban effluents, many computational tools were developed in order to simulate pollutant dispersion in water. This work presented in this document shows numeric results of water quality simulations based on the criterion of thermoresistant coliform concentration. In order to confirm the results, simulations with different programs were compared: DMAE-Map, IPH-A, IPH-Eco and Sis-Bahia. Which are robust and widely used hydrologic simulators in Brazil. The simulations interpretation focused on the Lami beach and Belém Novo beach regions in order to characterize the water quality for bath accordingly to legal limits. The present situation and different scenarii discussed in the Porto Alegre's department of water and sewage were analyzed.

Moreover, the computational tools mentioned have different solving strategies for fluid dynamics and matter transport equations: IPH-A, IPH-Eco and Si-Bahia are based on a numerical approach, while DMAE-Map relies on an analytical innovative approach. This later program is described in more details, as. It is a newer and more efficient way –from the calculation time point of view- to determine the concentration distribution. The concentration distribution is computed through the bi-dimensional advection and diffusion equation solving, in permanent or transient regime, for morphologically complex water bodies. The analytic formulation of the advective and diffusive propagation problem, based on conform transformation, converts the original equation in Cartesian coordinates into another expression written in terms of generalized curve coordinates, which corresponds to the stream function and the velocity potential of unviscous flows.

Bibliography and DMAE monitoring shows that today it is safe to bath at Lami and Belém Novo beach in winter, but sometimes quality problems occur in summer due to the slower stream of the Guaíba. The analisis of the simulation demonstrated a low impact of part effluent flow deviation from the Centro to the outflow conduct of the urban effluent treatment plant of Serraria near Ponta Grossa on the water quality in Lami and Belém Novo. Today, the main source of pollution in Lami and Belém Novo is the local effluent sources like septic tanks or low quality creeks, rather than the remote sources like the urban effluent conduct in Ponta Grossa or Ponta da Cadeia. However, taking into account the population growth till 2030, the water quality of the Guaíba as a whole will significantly drop in every season because of the increase of the effluent flow. The simulations showed that the most relevant parameter to alter in order to preserve the quality of water, and the bathing conditions in Lami and Belém Novo, are the local sanitation infrastructures.

Lista das figuras e tabelas.

Figura 1: Pontos de coleta no Guaíba e tributários (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE 2010).	24
Figura 2: Pontos de coleta de cargas afluentes no rio Gravataí e no rio Guaíba (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE 2010).	25
Figura 3: ETEs operacionais em 2009 (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE, 2010).	26
Figura 4: Infraestrutura do sub-sistema de esgoto Belém Novo em 2006 (Fonte: PDE 2006-2009). ...	27
Figura 5: Infraestrutura do sub-sistema de esgoto Lami em 2006 (Fonte: PDE 2006-2009)	27
Figura 6: Histograma das frequências experimentais de ocorrência das classes de qualidade CONAMA nº357 de 2005 para o parâmetro de coliformes termotolerantes em Lami e Belém Novo (Fonte: ECOPLAN, 2016)	29
Figura 7: Coliformes termotolerantes no Lami (Fonte: SANCHES, 2013).	30
Figura 8: Equacionamento empregado no aplicativo IPH-A (Fonte: Manual de uso de IPH-A, BORCHE).	32
Figura 9: Equações do escoamento hidrodinâmico usadas em IPH-Eco (Fonte: PERREIRA, 2012).	33
Figura 10: tela inicial do programa DMAE-Map	43
Figura 11: tela de definição do cenário do programa DMAE-Map.	44
Figura 12: Tela de resultado da simulação no programa DMAE-Map.	45
Figura 13: Fluxograma de operações de cálculo do programa DMAE-Map.	48
Figura 14: Mapa do Guaíba com o detalhe da localização dos arroios e regiões do Guaíba.	52
Figura 15: Enquadramento das águas do Guaíba para o cenário atual simulado por DMAE-Map, e detalhe da região da Ponta Grossa, onde há o emissário (representado como uma seta).	53
Figura 16: Enquadramento das águas do Guaíba (direita), e detalhe na Ponta Grossa (a seta representa o emissário) para o cenário desvio de carga em condição de vazão alta por DMAE-Map.	56
Figura 17: Enquadramento das águas do Guaíba (direita), e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário desvio de carga em período de estiagem por DMAE-Map.	57
Figura 18: Enquadramento das águas do Guaíba, e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário de aumento populacional em condição de vazão de base alta por DMAE-Map.	59
Figura 19: Enquadramento das águas do Guaíba, e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário de aumento populacional em condição de vazão de base baixa por DMAE-Map.	60
Figura 20: Histogramas das frequências experimentais de concentração de coliformes termotolerantes dos pontos situados na região margem esquerda jusante com base em séries de dados 2009-2013. (Adaptado de ECOPLAN, 2016).	63
Figura 21: Frequências experimentais de balneabilidade (Adaptado de EcoPlan (2016)).	63
Figura 22: Valores das concentrações de coliformes termotolerantes em diferentes pontos próximos ao emissário da ponta Grossa. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013)	65
Figura 23: distribuição da concentração de coliformes termotolerantes na região da Ponta Grossa, onde há o emissário, simulada com o aplicativo IPH-A (Fonte: LERSCH, HOFFMANN, ROSNAN, 2013).	66
Figura 24: Concentração de microorganismos no Guaíba no período de estiagem 355m ³ s. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013)	68
Figura 25: Concentração de micro-organismos no Guaíba no período de estiagem 355m ³ s contando o emissário da ponta Grossa como única fonte de lançamento e com vazão de 2500 m ³ /s. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013).	69
Tabela 1: Limites de concentração de coliformes termotolerantes estabelecidos por lei para o uso recreacional. (CONAMA nº357 de 2005).	19

Tabela 2: Comparação dos limites de coliformes termotolerantes para balneabilidade e uso preponderante nas resoluções CONAMA nº357 de 2005 e nº274 de 2000.	20
Tabela 3: Classes de balneabilidade para as águas doces de acordo com a legislação vigente na União Europeia.	21
Tabela 4: classes de qualidade da água utilizando o IQA (ECOPLAN, 2016)	22
Tabela 5: desvios obtidos entre os parâmetros simulados por método analítico baseado em transformação conforme e resultados experimentais (Fonte: adaptado de Haag, 2003).....	41
Tabela 6: Resumo das diferenças entre os cenários simulados.	50
Tabela 7: Legenda dos mapas de enquadramento das águas nas simulações DMAE-Map.....	51

Lista das abreviaturas

CONAMA: Conselho do Meio Ambiente

COPPETEC: Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos

DBO5: Demanda bioquímica de oxigênio de cinco dias

DMAE: Departamento de água e esgoto de Porto Alegre

E.Coli: Escherchia Coli

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

FIST: Filtered in Space and Time

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IQA: Índice de qualidade da água

LES: Large Eddy Simulation

ONU Organização das Nações Unidas

PDE: Plano de esgoto

PISA: Projeto Integrado Socio-Ambiental

PMSB: Plano Municipal de Saneamento Básico

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro

Index das siglas

Q	Fonte de contaminante
C	Concentração de poluente de interesse
C_0	Termo de integração
D	Coefficiente de difusão do poluante no meio aquático
k	Coefficiente de decaimento do poluente
u, v	Componentes respetivamente radial e transversal da velocidade do escoamento
ψ	Função corrente
ϕ	Potencial velocidade

1 Introdução

Durante o século XX, o crescimento populacional acelerado e o desenvolvimento econômico ao nível mundial aumentaram brutalmente a pressão sobre a disponibilidade e a qualidade dos recursos ambientais. Hoje dia, a necessidade de planejar e gerenciar o uso dos recursos naturais de modo a preservá-los é de suma importância. Os recursos hídricos constituem um ponto particularmente sensível, como mostrou na escala nacional, a crise hídrica em São Paulo em 2015, e sua adição aos objetivos do desenvolvimento sustentável definidos pela ONU em 2015¹.

O primeiro decreto do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 1986 inclui dentro dos bens a proteger as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e a qualidade dos recursos ambientais (BRASIL, 1986). Para municiar os órgãos públicos de ferramentas jurídicas necessárias ao alcance desse objetivo no caso dos recursos hídricos, o Congresso Nacional promulgou a Política Nacional dos Recursos Hídricos (Lei 8.433 de 08 de janeiro de 1997) para determinar os fundamentos do gerenciamento da água no Brasil:

- I. a água é um bem de domínio público;
- II. a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III. em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV. a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V. a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- VI. a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

De acordo com essa política, e a sua versão estadual (Lei estadual nº10350 de 1994) a municipalidade de Porto Alegre criou o comitê de bacia do Guaíba para cumprir os objetivos especificados pela participação popular: melhorar da qualidade da água, assegurar o uso múltiplo, conservar os ecossistemas da sua bacia hidrográfica. Os estudos encomendados por esse comitê resultou na redação do plano de bacia do Guaíba².

Os usos principais das águas do Guaíba, detalhados no relatório dos programas e ações (ECOPLAN, 2016), são: dentro dos usos consuntivos: 53% da água é destinada à irrigação, 27% ao consumo industrial, 20% ao abastecimento humano; os usos não-consuntivos contam com a navegação, pesca, turismo e lazer, mineração, preservação das comunidades aquáticas e ao desenvolvimento da ictiofauna. Esses usos múltiplos alteram a disponibilidade e a qualidade das águas, podendo levar a aparição de conflitos em períodos de seca ou de uso intensivo. Como resultado, a qualidade das águas do Guaíba é de modo geral degradada, em particular na foz dos rios Gravataí, e Sinos e Arroio Dilúvio, e alguns pontos específicos da margem esquerda (ANDRADE ET AL 2012). A principal fonte de contaminação é o lançamento de esgoto sanitário sem tratamento adequado: em 2015, levando em conta os usuários cadastrados como usuários do sistema, apenas 65% dos esgotos são tratados antes de voltar ao Guaíba (DMAE, 2015).

¹ Meta 7 dos objetivos do desenvolvimento sustentável definidas pela ONU.

² Nesse trabalho, o termo Guaíba será usado para evitar polêmicas.

Considerando também que, as atividades de lazer se desenvolvem principalmente nos balneários maiores de Ipanema, e Belém Novo, na margem esquerda do rio. Na mesma região, a praia do Lami, historicamente vilarejo de pescadores e ecossistema sensível (SANCHES, 2013), hoje é habitada por uma população de baixa renda. As águas de Belém Novo e Lami apresentam melhor qualidade (ANDRADE et al 2012) por encontrar-se afastadas dos centros urbanizados mais carregados em poluição cloacal. Até, a qualidade é suficiente para atender os requisitos legais³ de balneabilidade (de acordo com os resultados do monitoramento efetuado pelo DMAE, disponíveis no site do DMAE). Além disso, o extremo Sul do Município abriga três reservas naturais importantes: a fazenda do Arado, o banhado do Lami, e o parque estadual de Itapuã. De acordo com os objetivos gerais de conservação, o plano de bacia prevê que para proteger sua biodiversidade e sua beleza natural, é necessário planejar a adequar o sistema de saneamento básico, em particular no que tange ao esgotamento sanitário.

Desta forma, para compatibilizar os vários usos das águas do Guaíba, é essencial planejar e gerenciar o manancial hídrico. A correta gestão promove os diferentes usos do Guaíba sem conflito, isto é, a ação depurativa, a manutenção dos ecossistemas aquáticos e a preservação de áreas de lazer, visto que o lançamento indiscriminado de esgoto com nível de tratamento insuficiente é a primeira causa de degradação da qualidade das águas do Guaíba. Ações no próprio sistema de saneamento são essenciais para reduzir o lançamento não planejado de esgoto sem tratamento a fim de evitar a poluição da orla resultante do espalhamento das plumas oriundas dos emissários. Um recurso usado com frequência no planejamento de rede de esgoto é a realocação de carga. Porém essa estratégia não é ausente de impacto ambiental. Daí a importância de simular esse impacto negativo, através, por exemplo, de ferramentas computacionais robustas. Assim, este trabalho aplicará tais ferramentas matemáticas para verificar o efeito da emissão de carga de esgoto sobre a qualidade e a balneabilidade das águas ao longo da zona sul de Porto Alegre.

2 Justificativa

Os usos do Guaíba como corpo hídrico são diversos; um deles, no âmbito do saneamento, é a depuração natural dos efluentes urbanos: através da sua fauna e da sua flora e de processos de diluição e aeração, a matéria orgânica oriunda dos esgotos da cidade é, então, degradada. Assim os efluentes domésticos são tratados através do próprio ecossistema aquático, cuja principal consequência é a degradação de qualidade das águas na zona a jusante dos pontos de lançamento dos seus emissários principais, a saber: Ponta Grossa, a Ponta da Cadeia, além do delta do Rio Gravataí e do Rio Jacuí. Nesses locais de despejo determinados são usados emissários aquáticos ou terrestres: isto é, canalizações submersas ou terrestre, de acordo com as facilidades da geografia local, com o propósito de afastar os efluentes das zonas povoadas. Os condutos desembocam dentro ou na proximidade do canal de navegação, aproveitando assim das altas velocidades neste local para afastar eficientemente as cargas cloacais a jusante. Em contrapartida, uma pluma de esgoto se espalha rumo à Lagoa dos Patos; paralelamente a matéria orgânica e os patogênicos migram transversalmente a direção principal de progressão da pluma por difusão. Isto pode resultar na contaminação das orlas da Zona sul (margem esquerda) do Guaíba. A contribuição dos emissários no corpo da água, além de representar uma vazão elevada, é muito concentrada em matéria orgânica e em microorganismos eventualmente patogênicos. Por outro lado, o decaimento ao longo do percurso e a diluição que caracteriza o processo difusivo podem eventualmente reduzir a concentração de poluentes junto à orla a níveis aceitáveis (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013).

³ definido na resolução CONAMA nº274 de 2000 (CONAMA 2000).

Para compatibilizar o uso depurativo do corpo hídrico com seus usos de manutenção do ecossistema aquático e de lazer, fica essencial projetar os emissários de modo a poder atingir o enquadramento planejado para as diferentes zonas do Guaíba e absorver as cargas de esgoto da cidade futura, mapeando as zonas de maior contaminação e manter uma boa informação sobre a qualidade em todo corpo hídrico. Para tanto, deverá ser levado em conta para projetar o sistema de coleta-tratamento-lançamentos de esgotos, o crescimento populacional, a disposição dos emissários, as fontes não planejadas de lançamento, e as metas de enquadramento de cada zona do Guaíba. Uma maneira de realizar isso é através de ferramentas de matemática computacionais, as quais permitem testar cenários de modo a subsidiar informação técnica consolidada para a tomada de decisão no âmbito do planejamento urbano. Tradicionalmente os problemas de propagação de poluentes em meio aquático empregam métodos de resolução computacional numérica como os modelos SISBahia, IPH-A ou IPH-Eco, os quais necessitam a construção de malhas pesadas, e um poder de cálculo importante por cada cenário testado, devido à complexidade das condições de contorno do domínio de estudo. Existem outros métodos de resolução de natureza analítica, com a vantagem de reduzir significativamente o custo computacional da simulação. A redução do tempo de computação permite simular uma diversidade maior de configurações e cenários possíveis pelo mesmo custo financeiro, de modo a gerar uma informação técnica mais completa. Um exemplo de resolução mista já bem investigada por Zabadal (2014), Ribeiro (2004), Garcia (2004), Haag (2003), Poffal (2005), Santiago (2007), Fernandes (2007), Wang e Ji (2015) no âmbito da dinâmica dos fluidos é baseado no emprego de transformações conformes, convertindo a equação original em um modelo expresso em termos de coordenadas curvilíneas generalizadas, que correspondem à função corrente e ao potencial velocidade para escoamentos invíscidos.

Assim, esse trabalho utilizará tais ferramentas computacionais de modo que seja possível contribuir para o entendimento da dinâmica do Guaíba e do transporte de poluentes.

3 Questão de pesquisa.

Como a estrutura do esgotamento sanitário da cidade de Porto Alegre influencia a qualidade do Guaíba, e particularmente a balneabilidade nas praias do Lami e Belém Novo?

4 Objetivos.

4.1 Objetivos Gerais.

O objetivo geral desse trabalho é avaliar o enquadramento e a balneabilidade atuais das águas em Belém Novo e no Lami, através de simulações computacionais do aplicativo DMAE-Map com diferentes cenários de emissão de esgotos, e consolidar esses resultados através da comparação com outros programas robustos de simulação. Para tal, diferentes cenários de simulações de 2013 foram analisadas como sendo representativas da situação atual em 2016.

4.2 Objetivos específicos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Estudar a situação atual da qualidade e balneabilidade das águas do Guaíba nas praias da zona sul com a ferramenta de simulação DMAE-Map.

- Estudar o efeito da reposição de uma parte das cargas lançadas desde o emissário da Ponta da Cadeia para o emissário da Ponta Grossa sobre a qualidade e a balneabilidade das águas do Guaíba nas praias da Zona sul com a ferramenta de simulação DMAE-Map.

- Consolidar esses resultados comparando com os cenários atuais de outros programas de simulação de qualidade das águas: IPH-A, IPH-Eco, SisBahia.

4.3 Estrutura do trabalho.

Em um primeiro momento, a revisão bibliográfica traz elementos de contexto sobre as leis vigentes acerca da qualidade dos corpos hídricos, um panorama e perspectivas acerca das condições de qualidade das águas do Guaíba, e uma apresentação das técnicas de modelagem de contaminação em meio aquático.

No item aparato e metodologia, foi apresentado o aplicativo DMAE-Map, e os cenários simulados com essa ferramenta, contemplando a situação atual além de diferentes prognósticos quanto a evolução da configuração da infraestrutura sanitária em Porto Alegre. Como o aplicativo DMAE-Map possui acesso restrito, devido à utilização de uma base de dados confidenciais do DMAE, as simulações foram realizadas por Zabadal (sendo habilitado).

Em seguida, foram analisados e comparados os resultados de simulações com DMAE-Map com os demais aplicativos IPH-A, e Sis-Bahia, tomando como base as simulações realizadas no projeto integrado socio-ambiental (PISA) (LERSCH HOFFMANN ROSMAN 2013). Também, os resultados foram comparados com o plano de bacia do Guaíba 2016 (ECOPLAN, 2016) e com IPH-Eco. As simulações analisadas nesse terceiro momento provêm da literatura.

Por fim, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

5 Revisão bibliográfica.

Esse item apresenta uma revisão da literatura para contextualizar o presente estudo. Em um primeiro movimento descreve as referências legais que definem a qualidade da água e a balneabilidade. Após, é descrita a situação de qualidade e balneabilidade das águas nas regiões do Lami e de Belém Novo. Por fim, diferentes métodos de modelagem usualmente empregados nos estudos de qualidade são apresentados.

5.1 Legislação sobre o enquadramento das águas brasileiras e os critérios de balneabilidade.

5.1.1 Classes de qualidade das águas Brasileiras.

A resolução CONAMA nº357 de 2005 determina o enquadramento das águas brasileiras. Quatro classes de qualidades foram determinadas em função de valores quantitativos de parâmetros chaves, cada uma correspondente a um conjunto de usos seguros do ponto de vista da conservação da qualidade da água e da saúde humana e animal: os usos preponderantes. É mencionado que as águas de melhor qualidade podem ser aproveitadas para usos menos exigentes, desde que estes não prejudicam a qualidade da água.

No caso das águas doces, como é o caso do Guaíba, os usos preponderantes de cada classe são descritos de acordo com o artigo 43 do capítulo I do texto da lei:

As águas doces são classificadas em:

I - classe especial: águas destinadas:

- ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas;
- à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II - classe 1: águas que podem ser destinadas:

- ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- à proteção das comunidades aquáticas
- à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;
- à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e
- à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III - classe 2: águas que podem ser destinadas:

- ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- à proteção das comunidades aquáticas;
- à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA no 274, de 2000;
- à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- à aquicultura e à atividade de pesca.

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:

- ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- à pesca amadora;
- à recreação de contato secundário; e
- à dessedentação de animais.

V - classe 4: águas que podem ser destinadas:

- à navegação;
- à harmonia paisagística.

Os vários parâmetros que permitem definir o enquadramento são definidos na seção II do capítulo III condições e padrões de qualidade das águas da resolução (CONAMA, 2005). Constam como critérios quantitativos de qualidade os valores das grandezas: pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO5), Demanda de Oxigênio, nitrogênio e fósforo, clorofila, densidade de cianobactérias, sólidos dissolvidos totais, concentrações de elementos inorgânicos, e concentrações de compostos orgânicos detalhados na lei CONAMA nº357 de 2005 apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Limites de concentração de coliformes termotolerantes estabelecidos por lei para o uso recreacional. (CONAMA nº357 de 2005)

Classe do corpo hídrico	Concentração de coliformes termotolerantes C (bactérias por 100 mL)	Uso da água em relação a recreação
1	$C < 200$	Contato primário ⁴
2	$200 < C < 1000$	Contato primário
3	$1000 < C < 2500$	Contato secundário ⁵
4	$2500 < C$	Beleza paisagística

5.1.2 Balneabilidade das águas Brasileiras.

A resolução CONAMA nº274 de 2000 determina o padrão de balneabilidade (recreação de contato primário) para águas brasileiras doces. O critério quantitativo que determina a balneabilidade é a quantidade de micro-organismos coliformes termotolerantes, ou *Escherichia Coli* (*E.Coli*). Ambos grupos de micro-organismos são caracterizados pela presença em fezes humanas e animais não são patogênicos, portanto, eles são indicadores de contaminação fecal. Entretanto os grupos se diferenciam pela abrangência do meio de desenvolvimento de cada um. Os coliformes termotolerantes, também chamados coliformes fecais, além de presentes em fezes humanas e de animais podem, também, ser encontradas em solos, plantas ou quaisquer efluentes contendo matéria orgânica. A bactéria *Escherichia coli*, por sua vez, é abundante em fezes humanas e de animais, tendo, somente, sido encontrada em esgotos, efluentes, águas naturais e solos que tenham recebido contaminação fecal recente. De fato, a contaminação fecal pode apresentar riscos à saúde humana, por ser potencialmente associada a micro-organismos patogênicos como a salmonela.

⁴ recreação de contato primário: contato direto e prolongado com a água (tais como natação, mergulho, esqui-aquático) na qual a possibilidade do banhista ingerir água é elevada.

⁵ recreação de contato secundário: atividades em que o contato com a água é esporádico ou acidental e a possibilidade de ingerir água é pequena, como na pesca e na navegação.

Em outras palavras, o critério de balneabilidade definido acima apenas leva em conta a contaminação fecal. Outros critérios são mencionados na resolução fazendo parte do conceito de qualidade de águas balneáveis, por exemplo presença de algas, de rejeitos sólidos ou líquidos, ocorrência de doenças pouco frequentes, pH baixo ou elevado. Porém, eles não são objetos de controles quantitativos sistemáticos. Isto demonstra a importância acordada à contaminação por esgoto pelas autoridades.

Além de definir se as águas são balneáveis ou não, a resolução precedente define categorias de qualidade da água própria para banho com base no indicador microbiológico escolhido, como mostra a tabela 2. Além disso, o número de organismos determinado para ser balneável é de 2500 coliformes termotolerantes/100 mL ou de 2000 *E. Coli.*/100 mL. Isto corresponde ao limite entre as classes 3 e 4 da resolução CONAMA nº 357 de 2005 (ver tabela 1). O método experimental para a contagem destes fatores exige uma repetibilidade de 80%, em cinco amostras coletadas semanalmente durante cinco semanas anteriores a publicação do resultado da análise de balneabilidade.

Tabela 2: Comparação dos limites de coliformes termotolerantes para balneabilidade e uso preponderante nas resoluções CONAMA nº357 de 2005 e nº274 de 2000.

Classe do corpo hídrico (CONAMA nº357 2005)	Uso da água em relação a recreação (CONAMA nº357 2005)	Categoria de água balneável (CONAMA nº274 de 2000)	Concentração de coliformes termotolerantes (u/100 mL)	Concentração de <i>E. Coli.</i> (u/100 mL)
1 ou 2	Contato primário	Excelente	C < 250	C < 100
2	Contato primário	Muito boa	250 < C < 500	200 < C < 400
2	Contato secundário	Satisfatória	500 < C < 1000	400 < C < 800
3 ou 4	Beleza paisagística	Não balneável	C > 2500	C > 2000

Nesse trabalho, dada a ambiguidade do critério legal de balneabilidade, foi adotado como limite de qualidade para banho a categoria de água balneável satisfatória (conforme tabela 1), ou seja uma concentração de coliformes termotolerantes de 1000 micro-organismos/100 mL.

5.1.3 Critérios legais de balneabilidade na Europa.

Como comparação da lei brasileira, serão apresentados os critérios de balneabilidade nos países da União Europeia. A diretiva europeia 2006/7/CE (UNIÃO EUROPEIA 2007) define quatro classes de balneabilidade em função da concentração de *E. Coli* ou de *Enterococcus spp* (/100 mL). *Enterococcus spp* é uma bactéria intestinal humana e animal patogênica e resistente aos antibióticos. Portanto, essa bactéria constitui um indicador de contaminação fecal com limiar bastante baixo por causa de sua virulência. Na Europa, uma primeira avaliação das águas tinha que ser finalizada em 2013, e em 2015 todas as praias tinham que atingir uma qualidade satisfatória. Já nos Estados Unidos, a *Enterococcus spp* foi adotado como indicador em 2004.

Os valores de concentração nos pontos de amostragem são definidos em cima de séries de dados de 4 anos de duração. Considerando que as concentrações seguem um lei de probabilidade Log-Normal, os valores de concentrações nos pontos de amostragem são o valor do percentil 95 para a classe excelente ou boa, ou o percentil 90 para a classe suficiente. A tabela 3 apresenta um resumo das classes de balneabilidade.

Tabela 3: Classes de balneabilidade para as águas doces de acordo com a legislação vigente na União Europeia.

Classe de balneabilidade	Concentração limite E.Coli /100 mL	Concentração limite <i>Enterococcus</i> spp /100 mL
Excelente	500	200
Boa	900	400
Insuficiente	1000	330

Um exame visual, sem avaliação quantitativa, deve ser realizado para detectar a presença de resíduos sólidos, resíduos de betume, microalgas, fitoplanctone cianobactérias.

Comparando as tabelas 2 e 3, pode-se notar que o limite de balneabilidade em termos de coliformes termotolerantes na União Europeia corresponde ao limite superior para o enquadramento na classe 2. Ambos critérios de balneabilidade – europeu e brasileiro - são relativamente fracos, no sentido que o contato primário não é mais recomendável para categoria de balneabilidade satisfatória. Considerando os valores máximos, verifica-se que o critério europeu é mais restritivo, o limite de balneabilidade sendo de 1000 *E.Coli* /100 mL enquanto no Brasil o limite é 2000 *E.Coli*/100 mL. Além disso, o método de cálculo dos valores na Europa são mais rigorosos.

5.2 Parâmetros de mapeamento de qualidade da água.

5.2.1 Mapeando a qualidade da água.

Conforme foi apresentada a legislação vigente (item 5.1.-legislação sobre o enquadramento das águas brasileiras e os critérios de balneabilidade), a caracterização da qualidade da água depende de um conjunto de parâmetros e não de apenas uma grandeza isolada. Por exemplo, a clorofila cuja presença pode indicar uma eutrofização do corpo hídrico, os nitratos indicam uma possível poluição oriunda principalmente de atividades agrícolas, a DBO5 indica a presença de matéria orgânica biodegradável, e, também, os coliformes termotolerantes que indicam a poluição oriunda do despejo de esgoto ou efluente agrícola. Além disso, os critérios quantitativos de qualidade apresentam uma sensibilidade diferente: o pH varia entre 1 e 12 enquanto os coliformes termotolerantes variam entre 1 e vários milhões de indivíduos em 100mL de amostra. Por fim, o corpo hídrico apresenta diferentes regimes de vazão, os quais implicam sobre a sua qualidade: por exemplo, no sul, no período de estiagem, a qualidade é pior que no período chuvoso. O período de estiagem corresponde a época do ano de novembro a fevereiro e a vazões menores do Guaíba. O período chuvoso corresponde a época do ano de junho a setembro e a vazões maiores do Guaíba. Assim, surge a dificuldade de mapear com um critério simples a qualidade da água conforme ao enquadramento. Diferentes estratégias foram elaboradas para representar esse enquadramento considerando todos os aspectos citados acima.

Uma maneira de realizar isso é através de ferramentas estatísticas, as quais permitem ilustrar a variabilidade temporal dos critérios de qualidade. Assim no Plano de Bacia do Guaíba (ECOPLAN, 2016), a classe de qualidade de cada parâmetro é definida como a classe de enquadramento de 80% das amostras analisadas durante um período de avaliação. Esse período de avaliação pode ser curto de modo a revelar as variações sazonais no regime de vazão do Guaíba, ou longo de modo a construir valores representativos de uma situação média. Assim, foram construídos diagramas de frequência de classes conforme CONAMA 357 de 2005 para cada parâmetro de qualidade, em cima de dados de

2009 a 2013, no plano de bacia do Guaíba (Cf. Figura 20 do item 8.1.1.). Esses diagramas resolvem a dificuldade da variabilidade temporal dos parâmetros mas ainda há dificuldade em sintetizar os resultados por causa do número elevado de critérios a se levar em conta. Portanto, é relevante imaginar uma maneira de resumir em um único parâmetro o conceito de qualidade da água.

A realização de um índice global representativo da qualidade facilita a comunicação ao público em geral, o qual faz parte integrante da elaboração do plano de gestão e na aplicação do gerenciamento dos recursos hídricos. O Índice de Qualidade de Água (IQA) utilizado no plano de bacia do Guaíba foi proposto pela *National Sanitation Foundation*, e alterado pelo COMITESINOS em 1990 (ECOPLAN, 2016). O Índice de Qualidade de Água é calculado como o produto das qualidades relativas de cada parâmetro, ponderado por um expoente, cujo valor varia entre 0 e 1, o qual representa o peso relativo do parâmetro correspondente (ECOPLAN, 2016; ANDRADE, 2012). Os valores dos pesos relativos resultam da hierarquização dos critérios de qualidade, em função da ênfase que se deseja dar a cada um, e das fontes de contaminação realmente preponderantes. A equação 1 apresenta o cálculo do Índice de Qualidade de Água (IQA).

$$IQA = \prod_{i \text{ parâmetros}} q_i^{w_i} \quad (1)$$

Onde :

q_i é oi – i ésimo parâmetro de qualidade
 w^i é o peso relativo de q_i

O IQA obtido é um número adimensional entre 0 e 100, crescente conforme a qualidade da água. Em seguida, o valor do IQA é comparado com as faixas de qualidade descritas na tabela 4.

Tabela 4: classes de qualidade da água utilizando o IQA (ECOPLAN, 2016)

Faixa de valor do IQA	Classificação da qualidade da água
0-25	Muito ruim
26-50	Ruim
51-70	Regular
71-90	Bom
91-100	Excelente

Uma outra estratégia empregada nos estudos de qualidade de água é de escolher um parâmetro específico considerado representativo da contaminação. Na determinação do enquadramento do Guaíba (ECOPLAN, 2016), e na própria legislação de balneabilidade o critério quantitativo microbiológico é escolhido: concentração de *Escherchia Coli* ou coliformes termotolerantes. De fato, no caso do Guaíba, a poluição por coliforme termotolerantes é preponderante frente aos outros tipos de contaminação (ECOPLAN 2016).

5.2.2 Mapear a poluição por esgoto urbano.

A disposição inadequada de efluentes cloacais é uma fonte recorrente de contaminação das águas superficiais: observa-se no plano de bacia do Guaíba (ECOPLAN, 2016) que os parâmetros fósforo no primeiro lugar, e concentração de coliformes termotolerantes em segundo lugar, atingem com mais frequência classes de qualidade 3 e 4 (CONAMA 357 de 2005). Porém, a presença de altas concentrações de fósforo, poderia ser devido tanto a fontes naturais quanto a fontes antrópicas (BENDATTI et al, 2003). Enquanto isso, a concentração de coliformes termotolerante por sua vez, apresentou menor saturação. Assim, esse parâmetro é adequado para representar a qualidade da

água com um todo, uma vez que, a poluição por esgoto é preponderante no Guaíba em condições regulares. É evidente que ele não será mais representativo se ocorrer uma floração de algas (cianobactérias) ou se ocorrer um derramamento acidental industrial (fontes de poluente externa).

Além disso, esse critério microbiológico apresenta vantagens para executar o mapeamento propriamente dito. Os valores medidos de concentração de coliformes termotolerantes variam em uma ampla faixa de 1 até 10^{12} organismos por 100 mL, característica que permite mapear as manchas de contaminação com bastante contraste, uma vez que o valor característico de um efluente doméstico não tratado local é de 10^{12} coliformes termotolerantes/ 100 mL, enquanto o efluente não tratado de uma carga mais afastada atinge concentrações de 10^4 a 10^6 coliformes termotolerantes/ 100 mL, e ainda, após tratamento biológico convencional de esgoto em ETE, o valor reduz para 5% a 10% da carga bruta original. Como consequência, no plano de bacia do Guaíba, a variabilidade desse critério permitiu delimitar com mais precisão, em comparação com os outros parâmetros, as fontes de contaminação e a atenuação da pluma.

A concentração de micro-organismos assim pode ser adotada como critério de qualidade geral, e também, específico da contaminação por esgoto urbano. Por permitir uma representação sensível, com bastante contraste das classes de qualidade de acordo com CONAMA 357 de 2005, a concentração de coliformes termotolerantes foi escolhida como parâmetro de modelagem nesse trabalho.

5.3 Panorama da situação do esgotamento sanitário em Porto Alegre e particularmente em Belém Novo e Lami.

5.3.1 Infraestrutura de esgotamento.

O Guaíba é exutório de uma bacia hidrográfica que abrange cerca 30% da superfície do território Gaúcho (DMAE, 2010). A cidade de Porto Alegre está instalada acima de duas bacias hidrográficas vizinhas: a bacia do Guaíba e a bacia do rio Gravataí, no extremo norte do município (DMAE, 2010). De acordo com o IBGE (IBGE, 2009), a cidade conta com 85% de área urbana e 15% de área rural. As atividades econômicas que se desenvolvem aí contribuem para cerca 70% da riqueza gerada no estado. A cidade se abastece de água pelo Guaíba, e no mesmo tempo ele é o corpo receptor final dos esgotos. Essas características tem um impacto ambiental forte sobre esse corpo da água, e coloca a preservação da qualidade como um objetivo essencial.

Desde os anos 70, o Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE) de Porto Alegre dispõe de uma rede de pontos de coleta no intuito de monitorar as condições de qualidade das águas do Guaíba. Os mapas apresentados nas figuras 1 e 2, extraídas do plano diretor de esgoto pelo período 2006-2009 (DMAE, 2010) mostram a localização dos pontos de monitoramento de água. Essa rede de pontos de captação é usada amplamente nos estudos hidrológicos, realizados pelo próprio DMAE ou por outras instituições contratadas e o banco de dados gerados do DMAE podem ser utilizados como base para as simulações realizadas com aplicativos computacionais, tais como : DMAE-Map, IPH-A, SIS-Bahía, IPH-Eco(ver itens 7. e 8.).

Figura 1: Pontos de coleta no Guaíba e tributários (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE 2010).



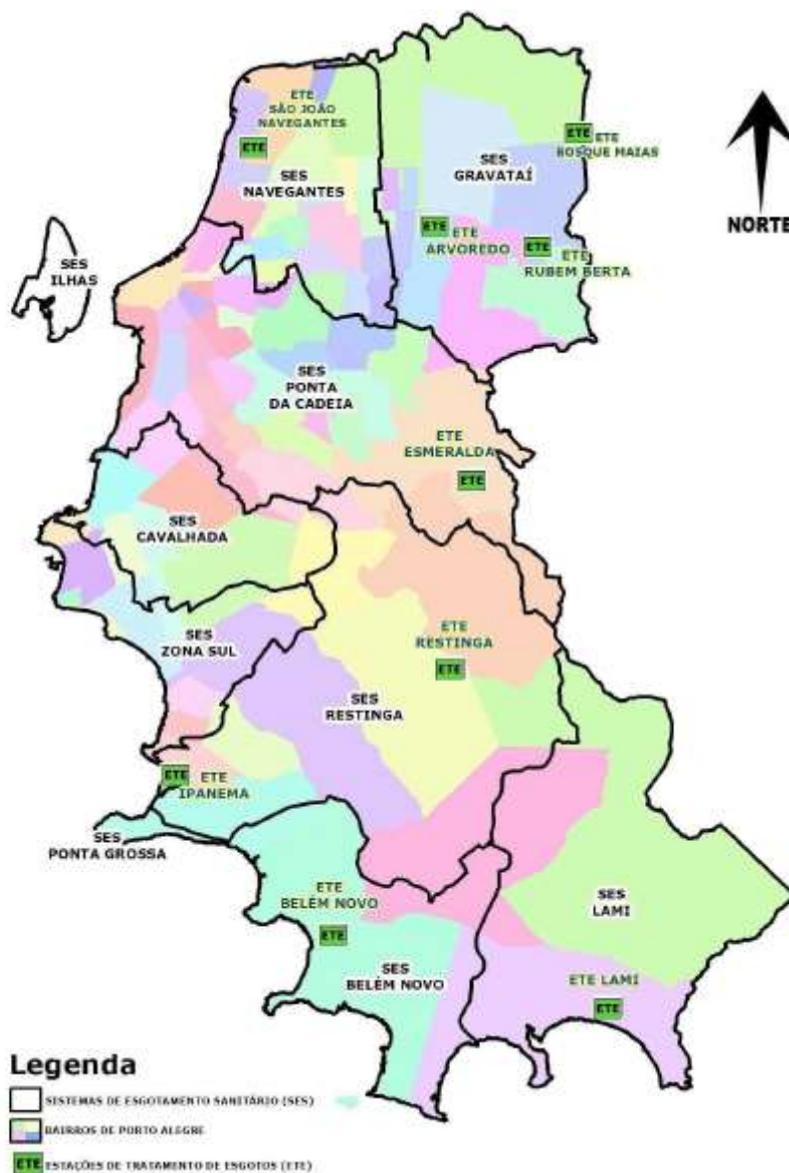
Figura 2: Pontos de coleta de cargas afluentes no rio Gravataí e no rio Guaíba (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE 2010).



A cidade ainda, conta com dez estações de tratamento de esgotos (ETE) urbanos em 2015. A Figura 3 apresenta mostra as ETEs em atividades atualmente, faltando acrescentar a ETE Serraria-Sarandi cuja inauguração foi posterior a essa data.

Uma dificuldade importante apontada pelo DMAE no plano de esgoto 2006-2009 (DMAE, 2010) na busca da coleta e do tratamento dos esgotos domésticos e da drenagem pluvial eficiente é a existência de um número significativo de ligações incorretas na rede pluvial para despejo das águas servidas. A consequência dessas práticas inadequadas, resultantes da falta de planejamento urbano, é a ineficiência ambiental e hidráulica do sistema de separador absoluto pluvial-cloacal, prejudicando a qualidade do corpo receptor: o Guaíba.

Figura 3: ETEs operacionais em 2009 (Fonte: PDE 2006-2009, DMAE, 2010).



Assim, o bairro Lami e Belém Novo, possuem estações de tratamento de esgoto na forma de lagoas de estabilização de tipo australiano, que coletam as cargas locais. Essas infraestruturas nos balneários permitiram preservar a qualidade da água para banhismo.

Figura 4: Infraestrutura do sub-sistema de esgoto Belém Novo em 2006 (Fonte: PDE 2006-2009).

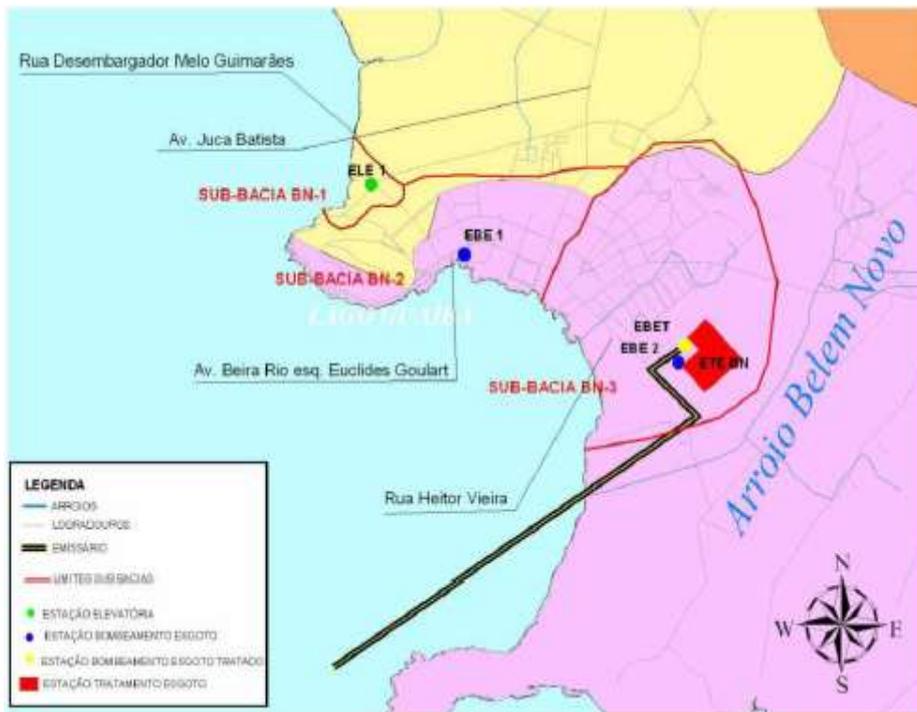
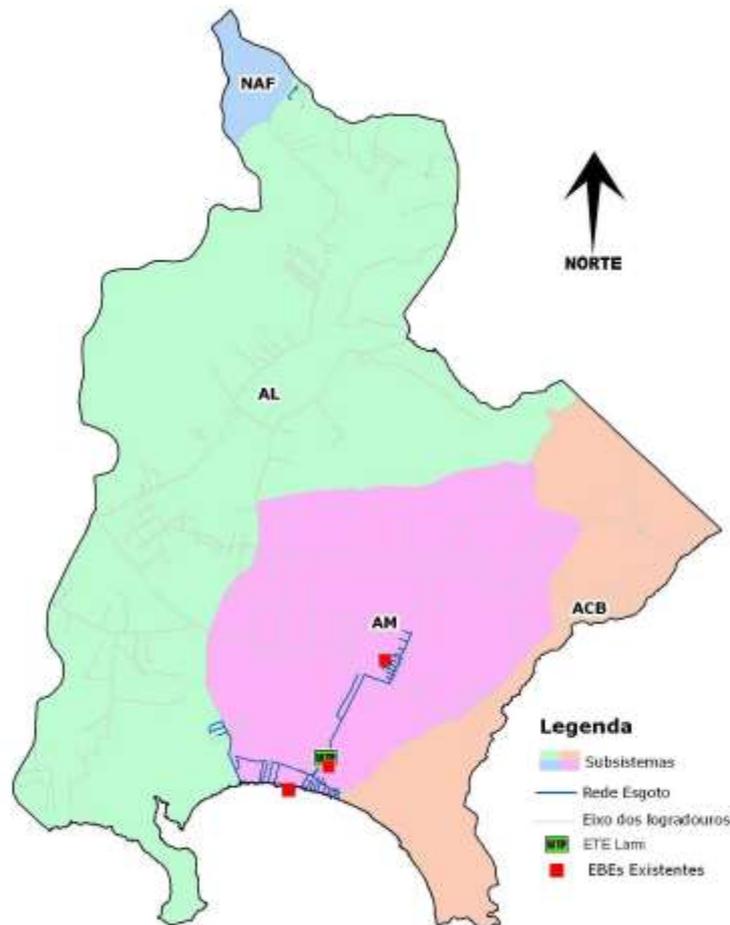


Figura 5: Infraestrutura do sub-sistema de esgoto Lami em 2006 (Fonte: PDE 2006-2009)



Além disso, em 2000 o DMAE lançou um Programa Integrado Socio-Ambiental (PISA) em Porto Alegre com o objetivo de recuperar a balneabilidade das águas do Guaíba, através de investimentos municipais e com a participação da Caixa Federal na infraestrutura de esgotamento (site institucional do PISA, PORTO ALEGRE). Assim, o projeto principal do PISA é a construção da ETE Serraria, com um emissário subaquático para afastar o efluente tratado, e a extensão da rede coletora de esgoto em toda cidade. O emissário subaquático foi construído para despejar o efluente tratado oriundo da ETE próximo ao canal de navegação em frente da Ponta Grossa. Entretanto, a FEPAM emitiu dúvidas quanto a possibilidade de contaminação das praias da zona sul consequente ao desvio de cargas, e suspendeu o processo desde 2008 até esclarecimento das possíveis consequências. Posteriormente, serão apresentadas as simulações realizadas pelo IPH e DMAE apresentando o efeito do PISA sobre a qualidade das águas do Guaíba item 7.2 e 7.3. Um dos cenários propostos também investigou uma possibilidade de aproveitamento do emissário da Ponta Grossa para aliviar a carga do centro.

Em 2015 as reformas do DMAE em busca da melhoria das condições de acesso à coleta e ao tratamento de esgotos foram disponibilizadas no site do departamento⁶. Na época, 89,67% da população é atendida pela coleta de esgoto misto (cloacal e pluvial), a capacidade de tratamento de esgoto é de 80% da população, por fim 65% dos esgotos gerados são tratados. O plano diretor de esgoto 2006-2009 (DMAE, 2010) coloca como objetivo a universalização do serviço de coleta e tratamento dos esgotos sanitários no horizonte de 2030.

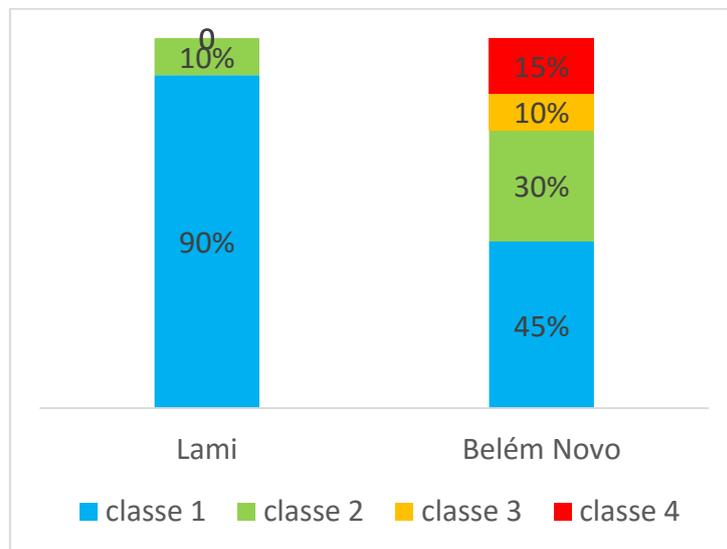
5.3.2 Qualidade das águas das praias do Lami e Belém Novo situação atual e perspectivas.

Qualidade atual.

O DMAE efetua rotineiramente levantamentos de água para avaliar a balneabilidade das águas nas praias de Belém Novo e Lami. De modo geral, a qualidade de água no Lami é melhor (Site institucional da Prefeitura de Porto Alegre, DMAE). O plano de bacia, na parte de enquadramento avaliou que em Belém Novo a água é de qualidade igual ou superior ao limite de balneabilidade 75% do tempo (conforme o critério de concentração de coliforme termotolerante), enquanto no Lami essa frequência chega a ser de 100% (ECOPLAN, 2016). A figura 6 resume as frequências de classes de qualidade CONAMA nº357 para o parâmetro coliformes termotolerantes apresentadas no plano de bacia.

⁶http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=186 (acesso em 3 de dezembro de 2016).

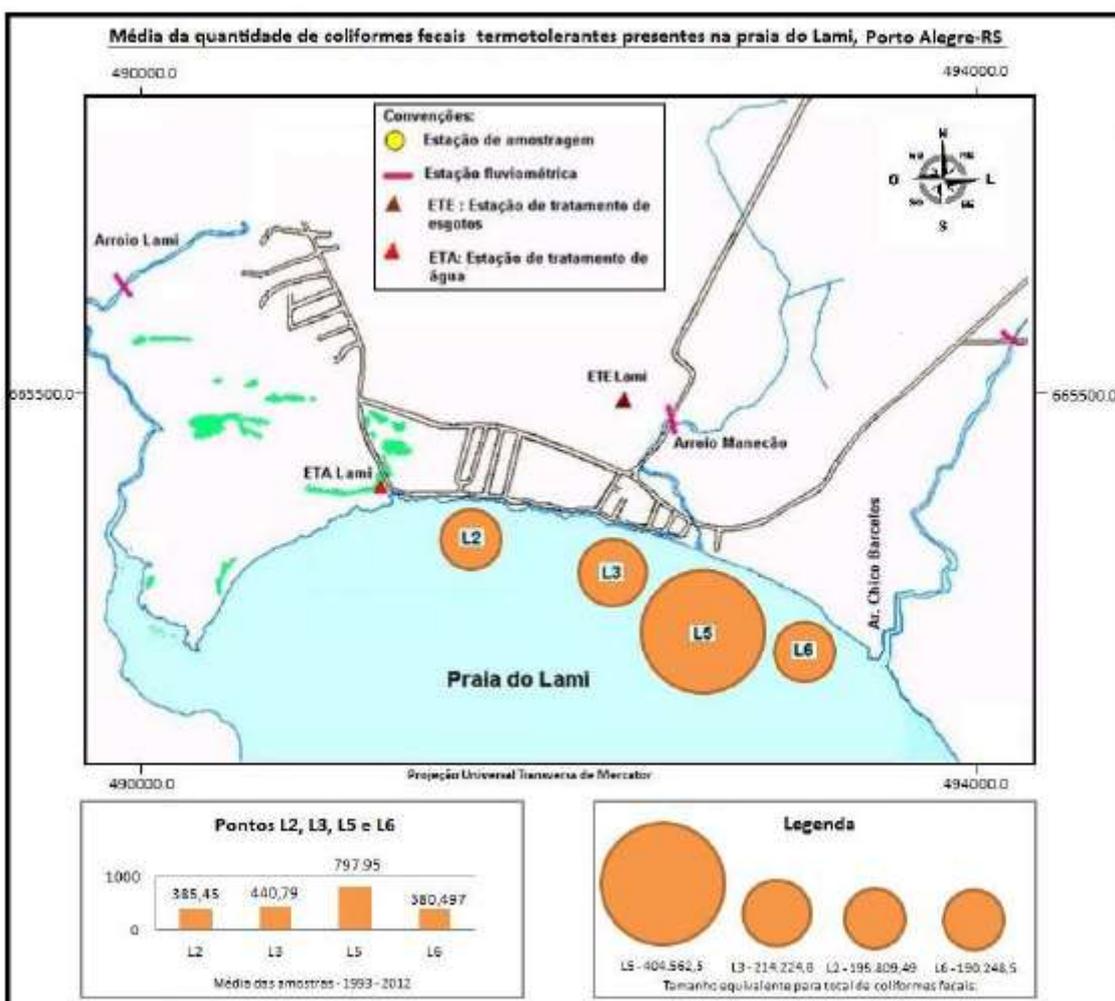
Figura 6: Histograma das frequências experimentais de ocorrência das classes de qualidade CONAMA nº357 de 2005 para o parâmetro de coliformes termotolerantes em Lami e Belém Novo (Fonte: ECOPLAN, 2016)



O estudo de qualidade específico da região do Lami, feito por Sanches, (2013), permitiu estabelecer o comportamento da qualidade da água com basenas sérias históricas de 1992 até 2012 de dados fornecidos pelo DMAE. Assim, em média, a praia estava sempre dentro do limite de balneabilidade estabelecido pelo CONAMA como mostra o mapa apresentado na figura 7. Porém, o valor médio de coliformes termotolerantes das amostras varia entre uma classe de balneabilidade média e satisfatória, não chegando a ser excelente (CONAMA nº 274, 2000). Levando em conta o efeito de sazonalidade destacado no trabalho de Sanches, 2013, as condições no verão tendem a ser de pior qualidade, por causa do baixo regime de vazão na enseada. Assim, as ocorrências de não-balneabilidade sempre foram observadas entre dezembro e março e correspondem a 9,5% das amostras. Conferindo a figura 6, esse valor parece mais provável que o valor de 0% apresentado no plano de bacia (ECOPLAN, 2016).

F

Figura 7: Coliformes termotolerantes no Lami (Fonte: SANCHES, 2013)



Uma causa identificada da má qualidade no Lami é o efeito das cargas locais oriundas dos arroios Manecão, Chico Barcelos e Lami. Esses arroios recebem esgotos *in-natura* uma vez que apenas 11% das residências são conectadas na ETE Lami de acordo com o plano de esgotos (DMAE, 2010). Além disso, foi reportado por Sanches (2013) a presença de resíduos sólidos na praia, e nas margens dos arroios, fato que de acordo com CONAMA nº 274 invalidaria a balneabilidade dos locais.

Em Belém Novo, o plano de bacia do Guaíba (ECOPLAN, 2016) a água é considerada balneável 75% do tempo (Cf. Figura 6). Uma diferença relevante entre Belém Novo e o Lami é a densidade populacional: Belém Novo consta com uma população de, aproximadamente 14655 habitantes no ano 2000, enquanto o Lami consta com 7500 habitantes no mesmo ano; além disso o centro urbano em Belém Novo é mais desenvolvido do que o do Lami (DMAE, 2010). Também, o plano de esgoto 2006-2009 menciona que, em períodos de chuvas, a vazão de esgotos afluentes à estação de tratamento, coletada em rede separadora, chega a superar em 1.000 % a vazão nominal da ETE Belém Novo. Este fato acarreta prejuízos no dimensionamento da rede coletora e traz problemas ao processo biológico de tratamento de esgotos.

Plano de esgoto sanitário até 2030.

As projeções populacionais propostas no plano de Esgotos sanitários 2006-2009 (DMAE,2010) prevê um aumento global de 23% para a população de Porto Alegre. Mais especificamente, o aumento

previsto para Belém Novo é de 25%, atingindo 17294 pessoas e de 100% do bairro Lami atingindo 10,5000pessoas. Essas projeções significam um aumento das cargas de efluentes a serem tratadas pela ETE, e a necessária ampliação da infraestrutura de captação de esgoto.

Para atingir a universalização do acesso à coleta e ao tratamento de esgoto, o plano de esgotos (DMAE, 2010) prevê a construção de mais 13 km de rede coletora em Belém Novo, e de melhorar a eficiência do tratamento (melhor clarificação do efluente final, e implantação de um *by pass* para limitar a entrada de esgoto pluvial). O PDE não prevê a ampliação da ETE Belém Novo, uma vez que a capacidade projetada seria suficiente comparada com a população futura. No Lami 10 km de rede coletor deverão ser instalados, e a ETE Lamideverá ser alterada para melhorar a eficiência de remoção de sólidos suspensos, DBO5 e nutrientes.

Além disso, para atender aos objetivos de enquadramento, é relevante insistir sobre a fiscalização das instalações particulares de tratamento de efluentes domésticos. Assim, um controle das cargas locais próximas as praias em Belém Novo e Lami seria assegurado. Porém, as cargas remotas oriundas da Ponta Grossa e da Ponta da Cadeia poderiam ter uma influência, por serem muito concentradas e de alta vazão em comparação com as cargas locais. Esse ponto será examinado no Item 7 através das simulações do DMAE-Map.

5.4 Métodos de simulações de propagação de poluentes.

A qualidade da água, como foi mostrado no parágrafo precedente, pode ser representada pelo mapeamento espacial de um ou vários critérios de qualidade no corpo hídrico. Nesse trabalho, a concentração de coliformes termotolerante foi adotada como parâmetro de referência. Seria bastante custoso de estabelecer experimentalmente uma cartografia detalhada das concentrações ao longo do Guaíba, por causa da densidade elevada de pontos de amostragem necessários, e as numerosas replicações de medição para atingir valores estatisticamente consolidados. A modelagem computacional aparece com uma alternativa viável economicamente e confiável do ponto de vista científico, para realizar tais mapas temáticos. Nesse item, são apresentados:diversas abordagens para simular a dispersão de poluentes em meio aquático, e os programas computacionais associados. A mecânica dos fluidos e as equações de fenômenos de transporte de partículas constiuem a base matemática e física de todos esses métodos, porém, eles se diferenciam pelas técnicasde resolução para propor valores numéricos.

5.4.1 Métodos numéricos.

Esse item apresenta resumidamente os métodos numéricos que permitiram gerar as simulações empregadas na consolidação dos resultados do programa de interesse DMAE-Map. O foco do trabalho não é a explicação exaustiva do equacionamento desses métodos, mas sim fornecer informações básicas para contextualizar as tecnologias contempladas.

5.4.1.1 IPH-A.

O aplicativo IPH-A foi desenvolvido pelo Professor Alejandro Borche Casas, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Ele usa um método numérico de resolução e pode ser usado no estudo de corpos de água em que as dimensões horizontais sejam fortemente predominantes sobre as dimensões verticais e no qual as componentes horizontais da velocidade possam ser descritas por valores médios na vertical (CASALAS, 1996).

Para o caso de transporte e difusão de contaminantes, o programa faz uso em cada iteração da equação de advecção-difusão, obtendo-se a variação da concentração em cada elemento. Esta variação é calculada a partir do campo de velocidades, das variações de concentração nas fronteiras abertas e dos valores de concentração nos pontos em que o material poluente é despejado (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013).

A figura 8 mostra as equações principais de hidrodinâmica e de transporte de massa usadas pelo programa IPH-A.

Figura 8: Equacionamento empregado no aplicativo IPH-A (Fonte: Manual de uso de IPH-A, BORCHE).

a) Equações do escoamento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - \Omega V + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - \varepsilon \nabla^2 U = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \Omega U + g \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2 + V^2}}{C_h^2 H} - \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - \varepsilon \nabla^2 V = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$

b) Equação de transporte de massa:

$$\frac{\partial(CH)}{\partial t} + \frac{\partial(CHU)}{\partial x} + \frac{\partial(CHV)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(HD_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(HD_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - KHC$$

onde:

- U, V componentes do vetor velocidade nas direções x e y ;
- z nível medido a partir de um plano de referência fixo;
- h profundidade referida a este plano;
- H profundidade total ($H = h + z$);
- Ω aceleração de Coriolis;
- $\tau_{sx} \tau_{sy}$ componentes da tensão de cisalhamento na superfície;
- C_h coeficiente de Chézy;
- ε coeficiente de dissipação turbulenta;
- C concentração integrada na vertical;
- $D_x D_y$ coeficientes de dispersão nas direções x e y ;
- K coeficiente de decaimento;

Para a resolução numérica das equações que definem o escoamento, o método utilizado pelo sistema IPH-A é baseado na técnica de diferenças finitas, semi-implícita de direções alternadas (CASALAS, 1996). As equações da continuidade e dinâmica, previamente integradas na vertical, consideram a perda de carga junto ao fundo, a ação do vento na superfície, a força de Coriolis e a difusão turbulenta. O mesmo método de direções alternadas, porém explícito com interpolação exponencial, é utilizado para solução numérica da equação de advecção-difusão.

As aplicações deste programa iniciaram-se com a modelagem do Guaíba. Posteriormente foi aperfeiçoado quando da sua aplicação no banhado Taím da Lagoa dos Patos RS (PAZ, SCHETTINI, VILANUEVA, 2003), rio da Plata, rio Uruguai, rio Setubal na Argentina, e Praia de Ipanema do Rio Guaíba (SCHWARZENBACH et al, 1997). Também, mais recentemente, ele foi empregado durante a qualificação do PISA para avaliar o impacto ambiental do emissário da estação de tratamento de esgoto Serraria (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013). Todavia, as pesquisas permanentes para melhorar a modelagem numérica de corpos hídricos no IPH resultaram em um aprimoramento do programa IPH-A como é exposto no parágrafo a seguir sobre o programa IPH-Eco.

5.4.1.2 IPH-Eco.

A ferramenta IPH-Eco se configura como uma evolução conceitual e metodológica em comparação com o IPH-A. Ele também foi desenvolvido no IPH, na UFRGS, tendo como objetivo representar os fenômenos relacionados ao transporte de nutrientes, e ao desenvolvimento de fito-plâncton de corpo d'água rasos (FRAGOSO, 2009). Em 2016 ele está na sua versão 2.0, o que permite modelar o comportamento de corpo d'água rasos e profundos (ECOPLAN, 2016).

Programa conta com um módulo hidrodinâmico – o qual modela os fluxos d'água no corpo hídrico, de um módulo de transporte – para modelar a dispersão de diversos compostos como por exemplo os nutrientes nitrogênio e fósforo, e um módulo ecológico – que trata de representar os principais processos químicos e biológicos determinantes pela qualidade da água, como por exemplo o desenvolvimento de algas possibilitado pela presença de nutrientes (FRAGOSO, 2005).

O módulo de transporte de massa emprega as equações de conservação do volume e da massa de contaminante.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint C \, dV \right) = \iint C \, \mathbf{v} \, d\mathbf{S}$$

Onde C é a concentração de contaminante, dV uma unidade de volume, \mathbf{v} é o vetor velocidade, e $d\mathbf{S}$ é o vetor dirigido perpendicularmente a superfície do volume de controle, de módulo igual a superfície unitária dS, e orientado para fora do volume de controle.

O módulo hidrodinâmico fornece o campo de velocidade no domínio de interesse resolvendo as equações de Navier-Stokes bidimensional, no caso de corpo de água rasa, ou tridimensional, no caso de corpo de água profundo.

Figura 9: Equações do escoamento hidrodinâmico usadas em IPH-Eco (Fonte: PERREIRA, 2012).

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} &= -g \cdot \frac{\partial z}{\partial x} - \gamma \cdot u + \tau_x + f \cdot v + A_h \cdot \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right], \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} &= -g \cdot \frac{\partial z}{\partial y} - \gamma \cdot v + \tau_y - f \cdot u + A_h \cdot \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right], \\ \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial[(h+z) \cdot u]}{\partial x} + \frac{\partial[(h+z) \cdot v]}{\partial y} &= 0, \end{aligned}$$

Onde : u e v são os componentes respectivamente longitudinal e transversal do campo de velocidade, x , y e z são as coordenadas cartesianas do espaço, h é a altura da lâmina da água, e τ_x e τ_y são as tensões de cisalhamento junto ao fundo, Ah é o coeficiente de rugosidade turbulente horizontal, ef o parâmetro de Coriolis (PERREIRA, 2012).

A resolução é feita através da discretização do domínio de acordo com uma malha não regular, para um melhor detalhamento espacial, e é baseada no método de resolução numérico UNTRIM3D. A solução numérica da hidrodinâmica usa uma abordagem mista Euleriana e Lagrangiana, com uma formulação semi-implícita das equações discretizadas conforme o cálculo detalhado das equações discretizadas descrito por Perreira (2012).

Esse modelo apresenta uma boa estabilidade e precisão numérica (CHENG e CASULLI, 2001). Além do qual, usou-se no esquema de resolução numérico, um limitador de fluxo: ele confere estabilidade e maior precisão a resolução numérica limitando as variações totais que podem ocorrer ao longo da propagação da solução numérica, apesar de aumentar o custo computacional (RIZZI, 2002). Pereira (2013) obteve bons resultados na simulação hidrodinâmica com o limitador de fluxo inserido no IPH-Eco.

O modelo IPH-Eco foi, por exemplo, empregado para definir o enquadramento do Guaíba na elaboração do plano de bacia (ECOPLAN, 2016).

5.4.1.3 SIS-Bahia.

O aplicativo computacional SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) é um sistema profissional registrado pela Fundação COPPETEC - COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, cujo desenvolvimento atende a projetos, estudos e gestão ambiental de recursos hídricos (COPPE/UFRJ, 2016). Os diferentes modelos que constituem o programa podem ser utilizados na previsão do escoamento e movimento das águas, bem como para o transporte de grandezas escalares de interesse. O SISBAHIA pode ser aplicado em simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, canais, reservatórios, rios ou lagoas, no sentido de melhor compreender a dinâmica dos processos que ocorrem nesses ecossistemas (ROSMAN, 2012). Todas as informações sobre o funcionamento do programa estão disponíveis na internet no site do aplicativo (Manual SISBAHIA).

Para o modelo hidrodinâmico aplica-se o conceito da linhagem FIST (“Filtered in Space and Time”) que permite simular a circulação hidrodinâmica tanto bidimensional na vertical (2DH) ou tridimensional (3D) em mananciais de águas naturais, para diferentes condições meteorológicas, oceanográficas, fluviais ou lacustres. O conceito da linha FIST conta com a modelagem de corpos d’água com superfície livre e composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, onde a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes às empregadas para a simulação de vórtices (“LES - Large Eddy Simulation”) (ROSMAN, 2012).

Para a avaliação de transporte de poluentes, utilizam-se modelos de Transporte Eulerianos e Lagrangeanos, aplicáveis para simulações de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas, para escoamentos bidimensionais –onde a dimensão de profundidade não está levada em conta, ou em camadas selecionadas de escoamentos –para levar em conta o efeito da profundidade. O Sistema computacional SisBaHiA, já foi aplicado inúmeras vezes em trabalhos acadêmicos, inclusive no âmbito da modelagem de dispersão de poluentes em meio aquático, como em Perreira (2012) ou Feitosa (2007). Também, ele foi empregado em outros projetos de engenharia desenvolvidos pela Fundação COPPE (UFRJ) em parceria com empresas do setor privado ou instituições públicas de governo, em relação a modelagem hidrodinâmica e de qualidade e água, demonstrando sua

relevante importância para as situações que se seguem: hidroelétrica de JIRAU-Ilha do Padre no Rio Madeira (TO); estudos para ANGRA 3 no RJ; estudo do emissário da Dow Química na Baía de Aratuba (BA); estudos do emissário submarino da Barra da Tijuca (RJ); estudos do emissário submarino de Ponta Negra em Natal (RN), estudos para o emissário submarino do Rio Vermelho (BA); estudos de plumas dos efluentes da COMPERJ na Baía de Guanabara (RJ); estudos para a disposição de efluentes de emissários na costa oceânica de Salvador (BA), (COPPE/UFRJ, 2016).

5.4.2 Modelos analíticos baseados na aplicação de transformações conformes.

Esse item apresenta detalhadamente os fundamentos teóricos e o funcionamento do programa computacional da ferramenta DMAE-Map.

5.4.2.1 Resolução da equação de advectivo-difusão através de transformações conformes.

A resolução analítica da equação advectivo difusiva foi descrita nos trabalhos de Garcia et al (2004), Poffal (2005), Ribeiro et al. (2010), Zabadal, Poffal e Ribeiro (2014), Wang e Ji (2015), Scortegagna (2016). As ideias gerais que orientam a abordagem analítica de resolução da equação de advecção-difusão de poluente são duas: a primeira é a utilização de hipóteses adequadas de mecânica dos fluidos, as quais permitem efetuar uma primeira simplificação e particularização do problema geral oriundo do balanço de massa de poluente no corpo hídrico (SCORTEGAGNA, 2016); em seguida, utilizar as transformações conformes para simplificar as condições de contorno espaciais complexas, alterando a equação de trabalho de modo a deixar ela possível de resolver no espaço transformado. A transformação conforme é a conversão da equação original em um modelo expresso em termos de coordenadas curvilíneas generalizadas, que correspondem à função corrente e ao potencial velocidade para escoamentos invíscidos. A função de variável complexa responsável pela definição da transformação é obtida a partir das equações paramétricas que descrevem as fronteiras do domínio. Através da simplificação da geometria do domínio, as transformações conformes permitem simplificar mais a equação de advecção-difusão, para poder determinar analiticamente a forma da concentração de poluente em todo domínio.

A formulação analítica confere flexibilidade ao modelo, alterando a forma da solução à equação conforme as hipóteses simplificativas e as condições iniciais. Desta forma é possível representar um sistema bidimensional – integrado na vertical da solução em ambientes hídricos de baixa profundidade - ou ainda, sistemas tridimensionais. A formulação também pode ser realizada em regime permanente ou transiente no tempo. Por outro lado, a distribuição das concentrações depende da escolha do comprimento característico da malha espacial, e é necessário ajustar funções paramétricas para representar a fronteira complexa do domínio de estudo. Nesse sentido do método de resolução é semi-analítico.

Os modelos analíticos baseados em transformações conformes tem aplicação nos problemas de dispersão de poluentes em meios aquático (HAAG, 2003; SANTIAGO, 2007; SCORTEGAGNA, 2016) e atmosférico (ZABADAL e POFFAL, 2014). Na sua versão de regime transiente, ele serve para estudar derramamentos acidentais ou floração de algas; enquanto na sua versão de regime permanente, ele serve para projetar sistemas de lançamento de efluentes, em particular sistemas de esgotos urbanos.

A vantagem principal desse método é a diminuição significativa do tempo de processamento de simulação. Isto favorece aplicações de engenharia, tais como: análise de riscos ou durante a fase de dimensionamento de projetos, pois permite a criação de diversos cenários de simulação.

Neste trabalho, a resolução da equação de advecção-difusão através de transformações conformes para resolver o problema de dispersão de poluentes aplicado ao estudo do lançamento de esgoto será avaliado através do aplicativo o DMAE Map, que será apresentado mais detalhadamente no Item 6.1- o programa DMAE-Map para simulação de propagação de poluentes em meio aquático.

5.4.2.2 Equacionamento do problema de estudo da contaminação por esgoto do Guaíba.

O problema completo de propagação advectivo difusivo resulta da realização do balanço de massa realizado com a quantidade de poluente (SCORTEGANA, 2016). Assim o poluente pode ser qualquer um, apenas ele é particularizado através da determinação de valores numéricos a suas características difusivas e conservativas presentes na equação.

Neste trabalho será mapeado a contaminação por esgoto dos emissários do Guaíba, através a representação gráfica da distribuição de coliformes termotolerantes. As fontes principais são as cargas lançadas através dos emissários da Ponta Grossa, da Ponta da Cadeia, dos arroios contaminados de Porto Alegre que desembocam no corpo hídrico do Guaíba. No total, o programa leva em conta as 51 fontes identificadas no banco de dados do DMAE.

Para particularizar o problema matemático geral, e simplificá-lo, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Escoamento bidimensional.
A profundidade característica do Guaíba é ordens de grandeza menor que os comprimentos característicos nas outras direções. Portanto, será desconsiderada a advecção difusão ao longo do eixo “vertical z”;
- Escoamento permanente.
Para projetar as situações limites de poluição da orla do rio Guaíba serão utilizados apenas valores típicos das estações: maior vazão correspondente a época chuvosa, menor vazão correspondente a época de estiagem. Desta forma, o campo de velocidade do escoamento do Guaíba é independente do tempo (escoamento permanente). Na mesma linha de raciocínio, as fontes de contaminação estudadas serão cargas de esgoto estáticas lançadas permanentemente no Guaíba, representando variações em uma escala de tempo comparável com a do próprio regime de vazão do corpo hídrico;
- O meio aquático é homogêneo.
Como a concentração não influencia o livre percurso das próprias partículas de contaminante considerou-se um coeficiente de difusão homogêneo no espaço: isto é o a difusão tem um valor numérico idêntico para difusão longitudinal e transversal.
- O meio aquático é isotrópico.
O fenômeno de difusão ocorre sem favorecer uma direção particular.
- O meio é aquático é incompressível.
A temperatura ambiente, a água é incompressível.
- O escoamento é irrotacional.
O tamanho característico da camada limite é insignificante na escala geográfica que foi adotada ou seja, o comprimento da cadeia de vórtices varia entre alguns centímetros e um metro, enquanto a distância entre as margens do Guaíba é de alguns quilômetros.

Assim o problema de interesse é: o problema bi-dimensional advecto-difusivo de poluente não-conservativo em regime permanente em meio aquático não viscoso.

Estas hipóteses simplificadoras permitem trabalhar a equação bidimensional de advecção-difusão, (HAAG 2003, POFFAL 2005, ZABADAL 2006, SCORTEGANA 2016) apresentadas na equação 2

abaixo. Nesse caso, a equação 2 apresenta um termo de fontes Q adicional que representa o lançamento de esgoto dentro do próprio corpo hídrico (por exemplo o efluente lançado por um emissário de esgotos). A fonte Q pode ser, também, programada de modo a representar o lançamento de cargas permanentes pontuais como é o caso dos emissários, bem como cargas transitórias pontuais, como o derramamento acidental de um produto no Guaíba. Assim, outras fontes pontuais ou distribuídas podem ser embutidas nas condições de contorno a ser programadas para resolver o problema específico do corpo hídrico de interesse.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial C}{\partial x} - v \frac{\partial C}{\partial y} - kC + Q(x, y) \quad (2)$$

Onde :

C é a concentração de poluante de interesse

D é o coeficiente de difusão do poluante no meio aquático.

k é o coeficiente de decaimento do poluante, no caso em que ele é não conservativo.

u, v são os componentes respectivamente radial e transversal da velocidade do escoamento.

$Q(x, y)$ é o termo de fonte de poluentes.

Para resolver essa equação, pode ser utilizado o processo chamado “split” descrito em Garcia et al(2004), que resulta em um sistema de equações diferenciais a partir de uma equação única. No caso, é separar a equação 2 em duas equações, no caso 3 e 4. Esse processo se justifica pelo fato que, uma vez que o escoamento é permanente, o termo de decaimento bacteriano $-k * C$ é a única contribuição ao balanço de massa do poluente que depende do tempo - termos de advecção e difusão dependentes do tempo, e assim esse termo pode ser separado junto ao termo $\frac{\partial C}{\partial t}$ da equação precedente. No caso do estudo de um poluente conservativo - não é o caso dos coliformes termotolerantes, a equação 2 se torna a identidade nula.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -kC \quad (3)$$

$$-D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = Q(x, y) \quad (4)$$

A equação (3) representa o decaimento natural dos coliformes termotolerantes no ambiente aquático. A cinética de primeira ordem adotada impõe assim um componente temporal para a expressão da concentração de coliformes termotolerantes da forma:

$$C(t) = f(x, y)e^{-kt} \quad (5)$$

Onde $f(x, y)$ é uma função a ser determinada via a resolução da equação 3. Para fim de simplificação, a função $f(x, y)$ receberá o nome de $C(x, y)$.

As soluções de (4) são formadas pela soma da solução geral da equação homogênea associada⁷ e de uma solução particular de (4). A função fonte $Q(x, y)$ é nula quase em todo domínio, apenas ela toma valores não nulos quando as coordenadas (x, y) correspondem à posição de um ponto de despejo de esgoto, por exemplo: um emissário (dentro do próprio domínio), a foz de um arroio poluído (por exemplo o Dilúvio, ou o arroio do Salso). Também, na fronteira do domínio correspondente à orla, existem fontes difusas (expressas em termos de vazão de infiltração, e concentração de coliformes termotolerantes por metro linear de orla em uma determinada porção)

⁷A equação homogênea é tal que $Q(x, y)$ é identicamente nula.

correspondante à infiltração de efluentes de fossas sépticas ou poços de retenção⁸ simples. Para simplificar a resolução do problema (4), adota-se uma divisão do domínio de estudo em porções tais que a função fonte toma valores não nulos na fronteira de cada sub-parte. Assim, a solução de (4) em cada sub-domínio é dada pela solução da equação homogênea, resolvida pelas condições de contorno especificadas por $Q(x, y)$: a simplificação do problema provém do fato que não é mais necessário determinar uma solução particular. Conseqüentemente, o passo seguinte de resolução consiste a determinar a solução homogênea ao problema (4), pelas condições de contorno impostas pela geografia da região de interesse.

5.4.2.3 Redução de ordem da equação.

A quantidade de poluente dentro de uma partícula de fluido é considerada fixa nesta resolução. Também, a água é considerada como um meio homogêneo e isotrópico; e o escoamento é irrotacional (Item 5.5.2.2 precedente). Desta forma, por conservação da quantidade de poluente⁹, a difusão longitudinal (e respectivamente transversal) é igual à advecção longitudinal (respectivamente transversal). Isto pode se traduzir no formalismo matemático como o sistema de equações 6 e 7 a seguir:

$$u C = D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (6)$$

$$v C = D \frac{\partial C}{\partial y} \quad (7)$$

Onde :

C é a concentração de poluente de interesse

D é o coeficiente de difusão do poluente no meio aquático.

u, v são os componentes respectivamente axial, transversal, e radial da velocidade do escoamento.
 x, y direções longitudinal e transversal, respectivamente

Aplicando o operador divergente sobre o sistema de equações 6 e 7, obtém-se novamente a equação 4. O resultado do processo descrito acima é chamado de gênese e nele foram geradas duas equações de ordem menor, e, portanto mais simples, cujas soluções abrangem as soluções da equação principal deste trabalho, a saber equação 4. Posteriormente, essas equações 6 e 7 passam a serem consideradas como as equações de trabalho.

5.4.2.4 Mapeamento com o potencial velocidade e função corrente.

Neste item será introduzida a função corrente e o potencial velocidade do escoamento cuja notação é, respectivamente, ψ , e ϕ . Por definição, elas se relacionam como função do campo de velocidade:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (8)$$

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (9)$$

Poffal (2005), realizou uma mudança de variáveis entre as coordenadas cartesianas e novas coordenadas (ψ, ϕ) e trabalhou as equações 6, 7, 8 e 9 obtendo a seguinte equação 10 :

⁸ Também chamado poço negro, essa instalação não conforme às normas técnicas consiste em uma excavação revestida com tijolos de 6 furos para reter a matéria sólida, o líquido que infiltra não passa por nenhum tratamento.

⁹ O componente de decaimento temporal da quantidade de poluente já foi isolado em (5).

$$\frac{\partial C}{\partial \phi} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial \psi^2} \right) \quad (10)$$

Comparando as ordens de grandeza entre os dois termos de segunda ordem na equação 10 o termo $\frac{\partial^2 C}{\partial \phi^2}$ pode ser desprezado em frente ao termo $\frac{\partial^2 C}{\partial \psi^2}$. Fisicamente, isto pode ser interpretado como a predominância da concavidade da pluma de contaminação transversal à linha de corrente em relação à concavidade longitudinal à linha de corrente. Assim, a equação que descreve o percurso do poluente no espaço (ϕ, ψ) é semelhante à equação de difusão de calor em função do tempo (equação 11).

$$\frac{\partial C}{\partial \phi} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial \psi^2} \right) \quad (11)$$

5.4.2.5 Expressão da solução C.

Uma resolução clássica da equação 10 usa a transformação de Fourier em ψ , de modo a reduzir de novo a ordem da equação. Assim, de volta no espaço (ϕ, ψ) , a concentração de poluente é de forma gaussiana:

$$C(\phi, \psi) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D \phi}} e^{-\frac{\psi^2}{4D\phi}} \quad (11)$$

O parâmetro C_0 de integração pode ser determinado usando a conservação da quantidade de matéria: a quantidade total de partículas de poluentes no corpo hídrico é igual ao somatório das partículas saindo das fontes emissoras.

$$\iint_{\text{domínio}} C d\phi d\psi = \sum_{\text{domínio}} Q_{\text{poluente}} C_{\text{poluente}} \quad (12)$$

Onde:

$$Q_{\text{poluente}} = \text{avazão da fonte emissora}$$

$$C_{\text{poluente}} = \text{a concentração de poluente na fonte emissora}$$

Assim:

$$C_0 = \frac{\sum_{\text{domínio}} Q_{\text{poluente}} C_{\text{poluente}}}{\int_{\phi_{\min}}^{\phi_{\max}} \int_{\psi_{\min}}^{\psi_{\max}} \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi D \phi}} e^{-\frac{\psi^2}{4D\phi}} \right) d\psi d\phi} \quad (13)$$

O valor de C_0 pode ser calculado, uma vez que a primitiva no denominador pode ser calculada.

O procedimento descrito acima se chama transformação conforme, a qual permite gerar uma solução analítica (equações 11 e 13) para o problema advecto-difusivo, usando uma mudança de variável adequada do espaço cartesiano para o espaço (ψ, ϕ) . Essa solução pode ser calculada em computador comum em todos os pontos (ψ, ϕ) do domínio de interesse.

Após isso, as soluções espacial e temporal são reacopladas (item 5.4.2.2. Equacionamento do problema de estudo da contaminação por esgoto do Rio Guaíba) e, com a substituição de $f(x, y)$ na equação 5. Assim, a expressão 11 fica:

$$C(\psi, \phi, t) = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D \phi}} e^{-\frac{\psi^2}{4D\phi} - kt} \quad (14)$$

Onde:

C = a concentração de coliformes termotolerantes

CO = termo de integração definido por equação 13

D = coeficiente de difusão do meio aquático considerado homogêneo e isotrópico

k = constante de decaimento bacteriano

t = tempo de propagação deso lançamento da partícula no corpo hídrico

ψ = função corrente

ϕ = potencial velocidade

A expressão 14 é a expressão da distribuição espacial e temporal da concentração de poluente, no caso, os coliformes termotolerantes no domínio mapeado pelas coordenadas potencial velocidade e função corrente.

5.4.2.6 Estabelecimento da transformação conforme direta e inversa ajustada ao corpo hídrico de interesse.

De acordo com a equação 14 é necessário o campo (ϕ, ψ) do escoamento, a vazão e a concentração de poluente para cada fonte emissora levantada para calcular a concentração de coliformes termotolerantes. Entretanto, o resultado obtido ainda não é adequado para uma representação gráfica porque ele é calculado do espaço (ϕ, ψ) . Para desenhar mapas com base nos resultados do cálculo precedente, é preciso efetuar a transformação inversa do espaço para o espaço cartesiano $f^{-1}: (\phi, \psi) \rightarrow (x, y)$. Cabe ressaltar que a determinação direta da transformação inversa f^{-1} permite poupar tempo computacional, porque evita o cálculo da transformação direta f e sua inversão posterior.

Para determinar a transformação inversa, vamos parametrizar as coordenadas cartesianas em função da função corrente e do potencial velocidade ao longo de um contorno bem determinado, onde há mais informação. Assim, considera-se as funções paramétricas definidas na fronteira do domínio:

$$\left(x_p(\phi), y_p(\phi) \right)_{\psi_{contorno}}$$

Onde:

- $\psi_{contorno}$ tem um valor arbitrário,
- ϕ é o potencial velocidade ao longo da fronteira,
- x_p é a abscissa ao longo da fronteira,
- y_p é a ordenada ao longo da fronteira.

Ao longo do contorno, as partículas de fluido seguem uma trajetória idêntica a geometria física da orla do Guaíba uma vez que são adotadas condição de deslizamento do escoamento junto a um obstáculo rígido. Assim, todos parâmetros são conhecidos: x_p, y_p, ϕ , e $\psi_{contorno}$ ao longo da orla através levantamento no campo (Cf. item 6.2 Dados de entrada do programa) e resumidos em uma matriz $(\phi \ x_p \ y_p)$. As equações paramétricas são obtidas através de um ajuste numérico de funções racionais de modo a gerar uma expressão analítica da relação entre $\psi \rightarrow x_p(\phi)$ e $\psi \rightarrow y_p(\phi)$ na borda.

Nesse ponto do cálculo, cabe ressaltar que as relações analíticas estabelecidas valem para qualquer ponto do domínio e não apenas na fronteira. Assim, as relações são generalizadas de modo a agregar a informação sobre a função corrente na mesma equação paramétrica através de uma mudança de variável no plano complexo na forma: $\phi \leftarrow \phi + i\psi$. Obtem-se no plano complexo, então:

$$z = f(\phi + i\psi) = x_p(\phi + i\psi) + iy_p(\phi + i\psi) \quad (15)$$

Por fim, extrai-se a expressões analíticas coordenadas cartesianas em função da função corrente e do potencial velocidade:

$$x = \text{Re}(x_p(\phi + i\psi) + iy_p(\phi + i\psi)) \quad (16)$$

$$y = \text{Im}(x_p(\phi + i\psi) + iy_p(\phi + i\psi)) \quad (17)$$

Assim que são conhecidas as equações de ajuste para mapear os espaços $(\phi, \psi) \rightarrow (x, y)$, é possível colocar no mapa os valores $C(\phi, \psi)$. A transformação precisa ser determinada uma vez só: a sua expressão pode ser empregada para qualquer simulação de lançamento de carga no corpo hídrico de interesse.

5.4.2.7 Performas do aplicativo DMAE-Map.

Estimativa do desvio nos resultados numéricos gerados por métodos de simulação analítico empregando transformação conforme no Guaíba.

Ribeiro et al (2010) estudaram a distribuição de concentração de coliformes termotolerantes obtida através da resolução do problema de propagação de coliformes termotolerantes por transformação conforme. Os resultados simulados de qualidade das águas na região do Lami, comparados com dados experimentais do DMAE (RIBEIRO et al, 2010), resultaram na avaliação do erro numérico resultante da simulação entre 15% e 20%. Fernandes (2007) avaliou em cerca de 23%, o desvio médio nas concentrações de coliformes termotolerantes. No caso, o autor considerou como hipóteses para explicar as discrepâncias observadas no seu trabalho, a bidimensionalidade do modelo, ou seja, que o modelo poderia gerar localmente discrepâncias entre o campo de velocidade real e calculado. Também outra explicação é devido ao coeficiente de decaimento bacteriano dos coliformes termotolerante em condições naturais ser diferente, uma vez que ele é normalmente, avaliado em laboratório. Por fim, a estimativa das cargas pontuais é feita frequentemente a partir de estimativas populacionais, e não por medições de campo.

Haag (2003) simulou com o mesmo método a contaminação ao longo do Jacuí. Ela averigou os desvios entre valores simuladas e valores experimentais para diferentes parâmetros relevantes na avaliação da qualidade da água, apresentados na tabela 5.

Tabela 5: desvios obtidos entre os parâmetros simulados por método analítico baseado em transformação conforme e resultados experimentais (Fonte: adaptado de Haag, 2003).

Parâmetro	Nitrogênio (mg/L)	Fósforo(mg/L)	DBO5(mg/L)	OD(mg/L)
Desvio Máximo	35%	4,5%	5%	19%

Considerações sobre o tempo de processamento.

Outros elementos essencial pela caracterização das performas computacionais de um programa de simulação são o tempo de processamento e a memória. A memória imobilizada corresponde a quantidade de informações a serem armazenadas temporariamente para finalizar uma etapa de cálculo. O tempo de processamento corresponde a quantidade de operações unitárias realizadas para finalizar o cálculo. O quanto menor o tempo de processamento e a memória, melhor é o programa, por permitir a consolidação dos resultados através da multiplicação dos cenários a custo aceitável.

Os métodos numéricos, apesar de apresentar excelentes resultados em termos de precisão, tem a grande desvantagem de ter um custo computacional bastante alto. Em particular, os problemas cujas condições de contorno são complexas (como é o caso para modelagem de corpos hídricos) necessitam uma malha irregular complexa onerosa: uma ordem de grandeza do tempo de concepção de tal malha pode ser de cerca 8 horas, e necessita a intervenção de um operador possuindo um conhecimento aprofundado. Geradores de malhas automáticos permitem reduzir esse tempo, e melhoram as performas (FERNANDES, 2007). Também, os programas numéricos bidimensionais resultam em sistemas algébricos demasiados pesados em termos de memória e de tempo de processamento (FERNANDES, 2007). Por fim, a formulação implícita das soluções leva à multiplicação das etapas de cálculo (por exemplo usando o critério dos mínimos quadrados) e piora as performas computacionais (FERNANDES, 2007). O tempo de processamento da solução (para uma malha definida e pré-implementada no programa de simulação numérica) é da ordem de grandeza de algumas horas.

Em comparação, o método analítico proposto no item 5.5.2. apresenta performas computacionais melhores devido ao emprego de uma formulação da solução em forma fechada, isto é, o cálculo numérico não necessita iterações sucessivas em um numero razoável de operações unitárias. Assim, no caso da modelagem de propagação de poluentes em meio aquático, e conchendo o campo de velocidades do corpo hídrico de interesse, o número de operações necessárias é bastante reduzido, poupando memória, e aumentando significativamente a velocidade de computação das soluções (FERNANDES, 2007). A ordem de grandezado tempo de geração de uma simulação com DMAE-Map foi de 1 minuto.

6 Aparato e metodologia.

Esse capítulo apresenta o programa DMAE-Map em detalhe assim como as simulações de qualidade de água que foram realizadas.

6.1 O programa DMAEMap para simular a propagação de poluentes em meio aquático.

6.1.1 Apresentação do DMAE-Map.

O programa DMAE-Map foi desenvolvido no DMAE, com a participação do professor Jorge Zabadal nos anos 2000, com a finalidade de apoiar ao projeto de sistema de água e esgotos de Porto Alegre. Ele foi projetado para mapear a distribuição de concentração de poluentes diversos, conservativos ou não, no Guaíba. O programa apresenta um módulo de simulação transiente, para representar o impacto da floração de algas por exemplo, e um módulo de simulação em regime permanente, para visualizar o efeito do lançamento contínuo de efluentes no corpo hídrico. O acesso ao aplicativo é restrito por causa da incorporação de uma base de dados do DMAE contendo informações confidenciais. Por essa razão, as simulações apresentadas (Cf. item 7) foram realizadas por Zabadal, habilitado para manipular o aplicativo.

O programa DMAE-Map resolve a equação de advecção difusão de poluentes em meio aquático através de uma abordagem analítica que usa transformações conformes (Cf. Item 5.5.2).

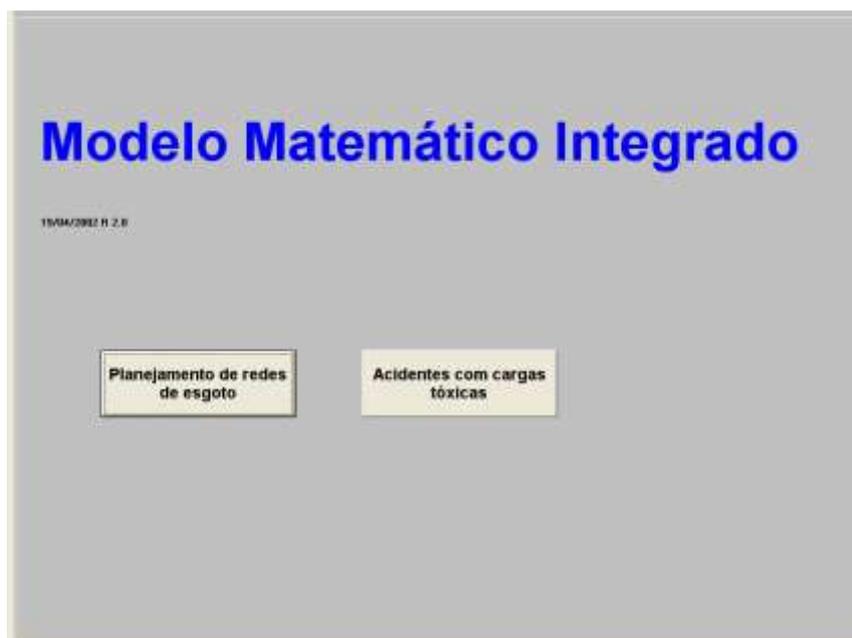
Os resultados aparecem na forma de mapas temáticos cuja legenda pode ser alterada em função do poluente estudado, e dos fenômenos a serem destacados.

6.1.2 Interface o programa.

A interface do progama DMAE-Map foi concebida para uma apropriação rápida e intuitiva. As figuras 8 e 9 e 10ilustram as interfaces gráficas do programa.

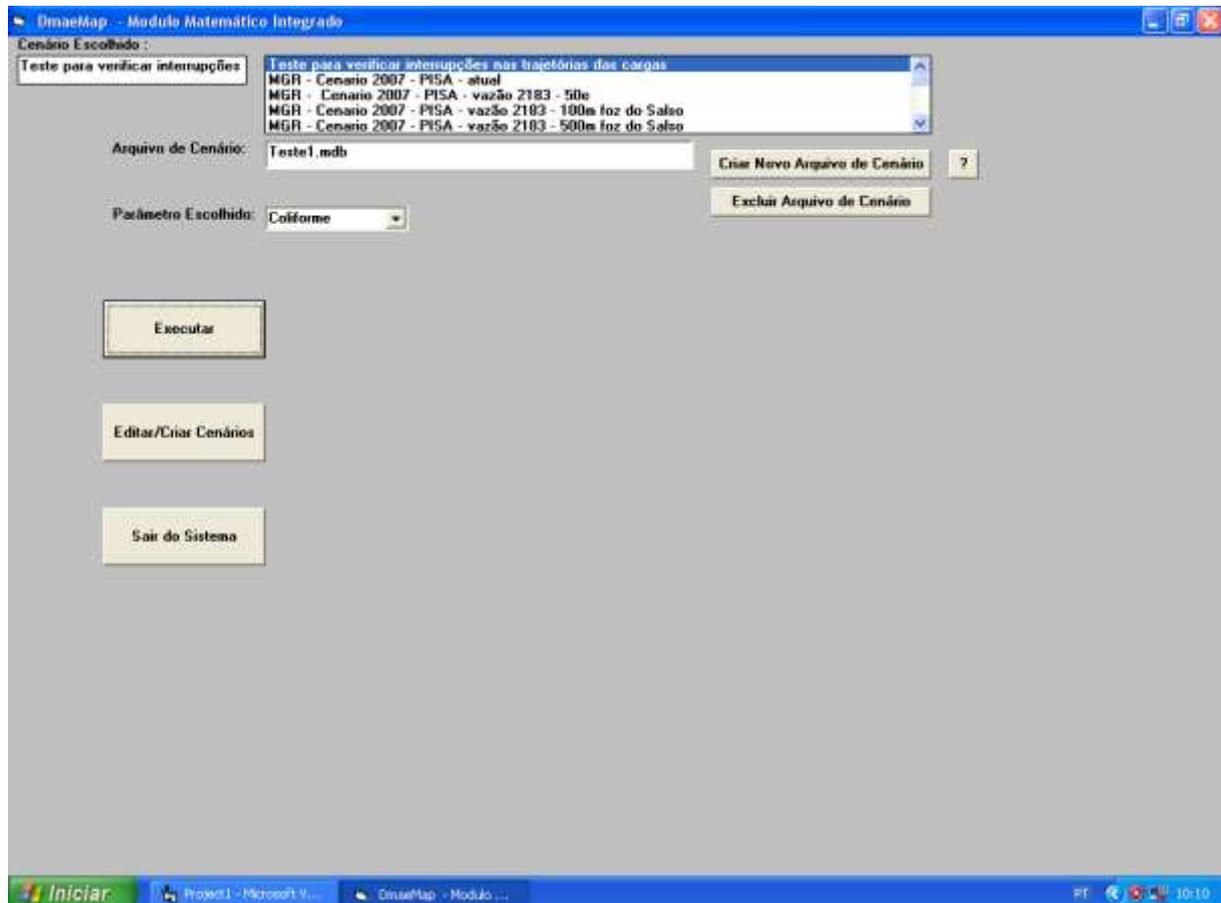
A figura 8 é uma imagem da tela inicial do programa DMAE-Map. Pode-se escolher trabalhar uma simulação de dispersão de poluente em regime permanente, apertando o botão “planejamento de redes de esgotos”, ou em regime transiente, apertando o botão “acidentes com cargas tóxicas”. O primeiro problema constitui um caso tipicamente estacionário, no qual as cargas de esgoto são repostas de forma contínua e ininterrupta, produzindo uma pluma de poluente cujas isolinhas de concentração permanecem invariantes ao longo do tempo. No segundo problema, essencialmente transiente, um único despejo é lançado no corpo hídrico em um determinado instante de tempo, a partir do qual se propaga por advecção e difusão como uma mancha de poluente. Uma vez escolhida o tipo de simulação a ser gerada, o programa oferece a possibilidade de criar um cenário como mostra a figura 9.

Figura 10: tela inicial do programa DMAE-Map



A figura 9 é a imagem do segundo formulário do programa; o qual é dedicado à geração de cenários, que corresponde à entrada de dados do sistema. Nesse formulário são definidas as posições, vazões e concentrações de cargas, que são armazenadas em tabelas, as quais compõem uma base de dados em Access.

Figura 11: tela de definição do cenário do programa DMAE-Map.

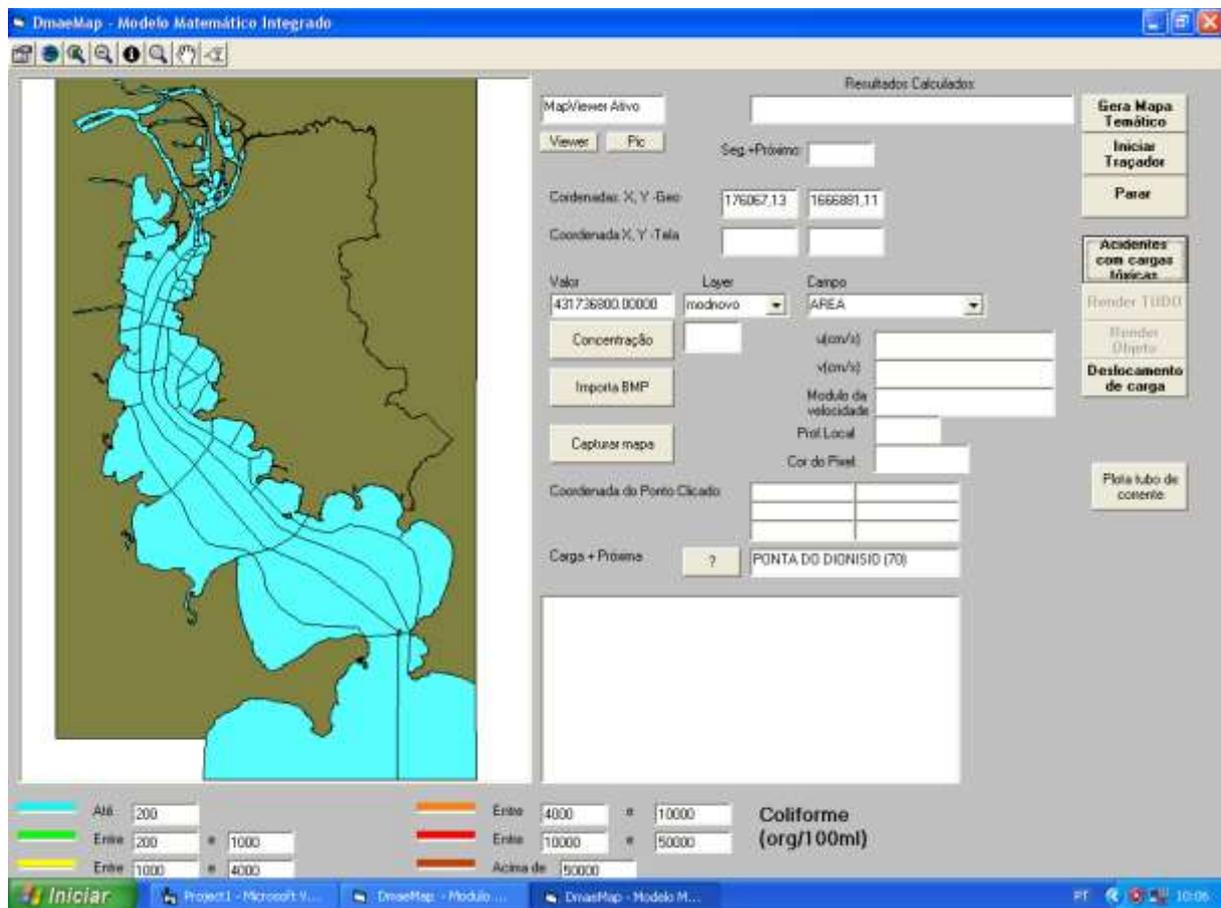


O terceiro formulário, ilustrado na figura 10 contém uma série de opções de teste para depuração do sistema, por exemplo, a verificação de linhas de fluxo ou a avaliação de valores locais de concentração. Entretanto, os principais botões presentes nessa interface consistem no conjunto de ferramentas para ampliação, deslocamento e *zoom out*, que se localizam junto ao vértice superior esquerdo, além dos botões responsáveis pela execução de rotinas que produzem e capturam mapas de concentração. A sequência de operação para a obtenção desses mapas é descrita como segue:

- Uma vez definidas as coordenadas centrais do mapa e o nível de ampliação desejado, deve ser pressionado o botão “Importa bmp”, que cria um arquivo do tipo bitmap para a plotagem da distribuição de concentrações.
- Pressionando em seguida o botão “gera mapa temático”, o sistema varre toda a região de interesse do corpo hídrico, delimitada previamente pelo usuário, produzindo um mapa de concentrações cuja escala de cores segue as convenções do CONAMA nº357 de 2005 relativas as classes e seus respectivos intervalos de concentração.
- Concluída a elaboração do mapa de concentrações, o usuário pode armazená-lo ao pressionar o botão “Captura mapa”. O arquivo gerado, com extensão “.bmp”, é então

armazenado em uma pasta denominada “MAPAS”, para uso futuro na elaboração de relatórios.

Figura 12: Tela de resultado da simulação no programa DMAE-Map.



6.2 Dados de entrada do programa.

6.2.1 Tamanho característico da resolução.

Para determinar a resolução do mapa a ser gerado, é necessário o levantamento de dados em campo, ou também, pode ser utilizado mapas geográficos. Com esse levantamento é necessário informar o tamanho característico do menor elemento geométrico para estabelecer a malha do programa. Para o caso do Rio Guaíba, o valor de 50 m foi adotado com base nos mapas geográficos da região.

6.2.2 Delineamento das feitorias do corpo hídrico.

O programa é configurado para mapear o Guaíba. Para que o programa possa realizar a transformação conforme inversa descrita no Item 5.5.2.6.- Estabelecimento da transformação conforme direta e inversa ajustada ao corpo hídrico de interesse, é necessário levantar as coordenadas GPS do contorno do corpo hídrico no campo, ou com um aplicativo de geoprocessamento –como, por exemplo, *Google Earth*. Essas coordenadas correspondem aos dados:

$$\left(x_p(\phi), y_p(\phi) \right)_{\psi_{contorno}}$$

6.2.3 Campo de velocidade no corpo hídrico.

Outra informação importante para o programa é o campo de velocidade em cada ponto do corpo hídrico (u, v) , pois com esses dados é possível determinar as faixas da função potencial e função corrente, respectivamente (ϕ, ψ) do estudo. Ainda, quando esse campo de velocidades é determinado no contorno da orla do corpo hídrico a ser estudado, permite determinar as equações paramétricas de ajuste da transformação conforme inversa.

Para tanto, é necessário levantar dados experimentais de velocidade característicos do corpo hídrico, através do cálculo da vazão local, ou através de outras técnicas usuais em hidrologia/recursos hídricos. O programa DMAE-Map usa os dados experimentais de campo de velocidade levantados pelo próprio DMAE, e relatado no caderno nº38 do DMAE.

Com o campo de velocidade (u, v) medido em vários pontos (x, y) que representam a hidrodinâmica do domínio de interesse é possível calcular, posteriormente, por integração a função corrente e o potencial velocidade (ϕ, ψ) para cada um dos pontos de amostragem conforme apresentado nas equações (8) e (9).

$$\phi = \int u \, dx = \int v \, dy \quad (18)$$

$$\psi = - \int v \, dx = \int u \, dy \quad (19)$$

6.2.4 Vazões de referência do Guaíba.

As vazões de referência adotadas pelo programa foram medidas pelo DMAE em 2013 na ponta da Cadeira e representam as variações sazonais do regime de vazão do Guaíba. Assim foram implementados os valores de 600 m³/s durante a estiagem (em média de novembro a fevereiro), e 2400 m³/s no período de altas vazões (em média de junho a setembro).

6.2.5 Características das fontes emissoras.

Para construir cenário representativos das fontes principais de esgoto e calcular o valor do parâmetro $C0$ com a equação (13), é necessário conhecer as características das fontes emissoras. As informações a serem programadas são: a posição (coordenadas GPS) das fontes pontuais (emissário ou afluente do Guaíba), a vazão e a concentração de poluente emitida. No caso do presente trabalho, o poluente considerado é a população de coliformes termotolerantes.

O banco de dados do DMAE conta com 51 fontes de lançamento de esgoto levantadas em todo comprimento do Rio Guaíba. Os pontos de amostragem são descritos no item 5.3.1 (Figura 1). As cargas principais são os dois emissários de esgoto construídos na Ponta da Cadeira e na Ponta Grossa. Além disso, é possível programar fontes arbitrárias ou realizar projeções populacionais para refinar o modelo, se necessário for.

6.2.6 Operações computacionais realizadas pelo programa DMAEMap.

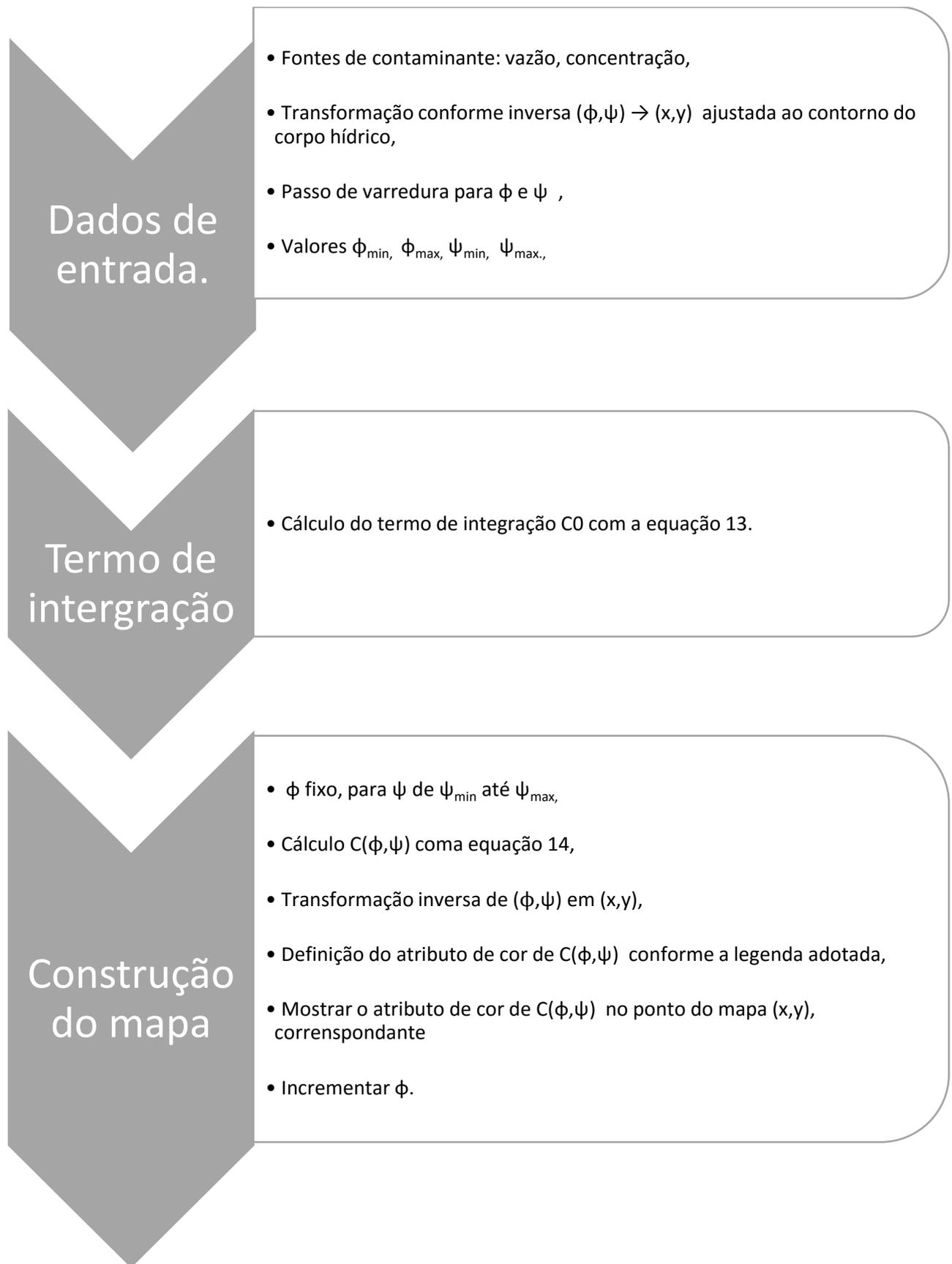
O aplicativo recebe como dados de entrada:

- os valores mínimo e máximo de ψ e ϕ correspondente ao corpo hídrico de interesse;
- o passo de varredura para ψ e ϕ que determina o grau de detalhamento do corpo hídrico.
- as funções paramétricas que permitem transformar o espaço (ϕ, ψ) para o espaço cartesiano (x, y) (Cf. Item 5.4.2.6).

- Os parâmetros ajustáveis do modelo, os quais permitem gerar cenários específicos são as características das fontes emissoras de poluição, a saber:
- tipo de fontes: se respeitam o regime permanente ou regime transitório
- características de cada fonte: posição (x, y) , vazão e concentração

O próprio procedimento de cálculo realizado pode ser resumido pelos passos apresentados na figura 13.

Figura 13: Fluxograma de operações de cálculo do programa DMAE-Map.



6.2.7 Estimativa do desvio na simulação de concentração de coliforme termotolerantes com o programa DMAE-Map.

Como o programa DMAE-Map emprega os mesmos fundamentos matemáticos que outros trabalhos em relação a resolução analítica do problema de dispersão advecto-difusivo de poluentes, e que as definições dos modelos são próximas, foi adotado o valor de desvio máximo do parâmetro concentração de coliformes termotolerantes proposto por Ribeiro et al (2010) (Cf. item 5.4.2.7.- Estimativa do desvio nos resultados numéricos gerados por métodos de simulação analítico empregando transformação conforme no Guaíba), ou seja o desvio adotado é de 20% com base nos dados experimentais do DMAE (RIBEIRO et al, 2010).

6.3 Cenários de estudo da contaminação da zona sul de Porto Alegre através do DMAE-Map.

A metodologia do trabalho consistirá em considerar em aplicar o DMAE-Map com diferentes cenários de simulação para avaliar o efeito do lançamento atual e futuro de esgoto no Guaíba, sobre a qualidade das águas na zona sul, em particular, nas praias de Belém Novo e Lami. Para tal, serão considerados as seguintes configurações apresentadas a seguir.

6.3.1 Cenário de base.

O cenário considerado atual será representado por uma situação sanitária ocorrida em 2013, devido a disponibilidade de dados. O objetivo desse cenário - chamado de base - é de calibrar o modelo proposto pelo DMAE-Map e analisar a consistência dos seus resultados. Assim, ele leva em conta a população IBGE de 2010, ou seja 1 532 523 habitantes, base de população usada no plano diretor de esgotos (DMAE, 2010). Apesar de que os efluentes da população de Porto Alegre contribuem para o rio Gravataí (cerca 22%) e para o Guaíba (cerca 78%), (PMSB Porto Alegre, 2015) foi considerado que a integralidade da vazão está lançada no Guaíba, para estar em favor da segurança. Sobre as condições hidrodinâmicas, o cenário reproduz a condição de vazão do Guaíba de referência de 2400 m³/s (condição de vazão média do Guaíba no período úmido). Já a vazão considerada de esgoto lançada através do emissário da Ponta Grossa foi de 0,2710 m³/s, conforme levantamento no campo do DMAE (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013), e o comprimento do emissário considerado e de 1600 m, como mencionado no relatório complementar ao PISA (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013). Esse valor de vazão de esgoto tratado escolhido corresponde ao funcionamento em 2013 da ETE Serraria. De acordo com os números globais de 2015 fornecidos pelo DMAE sobre o saneamento em Porto Alegre, a ETE Serraria ainda não funciona a plena capacidade por falta de infraestrutura de captação (DMAE, 2015).

6.3.2 Cenário de desvio de carga periférica oriunda do Centro para o emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa.

Esse cenário contempla o impacto na qualidade das águas da ampliação do aproveitamento das infraestruturas implantadas na cidade durante o PISA descrito na edição especial da revista Ecos de março 2014 (ECOS, 2014), para desviar uma parte da carga lançada através o emissário da Ponta da Cadeia no Centro para o emissário da Ponta Grossa. Essa hipótese é puramente dissertativa no sentido que a FEPAM suspendeu a construção do emissário subaquático da Ponta Grossa desde 2008 por ter dúvidas quanto a potencial poluição das praias da zona sul decorrente dessa estratégia.

O emissário da Ponta Grossa foi construído para afastar os efluentes tratados da ETE Serraria, ele é submerso e desemboca a 1600 m da orla. A qualidade péssima das águas a jusante do emissário da Ponta da Cadeia (centro da cidade) sugere a possibilidade de aproveitar o emissário da Serraria para desviar uma parte dos efluentes do Centro, os quais não passam por nenhum tratamento, de modo a repartir melhor as cargas de esgotos ao longo do canal de navegação do rio Guaíba.

Com base nessa informação, o cenário proposto investiga o efeito da adição de uma contribuição de efluente não tratado oriunda o Centro na vazão já lançada através do emissário da Ponta Grossa sobre a qualidade das águas da praia do Lami e Belém Novo. Desta forma, o cenário leva em conta uma população igual à população do cenário de base, o mesmo comprimento do emissário subaquático de 1600 m, e foi considerada como a vazão de esgoto lançada através do emissário da Ponta Grossa, o valor de 0,4100m³/s, conservando o valor típico de concentração em coliformes termotolerantes por essa fonte em comparação com o cenário de base. O valor de 0,4100m³/s corresponde ao limite operacional do emissário subaquático, calculado em função do limite operacional da ETE Serraria, também de 0,4100m³/s (ECOS, 2014). Assim, considera-se uma contribuição de 0,2710 m³/s de efluente tratado pela ETE, e 0,1400 m³/s de efluente urbano bruto oriundo o Centro (a vazão total é de 0,4100m³/s). Para considerar os regime típicos de período húmido e seco do Guaíba, duas vazões de referência foram consideradas: 600 m³/s no período seco (verão), e 2400 m³/s no período úmido (alta vazão).

Tabela 6: Resumo das diferenças entre os cenários simulados.

Cenário	Vazão de efluentes emissário da ponta Grossa. (m³/s.)	Vazão de referência do Guaíba (m³/s)
Base	0,2710	2400
Desvio de efluente período úmido	0,4100	2400
Desvio de efluente período seco	0,4100	600

6.3.3 Cenário aumento populacional e desvio de carga.

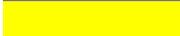
De acordo com as previsões do plano diretor de esgoto de Porto Alegre (DMAE, 2010), a população da cidade será em 2030, ano do horizonte de planejamento, de 1 653 523, ou seja um aumento de +21,53% em média na cidade. Esse aumento de população vai contribuir ao lançamento de esgoto tratado ou não no Guaíba.

O cenário de aumento populacional contempla o efeito do crescimento da população de Porto Alegre sobre a qualidade da água do Guaíba, em particular na vizinhança das praias de Belém Novo e Lami. Ele considera um aumento homogêneo de população em toda cidade conforme as previsões globais de +21,53% do DMAE (DMAE,2010), na simulação isto se traduz pelo mesmo aumento da vazão de contribuição, a concentração de coliformes termotolerantes constante, de cada uma das fontes de lançamento. As infraestruturas nessa simulação são consideradas semelhantes as condições de desvio de carga da Ponta da Cadeia para Ponta Grossa. Como ilustração da consequência do aumento populacional de 21,53%, a vazão do emissário subaquático da ETE Serraria era 0,4100m³/s com o desvio, é nessa simulação é de 0,5000m³/s. A vazão de referência do Guaíba pode influenciar a distribuição de concentração dos coliformes termotolerantes, portanto, foram consideradas duas condições de vazão de base : vazão alta de 2400 m³/s correspondante a estação chuvosa, e vazão baixa de 600 m³/s, correspondante a estiagem no verão.

6.4 Legenda dos mapas temáticos.

Os mapas temáticos apresentados item 7, em um primeiro momento ilustrarão as classes de enquadramento das águas no Guaíba conforme o CONAMA n°357 de 2005 através de uma legenda de cores (tabela 6). Assim será possível interpretar a sensibilidade da zona sul para os cenários de simulação propostos.

Tabela 7: Legenda dos mapas de enquadramento das águas nas simulações DMAE-Map.

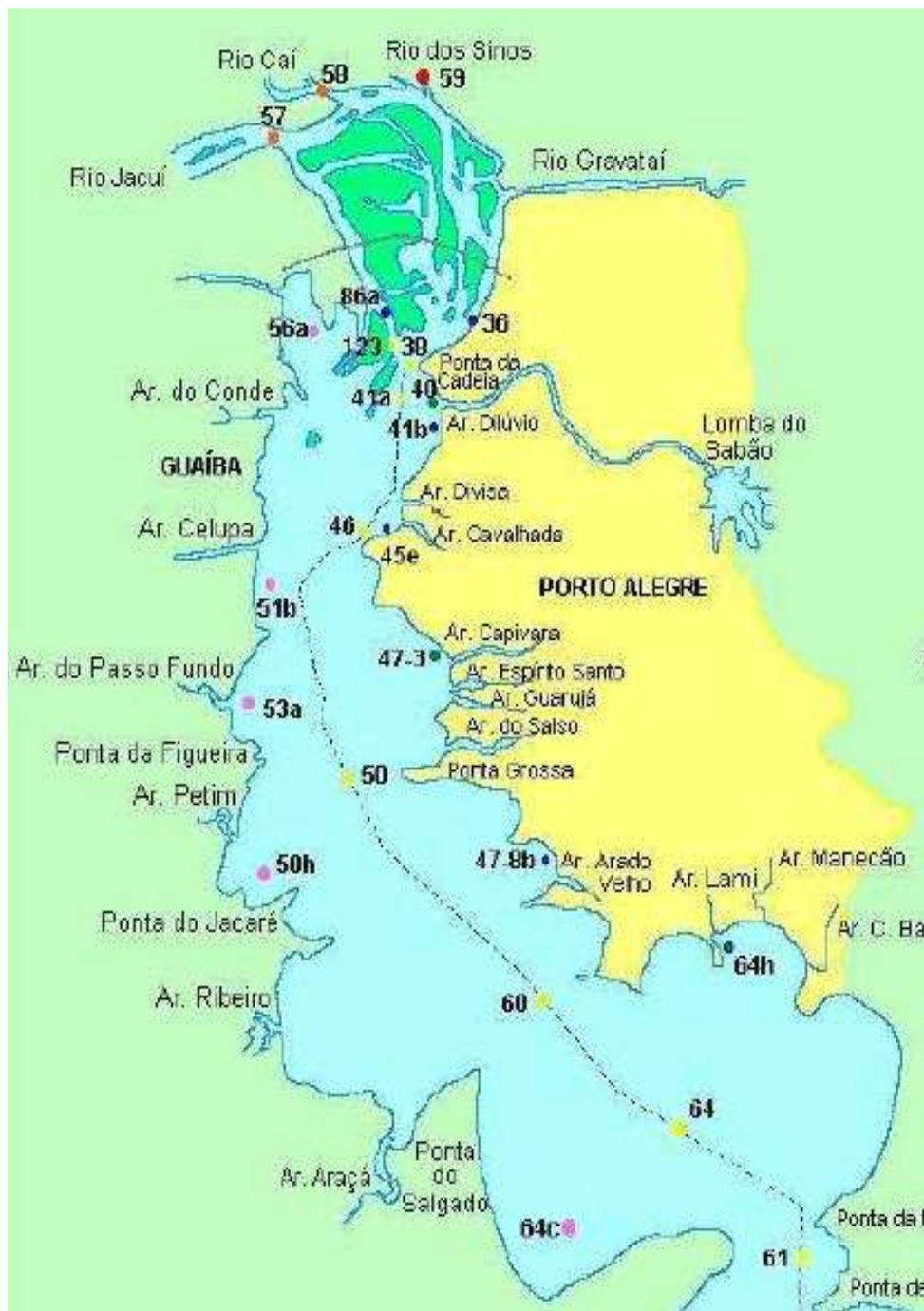
Cor no mapa	Número de coliformes termotolerantes/100 mL	Enquadramento CONAMA n°357 de 2005	Balneabilidade CONAMA 274 de 2000
	Até 200	1	Sim
	De 200 a 1000	2	Sim
	De 1000 a 4000	2 a 4	Não
	De 4000 a 10000	2 a 4	Não
	De 10000 a 40000	2 a 4	Não
	Acima de 40000	2 a 4	Não

7 Resultados e análise das simulações com o programa DMAE-Map.

Esse capítulo apresenta e analisa os resultados das simulações com foco na qualidade das águas nas regiões da praia de Belém Novo e do Lami. Além disso, o cenário de base foi comparado com medições de concentrações de coliformes termotolerantes, de modo a estabelecer a calibração do modelo de base simulado com o programa DMAE-Map. Cabe ressaltar que as simulações apresentadas foram disponibilizadas por Zabadal, por causa da restrição de acesso ao DMAE-Map.

A figura seguinte mostra as regiões do Guaíba que foram usadas como ponto de orientação na análise das simulações, assim como as estações de monitoramento da qualidade do DMAE-Map.

Figura 14: Mapa do Guaíba com o detalhe da localização dos arroios e regiões do Guaíba.

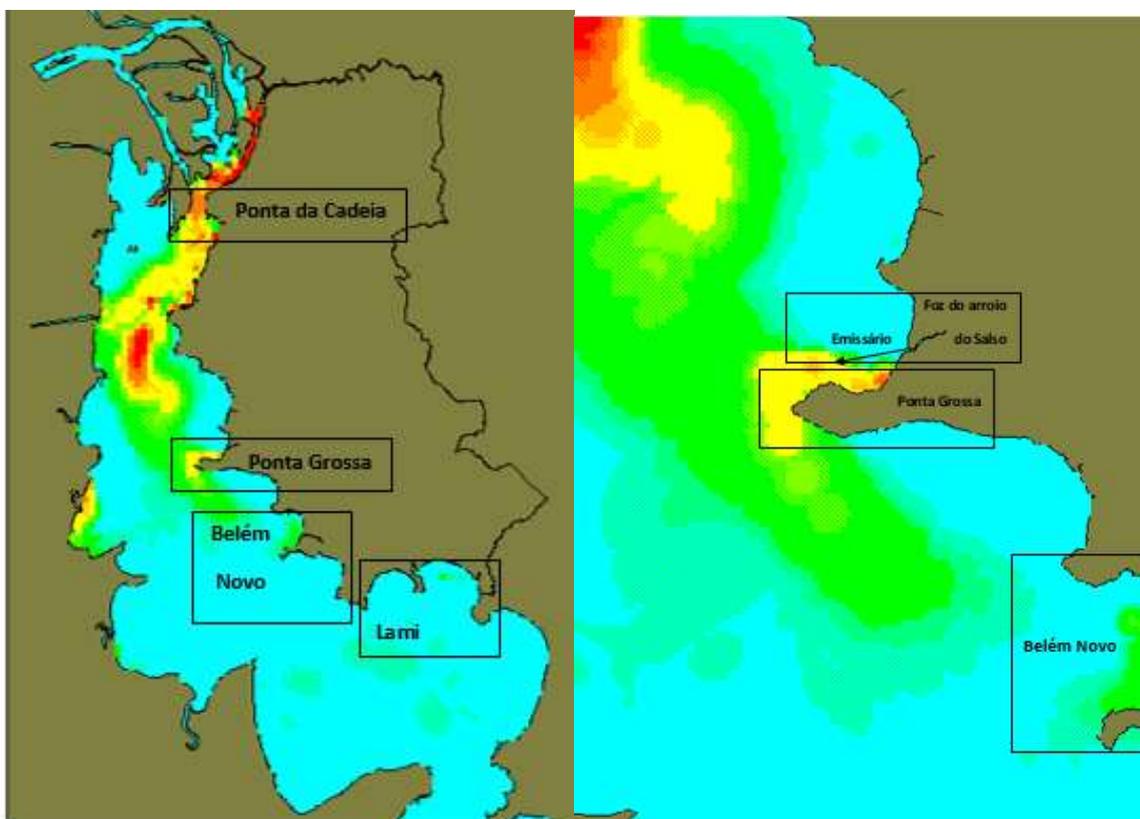


7.1 Resultados e análise da simulação do cenário de base.

7.1.1 Análise dos resultados da simulação do cenário de base.

A figura 15 mostra o mapa temático com o resultado das concentrações de coliformes termotolerantes no Guaíba para cenário de base, i.e, com vazão do emissário de $0,2710 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma vazão de base do Guaíba de $2400 \text{ m}^3/\text{s}$. A direita, o mapa detalha a distribuição de concentração de coliformes termotolerantes na região do emissário da ETE Serraria em Belém Novo. A ponta no centro da imagem é a Ponta Grossa, a 1600 m da extremidade dela há o emissário. No sul da ponta, encontra-se a região de Belém Novo.

Figura 15: Enquadramento das águas do Guaíba para o cenário atual simulado por DMAE-Map, e detalhe da região da Ponta Grossa, onde há o emissário (representado como uma seta).



Observa-se na figura 15 que a carga principal é oriunda do centro de Porto Alegre (Ponta da Cadeia) e da boca do rio Gravataí. A pluma se desenvolve direção Sul-Sudoeste até a jusante da ponta do Dionísio (próximos ao arroio cavahada e Dilúvio), onde as águas retornam a classe 2 por diluição e atenuação natural. Junto a desembocadura do arroio Salso e na Ponta Grossa onde há o emissário, as águas são de classe 3 ou 4 (ECOPLAN, 2016). Essa mancha constitui um segundo foco de carga importante, ela se desloca por sua vez direção Sul-sudeste. Ela é a fonte principal suscetível de atingir as orlas da zona sul do Lami e Belém Novo, uma vez que as cargas do centro já são bastante atenuadas nessa altura do corpo hídrico. Observou-se uma diluição da pluma oriunda do emissário da Ponta Grossa antes de atingir a orla da praia de Belém Novo conforme apresentado em detalhe na figura 15 a direita.

7.1.2 Análise dos resultados da simulação do cenário de base.

Observa-se na figura 15 que a praia do Lami ficou classificado como classe 1, apenas com uma mancha de classe 2 relativamente afastada da orla. A preservação da praia pode ser explicada pela proteção exercida pela ponta das Canoas (que faz a separação entre Belém Novo e Lami), a baixa profundidade das água impedindo a entrada de carga oriundas de montante, e o afastamento do canal de navegação- o qual apresenta um velocidade maior e uma direção preferencial de escoamento. Essa zona de maior concentração pode ser explicada pelo deságue dos arroios Lami e Chico Barcelos, ambos contaminados por coliformes termotolerantes. De fato, o plano de bacia avaliou o enquadramento dos arroios citados como sendo, ambos, de classe 3. Sanches (2013) observa no seu trabalho (apresentado no item 5.2.2), que há focos de maior concentração perto da boca do arroio Manecão. Na hipótese de que a relativa baixa profundidade, combinada com o regime de alta vazão do Guaíba nessa simulação, tende a impedir a entrada de água poluída na enseada do Lami e favorecer a diluição da carga. Assim, a pluma de classe 2 oriunda os arroios se atenuaria por causa do decaimento natural dos micro-organismos. A simulação não representou o fenômeno de não balneabilidade no Lami descrito por Sanches (2013) com base em séries históricas de dados. Uma explicação possível disso é a escolha dos pontos de monitoramento de qualidade escolhidos pelo DMAE na praia do Lami. Se as linhas de correntes oriundas das fontes como o do arroio Chico Barcelos, ou Lami, passam pelo ponto de amostragem, o teste de balneabilidade vai ser muito restrito e não necessariamente representar as condições de contaminação nas zonas de banho. Levando em conta o desvio dos valores calculados (erro da simulação) estimado a 20% na concentração de coliformes termotolerantes simulada (Cf. Item 6.2.7.), as zonas verdes observadas na figura 15 poderiam ser classificadas como não balneáveis (classe 2) e as zonas azuis próximas às margens - onde as cargas difusas oriundas das fossas sépticas são mais concentradas - podem ser no limite entre a classe 1 e 2 do CONAMA ou apenas de balneabilidade satisfatória (e não de excelente qualidade como as zonas de cor azul deveriam ser).

A parte sul da praia de Belém Novo ficou mais poluída, atingindo a classe 2, mas essa poluição não parece ser devida à proximidade com as cargas lançadas da Ponta Grossa, uma vez que a pluma é diluída antes de atingir a baía de Belém Novo. Porém, ao contrário do Lami, a geografia da enseada, orientada norte - norte oeste, expõe a praia à vazão de montante carregada com coliformes termotolerantes. Portanto, apesar da aparente diluição da pluma da Ponta Grossa, é possível que a orientação da praia favoreça a acumulação dos coliformes. A comparação com os resultados dos outros aplicativos (próximo item) poderá esclarecer esse ponto mais a jusante. Outra fonte possível e provável, de contaminação da praia de Belém Novo, é a própria carga local do bairro, o qual consta com um emissário pequeno para lançar os efluentes da ETE Belém Novo. Eventualmente, as águas do arroio Belém Novo poderiam ser contaminadas por esgoto e contribuir à degradação da qualidade da água.

Portanto a balneabilidade da Zona sul não está comprometida no cenário de base, o que corresponde aos resultados do monitoramento de balneabilidade do DMAE disponíveis no site da prefeitura de Porto Alegre (DMAE, 2016). Entretanto, levando em conta a variação de valores de desvio nas concentrações simuladas, é possível que as zonas no limite de balneabilidade verdes sejam na realidade acima do limite legal de balneabilidade, em particular quando o regime de escoamento do Guaíba é baixo (menor vazão do Guaíba e aumento da concentração de coliformes nos efluentes devido a falta de chuva que dilui o efluente no esgoto misto).

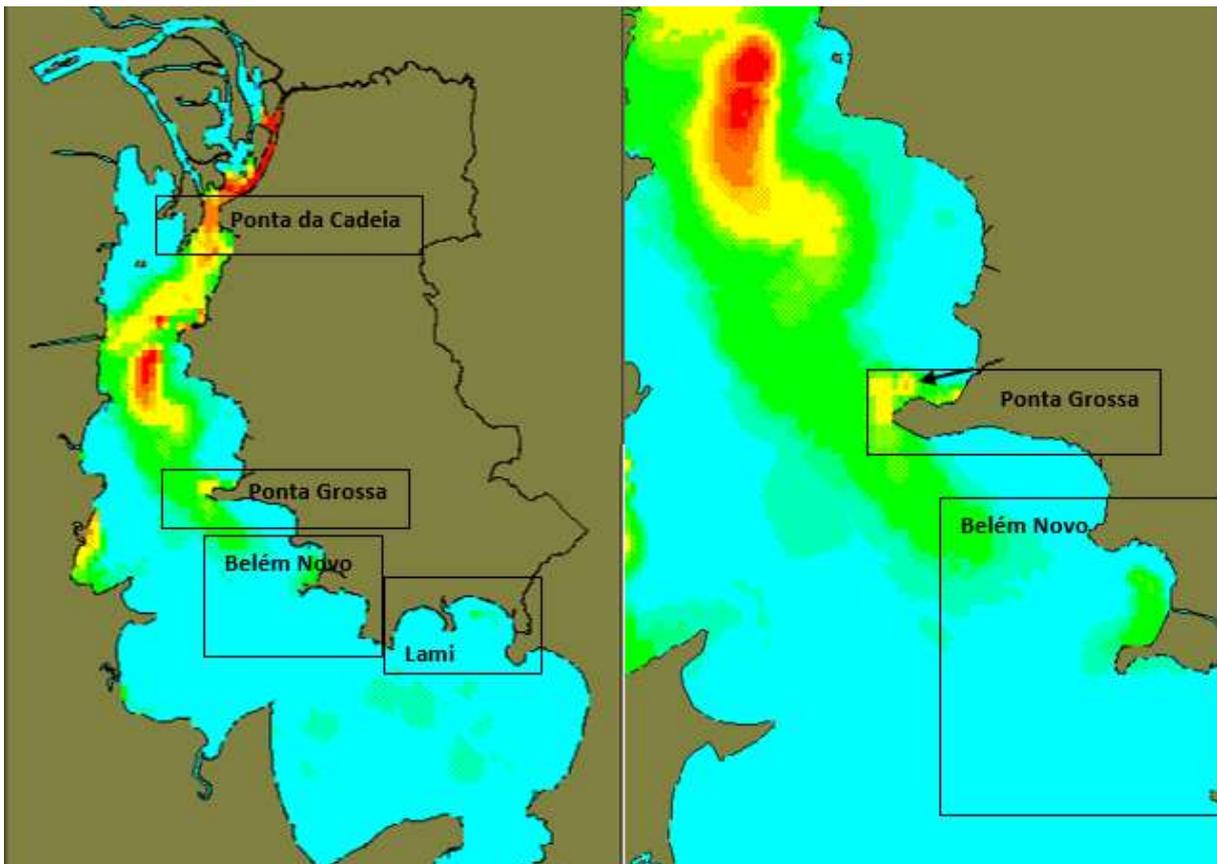
7.2 Resultados e análise da simulação do cenário de desvio de carga periférica oriunda do Centro para o emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa.

7.2.1 Em condição de vazão alta do Guaíba 2400 m³/s.

Resultados.

O mapa seguinte mostra as concentrações de coliformes termotolerantes no Guaíba para a vazão do emissário de 0,4100m³/s e uma vazão de base do Guaíba de 2400 m³/s.

Figura 16: Enquadramento das águas do Guaíba (direita), e detalhe na Ponta Grossa (a seta representa o emissário) para o cenário desvio de carga em condição de vazão alta por DMAE-Map.



Observa-se figura 16 os mesmos focos principais de carga que no cenário atual: a pluma principal provem da Ponta Grossa, e há uma pluma secundaria oriunda da Ponta Grossa. Elas são diluídas antes de atingir a orla de Belém Novo e Lami.

Análise dos resultados.

Observa-se Figura 16 que, semelhantemente ao cenário de base atual, as águas ficam respectivamente de classe 1 no Lami e de classe 2 na parte sul de Belém Novo. Notamos a mesma mancha de classe 2 a alguma distancia da orla do Lami, e de classe 3 a alguma distancia da orla de Belém Novo, ambas ligadas, com probabilidade, às cargas locais, e eventualmente ao emissário da Ponta Grossa no caso de Belém Novo. Novamente, levando em conta a variabilidade dos resultados considerando um desvio (erro) das simulações, é possível atingir localmente condições de não-balneabilidade em Belém Novo e Lami, onde a classe 2 está sendo mapeada.

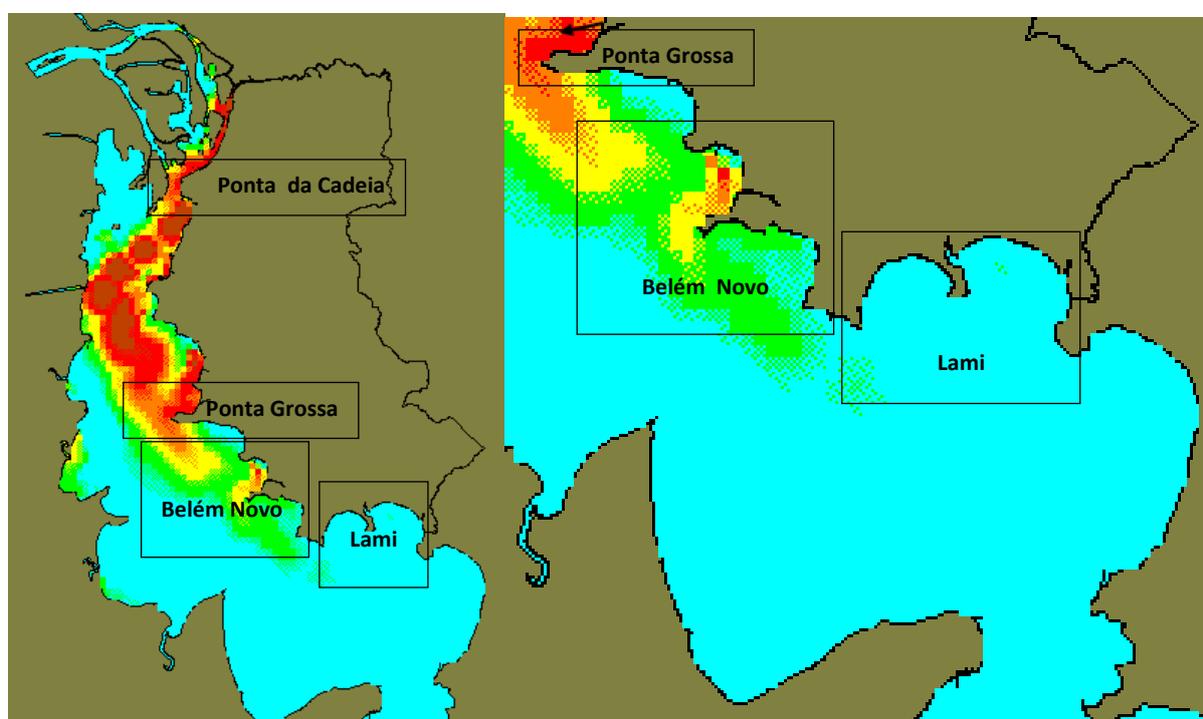
Assim, de acordo com as simulações, o lançamento de $0,4100\text{m}^3/\text{s}$ de efluentes através do emissário da Ponta Grossa não afeta globalmente o enquadramento das águas do Guaíba. Na zona sul, as conclusões são idênticas: o aumento da vazão do emissário efluente na ponta Grossa não alterou significativamente a balneabilidade das praias a jusante do ponto.

7.2.2 Resultados e análise em condição de vazão baixa do Guaíba $600\text{ m}^3/\text{s}$.

Resultados.

O mapa seguinte mostra as concentrações de coliformes termotolerantes no Guaíba para a vazão do emissário de $0,4100\text{m}^3/\text{s}$ e uma vazão de base do Guaíba de $600\text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 17: Enquadramento das águas do Guaíba (direita), e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário desvio de carga em período de estiagem por DMAE-Map.



Observa-se Figura 17 que a qualidade das águas do Guaíba é de classe 4 desde a região dos deltas até a jusante da Ponta Grossa. A jusante desse ponto, as águas retomam uma qualidade melhor, se enquadrando na classe 1 ou 2. A pluma secundária oriunda da Ponta Grossa ampliou e ficou enquadrada na classe 3-4 retoma a classe 2 antes de atingir a orla de Belém Novo.

Análise dos resultados.

Observa-se Figura 17 que a qualidade da água na praia de Belém Novo se degradou significativamente não atendendo mais os critérios de balneabilidade: as águas passaram para a classe 3 ou 4 em alguns pontos mais distantes da orla. A contribuição oriunda do emissário da Ponta Grossa aparece mais provável no contexto da estiagem, que corresponde ao veraneio e a temporada turística, por causa da orientação Norte-Oeste da orla e da trajetória Sul-Leste da pluma. Outra causa da degradação da qualidade em Belém Novo seria a carga lançada pela própria ETE Belém Novo (ou arroio Belém Novo), ou cargas difusas oriunda a zona urbanizada na orla. Apenas, a parte Norte da

baía de Belém Novo fica de classe 1, porém, a incerteza sobre o valor numérico simulado sugere uma vigilância particular quanto ao enquadramento real dessa região.

Na praia do Lami, as águas ficam balneáveis, de classe 1. A pluma oriunda Belém Novo está sendo diluída antes de atingir a orla dessa praia apesar do baixo regime de vazão do Guaíba. As populações de micro-organismos pode decair naturalmente antes de atingir a orla do Lami, também a morfologia do terreno parece proteger o Lami da poluição exterior : a Ponta das Canoas (que separa o Lami do Belém Novo) e as águas rasas no Lami dificultam a entrada de contaminantes nessa região, assim como a posição bem mais ao norte da orla em relação ao canal de navegação.

Comparando com Sanches (2013), e o monitoramento de balneabilidade do DMAE em Belém Novo disponíveis no site da prefeitura, as praias do Lami e Belém Novo já sofrem atualmente problemas de qualidade que inviabilizam as condições de balneabilidade durante o período de estiagem. Isto, enquanto a vazão lançada através do emissário da ETE Serraria nem atinge 0,2500 m³/s. Portanto, a degradação de qualidade observada em Belém Novo provém certamente das cargas locais, da falha da ETE Belém Novo, e, de alguma forma, que teria que ser melhor descrita através de outras simulações, a pluma oriunda da Ponta Grossa. Ressata-se que a pluma da Ponta Grossa é constituída da contribuição do emissário da ETE Serraria e do desague do arroio do Salso, cuja carga em coliformes termotolerantes corresponde à classe 4.

7.2.3 Conclusão da análise do cenário de desvio de carga.

De acordo com as simulações, as praias do Lami e Belém Novo são balneáveis durante o período de altas vazões do Guaíba. Durante a estiagem, que corresponde a temporada turística de veraneio, o Lami ficaria balneável, mas a praia de Belém Novo não, prejudicando as atividades de lazer e as atividades econômicas do turismo. A causa da degradação da qualidade em Belém Novo no período de estiagem provavelmente é vinculada a combinação dos fatores seguintes: o regime de vazão baixa do Guaíba, que favorece o acúmulo das cargas no local de despejo da ETE Belém Novo, a baixa eficiência do tratamento por lagoa de estabilização em Belém Novo em comparação com a população a ser atendida, e a influência remota dos efluentes da Ponta Grossa, com as contribuições do arroio do Salso e dos efluentes do emissário da ETE Serraria.

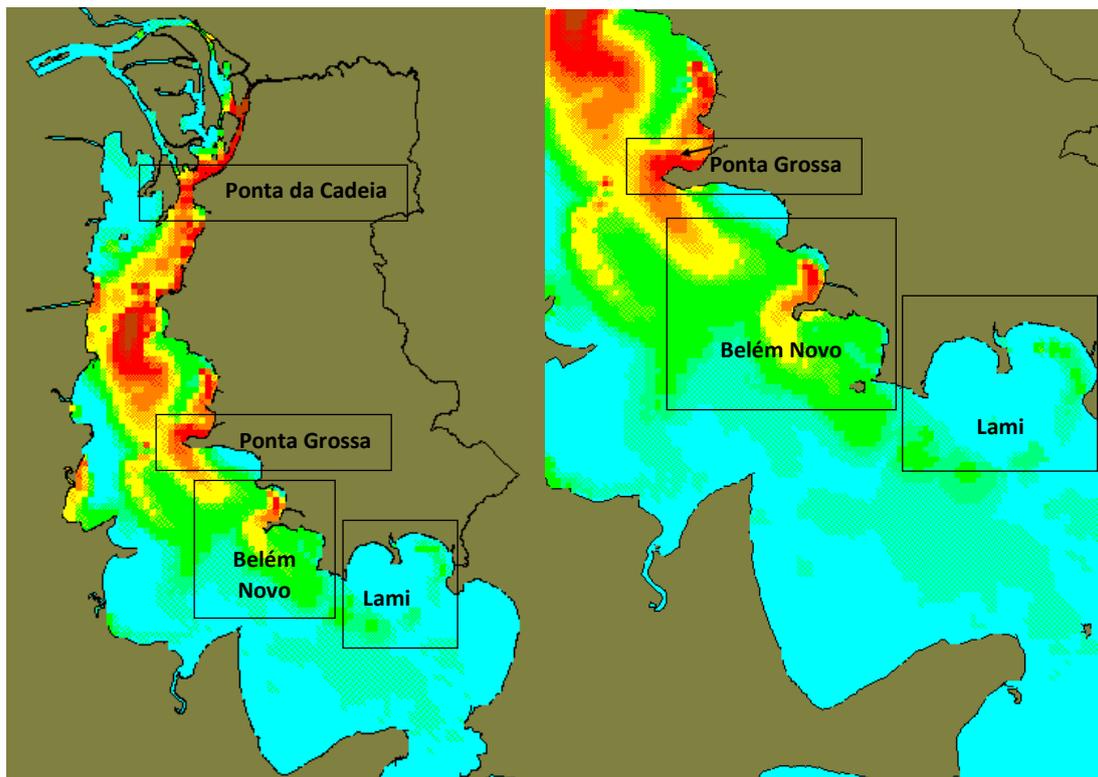
7.3 Resultados e análise da simulação do cenário de aumento populacional com desvio de carga periférica.

7.3.1 Em condição de vazão alta do Guaíba 2400 m³/s.

Resultados.

O mapa seguinte ilustra a distribuição de concentração de coliformes termotolerantes no Guaíba para uma população estimada em 2030 de 1 653 523 habitantes em Porto Alegre, em condição de vazão alta do Guaíba (2400 m³/s). (Cf. Item 6.3.3.).

Figura 18: Enquadramento das águas do Guaíba, e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário de aumento populacional em condição de vazão de base alta por DMAEMap.



Observa-se figura 18 as mesmas duas plumas principais de classe 4 oriundas do Jacuí e Gravataí, da Ponta da Cadeia, e da Ponta Grossa. Apareceu uma pluma de classe 4 na praia de Belém Novo que não era presente nas outras simulações com a população de base de 2010. Globalmente, a zona de classe 4 ampliou, desde a zona norte, quase chegando até a Ponta Grossa. Além disso, a atenuação da pluma de contaminação, ou seja, quando a qualidade volta a se enquadrar na classe 1, está na entrada da lagoa dos Patos, muito mais no sul que nas outras simulações (frente a ponta do Arado Velho).

Análise dos resultados.

A Figura 18 mostra que a balneabilidade do Guaíba, em particular das praias da zona sul são particularmente impactadas pelo aumento populacional, com desvio de carga.

Toda a região ao Sul da praia de Ipanema estão classificadas como classe 3 ou 4 por causa do fluxo de carga oriundo da ponta da Cadeia e da Zona Norte, também as cargas locais podem contribuir para esse resultado.

A praia de Belém Novo não está mais balneável nessa simulação. Observa-se que a pluma oriunda do Centro e da Ponta Grossa chega até a praia de Belém Novo, causando uma degradação da qualidade em Belém Novo pelo efeito geográfico previamente descrito. Além disso, a carga lançada pela ETE Belém Novo e, ou, o arroio Belém Novo participam também à degradação da qualidade. Apenas, a parte norte da baía de Belém Novo ficaria classificada como classe 1, porém, a incerteza sobre o valor numérico simulado sugere uma vigilância particular quanto ao enquadramento real dessa região.

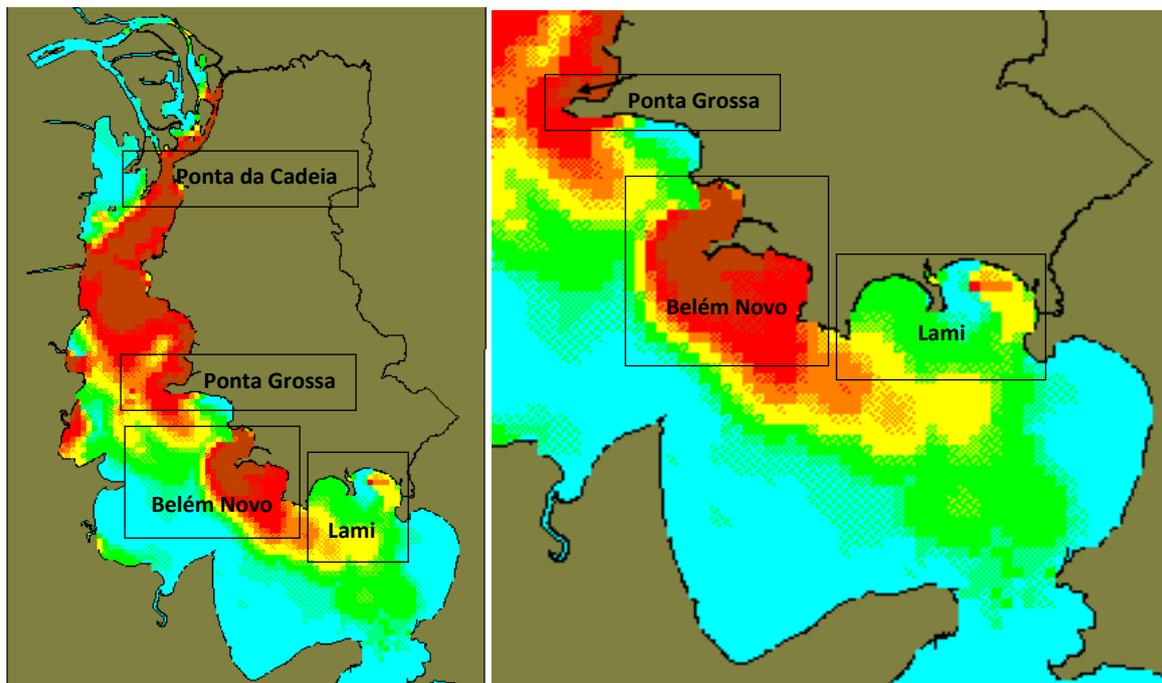
A praia do Lami sofre igualmente uma alteração de qualidade importante: a mancha de classe 2 previamente observada nas outras simulações quase ocupa toda enseada da praia, porém, isto não invalida a balneabilidade no Lami. Observa-se que a pluma oriunda da Ponta Grossa chega até a praia do Lami, mas com uma contribuição de qualidade suficiente para preservar a balneabilidade (classe 2). Portanto a degradação da qualidade pode ser devida ao aumento das cargas locais no Lami, carregadas pelo arroio Lami e o arroio Chico Barcelos.

7.3.2 Resultados em condição de vazão baixa do Guaíba 600 m³/s.

Resultados.

O mapa seguinte ilustra a distribuição de cargas de coliformes termotolerantes no Guaíba em condição de estiagem (600 m³/s), e com a população estimada em 2030. (Cf. Item 6.3.3.).

Figura 19:Enquadramento das águas do Guaíba, e detalhe na Ponta Grossa, para o cenário de aumento populacional em condição de vazão de base baixa por DMAEMap.



Observa-se figura 19 uma nitida queda da qualidade global do Guaíba. A pluma de classe 4 se desenvolve desde o delta do Gravataí até a Ponta Grossa. Ela chega a ocupar toda largura do Guaíba entre a Ponta do Dionísio e a Ponta Grossa. A pluma oriunda da Ponta Grossa e do arroio do Salso também é de classe 4 mas é diluída antes de chegar na Ponta do Arado Velho, em Belém Novo. Uma nova pluma principal de classe 4 aparece em Belém Novo, e contamina as praias vizinhas a montante e a jusante. Da mesma forma que no cenário de aumento populacional em regime de vazão alta, o Guaíba retoma sua condição de classe 1 na entrada da Lagoa dos Patos.

Análise dos resultados.

A figura 19 mostra que no período de estiagem, a qualidade do Guaíba com um todo é significativamente alterada pelo aumento populacional. Em particular, todas as praias da zona sul salvo Itapuã e a enseada norte entre a Ponta Grossa e a Ponta do Arado Velho (por causa da morfologia da costa, que protege essa praia) são altamente contaminadas por esgoto.

Assim, em Belém Novo, a classe de qualidade é a classe 4, não balneável. Porém, a degradação da qualidade não provém apenas das cargas remotas oriundas do Centro e do emissário da ETE Serraria na Ponta Grossa, mas principalmente da própria zona urbana costeira, ilustrando o mesmo fenômeno que na simulação de aumento populacional em regime de vazão alta (Cf. Item 7.3.1).

No Lami, o enquadramento é classe 3 quase em toda enseada (salvo a parte norte, junto a boca do arroio Lami). Portanto a balneabilidade está comprometida no período de estiagem. Da mesma forma que no item 7.3.1, as cargas locais tem uma importância maior que as cargas remotas para explicar a degradação da qualidade devido as características geográficas do Lami.

7.3.3 Conclusão da análise das simulações de aumento populacional.

O aumento populacional combinado com o desvio de carga do Centro para a Ponta Grossa, toda infraestrutura de saneamento ficando igual, constitui a ameaça maior à qualidade do Guaíba e à balneabilidade das praias de Belém Novo e Lami.

Para atingir as metas do enquadramento previstas no plano de bacia (ECOPLAN, 2016), será necessário aliviar as cargas locais e as cargas principais oriundas dos emissários, e do Centro. Assim, a solução da reposição de carga poderia ser acoplada com melhorias na capacidade de coleta, para evitar a dispersão de cargas locais no corpo hídrico, e de tratamento de esgoto principalmente, no centro da cidade, onde se concentra a população, de modo a diminuir a concentração dos efluentes lançados pelos emissários da Ponta da Cadeia e da Ponta Grossa. Também, os outros sistemas de coleta de esgoto poderiam vantajosamente ser ampliados, e passar por um aprimoramento da eficiência do tratamento de esgoto (optando por outrassoluções que as lagoas de estabilização, como por exemplo, um sistema de elodo ativado, ou UASB) para melhorar a balneabilidade no Lami e em Belém Novo. A fiscalização das soluções individuais de tratamento de esgoto poderia também constituir uma medida de controle das cargas locais. O estudo das simulações ressaltou a importância de melhorar a qualidade dos arroios que desembocam no Guaíba, por contribuir bastante nas cargas próximas à orla: portanto eles tem uma importância particular para a balneabilidade das praias. Uma dessas sugestões de melhorias, tanto na coleta de esgoto (todos os bairros) quanto no tratamento (ampliação de algumas ETEs, mas não do Lami nem de Belém Novo), são previstas no plano de esgoto (DMAE, 2010).

8 Comparação dos resultados obtidos com o aplicativo DMAE-Map com outros resultados experimentais.

Com o intuito de consolidar os resultados obtidos com o aplicativo DMAE-Map, o enquadramento obtido no cenário de base foi comparado com outras fontes bibliográficas a respeito: o plano de bacia do Guaíba (ECOPLAN, 2016) e o relatório técnico complementar PISA (LERSCH, HOFFMANN, ROSMAN, 2013). Assim, os parâmetros das simulações com outros aplicativos não correspondem sempre aos valores simulados com o aplicativo DMAE-Map. Porém, buscou-se estabelecer comparações relembando dessas diferenças. O plano de bacia determinou o enquadramento atual do Guaíba através de séries de dados levantados no campo, e calibrou um modelo de simulação de qualidade da água com o aplicativo IPH-Eco. O relatório complementar do projeto integrado socio-ambiental contempla simulações da qualidade da água com outros programas de modelagem: SIS-Bahia e IPH-A.

8.1 Comparação dos resultados do enquadramento do Guaíba e os resultados de IPH-Eco com os resultados da simulação do cenário de base com DMAE-Map.

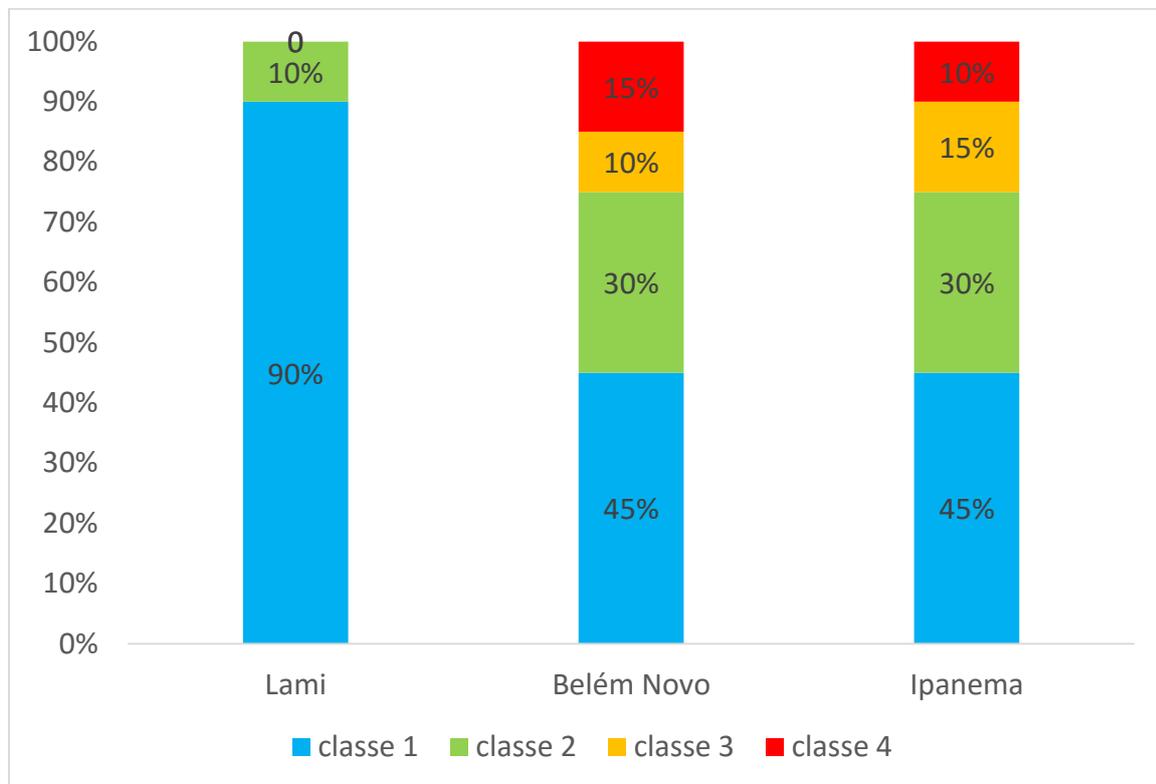
8.1.1 Enquadramento atual do Guaíba e calibração do modelo de qualidade IPH-Eco.

A avaliação do enquadramento em 2015 da qualidade das águas do Guaíba foi realizada no plano de bacia¹⁰ (ECOPLAN, 2016). Para subsidiar à elaboração de planos de ação de modo a atingir as metas de enquadramento de médio e longo prazo determinadas em tal plano, o modelo IPH-Eco foi calibrado para representar a qualidade das águas do Guaíba. Além disso, os resultados da simulação com o DMAE-Map do cenário de base foram comparados com os dados experientais de campo do enquadramento com o intuito de confirmar a precisão do programa. Por fim, os resultados da calibração do aplicativo IPH-Eco foram comparados com os resultados do DMAE-Map.

O modelo de simulação DMAE-Map apresentou os resultados de enquadramento mais otimistas pela região formada pelas águas frente a Ipanema, Belém Novo e Lami, que os dados de campo do enquadramento. De fato, no cenário de base simulado com o aplicativo DMAE-Map (Item 7.1.Resultados e análise da simulação do cenário de base) foi constatado que as águas do Lami são de classe 1 e de Belém Novo de classe 2, enquanto a classe de qualidade atual para as praias do Lami e de Belém Novo é a classe 3 (ECOPLAN, 2016). No plano de bacia, o enquadramento atual foi determinado com base no percentil 80 do parâmetro coliformes termotolerantes, em outras palavras a classe d'água corresponde à faixa de concentração de coliformes termotolerantes repetida em 80% das medidas experimentais considerando a vazão de referência. Entretanto, o zoneamento do plano de bacia abrange zonas muito amplas, podendo resultar em médias pouco detalhadas. Em particular, a margem esquerda Sul abrange toda faixa costeira desde o Sul da Ponta Grossa até o Sul da baía do Lami, e é representada por apenas três pontos de amostragem (Ipanema, Belém Novo, Lami) cuja situação em relação aos focos de carga é diferenciada. O histograma figura 20 ilustra essas diferenças.

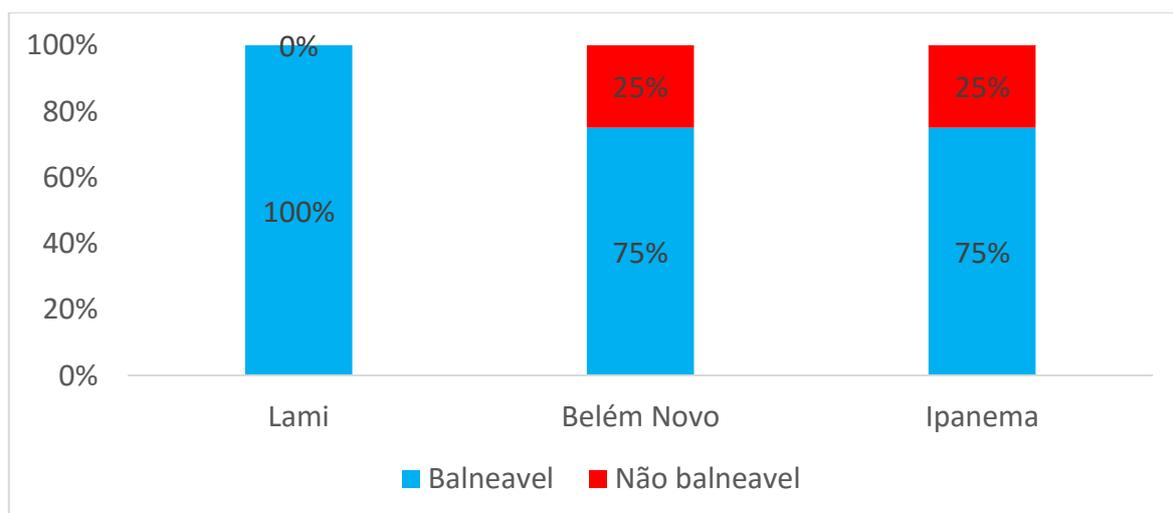
¹⁰ RT2 março 2016: complemento da fase B, estabelecimento das metas intermediárias do enquadramento e vazão de referência. Mapa Qualidade atual do Lago Guaíba e dos arroios segundo as classes do enquadramento (CONAMA 357 de 2005).

Figura 20: Histogramas das frequências experimentais de concentração de coliformes termotolerantes dos pontos situados na região margem esquerda jusante com base em séries de dados 2009-2013. (Adaptado de ECOPLAN, 2016).



A figura 21 resume os dados da figura 20 em termos de balneabilidade, lembrando que as águas de classe 1 ou 2 são classificadas como balneáveis (Cf. item 5.1.2.).

Figura 21: Frequências experimentais de balneabilidade (Adaptado de EcoPLAN (2016))



A calibração do modelo de qualidade IPH-Eco foi realizada comparando os valores simulados com os valores experimentais de cada ponto de amostragem utilizado no enquadramento (ECOPLAN, 2016).

Os resultados de conformidade com os valores experimentais foram satisfatórios, resultando no mesmo enquadramento global¹¹ (considerando a média e o percentil 80 de cada parâmetro) dos diferentes setores do Guaíba. De acordo com os resultados do programa IPH-Eco, as regiões de Belém Novo e do Lami são atualmente de classe 3, ou seja, não balneáveis (ECOPLAN, 2016). Entretanto, visto o quadro 20, o critério adotado pelo plano de bacia na definição do enquadramento atual da região do Lami e Belém Novo é bastante severo: o Lami seria de classe 3 porém, as águas nessa região são 90% do tempo de classe 1, enquanto que Belém Novo seria também de classe 3, com 70% do tempo águas de classe 1 ou 2 balneáveis. Isto porque o zoneamento do Guaíba escolhido e com base em uma “média” dos parâmetros de qualidade não é a mais favorável.

Comparando as frequências experimentais da figura 20 com o enquadramento calculado no cenário de base com o aplicativo DMAE-Map (figura 15), a qualidade simulada do Lami (classe 1, balneável) e Belém Novo (classe 2, balneável), são melhores que os dados experimentais. Cabe ressaltar que os dados experimentais tabelados (figura 20) correspondem a uma média anual das concentrações de coliformes termotolerantes, enquanto a simulação de interesse corresponde a condição de estiagem, a qual é mais desfavorável à qualidade das águas. Portanto, o programa DMAE-Map seria mais favorável, isto é, calcula um enquadramento melhor do que as condições em campo. Uma vantagem da simulação, apesar do comentário precedente, é que ela descreve melhor as variações locais de qualidade: figura 15 enxerga-se as zonas de classe 2 e de classe 1 dentro das zonas de Belém Novo e Lami. Isto indica onde especificamente poderia eventualmente ter uma restrição de balneabilidade nessas praias, quando o DMAE evidencia uma concentração elevada de coliformes termotolerante na rotina de monitoramento.

Não foi possível comparar diretamente a simulação do cenário de base do DMAE-Map com a calibração do IPH-Eco, uma vez que o plano de bacia disponibiliza a média dos parâmetros de qualidade (fósforo, pH, nitrogênio total, coliformes termotolerantes ect.), e não apenas a concentração de coliformes termotolerantes.

8.1.2 Comparação entre a precisão concentração de coliformes termotolerantes calculada com o aplicativo IPH-Eco e o aplicativo DMAE-Map.

A calibração do programa IPH-Eco foi concluída com o cálculo da correlação entre os valores de concentração de coliforme termotolerante experimentais, e os valores calculados com IPH-Eco. Assim, a correlação é de 0,95 no período chuvoso, e de 0,89 no período seco. Ou seja, os desvios são respectivamente de 5% e 19%. Essas correlações são da mesma ordem de grandeza que os desvios estimados calculados por Zabadal et al (2010) para os resultados do aplicativo DMAE-Map : o desvio estimado é entre 15% e 20% (Cf. item 6.2.7. Porém, o desvio no período chuvoso com o aplicativo DMAE-Map ficou significativamente superior. Portanto, os resultados de simulação de distribuição de concentração de coliformes termotolerantes é mais confiável empregando o programa IPH-Eco durante o período chuvoso em comparação com o programa DMAE-Map.

¹¹ Os valores simulados com IPH-Eco pelos pontos de amostragem correspondente as praias de Belém Novo e Lami não foram apresentados no relatório de trabalho das metas intermediárias do enquadramento e vazão de referência (ECOPLAN, 2016).

8.2 Comparação dos resultados da simulação do Cenário atual com DMAE-Map e IPH-A.

8.2.1 Cenário simulado com IPH-A.

LERSCH, HOFFMANN & ROSMAN (2013) apresentaram no II Relatório complementar de impacto ambiental do projeto socioambiental da ETE Serraria, as simulações de qualidade de água para o Guaíba, com os dois aplicativos apresentados no Item 5.4.1. Sis-Bahia e IPH-A.

A simulação de concentração de coliformes termotolerantes realizada com IPH-A é similar com o Cenário de base do DMAE-Map, porém consta das hipóteses seguintes: o emissário da Serraria lança uma vazão de 0,2500 m³/s (um pouco maior que a do DMAE-Map) – essa vazão corresponde ao funcionamento pleno a ETE Serraria, e é considerado fonte local única, o emissário tem um comprimento de 1600 m, o regime de vazão do Guaíba está considerado em regime de estiagem com uma vazão de referência de 355 m³/s. Com relação a este último valor, nota-se que a condição de vazão de estiagem considerada pelo IPH-A (e os outros aplicativos) é mais restritiva que a condição usada com DMAE-Map. Esse cenário simulado no IPH-A buscava avaliar o impacto local do emissário da ETE Serraria em especial a pluma formada na sua saída. As figuras 22 e 23 apresentadas no relatório, mostra que o emissário sozinho não compromete a balneabilidade em nenhum ponto do Guaíba, seja a montante ou a jusante da Ponta Grossa.

Figura 22: Valores das concentrações de coliformes termotolerantes em diferentes pontos próximos ao emissário da ponta Grossa. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013)

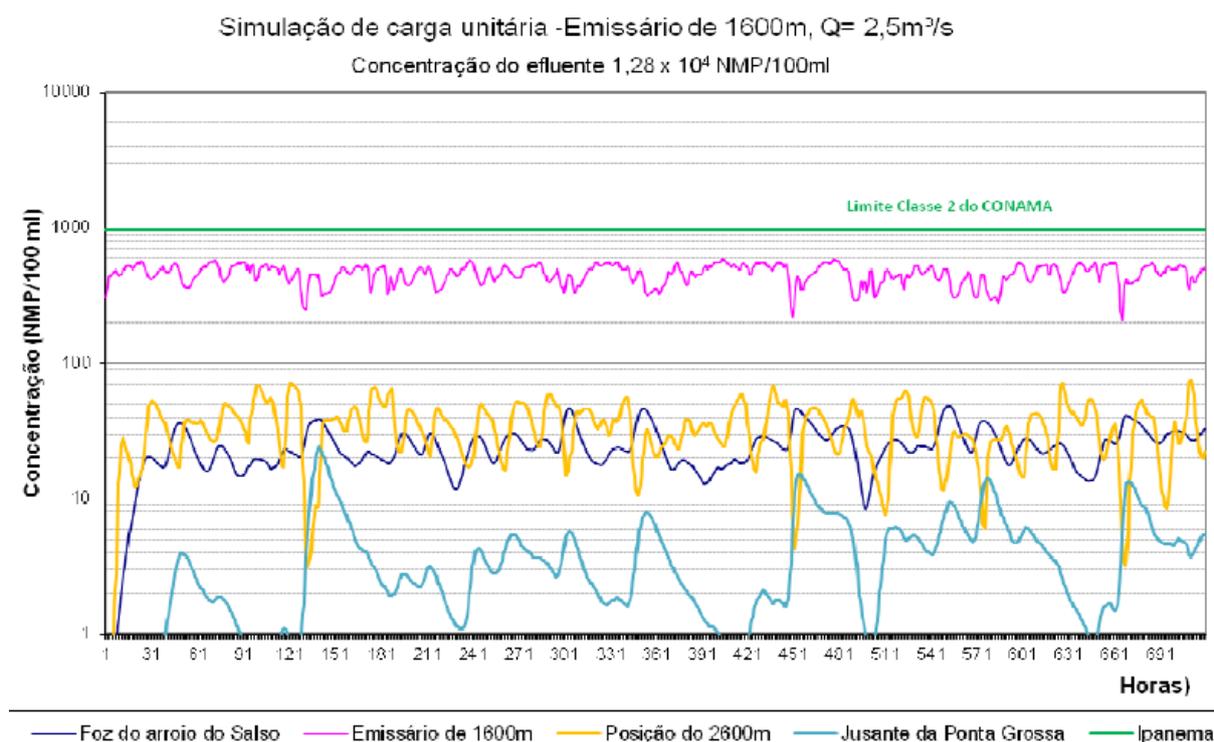
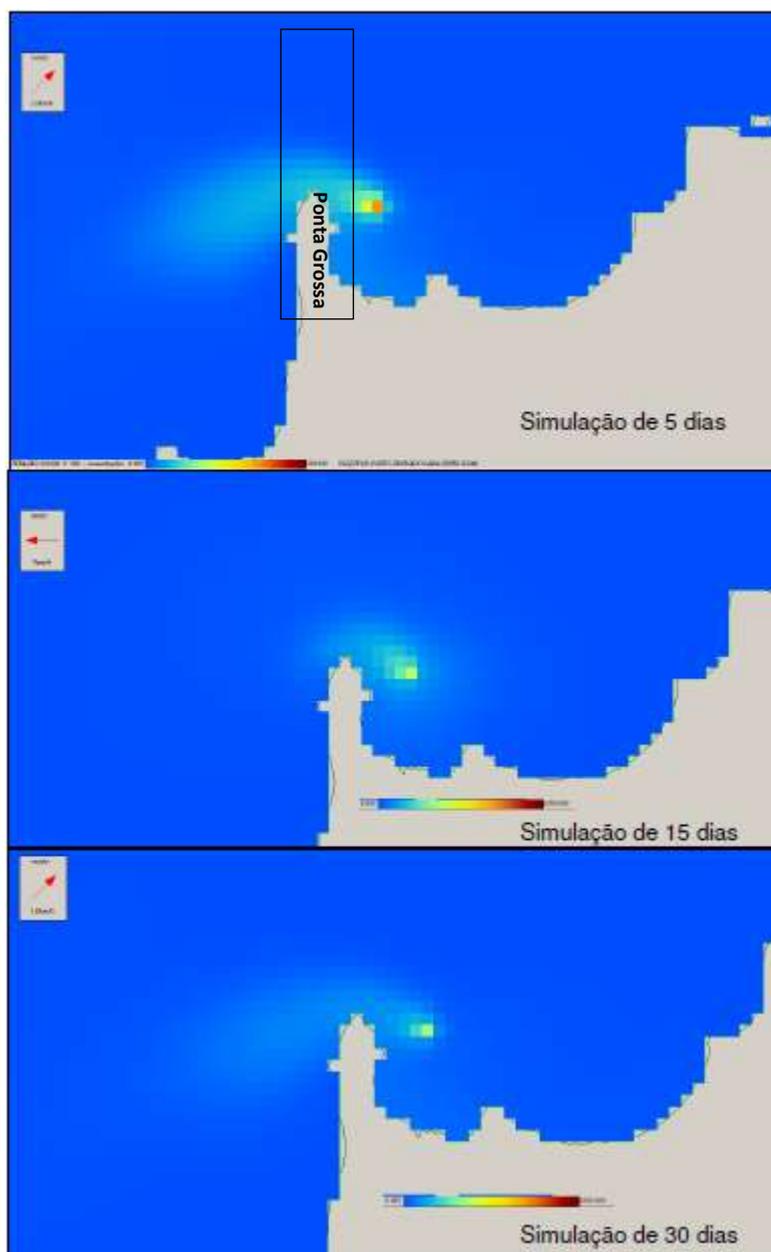


Figura 23: distribuição da concentração de coliformes termotolerantes na região da Ponta Grossa, onde há o emissário, simulada com o aplicativo IPH-A (Fonte: LERSCH, HOFFMANN, ROSNAN,2013).



8.2.2 Análise e comparação com os resultados das simulações com DMAE-Map.

Os resultados da simulação do IPH-A¹² figuras 22 e 23 revelam que a pluma de contaminação oriunda do emissário Ponta Grossa é diluída de tal maneira que não ocasiona nenhuma alteração da qualidade da água perto das praias do Lami e Belém Novo. Em comparação com o mapa detalhado da região da Ponta Grossa gerado com DMAE-Map no cenário de base (figura 15), os resultados são semelhantes: as águas são classificadas como classe 1 e, localmente, de classe 2 próximo ao emissário. Desta forma, conclui-se que os resultados das simulações, apesar de apresentarem diferenças nas suas configurações, são similares para o cenário de base nesta região do Guaíba. A

¹² p. 96 do relatório de impacto ambiental do projeto de ETE Serraria, Aplicação de modelos transientes IPH-A e SIS-Bahia, 2013

pluma simulada pelo DMAE-Map tem uma extensão maior (Figura 15), mas isso pode ser explicado pela vazão de referência de estiagem empregada, o qual é maior com o DMAE-Map (600 m³/s), o que amplifica a importância do transporte por advecção.

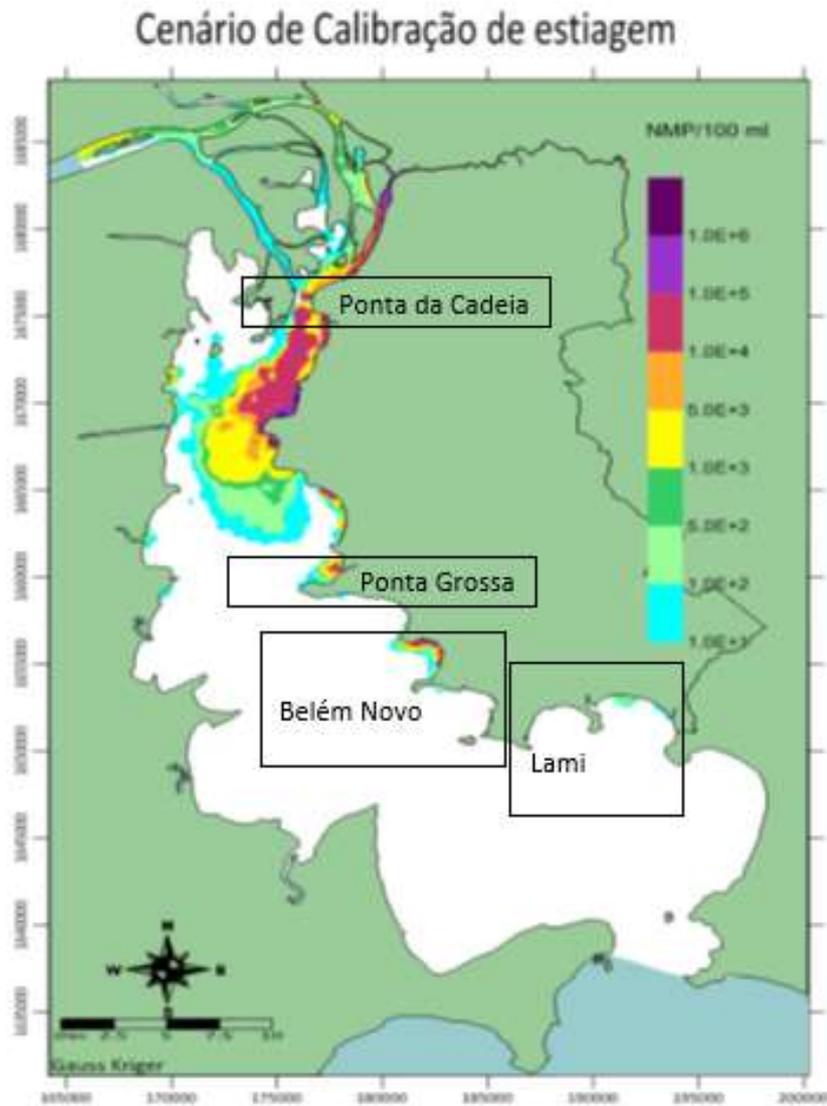
Também, a conclusão precedente mostra que o arroio do Salso carrega a contribuição principal de contaminação na pluma observada na vizinhança da Ponta Grossa no cenário de base, e não o emissário da ETE Serraria.

8.3 Comparação dos resultados da simulação do cenário atual com DMAE-Map e SIS-Bahia.

8.3.1 Cenários simulados com SIS-Bahia e resultados.

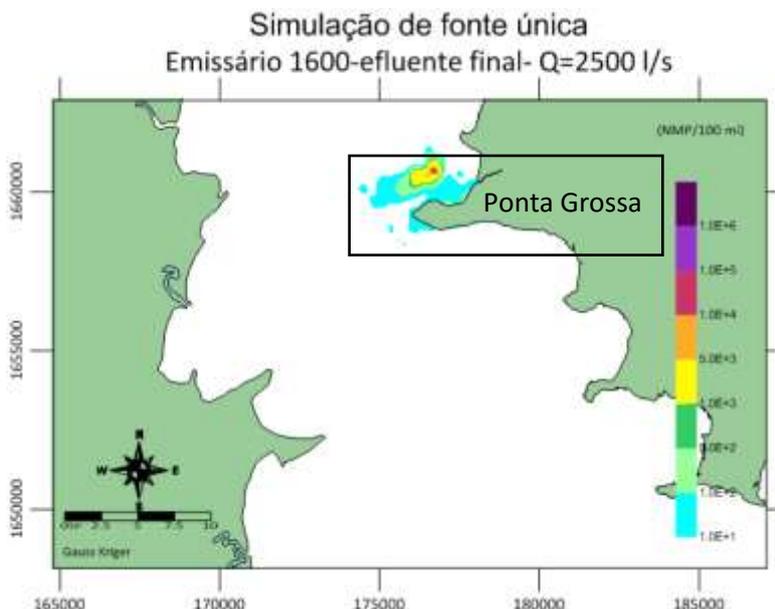
Os resultados apresentados pelo aplicativo Sis-Bahia (LERSCH, HOFFMANN & ROSMAN, 2013) também consideraram o regime de vazão do Guaíba de estiagem de 355 m³/s, o comprimento do emissário da Ponta Grossa de 1600 m, e a vazão de efluentes lançada através do emissário de 0,2500 L/s; porém com a diferença de haver simulações com e sem a presença do emissário. A figura 24 apresenta a calibração do modelo, a qual não leva em conta a descarga efluente do emissário da ponta da Grossa.

Figura 24: Concentração de microorganismos no Guaíba no período de estiagem 355m³s. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013)



Já a figura 25 apresenta os resultados da simulação do emissário da Ponta Grossa realizada com o emissário de comprimento de 1600 m e uma vazão de esgotos de 0,2500 m³/s. O impacto local do emissário é estudado isoladamente das outras fontes como precedentemente na simulação do IPH-A.

Figura 25: Concentração de micro-organismos no Guaíba no período de estiagem $355\text{m}^3/\text{s}$ contando o emissário da ponta Grossa como única fonte de lançamento e com vazão de $2500\text{ m}^3/\text{s}$. (Fonte: LERSCH ROSNAN HOFFMANN, 2013).



8.3.2 Análise e comparação com os resultados de DMAE-Map.

Analisando os dois mapas apresentados nas figuras 15, 22 e 23, percebe-se que a qualidade do Guaíba obtida tanto globalmente quanto localmente é semelhante em comparação com a simulação DMAE-Map. Observa-se uma atenuação por decaimento natural e diluição (mesmo em período de estiagem) das plumas da Ponta da Cadeia e da Ponta Grossa antes de atingir as praias de Belém Novo e Lami. O Sis-Bahia reforça em comparação com o DMAE-Map o efeito das cargas locais no Lami e em Belém Novo. Em Belém Novo há uma faixa de água de classe 4 junto à margem, e no Lami, as águas frente ao centro urbanizado ficam na classe 2. Assim pelo resultado do Sis-Bahia, a balneabilidade é sistematicamente comprometidas em Belém Novo em período de estiagem. No Lami, a balneabilidade é preservada mesmo no centro urbano. Portanto, com base na simulação do Sis-Bahia, e correlacionando com os resultados apresentados na simulação do cenário de base com DMAE-Map, pode-se concluir que apenas as cargas locais influenciam o enquadramento das águas nessas regiões do extremo sul do Guaíba. Esse resultado, é um indicador para resolver a dúvida levantada item 7.2.3 e 7.3.3., acerca do fenômeno responsável pela contaminação de Belém Novo no período de estiagem. A figura 24 mostra bem a contaminação de Belém Novo mesmo sem contribuição do emissário da Ponta Grossa. Portanto, não é a carga adicional que está sendo responsável da degradação da qualidade das águas em Belém Novo mas sim, a baixa vazão do Guaíba durante o verão, e a existência de cargas locais que se acumulam nesse período.

9 Conclusão .

As simulações estudadas nesse trabalho contribuíram para o entendimento acerca da qualidade de água na região sul do Guaíba. Em relação às performas do programa DMAE-Map, as simulações confirmaram o enquadramento correto descrito anteriormente na revisão bibliográfica, para uma população próxima à população de 2010. O programa DMAE-Map permitiu simular a distribuição das concentrações de coliformes termotolerantes no corpo hídrico de modo satisfatório: os resultados obtidos no cenário atual e no cenário de reposição de carga obtidos com o programa DMAE-Map, e os programas IPH-A, IPH-Eco e Sis-Bahia foram consistentes. As simulações encontradas na literatura feitas através do programa IPH-A foram menos detalhadas que as realizadas através do programa DMAE-Map (LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN, 2013). Já IPH-Eco ofereceu resultados bastantes detalhados no plano de bacia do lago Guaíba (ECOPLAN, 2016) bem como o programa Sis-Bahia demonstrou também um grau de precisão elevado.

Em relação à avaliação da balneabilidade, o banhismo no Lami é seguro em todas as estações, se enquadrando na classe 1 do CONAMA nº357 de 2005 para a concentração de coliformes termotolerantes. Em Belém Novo, o banhismo é seguro apenas no período chuvoso do ano, ou seja durante os meses de pouco turismo (maio - outubro). Resumidamente, a temporada de veraneio e de alta temporada turística correspondem aos períodos do ano de pior qualidade da água. As causas principais da degradação da qualidade nesses locais são principalmente: a variação natural de regime de vazão do Guaíba, e o despejo local de efluente doméstico. No caso de Belém Novo, uma influência negativa do efluente lançado através da Ponta Grossa foi determinada.

A degradação da qualidade observada no período de estiagem ou seja no verão, estação mais turística, provém do regime de vazão baixo do Guaíba de apenas 600 m³/s em média (apenas 30% da vazão média do período chuvoso), chegando a apenas 355m³/s no mínimo. Durante o período de estiagem, os contaminantes se acumulam no local de despejo (foz de arroio, fossas sépticas, emissários), resultando em concentrações elevadas. As concentrações diminuem ao se afastar das fontes por decaimento natural predominantemente. Isto tem um efeito negativo na qualidade das águas, em particular nas praias, que ficam junto as fontes de despejo na orla. Além disso, o período de estiagem corresponde aos meses de alta temporada turística, podendo causar prejuízo as atividades turística e de lazer nesses locais.

Pelas simulações propostas com DMAE-Map, as cargas locais são principalmente responsáveis pela contaminação das praias de Belém Novo e Lami. De fato, as plumas principais, em termos de coliformes termotolerantes no Guaíba, são oriundas dos emissários da Ponta da Cadeia e da Ponta Grossa. Na Ponta Grossa, o arroio do Salso, que se enquadra na classe 4, contribui também significativamente à pluma de contaminação por esgoto, além do emissário da ETE Serraria. Essas plumas são diluídas antes de atingir Belém Novo e Lami. Porém, no caso de Belém Novo, foi evidenciada um influência direta da pluma da Ponta Grossa, devida à orientação da correnteza principal das águas e a conformação geográfica da praia de Belém Novo. A magnitude de influência dos efluentes oriundos da Ponta Grossa sobre Belém Novo aparecem secundária em comparação com as cargas locais. Cabe ressaltar que a decisão de construir a ETE Serraria já implica a operação do emissário da Ponta Grossa, apesar dos impactos ambientais negativos dele sobre Belém Novo. Olhando o Guaíba com um todo, essa instalação tem o potencial de melhorar a qualidade da água significativamente, uma vez que a ETE Serraria foi projetada para atender 80% da população da cidade, se a rede de captação continua ampliando, e se população se conecta nessa rede. Nessa perspectiva, o emissário da ETE Serraria, já construído mas inoperante desde 2008 poderia entrar em funcionamento sem consequências significativas sobre Belém Novo, e muito menos sobre as águas mais a jusante. Voltando para as causas da contaminação por esgoto nas praias de Lami e Belém

Novo, a contribuição principal provém das cargas locais despejadas nos próprios bairros de Lami e Belém Novo. As simulações do DMAE-Map mostraram também que o aumento populacional é um fator de influência significativo em relação à qualidade das águas nas praias da zona sul. Esse fator entra em sinergia com a fraqueza do sistema atual de coleta e tratamento de esgoto Lami e Belém Novo, para piorar a meio prazo a qualidade das águas nesses bairros.

Conseqüentemente, a preservação da balneabilidade nas praias de Belém Novo e Lami é dependente, de acordo com os resultados do trabalho, da mitigação dos fatores de influência do aumento populacional e das cargas locais. Atualmente, o sistema de esgoto em Belém Novo e Lami não apresenta uma eficiência satisfatória, por ser sistemas de lagoas de estabilização. Além disso, o número de pessoas conectadas ao sistema de coleta não é suficiente, lançando então o efluente sem tratamento nos arroios, ou dispendo de um tratamento individual (por exemplo, fossa séptica). Esse comentário vale pela cidade de Porto Alegre com um todo: o sistema de tratamento da Serraria é performante, mas a rede de captação não está ainda suficiente para atender toda cidade, também os usuários próximos à um interceptor de esgoto nem todos são ligados à rede coletora, principalmente por causa do custo que isso representa. Com a informação elaboradas nesse trabalho, sugere se algumas ações de mitigação em relação ao sistema de esgoto para melhorar a qualidade das águas nas praias da zona sul de de maneira mais ampla, as águas do Guaíba com um todo. A curto prazo, uma modernização dos sistemas de tratamento ETE Lami e Belém Novo é desejável, para atender a população futura, e tratar eficientemente o esgoto, por exemplo um sistema compacto de lodo ativado, ou UASB, poderiam vantajosamente substituir as lagoas de estabilização de baixa eficiência atuais. Um tratamento terciário de remoção de nutriente seria apropriado por causa da detecção pelo DMAE de altas concentrações de fósforo durante o monitoramento de rotina, com o intuito de evitar a poluição das praias por algas, e a eutrofização do Guaíba. Também, a ampliação da rede de captação nos bairros de Lami e Belém Novo é essencial pela efetividade do tratamento de esgoto: atualmente a captação é insuficiente para atender a população, prejudizando os arroios¹³. Contudo, uma vez que o Lami e Belém Novo são bairros de renda média ou baixa, facilidades de financiamento poderiam ajudar a incentivar a conexão da população local à rede (por exemplo, se inspirando nos mecanismos financeiros do programa Minha Casa Minha Vida). A fiscalização da conformidade às normas técnicas das instalações individuais já existentes por parte da prefeitura, assim como a lei exige, complementaria o planejamento da rede de esgoto. Por fim, a recuperação dos arroios, que estão sendo usados como corpos receptores de esgoto não tratado e contribuem significativamente para a contaminação da orla (por exemplo, o arroio do Salso contribui significativamente à pluma de contaminação da Ponta Grossa), complementaria os esforços para melhorar duravelmente a qualidade das águas no Guaíba com um todo, e particularmente no Lami e Belém Novo.

Cabe ressaltar que a modelagem com o programa DMAE-Map não levou em conta alguns parâmetros suscetíveis de alterar significativamente a balneabilidade das praias da zona sul. Em particular, não foi considerada a possibilidade de floração de águas que é uma fonte importante de poluição. A presença de sedimento ricos em fósforo no fundo do Guaíba, as contribuições com teor de fósforo elevados dos arroios, como indicado no Plano de Bacia do Guaíba (ECOPLAN,2016), e o despejo contínuo de esgoto na Ponta da Cadeia são condições suficientes para promover uma floração de algas. Elas sobrenadam na superfície e se multiplicam com muita velocidade, assim elas podem

¹³ Essa ampliação da rede de captação de esgoto é prevista no Plano de Esgoto de Porto Alegre, com o objetivo de atingir a universalização do serviço de coleta e tratamento de esgoto na cidade no horizonte 2030. Os esforços do DMAE se concentraram até hoje prioritariamente no centro de Porto Alegre, que é a zona mais poluída por esgoto. Porém, a balneabilidade das praias na zona sul está ameaçada a médio prazo, portanto merecendo atenção no planejamento a curto prazo também.

atingir as zonas de águas rasas como a praia do Lami e impossibilitar a balneabilidade segura. Isto apesar dos cuidados tomados para dimensionar um sistema de gestão de esgotos que leva em conta as zonas de lazer a serem protegidas.

10 Indicações de trabalhos futuros no mesmo tema.

Trabalhos futuros poderiam focar na região de Belém Novo, para determinar a influencia relativa das cargas locais e oriundas à Ponda Grossa na qualidade da água. Também, simulações adicionais para comparar os senários propostos para atingir as metas de enquadramento determinadas pelo plano de bacia (ECOPLAN, 2016) como efeito das melhorias na infra-estrutura de coleta e tratamento previstas no plano de esgoto - em particular determinar sistemas de tratamentos adaptados para a região de Belém Novo e do Lami, seriam desejáveis. A determinação do risco de floração de algas poderia ser um estudo complementar relevante uma vez que a contaminação por fósforo é amplamente difundida no manancial, por exemplo com o apoio do aplicativo DMAE-Map.

11 Bibliografia

- ANDRADE, R.R et. al. **Lago Guaíba (RS): índice de qualidade de água - IQA, 2000 a 2009**. Revista Ecos DMAE. Nº 32. Ano 18. Encarte nº 4. Maio de 2012.
- BENDATI et al. Avaliação da qualidade da água do lago Guaíba. Subsídios para a gestão da bacia hidrográfica. **Revista Ecos**, DMAE, Porto Alegre, v. 4, n. 7, 2003.
- BORCHE, **IPH-A Aplicativo para modelagem de estuários e lagos, Manual de uso**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.
- CASALAS, Alejandro Borché. **IPH-A aplicativo para modelação de estuários e lagoas: manual de utilização do sistema**. Porto Alegre: Instituto de pesquisas hidráulicas/UFRGS, 1996.
- CHENG, CASULLI. **Evaluation of the UNTRIM model for 3D tidal circulation**. Proceedings of the international conference on estuarine and coastal modelling. P. 628-642. Novembro 2001.
- CONAMA. Resolução nº 274, de 2000. **Critérios de Balneabilidade em águas Brasileiras**. Brasília.
- CONAMA. Resolução nº 357, de 2005. **Classificação dos corpos de água, diretrizes ambientais para seu enquadramento, condições e padrão de lançamento de efluentes**. Brasília.
- COPPE/UFRJ, Fundação COPPETEC, COPPE/UFRJ. **SIS-Bahía, Sistema base de hidrodinâmica ambiental**. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 15 out. 2016.
- COPPE/UFRJ, Fundação COPPETEC, COPPE/UFRJ. **Manual do aplicativo Sis-Bahia**. Disponível em:<<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/ManualSisbahia.htm>>. Acesso em: 10 dez. 16.
- DMAE. **Blaneabilidade das praias, Belém Novo e Lami**. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=420>. Acesso em: 16 out. 2016.
- DMAE. **Dados gerais edição 2016**. Porto Alegre: 2016. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/relatorio_dados_gerais_2016.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2016.
- DMAE. **Plano Diretor de Esgoto de Porto Alegre 2006-2009**. 5. ed. Porto Alegre, 2010.
- ECO-PLAN ENGENHARIA. **Serviços de consultoria relativos ao processo do planejamento da bacia hidrográfica do lago Guaíba**. Porto Alegre, 2014. Acesso em: 14 ago. 2016.
- ECOS: Edição especial**. Porto Alegre: Dmae, março 2014. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/revista_ecos_34_-_final_em_baixa.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.
- FEITOSA, Renato Castiglia. **Acomplamento de Modelos de Campo Próximo e Campo Afastado com Cinética de Decaimento Bacteriano Variável – Aplicações em Emissários Submarinos**. 2007. 300 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Oceânica, Coppe/ufRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- FERNANDES, Leonardo Cabral. **Simulação da propagação de poluentes utilizando as transformações de Bäcklung - modelo bidimensional**. 2007. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufrgs, Porto Alegre, 2007.
- FRAGOSO Jr. C. R.; FERREIRA, T. F. & MARQUES, D. M. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

FRAGOSO, **Simulação da dinâmica de fitoplâncton no sistema hidrológico do Taim (RS)**. Porto Alegre: Dissertação de mestrado - IPH-UFRGS, 2005, p151.

GARCIA, Renato; ZABADAL, Jorge; RIBEIRO, Vinicius. 1 Laboratório de Pesquisa em Tecnologias da Informação e da Comunicação - LATEC/UFRJ & Grupo de Pesquisa em Ensino de Ciências e Educação Ambiental - GEA/UFRJ. Gênese e Split: estratégias alternativas de introdução ao estudo das equações diferenciais parciais. **Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 2, p.1-16, dez. 2014.

HAAG, Annelise. **Simulação de propagação de poluentes no Jacuí no canal do rio dos Sinos**. 2003. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufrgs, Porto Alegre, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Metodologia das Estimativas das Populações Residentes nos Municípios Brasileiros**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em 14 out. 2016.

LERSCH; HOFFMANN; ROSMAN. **Segundo relatório complementar de avaliação de impacto do projeto integrado socio-ambiental ETE Serraria**. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/pisa/>>. Acesso em: 05 out. 2016.

PAZ, Adriano Rolim da; SCHETTINI, Edith B. C.; VILLANUEVA, Adolfo O. N.. **Simulação hidrodinâmica bidimensional do banhado do taim (rs)**. In: **simpósio brasileiro de recursos hídricos**, 2003 Paraiba. Artigo. Paraiba: Universidade Federal da Paraiba, 2003. p. 1 - 19. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2003.pdf>. Acesso em: 16 out. 2016.

PEREIRA, Silvano Porto. **Modelagem da Qualidade Bacteriológica das Águas Costeiras de Fortaleza (Nordeste do Brasil)**. 2012. 300 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biologia, Ufc, Fortaleza, 2012.

POFFAL, Cristiana Andrade. **Solução da equação advection-difusiva utilizando regras para manipulação de exponenciais de operadores diferenciais e simetrias de Lie: aplicação em engenharia ambiental**. 2005. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufrgs, Porto Alegre, 2005.

Prefeitura de Porto Alegre (Org.). **Plano Municipal de Saneamento Básico: Volume 2: prognósticos, objetivos e metas**. Porto Alegre: Dmae, 2015.

PORTO ALEGRE, Prefeitura de. **Projeto Integrado Socio-ambiental**. Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/pisa/default.php>>. Acesso em: 14 out. 2016.

RIBEIRO, Vinicius et al. Simulação da propagação de poluentes em meio aquático utilizando redução de ordem. **Sistemas de Informação da Fsm**, Porto Alegre, v. 6, p.42-48, 2010.

RIZZI. **Modelo computacional paralelo para hidrodinâmica e para o transporte de substâncias bidimensional e tridimensional**. 2002. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências da Computação, Instituto de Informática, Ufrgs, Porto Alegre, 2002.

SANCHES, Nanashara D'Ávila. **A balneabilidade da praia do Lami - Porto Alegre/RS: no período de 1993 a 2012**. 2013. 98 f. Trabalho de conclusão de curso - Curso de Geografia, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

SANTIAGO, Gustavo Fuhr. **Simulação de escoamentos viscosos utilizando mapeamentos entre equações**. 2007. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Ufrgs, Porto Alegre, 2007.

SCORTEGAGNA. **Simulação da propagação de poluentes em meio aquático utilizando transformações conformes**. 2016. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Ufrgs, Porto Alegre, 2016.

SCHWARZBACH, Miriam Suzana Rodrigues et al. Aplicação do modelo iph-a, de correntologia e transporte de poluentes, à baía de Ipanema. **Anais do XIX Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária.** Foz de Iguaçu, p. 2333-2345. jan. 1997. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/aplicacion.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2016.

UNIÃO EUROPEIA. Directive Européenne nº 7, de 2006. **Cálculo da Qualidade das águas Para Banhismo.** FRANÇA, Disponível em:<<http://baignades.sante.gouv.fr/baignades/editorial/fr/controle/qualite.html>>. Acesso em: 14 out. 2016.

WANG, Jianping; JI, Lina. Conditional Lie–Bäcklund symmetry, second-order differential constraint and direct reduction of diffusion systems. **Journal Of Mathematical Analysis And Applications.** Sanghai, p. 1101-1118. fev. 2015.

ZABADAL, Jorge et al. Steady two-dimensional diffusion problems with arbitrary sources – exact solutions. **Engenharia Ambiental e Sanitária**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p.125-132, jun. 2006.

ZABADAL, Jorge; RIBEIRO, Vinicius; POFFAL, Cristiana. Diferencial restrictions applied to pollutant dispersion. **International Journal Of Mathematical Models And Methods In Applied Sciences.** Porto Alegre, p. 1-16. jan. 2014.