

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIELA GOMES NOGUEIRA SALES

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA – PR

CURITIBA

2017

GABRIELA GOMES NOGUEIRA SALES

MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA NA  
REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA – PR

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em  
Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia,  
Universidade Federal do Paraná, apresentado como  
requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Cynara de Lourdes da Nóbrega  
Cunha.

CURITIBA

2017



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

## TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

GABRIELA GOMES NOGUEIRA SALES

### MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA NA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA – PR

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 100,0, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: Cynara Cunha  
Cynara Cunha  
DEA / UFPR

Membro 1: Tobias Bleninger  
Tobias Bleninger  
DEA / UFPR

Membro 2: Michael Mannich  
Michael Mannich  
DEA / UFPR

Curitiba, 11 de dezembro de 2017.

## RESUMO

A gestão dos recursos hídricos em reservatórios artificiais pode ser realizada com o uso da modelagem computacional, ao representar os processos que ocorrem nesses sistemas ambientais. Este trabalho mostra a aplicação dos modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização (MQA) do SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) no reservatório do Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba e destinado ao abastecimento público de parcela dessa população. O objetivo foi avaliar o comportamento do fluxo longitudinal e a distribuição espacial das variáveis de estado: temperatura, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio orgânico total, amônia, nitrato, fósforo orgânico, fósforo inorgânico e clorofila *a*. Foram realizadas duas simulações do MQA, um primeiro cenário considerando os dados atuais de concentração de fósforo total e o segundo com o aumento de dez vezes nesses valores, a fim de analisar a resposta do reservatório ao aumento de cargas de nutrientes. Os resultados do modelo de circulação hidrodinâmica foram satisfatórios, apresentando velocidades baixas em quase todo o domínio do reservatório. Também evidenciaram, assim como os resultados do MQA nas três estações de controle, a compartimentalização do reservatório nas zonas lótica, de transição e lêntica. Os resultados do OD demonstraram a maior capacidade de reaeração no inverno. As concentrações de fósforo total apresentaram um decréscimo ao longo do reservatório, indicando uma possível retenção desse nutriente nos sedimentos do reservatório. A clorofila *a* foi a única variável que apresentou alterações significativas no cenário 2 (com aumento de carga), não sendo proporcional ao aumento de carga de fósforo total.

Palavras-chave: Reservatório do Passaúna. SisBaHiA. Modelo de qualidade de água.

## ABSTRACT

The management of water resources in artificial reservoirs can be carried out using computational modeling, when representing the processes that occur in these environmental systems. This study shows the application of two-dimensional hydrodynamic circulation, and water quality and eutrophication (WQM) models of the SisBaHiA (Base System of Environmental Hydrodynamics) in the Passaúna reservoir, located in the Curitiba Metropolitan Region and destined to the public supply of a portion of this population. The objective was to evaluate the behavior of the longitudinal flow and the spatial distribution of the state variables: temperature, biochemical oxygen demand (BOD), dissolved oxygen (DO), total organic nitrogen, ammonia, nitrate, organic phosphorus, inorganic phosphorus and chlorophyll *a*. Two simulations of the WQM were carried out, a first scenario considering the current data of total phosphorus concentration and the second with the ten times increase in the values, in order to analyze the response of the reservoir to the increase of nutrient loads. The results of the hydrodynamic circulation model were satisfactory, presenting low velocities in almost all the reservoir domain. They also showed, in addition to the results of the WQM in the three control stations, the compartmentalization of the reservoir in the lotic, transition and lentic zones. The DO results demonstrated greater capacity to reaeration in the winter. The total phosphorus concentrations presented a decrease along the reservoir, indicating a possible retention of this nutrient in the reservoir sediments. Chlorophyll *a* was the only variable that presented significant changes in scenario 2 (with increased load), not being proportional to the increase in total phosphorus loading.

**Keywords:** Passaúna reservoir. SisBaHiA. Water quality model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Passaúna .....	24
Figura 2 - Vista panorâmica do barramento do rio Passaúna .....	26
Figura 3 - Batimetria, indicação dos principais afluentes e localização aproximada das estações onde foram realizados os perfis de temperatura, em fevereiro de 2017, no reservatório do Passaúna .....	27
Figura 4 - Localização dos pontos amostrais para a distribuição granulométrica do reservatório do Passaúna .....	29
Figura 5 - Distribuições de tamanho de grão das amostras de sedimento no reservatório do Passaúna .....	29
Figura 6 - Localização dos pontos amostrais para avaliação da porcentagem das frações de solo pelo tamanho dos grãos dos sedimentos do reservatório do Passaúna .....	30
Figura 7 - Porcentagem das frações de solo pelo tamanho dos grãos dos sedimentos do reservatório do Passaúna .....	31
Figura 8 - Perfis de temperatura do reservatório do Passaúna nos dias 10/05, 14/06 e 19/07 de 2014 .....	31
Figura 9 - Perfis de OD do reservatório do Passaúna nos dias 10/05, 14/06 e 19/07 de 2014 .....	32
Figura 10 - Perfil térmico do reservatório do Passaúna em 15/02/2017 .....	33
Figura 11 - Perfis de temperatura e OD no reservatório do Passaúna entre abril de 2005 e junho de 2008 .....	34
Figura 12 - Domínio de modelagem para o reservatório do Passaúna, mostrando a malha com 571 elementos finitos e 2.707 nós e a localização das estações de monitoramento .....	37
Figura 13 - Rosa dos ventos dos meses de janeiro a dezembro de 2010, dados da estação meteorológica do reservatório Rio Verde.....	39
.....	39
Figura 14 - Rosa dos ventos do ano de 2010, dados da estação meteorológica do reservatório Rio Verde.....	41
Figura 15 - Dados de temperatura do ar, em graus Celsius, medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010.....	45
Figura 16 - Dados de radiação solar incidente, em W/m <sup>2</sup> , medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010.....	45
Figura 17 - Dados de umidade relativa do ar, em %, medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010.....	46

Figura 18 – Velocidade, em m/s, do reservatório do Passaúna nas 3 estações de monitoramento .....	47
Figura 19 - Padrão de circulação hidrodinâmica do reservatório do Passaúna para 27/10/2010 .....	48
Figura 20 - Valores de temperatura da água, em graus Celsius, do reservatório do Passaúna, ano de 2010 .....	49
Figura 21 - Distribuição da temperatura da água do reservatório do Passaúna para 01/02/2010 .....	50
Figura 22 - Distribuição da temperatura da água do reservatório do Passaúna para 01/06/2010 .....	50
Figura 23 - Valores de OD, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010 .....	51
Figura 24 - Valores de DBO, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010.....	51
Figura 25 - Campo de concentração de OD no reservatório do Passaúna para 01/02/2010.....	52
Figura 26 - Campo de concentração de DBO no reservatório do Passaúna para 01/02/2010..	52
Figura 27 - Valores de nitrogênio orgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010 .....	53
Figura 28 - Valores de amônia, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010.....	53
Figura 29 - Valores de nitrato, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010.....	54
Figura 30 - Campo de concentração de nitrogênio orgânico no reservatório do Passaúna para 01/10/2010.....	54
Figura 31 - Campo de concentração de amônia no reservatório do Passaúna para 01/10/2010 .....	55
Figura 32 - Campo de concentração de nitrato no reservatório do Passaúna para 01/10/2010	55
Figura 33 - Valores de fósforo orgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010 .....	56
Figura 34 - Valores de fósforo inorgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010 .....	56
Figura 35 - Campo de concentração de fósforo orgânico no reservatório do Passaúna para 01/08/2010.....	57
Figura 36 - Campo de concentração de fósforo inorgânico no reservatório do Passaúna para 01/08/2010.....	58
Figura 37 - Valores de clorofila <i>a</i> , em µg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010.....	59
Figura 38 - Campo de concentração de clorofila <i>a</i> no reservatório do Passaúna para 01/08/2010 .....	59

Figura 39 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 1 .....	60
Figura 40 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 2.....	60
Figura 41 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3.....	61
Figura 42 - Comparação entre os valores de OD, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3 .....	61
Figura 43 - Comparação entre os valores de DBO, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3 .....	62
Figura 44 - Comparação entre os valores de clorofila <i>a</i> , em µg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 1 .....	62
Figura 45 - Comparação entre os valores de clorofila <i>a</i> , em µg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 2.....	63
Figura 46 - Comparação entre os valores de clorofila <i>a</i> , em µg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3.....	63



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vazão média, carga de nitrogênio total e fósforo total para os rios afluentes ao reservatório do Passaúna .....	28
Tabela 2 - Vazão média diária do rio Passaúna, em m <sup>3</sup> /s, na estação BR 277 – Campo Largo, ano de 2010.....	38
Tabela 3 - Parâmetros utilizados na simulação da circulação hidrodinâmica do SisBaHiA ....	41
Tabela 4 - Valores de temperatura, em graus Celsius, medidos em março, junho e outubro de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo.....	42
Tabela 5 - Valores de OD, DQO, nitrogênio total e fósforo total, em mg/L, medidos no ano de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo.....	43
Tabela 6 - Valores de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total e nitrogênio total Kjeldahl, em mg/L, medidos em março, junho e outubro de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo.....	43
Tabela 7 - Valores de clorofila <i>a</i> , em µg/L, medidos entre abril de 2005 e junho de 2008 no reservatório do Passaúna .....	43
Tabela 8 - Valores das condições de contorno para os rios afluentes do reservatório do Passaúna, utilizadas na simulação do MQA do SisBaHiA .....	44
Tabela 9 - Valores das condições iniciais utilizadas na simulação do MQA do SisBaHiA.....	44
Tabela 10 - Parâmetros utilizados na simulação do MQA do SisBaHiA.....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS.....	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1	QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS.....	14
2.2	EUTROFIZAÇÃO .....	16
2.3	MODELAGEM AMBIENTAL.....	18
2.3.1	SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental .....	21
2.3.2	Modelo de circulação hidrodinâmica .....	21
2.3.3	Modelo de qualidade de água e eutrofização .....	22
<b>3</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>24</b>
3.1	BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PASSAÚNA.....	24
3.2	RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA.....	26
3.2.2	Estudos anteriores no reservatório do Passaúna .....	34
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
4.1	MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	36
4.2	MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA E EUTROFIZAÇÃO .....	41
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
5.1	MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	47
5.2	MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA E EUTROFIZAÇÃO .....	48
5.2.1	Cenário 1 .....	48
5.2.2	Cenário 2 .....	60
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água, tanto em quantidade como em qualidade, está intrinsecamente relacionada à estrutura socioeconômica da sociedade moderna. Além de ser imprescindível para todas as formas de vida, esse recurso natural é insumo básico para o desenvolvimento de praticamente todas as atividades antrópicas. Como estabelecido na Lei 9433 de 1997, que trata da Política Nacional de Recursos Hídricos, a água é um bem de domínio público, dotada de valor econômico.

Apesar de abundante e com capacidade de renovação natural através do ciclo hidrológico, a água encontra-se distribuída de forma irregular no planeta. O contexto atual intensifica ainda mais a pressão sobre os recursos hídricos. A crescente demanda é causada pelo aumento não só da população, mas também do consumo per capita e pelos setores de produção (agricultura e indústria). Além disso, há a degradação dos mananciais pela expansão urbana irregular, falta de saneamento básico e uso inadequado do solo (ANDREOLI; CARNEIRO, 2005).

Uma alternativa visando garantir a disponibilidade hídrica é a construção de reservatórios, que criam ambientes lacustres resultantes do barramento artificial de cursos d'água. Os reservatórios têm diversas finalidades: armazenamento de água para consumo humano, agrícola e industrial, regularização da vazão de rios para contenção de cheias, produção de altura de queda d'água suficiente para geração de energia, sendo ainda possíveis múltiplos usos (CUNHA *et al.*, 2011). De acordo com o *Relatório de Segurança de Barragens 2016*, da Agência Nacional de Águas - ANA (2017), no Brasil estão cadastradas atualmente 22.920 barragens.

A Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no estado do Paraná, apresenta 45% do seu território considerado como Área de Interesse de Mananciais de Abastecimento Público de Água (COORDENAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA - COMEC, 2017). O Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba conta hoje com quatro barragens (Piraquara I e II, Iraí e Passaúna) e uma em construção (Miringuava). Especificamente, o reservatório do Passaúna, objeto de estudo desse trabalho, abastece cerca de 25% da população da RMC, contando com um volume útil de 48,0 hm<sup>3</sup> e área superficial de 9,0 km<sup>2</sup> (SANEPAR, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Passaúna possui cerca de 200 km<sup>2</sup> com a presença de áreas agrícolas e urbanas e, embora protegida por uma Área de Proteção Ambiental (APA), apresenta inadequações quanto ao uso e ocupação do solo. Assim, estudos realizados na bacia verificaram

o aporte de nutrientes no reservatório proveniente, principalmente, do rio Passaúna, já que os demais afluentes possuem uma área de drenagem menor e, consequentemente, vazão reduzida (VEIGA, 2001; XAVIER, 2005).

Diversas características dos próprios reservatórios também acabam comprometendo a qualidade da sua água. Segundo Andreoli e Carneiro (2005), os reservatórios existentes na RMC apresentam baixa profundidade média, elevado tempo de residência e extensa lâmina d'água, tornando-os suscetíveis à eutrofização. Tal fenômeno caracteriza-se pela concentração excessiva de nutrientes na água, basicamente fósforo e nitrogênio, normalmente proveniente da descarga de efluentes urbanos, agrícolas e industriais. Esse enriquecimento da água por nutrientes causa uma grande proliferação de plantas aquáticas, em especial algas, acarretando problemas não só à biota local e ao usuário da água, como também a todo o sistema de tratamento e distribuição (VON SPERLING, 1996).

Desse modo, o manejo adequado dos reservatórios perpassa pela compreensão do contexto ao qual estão inseridos, juntamente com o estudo dos complexos e dinâmicos processos que neles ocorrem e de seus aspectos morfométricos. Nesse sentido, o uso da modelagem configura-se como uma importante ferramenta para a compreensão do comportamento hidrodinâmico e variações espaciais e temporais das substâncias, representando matematicamente as variáveis de interesse por meio de equações diferenciais e resolvendo-as através de técnicas numéricas (PORTO *et al.*, 1991).

Um sistema profissional de modelos computacionais desenvolvido no Brasil e já utilizado em diversos estudos, o SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) é capaz de realizar a modelagem de corpos d'água costeiros e continentais, composto por um modelo de circulação hidrodinâmica tridimensional (3D) e bidimensional na horizontal (2DH), um modelo de transporte euleriano advectivo-difusivo, um modelo de qualidade de água e eutrofização, um modelo de transporte lagrangeano determinístico e outro probabilístico, e um modelo de geração de ondas (ROSMAN, 2017).

Este trabalho apresenta a aplicação dos modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização do SisBaHiA no reservatório do Passaúna. É avaliado o comportamento do fluxo longitudinal e a distribuição espacial das variáveis de estado representativas da qualidade da água, bem como a resposta do reservatório frente ao aumento de carga de fósforo.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é aplicar os modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização do SisBaHiA no reservatório do Passaúna.

Os objetivos específicos são:

- Obter os dados necessários para a modelagem da circulação hidrodinâmica e de qualidade de água, a partir da literatura e de estudos desenvolvidos no reservatório do Passaúna;
- Aplicar os modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização para um ano hidrológico;
- Analisar as distribuições, obtidas no modelo de qualidade de água e eutrofização, das variáveis de estado;
- Verificar o comportamento do reservatório quando submetido a um aumento da carga de fósforo total.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS

A qualidade da água nos reservatórios é influenciada por diversos fatores, desde as condições dos seus principais tributários, que normalmente correspondem à maior parcela do aporte de água, carga de nutrientes e sedimentos, até as interações físicas, químicas e biológicas que ocorrem nesses ambientes lacustres. As suas particularidades morfométricas também são informações de interesse, em especial a profundidade do reservatório, seu comprimento, largura, área da superfície líquida, área de drenagem, volume e comprimento das margens (PORTO *et al.*, 1991).

Uma variável capaz de sintetizar algumas dessas características é o tempo de residência (ou de detenção), isto é, o período necessário para que a água do reservatório seja totalmente renovada, obtido por meio da razão entre o volume do reservatório e a vazão média (THOMANN; MUELLER, 1987). Entretanto, essa maneira de calcular a detenção hidráulica representa uma aproximação com valores constantes, o que torna necessário também a especificação de outros aspectos relacionados, como por exemplo, os padrões de estratificação térmica e química, as variações das cargas afluentes e os processos de transporte e mistura (PORTO *et al.*, 1991).

Em relação às variações horizontais de velocidades no reservatório, o barramento artificial do curso d'água pode causar alterações na circulação hidrodinâmica, formando três regiões distintas: zona lótica, de transição e lântica. A zona lótica, também denominada de região de rio, apresenta-se rasa e com forte influência dos tributários, predominando assim o transporte advectivo. Na região transicional as profundidades são mais elevadas e o fluxo longitudinal é reduzido, características essas maximizadas na zona lântica (região de reservatório) (THORNTON *et al.*, 1990 apud FRANZ, 2010).

A formação dessas zonas também é dependente do tempo de residência do reservatório. Em reservatórios a fio d'água, a baixa detenção pode não ser suficiente para o desenvolvimento de uma região lântica representativa, fazendo com que a qualidade da água seja determinada principalmente pelos afluentes. Já em casos de reservatórios com elevado tempo de residência (da ordem de anos), tais condições são responsáveis por caracterizarem as zonas lótica e de transição como insignificantes comparadas à zona lântica formada, predominando assim, efeitos significativos de atividades biológicas e de fontes provenientes da superfície ou das camadas mais profundas (FISCHER *et al.*, 1979).

Em determinadas épocas do ano, o aumento da temperatura superficial da água do reservatório pela radiação solar absorvida leva a diminuição da sua densidade e, em consequência, propicia a formação de um gradiente térmico. A presença da estratificação térmica pode dar origem a três camadas distintas: o epilímnio, localizado na região superior, com maior presença de luminosidade e maior concentração de oxigênio dissolvido; o metalímnio, que é a faixa intermediária, apresentando uma queda gradual de temperatura onde encontra-se a termoclina (plano que passa no ponto de inflexão do perfil térmico); e o hipolímnio, região mais profunda, com maior estagnação e pouca luminosidade, chegando a atingir a anoxia em alguns casos (VON SPERLING, 1996).

Outros fatores podem agir favorecendo a mistura da coluna d'água, como o vento, que em reservatórios mais rasos pode promover a mistura das camadas, redistribuindo o calor por toda a massa. O processo conhecido como mistura convectiva também pode erodir a estratificação; o resfriamento da água em épocas mais frias torna a fração superficial mais pesada, fazendo com que apresente uma tendência a afundar e desestabilizando assim o perfil de temperatura (FISCHER *et al.*, 1979).

Quanto aos padrões de mistura, os reservatórios podem ser classificados como holomíticos, com uma circulação completa na coluna d'água, meromíticos, com uma circulação apenas na camada superior e uma camada inferior mais estável, ou ainda amíticos, sem nenhuma circulação. Os reservatórios holomíticos se distinguem ainda no número de circulações por ano, podendo ter apenas uma (monomítico), duas (dimítico), várias (polimítico) ou poucas circulações (oligomítico). De acordo com Esteves (2011), em reservatórios subtropicais normalmente ocorre uma circulação (monomítico) durante o inverno.

Os processos biológicos que ocorrem em sistemas aquáticos também condicionam estes a uma compartimentalização em diferentes regiões: litorânea, limnética e pelágica. A faixa litorânea corresponde à transição (ecótono) entre o ecossistema terrestre e o lacustre, tendo diversos nichos ecológicos e cadeias alimentares. A faixa limnética engloba a região onde são encontrados os principais produtores primários, como as algas, as macrófitas aquáticas e algumas espécies de bactérias. Por último, na camada mais profunda, chamada pelágica, predomina a comunidade bentônica, formada principalmente por invertebrados (ESTEVES, 2011).

Tal ordenamento dos organismos presentes no corpo hídrico está condicionado, principalmente, à presença de luz, que secciona o reservatório em zona eufótica (iluminada) e afótica (PORTO *et al.*, 1991). Essa condição está igualmente atrelada à estratificação, tanto térmica quanto química, influenciando na distribuição de nutrientes na coluna d'água. Os

nutrientes, principalmente carbono, nitrogênio, fósforo e sílica, quando não ocorrem de maneira uniforme (eventos de estratificação), fazem com que algumas espécies mais adaptadas em regiões de maior concentração se sobreponham, causando assim um desequilíbrio ecológico (CUNHA *et al.*, 2011).

## 2.2 EUTROFIZAÇÃO

A eutrofização é o enriquecimento dos ecossistemas aquáticos com nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, levando à proliferação excessiva de algas a níveis considerados interferentes nos usos desejáveis da água. A eutrofização de corpos d'água é um processo natural, lento e contínuo, conhecido como envelhecimento de lagos. Esse fenômeno, no entanto, vem sendo acelerado pelas ações antrópicas na bacia hidrográfica, chamado assim de eutrofização artificial. (THOMANN; MUELLER, 1987; ESTEVES, 2011).

De acordo com Andreoli e Carneiro (2005), as principais fontes pontuais (lançamentos concentrados em um determinado local) de poluição e, conseqüentemente, de nutrientes, são provenientes de descargas orgânicas de efluentes domésticos e industriais, tratadas ou não, das próprias estações de tratamento de efluentes, águas percoladas de fossas sépticas e ligações clandestinas de esgotos nas redes pluviais.

O aporte de nutrientes também é causado pelos resíduos oriundos da atividade pecuária e por fertilizantes e agrotóxicos das áreas agrícolas. Nesse caso, os nutrientes são transportados pelo escoamento superficial associado a eventos de precipitação, dependentes também das características topográficas e geológicas da região, bem como dos efeitos de erosão e lixiviação do solo, com o agravante de ocorrer de forma difusa, tornando difícil o seu monitoramento e controle (ANDREOLI; CARNEIRO, 2005).

Nesse sentido, uma importante especificação do corpo d'água é o seu nível de trofia, um indicador do potencial de produção primária, isto é, da quantidade de matéria orgânica sintetizada pelos organismos autotróficos (algas, macrófitas) e quimiotróficos (bactérias nitrificantes). Em condições de baixas taxas de ciclagem de nutrientes e renovação da biomassa fitoplânctônica (algas pluricelulares), ou seja, reduzida produção primária, o reservatório encontra-se no estado oligotrófico, elevando-se para mesotrófico ou eutrófico conforme esses valores aumentam. O estágio de eutrofização em que o corpo d'água se encontra pode apresentar também classificações intermediárias mais acuradas, como ultraoligotrófico, oligomesotrófico, mesoeutrófico, eupolitrófico e hipereutrófico (VON SPERLING, 1996; ESTEVES, 2011).



Fatores morfométricos, hidrológicos e meteorológicos inter-relacionados também afetam as condições de trofia de um corpo d'água. Lagos rasos, segundo Odum (1971), são morfometricamente eutróficos mesmo com baixas concentrações de nutrientes, já que possuem um maior volume de água recebendo radiação solar. Em relação ao tempo de residência do reservatório, o aumento da densidade de organismos é favorecido quanto maior o período em que a água se encontra nesse ambiente (CUNHA *et al.*, 2011).

A caracterização do estado trófico baseia-se em vários indicadores utilizados em conjunto, como o grau de transparência da água, obtida a partir do disco de Secchi, ou a concentração de clorofila *a*, um pigmento que agrega a cor verde dos fitoplânctons, possibilitando a quantificação da sua biomassa. Segundo Porto *et al.* (1991), valores de clorofila *a* inferiores a 4,0 µg/L representam ambientes oligotróficos, entre 4,0 e 10,0 µg/L caracterizam ambientes mesotróficos e valores acima de 10,0 µg/L ambientes eutróficos.

No caso dos nutrientes, o fósforo participa do metabolismo dos organismos aquáticos através do armazenamento de energia e da estrutura da membrana celular, já o nitrogênio atua na formação de suas proteínas (ESTEVES, 2011). Para determinar qual deles é o elemento limitante da produção, deve-se analisar a razão entre ambos (N/P); se o lago for grande e predominar fontes difusas de poluição,  $N/P > 10$  indica limitação por fósforo. Quando se tratar de lagos pequenos e fontes pontuais,  $N/P < 10$  sugere o crescimento de algas controlado pelo nitrogênio (THOMANN; MUELLER, 1987).

Entretanto, esta simples análise está sujeita a variações, já que algumas algas são capazes de fixar o nitrogênio elementar existente em abundância na atmosfera, fazendo com que o processo de eutrofização fique condicionado à concentração de fósforo (CUNHA *et al.* 2011). Desse modo, o fósforo pode ser usado como medida quantitativa do crescimento da comunidade fitoplanctônica, sendo que a faixa de concentração de fósforo total entre 4,0 e 10,0 µg/L está associada ao estado oligotrófico, entre 10,0 e 35,0 µg/L ao mesotrófico e valores acima de 35,0 µg/L a eutrófico (ESTEVES, 2011).

O desequilíbrio da concentração de nutrientes pode levar a surtos incontrolláveis, conhecidos como *bloom* de algas, chegando a formar “tapetes” sobre a superfície da água com uma densa camada de células, causando assim a morte de algas situadas nas regiões inferiores do corpo d'água ao impedir a penetração da energia luminosa. Essa floração das algas e o consequente aumento da decomposição da matéria orgânica causam uma significativa depleção de oxigênio, com a morte de seres aquáticos e liberação de gases fétidos do sedimento de fundo, como gás sulfídrico e metano (CUNHA *et al.*, 2011).

Ocorre também o encarecimento do processo de tratamento de água, já que a grande quantidade de algas em reservatórios de abastecimento pode acarretar o entupimento dos filtros nas estações, além de conferir sabor e odor desagradáveis à água, alterar sua cor, contribuir para aumentar a corrosão nas redes de distribuição, propiciar a formação de compostos organoclorados e aumentar o pH. Um dos maiores problemas, no entanto, envolve a saúde pública, devido à produção pelas cianobactérias (uma espécie fitoplancônica) de substâncias potencialmente tóxicas, chamadas cianotoxinas, que apresentam riscos à saúde humana (ANDREOLI; CARNEIRO, 2005).

De modo geral, o processo de eutrofização traz várias consequências para o equilíbrio do ecossistema aquático e para seus diferentes usos, podendo ser considerado uma forma de poluição (CUNHA *et al.*, 2011). A fim de acabar ou, pelo menos, minimizar os problemas decorrentes da eutrofização, pode-se adotar estratégias agrupadas em medidas de controle e corretivas. Também chamadas de profiláticas, as medidas de controle têm a sua atuação na bacia hidrográfica como um todo, visando reduzir as cargas alóctones geradas pela ocupação urbana, agrícola e industrial. Já as medidas corretivas (terapêuticas) objetivam restabelecer o equilíbrio do lago eutrofizado com a diminuição das cargas autóctones, isto é, internas ao ambiente (THOMANN; MUELLER, 1987; VON SPERLING, 1996).

## 2.3 MODELAGEM AMBIENTAL

O uso de modelos matemáticos é cada vez mais recorrente em estudos e projetos relacionados a recursos hídricos, auxiliando seu gerenciamento ao possibilitarem uma visão ampla da dinâmica dos processos nesses sistemas ambientais. Para tanto, permitem, de acordo com Rosman (2017), integrar informações espacialmente dispersas, interpretar medições feitas em estações pontuais, interpolar informações para regiões onde não se têm dados, além de prever situações simulando cenários.

A obtenção de informações de qualidade através dessas ferramentas perpassa, contudo, pelo entendimento por parte do modelador da essência do fenômeno de interesse, bem como dos fundamentos do processo de modelagem, limitações e potencialidades do modelo utilizado. Por se tratarem de aproximações da realidade, faz-se necessário identificar os parâmetros mais relevantes para a aplicação do modelo, uma vez que o grau de complexidade deste está associado à confiabilidade dos seus resultados. Nesse sentido, é importante também realizar a calibração do modelo, ajustando-o a um conjunto de dados pré-definido (FRANZ, 2010).

A modelagem matemática de corpos d'água expressa “leis” físicas e conceituais em termos de equações diferenciais e condições de contorno adequadas, tendo como base os princípios da conservação da massa, quantidade de movimento, energia e massa de soluto para a representação geral dos processos envolvidos. Desse modo, devido à dificuldade da solução analítica dada pelas variáveis englobadas, são comumente utilizados métodos numéricos na resolução dos cálculos requeridos (ROSMAN, 2017).

A escolha da dimensão espacial do modelo depende do objeto de estudo, do nível de detalhe exigido e da disponibilidade computacional. Modelos em três dimensões realizam simulações do padrão de circulação de forma completa, representando as interações das zonas profundas e próximas à margem e, conseqüentemente, sua influência na qualidade da água. No caso de reservatórios com pouca variação vertical, baixa profundidade e coluna d'água bem misturada, pode-se empregar modelos bidimensionais, que demandam menor tempo e custo computacional (ALMEIDA; EIGER; ROSMAN, 1993). Deus *et al.* (2013) utilizaram um modelo de qualidade da água bidimensional (CE-QUAL-W2) para avaliar o impacto da piscicultura no reservatório de Tucuruí, no Pará. Ha *et al.* (2014) empregaram um modelo bidimensional de transporte difusivo para estimar a poluição da água por algumas substâncias contaminantes no lago Thanh Nhan, na cidade de Hanói, Vietnã.

O transporte de grandezas físicas no ambiente lântico envolve processos de advecção, associados às velocidades do escoamento, e de difusão, que corresponde ao movimento na escala não resolvível, podendo ser em nível molecular ou turbulento (CHAPRA, 1997). Há também os processos de dispersão, representando a perda da advecção diferenciada ao longo da direção vertical e/ou horizontal (CUNHA *et al.*, 2011). O transporte pode apresentar uma descrição euleriana, lagrangeana ou euleriana-lagrangeana. A primeira abordagem consiste em aplicar os balanços correspondentes em volumes de controle fixos no espaço, com o interesse na evolução temporal da distribuição espacial das propriedades do meio. Já a descrição lagrangeana apresenta um sistema de referencial móvel, representado por partículas que se movimentam com o escoamento, como plumas ou manchas de contaminantes. Por último, no caso dos modelos eulerianos-lagrangeanos, tem-se a combinação do método lagrangeano na porção advectiva e do euleriano nos termos restantes (FISCHER *et al.*, 1979).

Os modelos de circulação hidrodinâmica são usados para a determinação do campo de velocidades, um conjunto de dados de entrada fundamental para os modelos de transporte de escalares que consideram o contaminante passivo. A variável de estado modelada é dita ativa quando a sua concentração interfere na circulação hidrodinâmica, já em situações em que não é capaz de gerar forças relevantes para influir no movimento da água, ela é chamada de passiva

e a circulação apresenta-se desacoplada do estudo do transporte. Pode ser classificada também quanto à sua reatividade com o meio, em conservativa ou não conservativa se sofrer ou não, respectivamente, reações cinéticas de produção ou consumo (ROSMAN, 2017). As reações podem ser classificadas conforme sua ordem: as reações de ordem zero são aquelas que ocorrem a uma taxa constante, as de primeira ordem representam taxas de transformação diretamente proporcionais à quantidade do componente em si e, nas de ordem dois, as taxas equivalem ao quadrado do componente (VESILIND; MORGAN, 2011).

Nos modelos de transporte chamados de modelos de qualidade de água, as fontes e sumidouros de massa podem ser modelados considerando o ciclo biogeoquímico do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo, além da biomassa de fitoplâncton e zooplâncton e o transporte de calor. (ROSMAN, 2017). Dentre os modelos de qualidade da água encontrados na literatura que podem ser aplicados em lagos e reservatórios, destaca-se o MOHID (Modelo Hidrodinâmico), desenvolvido pelo Instituto Superior Tecnológico da Universidade de Lisboa, capaz de simular processos físicos e bioquímicos na coluna d'água e no sedimento, além das interações entre estes compartimentos. Pode ser usado na escala longitudinal (1D), na bidimensional em planta (2DH) ou tridimensionalmente, sendo o método de volumes finitos utilizado na discretização espacial. O módulo de qualidade de água simula os ciclos do oxigênio, nitrogênio, fósforo e sílica, bem como os organismos fitoplanctônicos, zooplânctons e bactérias (MARETEC, 2017).

O *Delft 3D*, modelo criado pela *Delft Hydraulics* da Holanda, funciona de forma multidisciplinar, onde o modelo principal apresenta módulos de simulações de circulação, ondas, transporte de sedimento, parâmetros de qualidade da água e evolução morfológica. Estes módulos trabalham usando uma mesma interface, interagindo entre si através de “arquivos de comunicação”, sendo que os resultados gerados são possíveis de serem utilizados para análises em outras simulações dentro do próprio programa (WL | DELFT HYDRAULICS, 2014).

Outro modelo adotado em diversos estudos e projetos envolvendo modelagem de corpos d'água continentais e costeiros é o SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), escolhido para ser usado neste trabalho. Desenvolvido em 1987 pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro, tem sido desde então constantemente aperfeiçoado (ROSMAN, 2017).

Franz (2010) utilizou o SisBaHiA no reservatório do Iraí, definindo uma nova variável (zooplâncton herbívoro) e modificando a dinâmica do fitoplâncton no modelo de qualidade de água e eutrofização. Nocko (2011) também fez uso do SisBaHiA na modelagem de um

reservatório artificial, a fim de avaliar a utilidade dessa ferramenta ao licenciamento ambiental. Cunha *et al.* (2011) realizou um estudo no reservatório Rio Verde (PR), caracterizando a circulação hidrodinâmica e o transporte de nutrientes no reservatório. Corrêa (2013) aplicou o MQA do SisBaHiA no mesmo local (Rio Verde), com o objetivo de analisar o efeito de eutrofização para diferentes condições de cargas de fósforo orgânico e inorgânico.

### 2.3.1 SisBaHiA - Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental

O SisBaHiA é constituído por diferentes modelos: modelo de circulação hidrodinâmica, de transporte euleriano, qualidade de água e eutrofização, transporte de sedimentos e evolução morfológica do fundo, transporte lagrangeano – determinístico e probabilístico, campo próximo para emissários e fontes pontuais, geração de ondas, propagação de ondas e análise e previsão de marés (ROSMAN, 2017).

Neste trabalho são usados os modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização, mostrados em detalhes a estrutura e composição. Para maiores informações quanto às equações matemáticas representativas dos processos de transformação e das variáveis de estado utilizadas, pode-se consultar a Referência Técnica do SisBaHiA (ROSMAN, 2017).

### 2.3.2 Modelo de circulação hidrodinâmica

O SisBaHiA dispõe de um modelo de circulação hidrodinâmica para modelagem de corpos d'água com superfície livre. É composto por dois módulos: um bidimensional na horizontal (2DH), onde são calculadas a elevação da superfície livre e velocidade de correntes promediadas na vertical; e outro tridimensional, totalmente numérico ou analítica-numérico (ROSMAN, 2017).

A estratégia de discretização espacial horizontal é otimizada para corpos d'água naturais, permitindo representação de batimetrias e geometrias complexas e irregularidades, já que o tamanho dos elementos é adaptado aos contornos do domínio. É potencialmente de quarta ordem e feita, preferencialmente, via elementos finitos quadrangulares biquadráticos, uma vez que oferecem maior flexibilidade e acurácia; a discretização vertical da coluna d'água se dá por meio de diferenças finitas com transformação sigma. Na discretização temporal é utilizado um esquema implícito de diferenças finitas com erro de truncamento de segunda ordem (ROSMAN, 2017).

No modelo de circulação hidrodinâmica é preciso definir as condições de contorno do domínio de estudo, sendo seus limites representados pelos contornos abertos, com a elevação da superfície livre (ou níveis de água) como principal forçante. Já os chamados contornos fechados, ou de terra, configuram as margens e seções de rios ou canais afluentes que estejam incluídos no domínio de modelagem. Compreendem, portanto, a limitação física do sistema, onde são estabelecidos valores de vazões ou velocidades. No módulo tridimensional são identificados também contornos verticais, dados pela velocidade zero no fundo e pela estimativa da tensão de atrito na superfície livre a partir das velocidades do vento (ROSMAN, 2017).

O modelo permite ainda uma boa acurácia na representação física do leito ao possibilitar a especificação pontual do tipo de material de fundo, usando para isso interpolação biquadrática para valores de profundidade e rugosidade equivalente do fundo. Tal realismo, de acordo com Rosman (2017), é extremamente relevante para simulações de escoamentos em regiões costeiras, baías, estuários, rios e lagos, diminuindo discrepâncias entre resultados medidos e modelados e minimizando o processo de calibração.

### 2.3.3 Modelo de qualidade de água e eutrofização

O modelo de qualidade de água e eutrofização (MQA) do SisBaHiA possui a mesma base numérica do modelo euleriano de transporte advectivo-difusivo integrado na vertical. Desse modo, pode ser aplicado tanto para transporte bidimensional, quanto em camadas selecionadas, sendo a equação de advecção-difusão resolvida de forma separada para cada variável de estado, formando três parcelas: transporte advectivo, transporte difusivo e processos de transformação (ROSMAN, 2017).

Por ser resolvida para escalares passivos, a modelagem da circulação e do transporte configuram-se como problemas desacoplados. Entretanto, para que ocorra uma boa simulação do MQA é necessário o conhecimento da circulação hidrodinâmica, além dos dados meteorológicos de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, bem como as condições iniciais e de contorno das variáveis de estado consideradas. (ROSMAN, 2017).

O modelo avalia 11 variáveis de estado: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), temperatura da água, salinidade, compostos de nitrogênio (nitrogênio orgânico, amônia e nitrato) e de fósforo (orgânico e inorgânico), além da biomassa de fitoplâncton e zooplâncton (ROSMAN, 2017).

Os processos de transformação das variáveis de estado são modelados para cada variável usando reações de zero ordem, de primeira ordem e de saturação, sendo que as taxas da maioria das reações químicas e biológicas são corrigidas para diferentes temperaturas (ROSMAN, 2017).

Os processos físicos, químicos e biológicos para cada variável de estado, com exceção da temperatura e salinidade, são descritos a seguir (ROSMAN, 2017):

- Clorofila *a* (fitoplâncton): crescimento, respiração, excreção, mortalidade não-predatória, herbivoria e sedimentação.
- Zooplâncton Herbívoro: crescimento, respiração, excreção, mortalidade não-predatória e predação.
- Nitrogênio Orgânico Total: excreção de fitoplâncton e de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton e de zooplâncton, amonificação, sedimentação e detritos da herbivoria.
- Amônia: respiração de fitoplâncton e de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton e de zooplâncton, amonificação, nitrificação e crescimento de fitoplâncton.
- Nitrato: nitrificação, desnitrificação e crescimento de fitoplâncton.
- Fósforo Orgânico: excreção de fitoplâncton e de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton e de zooplâncton, detritos da herbivoria, mineralização e sedimentação.
- Fósforo Inorgânico: respiração de fitoplâncton e de zooplâncton, mortalidade não-predatória de fitoplâncton e de zooplâncton, crescimento de fitoplâncton, mineralização e precipitação.
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): decomposição, sedimentação, detritos da herbivoria, mortalidade não-predatória de fitoplâncton e de zooplâncton.
- Oxigênio Dissolvido (OD): respiração de fitoplâncton e de zooplâncton, reaeração, decomposição, nitrificação, fotossíntese e demanda de oxigênio no sedimento.





Prefeitura Municipal, 2003). A vegetação local é composta por campos naturais (campos secos e várzeas), floresta ombrófila mista e vegetação secundária, com altitudes variando de 875 m a 1050 m (EMBRAPA, 1984; BIGARELLA, 1985).

Com o intuito de preservar a bacia, em 1991 foi instituída a Área de Proteção Ambiental denominada APA Estadual do Passaúna, através do Decreto Estadual nº 458, entendendo-se por 16 mil ha, desde as nascentes do rio Passaúna até a barragem do reservatório. Desse modo, a APA representa, juntamente com o seu Zoneamento Ecológico-Econômico, concluído em 1995 e revisado em 2001, um importante instrumento de controle do uso do solo e de proteção da qualidade da água, imprescindível já que o reservatório do Passaúna é considerado um dos principais mananciais da RMC (MEGER, 2007; TAMANINI, 2008).

No entanto, mesmo tendo prioridade na questão da preservação, a região tem sofrido com ações antrópicas que acabam por comprometer a qualidade ambiental da bacia hidrográfica como um todo. De acordo com Xavier (2005), desde a década de 80 foram observados problemas, com a ocorrência de ocupações irregulares nas margens dos rios, presença de indústrias sem tratamento de efluentes e áreas agrícolas sem métodos de manejo adequados. Ainda, o antigo lixão da Lamenha Pequena representa uma possível fonte de contaminação do rio Passaúna, já que está situado a aproximadamente 150 metros da sua margem esquerda, à montante do reservatório, podendo o seu efluente atingir o rio. Esse lixão, posteriormente denominado de aterro controlado, foi utilizado por 18 anos, sendo desativado em 1989. Recebia todos os resíduos de Curitiba e RMC numa área de cerca de 100.000 m<sup>2</sup>.

Em termos de abastecimento de água, praticamente 100% dos loteamentos da bacia recebem água tratada, sendo parte proveniente do reservatório do Passaúna e uma parcela servida pelo aquífero Karst. Dados referentes ao ano de 2004 mostram que apenas 26% da população residente na bacia têm coleta de esgoto (SANEPAR, 2004). O serviço de coleta de lixo domiciliar atende, de modo geral, toda a região. A drenagem urbana apresenta um elevado coeficiente de escoamento superficial, devido às altas inclinações dos terrenos e a composição do solo da bacia, predominantemente, argiloso (XAVIER, 2005).

Busch (2009) considerou a poluição pontual por canalizações irregulares de esgotos como principal fonte do aporte de nutrientes para o reservatório. Sauniti, Fernandes e Bittencourt (2004) verificaram um aumento em torno de 13% das áreas ocupadas por agricultura, pastagem, cultura permanente e desmatamento na comparação do uso e ocupação do solo entre os anos de 1991 e 2000, provocando e acelerando o processo erosivo com a predominância de cobertura vegetal mais baixa, além da redução da ordem de 6% nas áreas de preservação ocupadas por floresta aluvial, campo, reflorestamento e várzea. Tal fato é

constatado por Xavier (2005) ao afirmar que, dentre as atividades antrópicas existentes na bacia, a agricultura é a mais representativa, ocupando aproximadamente 63 km<sup>2</sup>.

A malha viária atual da região tem alavancado o desenvolvimento industrial e de serviços na bacia, o que representa, entretanto, riscos de contaminação das águas por acidentes envolvendo cargas perigosas, tendo em vista o grande fluxo de caminhões principalmente na BR 277, além do potencial de geração de poluentes pelo tráfego de caminhões. De uma maneira geral, os impactos da ocupação urbana não são ainda de grande magnitude, porém, por se tratar de uma área de manancial, a densidade demográfica deve ser mantida baixa, havendo também a necessidade de medidas visando o tratamento integral dos esgotos domésticos e o incentivo a adoção de práticas conservacionistas na agricultura (DIAS, 1997; XAVIER, 2005).

### 3.2 RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA

O reservatório do Passaúna, resultante do represamento do rio de mesmo nome, começou a ser represado em 1990 e apresentou o primeiro extravasamento em fevereiro de 2001, sendo sua barragem construída entre os anos 1985 e 1989. Localizado a oeste de Curitiba na divisa com os municípios de Araucária e Campo Largo, está inserido na bacia hidrográfica do rio Passaúna entre os paralelos 25° 26' – 25° 32' Sul e os meridianos 49° 23' – 49° 21' Oeste (SAUNITI; FERNANDES; BITTENCOURT, 2004). A Figura 2 apresenta uma vista panorâmica do barramento do rio Passaúna.

Figura 2 - Vista panorâmica do barramento do rio Passaúna

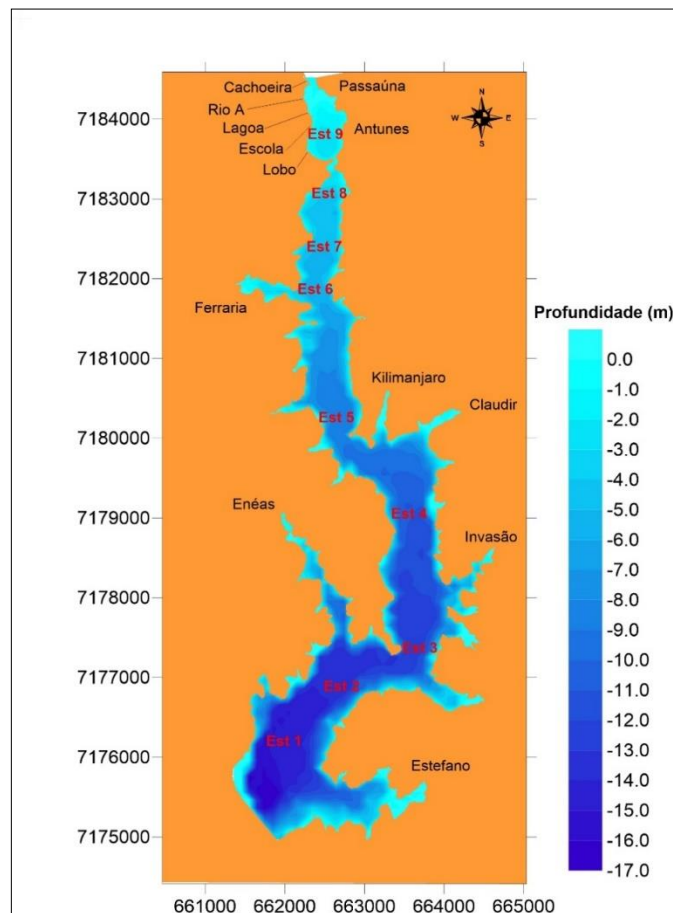


Fonte: SANEPAR (2017)

Considerado o segundo maior reservatório da Região Metropolitana de Curitiba, é menor apenas que o reservatório do Iraí em termos de volume útil; possui 48,0 hm<sup>3</sup> de volume útil e 59,0 hm<sup>3</sup> de volume total. Abastece aproximadamente 25% da população da RMC, um pouco mais de 800.000 habitantes (população estimada para 2013 segundo o censo de 2010 do IBGE), mais especificamente os municípios de Curitiba, Araucária, Campo Magro e Campo Largo, com a produção de cerca de 2 mil litros de água por segundo (SANEPAR, 2013).

O reservatório dispõe de uma área superficial de aproximadamente 9,0 km<sup>2</sup>, cota da soleira do vertedouro de 887,0 m, profundidade média de 6,5 m, alcançando 15,0 m em determinados locais, e tempo de residência estimado de 292 dias (CARNEIRO; KELDERMAN; IRVINE, 2016). A batimetria do reservatório, obtida por Hilgert e Sotiri (2017) com o uso de um ecobatímetro, é apresentada na Figura 3, onde também estão identificados os principais tributários.

Figura 3 - Batimetria, indicação dos principais afluentes e localização aproximada das estações onde foram realizados os perfis de temperatura, em fevereiro de 2017, no reservatório do Passaúna



Fonte: Adaptado de Hilgert e Sotiri (2017)

Como é possível observar na Figura 3, o reservatório recebe um conjunto de rios, dos quais se destacam o Passaúna e o Cachoeira. Em termos de vazão afluente, a maior contribuição vem do próprio rio Passaúna, representando 65,6 % dentre os principais tributários do reservatório, uma vez que a sua área de drenagem é igualmente significativa, cerca de 83 km<sup>2</sup> (VEIGA; DZIEDZIC, 2010).

Os resultados obtidos por Veiga e Dziedzic (2010) para carga anual de nitrogênio e fósforo totais são mostrados na Tabela 1, onde é possível notar a grande contribuição, além do rio Passaúna (93.904 kg/ano de nitrogênio total e 5.789 kg/ano de fósforo total), do rio Invasão em comparação aos demais. Este rio, mesmo apresentando umas das menores áreas de drenagem entre os afluentes, 0,60 km<sup>2</sup>, apresenta uma carga de nitrogênio e fósforo bastante elevada.

Tabela 1 - Vazão média, carga de nitrogênio total e fósforo total para os rios afluentes ao reservatório do Passaúna

Afluente	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)	Uso principal do solo	Fluxo de massa de nitrogênio (kg/ano)	Fluxo de massa de fósforo (kg/ano)
Rio Passaúna	82,73	1,362	Urbano/agricultura	93.904	5.789
Rio Cachoeira	10,82	0,178	Urbano/agricultura	19.157	2.038
Rio A	3,14	0,052	Agricultura	1.635	162
Rio Lagoa	0,67	0,011	Agricultura	784	112
Rio Escola	0,42	0,007	Urbano/agricultura	284	108
Rio Lobo	0,94	0,015	Urbano/agricultura	768	18,2
Rio Ferraria	11,07	0,182	Agricultura	7.396	861
Rio Enéas	2,53	0,042	Agricultura	999	49
Rio Antunes	4,01	0,066	Floresta/agricultura	1.905	71
Rio Claudir	2,04	0,034	Urbano/agricultura	108	23
Rio Kilimanjaro	1,16	0,019	Floresta/agricultura	601	18
Rio Invasão	0,60	0,010	Urbano/agricultura	8.060	772
Rio Estefano	5,90	0,097	Floresta/agricultura	1.794	143

Fonte: Adaptado de Veiga e Dziedzic (2010)

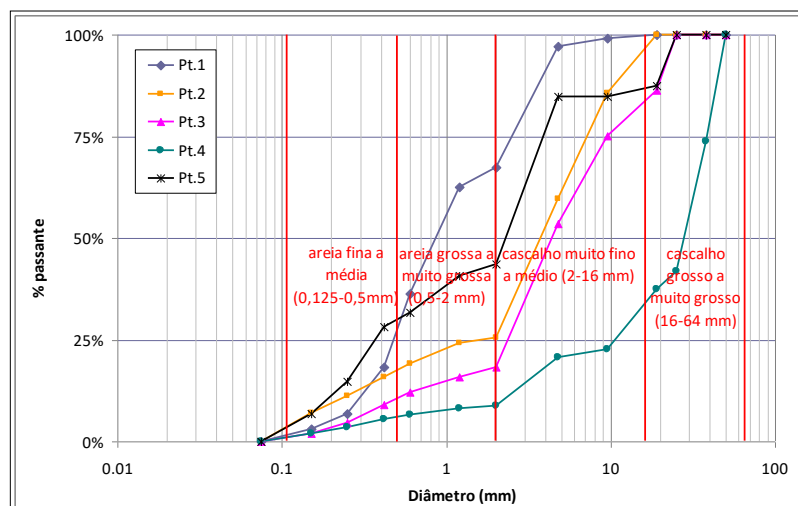
Quanto à caracterização dos sedimentos do reservatório e o grau de assoreamento associado, Sauniti, Fernandes e Bittencourt (2004) constataram que o comportamento hídrico da região e a deposição de material no interior do reservatório foram alterados devido ao aumento da agricultura e desmatamento em áreas com solos de perfis mais imaturos. Salgado e Rauén (2014) observaram que os sedimentos do reservatório do Passaúna são, no geral, mais grossos e não apresentam frações coesivas, o que caracteriza pouca capacidade de adsorção de matéria orgânica e contaminantes. Para tanto, a partir de amostras feitas em cinco pontos (Figura 4), obtiveram a distribuição granulométrica dos sedimentos (Figura 5).

Figura 4 - Localização dos pontos amostrais para a distribuição granulométrica do reservatório do Passaúna



Fonte: Salgado e Rauén (2014)

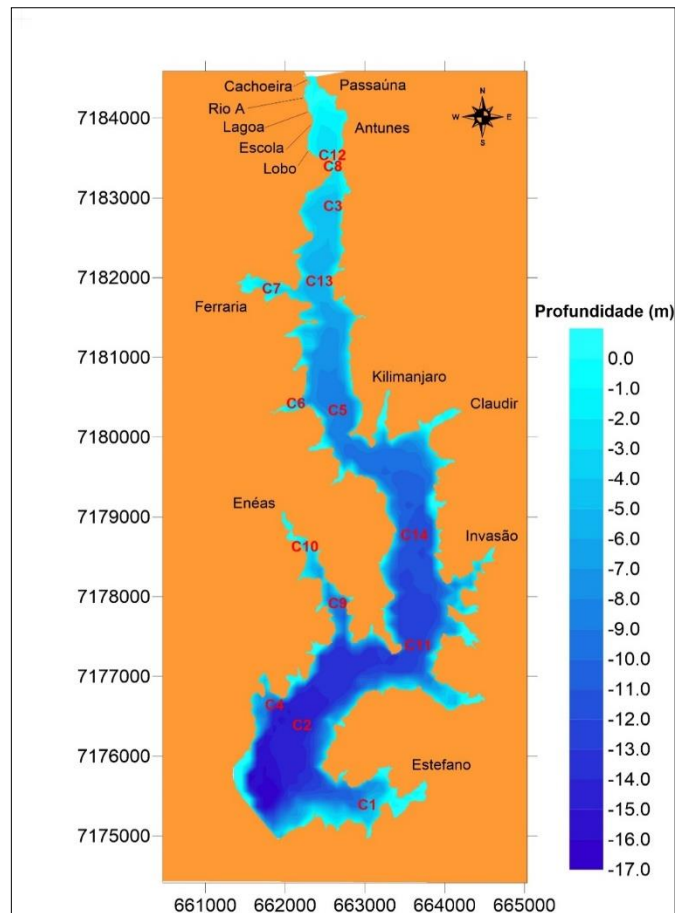
Figura 5 - Distribuições de tamanho de grão das amostras de sedimento no reservatório do Passaúna



Fonte: Salgado e Rauén (2014)

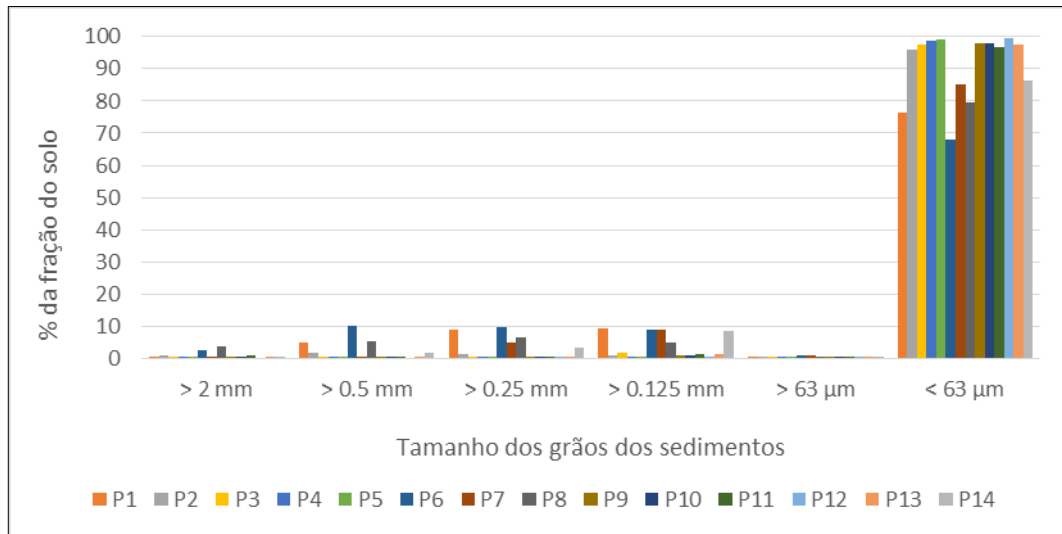
Dados adquiridos por Hilgert e Sotiri (2017) evidenciaram, em contrapartida, a predominância de sedimentos com tamanho de grão dentro dos limites de areia fina (0,06 mm a 0,2 mm). Na Figura 6 é mostrado a localização das estações onde foram realizadas as amostras e a Figura 7 apresenta a porcentagem das frações de solo pelo tamanho dos grãos dos sedimentos do reservatório, podendo-se observar que na maioria dos pontos medidos, mais de 80% da fração do grão é menor que 0,063 mm.

Figura 6 - Localização dos pontos amostrais para avaliação da porcentagem das frações de solo pelo tamanho dos grãos dos sedimentos do reservatório do Passaúna



Fonte: Adaptado de Hilgert e Sotiri (2017)

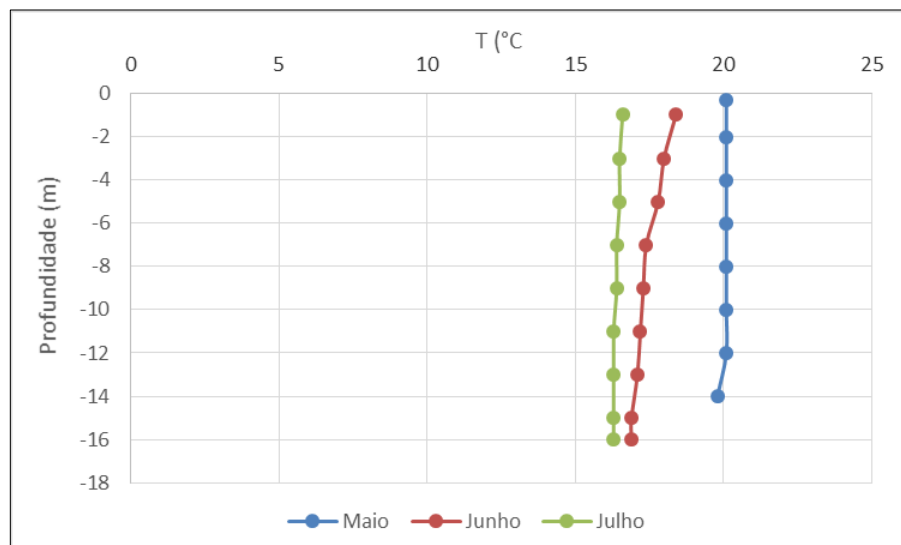
Figura 7 - Porcentagem das frações de solo pelo tamanho dos grãos dos sedimentos do reservatório do Passaúna



Fonte: Adaptado de Hilgert e Sotiri (2017)

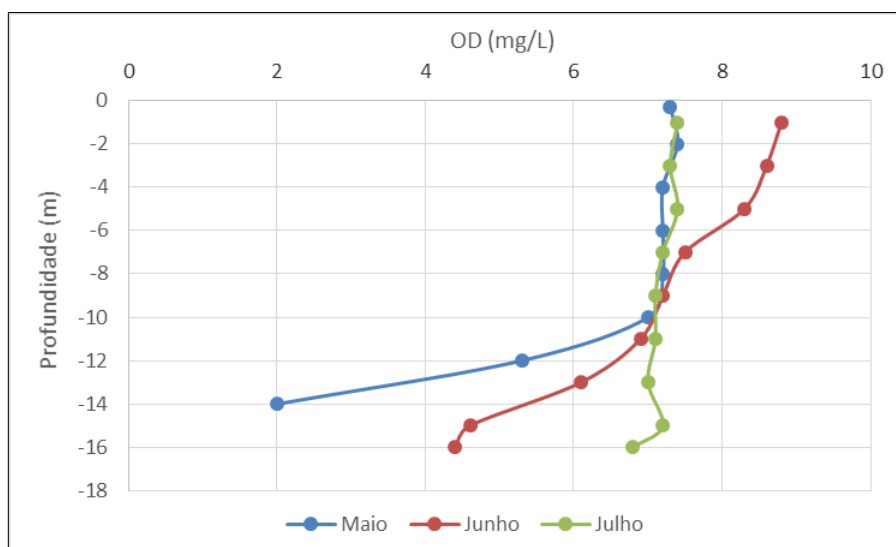
Em relação aos perfis de temperatura do reservatório, Rauen (2014) realizou medições no período de maio a julho (Figuras 8), verificando também o comportamento do oxigênio dissolvido (Figuras 9). Para tanto, fez uso de uma sonda YSI no ponto 49°23'27"O e 25°31'35"S, o qual pode ser considerado como equivalente à Est 1, mostrada na Figura 3. Observando os dados, é possível perceber que a temperatura ficou misturada na coluna d'água nos três meses. Já o OD apresentou uma estratificação mais forte em maio e moderada em junho, possivelmente por se tratar de um período em que seu comportamento reflete ainda a estratificação ocorrida nos meses mais quentes; em julho o OD mostrou-se uniforme verticalmente.

Figura 8 - Perfis de temperatura do reservatório do Passaúna nos dias 10/05, 14/06 e 19/07 de 2014



Fonte: Adaptado de Rauen (2014)

Figura 9 - Perfis de OD do reservatório do Passaúna nos dias 10/05, 14/06 e 19/07 de 2014



Fonte: Adaptado de Rauen (2014)

Polli, Silva e Rauen (2017) constataram a ocorrência de estratificação durante o verão (Figura 10) ao realizarem monitoramento no mês de fevereiro (15/02/2017). A localização aproximada das estações onde foram efetuadas as medições estão apresentadas na Figura 3. Os perfis térmicos expressam a compartimentalização do reservatório, já que estação 1 encontra-se em uma região de maior profundidade, característico da zona lântica e mais suscetível à estratificação em relação aos pontos localizados à montante (Est 7, 8 e 9).

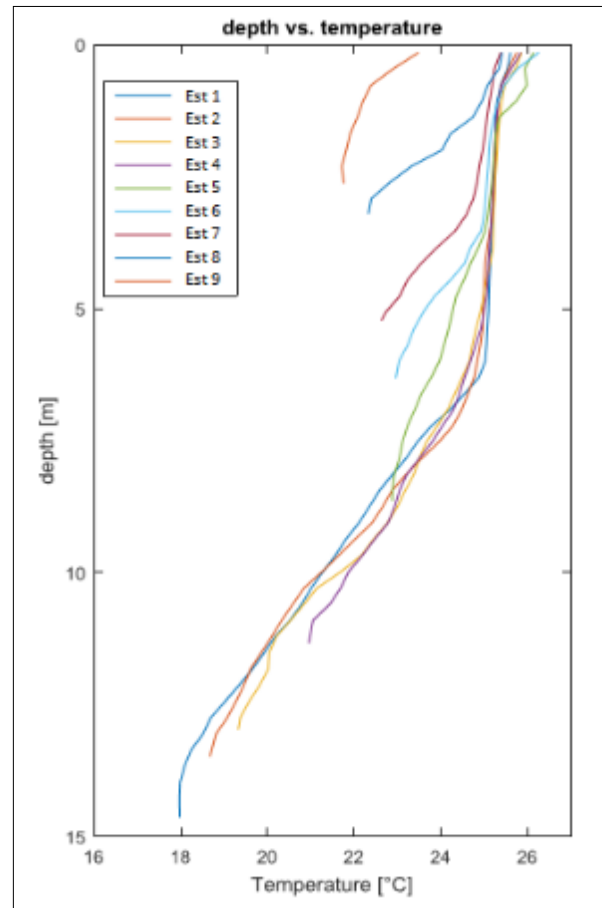
Embora os dados apresentados sejam escassos para uma análise da sazonalidade do comportamento térmico do reservatório, é possível perceber o fenômeno acentuado de estratificação no verão, enquanto que no outono e no inverno constatou-se a coluna d'água bem misturada. Tais circunstâncias também foram verificadas por Ferreira e Cunha (2013) na simulação numérica desenvolvida para a transferência de calor no reservatório Rio Verde, bacia hidrográfica vizinha do Passaúna, revelando que o Verde é um lago monomítico quente, isto é, com a presença de estratificação térmica nos meses mais quentes e uma circulação completa por ano.

Dias (1997) já havia classificado o reservatório do Passaúna como um lago monomítico quente, observando que a estratificação térmica é acompanhada de estratificação química e que, durante esse período, há forte depleção de oxigênio decorrente das cargas autóctones provenientes da vegetação alagada na formação do reservatório. Constatou ainda que o elevado tempo de residência e as baixas profundidades minimizam a capacidade de depuração das cargas poluidoras provenientes da bacia de drenagem, trazendo consequências negativas à qualidade da água. Contudo, a configuração dendrítica do reservatório favorece a



proteção do seu corpo central frente essas cargas, considerando que as áreas litorâneas alagadas acumulam a matéria orgânica e absorvem nutrientes, principalmente pelas macrófitas existentes nesses locais.

Figura 10 - Perfil térmico do reservatório do Passaúna em 15/02/2017



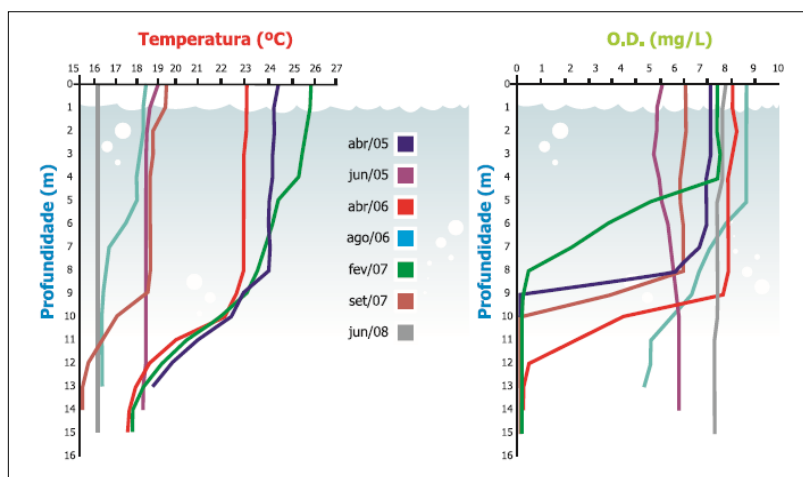
Fonte: Adaptado de Polli, Silva e Rauen (2017)

No ano de 1997, com o reservatório do Passaúna recentemente formado, era difícil a definição do seu estado trófico, sendo verificado por Dias (1997) uma tendência para mesotrófico. Xavier (2005) chegou à semelhante conclusão, com o reservatório em vias de eutrofização, havendo, portanto, a necessidade da adoção de medidas de saneamento profilático, com a redução do aporte de nutrientes de fontes pontuais e não pontuais.

Ainda, segundo o monitoramento realizado pelo Instituto Ambiental do Paraná – IAP (2009), de janeiro de 1999 a junho de 2008, confirma as características mesotróficas do reservatório do Passaúna, observando os processos de estratificação térmica durante os meses mais quentes e uma circulação no inverno (Figura 11). A Figura 12 apresenta os perfis de temperatura e OD medidos pelo IAP na Estação Barragem (25°31'7.7"S e 49°23'2.03"O), região

lênica, larga e profunda do reservatório. É possível observar um déficit de oxigênio nas camadas mais profundas, levando até à anoxia, e valores altos na superfície, decorrente do processo de reaeração e, possivelmente, da produção do fitoplâncton na zona eufótica. Em relação à presença de fitoplânctons no reservatório do Passaúna, foi detectada uma pequena concentração de células de cianobactérias (algas azuis) ao longo do período monitorado, apresentando valores abaixo de 10 mil cél/ml, sendo que as espécies mais frequentes não eram consideradas potencialmente tóxicas. O reservatório do Passaúna no ano de 2009 apresentou-se como moderadamente degradado, dentro ainda dos limites considerados aceitáveis para ser utilizado como manancial de abastecimento (IAP, 2009).

Figura 11 - Perfis de temperatura e OD no reservatório do Passaúna entre abril de 2005 e junho de 2008



Fonte: Instituto Ambiental do Paraná (2009)

### 3.2.2 Estudos anteriores no reservatório do Passaúna

A construção do reservatório do Passaúna para fins de abastecimento público motivou a realização, pelo IAP em Convênio de Cooperação Técnica Brasil Alemanha, do *Estudo de Caso do Reservatório do Passaúna*. Os relatórios técnicos (SUREHMA, 1990 e 1991 apud DIAS, 1997) foram elaborados por uma equipe multidisciplinar, tendo como foco o estudo integrado da bacia hidrográfica do rio Passaúna. Posteriormente, Dias (1997) fez um levantamento de informações de macroescala na bacia, além de realizar o estudo limnológico do reservatório e de seus principais rios tributários.

Smaha e Gobbi (2003) desenvolveram e implementaram um modelo unidimensional para simular a eutrofização do reservatório, com destaque para a concentração de clorofila *a*. Foi possível concluir que as concentrações de clorofila *a* foram elevadas, dados os níveis de

lançamento de carga nos afluentes. Xavier (2005) avaliou a influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade da água do reservatório. Os dados obtidos indicaram que os rios contribuintes encontram-se bastante impactados e que o reservatório do Passaúna pode ser classificado como mesotrófico.

Veiga e Dziedzic (2010) estimaram as cargas de nutrientes do reservatório utilizando o *software* FLUX, a partir de dados medidos e considerando para o cálculo do coeficiente de exportação o uso predominante do solo. Salgado e Rauen (2014) fizeram a caracterização física dos sedimentos do reservatório, por meio da determinação da distribuição de tamanhos de grão e massa específica. Siqueira (2014) procurou estimar o aporte de sedimentos no reservatório criando diferentes cenários em função da curva chave de sedimentos, chegando a uma variação de 0,104 hm<sup>3</sup> a 0,155 hm<sup>3</sup> de volume médio.

Costa, Alcantara e Rauen (2015) realizaram um diagnóstico da qualidade da água do reservatório incluindo o seu risco de eutrofização, com base em uma série histórica de dados e novas medições. Os resultados demonstraram que o reservatório apresenta uma boa qualidade da água e que, em 84% das campanhas, o estado trófico do reservatório oscilou entre oligotrófico e mesotrófico, detectando o risco de eutrofia somente em 8% das amostras.

No estudo de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) foram calculados o balanço hídrico e o balanço de fósforo no reservatório do Passaúna para os anos de 2010 a 2012, avaliando a troca desse nutriente entre a interface água-sedimento. De acordo com os resultados, as cargas de fósforo no reservatório são provenientes, predominantemente, dos tributários da região, havendo também um aumento da contribuição através de entradas de águas subterrâneas. Ainda, foi observado que, em média, 30% do fósforo que entra no reservatório fica retido nos sedimentos e se esta carga retornar para a água, poderá levar a depleção do oxigênio dissolvido.

Hilgert e Sotiri (2017) avaliaram o uso de uma ecossonda como ferramenta de gerenciamento de reservatórios, ao realizarem medições hidroacústicas para determinação da batimetria (topografia de fundo) do reservatório do Passaúna, bem como as características dos sedimentos de fundo. Polli, Silva e Rauen (2017) modelaram o transporte de calor no reservatório, verificando a presença de estratificação térmica em alguns períodos do ano (meses quentes).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de analisar a distribuição das variáveis de estado representativas da qualidade da água no reservatório do Passaúna, foi implementado o modelo de qualidade de água e eutrofização (MQA) do SisBaHiA. Para tanto, fez-se necessário, inicialmente, o estudo da circulação hidrodinâmica do corpo hídrico com a aplicação do modelo de circulação hidrodinâmica. Ambos os modelos são bidimensionais, uma vez que o interesse principal do trabalho é o conhecimento da distribuição longitudinal das variáveis de estado.

Os modelos foram simulados para um período de um ano, de janeiro a dezembro de 2010, sendo possível observar os efeitos sazonais para as diferentes estações do ano. Ainda, para a modelagem do MQA foram definidos dois cenários com distintas cargas de fósforo total: uma primeira simulação com os dados atuais e a segunda, considerando o aumento de dez vezes na carga, a fim de analisar a resposta do reservatório ao aumento de cargas de nutrientes.

O conjunto de dados utilizados para o desenvolvimento do trabalho foi obtido do relatório do Instituto Ambiental do Paraná (2009), *Monitoramento da qualidade das águas dos reservatórios do Estado do Paraná no período de 2005 a 2008*; dos registros disponíveis na plataforma *HidroWeb* da estação fluviométrica BR 277 - Campo Largo, código 65021800, localizada no rio Passaúna (25°25'37"S e 49°23'17"O) e operada pela Agência Nacional das Águas (ANA); dos estudos de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016), Hilgert e Sotiri (2017) e Polli, Silva e Rauen (2017).

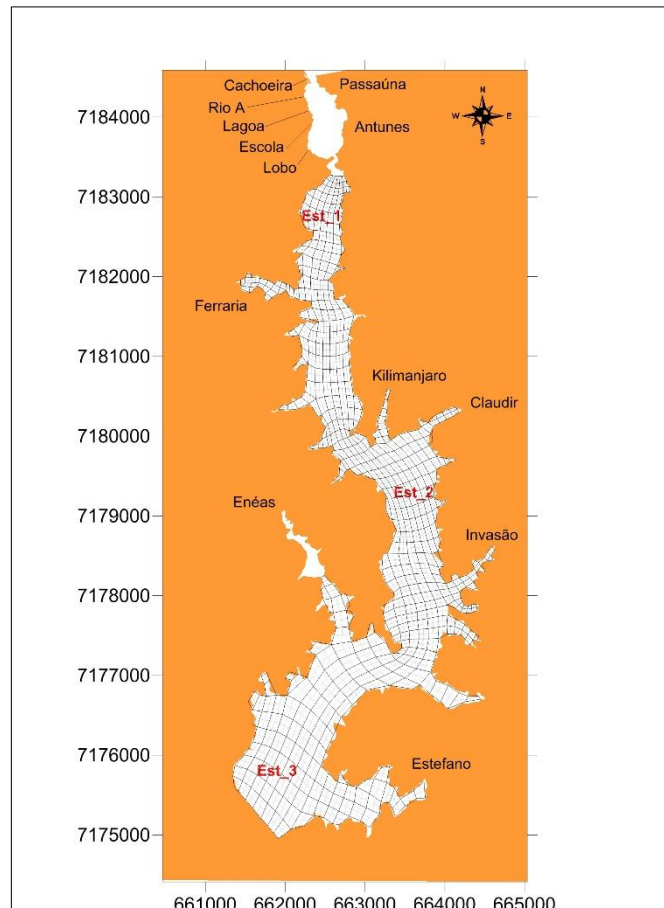
Os dados meteorológicos utilizados foram os disponíveis, para o ano de 2010, no banco de dados da estação meteorológica instalada junto à captação da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), localizada no reservatório Rio Verde, coordenadas 25°31'36.52"S e 49°31'38.52"O. Por se tratar de uma bacia hidrográfica adjacente à do Passaúna, com a mesma faixa climática, é possível considerar uma equivalência das informações registradas. Na estação são medidos, a cada 15 minutos, direção e velocidade do vento, radiação solar incidente de ondas curtas, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar.

### 4.1 MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Para a implementação do modelo de circulação hidrodinâmica, primeiramente foi definido o domínio de modelagem e desenvolvida uma malha com 2.707 nós e 571 elementos quadrangulares, com dimensões que variam entre 30 e 200 m. A área é de aproximadamente 7,7 km<sup>2</sup>, volume de 65 hm<sup>3</sup>, profundidade média de 5,93 m e nível de água médio de 885,8 m.

A malha usada é apresentada na Figura 12, com a localização das estações escolhidas para análise dos resultados das variações temporais.

Figura 12 - Domínio de modelagem para o reservatório do Passaúna, mostrando a malha com 571 elementos finitos e 2.707 nós e a localização das estações de monitoramento



A batimetria utilizada pelos modelos está apresentada na Figura 3. Outra característica importante é o coeficiente de atrito, que pode ser calculado via coeficiente de Chèzy. Este coeficiente depende da amplitude efetiva da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo. Dessa forma, foi especificado o valor uniforme de 0,015 m para a amplitude da rugosidade, que corresponde a um leito de sedimentos com predominância de areias finas (ROSMAN, 2017).

Nos nós que representam os tributários, foram atribuídas vazões variáveis ao longo do período de simulação, a partir dos dados disponibilizados por Carneiro, Kelderman e Irvine (2016). Os dados consistiam em medições de vazão no ponto da estação BR 277 - Campo Largo, realizadas duas vezes ao dia (às 7h e 17h) entre os anos de 2010 a 2012. A partir das vazões médias diárias do ano de 2010 (Tabela 2), foi estabelecida a vazão específica de cada sub-bacia

do entorno do reservatório e assim, determinadas as vazões diárias para os demais tributários, as quais podem ser consultadas no Apêndice A.

Tabela 2 - Vazão média diária do rio Passaúna, em m³/s, na estação BR 277 – Campo Largo, ano de 2010

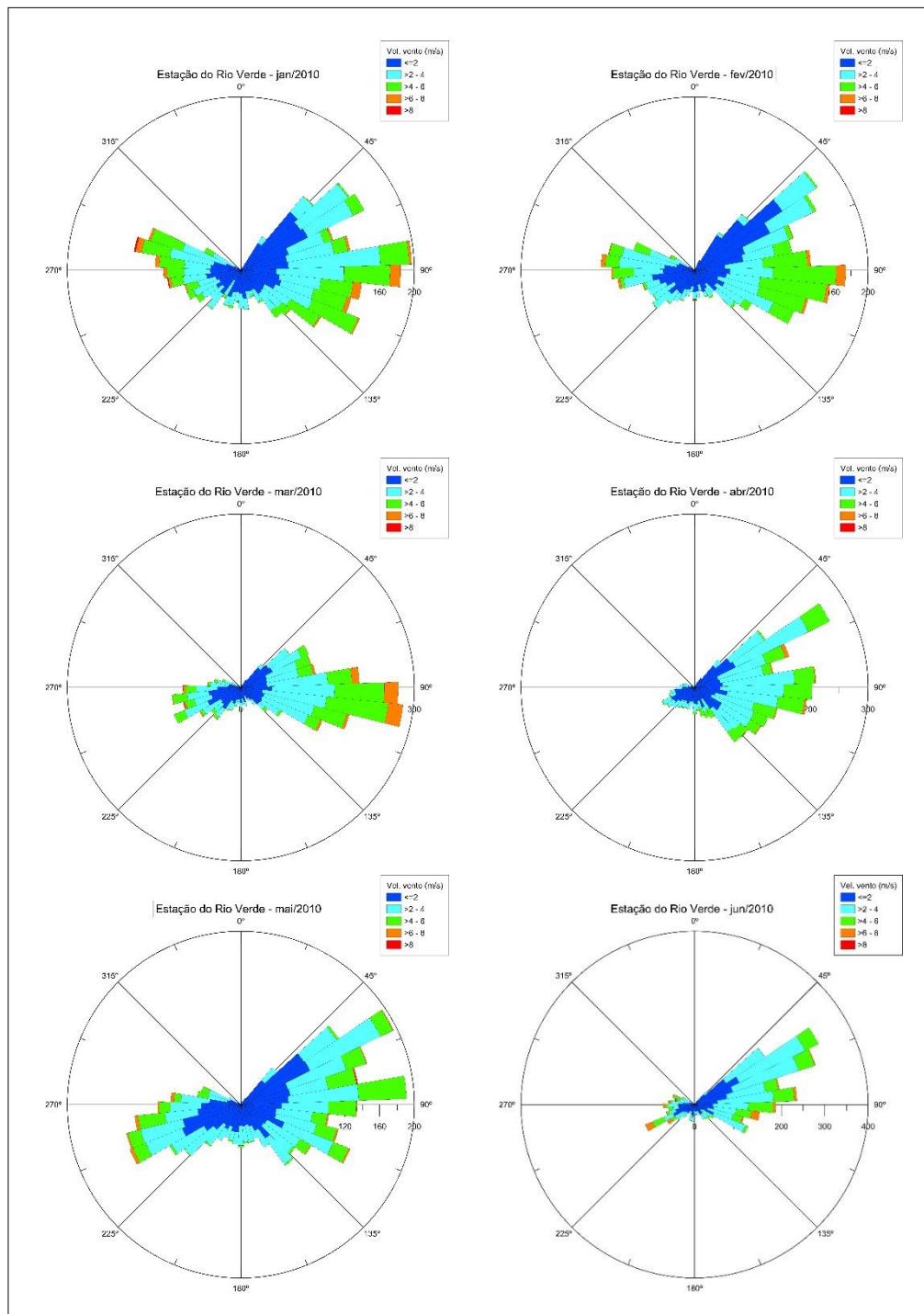
Dia/Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1	2,29	5,70	2,47	2,89	3,07	2,23	1,78	1,93	1,24	1,21	1,13	1,00
2	2,21	5,04	2,49	2,85	2,94	2,23	1,76	1,95	1,28	1,37	1,02	2,12
3	2,23	4,44	2,47	2,80	2,89	2,16	1,74	1,97	1,30	1,26	0,96	1,91
4	3,57	3,94	2,49	2,80	2,85	3,76	1,74	3,19	1,26	1,84	0,82	2,04
5	3,17	3,71	2,80	2,40	2,76	5,22	1,72	2,60	1,26	2,97	0,87	3,05
6	3,58	3,78	5,37	4,13	2,60	2,84	1,70	2,01	1,28	1,41	1,89	1,91
7	2,89	3,52	3,73	2,67	2,65	2,56	1,66	1,88	1,41	2,56	1,15	1,50
8	2,65	3,31	3,21	2,56	8,81	2,43	1,64	1,80	1,32	1,66	1,03	1,54
9	2,36	4,13	2,89	2,47	3,78	2,34	1,62	1,74	1,28	1,26	1,00	1,26
10	2,76	6,40	2,71	2,43	3,12	2,27	1,60	1,74	1,24	1,18	1,30	1,13
11	2,80	3,85	2,49	2,38	3,03	2,23	1,60	1,76	1,22	1,11	1,09	1,13
12	13,17	3,35	2,49	2,34	2,96	2,32	1,56	1,72	1,16	1,07	0,98	1,72
13	8,30	3,19	2,49	2,29	2,91	2,21	4,31	1,72	1,16	1,01	0,98	6,35
14	8,65	2,96	2,87	2,27	2,82	2,14	1,99	1,66	1,17	1,01	0,93	8,88
15	7,20	3,14	2,80	2,25	2,78	2,12	1,89	1,66	1,16	1,50	0,87	5,20
16	4,69	2,82	2,40	2,23	2,67	2,05	4,16	1,64	1,13	1,36	0,91	3,26
17	4,07	2,85	2,31	2,23	2,97	2,03	4,00	1,64	1,13	1,13	0,91	3,29
18	3,80	2,87	2,40	2,23	4,01	1,97	3,05	1,60	1,09	2,39	1,02	2,98
19	3,90	3,12	2,34	2,16	3,33	1,95	2,34	1,56	1,11	1,34	0,89	2,36
20	3,33	2,82	2,27	2,16	2,80	1,92	2,23	1,51	1,15	1,09	0,75	2,12
21	5,82	2,58	2,49	2,21	2,71	2,72	1,99	1,49	1,22	1,03	0,73	2,05
22	5,60	2,47	2,38	2,14	2,73	4,25	1,88	1,47	1,13	1,01	1,34	4,45
23	7,79	2,40	2,27	7,93	2,65	2,40	2,03	1,47	1,07	1,01	1,11	5,61
24	4,92	3,23	2,34	6,11	2,58	2,12	4,17	1,39	1,41	0,96	0,87	2,74
25	3,73	4,99	7,03	6,10	2,60	1,99	2,19	1,41	2,67	0,96	1,66	2,30
26	5,89	2,89	3,61	11,66	2,47	1,92	1,99	1,39	1,52	1,11	1,05	2,32
27	4,49	2,58	2,94	5,73	2,43	1,90	1,88	1,39	1,28	0,96	0,93	2,01
28	6,08	2,58	3,67	3,68	2,36	1,88	1,84	1,39	1,44	0,91	0,85	1,90
29	11,47	-	7,94	3,68	2,31	1,84	1,80	1,35	1,16	0,85	0,80	1,82
30	23,42	-	4,37	3,26	2,27	1,82	1,78	1,35	1,11	2,69	1,29	1,76
31	8,06	-	3,33	-	2,27	-	1,72	1,35	-	1,52	-	1,72

Fonte: Adaptado de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016)

Na simulação do padrão de circulação hidrodinâmica, além das vazões fluviais para os rios tributários, o vento também foi considerado como um dos principais forçantes, necessário no cálculo das tensões na superfície livre. O perfil do vento foi considerado no modelo como variável no tempo e uniforme no espaço. O conjunto de dados de direção e velocidade do vento da estação meteorológica do reservatório Rio Verde apresentou algumas falhas, que foram

corrigidas considerando registros anteriores para intervalos de tempo menores que 1 dia e, as falhas de intervalos maiores, foram preenchidas com dados correspondentes ao ano anterior medidos na mesma estação. A Figura 13 mostra a rosa dos ventos para cada mês e a Figura 14 apresenta a rosa dos ventos para o ano inteiro. Pode-se observar que as intensidades mais frequentes do vento ocorreram na faixa de 2,0 a 4,0 m/s, seguida da faixa entre 4,0 e 6,0 m/s, predominantemente nas direções leste e nordeste.

Figura 13 - Rosa dos ventos dos meses de janeiro a dezembro de 2010, dados da estação meteorológica do reservatório Rio Verde



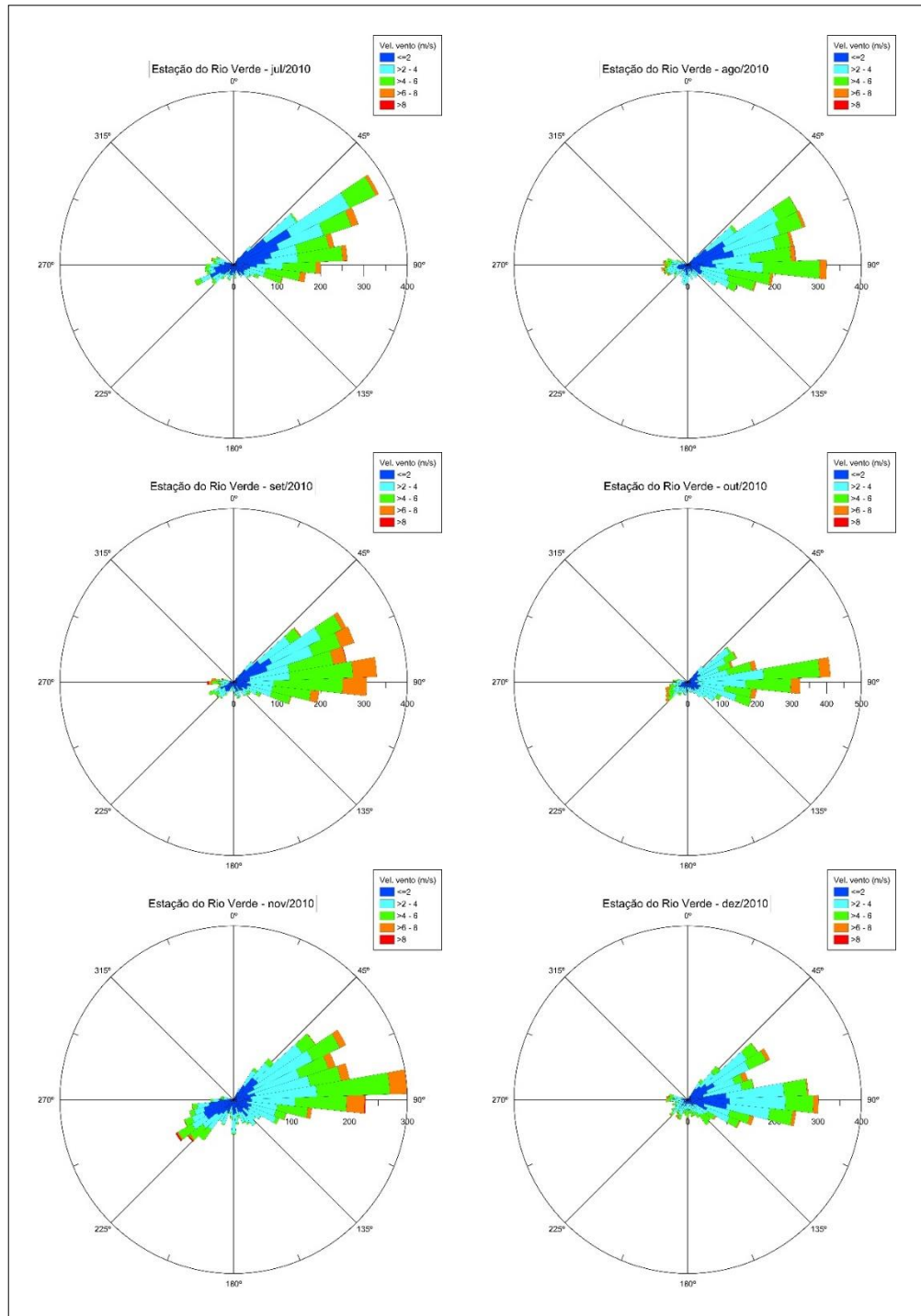
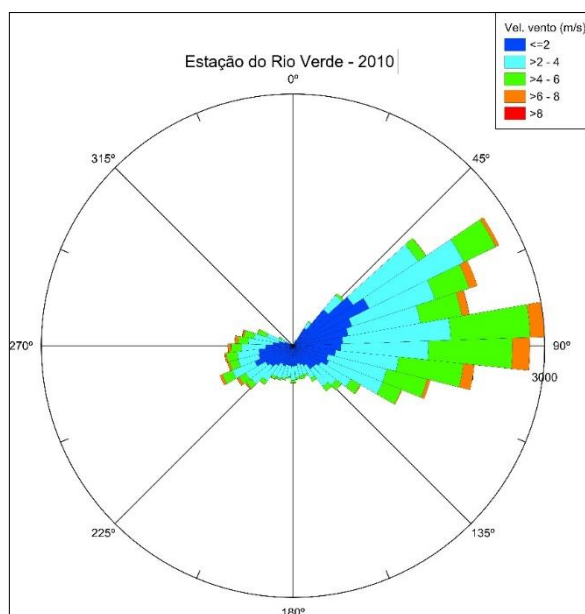




Figura 14 - Rosa dos ventos do ano de 2010, dados da estação meteorológica do reservatório Rio Verde



Os parâmetros gerais usados no SisBaHiA na simulação numérica da circulação hidrodinâmica são mostrados na Tabela 3. O  $\alpha_x$  e o  $\alpha_y$  representam a escala do termo de filtragem espacial da turbulência na direção x e y, respectivamente.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados na simulação da circulação hidrodinâmica do SisBaHiA

Parâmetro	Valor
$\alpha_x$ (filtro espacial em x)	1,0
$\alpha_y$ (filtro espacial em y)	1,0
$\Delta t$ (passo de tempo em segundos)	60
Número de Courant máximo	3,7
Número de Courant médio	2,1

## 4.2 MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA E EUTROFIZAÇÃO

Na simulação do modelo de qualidade de água e eutrofização foram avaliadas 9 variáveis de estado: clorofila *a*, temperatura, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), oxigênio dissolvido (OD), nitrogênio orgânico total, amônia, nitrato, fósforo orgânico e fósforo inorgânico.

Os valores de temperatura para os tributários foram obtidos na plataforma *HidroWeb*, medidos pela estação BR 277 - Campo Largo (Tabela 4). Carneiro, Kelderman e Irvine (2016) disponibilizaram concentrações de OD, DQO, fósforo total e nitrogênio total para os rios

afluentes, medidos também na estação BR 277 - Campo Largo, no ano de 2010 (Tabela 5). As concentrações de DBO foram determinadas usando a razão  $\frac{DBO}{DQO} = 4$  (VON SPERLING, 1996). As concentrações de fósforo orgânico e inorgânico foram estabelecidas considerando que 30% do fósforo total correspondem à parcela orgânica e 70% à parcela inorgânica (VON SPERLING, 1996).

Em relação às concentrações de nitrogênio orgânico, amônia e nitrato, foi definida a proporção de cada variável em relação ao nitrogênio total, usando dados disponíveis da estação BR 277 - Campo Largo, apresentados na Tabela 6. Os resultados da proporção de cada variável foram aplicados aos valores de nitrogênio total disponibilizados por Carneiro, Kelderman e Irvine (2016). Para a clorofila *a*, como não se dispunham de dados referentes aos tributários, foram utilizados valores contidos no relatório do Instituto Ambiental do Paraná (2009) referente ao monitoramento da qualidade da água do reservatório do Passaúna (Tabela 7). A Tabela 8 mostra os valores utilizados como condição de contorno, igualmente para todos os afluentes, no modelo de qualidade de água.

Tabela 4 - Valores de temperatura, em graus Celsius, medidos em março, junho e outubro de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo

Mês	Temperatura (°C)
Março	20,7
Junho	14,0
Outubro	17,7

Fonte: HIDROWEB (2017)

Tabela 5 - Valores de OD, DQO, nitrogênio total e fósforo total, em mg/L, medidos no ano de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo

Data	OD (mg/L)	DQO (mg/L)	Nitrogênio total (mg/L)	Fósforo total (mg/L)
13/01/10	7,0	4,0	1,90	0,09
11/02/10	4,0	52,9	1,60	0,06
10/03/10	6,5	19,2	2,30	0,04
14/04/10	7,0	17,1	1,80	0,04
12/05/10	6,4	4,0	2,90	0,02
09/06/10	4,5	6,5	1,20	0,02
07/07/10	8,0	27,9	1,90	0,03
04/08/10	2,9	8,2	2,20	0,16
01/09/10	7,4	4,0	2,10	0,03
29/09/10	7,0	4,0	11,90	0,03
27/10/10	7,6	22,2	9,70	0,04
24/11/10	6,9	12,0	7,00	0,05
22/12/10	6,7	4,0	3,90	0,03

Fonte: Adaptado de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016)

Tabela 6 - Valores de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total e nitrogênio total Kjeldahl, em mg/L, medidos em março, junho e outubro de 2010 na estação BR 277 - Campo Largo

Parâmetro (mg/L)	Março	Junho	Outubro
Nitrato	1,1	1,05	0,99
Nitrito	0,04	0,03	0,05
Nitrogênio amoniacal	0,05	0,12	0,12
Nitrogênio total	1,38	0	1,43
Nitrogênio total Kjeldahl	0,24	0,86	0,39

Fonte: HIDROWEB (2017)

Tabela 7 - Valores de clorofila *a*, em µg/L, medidos entre abril de 2005 e junho de 2008 no reservatório do Passaúna

Data	Clorofila <i>a</i> (µg/L)
01/04/05	2,65
01/06/05	1,48
01/04/06	3,11
01/08/06	5,29
01/02/07	2,07
01/09/07	3,22
01/06/08	4,14

Fonte: Instituto Ambiental do Paraná (2009)

Tabela 8 - Valores das condições de contorno para os rios afluentes do reservatório do Passaúna, utilizadas na simulação do MQA do SisBaHiA

Data	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	Fósforo orgânico (mg/L)	Fósforo inorgânico (mg/L)	Nitrato (mg/L)	Amônia (mg/L)	Nitrogênio orgânico (mg/L)	Clorofila <i>a</i> (µg/L)	Temperatura (°C)
Janeiro	7,000	1,000	0,026	0,060	1,476	0,114	0,310	1,665	25,167
Fevereiro	4,000	13,225	0,018	0,042	1,243	0,096	0,261	2,070	22,933
Março	6,500	4,800	0,012	0,028	1,786	0,138	0,375	2,475	20,700
Abril	7,000	4,275	0,011	0,027	1,398	0,108	0,294	2,880	18,467
Mai	6,400	1,000	0,007	0,017	2,252	0,174	0,473	2,845	16,234
Junho	4,500	1,625	0,007	0,017	0,932	0,072	0,196	2,810	14,000
Julho	8,000	6,975	0,010	0,023	1,476	0,114	0,310	4,050	14,925
Agosto	2,940	2,050	0,049	0,114	1,709	0,132	0,359	5,290	15,850
Setembro	7,200	1,000	0,009	0,020	5,437	0,421	1,143	3,220	16,775
Outubro	7,600	5,550	0,013	0,030	7,534	0,583	1,583	1,150	17,700
Novembro	6,900	3,000	0,015	0,036	5,437	0,421	1,143	0,920	18,625
Dezembro	6,700	1,000	0,009	0,022	3,029	0,234	0,637	2,990	19,550

A definição das condições iniciais da qualidade da água do reservatório seguiu a mesma metodologia adotada para os tributários, diferenciando somente no ponto amostral do estudo de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016), o qual se localiza a jusante da barragem, nas coordenadas 49°23'34.42"O e 25°31'55.80"S. A Tabela 9 mostra os dados utilizados no modelo.

Tabela 9 - Valores das condições iniciais utilizadas na simulação do MQA do SisBaHiA

Variável	Valor
OD (mg/L)	5,000
DBO (mg/L)	1,000
Fósforo orgânico (mg/L)	0,006
Fósforo inorgânico (mg/L)	0,014
Nitrato (mg/L)	0,854
Amônia (mg/L)	0,066
Nitrogênio orgânico (mg/L)	0,180
Clorofila <i>a</i> (µg/L)	3,000
Temperatura (°C)	22,000

Fonte: Adaptado de Carneiro, Kelderman e Irvine (2016)

As variáveis meteorológicas utilizadas na simulação do MQA foram: radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa, necessárias no cálculo da temperatura da água, que é usada para corrigir os parâmetros relacionados às reações cinéticas. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam os dados registrados na estação meteorológica do reservatório Rio Verde para o ano de 2010. Nota-se que a temperatura do ar apresentou uma média de 17 °C, chegando à máxima

de 33 °C no mês de fevereiro e mínima de 2,7 °C em julho, característico do clima da região. Da mesma forma, a radiação solar apresentou seus maiores valores no início do ano, uma diminuição gradativa entre março e julho e aumento da sua intensidade até dezembro. A umidade relativa do ar permaneceu na maior parte do tempo acima de 80 %, registrando valores críticos próximos a 20 % entre os meses de agosto e setembro.

Figura 15 - Dados de temperatura do ar, em graus Celsius, medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010

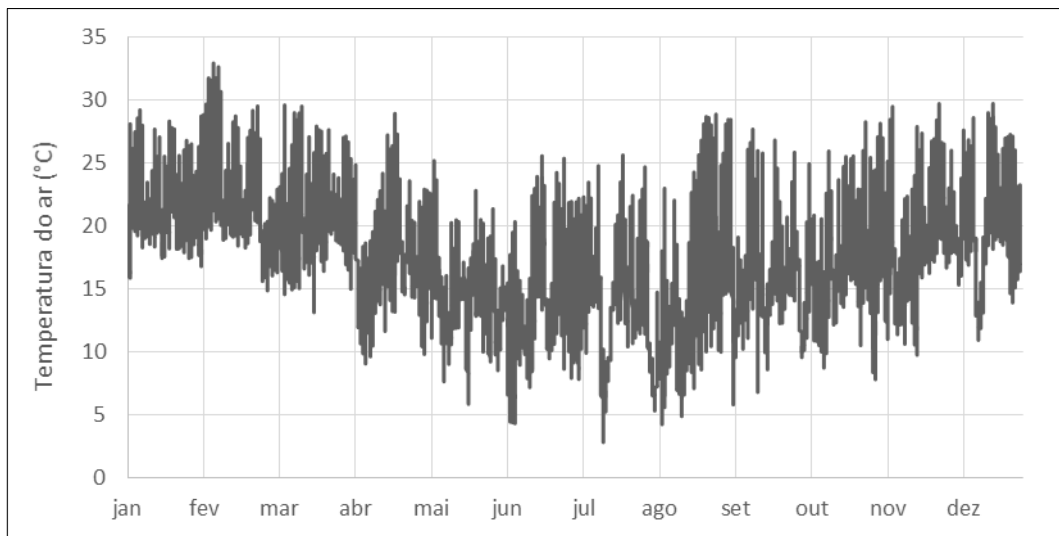


Figura 16 - Dados de radiação solar incidente, em W/m², medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010

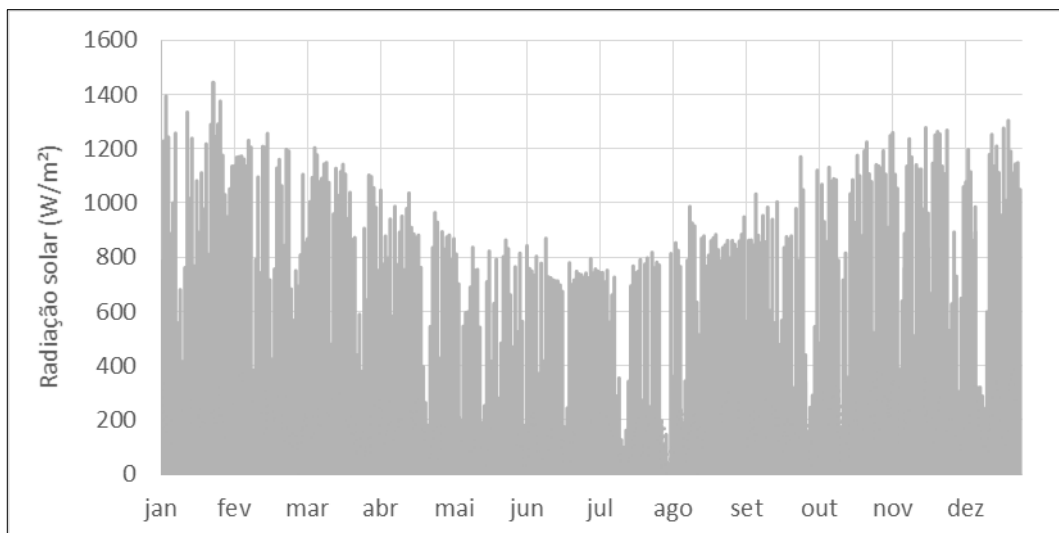
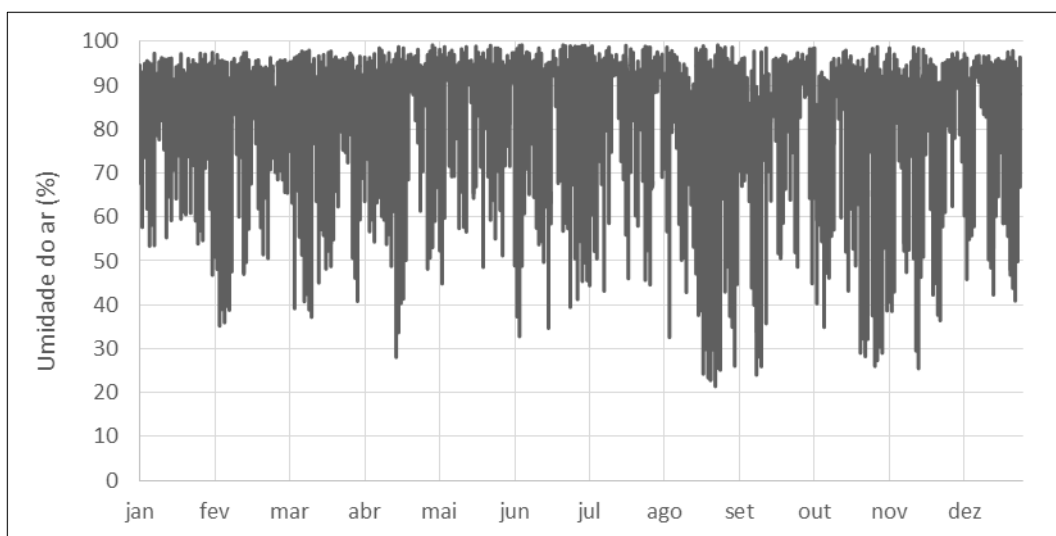


Figura 17 - Dados de umidade relativa do ar, em %, medidos na estação meteorológica do reservatório Rio Verde em 2010



Por fim, os parâmetros gerais usados na simulação numérica do transporte advectivo-difusivo podem ser observados na Tabela 10. Os parâmetros  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$  e  $D_{xy}$  são usados para calibração do modelo, representando a escala do termo de dispersão turbulenta na direção x, y e transversal, respectivamente. Ainda, o Apêndice B lista os parâmetros, taxas e coeficientes adotados nas reações cinéticas do MQA.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na simulação do MQA do SisBaHiA

Parâmetro	Valor
$D_{xx}$ (m <sup>2</sup> /s)	2,0
$D_{xy}$ (m <sup>2</sup> /s)	0,0
$D_{yy}$ (m <sup>2</sup> /s)	0,5
$\Delta t$ (passo de tempo em segundos)	60,0
Número de Peclet máximo	5,0
$\alpha$ (escala da dispersão longitudinal)	1,0
$\beta$ (escala da dispersão transversal)	1,0
$\alpha_x$ (filtro espacial em x)	1,0
$\alpha_y$ (filtro espacial em y)	1,0
$\alpha_t$ (filtro temporal)	1,0

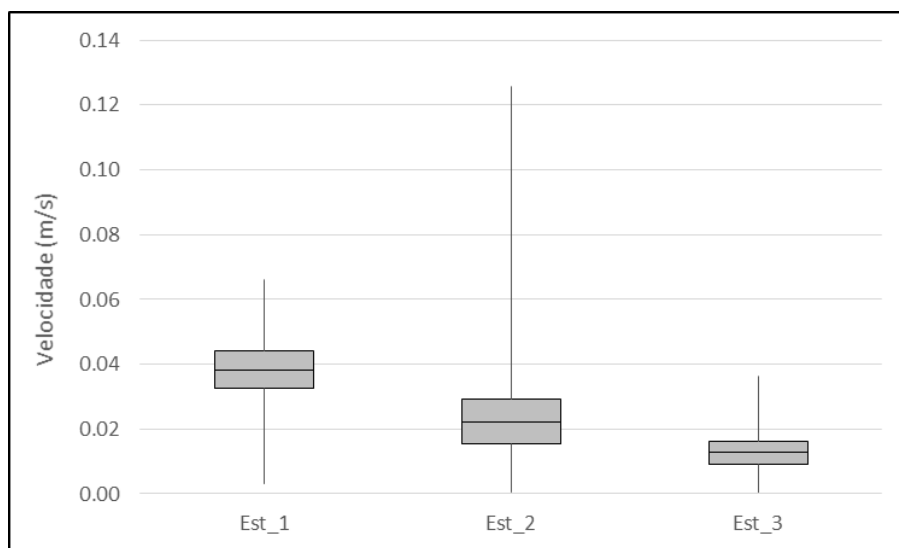
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação da circulação hidrodinâmica gerou um conjunto de resultados organizados espacialmente a cada 3 horas e temporalmente a cada 1 hora. A distribuição espacial dos resultados das simulações do MQA seguiu o mesmo padrão, no entanto, os dados temporais foram organizados em intervalos de tempo menores, 15 minutos. Tal periodicidade foi configurada visando facilitar o tratamento das informações geradas e, consequentemente, o processamento dos dados.

### 5.1 MODELO DE CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA

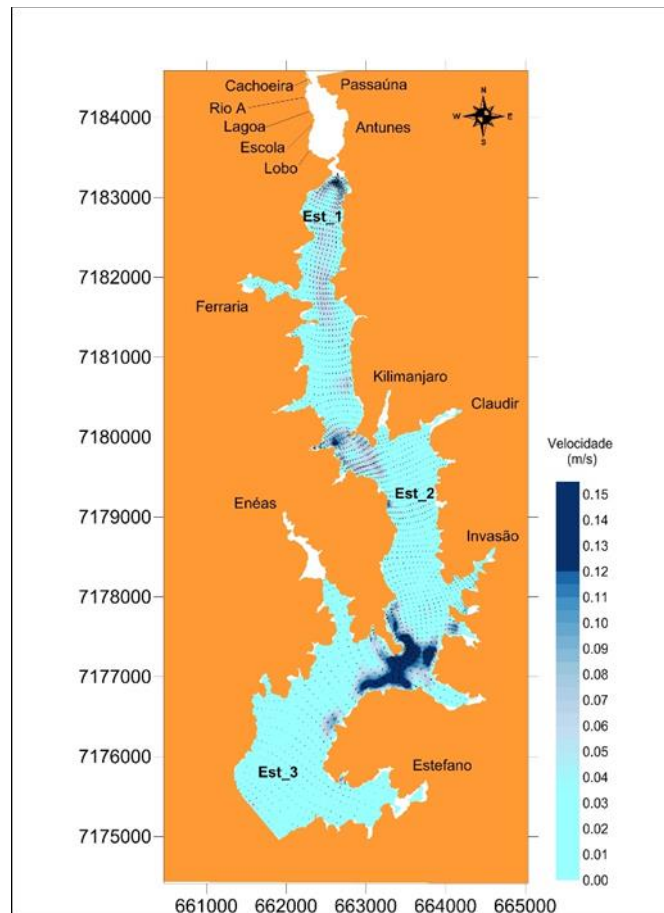
Os resultados do modelo de circulação hidrodinâmica foram condizentes com as características de fluxo longitudinal de um reservatório, apresentando, na média, velocidades bastante baixas, da ordem de magnitude de cm/s. Como pode ser observado na Figura 18, a estação 1, localizada na entrada do reservatório, apresenta velocidades um pouco maiores que as demais devido à grande influência dos tributários, característico da zona lótica em que se encontra. A estação 3, próxima à barragem, possui aspectos de zona lântica, com profundidades mais elevadas e fluxo longitudinal reduzido. Logo, a estação 2, na área central do reservatório, configura uma região de transição.

Figura 18 – Velocidade, em m/s, do reservatório do Passaúna nas 3 estações de monitoramento



A Figura 19 mostra o padrão de circulação do reservatório para o dia 27/04/2010, data correspondente às vazões mais elevadas do rio Passaúna, o principal forçante da circulação. Verifica-se que as maiores velocidades ocorreram nas duas regiões de estrangulamento do reservatório; nas demais regiões, os valores são muito baixos.

Figura 19 - Padrão de circulação hidrodinâmica do reservatório do Passaúna para 27/04/2010



## 5.2 MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA E EUTROFIZAÇÃO

### 5.2.1 Cenário 1

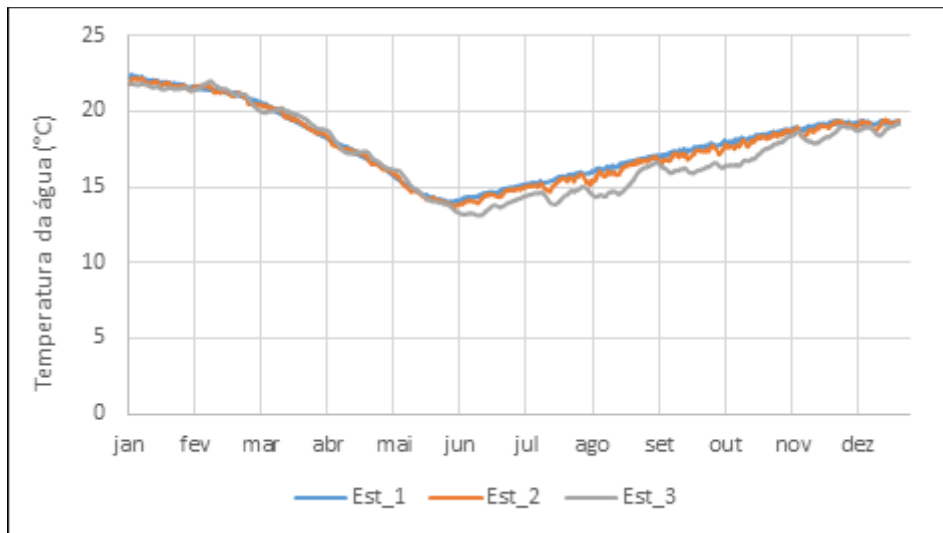
Os resultados do modelo de qualidade de água e eutrofização para o cenário 1 mostram que, de modo geral, há uma grande compatibilidade dos resultados da estação 1 com as condições de fronteira impostas, devido à sua localização. Na estação 2 essa influência é reduzida, chegando a ser desprezada na estação 3.

Essas diferenças entre os resultados obtidos em cada estação, entretanto, foram muito pequenas para a variável temperatura da água, apresentado apenas uma leve redução nos valores



da estação 3 em alguns meses, provavelmente por se tratar de uma área com maior profundidade. A Figura 20 mostra os valores de temperatura da água obtidos ao longo do ano para as três estações de controle, onde é possível observar uma máxima de 22°C em janeiro e mínima de 13 °C em junho.

Figura 20 - Valores de temperatura da água, em graus Celsius, do reservatório do Passaúna, ano de 2010



Desse modo, foi escolhido o primeiro dia do mês de fevereiro e do mês de junho para a apresentação da distribuição espacial do comportamento médio da temperatura (Figuras 21 e 22), evidenciando a uniformidade dos valores de temperatura em toda a extensão do domínio do reservatório.

As concentrações de oxigênio dissolvido na estação 1 apresentaram valores bastante compatíveis com as condições de contorno: nos meses de fevereiro, junho e agosto, os valores de concentração para os afluentes foram baixos, refletindo nos resultados obtidos pelo modelo. Nas outras estações, as concentrações são um pouco mais elevadas, chegando a um acréscimo de cerca de 3,0 mg/L na estação 3 entre os meses de junho e agosto, como observado na Figura 23. Tal fato se deu, provavelmente, pela maior concentração de saturação de OD nesse período com, consequentemente, maior capacidade de reaeração.

Figura 21 - Distribuição da temperatura da água do reservatório do Passaúna para 01/02/2010

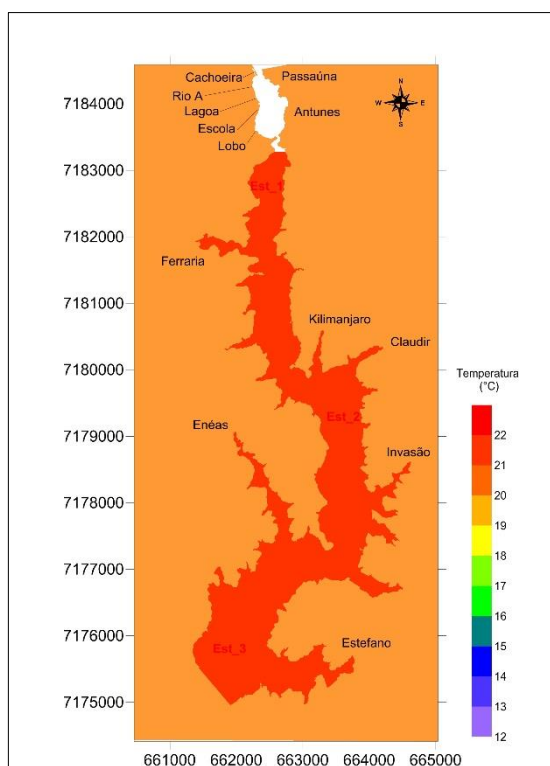


Figura 22 - Distribuição da temperatura da água do reservatório do Passaúna para 01/06/2010

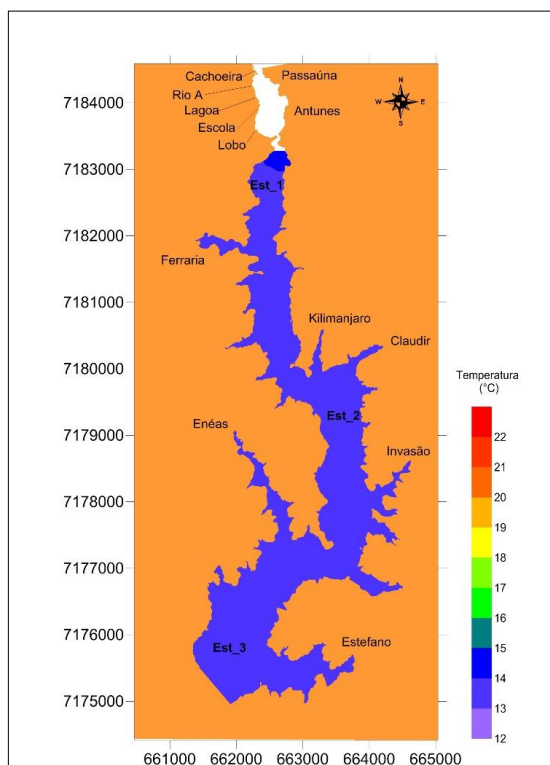
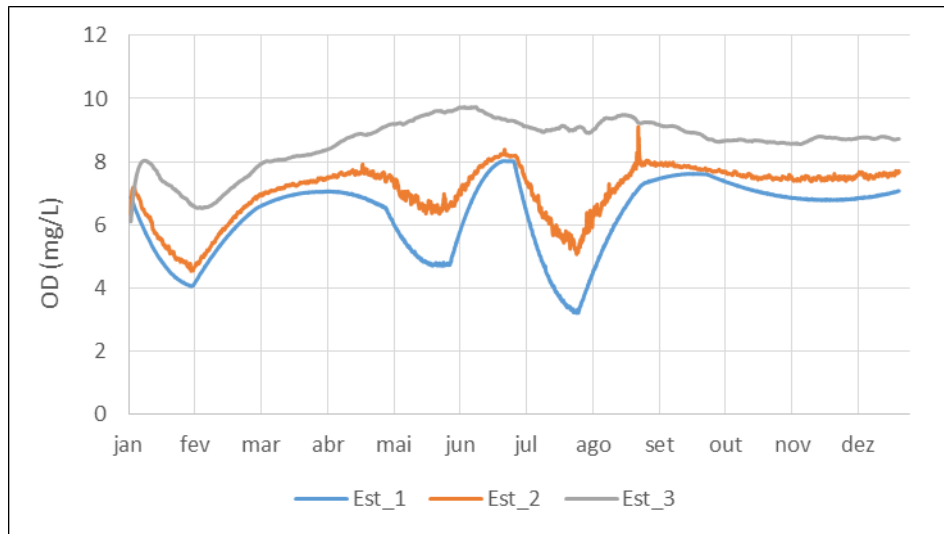
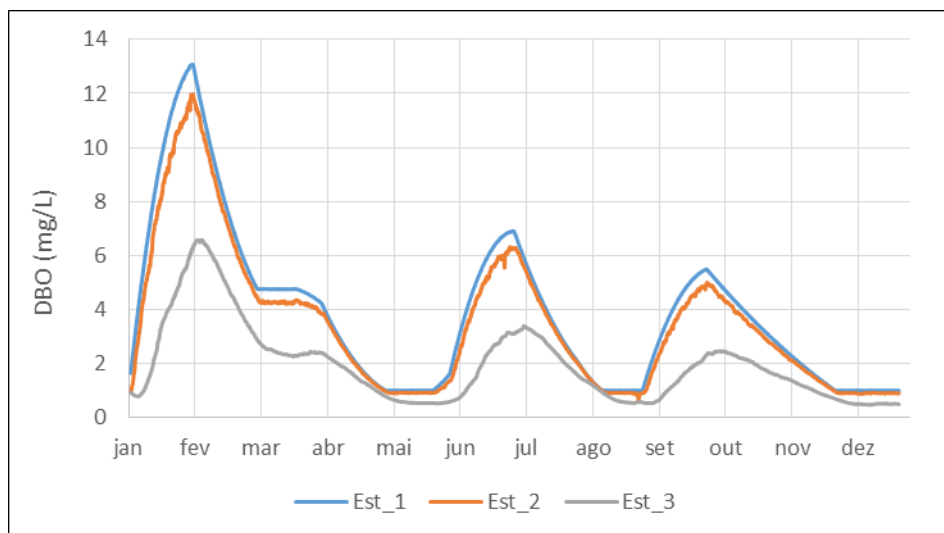


Figura 23 - Valores de OD, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010



O comportamento das (Figura 24) na estação 1, igualmente ao OD, apresentou oscilações condizentes com os valores estabelecidos nas condições de contorno, com picos nos meses de fevereiro, julho e outubro. Já em relação à distribuição espacial, na estação 3 foram verificadas concentrações menores que nas demais, o que era esperado, considerando que as cargas orgânicas provenientes dos tributários são consumidas ao longo do reservatório.

Figura 24 - Valores de DBO, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010



As Figuras 25 e 26 mostram o campo de concentração de OD e de DBO no começo do mês de fevereiro, data em que ocorreram os maiores picos de DBO e, consequentemente, maior depleção do OD. É possível observar que as distribuições espaciais formam regiões bem definidas, com uma variação de 4,0 a 6,0 mg/L, no caso do OD, e de 5,0 a 13,0 mg/L para a DBO.

Figura 25 - Campo de concentração de OD no reservatório do Passaúna para 01/02/2010

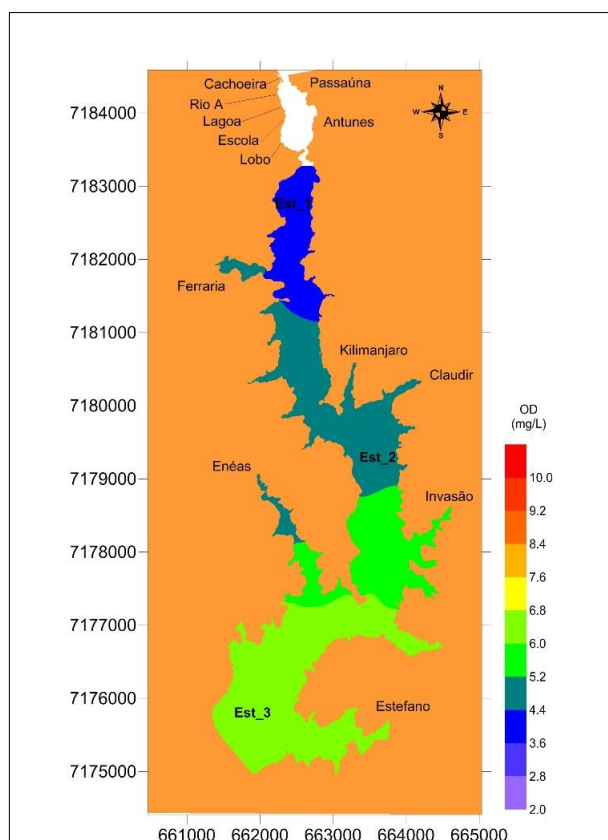
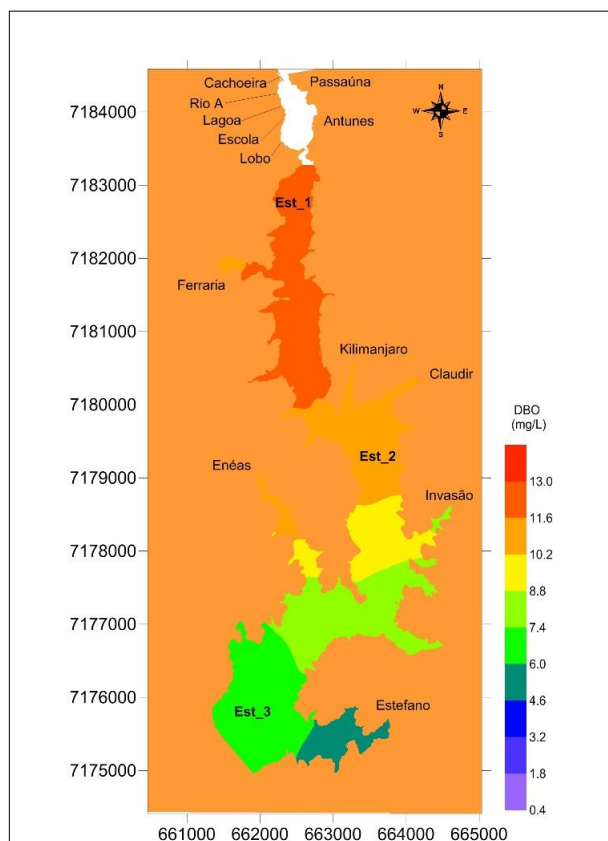


Figura 26 - Campo de concentração de DBO no reservatório do Passaúna para 01/02/2010



Os compostos nitrogenados exibiram o mesmo comportamento das concentrações de OD e DBO na estação 1, com aumento significativo nos valores entre setembro e outubro, conforme as variações observadas nas condições de fronteira. As Figuras 27, 28 e 29 exibem os gráficos com os valores desses parâmetros obtidos pelo SisBaHiA e as Figuras 30, 31 e 32 mostram a distribuição espacial deles no início do mês de outubro, correspondente aos seus maiores valores. Percebe-se, como anteriormente, a compartimentalização do reservatório em segmentos bem definidos, com um intervalo de variação do nitrogênio orgânico de aproximadamente 1,0 a 1,6 mg/L, 0,5 a 0,8 mg/L para a amônia e 5,0 a 7,5 mg/L para o nitrato. Nota-se um gradiente longitudinal positivo somente no caso da amônia, já que, provavelmente, boa parte do nitrogênio orgânico é convertido em amônia, sem tempo, contudo, de transformar-se em nitrato.

Figura 27 - Valores de nitrogênio orgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010

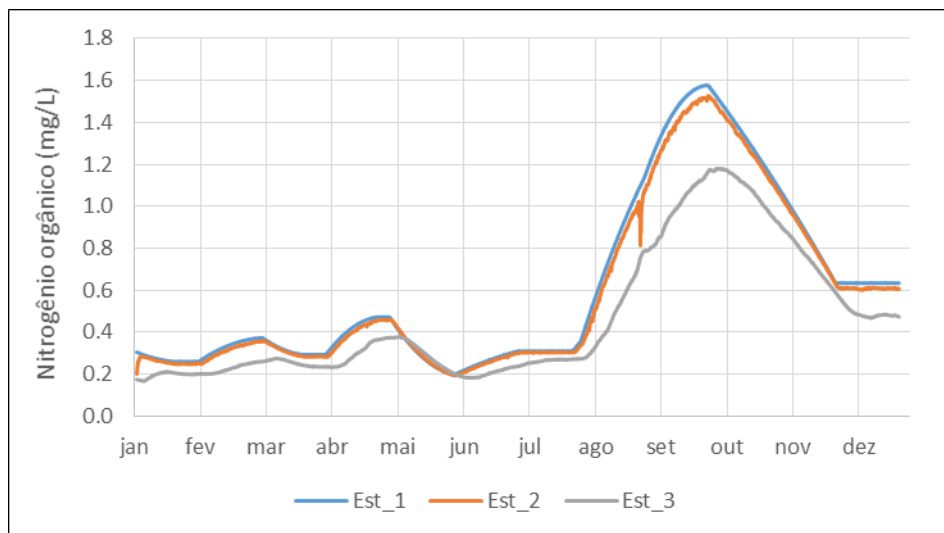


Figura 28 - Valores de amônia, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010

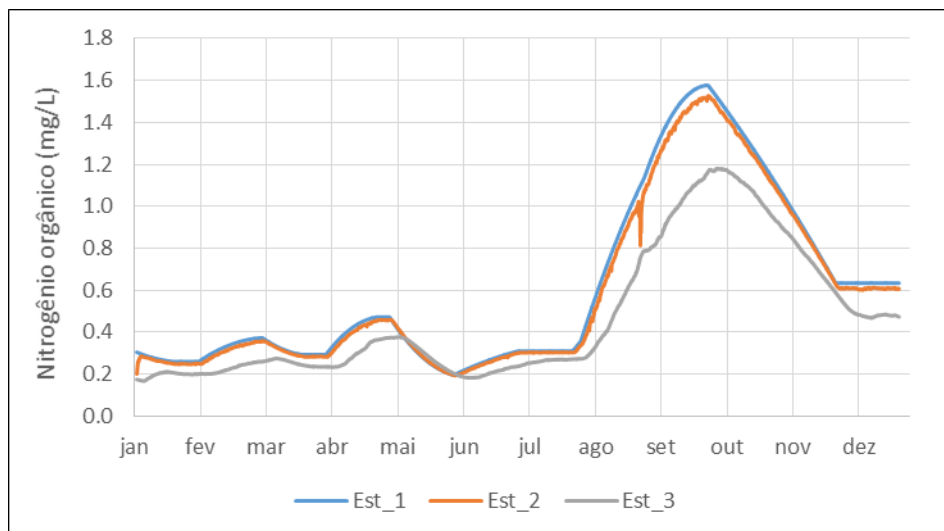


Figura 29 - Valores de nitrato, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010

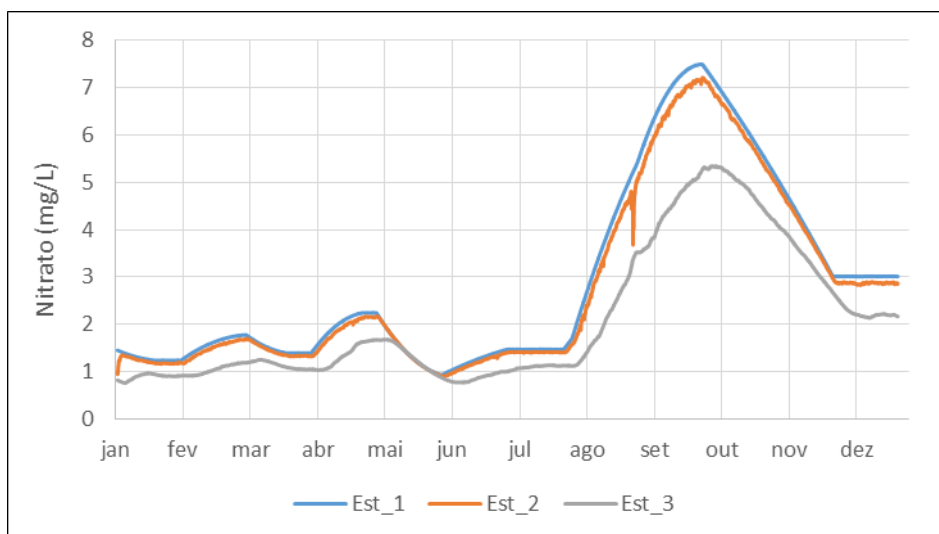


Figura 30 - Campo de concentração de nitrogênio orgânico no reservatório do Passaúna para 01/10/2010

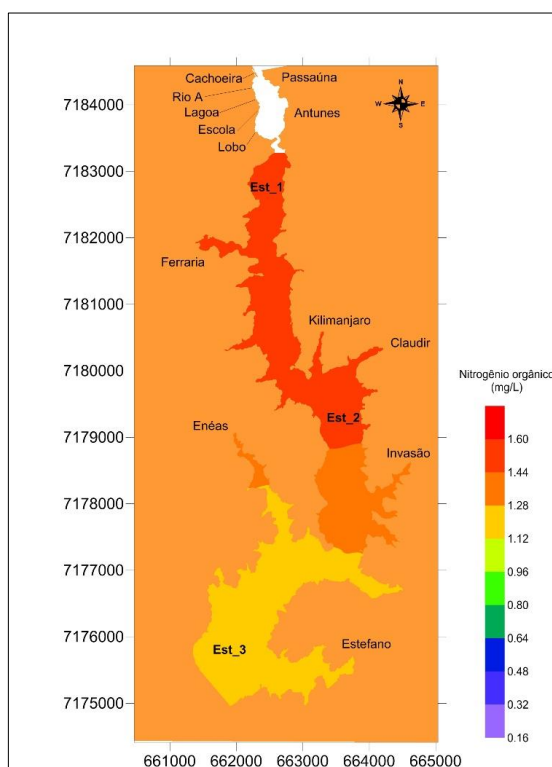


Figura 31 - Campo de concentração de amônia no reservatório do Passaúna para 01/10/2010

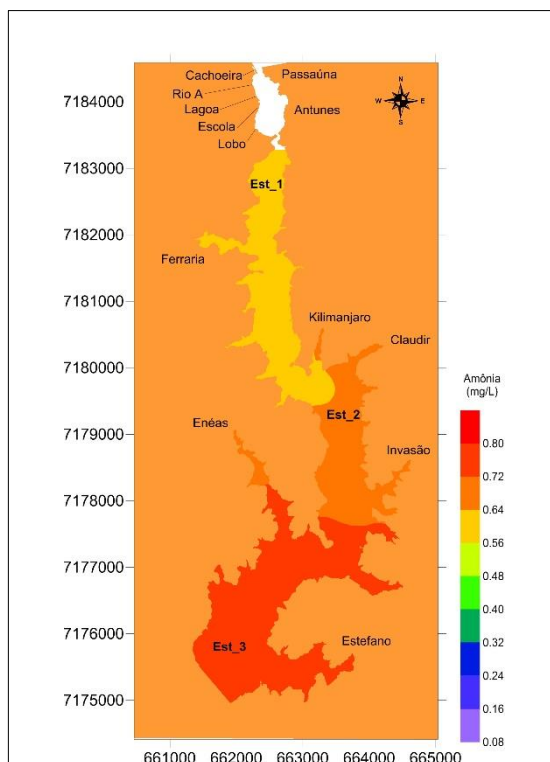
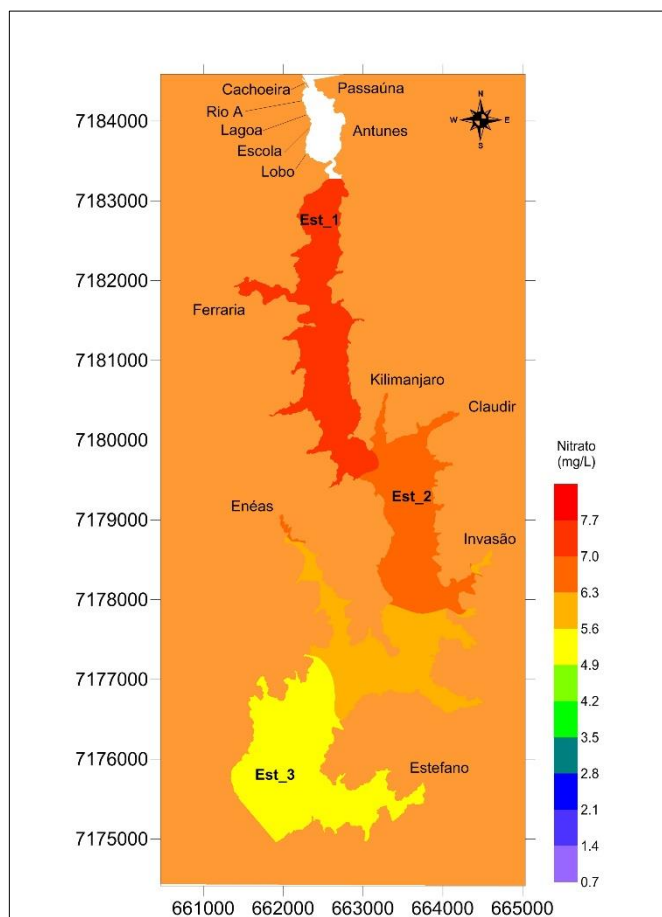


Figura 32 - Campo de concentração de nitrato no reservatório do Passaúna para 01/10/2010



Nos resultados obtidos para as concentrações de fósforo orgânico e inorgânico ao longo do período de simulação (Figuras 33 e 34), o comportamento nas estações é semelhante: houve um pico inicial em janeiro, as concentrações foram gradativamente caindo até julho, para então ocorrer o valor máximo em agosto. Posteriormente, outro pequeno pico ocorreu entre outubro e novembro. Verifica-se, para o fósforo orgânico, uma pequena diferença entre os valores da estação 3 para as demais, principalmente nos picos, havendo, portanto, um amortecimento. Já o fósforo inorgânico apresenta-se praticamente homogêneo no espaço, isto é, amortece pouco.

Figura 33 - Valores de fósforo orgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010

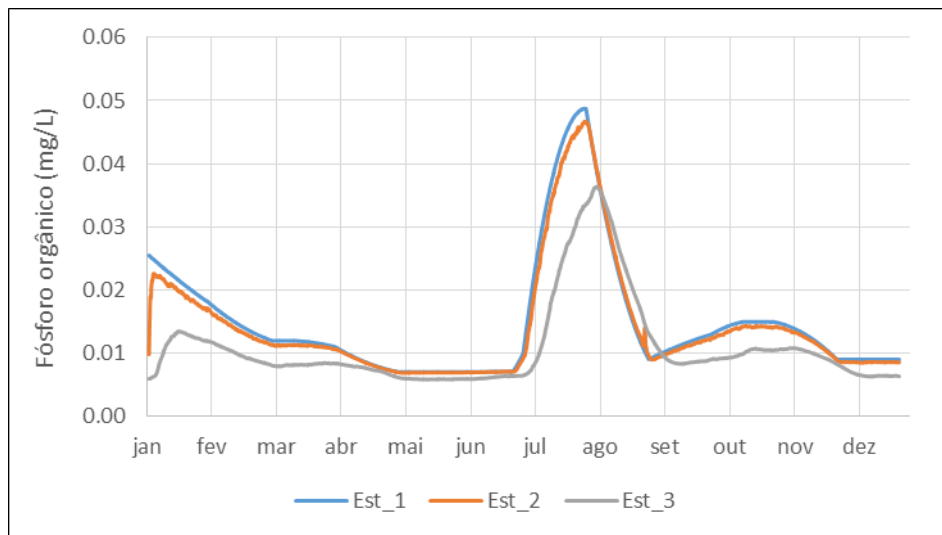
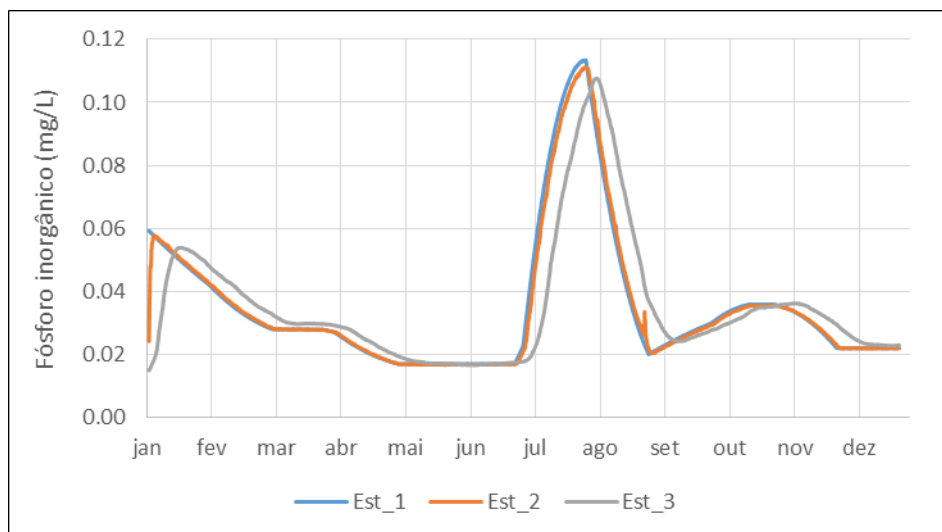


Figura 34 - Valores de fósforo inorgânico, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010



As Figuras 35 e 36 apresentam a distribuição das concentrações de fósforo orgânico e inorgânico no reservatório para o período com maior pico (início de agosto). É possível



observar a pequena variação espacial para o fósforo inorgânico comparado à escala dos resultados obtidos durante o período de simulação, com um intervalo de 0,09 a 0,11 mg/L. O fósforo orgânico, diferentemente, apresentou maior segmentação ao longo do reservatório, com valores variando de 0,03 mg/L na estação 3 a 0,05 mg/L entre as estações 1 e 2.

Figura 35 - Campo de concentração de fósforo orgânico no reservatório do Passaúna para 01/08/2010

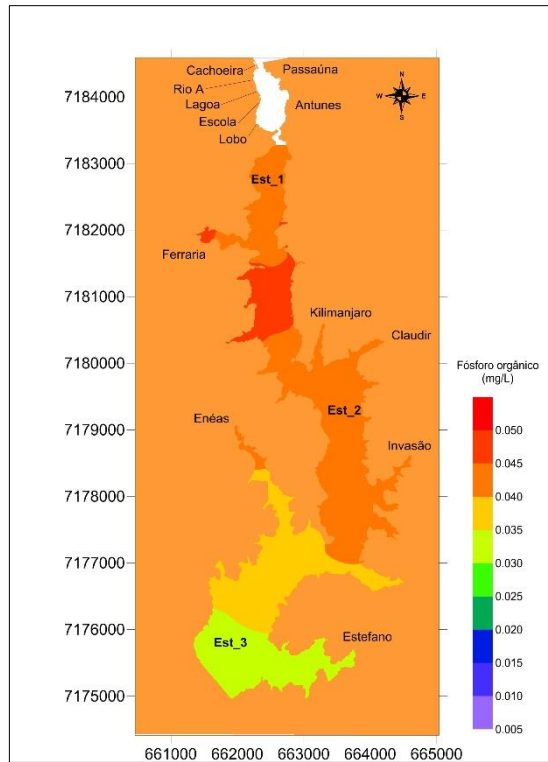
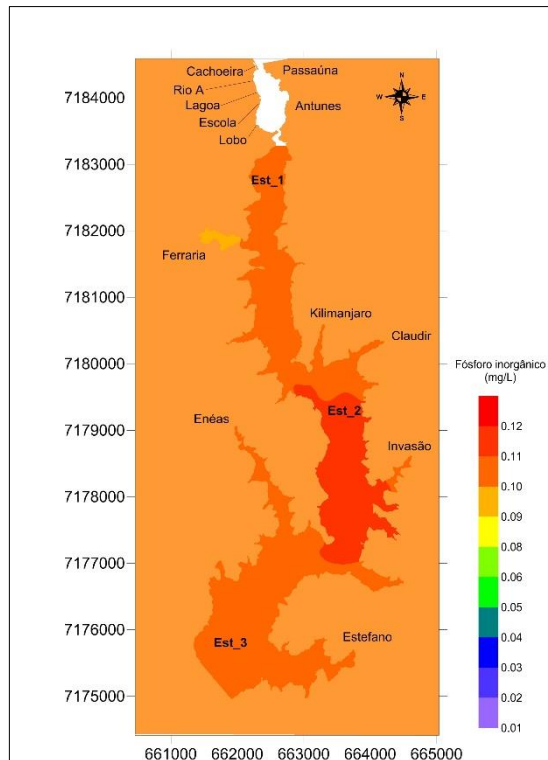


Figura 36 - Campo de concentração de fósforo inorgânico no reservatório do Passaúna para 01/08/2010



A concentração de clorofila *a* apresentou apenas um pico significativo, entre julho e agosto, análogo aos meses com os maiores valores atribuídos aos afluentes. Esse período corresponde também ao dos valores máximos de concentração de fósforo, não havendo, no entanto, uma resposta às formas nitrogenadas. Tais parâmetros regulam o crescimento da biomassa de fitoplâncton e, conseqüentemente, as concentrações de clorofila *a*. Os resultados mostraram também uma pequena diminuição dos valores na estação 3, com uma variação em relação às outras estações em torno de 1,0 µg/L. A Figura 37 apresenta os dados de clorofila *a* ao longo do ano de 2010 e a Figura 38 seu campo de concentração para o mês de agosto, onde verifica-se a uniformidade dessa substância no domínio do reservatório, com uma variação de 4,5 a 6,0 µg/L.

Figura 37 - Valores de clorofila *a*, em  $\mu\text{g/L}$ , no reservatório do Passaúna, ano de 2010

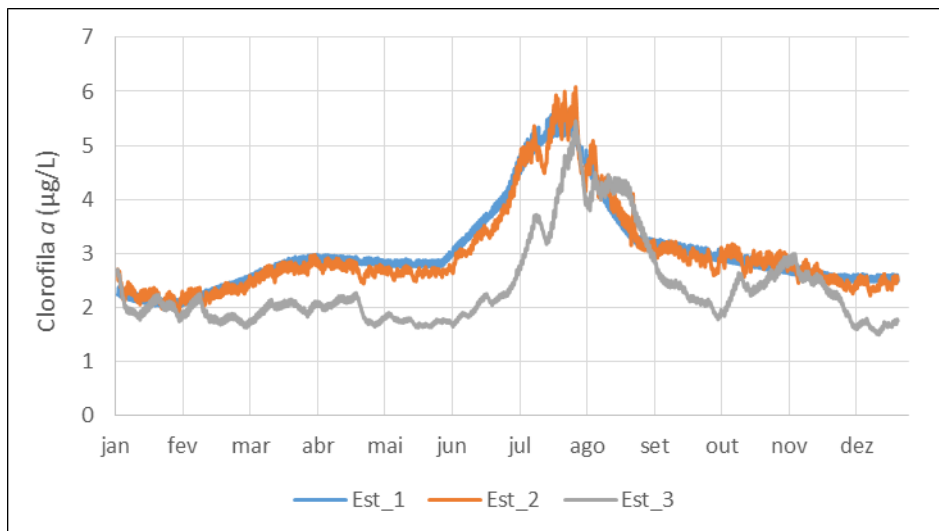
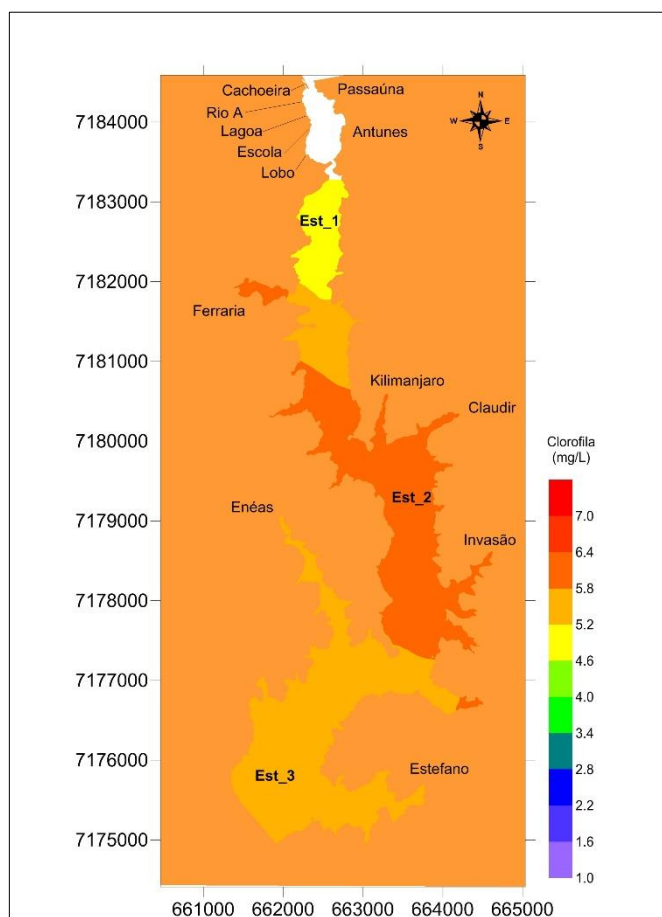


Figura 38 - Campo de concentração de clorofila *a* no reservatório do Passaúna para 01/08/2010



### 5.2.2 Cenário 2

A simulação do cenário 2 considerou um aumento da carga de fósforo total em dez vezes, mantendo os demais parâmetros. Os resultados obtidos para as concentrações de fósforo total, quando comparados com o cenário 1, de cargas atuais, diferencia apenas nos valores em uma ordem de grandeza, como esperado, permanecendo o mesmo comportamento (Figuras 39, 40 e 41). Na estação 3 observa-se que os valores de pico de fósforo total foram menores que nas demais estações.

Figura 39 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 1

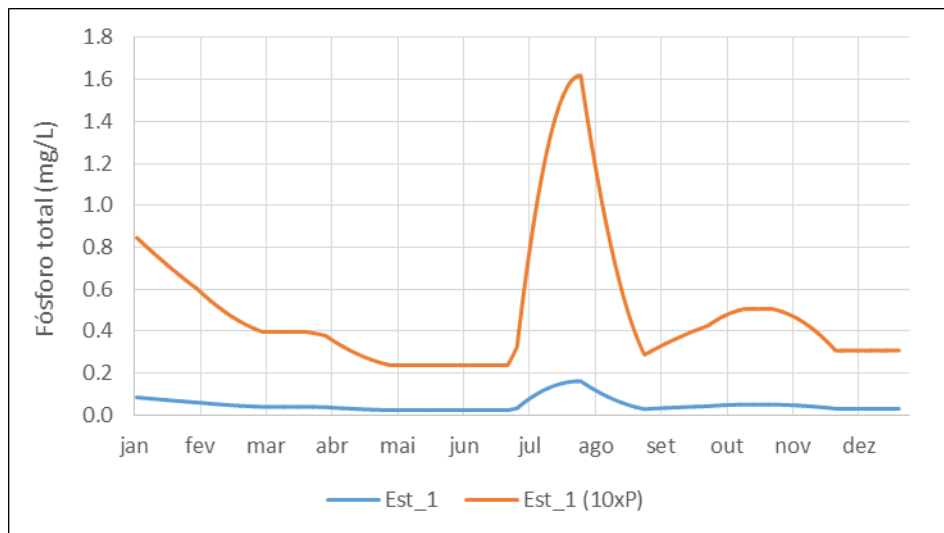


Figura 40 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 2

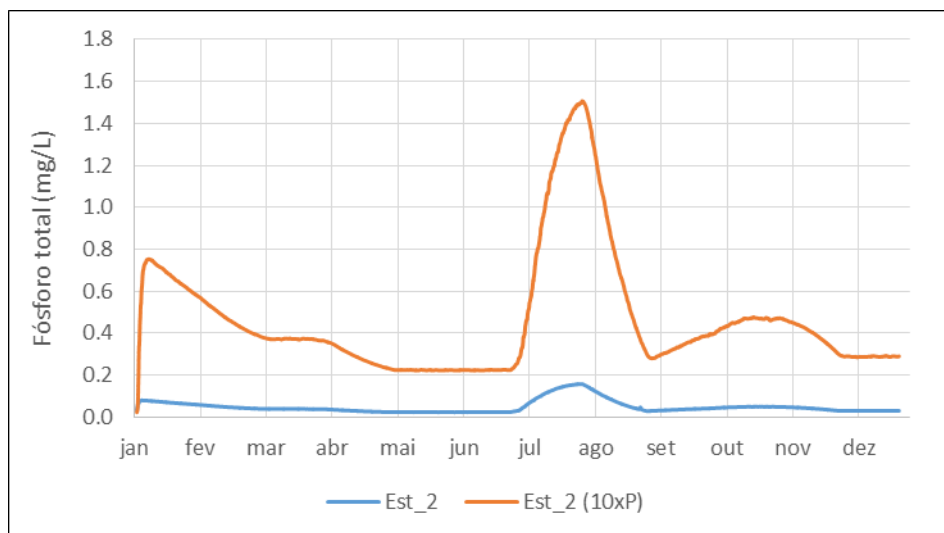
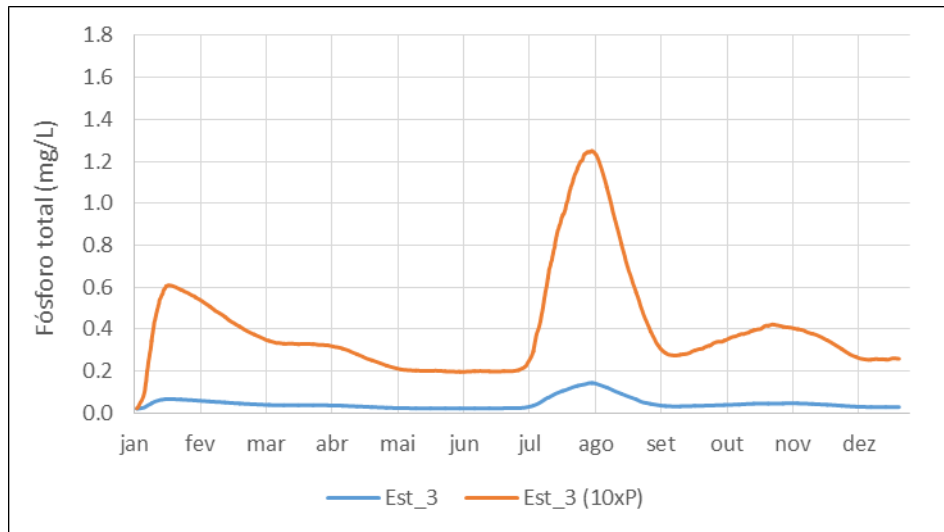


Figura 41 - Comparação entre os valores de fósforo total, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3



As demais variáveis de estado apresentaram resultados bastante similares aos da primeira simulação. Pequenas diferenças foram verificadas nos valores médios dos compostos nitrogenados, leve diminuição do nitrato e nitrogênio orgânico e aumento da amônia. As concentrações de OD e DBO não apresentaram flutuações, como mostrado nas Figuras 42 e 43, para a estação 3.

Figura 42 - Comparação entre os valores de OD, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3

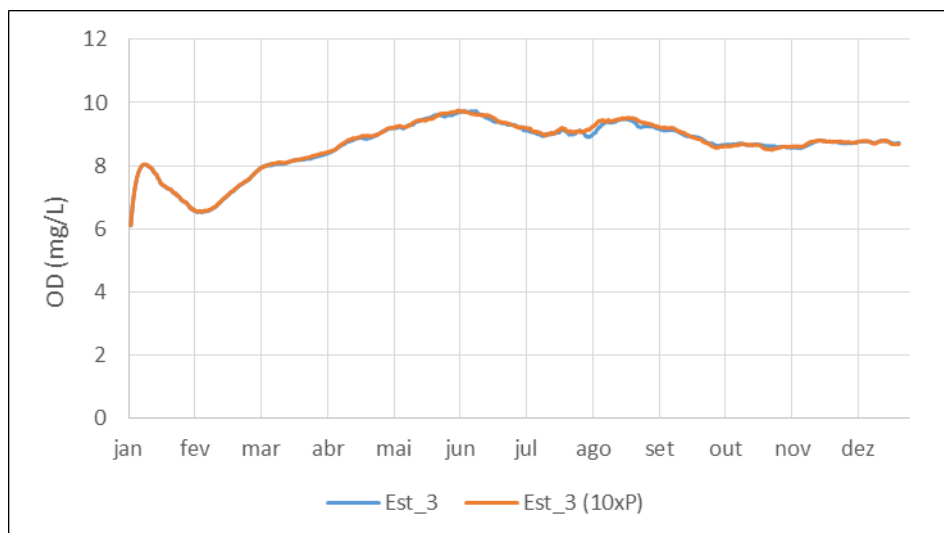
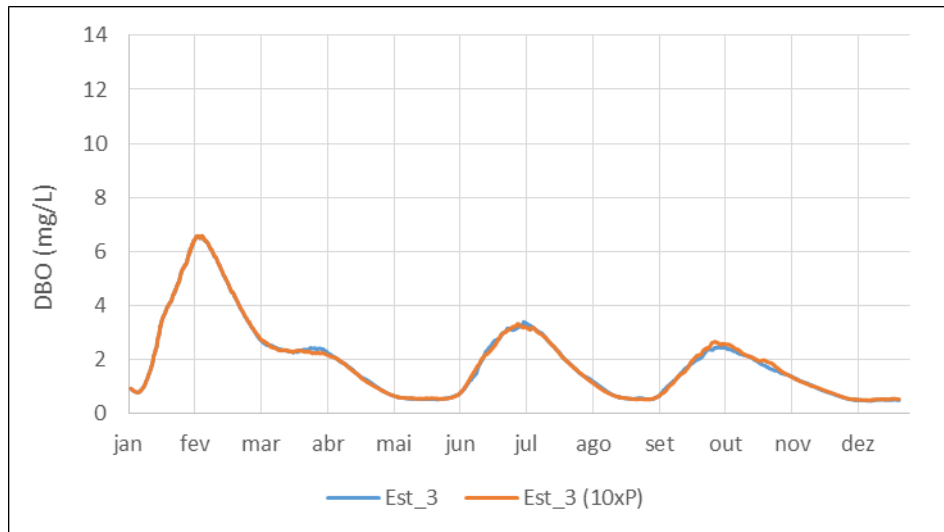


Figura 43 - Comparação entre os valores de DBO, em mg/L, no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3



As concentrações de clorofila *a* apresentaram alterações somente nas estações 2 e 3, chegando a dobrar os valores na região próxima à barragem, com um aumento dos picos de agosto/setembro e de novembro ao redor de 3,0  $\mu\text{g/L}$ . Como se trata do indicador da biomassa de fitoplâncton, é presumível apresentar uma resposta ao aumento da carga de fósforo. As Figuras 44, 45 e 46 exibem os resultados com a comparação entre os cenários para cada estação, onde nota-se que na estação 1 os resultados foram praticamente iguais, indicando que essa região, próxima à entrada do reservatório, é influenciada pelos rios afluentes.

Figura 44 - Comparação entre os valores de clorofila *a*, em  $\mu\text{g/L}$ , no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 1

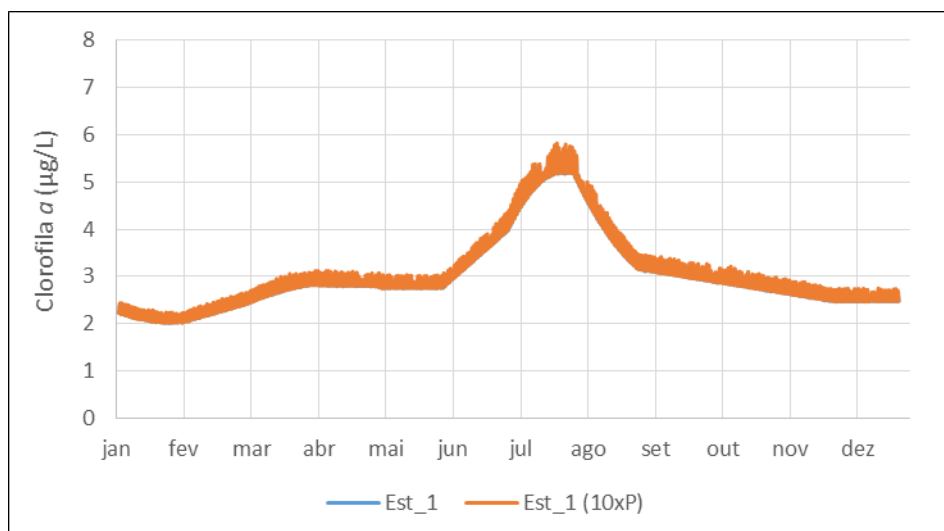


Figura 45 - Comparação entre os valores de clorofila  $a$ , em  $\mu\text{g/L}$ , no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 2

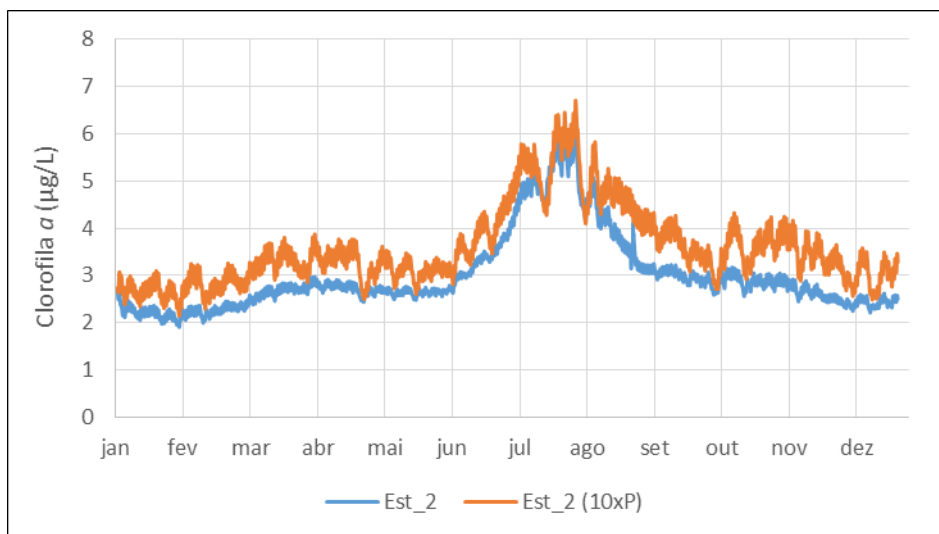
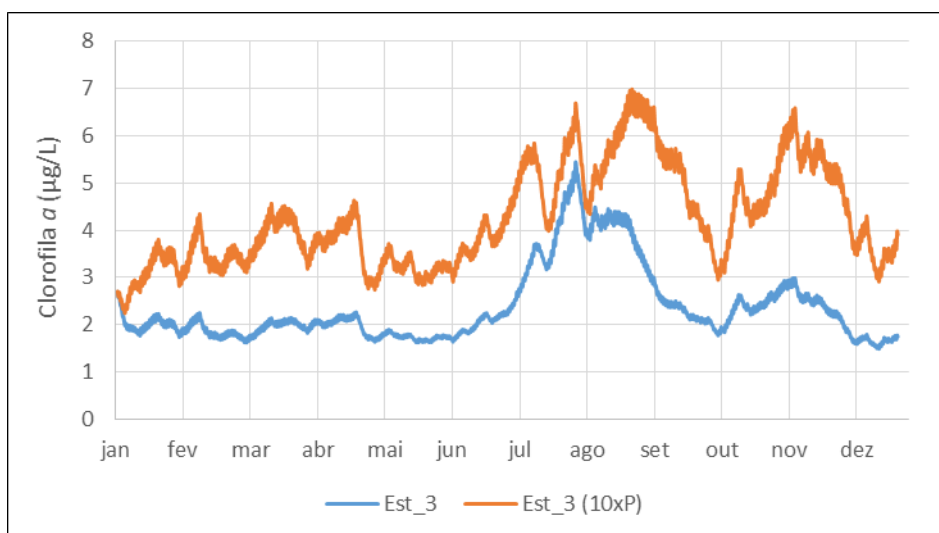


Figura 46 - Comparação entre os valores de clorofila  $a$ , em  $\mu\text{g/L}$ , no reservatório do Passaúna, ano de 2010, para os dois cenários na estação 3



## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação dos modelos de circulação hidrodinâmica bidimensional e de qualidade de água e eutrofização do SisBaHiA no reservatório do Passaúna. O desenvolvimento do processo de modelagem iniciou com a construção de uma malha de elementos finitos. A área do domínio de modelagem (7,7 km<sup>2</sup>) ficou um pouco menor que a área do espelho d'água segundo Carneiro, Kelderman e Irvine (2016), 9,0 km<sup>2</sup>, devido, principalmente, a desconsideração da região próxima ao deságue do rio Passaúna, já que esse local apresenta um trajeto bastante estreito e com poucos dados batimétricos. Em relação ao volume do reservatório, o modelo estimou em 65 hm<sup>3</sup>, valor superior ao descrito na literatura para volume total (59 hm<sup>3</sup>). A profundidade média (5,9 m) ficou próxima ao valor real de 6,5 m.

Quanto ao comportamento do fluxo longitudinal no corpo d'água, o modelo de circulação hidrodinâmica obteve velocidades médias bem baixas, em torno de 0,02 m/s, com um ligeiro aumento nas regiões de estrangulamento. Tais resultados foram semelhantes aos verificados no reservatório Rio Verde, o qual trata-se, igualmente ao Passaúna, de um reservatório raso e com baixo aporte fluvial. Ainda, as pequenas diferenças entre os valores nas estações representaram de forma adequada a compartimentalização do reservatório, com a especificação da zona lótica, de transição e lântica.

Os resultados do modelo de qualidade de água e eutrofização seguiram, no geral, o mesmo padrão das condições atribuídas aos tributários ao longo do período de simulação, havendo aumento e diminuição da concentração compatível com as cargas disponibilizadas. Além disso, demonstraram o grau de influência que as condições de contorno exercem em cada região do reservatório, sendo bastante significativa nas áreas próximas aos rios e praticamente sem relevância nas zonas lânticas, evidenciando assim que nesses compartimentos predominam os processos de transformação considerados no modelo.

O oxigênio dissolvido manteve-se estabilizado na estação 3 (próximo à barragem) ao longo do tempo, sem apresentar variações significativas nos meses mais frios, como ocorrido nas demais estações, já que nesse período a concentração de saturação do OD e, portanto, a reaeração são mais elevadas. Quanto aos compostos nitrogenados, observou-se que os valores de amônia tiveram um aumento na estação 3, ocorrendo o contrário com o nitrogênio orgânico e o nitrato, provavelmente pelo fato do nitrogênio orgânico ter se transformado para a forma amoniacal e esta ainda não ter sido convertida em nitrato.



O fósforo total apresentou um pequeno decréscimo em nível espacial, com maiores valores na estação 1, o que pode indicar a retenção e, conseqüentemente, acúmulo desse nutriente nos sedimentos do reservatório, como evidenciado por Carneiro, Kelderman e Irvine (2016). Nos resultados de clorofila *a*, verificou-se uma resposta à carga de nutrientes, já que o pico de concentração ocorreu no mesmo período dos valores máximos de fósforo. Contudo, esse efeito não foi proporcional, pois as variações da concentração de clorofila *a* na simulação do cenário 1 foram distintas comparadas ao aumento de dez vezes a carga de fósforo, cenário 2. Os resultados indicaram que o aumento da carga de nutrientes pode gerar problemas de proliferação de fitoplânctons e, assim, eutrofização.

Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos pelo modelo são satisfatórios, mas não representam a realidade, visto que os dados de vazão e concentração das substâncias foram estimados a partir de fontes diversas da literatura. No caso da clorofila *a*, como não foram encontrados dados de medições nos tributários, utilizou-se valores referentes ao próprio reservatório. Apesar disso, demonstrou-se que os modelos do SisBaHiA responderam de forma adequada e coerente o conjunto de dados fornecidos, evidenciando a capacidade dessa ferramenta em representar o padrão de circulação hidrodinâmica e a distribuição das variáveis de estado representativas da qualidade da água de um reservatório.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA A. B.; EIGER, S.; ROSMAN P. C. C. **Métodos numéricos em recursos hídricos 3**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 1993.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de segurança de barragens 2016**. Brasília: ANA, 2017.
- ANDREOLI, C.V.; CARNEIRO, C. **Gestão integrada de mananciais de abastecimento eutrofizados**. Curitiba: Sanepar/Finep, 2005.
- ARAUCÁRIA. Prefeitura Municipal. **Perfil Municipal**. Secretaria Municipal de Planejamento SMPL, Departamento de Gestão do Conhecimento, 2003, 167 p.
- BIGARELLA, J. J. **Visão integrada da problemática da erosão**. Curitiba: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1985.
- BUSCH, O. M. S. **Qualidade da água e saúde humana: riscos potenciais face ao processo de ocupação urbana no entorno da represa do Passaúna – Curitiba – PR**. 257 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- CARNEIRO, C.; KELDERMAN, P.; IRVINE, K. Assessment of phosphorus sediment–water exchange through water and mass budget in Passaúna Reservoir (Paraná State, Brazil). **Environ Earth Sci**, 2016, p. 75-564.
- CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**. USA: McGraw-Hill Companies, 1997.
- COORDENAÇÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA (COMEC). Região Metropolitana de Curitiba. **Revista da Região Metropolitana de Curitiba**, Curitiba, 2017.
- CORRÊA, G. P. **Aplicação do modelo de qualidade de água SisBaHiA® no reservatório do rio Verde, RMC/PR**. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- COSTA, R. M. P. da.; ALCANTARA, J. K. A.; RAUEN, W. B. **Diagnóstico da qualidade da água do reservatório do rio Passaúna**. In: Encontro de Pesquisa e Iniciação Científica da Universidade Positivo – EPIC, 2015.
- CUNHA, C. de L. da N.; CARNEIRO, C.; GOBBI, E. F.; ANDREOLI, C. V. **Eutrofização em Reservatórios: Gestão Preventiva**. Estudo Interdisciplinar na Bacia do Rio Verde, PR. Curitiba: UFPR, 2011.
- DEUS, R.; BRITO, D.; MATEUS, M.; KENOV, I.; FORNARO, A.; NEVES, R.; ALVES, C. N. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuçu reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model. **Journal of Hydrology**, v. 487, 2013, p. 1-12.
- DIAS, L. N. **Estudo integrado da bacia hidrográfica do reservatório Passaúna (Araucária-Paraná-Brasil), considerando a interrelação da ocupação dos solos com a**

**qualidade das águas.** 141 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamentos de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná.** Londrina: EMBRAPA/IAPAR, 1984.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência/Finep, 2011.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Eng Sanit Ambient**, v.18 n.1, jan/mar 2013, p. 83-93.

FISCHER, H. B.; LIST, E. J.; KOH, R. C. Y.; IMBERGER, J.; BROOKS, N. H. **Mixing in Inland and Coastal Waters.** New York: Academic Press Inc., 1979.

FRANZ, G. A. S. **Desenvolvimento, aplicação e análise do modelo de qualidade da água e eutrofização do SisBaHiA®.** 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

HA, T. T.; TUAN, P. D.; LAI, H. V.; PHONG, N. H. Water pollution estimation based on the 2D transport-diffusion model and the Singular Evolutive Interpolated Kalman filter. **C. R. Mecanique**, v. 342, 2014, p. 106-124.

HIDROWEB. Disponível em: < <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 12 maio. 2017.

HILGERT, S.; SOTIRI, K. **Ecossonda como uma ferramenta de gerenciamento promissora.** In: Workshop Abordagens inovadoras para a gestão de reservatórios. Projeto SeWaMa, Programa Novas Parcerias (NoPa). Curitiba, 2017.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Monitoramento da qualidade das águas dos reservatórios do Estado do Paraná no período de 2005 a 2008.** Paraná, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico, 2010.** Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 20 abril. 2017.

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO (MARETEC). **MOHID Hydrodynamic Module User Guide.** Disponível em: < <http://aquageo.es/wp-content/uploads/2012/10/HYDRODYNAMIC-MODULE-MOHID.-USER-GUIDE.pdf>>. Acesso em: 4 maio. 2017.

MEGER, D. G. **Material particulado suspenso e macroconstituintes iônicos em um reservatório de abastecimento:** o caso do rio Passaúna, Curitiba, Paraná, Brasil. 143 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental) – Centro Universitário Positivo (UnicenP) Curitiba, 2007.

NOCKO, H. R. **Modelagem matemática de reservatórios artificiais como ferramenta para o licenciamento ambiental.** 163 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Setor de Tecnologia e Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

ODUM, E. P. **Fundamentals of Ecology**. 3. ed. Philadelphia – London – Toronto: W. B-Saunders Company, 1971.

POLLI, B. A.; SILVA, M. G. da; RAUEN, W. B. **Modelagem do reservatório**. In: Workshop Abordagens inovadoras para a gestão de reservatórios. Projeto SeWaMa, Programa Novas Parcerias (NoPa). Curitiba, 2017.

PORTO, R. La L.; BRANCO, S. M.; CLEARY, R. W.; COIMBRA, R. M.; EIGER, S.; LUCA, S. J. de; NOGUEIRA, V. de P. Q.; PORTO, M. F. do A. **Hidrologia ambiental**. São Paulo: Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.

RAUEN, W. B. Notas pessoais, 2014 (material não publicado).

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SISBAHIA**. Disponível em: <<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/>>. Acesso em: 16 abril. 2017.

SALGADO, M. S. K.; RAUEN, W. B. **Coleta e análise de sedimentos do reservatório do Passaúna**. In: Encontro de Pesquisa e Iniciação Científica da Universidade Positivo – EPIC, 2014.

SANEPAR. **Dados sobre rede de distribuição de água e rede coletora de esgotos das APA's dos rios Passaúna e Iraí**. Curitiba, 2004. Relatório.

SANEPAR. **Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento de Água Integrado de Curitiba e Região Metropolitana**. Curitiba: Sanepar, 2013.

SANEPAR. **Sanepar é parceira do projeto internacional de pesquisa Mudak**. Disponível em: <<http://intra.sanepar.com.br/>>. Acesso em: 31 outubro. 2017.

SAUNITI, R. M.; FERNANDES, L. A.; BITTENCOURT, A. V. L. Estudo do assoreamento do reservatório da barragem do rio Passaúna – Curitiba – PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 54, 2004, p. 25-35.

SILVA FILHO, L. V. da. **Qualidade e percepção ambiental: estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Passaúna**. 202 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SIQUEIRA, A. C. **Avaliação do assoreamento do reservatório de abastecimento de água do rio Passaúna**. 70 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) – Centro Universitário Positivo (UnicenP), Curitiba, 2014.

SMAHA, N.; GOBBI, M. F. Implementação de um modelo para simular a eutrofização do reservatório do Passaúna - Curitiba – PR. RBRH – **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n. 3, jul/set 2003, p. 59-69.

TAMANINI, M. do S. A. **Diagnóstico físico-ambiental para a determinação da fragilidade potencial e emergente da bacia do baixo curso do rio Passaúna em Araucária - Paraná**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J.A. **Principles of surface water quality modeling and control**. USA: Harper Collins Publishers, 1987.

VEIGA, B. V. **Modelagem computacional do processo de eutrofização e aplicação de um modelo de balanço de nutrientes a reservatórios da Região Metropolitana de Curitiba**. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

VEIGA, B. V.; DZIEDZIC, M. Estimating nutrient loads in the Passaúna reservoir with FLUX. **Technical note. Water International**, v. 35, n. 2, march 2010, p. 210-222.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M.; **Introdução À Engenharia Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2011

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WL | DELFT HYDRAULICS. **Delft3D – FLOW User Manual**. Holanda Delft, 2014.

XAVIER, C. da F. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois reservatórios da Região Metropolitana de Curitiba – Paraná**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Solos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

## APÊNDICE A

Data	Vazão (m³/s)						
	Passaúna	Ferraria	Enéas	Estefano	Invasão	Claudir	Kilimanjaro
01/01/2010	0,1278	0,0152	0,0044	0,0009	0,0032	0,0032	0,0038
02/01/2010	0,1231	0,0147	0,0042	0,0009	0,0030	0,0031	0,0037
03/01/2010	0,1242	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
04/01/2010	0,1992	0,0237	0,0069	0,0014	0,0049	0,0050	0,0059
05/01/2010	0,1766	0,0210	0,0061	0,0012	0,0044	0,0045	0,0053
06/01/2010	0,1995	0,0238	0,0069	0,0014	0,0049	0,0050	0,0059
07/01/2010	0,1613	0,0192	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
08/01/2010	0,1476	0,0176	0,0051	0,0010	0,0036	0,0037	0,0044
09/01/2010	0,1314	0,0157	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
10/01/2010	0,1538	0,0183	0,0053	0,0011	0,0038	0,0039	0,0046
11/01/2010	0,1560	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0046
12/01/2010	0,7350	0,0876	0,0254	0,0051	0,0182	0,0186	0,0219
13/01/2010	0,4632	0,0552	0,0160	0,0032	0,0114	0,0117	0,0138
14/01/2010	0,4827	0,0575	0,0167	0,0034	0,0119	0,0122	0,0144
15/01/2010	0,4015	0,0478	0,0139	0,0028	0,0099	0,0101	0,0120
16/01/2010	0,2615	0,0312	0,0090	0,0018	0,0065	0,0066	0,0078
17/01/2010	0,2269	0,0270	0,0078	0,0016	0,0056	0,0057	0,0068
18/01/2010	0,2121	0,0253	0,0073	0,0015	0,0052	0,0054	0,0063
19/01/2010	0,2174	0,0259	0,0075	0,0015	0,0054	0,0055	0,0065
20/01/2010	0,1856	0,0221	0,0064	0,0013	0,0046	0,0047	0,0055
21/01/2010	0,3248	0,0387	0,0112	0,0023	0,0080	0,0082	0,0097
22/01/2010	0,3125	0,0372	0,0108	0,0022	0,0077	0,0079	0,0093
23/01/2010	0,4345	0,0518	0,0150	0,0030	0,0107	0,0110	0,0129
24/01/2010	0,2743	0,0327	0,0095	0,0019	0,0068	0,0069	0,0082
25/01/2010	0,2079	0,0248	0,0072	0,0015	0,0051	0,0053	0,0062
26/01/2010	0,3287	0,0392	0,0113	0,0023	0,0081	0,0083	0,0098
27/01/2010	0,2506	0,0299	0,0086	0,0018	0,0062	0,0063	0,0075
28/01/2010	0,3390	0,0404	0,0117	0,0024	0,0084	0,0086	0,0101
29/01/2010	0,6401	0,0763	0,0221	0,0045	0,0158	0,0162	0,0191
30/01/2010	1,3067	0,1557	0,0451	0,0091	0,0323	0,0330	0,0389
31/01/2010	0,4498	0,0536	0,0155	0,0031	0,0111	0,0114	0,0134
01/02/2010	0,3181	0,0379	0,0110	0,0022	0,0079	0,0080	0,0095
02/02/2010	0,2810	0,0335	0,0097	0,0020	0,0069	0,0071	0,0084
03/02/2010	0,2475	0,0295	0,0085	0,0017	0,0061	0,0063	0,0074
04/02/2010	0,2199	0,0262	0,0076	0,0015	0,0054	0,0056	0,0065
05/02/2010	0,2068	0,0246	0,0071	0,0014	0,0051	0,0052	0,0062
06/02/2010	0,2107	0,0251	0,0073	0,0015	0,0052	0,0053	0,0063
07/02/2010	0,1962	0,0234	0,0068	0,0014	0,0048	0,0050	0,0058
08/02/2010	0,1844	0,0220	0,0064	0,0013	0,0046	0,0047	0,0055
09/02/2010	0,2305	0,0275	0,0080	0,0016	0,0057	0,0058	0,0069
10/02/2010	0,3569	0,0425	0,0123	0,0025	0,0088	0,0090	0,0106
11/02/2010	0,2146	0,0256	0,0074	0,0015	0,0053	0,0054	0,0064
12/02/2010	0,1870	0,0223	0,0065	0,0013	0,0046	0,0047	0,0056

13/02/2010	0,1777	0,0212	0,0061	0,0012	0,0044	0,0045	0,0053
14/02/2010	0,1649	0,0197	0,0057	0,0012	0,0041	0,0042	0,0049
15/02/2010	0,1752	0,0209	0,0060	0,0012	0,0043	0,0044	0,0052
16/02/2010	0,1574	0,0188	0,0054	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
17/02/2010	0,1588	0,0189	0,0055	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
18/02/2010	0,1599	0,0191	0,0055	0,0011	0,0039	0,0040	0,0048
19/02/2010	0,1738	0,0207	0,0060	0,0012	0,0043	0,0044	0,0052
20/02/2010	0,1574	0,0188	0,0054	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
21/02/2010	0,1440	0,0172	0,0050	0,0010	0,0036	0,0036	0,0043
22/02/2010	0,1378	0,0164	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
23/02/2010	0,1339	0,0160	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
24/02/2010	0,1803	0,0215	0,0062	0,0013	0,0045	0,0046	0,0054
25/02/2010	0,2782	0,0332	0,0096	0,0019	0,0069	0,0070	0,0083
26/02/2010	0,1610	0,0192	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
27/02/2010	0,1437	0,0171	0,0050	0,0010	0,0035	0,0036	0,0043
28/02/2010	0,1440	0,0172	0,0050	0,0010	0,0036	0,0036	0,0043
01/03/2010	0,1376	0,0164	0,0047	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
02/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
03/03/2010	0,1378	0,0164	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
04/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
05/03/2010	0,1563	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0047
06/03/2010	0,2997	0,0357	0,0103	0,0021	0,0074	0,0076	0,0089
07/03/2010	0,2082	0,0248	0,0072	0,0015	0,0051	0,0053	0,0062
08/03/2010	0,1791	0,0213	0,0062	0,0013	0,0044	0,0045	0,0053
09/03/2010	0,1613	0,0192	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
10/03/2010	0,1512	0,0180	0,0052	0,0011	0,0037	0,0038	0,0045
11/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
12/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
13/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
14/03/2010	0,1602	0,0191	0,0055	0,0011	0,0040	0,0040	0,0048
15/03/2010	0,1563	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0047
16/03/2010	0,1339	0,0160	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
17/03/2010	0,1289	0,0154	0,0044	0,0009	0,0032	0,0033	0,0038
18/03/2010	0,1339	0,0160	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
19/03/2010	0,1303	0,0155	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
20/03/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
21/03/2010	0,1390	0,0166	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
22/03/2010	0,1328	0,0158	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
23/03/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
24/03/2010	0,1303	0,0155	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
25/03/2010	0,3921	0,0467	0,0135	0,0027	0,0097	0,0099	0,0117
26/03/2010	0,2015	0,0240	0,0070	0,0014	0,0050	0,0051	0,0060
27/03/2010	0,1638	0,0195	0,0057	0,0011	0,0040	0,0041	0,0049
28/03/2010	0,2048	0,0244	0,0071	0,0014	0,0051	0,0052	0,0061
29/03/2010	0,4431	0,0528	0,0153	0,0031	0,0109	0,0112	0,0132
30/03/2010	0,2436	0,0290	0,0084	0,0017	0,0060	0,0062	0,0073

31/03/2010	0,1856	0,0221	0,0064	0,0013	0,0046	0,0047	0,0055
01/04/2010	0,1613	0,0192	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
02/04/2010	0,1588	0,0189	0,0055	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
03/04/2010	0,1563	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0047
04/04/2010	0,1563	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0047
05/04/2010	0,1339	0,0160	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
06/04/2010	0,2302	0,0274	0,0079	0,0016	0,0057	0,0058	0,0069
07/04/2010	0,1487	0,0177	0,0051	0,0010	0,0037	0,0038	0,0044
08/04/2010	0,1426	0,0170	0,0049	0,0010	0,0035	0,0036	0,0042
09/04/2010	0,1378	0,0164	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
10/04/2010	0,1353	0,0161	0,0047	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
11/04/2010	0,1328	0,0158	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
12/04/2010	0,1303	0,0155	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
13/04/2010	0,1278	0,0152	0,0044	0,0009	0,0032	0,0032	0,0038
14/04/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
15/04/2010	0,1256	0,0150	0,0043	0,0009	0,0031	0,0032	0,0037
16/04/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
17/04/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
18/04/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
19/04/2010	0,1205	0,0144	0,0042	0,0008	0,0030	0,0030	0,0036
20/04/2010	0,1205	0,0144	0,0042	0,0008	0,0030	0,0030	0,0036
21/04/2010	0,1231	0,0147	0,0042	0,0009	0,0030	0,0031	0,0037
22/04/2010	0,1194	0,0142	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0036
23/04/2010	0,4426	0,0527	0,0153	0,0031	0,0109	0,0112	0,0132
24/04/2010	0,3407	0,0406	0,0118	0,0024	0,0084	0,0086	0,0101
25/04/2010	0,3404	0,0406	0,0118	0,0024	0,0084	0,0086	0,0101
26/04/2010	0,6507	0,0775	0,0225	0,0046	0,0161	0,0164	0,0194
27/04/2010	0,3195	0,0381	0,0110	0,0022	0,0079	0,0081	0,0095
28/04/2010	0,2054	0,0245	0,0071	0,0014	0,0051	0,0052	0,0061
29/04/2010	0,2054	0,0245	0,0071	0,0014	0,0051	0,0052	0,0061
30/04/2010	0,1819	0,0217	0,0063	0,0013	0,0045	0,0046	0,0054
01/05/2010	0,1713	0,0204	0,0059	0,0012	0,0042	0,0043	0,0051
02/05/2010	0,1638	0,0195	0,0057	0,0011	0,0040	0,0041	0,0049
03/05/2010	0,1613	0,0192	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
04/05/2010	0,1588	0,0189	0,0055	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
05/05/2010	0,1538	0,0183	0,0053	0,0011	0,0038	0,0039	0,0046
06/05/2010	0,1451	0,0173	0,0050	0,0010	0,0036	0,0037	0,0043
07/05/2010	0,1476	0,0176	0,0051	0,0010	0,0036	0,0037	0,0044
08/05/2010	0,4917	0,0586	0,0170	0,0034	0,0121	0,0124	0,0146
09/05/2010	0,2107	0,0251	0,0073	0,0015	0,0052	0,0053	0,0063
10/05/2010	0,1738	0,0207	0,0060	0,0012	0,0043	0,0044	0,0052
11/05/2010	0,1688	0,0201	0,0058	0,0012	0,0042	0,0043	0,0050
12/05/2010	0,1649	0,0197	0,0057	0,0012	0,0041	0,0042	0,0049
13/05/2010	0,1624	0,0194	0,0056	0,0011	0,0040	0,0041	0,0048
14/05/2010	0,1574	0,0188	0,0054	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
15/05/2010	0,1549	0,0185	0,0053	0,0011	0,0038	0,0039	0,0046



16/05/2010	0,1490	0,0178	0,0051	0,0010	0,0037	0,0038	0,0044
17/05/2010	0,1655	0,0197	0,0057	0,0012	0,0041	0,0042	0,0049
18/05/2010	0,2235	0,0266	0,0077	0,0016	0,0055	0,0056	0,0067
19/05/2010	0,1856	0,0221	0,0064	0,0013	0,0046	0,0047	0,0055
20/05/2010	0,1560	0,0186	0,0054	0,0011	0,0039	0,0039	0,0046
21/05/2010	0,1512	0,0180	0,0052	0,0011	0,0037	0,0038	0,0045
22/05/2010	0,1524	0,0182	0,0053	0,0011	0,0038	0,0038	0,0045
23/05/2010	0,1476	0,0176	0,0051	0,0010	0,0036	0,0037	0,0044
24/05/2010	0,1440	0,0172	0,0050	0,0010	0,0036	0,0036	0,0043
25/05/2010	0,1451	0,0173	0,0050	0,0010	0,0036	0,0037	0,0043
26/05/2010	0,1378	0,0164	0,0048	0,0010	0,0034	0,0035	0,0041
27/05/2010	0,1353	0,0161	0,0047	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
28/05/2010	0,1317	0,0157	0,0045	0,0009	0,0033	0,0033	0,0039
29/05/2010	0,1289	0,0154	0,0044	0,0009	0,0032	0,0033	0,0038
30/05/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
31/05/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
01/06/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
02/06/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
03/06/2010	0,1205	0,0144	0,0042	0,0008	0,0030	0,0030	0,0036
04/06/2010	0,2096	0,0250	0,0072	0,0015	0,0052	0,0053	0,0062
05/06/2010	0,2910	0,0347	0,0100	0,0020	0,0072	0,0074	0,0087
06/06/2010	0,1585	0,0189	0,0055	0,0011	0,0039	0,0040	0,0047
07/06/2010	0,1426	0,0170	0,0049	0,0010	0,0035	0,0036	0,0042
08/06/2010	0,1353	0,0161	0,0047	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
09/06/2010	0,1303	0,0155	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
10/06/2010	0,1267	0,0151	0,0044	0,0009	0,0031	0,0032	0,0038
11/06/2010	0,1245	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
12/06/2010	0,1292	0,0154	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0038
13/06/2010	0,1231	0,0147	0,0042	0,0009	0,0030	0,0031	0,0037
14/06/2010	0,1194	0,0142	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0036
15/06/2010	0,1180	0,0141	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0035
16/06/2010	0,1144	0,0136	0,0039	0,0008	0,0028	0,0029	0,0034
17/06/2010	0,1133	0,0135	0,0039	0,0008	0,0028	0,0029	0,0034
18/06/2010	0,1099	0,0131	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
19/06/2010	0,1085	0,0129	0,0037	0,0008	0,0027	0,0027	0,0032
20/06/2010	0,1072	0,0128	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
21/06/2010	0,1518	0,0181	0,0052	0,0011	0,0037	0,0038	0,0045
22/06/2010	0,2372	0,0283	0,0082	0,0017	0,0059	0,0060	0,0071
23/06/2010	0,1339	0,0160	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
24/06/2010	0,1180	0,0141	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0035
25/06/2010	0,1111	0,0132	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
26/06/2010	0,1072	0,0128	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
27/06/2010	0,1060	0,0126	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
28/06/2010	0,1049	0,0125	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
29/06/2010	0,1027	0,0122	0,0035	0,0007	0,0025	0,0026	0,0031
30/06/2010	0,1016	0,0121	0,0035	0,0007	0,0025	0,0026	0,0030

01/07/2010	0,0993	0,0118	0,0034	0,0007	0,0025	0,0025	0,0030
02/07/2010	0,0982	0,0117	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
03/07/2010	0,0971	0,0116	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
04/07/2010	0,0971	0,0116	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
05/07/2010	0,0960	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029
06/07/2010	0,0949	0,0113	0,0033	0,0007	0,0023	0,0024	0,0028
07/07/2010	0,0926	0,0110	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0028
08/07/2010	0,0915	0,0109	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0027
09/07/2010	0,0904	0,0108	0,0031	0,0006	0,0022	0,0023	0,0027
10/07/2010	0,0893	0,0106	0,0031	0,0006	0,0022	0,0023	0,0027
11/07/2010	0,0893	0,0106	0,0031	0,0006	0,0022	0,0023	0,0027
12/07/2010	0,0871	0,0104	0,0030	0,0006	0,0022	0,0022	0,0026
13/07/2010	0,2405	0,0287	0,0083	0,0017	0,0059	0,0061	0,0072
14/07/2010	0,1108	0,0132	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
15/07/2010	0,1052	0,0125	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
16/07/2010	0,2322	0,0277	0,0080	0,0016	0,0057	0,0059	0,0069
17/07/2010	0,2232	0,0266	0,0077	0,0016	0,0055	0,0056	0,0066
18/07/2010	0,1702	0,0203	0,0059	0,0012	0,0042	0,0043	0,0051
19/07/2010	0,1303	0,0155	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0039
20/07/2010	0,1242	0,0148	0,0043	0,0009	0,0031	0,0031	0,0037
21/07/2010	0,1111	0,0132	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
22/07/2010	0,1049	0,0125	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
23/07/2010	0,1133	0,0135	0,0039	0,0008	0,0028	0,0029	0,0034
24/07/2010	0,2324	0,0277	0,0080	0,0016	0,0057	0,0059	0,0069
25/07/2010	0,1219	0,0145	0,0042	0,0009	0,0030	0,0031	0,0036
26/07/2010	0,1111	0,0132	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
27/07/2010	0,1049	0,0125	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
28/07/2010	0,1027	0,0122	0,0035	0,0007	0,0025	0,0026	0,0031
29/07/2010	0,1005	0,0120	0,0035	0,0007	0,0025	0,0025	0,0030
30/07/2010	0,0993	0,0118	0,0034	0,0007	0,0025	0,0025	0,0030
31/07/2010	0,0960	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029
01/08/2010	0,1077	0,0128	0,0037	0,0008	0,0027	0,0027	0,0032
02/08/2010	0,1085	0,0129	0,0037	0,0008	0,0027	0,0027	0,0032
03/08/2010	0,1097	0,0131	0,0038	0,0008	0,0027	0,0028	0,0033
04/08/2010	0,1780	0,0212	0,0061	0,0012	0,0044	0,0045	0,0053
05/08/2010	0,1451	0,0173	0,0050	0,0010	0,0036	0,0037	0,0043
06/08/2010	0,1122	0,0134	0,0039	0,0008	0,0028	0,0028	0,0033
07/08/2010	0,1049	0,0125	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
08/08/2010	0,1005	0,0120	0,0035	0,0007	0,0025	0,0025	0,0030
09/08/2010	0,0971	0,0116	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
10/08/2010	0,0971	0,0116	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
11/08/2010	0,0982	0,0117	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
12/08/2010	0,0960	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029
13/08/2010	0,0960	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029
14/08/2010	0,0926	0,0110	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0028
15/08/2010	0,0926	0,0110	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0028

16/08/2010	0,0915	0,0109	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0027
17/08/2010	0,0915	0,0109	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0027
18/08/2010	0,0893	0,0106	0,0031	0,0006	0,0022	0,0023	0,0027
19/08/2010	0,0871	0,0104	0,0030	0,0006	0,0022	0,0022	0,0026
20/08/2010	0,0843	0,0100	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
21/08/2010	0,0832	0,0099	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
22/08/2010	0,0820	0,0098	0,0028	0,0006	0,0020	0,0021	0,0024
23/08/2010	0,0820	0,0098	0,0028	0,0006	0,0020	0,0021	0,0024
24/08/2010	0,0776	0,0092	0,0027	0,0005	0,0019	0,0020	0,0023
25/08/2010	0,0787	0,0094	0,0027	0,0006	0,0019	0,0020	0,0023
26/08/2010	0,0776	0,0092	0,0027	0,0005	0,0019	0,0020	0,0023
27/08/2010	0,0776	0,0092	0,0027	0,0005	0,0019	0,0020	0,0023
28/08/2010	0,0776	0,0092	0,0027	0,0005	0,0019	0,0020	0,0023
29/08/2010	0,0753	0,0090	0,0026	0,0005	0,0019	0,0019	0,0022
30/08/2010	0,0753	0,0090	0,0026	0,0005	0,0019	0,0019	0,0022
31/08/2010	0,0753	0,0090	0,0026	0,0005	0,0019	0,0019	0,0022
01/09/2010	0,0692	0,0082	0,0024	0,0005	0,0017	0,0017	0,0021
02/09/2010	0,0714	0,0085	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0021
03/09/2010	0,0726	0,0086	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0022
04/09/2010	0,0703	0,0084	0,0024	0,0005	0,0017	0,0018	0,0021
05/09/2010	0,0703	0,0084	0,0024	0,0005	0,0017	0,0018	0,0021
06/09/2010	0,0714	0,0085	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0021
07/09/2010	0,0787	0,0094	0,0027	0,0006	0,0019	0,0020	0,0023
08/09/2010	0,0737	0,0088	0,0025	0,0005	0,0018	0,0019	0,0022
09/09/2010	0,0714	0,0085	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0021
10/09/2010	0,0692	0,0082	0,0024	0,0005	0,0017	0,0017	0,0021
11/09/2010	0,0681	0,0081	0,0024	0,0005	0,0017	0,0017	0,0020
12/09/2010	0,0647	0,0077	0,0022	0,0005	0,0016	0,0016	0,0019
13/09/2010	0,0647	0,0077	0,0022	0,0005	0,0016	0,0016	0,0019
14/09/2010	0,0650	0,0077	0,0022	0,0005	0,0016	0,0016	0,0019
15/09/2010	0,0647	0,0077	0,0022	0,0005	0,0016	0,0016	0,0019
16/09/2010	0,0631	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
17/09/2010	0,0631	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
18/09/2010	0,0608	0,0072	0,0021	0,0004	0,0015	0,0015	0,0018
19/09/2010	0,0619	0,0074	0,0021	0,0004	0,0015	0,0016	0,0018
20/09/2010	0,0639	0,0076	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
21/09/2010	0,0681	0,0081	0,0024	0,0005	0,0017	0,0017	0,0020
22/09/2010	0,0631	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
23/09/2010	0,0597	0,0071	0,0021	0,0004	0,0015	0,0015	0,0018
24/09/2010	0,0787	0,0094	0,0027	0,0006	0,0019	0,0020	0,0023
25/09/2010	0,1490	0,0178	0,0051	0,0010	0,0037	0,0038	0,0044
26/09/2010	0,0845	0,0101	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
27/09/2010	0,0714	0,0085	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0021
28/09/2010	0,0804	0,0096	0,0028	0,0006	0,0020	0,0020	0,0024
29/09/2010	0,0647	0,0077	0,0022	0,0005	0,0016	0,0016	0,0019
30/09/2010	0,0619	0,0074	0,0021	0,0004	0,0015	0,0016	0,0018

01/10/2010	0,0672	0,0080	0,0023	0,0005	0,0017	0,0017	0,0020
02/10/2010	0,0765	0,0091	0,0026	0,0005	0,0019	0,0019	0,0023
03/10/2010	0,0703	0,0084	0,0024	0,0005	0,0017	0,0018	0,0021
04/10/2010	0,1027	0,0122	0,0035	0,0007	0,0025	0,0026	0,0031
05/10/2010	0,1655	0,0197	0,0057	0,0012	0,0041	0,0042	0,0049
06/10/2010	0,0787	0,0094	0,0027	0,0006	0,0019	0,0020	0,0023
07/10/2010	0,1426	0,0170	0,0049	0,0010	0,0035	0,0036	0,0042
08/10/2010	0,0924	0,0110	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0028
09/10/2010	0,0703	0,0084	0,0024	0,0005	0,0017	0,0018	0,0021
10/10/2010	0,0659	0,0078	0,0023	0,0005	0,0016	0,0017	0,0020
11/10/2010	0,0619	0,0074	0,0021	0,0004	0,0015	0,0016	0,0018
12/10/2010	0,0597	0,0071	0,0021	0,0004	0,0015	0,0015	0,0018
13/10/2010	0,0564	0,0067	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
14/10/2010	0,0564	0,0067	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
15/10/2010	0,0837	0,0100	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
16/10/2010	0,0756	0,0090	0,0026	0,0005	0,0019	0,0019	0,0023
17/10/2010	0,0628	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
18/10/2010	0,1331	0,0159	0,0046	0,0009	0,0033	0,0034	0,0040
19/10/2010	0,0745	0,0089	0,0026	0,0005	0,0018	0,0019	0,0022
20/10/2010	0,0608	0,0072	0,0021	0,0004	0,0015	0,0015	0,0018
21/10/2010	0,0575	0,0068	0,0020	0,0004	0,0014	0,0015	0,0017
22/10/2010	0,0564	0,0067	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
23/10/2010	0,0564	0,0067	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
24/10/2010	0,0536	0,0064	0,0018	0,0004	0,0013	0,0014	0,0016
25/10/2010	0,0536	0,0064	0,0018	0,0004	0,0013	0,0014	0,0016
26/10/2010	0,0617	0,0073	0,0021	0,0004	0,0015	0,0016	0,0018
27/10/2010	0,0536	0,0064	0,0018	0,0004	0,0013	0,0014	0,0016
28/10/2010	0,0508	0,0061	0,0018	0,0004	0,0013	0,0013	0,0015
29/10/2010	0,0474	0,0057	0,0016	0,0003	0,0012	0,0012	0,0014
30/10/2010	0,1498	0,0179	0,0052	0,0010	0,0037	0,0038	0,0045
31/10/2010	0,0845	0,0101	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
01/11/2010	0,0628	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
02/11/2010	0,0566	0,0067	0,0020	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
03/11/2010	0,0536	0,0064	0,0018	0,0004	0,0013	0,0014	0,0016
04/11/2010	0,0455	0,0054	0,0016	0,0003	0,0011	0,0011	0,0014
05/11/2010	0,0486	0,0058	0,0017	0,0003	0,0012	0,0012	0,0014
06/11/2010	0,1055	0,0126	0,0036	0,0007	0,0026	0,0027	0,0031
07/11/2010	0,0639	0,0076	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
08/11/2010	0,0575	0,0068	0,0020	0,0004	0,0014	0,0015	0,0017
09/11/2010	0,0555	0,0066	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
10/11/2010	0,0726	0,0086	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0022
11/11/2010	0,0608	0,0072	0,0021	0,0004	0,0015	0,0015	0,0018
12/11/2010	0,0547	0,0065	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0016
13/11/2010	0,0547	0,0065	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0016
14/11/2010	0,0516	0,0062	0,0018	0,0004	0,0013	0,0013	0,0015
15/11/2010	0,0486	0,0058	0,0017	0,0003	0,0012	0,0012	0,0014

16/11/2010	0,0505	0,0060	0,0017	0,0004	0,0012	0,0013	0,0015
17/11/2010	0,0508	0,0061	0,0018	0,0004	0,0013	0,0013	0,0015
18/11/2010	0,0566	0,0067	0,0020	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
19/11/2010	0,0497	0,0059	0,0017	0,0003	0,0012	0,0013	0,0015
20/11/2010	0,0416	0,0050	0,0014	0,0003	0,0010	0,0011	0,0012
21/11/2010	0,0407	0,0049	0,0014	0,0003	0,0010	0,0010	0,0012
22/11/2010	0,0745	0,0089	0,0026	0,0005	0,0018	0,0019	0,0022
23/11/2010	0,0617	0,0073	0,0021	0,0004	0,0015	0,0016	0,0018
24/11/2010	0,0486	0,0058	0,0017	0,0003	0,0012	0,0012	0,0014
25/11/2010	0,0926	0,0110	0,0032	0,0006	0,0023	0,0023	0,0028
26/11/2010	0,0586	0,0070	0,0020	0,0004	0,0014	0,0015	0,0017
27/11/2010	0,0516	0,0062	0,0018	0,0004	0,0013	0,0013	0,0015
28/11/2010	0,0474	0,0057	0,0016	0,0003	0,0012	0,0012	0,0014
29/11/2010	0,0446	0,0053	0,0015	0,0003	0,0011	0,0011	0,0013
30/11/2010	0,0720	0,0086	0,0025	0,0005	0,0018	0,0018	0,0021
01/12/2010	0,0555	0,0066	0,0019	0,0004	0,0014	0,0014	0,0017
02/12/2010	0,1183	0,0141	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0035
03/12/2010	0,1066	0,0127	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
04/12/2010	0,1136	0,0135	0,0039	0,0008	0,0028	0,0029	0,0034
05/12/2010	0,1699	0,0202	0,0059	0,0012	0,0042	0,0043	0,0051
06/12/2010	0,1063	0,0127	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
07/12/2010	0,0834	0,0099	0,0029	0,0006	0,0021	0,0021	0,0025
08/12/2010	0,0857	0,0102	0,0030	0,0006	0,0021	0,0022	0,0026
09/12/2010	0,0703	0,0084	0,0024	0,0005	0,0017	0,0018	0,0021
10/12/2010	0,0631	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
11/12/2010	0,0628	0,0075	0,0022	0,0004	0,0016	0,0016	0,0019
12/12/2010	0,0957	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029
13/12/2010	0,3541	0,0422	0,0122	0,0025	0,0087	0,0089	0,0105
14/12/2010	0,4956	0,0591	0,0171	0,0035	0,0122	0,0125	0,0148
15/12/2010	0,2902	0,0346	0,0100	0,0020	0,0072	0,0073	0,0086
16/12/2010	0,1819	0,0217	0,0063	0,0013	0,0045	0,0046	0,0054
17/12/2010	0,1833	0,0218	0,0063	0,0013	0,0045	0,0046	0,0055
18/12/2010	0,1663	0,0198	0,0057	0,0012	0,0041	0,0042	0,0050
19/12/2010	0,1317	0,0157	0,0045	0,0009	0,0033	0,0033	0,0039
20/12/2010	0,1180	0,0141	0,0041	0,0008	0,0029	0,0030	0,0035
21/12/2010	0,1144	0,0136	0,0039	0,0008	0,0028	0,0029	0,0034
22/12/2010	0,2481	0,0296	0,0086	0,0017	0,0061	0,0063	0,0074
23/12/2010	0,3128	0,0373	0,0108	0,0022	0,0077	0,0079	0,0093
24/12/2010	0,1526	0,0182	0,0053	0,0011	0,0038	0,0039	0,0045
25/12/2010	0,1281	0,0153	0,0044	0,0009	0,0032	0,0032	0,0038
26/12/2010	0,1292	0,0154	0,0045	0,0009	0,0032	0,0033	0,0038
27/12/2010	0,1122	0,0134	0,0039	0,0008	0,0028	0,0028	0,0033
28/12/2010	0,1060	0,0126	0,0037	0,0007	0,0026	0,0027	0,0032
29/12/2010	0,1016	0,0121	0,0035	0,0007	0,0025	0,0026	0,0030
30/12/2010	0,0982	0,0117	0,0034	0,0007	0,0024	0,0025	0,0029
31/12/2010	0,0960	0,0114	0,0033	0,0007	0,0024	0,0024	0,0029

---

## APÊNDICE B

Símbolo	Parâmetro	Variação	Valor
$E_Z$	Eficiência de predação do zooplâncton sobre algas	0,4 a 0,8	0,5
$f_{D5}$	Fração de DBO dissolvido na coluna de água	0,1 a 0,9	0,5
$f_{D7}$	Fração de nitrogênio orgânico dissolvido na coluna de água	0,1 a 1,0	1,0
$f_{D8}$	Fração de fósforo orgânico dissolvido na coluna de água	0,1 a 1,0	0,85
$f_{on}$	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para nitrogênio orgânico	-	0,5
$f_{op}$	Fração de morte e respiração do fitoplâncton reciclada para fósforo orgânico	0,1 a 0,9	0,5
$I_s$	Nível ótimo de luz ( $ly\ d^{-1}$ )	200 a 350	145
$k_{12(20)}$	Coeficiente de nitrificação em 20°C ( $d^{-1}$ )	0,03 a 0,9	0,1
$k_{71(20)}$	Coeficiente de amonificação em 20°C ( $d^{-1}$ )	0,001 a 0,2	0,08
$k_{83(20)}$	Coeficiente de mineralização do fósforo orgânico em 20°C ( $d^{-1}$ )	0,001 a 0,8	0,2
$k_{a(20)}$	Coeficiente de reaeração em 20°C ( $d^{-1}$ )	0,1 a 5,0	0,8
$k_{am}$	Constante de meia saturação para preferência de amônia ( $\mu gN/l$ )	-	50
$k_{2D(20)}$	Coeficiente de desnitrificação em 20°C ( $d^{-1}$ )	0 a 1,0	0,09
$k_{D(20)}$	Coeficiente de desoxigenação em 20°C ( $d^{-1}$ )	0,01 a 1,5	0,2
$k_{DBO}$	Constante de meia saturação para oxidação da DBO ( $mgO_2/l$ )	-	0,5
$k_{ea}$	Taxa de mortalidade do fitoplâncton ( $d^{-1}$ )	0,003 a 0,17	0,1
$k_{ez}$	Taxa de mortalidade do zooplâncton ( $d^{-1}$ )	0,001 a 0,125	0,01
$k_{g(20)}$	Taxa de crescimento do fitoplâncton a 20°C ( $d^{-1}$ )	0,2 a 8,0	2,0
$k_{gz(20)}$	Taxa de predação do fitoplâncton pelo zooplâncton a 20°C ( $m^3gC^{-1}d^{-1}$ )	0,5 a 5,0	0,5
$k_{gzc(20)}$	Perdas do zooplâncton por predação ( $d^{-1}$ )	0,001 a 0,1	0,05
$k_{NIT}$	Constante de meia saturação da nitrificação por limitação de oxigênio ( $mgO_2/l$ )	0,5 a 2,0	2,0
$k_{ra(20)}$	Perdas de fitoplâncton por respiração e excreção a 20°C ( $d^{-1}$ )	0,005 a 0,8	0,2
$k_{rz(20)}$	Perdas do zooplâncton por respiração e excreção a 20°C ( $d^{-1}$ )	0,001 – 0,36	0,03
$k_{sa}$	Constante de meia saturação para predação de zooplâncton sobre alga ( $\mu gChla/l$ )	2 a 25	10
$k_{sN}$	Constante de meia saturação de N ( $\mu gN/l$ )	1,4 a 400	25
$k_{sP}$	Constante de meia saturação de P ( $\mu gP/l$ )	0,5 a 80,0	20
$k_{uN}$	Constante de meia saturação para o consumo de N ( $mgN/l$ )	0,0014 a 0,2000	0,05

$k_{uP}$	Constante de meia saturação para o consumo de P ( $mgP/l$ )	0,0028 a 0,0700	0,05
$r_{ca}$	Razão carbono/clorofila nas células das algas ( $\frac{g(C)}{g(Chla)}$ )	10 a 100	10
$r_{namax}$	Razão nitrogênio/clorofila máxima nas células das algas ( $\frac{mg(N)}{mg(Chla)}$ )	8,0 a 15,0	12
$r_{namin}$	Razão nitrogênio/clorofila mínima nas células das algas ( $\frac{mg(N)}{mg(Chla)}$ )	1,5 a 4,0	3
$r_{pamax}$	Razão fósforo/clorofila máxima nas células das algas ( $\frac{mg(P)}{mg(Chla)}$ )	1,0 a 10,9	5
$r_{pamin}$	Razão fósforo/clorofila mínima nas células das algas ( $\frac{mg(P)}{mg(Chla)}$ )	0,1 a 1,0	0,5
$SOD_{20}$	Demanda de oxigênio no sedimento em 20°C ( $gO_2m^{-2}d^{-1}$ )	0,2 a 4,0	1,0
$V_{fr}$	Velocidade de precipitação do fósforo inorgânico ( $md^{-1}$ )	-	0,4
$V_{s3}$	Velocidade de deposição de substância orgânica ( $md^{-1}$ )	0,2 a 2,3	0,01
$V_{s4}$	Velocidade de sedimentação da biomassa ( $md^{-1}$ )	0 a 30,0	0,15