

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Vinícius Kuchinski

**MODELAGEM DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DO
VACACAÍ MIRIM**

Santa Maria, RS
2016

Vinícius Kuchinski

MODELAGEM DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.¹

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

Santa Maria, RS
2016

¹ Dissertação apresentada por videoconferência às 9h do dia 22/02/2016.

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Kuchinski, Vinícius
MODELAGEM DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ
MIRIM / Vinícius Kuchinski.-2016.
136 p.; 30cm

Orientadora: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2016

1. Eutrofização 2. Qualidade da água 3. CE-QUAL-W2 I.
Cauduro Gastaldini, Maria do Carmo II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Vinícius Kuchinski. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

e-mail: kuchinski@outlook.com

Vinicius Kuchinski

MODELAGEM DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 22 de fevereiro de 2016:

Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Dr^a.
(Presidente/Orientador)

Delmira Beatriz Wolff, Dr^a. (UFSM)


Nádia Bernardi Bonumá, Dr^a. (UFSC)

Santa Maria, RS
2016

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Deonízio e Rosângela, à minha irmã Bárbara, à minha avó, Maria Cândida e à minha namorada Glaucia, com carinho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais pela existência do meu ser, pela educação primorosa que nos foi dada desde o berço, pelo incentivo, amor e carinho. Sem isso, alguns degraus da escada da vida seriam superados, mas certamente o êxito ficaria pelo caminho. Amo vocês, obrigado por tudo!

Agradeço a minha irmã, pelo companheirismo de sempre, pelo apoio (“é louco fazer engenharia”), pelo amor, pelas brigas e por mostrar a importância da existência de outros caminhos, não menos importantes, além daquele cujo estou inserido. Valeu filhinha!

Agradeço minha avó Didi por estar sempre presente em nossas vidas, e mesmo após diversos problemas de saúde, familiares e perdas, continua sorridente e entusiasmada com nossas conquistas.

Agradeço minha namorada Glau, por que é, sem dúvidas, a melhor namorada do mundo. Engenheira que me enche de orgulho, me acompanhou por diversos finais de semana, até altas horas da noite e me ouviu ensaiar as apresentações por N vezes. Amor, muito obrigado, te amo!

Agradeço a minha orientadora, professora Maria do Carmo, pois é um exemplo para todos nós, não só seus orientados, mas todos que convivem com a senhora. Obrigado pelos momentos de orientação, que certamente foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho, mas também pelos momentos de descontração (para quem olha de fora pode parecer que não, mas a senhora é muito divertida). Sucesso!

Agradeço ao grupo GHIDROS, na figura do Prof. João Batista, que tem uma importância fundamental na pesquisa relacionada aos recursos hídricos na UFSM. A oportunidade de conviver e trabalhar em grupo, conhecer e trabalhar em diferentes pesquisas só faz enriquecer nosso conhecimento humano e científico.

Agradeço ao Mateus e à Taiane, pelo envolvimento, pela ajuda e pelo companheirismo ao longo dessa pesquisa, sem vocês, certamente esse trabalho seria realizado com um esforço muito maior, numa celeridade menor e não seria tão divertido.

Por fim, agradeço aos colegas que se transformaram em amigos: Osmar, Sizabeli, Marielle, Roberta, Cristiane, Adriano, Jota, Pablo e Robson, foi muito bom ter vocês como colegas, desejo o maior sucesso do mundo a cada um de vocês.

*Nenhum obstáculo será tão grande,
se a sua vontade de vencer for maior.*

(Autor Desconhecido)

RESUMO

MODELAGEM DO ESTADO TRÓFICO DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

AUTOR: VINÍCIUS KUCHINSKI

ORIENTADORA: MARIA DO CARMO CAUDURO GASTALDINI

A eutrofização é um distúrbio ambiental que acontece devido ao excesso de nutrientes, principalmente em lagos e reservatórios, proveniente da ação antrópica. Esse distúrbio causa a proliferação de algas, prejudicando a qualidade da água, aumentando os níveis de turbidez e também de toxicidade da água. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o estado de trofia do reservatório do rio Vacacaí Mirim, na cidade de Santa Maria/RS, entre os anos de 2010 e 2011 utilizando um modelo matemático de simulação e verificar a qualidade da água frente a resolução CONAMA 357/2005 e o Índice de Estado Trófico. O modelo utilizado neste trabalho é denominado CE-QUAL-W2 e foi desenvolvido para simulações de qualidade da água em rios e, principalmente, em reservatórios. Foram utilizados dados e informações referentes a área de estudo, que foram publicados em trabalhos anteriores. Esses dados foram inseridos no modelo como dados de entrada, para então ser feita a calibração do mesmo. A calibração foi realizada de forma manual, utilizando a perturbação de parâmetros e se mostrou adequada, ao se verificar a precisão por meio de erro médio absoluto e da raiz do erro médio quadrático. Após o modelo calibrado, foi feita a validação utilizando uma campanha que havia ficado de fora da calibração. Posteriormente, foram propostos cenários extremos para se verificar o comportamento do reservatório frente situações de estiagem, de volumes intensos precipitados, do aumento populacional e, por último, de um possível tratamento dos efluentes na bacia de drenagem. A simulação de cenários mostrou que uma estiagem de 30 dias piora a qualidade da água, tornando o reservatório hipereutrófico e prejudicando a classificação do reservatório nos valores de referência da Classe 3. O aumento da precipitação dilui nutrientes e poluentes, fazendo com que a sua concentração diminua, melhorando a qualidade da água e mantendo o estado de trofia do reservatório. O cenário de aumento da carga poluidora evidencia que o fósforo total e a clorofila *a* excedem os valores de referência da Classe 3, sendo necessário uma atenção maior, visto que elevam o estado trófico do reservatório para hipereutrófico. O cenário de redução do lançamento de efluentes mostra que, ao se reduzir em 66% o lançamento, há consideráveis ganhos de qualidade da água, classificando o reservatório nos valores de referência da Classe 3 e sendo classificado como mesotrófico.

Palavras-chave: CE-QUAL-W2. Eutrofização. Qualidade da água.

ABSTRACT

VACACAI MIRIM RESERVOIR TROPHIC STATE MODELLING

AUTHOR: VINÍCIUS KUCHINSKI

ADVISOR: MARIA DO CARMO CAUDURO GASTALDINI

The eutrophication is an environmental disorder that happens due to nutrients excess, mainly in lakes and reservoirs, from human action. This disorder causes the algal bloom, impairing the water quality, increasing the water turbidity and toxicity. This work aimed to assess the trophic state of Vacacai Mirim reservoir, located in the city of Santa Maria, southern Brazil, between 2010 and 2011, using a mathematical model for simulation and verify the water quality based on CONAMA resolution 357/2005 and on the Trophic State Index. The model used in this work is denominated CE-QUAL-W2 and was developed to water quality simulation in rivers and, principally in reservoirs. Data and information for the study area that have been published in previous work were used. These data were entered in the model as input data and then made the calibration of it. The calibration was made manually, using perturbation of parameters and has proven adequate, verifying the accuracy by the average absolute error and root mean square error. After calibration, the validation was made using a data set that was not entered as input data in calibration process. Afterwards, it was proposed extreme scenarios to verify the behavior of reservoir in front of situations of drought (30 days in length), high volume of precipitation (20x and 50x increase in rainfall volume), population growth (increase in nutrients concentration at 33, 66 and 99%) and finally, a possible treatment of effluents in the drainage basin (reduction in nutrients concentration at 33, 66 and 99%). The simulation of scenarios has shown that a drought of 30 days worsens the water quality, making the reservoir hypereutrophic and harming the classification of reservoir in reference values of Class 3 from CONAMA resolution 357/2005. The increase of precipitation dilutes nutrients and pollutants, decreasing their concentration, improving the water quality and keeping the trophic state of the reservoir. The scenario of the increase of pollutant load evidences that total phosphorous and chlorophyll-a exceeds limits reference values of Class 3, being necessary attention, because they raise the trophic state of the reservoir to hypereutrophic. The effluent discharge reduction scenario shows that, by reducing 66% the launch, there are considerable water quality gains, classifying the reservoir in Class 3 and being classified as mesotrophic.

Key-words: CE-QUAL-W2. Eutrophication. Water quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa da localização da área de estudo.....	43
Figura 2 - Coroas hipsométricas do reservatório do rio Vacacaí Mirim.....	46
Figura 3 - Pontos de amostragem no reservatório do rio Vacacaí Mirim.....	50
Figura 4 - Precipitação acumulada nos sete dias anteriores a cada campanha e vazão afluente no reservatório.....	51
Figura 5 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P2.....	52
Figura 6 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P3.....	53
Figura 7 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P4.....	53
Figura 8 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P5.....	53
Figura 9 - Batimetria do reservatório no modelo CE-QUAL-W2.....	60
Figura 10 - Elevação da superfície do reservatório entre 01/01/2010 até 02/12/2010.....	61
Figura 11 - Temperatura na superfície do reservatório entre 01/01/2010 até 02/12/2010.....	63
Figura 12 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 14/04/2010.....	64
Figura 13 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	65
Figura 14 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	66
Figura 15 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	67
Figura 16 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 02 de dezembro 2010.....	68
Figura 17 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	73
Figura 18 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	74
Figura 19 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	75
Figura 20 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	76
Figura 21 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	77
Figura 22 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	80

Figura 23 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	81
Figura 24 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	82
Figura 25 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 06 de junho de 2010.....	83
Figura 26 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	84
Figura 27 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	87
Figura 28 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	88
Figura 29 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	89
Figura 30 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	90
Figura 31 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	91
Figura 32 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	94
Figura 33 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	95
Figura 34 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	96
Figura 35 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	97
Figura 36 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	98
Figura 37 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	100
Figura 38 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	101

Figura 39 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	102
Figura 40 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	103
Figura 41 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	104
Figura 42 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.....	106
Figura 43 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.....	107
Figura 44 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.....	108
Figura 45 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.....	109
Figura 46 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.....	110
Figura 47 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	112
Figura 48 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	113
Figura 49 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	114
Figura 50 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	115
Figura 51 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	116
Figura 52 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	117
Figura 53 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.....	118
Figura 54 - Simulação de cenário de estiagem.....	120
Figura 55 - Simulação de cenário de aumento de precipitação.....	122
Figura 56 - Simulação de cenário de aumento da carga de poluentes.....	124
Figura 57 - Simulação de cenário de tratamento da carga poluidora.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Uso e ocupação do solo em 1995, 2003 e 2010.....	42
Tabela 2 - Levantamento Batimétrico (2001).....	43
Tabela 3 - Características morfométricas do reservatório do rio Vacacaí Mirim.....	45
Tabela 4 - Médias mensais de precipitação na estação pluviométrica de Santa Maria (1990 a 2010).....	46
Tabela 5 - Parâmetros de qualidade da água utilizados e suas metodologias de determinação.....	47
Tabela 6 - Campanhas de qualidade da água e sua utilização para a modelagem...	49
Tabela 7 - Resultados dos parâmetros investigados no reservatório do Vacacaí Mirim.....	52
Tabela 8 – Valores da literatura de demanda bentônica.....	68
Tabela 9 – Parâmetros relacionados à sedimentação.....	69
Tabela 10 - Equação de reaeração para lagos em função do vento a 20°C.....	69
Tabela 11 - Parâmetros para calibração da amônia no modelo CE-QUA-W2.....	77
Tabela 12 - Valores de referência na literatura para a taxa de decaimento da amônia.	77
Tabela 13 - Parâmetros calibráveis do nitrito e nitrato e seus valores padrões para o modelo CE-QUAL-W2.....	84
Tabela 14 - Parâmetros calibráveis para o fosfato no modelo CE-QUAL-W2.....	91
Tabela 15 - Parâmetros de calibração das algas.....	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes do IET e seus significados.....	28
Quadro 2 - Parâmetros de referência utilizados no modelo CE-QUAL-W2.....	53
Quadro 3 - Métodos de simulação de cenários utilizados na bibliografia recente utilizando o modelo CE-QUAL-W2.....	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação da quantidade de movimento na direção horizontal.....	34
Equação 2 - Equação da quantidade de movimento na direção vertical.....	34
Equação 3 - Equação da continuidade.....	35
Equação 4 - Equação de estado.....	35
Equação 5 - Elevação da superfície livre.....	35
Equação 6 - Equação de transporte de constituintes.....	35
Equação 7 – Equação do erro médio absoluto.....	54
Equação 8 – Equação da raiz do erro quadrático médio.....	54

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
°C	Temperatura em graus Célsius
‰	Permilagem
ANA	Agência Nacional de Águas
CE	Condutividade elétrica
Cl ⁻	Cloreto
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxigênio ao 5º dia
DBOC	Demanda bioquímica de oxigênio carbonácea
DBON	Demanda bioquímica de oxigênio nitrogenada
DQO	Demanda química de oxigênio
E. Coli	Escherichia Coli
EAM	Erro absoluto médio
F	Flúor
g	Unidade de massa grama
ha	Unidade de comprimento hectares
hm	Unidade de comprimento hectômetro
IET	Índice de Estado Trófico
IQA	Índice de Qualidade da Água
K ⁺	Potássio
km	Unidade de comprimento quilometro
L	Unidade de volume litro
m	Unidade de comprimento metro
mg	Unidade de massa miligrama
Mg ²⁺	Magnésio
mm	Unidade de comprimento milímetro
N	Nitrogênio
Na ⁺	Sódio
NH ₃	Amônia
NH ₄	Amônio
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO _x	Nitrito/nitrato
OD	Oxigênio dissolvido
P	Fósforo
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniônico
PO ₄ ⁻	Fosfato
PT	Fósforo total
Q2E	Modelo de qualidade da água QUAL2E
Q2K	Modelo de qualidade da água QUAL2K
R ²	Coefficiente de determinação
REQM	Raiz do erro quadrático médio
s	Unidade de tempo segundo
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SO ₄ ⁻	Sulfato
SST	Sólidos suspensos totais

UNT	Unidades de turbidez
W2	Modelo de qualidade da água CE-QUAL-W2
µg	Unidade de massa micrograma
µS	Unidade de condutância elétrica microsiemens

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVO GERAL.....	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	CONCEITOS E DEFINIÇÕES ACERCA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS...	22
2.2	EUTROFIZAÇÃO.....	23
2.3	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS.....	24
2.4	AVALIAÇÃO DOS NUTRIENTES.....	29
2.4.1	Nitrogênio.....	30
2.4.2	Fósforo.....	31
2.5	MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	31
2.6	O MODELO CE-QUAL-W2.....	33
2.6.1	Características do modelo.....	33
2.6.2	Equações gerais do modelo.....	34
2.6.3	Histórico recente de aplicações do ce-qual-w2.....	36
2.7	ESTUDOS ANTERIORES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO VACACAÍ MIRIM	39
3	RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM.....	41
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.2	DESCRIÇÃO DA BACIA CONTRIBUINTE AO RESERVATÓRIO.....	42
3.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO RESERVATÓRIO.....	43
3.4	CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	45
4	METODOLOGIA.....	47
4.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	47
4.1.1	Vazão e precipitação.....	49
4.1.2	Estratificação do reservatório.....	50
4.1.3	Qualidade da água.....	52
4.1.4	Dados meteorológicos.....	52
4.1.5	Parâmetros cinéticos.....	53
4.2	CALIBRAÇÃO.....	54
4.3	CONFIRMAÇÃO.....	55
4.4	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS.....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
5.1	APLICAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO CE-QUAL-W2.....	58

5.1.1	Batimetria do reservatório do rio Vacacaí Mirim.....	58
5.1.2	Características hidrodinâmicas e a elevação superficial.....	59
5.1.3	Perfis de temperatura e a estratificação térmica do reservatório.....	60
5.1.4	Perfis de oxigênio dissolvido do reservatório.....	68
5.1.5	Calibração do nitrogênio do reservatório.....	77
5.1.6	Calibração do fósforo do reservatório.....	90
5.1.7	Calibração da clorofila a.....	103
5.2	CONFIRMAÇÃO DO MODELO CE-QUAL-W2.....	109
5.3	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS.....	117
6	CONCLUSÕES.....	129
	REFERÊNCIAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade e a qualidade da água são cada vez mais preocupantes e exigem cada vez mais atenção, não só dos entes públicos, mas também da população em geral. Afinal o recurso hídrico, em quantidade e qualidade, é fundamental para a manutenção da vida humana, da fauna e da flora existentes no planeta Terra.

Um dos problemas de qualidade da água que vem se acentuando ultimamente, e por isso tornou-se objeto de estudo, é a eutrofização de lagos e reservatórios. A eutrofização está relacionada principalmente com a proliferação de algas, podendo causar distúrbios na cadeia alimentar dos organismos, além de prejudicar os processos de tratamento de água uma vez que esse fenômeno faz com que a turbidez da água seja aumentada, além de impactar na toxicidade da água.

Diante disso, a ocorrência do fenômeno da eutrofização é devido às mudanças que ocorrem nas bacias hidrográficas onde esses sistemas limnológicos estão inseridos. Essas mudanças são geralmente atreladas à antropização da bacia, com alterações do uso e da ocupação do solo, processos de urbanização, lançamento inadequado de efluentes (sem tratamento), entre outros.

Modelos matemáticos de qualidade da água surgem como uma ferramenta que possibilita a análise destes recursos. A modelagem se torna, então, um instrumento importante para a avaliação da qualidade da água, pois pode representar de forma aproximada os fenômenos que acontecem na realidade. Ainda, há a possibilidade de idealizar cenários futuros, prevendo, por exemplo, o efeito do aumento da carga poluidora na qualidade da água do reservatório.

Além disso, a modelagem é capaz de auxiliar na tomada de decisões no que diz respeito a ações afirmativas para a melhoria da qualidade da água no local estudado. Também, modelos se apresentam como ferramentas para assessorar a gestão dos recursos hídricos, assim é possível que se tenha uma melhor integração dos diferentes usos da água.

Em suma, para que se possa conviver em harmonia com o meio ambiente, a eutrofização é um obstáculo onde o homem deve encontrar alternativas viáveis para a sua solução. Ao se utilizar a modelagem como ferramenta para o melhor entendimento da eutrofização, é possível avaliar o impacto causado pela mesma em um sistema hídrico e sugerir ações e medidas capazes de mitigar as alterações causadas por esse fenômeno.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste trabalho justifica-se ao ressaltar a importância do reservatório do rio Vacacaí Mirim para o município de Santa Maria, uma vez que este abastece cerca de 30% da vazão bruta aduzida para atendimento da demanda da população (informação atualizada e cedida pela Companhia Riograndense de Saneamento - CORSAN).

A degradação da qualidade da água do reservatório, originada pelas ações antrópicas na bacia, tem gerado preocupações nos usuários desta água, principalmente a CORSAN, responsável pelo abastecimento de água de Santa Maria.

Face ao exposto, busca-se analisar o processo de eutrofização atual e prever a futura qualidade da água, através de simulações de modelo matemático de qualidade da água. Além de prejudicar a qualidade da água, a eutrofização acarreta em problemas relacionados ao tratamento de água, à saúde humana e à biota aquática.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de eutrofização do reservatório do rio Vacacaí Mirim utilizando o modelo CE-QUAL-W2 como ferramenta computacional de modelagem.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sistematizar os dados, já existentes, das características morfológicas, hidrodinâmicas e de qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim.
 - Realizar a calibração e validação do modelo matemático.
 - Simular cenários futuros para o reservatório do Vacacaí Mirim, para situações de períodos de estiagem, períodos de cheias e situação de grande aporte de nutrientes.
 - Avaliar a qualidade da água simulada nos cenários utilizando os valores de referência da Resolução CONAMA nº. 357/2005 e o Índice do Estado Trófico (IET).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITOS E DEFINIÇÕES ACERCA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

Limnologia (do grego *limne* – lago e *logos* – estudo) é a ciência que estuda as águas interiores. Com o passar do tempo e avanços na pesquisa, a limnologia afinou seu conceito e ampliou o campo de atuação, incluindo outros sistemas aquáticos continentais (SILVA, 2009).

Lagos são corpos d'água interiores sem comunicação direta com o mar. Os lagos não são elementos permanentes das paisagens da Terra, pois eles são fenômenos de curta durabilidade na escala geológica, portanto surgem e desaparecem no decorrer do tempo (ESTEVES, 1998). Apesar de não serem elementos permanentes na paisagem terrestre, são de extrema importância para a manutenção de diversos ecossistemas que deles dependem.

Para Tundisi e Tundisi (2008), o estudo limnológico é uma procura de princípios que atuam em certos processos e mecanismos de funcionamento e que podem ser utilizados em previsões e comparações. Por exemplo, quando se compara a hidrodinâmica de rios, lagos e represas, imediatamente se compreendem certos aspectos básicos de funcionamento que interferem significativamente no ciclo de vida.

Nos últimos anos, tem sido cada vez maior a degradação dos ecossistemas de águas interiores, com base em despejos de vários tipos de resíduos, por efeitos do desmatamento da bacia hidrográfica e por poluição do ar e posterior chuva ácida. A interferência antropogênica, com a inserção e retirada de espécies de plantas e animais aquáticos, produz imensas alterações nos ecossistemas aquáticos. Além dos problemas de poluição, eutrofização e degradação que as águas interiores vêm sofrendo, por isso além do interesse científico do aprofundamento dos conhecimentos básicos, a limnologia pode proporcionar aplicações importantes (TUNDISI e TUNDISI, 2008).

Desta maneira, lagos e reservatórios são sistemas que fornecem atividades fundamentais para as populações humanas com diferentes finalidades. Estes ecossistemas podem ser utilizados para o abastecimento de água, em piscicultura, atividades recreacionais, irrigação, dessedentação animal, geração de energia elétrica, entre outras.

Sobre a sua formação, Esteves (1998) afirma que lagos e lagoas brasileiras se enquadram em pelo menos cinco grupos bem definidos: lagos amazônicos, lagos do pantanal mato-grossense, lagos e lagoas costeiras, lagos formados por rios de médio a grande porte por barramento natural e lagos artificiais como represas e açudes.

Reservatórios são sistemas aquáticos e, neste aspecto, são muito semelhantes aos lagos naturais, com exceção de que são represamentos feitos pelo homem, onde a saída de água é normalmente regulada e na maioria dos casos, independente do regime de entrada. Da mesma forma que em lagos naturais na zona de clima temperado, reservatórios profundos também passam por mudanças sazonais, exibindo padrões de estratificação térmica (BOCANIOV et al., 2014).

2.2 EUTROFIZAÇÃO

Chalar et al. (2011) conceitua eutrofização como os danos e distúrbios ambientais, econômicos e sociais, causados no ecossistema aquático devido a presença e incorporação abundante de nutrientes.

O desenvolvimento urbano aumenta o transporte de nutrientes, metais e outros poluentes para os rios e outros corpos d'água receptores por conta da impermeabilização das áreas. Nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P) são requeridos para a manutenção de qualquer forma de vida (WANG et al., 2014).

Nesse sentido, para Von Sperling (2005), o nível de eutrofização está usualmente associado ao uso e ocupação do solo predominante na bacia hidrográfica. Pode-se, assim, separar o uso e ocupação do solo em três grupos e suas características com relação aos graus de trofia:

- Ocupação por matas e florestas: ainda que em um local com ausência de interferência antropogênica, o lago tende a reter sólidos que se sedimentam, constituindo uma camada de lodo no fundo. Por meio de fenômenos de decomposição, há um aumento, incipiente, do nível de nutrientes na massa líquida;

- Ocupação por agricultura: a retirada da cobertura vegetal natural para a ocupação por agricultura representa a quebra dos ciclos naturais de nitrogênio e fósforo, por isso a utilização de fertilizantes eleva artificialmente os teores de nutrientes, como N e P. Este aumento do aporte de nutrientes tem por consequência o aumento do número de algas, e em consequência dos outros organismos situados em patamares superiores da cadeia alimentar. Esse balanço pode ser positivo ou negativo, dependendo da capacidade de assimilação de nutrientes pelo corpo hídrico;

- Ocupação urbana: a troca da ocupação por agricultura para urbanização tem diversas consequências, com uma taxa muito mais rápida que as anteriores, como por exemplo, o assoreamento, eventuais condições anaeróbias dependendo do grau de crescimento bacteriano, eventuais mortandades de peixes, maior dificuldade e elevação nos custos de tratamento da água, problemas com o abastecimento de água industrial, toxicidade das algas, modificações na qualidade e quantidade de peixes de valor comercial e, por fim, o desaparecimento gradual do lago como um todo em decorrência do processo de eutrofização e assoreamento.

Uma das consequências da eutrofização é a ocorrência de associações de cianobactérias. Algumas espécies de cianobactérias são tóxicas, segundo Tundisi e Tundisi (2008), cerca de 20 espécies já foram registradas no Brasil. Estas toxinas têm diversas ações sobre a saúde humana e sobre os organismos aquáticos.

Por exemplo, no sul da China, Wang et al. (2012) afirmam que cerca de 40% da demanda total de água é suprida por reservatórios e que o nível trófico destes reservatórios vem aumentando a partir dos últimos 20 anos. Esse aumento está condicionado ao decréscimo da qualidade da água em muitos desses reservatórios. Devido ao clima de monção asiático, mais de 60% da precipitação anual se concentra no final da primavera e início do verão (entre abril e julho), trazendo altas descargas de poluentes, sedimentos, nutrientes e matéria orgânica para os reservatórios.

2.3 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS

Sabe-se que cerca de três quartos da superfície da Terra é coberta pela água. Segundo Braga et al. (2005), contudo, há no mundo uma disponibilidade finita de água doce capaz de atender às necessidades de consumo da população, desse

total de água existente no planeta Terra, apenas 0,5% representa água doce, mas a maior parte dela é inacessível, pois se encontra em forma de vapor d'água ou no subsolo, com difícil acesso ou mesmo por ser parte constituinte dos organismos vivos.

De acordo com ANA (2012), o Brasil possui cerca de 12% da disponibilidade de água doce superficial do mundo, sendo este um dos grandes patrimônios do País. Contudo, é destacável que a disponibilidade dessa água depende, também, do seu aspecto qualitativo, posto que uma água de baixa qualidade tem seus usos restringidos.

A degradação dos corpos d'água vem ocorrendo, em intensidades e tempos variados, em grande parte dos centros urbanos brasileiros. É relevante observar que, até as décadas de 1940 e 1950, vários rios em áreas urbanas ainda possuíam boa condição de qualidade da água. Até 1944, ocorria no rio Tietê a "Travessia de São Paulo a nado", mas a partir desse ano o nível de poluição do rio passou a não permitir mais a realização desse evento (ANA, 2012).

É importante salientar que a remoção da cobertura vegetal sem adoção de técnicas para conservação do solo pode gerar erosão, ocasionando diversos problemas como a degradação dos cursos da água. Além disso, a poluição difusa, tanto rural como urbana, é um problema deveras importante, pois carrega para os corpos d'água fertilizantes, agrotóxicos, resíduos de combustível, pneus, óleos e graxas, além de resíduos sólidos como as garrafas plásticas.

A respeito das águas de reservatórios, ANA (2012) afirma que as principais pressões com relação à qualidade da água estão relacionadas com os processos físico-químicos e ecológicos que ocorrem a partir da redução do fluxo de água. Entre diversas situações associadas à implantação de reservatórios, é possível reconhecer: emissão de gases como dióxido de carbono e metano, a estratificação vertical e a criação de uma camada inferior pobre em oxigênio dissolvido e rica em nutrientes, e também a retenção de sedimentos e nutrientes, reduzindo seu aporte nos trechos à jusante.

Inevitavelmente, o uso de um recurso hídrico está diretamente ligado à qualidade do mesmo. Por exemplo, uma água indicada para navegação pode não ter a qualidade adequada para o abastecimento público, já a qualidade de uma água para uso industrial não necessariamente seja indicada para o uso agrícola.

Com relação à qualidade da água, a Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2005) classifica as águas do território nacional, segundo seus usos, em treze classes de qualidade. Em função da salinidade as águas são classificadas em doces (até 0,50‰ de salinidade), águas salobras (de 0,50 até 30‰) e águas salinas (com salinidade superior a 30‰). As águas doce são classificadas em classe especial, classe 1, classe 2, classe 3 e classe 4.

Ainda se tratando da Resolução CONAMA 357/2005, o abastecimento público, a preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e a preservação dos ambientes aquáticos são tratados como a finalidade mais nobre do uso da água. Sendo assim, as águas destinadas para estes fins devem satisfazer diversos critérios de qualidade, para que não haja prejuízo no seu uso.

A seguir, alguns trabalhos que fizeram o uso da Res. CONAMA 357/2005 supracitada, para avaliar a qualidade da água ou até mesmo enquadrar corpos hídricos dentro das faixas de classificação (classes).

Cavalcanti et al. (2014) determinaram e caracterizaram as concentrações de metais traço em um afluente do reservatório de Furnas, em Alfenas-MG. Foram coletadas amostras em cinco pontos distintos no Córrego do Pântano para determinação dos níveis de cádmio, chumbo e zinco. Ao se utilizar a Resolução CONAMA 357/2005 para verificar o enquadramento do córrego, os autores afirmam que as concentrações de metais e dos parâmetros físico-químicos não estão de acordo com os limites estabelecidos pela Classe 2, sendo necessário estratégias para minimizar o impacto destes metais e o monitoramento contínuo do local.

Moretto et al. (2012) avaliaram a poluição orgânica no rio Pardo através de parâmetros físicos, químicos e biológicos em oito pontos de monitoramento. Posteriormente os autores utilizaram de análise multivariada para calibrar o Índice de Qualidade da Água (IQA) para comparar com os limites estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005 e comparar suas divergências na avaliação da qualidade da água. Os IQA calibrado mostrou significativa correlação com a Res. CONAMA 357/2005, sendo possível sua aplicação à bacia hidrográfica do rio Pardo. Com relação à qualidade da água, em muitos pontos e em diferentes épocas do ano, são preocupantes os problemas relacionados à eutrofização, há alta carga de nutrientes originados dos esgotos domésticos e da utilização de fertilizantes na agricultura.

Deus et al. (2013) utilizaram o modelo CE-QUAL-W2 para avaliar o impacto da piscicultura no reservatório Tucuruí, no Pará e simular cenários de situação extrema. Para a avaliação da qualidade da água após as simulações de cenários foi utilizada a Resolução CONAMA 357/2005. As simulações mostraram que o reservatório do Tucuruí não é um ambiente considerado contaminado pela Resolução.

Por fim, Cunha et al. (2013b) fizeram uso da Resolução CONAMA 357/2005 para avaliar o nível de conformidade da qualidade da água em 317 pontos amostrais de ambientes lóticos e 43 em lênticos do estado de São Paulo entre 2005 e 2009. Os parâmetros utilizados para essa avaliação foram fósforo total, OD, nitrato, turbidez e DBO. Os resultados expuseram uma maior fragilidade nos parâmetros fósforo total e oxigênio dissolvido, principalmente em regiões mais industrializadas. Desde o início da vigência da Resolução (2005), não houve redução percentual significativa na não conformidade dos parâmetros, explicitando a necessidade de mecanismos que possibilitem o estabelecimento de metas para recuperação da qualidade da água.

Para facilitar o processamento de um grande número de dados de qualidade da água, foram criados índices que permitem mostrá-los de maneira mais direta, como uma informação mais simples e que contenha um grau de entendimento.

Por conta disso, existe na literatura uma grande variedade de indicadores que expressam aspectos parciais de qualidade das águas, no entanto, não existe um único indicador que sintetize todas as variáveis de qualidade da água (ANA, 2012). O interessante de se utilizar índices de qualidade é ser possível avaliar a qualidade de uma determinada amostra de água por meio de uma nota que expressa o resultado de forma simplificada, rápida e com fácil visualização.

O Índice do Estado Trófico (IET) tem por finalidade classificar os corpos hídricos em relação ao grau de trofia. Avaliando, desta forma, a qualidade da água com relação ao enriquecimento por nutrientes e ao potencial crescimento de algas e macrófitas. Inicialmente, o IET foi proposto por Carlson (1977), quando o autor quis criar um índice que correlacionasse os dois melhores métodos de classificação do grau de trofia que existiam naquela época.

Partindo desta premissa, foram ajustadas equações que enquadrariam a área de estudo de acordo com seu nível de trofia utilizando apenas dados de transparência (por meio do disco de *Secchi*), da quantidade de clorofila *a* e a quantidade total de fósforo (CARLSON, 1977).

Portanto, pode-se avaliar o IET por meio da medida do potencial de eutrofização pela existência de fósforo - IET(P) – ou por meio da medida da resposta do corpo hídrico pela existência de clorofila *a* – IET(CL). O quadro 1 exhibe os significados de cada faixa de valores do índice do estado trófico e também seu significado.

Quadro 1 - Classes do IET e seus significados.

Valor do IET	Classes	Significado
$IET \leq 47$	Ultraoligotrófica	Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água.
$47 < IET \leq 52$	Oligotrófica	Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos d'água, decorrentes da presença de nutrientes.
$52 < IET \leq 59$	Mesotrófica	Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos.
$59 < IET \leq 63$	Eutrófica	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus usos múltiplos.
$63 < IET \leq 67$	Supereutrófica	Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios de florações de algas.
$IET > 67$	Hipereutrófica	Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matérias orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandade de peixes, com consequências indesejáveis para seus usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

O IET vem sendo muito utilizado por pesquisadores de diferentes locais do mundo por ser um método de classificação simples e de fácil adaptação. Lamparelli (2004) fez adequações no IET para a utilização em ambientes lóticos e lênticos na região de São Paulo. Chalar et al. (2011) propuseram uma modificação no IET para a avaliação de invertebrados bentônicos na bacia Santa Lúcia, no Uruguai. O IET também já foi utilizado para estimativa da atividade humana intensa, causando eutrofização em lagoas costeiras (CAÑEDO-ARGÜELLES et al., 2012; CHRISTIA et al., 2014).

Além disso, Cunha et al. (2013a), propuseram uma modificação nas equações de Carlson do IET especialmente para um clima tropical/subtropical em reservatórios (IET_{tsr}). Sulis et al. (2011) utilizaram o IET para a criação de um modelo otimizado de gestão de qualidade da água em reservatórios múltiplos na Itália. Da mesma forma, foram propostos novos equacionamentos para o IET para dois lagos, um chinês e outro italiano (XU et al., 2011).

2.4 AVALIAÇÃO DOS NUTRIENTES

Segundo Tundisi e Tundisi (2008), aproximadamente vinte elementos são requeridos para sustentar tecidos saudáveis de plantas; muitos deles são necessários em concentrações tão pequenas que podem ser considerados como elementos-traço ou “micronutrientes”. Entretanto, seis elementos são classificados como nutrientes principais: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre.

De um modo geral, os macronutrientes e os elementos-traço encontram-se ou concentrados na matéria orgânica viva, ou em matéria particulada morta e em decomposição, ou dissolvidos na água (TUNDISI e TUNDISI, 2008).

A importância da avaliação dos nutrientes está no fato destes serem limitantes para o desenvolvimento das espécies. Por exemplo, uma baixa concentração de nitrogênio e fósforo pode afetar a reprodução das populações fitoplantônicas.

Por conta disso, é relevante o controle da afluência dos nutrientes para os corpos hídricos, dado seu papel destacável no processo de eutrofização das massas de água. Pois, havendo nutrientes em excesso, a proliferação de algas acontecerá até que um destes nutrientes se torne escasso, tornando-se assim um novo nutriente limitante.

Como o foco deste trabalho é a avaliação da eutrofização, ponderando os nutrientes nitrogênio e fósforo, principalmente, então se justifica o detalhamento apenas destes dois elementos como forma de breve elucidação da forma que os processos de transformação ocorrem.

2.4.1 Nitrogênio

O nitrogênio é um dos elementos mais importantes no metabolismo de ecossistemas aquáticos. Esta importância deve-se principalmente à sua participação na formação de proteínas, um dos componentes básicos da biomassa. Quando presente em baixas concentrações pode atuar como fator limitante na produção primária de ecossistemas aquáticos (ESTEVES, 1998).

As principais fontes de nitrogênio são amônia, nitrito, nitrato e compostos nitrogenados dissolvidos. De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), a concentração de nitrito é sempre muito baixa, uma vez que esta espécie química é reduzida a nitrato ou oxidada a amônia. Porém, se encontrado em alta concentração, pode significar que o corpo hídrico recebeu cargas poluidoras recentes.

Desta maneira, para Esteves (1998), o nitrato, juntamente com o íon amônio, assume grande importância nos ecossistemas aquáticos, visto que representam as principais fontes de nitrogênio para os produtores primários. Em ambientes anaeróbios, como o hipolímnio de lagos eutróficos em período de estratificação, podem-se encontrar altas concentrações de nitrito.

Os processos mais citados na literatura, apesar da existência de outros envolvidos no ciclo do nitrogênio, são a nitrificação e a desnitrificação, sendo que ocorre pela atividade de organismos quimiotróficos como as *nitrosomonas* e as *nitrobacters* e outros nitrificantes.

A nitrificação é um processo que transforma a amônia (NH_3) em nitrito e nitrato (NO_2^- e NO_3^- , respectivamente), este processo ocorre em condições aeróbicas e, portanto, consome oxigênio presente no corpo hídrico. Já a desnitrificação, é um processo que ocorre na ausência de oxigênio ou em condições anóxicas, e que faz a redução, transformando nitrito e nitrato em nitrogênio gasoso (N_2) retornando-o, assim, para a atmosfera.

2.4.2 Fósforo

O fósforo é um nutriente essencial para os organismos, haja visto que participa de processos fundamentais do metabolismo de seres vivos, como por exemplo a síntese da membrana celular e no armazenamento de energia (ATP).

Segundo Esteves (1998), o fósforo desempenha papel importante também nas águas continentais, já que é apontado como o principal fator limitante da produtividade de organismos aquáticos. Por conta disso, o fósforo se torna um nutriente importante a se monitorar, pois é de extrema importância no processo de eutrofização dos corpos hídricos.

O fluxo de fósforo para as águas continentais depende dos processos geoquímicos nas bacias hidrográficas. De um modo geral, as formas mais comuns de fósforo orgânico são de origem biológica. Fosfatos dissolvidos são derivados do processo de lixiviação de minerais. De várias formas, o ortofosfato dissolvido é a principal fonte de fósforo para as plantas aquáticas, sobretudo o fitoplâncton (TUNDISI e TUNDISI, 2008).

Ainda segundo Tundisi e Tundisi (2008), o fósforo não possui um componente gasoso, por isso, sua disponibilidade depende de rochas fosfatadas e do ciclo interno dos lagos, dos quais a decomposição e a excreção dos organismos são partes importantes. Assim, o fósforo tem alguns processos de regulação e reciclagem fundamentais nos lagos.

Desta forma, o ciclo do fósforo pode ser resumido da seguinte forma: absorção, adsorção, excreção, morte, decomposição, sedimentação e ressuspensão.

2.5 MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA

A utilização de expressões matemáticas para representar fenômenos reais é uma prática comum entre os profissionais de engenharia. Logo, perante a necessidade em remediar e prever problemas relacionados com a poluição dos corpos d'água, a simulação matemática dos processos que envolvem os fluxos de substâncias dissolvidas, além dos fenômenos físicos inerentes da cinética, fizeram com que o desenvolvimento científico nesta área de pesquisa evoluísse

continuamente desde o início do século passado até o presente momento (SOUZA, 2006).

A avaliação qualitativa dos recursos hídricos é importante, pois nos mostra o nível de qualidade da água de determinado corpo em estudo. Desta maneira, se esta água será utilizada para uma certa finalidade, a avaliação da qualidade vai revelar se a água é adequada para o fim que foi destinado ou se é necessário algum tipo de tratamento de modo que se eleve o padrão de qualidade ao nível desejado.

Para auxiliar a análise da variação espacial e temporal da qualidade da água os modelos matemáticos de simulação são uma ferramenta que se mostra poderosa, pois possibilita o prognóstico das condições de um corpo d'água, a previsão de cenários face a determinado evento, também o impacto na qualidade por intermédio de alterações de um modo geral no ambiente em estudo.

Devido a grande quantidade de modelos de qualidade da água propostos, o foco deste tópico será dado aos modelos precursores do modelo utilizado nesta pesquisa, o CE-QUAL-W2.

Segundo Chapra (1997), o primeiro modelo relevante de qualidade da água é o modelo de Streeter e Phelps de 1925, que trouxe a clássica solução analítica unidimensional para a simulação de OD e DBO. A partir desta publicação, os pesquisadores foram aprimorando o modelo proposto, adicionando novos parâmetros e modificações nas equações. Ao final dos anos 60, os modelos analíticos passaram a utilizar a computação para soluções de expressões numéricas mais complexas, como o método dos elementos finitos, além da possibilidade de simulação não só em uma, mas duas dimensões. Já na década de 1970, houve um crescimento da preocupação com o meio ambiente, principalmente devido ao crescimento vertiginoso da economia mundial, consequência da industrialização, ocasionando maior poluição nos corpos hídricos, principalmente urbanos.

Assim, os parâmetros modelados aumentaram de OD e DBO, incorporando nutrientes. Houve também aprimoramento dos sistemas, possibilitando três dimensões, e das reações cinéticas, se tornando não lineares. Recentemente, os avanços na modelagem se deram devido ao problema relacionado às toxinas, adicionando parâmetros como sedimentos e metais pesados.

Após Streeter e Phelps (1925), um dos modelos propostos foi o *QUAL I* de 1970, desenvolvido pela *Texas Water Development Board*. Segundo Gastaldini (1982), ele é um conjunto de modelos interligados, capaz de simular distribuições espaciais e temporais dos parâmetros de qualidade como o OD, a DBOC, DBON, temperatura, mineral conservativo e também a densidade de coliformes.

Uma versão posterior deste modelo foi lançada em 1973, denominada *QUAL II*, foi desenvolvido para Agência de Proteção Ambiental (USEPA) dos Estados Unidos da América pela empresa *Water Resources Engineers Inc*. Esta atualização promoveu a avaliação dos efeitos de aflúências de nutrientes sobre a concentração de oxigênio dissolvido. Além disso, houve também a adição da demanda bentônica, o nitrogênio (amônia, nitrito e nitrato), além da presença de algas por meio da clorofila *a*.

A versão *QUAL2E* (Q2E) tem a capacidade para simular até quinze parâmetros descritivos da qualidade da água, incluindo temperatura, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, algas como clorofila *a*, quatro parâmetros do ciclo do nitrogênio, dois do ciclo do fósforo, coliformes, um parâmetro não-conservativo arbitrário e três parâmetros conservativos. Adicionalmente, incorpora também algoritmos que permitem desenvolver análises de incerteza relativas aos resultados do modelo (BROWN e BARNWELL, 1987).

Neste sentido, o modelo *QUAL2K* (Q2K) foi desenvolvido pela USEPA ao se aprimorar o modelo Q2E. Ele é detentor de características similares ao *QUAL2E*, sendo um modelo unidimensional, dividido em segmentos, com regime hidráulico permanente e não uniforme. Ao mesmo tempo, é possível a simulação de dezoito diferentes variáveis de qualidade da água e com a possibilidade de adição de fontes de poluição pontuais e não pontuais (USEPA, 2014).

2.6 O MODELO CE-QUAL-W2

2.6.1 Características do modelo

O modelo *CE-QUAL-W2* (W2) é um modelo de qualidade que permite a simulação de variáveis hidrodinâmicas e de qualidade da água e que trabalha em duas dimensões, podendo ser utilizado em rios, estuários, lagos, reservatórios e bacias hidrográficas. Esse modelo tem sido extensivamente usado como uma

ferramenta de gestão e de pesquisa, com mais de 400 aplicações a diversos sistemas hídricos (COLE e WELLS, 2013).

A quantidade de constituintes que podem ser simulados pelo modelo é de até 21, além da temperatura. Alguns dos parâmetros são: sólidos orgânicos em suspensão, coliformes, sólidos dissolvidos totais, DBOC, *pH*, alcalinidade, CO₂, ferro, OD, amônia, nitrato, fósforo, cloretos, algas e matéria orgânica dissolvida. É possível omitir constituintes de qualidade da água se estes não forem requeridos, tornando o modelo bastante flexível quanto aos dados de entrada.

Além disso, o modelo utiliza seis equações fundamentais, listadas no item 2.6.2 deste trabalho. Assim, são seis equações principais para seis incógnitas, determinando um sistema em que a solução é encontrada para cada instante.

Ainda, o modelo W2 tem a capacidade de incluir condições de contorno variáveis no tempo, múltiplos trechos, afluentes e retiradas de água laterais, além de outras características que permitem sua aplicação em uma gama variada de situações. Para a solução dos problemas, o modelo faz o cálculo dos termos do transporte advectivo por meio da solução das equações hidrodinâmicas, considerando o coeficiente de difusão longitudinal invariável no tempo e no espaço.

2.6.2 Equações gerais do modelo

O modelo CE-QUAL-W2, versão 3.71 é baseado na solução por diferenças finitas das equações com médias laterais do movimento de fluidos, compondo-se em seis equações principais e seis incógnitas. As equações são descritas por Cole e Wells (2013):

- Equação da quantidade de movimento na direção horizontal

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x \quad (1)$$

- Equação da quantidade de movimento na direção vertical

$$0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (2)$$

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (3)$$

- Equação de estado

$$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS}) \quad (4)$$

- Elevação da superfície livre

$$B_\eta \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_\eta^h UB dz - \int_\eta^h qB dz \quad (5)$$

- Equação de transporte de constituintes

$$\frac{\partial \phi BC}{\partial t} + \frac{\partial U \phi BC}{\partial x} + \frac{\partial W \phi BC}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \phi B D_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \phi B D_z \frac{\partial C}{\partial z} = q_\phi \phi B + S_K \phi B \quad (6)$$

U – velocidade horizontal (m/s)

W – velocidade vertical (m/s)

B – largura do corpo hídrico

t – tempo

x, z – coordenadas cartesianas longitudinal e vertical

ρ – densidade

P - pressão

g – aceleração da gravidade

η – elevação da superfície de água livre

τ_x, τ_x – tensão de cisalhamento média lateral – direção x e z

q – vazão lateral por unidade de largura

C – concentração de constituinte (mg/L)

D_x – coeficiente de dispersão longitudinal para temperatura e constituintes (m²/s)

D_z – coeficiente de dispersão vertical para a temperatura e constituintes (m²/s)

q_{ϕ} – taxa do fluxo de massa lateral para efluentes ou afluentes dos constituintes por unidade de volume (mg/L/s)

S_k – termo cinético para a concentração de constituintes (mg/L/s)

2.6.3 Histórico recente de aplicações do CE-QUAL-W2

Liu et al. (2008) utilizaram o modelo W2 para avaliar o impacto da redução de aporte de fósforo no reservatório estratificado de Mingder (Taiwan). A simulação, por meio do IET, mostrou que ao se reduzir 20% a carga de fósforo o reservatório deixa de ser eutrófico e passa a ser mesotrófico. Da mesma forma, ao reduzir-se 80% da carga de fósforo o reservatório passa a ser oligotrófico. Assim, o modelo mostra sua capacidade de ser uma ferramenta útil para ser utilizada por gestores ao se fazer a gestão e o planejamento integrado dos recursos hídricos.

Parsa e Shahidi (2010) pesquisaram uma forma de prever o comprimento excursão da maré em estuários aluviais. Para isso, utilizaram, como ferramenta de auxílio, o modelo W2 para avaliar o comprimento de intrusão da salinidade no estuário do rio Limpopo (Moçambique). Após a validação, o modelo foi utilizado como um laboratório virtual para fornecer um conjunto de dados sintéticos.

Yu et al. (2010) realizaram um trabalho a fim de descrever a influência da poluição difusa nas características espaciais e temporais da matéria orgânica natural em um reservatório estratificado, o reservatório Daecheong (Coréia do Sul). Para a simulação destas mudanças foi utilizado o modelo W2, resultando em alterações na qualidade da água. Os resultados calculados foram muito consistentes, próximos dos observados, além disso, o modelo explica bem a movimentação dos constituintes e o fenômeno da estratificação do reservatório.

Conroy et al. (2011) utilizaram o modelo W2 para a simulação de temperatura e concentração de OD, com a finalidade de explorar os efeitos do clima através da variação temporal e espacial nas taxas de depleção do oxigênio no hipolímnio. A área de estudo foi a região central da bacia do lago Erie (Estados Unidos). Os resultados obtidos comprovaram a variação espacial das taxas de depleção do oxigênio.

Lee et al. (2012) utilizaram modelos matemáticos, incluindo o W2, para validar o impacto de mudanças climáticas com relação a mudança de temperatura e para simular cenários futuros. Os resultados obtidos foram ao encontro a estudos

anteriores, mostrando o acréscimo da temperatura no epilímnio em comparação ao hipolímnio.

O modelo W2 foi utilizado por Deus et al. (2013) para quantificar o transporte de massa, a estratificação térmica e mudanças na qualidade da água devido a expansão da atividade de piscicultura no reservatório do Tucuruí (Pará). Os resultados obtidos para os parâmetros hidrodinâmicos foram satisfatórios, mostrando uma aproximação dos valores observados e dos valores calculados. Com relação a parte qualitativa, os resultados para a maioria dos parâmetros foram muito bons, com exceção da clorofila *a*.

Liu e Chen (2013) fizeram uso do modelo W2 para simular o comportamento hidrotermal e o transporte de sólidos em suspensão no reservatório estratificado de Shihmen (China). Eles encontraram um resultado calculado muito próximo do observado. Após a validação, o modelo foi utilizado para investigar os efeitos das retiradas de águas em diferentes profundidades e então estimar o tempo de residência no reservatório.

Matonse et al. (2013) investigaram o impacto de mudanças climáticas no sistema de abastecimento de água da cidade de Nova Iorque vinculando o modelo *NYC OASIS* (utilizado para simular as operações do sistema de abastecimento) com o modelo W2 já calibrado para o conjunto de reservatórios. Os resultados mostraram que algumas mudanças acontecerão nos cenários analisados (anos de 2055 e 2090), porém o sistema de abastecimento da cidade continuou se mostrando muito resiliente e confiável.

Saadatpour e Afshar (2013) aplicaram uma otimização multi-objetivo em conjunto ao modelo W2 com a finalidade de se avaliar o comportamento da pluma de poluição no reservatório de Ilam (Irã), frente a uma descarga química acidental. Os resultados mostraram que o algoritmo multi-objetivo, aliado ao modelo computacional, foram capazes de prever de forma satisfatória o desempenho do reservatório. Segundo os autores, a utilização destes instrumentos se mostra interessante no que se refere ao gerenciamento de reservatórios.

Park et al. (2014) desenvolveram uma estratégia para o controle de vazão visando a redução da carga de nutrientes em um sistema de reservatórios múltiplos, no sul da Coreia, por meio de modelo matemático de qualidade da água (W2). O resultado do trabalho mostrou uma eficiência na aplicação do modelo, incluindo a análise de sensibilidade e também o processo de auto-calibração via algoritmos

específicos, tornando-se, assim, uma ferramenta adequada para a gestão destes reservatórios.

Shokri et al. (2014) utilizaram o modelo W2 para investigar a descarga de 30 m³ de éter metil-terc-butílico, um composto químico aditivo na gasolina, no reservatório Karaj no Irã. Para tal, foi adicionada ao modelo a capacidade de se calcular volatilização por teorias propostas por Lewis e Whitman em 1924. Os resultados mostram que após a entrada, menos da metade é liberado e não permanece no reservatório, o restante é deteriorado ou volatilizado.

Para apresentar aos gestores um suporte científico para consequências de ações de projetos de desvios de água do lago Chenghai (China), Zou et al. (2014) aplicaram o modelo W2 para uma avaliação quanti e qualitativa. Foi incorporado um elemento de análise de múltiplas incertezas para auxiliar as condições de dados esparsos. Para os autores, o modelo aliado com o elemento de análise, tornou-se uma boa alternativa para pesquisas futuras quando há uma falta de condições de contorno com relação aos parâmetros de qualidade da água.

Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) aplicaram o modelo W2 para simular parâmetros de qualidade da água (temperatura da água, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, clorofila *a*, sólidos suspensos totais, alcalinidade, amônia, fosfato e a quantidade de ferro) do reservatório Sejnane, na Tunísia. Após a calibração e validação do modelo, foram simulados três cenários de situações extremas para a região considerada. Como resultado, os autores destacam que o W2 representa os valores de elevação da superfície, temperatura, perfis de oxigênio dissolvido e outras variáveis de estado com forte precisão. Ainda, a estratificação térmica e do oxigênio no reservatório foram representadas de forma muito acurada.

Mais recentemente, Zouabi-Aloui et al. (2015), utilizaram-se da ferramenta de modelagem (CE-QUAL-W2) para se avaliar o impacto da retirada de vazão em diferentes profundidades no reservatório estratificado de Sejnane. Os resultados mostraram que, dependendo da profundidade de retirada, o impacto na estratificação do reservatório pode ser positivo, fazendo com que a mesma enfraqueça, ou pode ser negativo, tendendo a encolher o metalímnio, fortalecendo estratificação e diminuindo a transferência de matéria entre o epilímnio e o hipolímnio.

2.7 ESTUDOS ANTERIORES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO VACACAÍ MIRIM

Alguns estudos já foram desenvolvidos no reservatório do Vacacaí Mirim: Gastaldini et al. (2000) realizaram um estudo sobre a influência das características hidrológicas na avaliação da qualidade da água do reservatório do arroio Vacacaí Mirim. O monitoramento hidrológico foi realizado por meio de uma estação fluviométrica e outra pluviométrica; com relação aos dados de qualidade da água, o monitoramento foi feito com coletas mensais em quatro pontos do reservatório. Foram utilizados os dados de 24 campanhas de coletas de amostras e análises realizadas no período de 1996 e 1997. A pesquisa concluiu que existe correlação entre os parâmetros hidrológicos e de qualidade, sendo os parâmetros que mostraram maior correlação com variáveis hidrológicas foram durezas, alcalinidade, turbidez e cor.

Gastaldini et al. (2001) realizaram um estudo da correlação entre parâmetros de qualidade da água e hidrológicos e concluíram que as variáveis hidrológicas tem interferência nos parâmetros de qualidade da água. Porém, os parâmetros OD, DBO e *pH* não apresentaram correlação com as vazões, provavelmente devido às baixas variações temporais.

Dill (2002) avaliou o uso do solo na bacia hidrográfica contribuinte ao reservatório do Vacacaí Mirim e a sua possível relação com o sedimento transportado e conseqüente assoreamento do reservatório. Foi concluído que houveram alterações no uso e ocupação do solo entre 1972 e 2001, como por exemplo o aumento da porção urbanizada. Além disso, ao analisar os dados de projeto do reservatório (1972) e os resultados da batimetria (2001), constatou-se uma redução significativa na capacidade de armazenamento de 29,45%.

Gastaldini et al. (2004) analisaram ciclos de estratificação térmica e do oxigênio dissolvido do reservatório aplicando o modelo CE-QUAL-W2 a perfis de temperatura e oxigênio dissolvido obtidos no ano de 1999. Observaram que ocorre a estratificação do reservatório no período do verão e concluíram que a estratificação proporciona alterações na qualidade da água.

Burin (2011) avaliou a variabilidade da qualidade da água e do estado trófico do reservatório do Vacacaí Mirim, realizou oito campanhas de campo entre 2010 e 2011. As coletas foram realizadas em quatro pontos distribuídos ao longo do reservatório e em um ponto localizado à montante, no principal afluente. Nos pontos

do reservatório foram coletadas amostras de superfície e de profundidade. Posteriormente, análises laboratoriais das características de qualidade da água eram feitas periodicamente, por meio de temperatura da água, *pH*, condutividade elétrica, turbidez, OD, DBO₅, DQO, SST, SDT, E. coli, clorofila *a*, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total e outros íons. Com relação ao índice de estado trófico, avaliou os teores de fósforo, clorofila *a* e indicadores biológicos. A variabilidade dos parâmetros de qualidade da água, em sua maioria, mostrou maior dispersão em função da sazonalidade climática. Encontrou, além da grande variabilidade, elevados valores de E. coli, o que indica uma ausência de sistemas de tratamento de efluente. Com relação aos valores de IET, os resultados obtidos mostraram que o reservatório do Vacacaí Mirim é classificado como um ecossistema mesotrófico, tendendo algumas vezes a eutrofia, evidenciando a influência antropogênica. A baixa concentração de DBO e a pequena presença de macrófitas aquáticas sustentam a hipótese de que o reservatório apresenta um estágio de trofia moderado, mas não isento de preocupação.

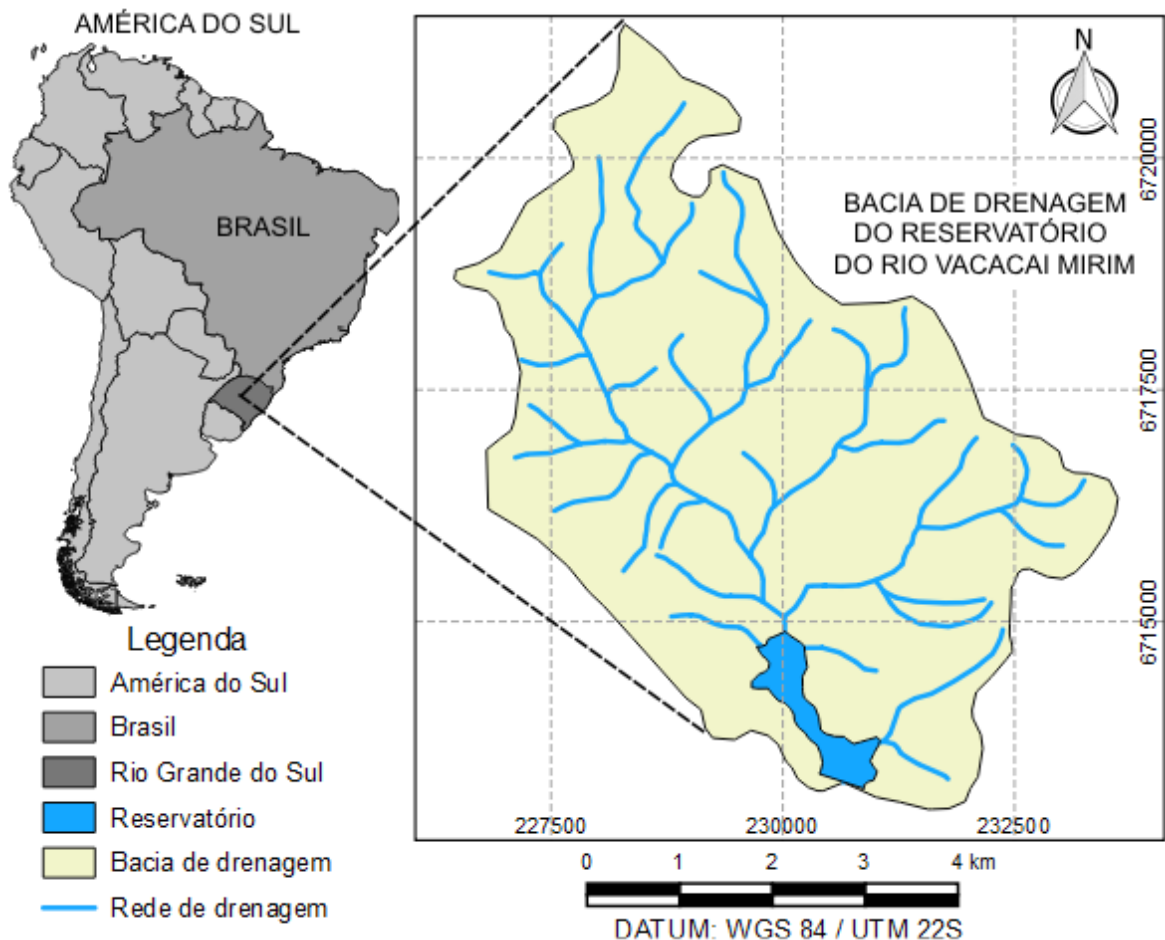
Portanto, é importante que se faça o estudo dos parâmetros hidrológicos e de qualidade da água deste reservatório, dada a sua importância para a cidade. Pois, segundo Figueirêdo et. al (2007), a ocorrência do fenômeno de eutrofização das águas, por meio do seu enriquecimento por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, leva ao crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quanto aderidas, com conseqüente desequilíbrio do ecossistema aquático e progressiva degeneração da qualidade da água dos corpos lânticos.

3 RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Com relação à área de estudo, o reservatório do Vacacaí Mirim está situado ao norte da cidade de Santa Maria-RS e a sudoeste do município de Itaara, coordenadas geográficas 29° 40' 31" de latitude sul e 53° 47' 6" de longitude oeste. Faz parte da bacia hidrográfica do rio Vacacaí Mirim, abrangendo uma área total de 3.151 ha, como mostrado na figura 1.

Figura 1 - Mapa da localização da área de estudo.



3.2 DESCRIÇÃO DA BACIA CONTRIBUINTE AO RESERVATÓRIO

A bacia é caracterizada por área em urbanização na margem direita do reservatório e área rural na margem esquerda. Suas principais utilizações atuais são abastecimento doméstico, uma vez que é responsável por 30% do abastecimento de água de Santa Maria.

Segundo Goldani (2006), a bacia hidrográfica do reservatório do Vacacaí Mirim pode ser dividida, em linhas gerais, em três grandes compartimentos geomorfológicos com características distintas: a região do planalto, a região do rebordo do planalto e a depressão periférica. Com relação à amplitude altimétrica, a bacia possui aproximadamente 450 m, evidenciando elevado trabalho erosivo do Rio Vacacaí Mirim e seus afluentes.

Com relação ao uso e ocupação do solo, Goldani (2006) apresenta os dados de uso e ocupação do solo por meio da evolução entre 1995 e 2003 (tabela 1). Para fins de melhor representatividade da área, durante a pesquisa foi realizado um novo estudo do uso e ocupação do solo para o ano de 2010 (também mostrado na tabela 1). Destaca-se o fato das áreas de florestas diminuírem ao longo do tempo e campos, agricultura e as áreas urbanas aumentarem, evidenciando um processo de urbanização da área.

Tabela 1 - Uso e ocupação do solo em 1995, 2003 e 2010.

Classe	1995		2003		2010	
	%	ha	%	ha	%	ha
Água	1,78	56,00	2,38	75,00	2,02	61,21
Vegetação arbor./arbus.	76,74	2418,00	71,00	2242,00	49,83	1506,44
Solo exposto	3,59	113,00	5,08	160,00	9,43	285,16
Vegetação rasteira	13,61	429,00	14,60	460,00	17,57	531,04
Área urbana	4,28	135,00	6,79	214,00	21,14	639,06

Fonte: Adaptado de Goldani (2006).

Predominante na bacia hidrográfica do reservatório, a floresta estacional decidual característica, que se situa entre o planalto meridional brasileiro e a depressão periférica sul-rio-grandense, apresenta-se em grande parte devastada. Isso ocorreu em virtude do desmatamento para uso agrícola, ocorrido principalmente nos patamares, topos de morros e nos setores menos declivosos das vertentes (GOLDANI, 2006).

3.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO RESERVATÓRIO

Como citado anteriormente, o reservatório do rio Vacacaí Mirim vem sendo estudado ao longo dos anos e suas características físicas também foram abordadas nestes estudos. No que diz respeito ao levantamento batimétrico, Dill (2002) apresentou, como mostra a tabela 2, dados do volume acumulado do reservatório com relação à determinada cota.

Tabela 2 - Levantamento Batimétrico (2001).

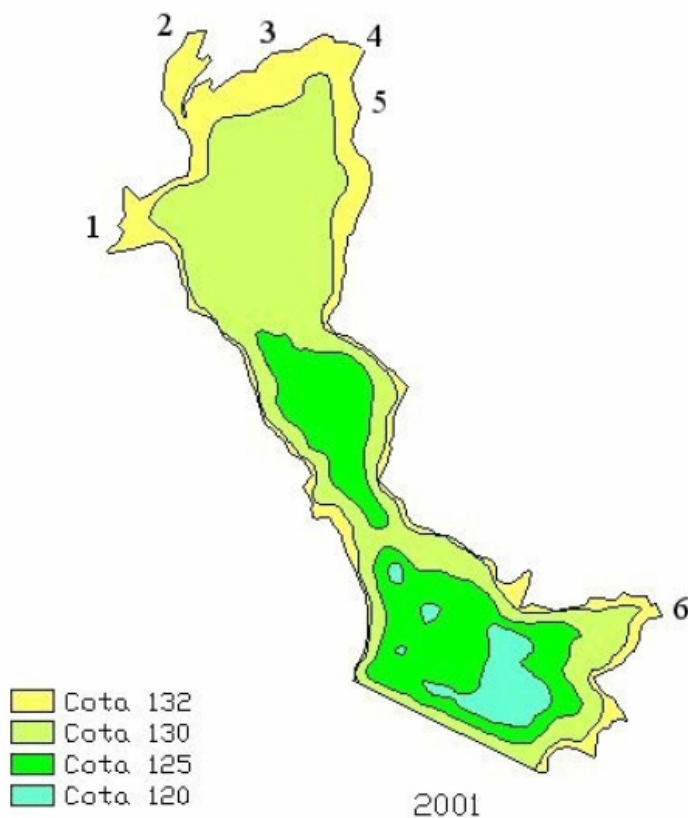
Cota (m)	Volume acumulado (hm³)
117	-
118	0,005931533
119	0,025627353
120	0,069031993
121	0,136670463
122	0,226957093
123	0,337273383
124	0,481382333
125	0,666539113
126	0,891110393
127	1,159158183
128	1,478118283
129	1,862901453
130	2,323211703
131	2,864941973
132	3,477000000

Fonte: Dill (2002).

Além disso, como forma de complementação, Dill (2002) apresentou as coroas hipsométricas do reservatório do Vacacaí Mirim (figura 1). Esses dois conjuntos de informações, juntos, viabilizam a inserção da batimetria do reservatório no modelo CE-QUAL-W2.

A inserção da batimetria do reservatório deu-se de forma a compatibilizar os volumes acumulados do levantamento batimétrico (Tabela 2) com as coroas hipsométricas (mostradas na figura 2). A compatibilização foi necessária, pois como as coroas são distantes de 5 metros cada, uma interpolação se mostrou a maneira eficiente para se obter as linhas intermediárias, por exemplo: entre 120 e 125 m, foi feita uma interpolação para se obter as linhas de 121, 122, 123 e 124.

Figura 2 - Coroas hipsométricas do reservatório do rio Vacacaí Mirim em 2001.



Fonte: Dill (2002).

O entendimento das características morfométricas é de suma importância, pois as características limnológicas do reservatório estão relacionadas diretamente com a forma do reservatório, bem como as propriedades físicas, químicas e biológicas do sistema. De forma elucidativa, a tabela 3 exhibe características morfológicas do reservatório em estudo.

Tabela 3 - Características morfométricas do reservatório do rio Vacacaí Mirim.

Parâmetro	Valor
Área de captação (km ²)	30,6
Vazão média de entrada (m ³ /s)	0,5
Volume do reservatório (m ³)	3.477.000
Tempo médio de detenção (dias)	87
Perímetro (m)	6400
Profundidade média (m)	4,7
Profundidade máxima (m)	15
Lâmina d'água (km ²)	0,723

Fonte: Dill (2002); Gastaldini et al. (2000); Gastaldini et al. (2004).

3.4 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

A região do reservatório situa-se no Estado do Rio Grande do Sul, região no extremo sul do Brasil, desta forma o clima é caracterizado por ser subtropical úmido (temperado) – *Cfa* de acordo com a classificação climática *Köppen-Geiger*. Este clima é conhecido por apresentar as quatro estações de forma bem definida: invernos frios e verões quentes, além das estações intermediárias. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano.

O INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) mantém uma estação de monitoramento climatológico em Santa Maria, podendo ser consultado a qualquer momento. Uma série histórica recente de Santa Maria (período de 1991 até 2010) informa valores de temperatura diária média de 19,34°C, temperatura mínima no período de -2,9°C e temperatura máxima de 40,20°C.

Com relação à oferta pluviométrica de Santa Maria, a tabela 4 exibe os valores médios mensais e a média anual de precipitação para a região. É interessante observar que a característica do clima da região, de chuvas bem distribuídas ao longo do ano, é verificada ao analisar a tabela 4.

Tabela 4 - Médias mensais de precipitação na estação pluviométrica de Santa Maria (1990 a 2010).

Mês	Precipitação média mensal (mm)
Janeiro	167,7
Fevereiro	140,5
Março	136,6
Abril	156,1
Mai	131,9
Junho	132,4
Julho	142,1
Agosto	113,5
Setembro	158,9
Outubro	180,9
Novembro	137,3
Dezembro	162,2
Média Anual	1764,13

Fonte: INMET (2015).

4 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como foco, destacar a importância do reservatório do rio Vacacaí Mirim, frente aos impactos ambientais relacionados à eutrofização. Para tal, os parâmetros avaliados serão: a batimetria, dados meteorológicos, vazões de entrada e saída, concentração de nutrientes em diferentes pontos de amostragem do reservatório.

4.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

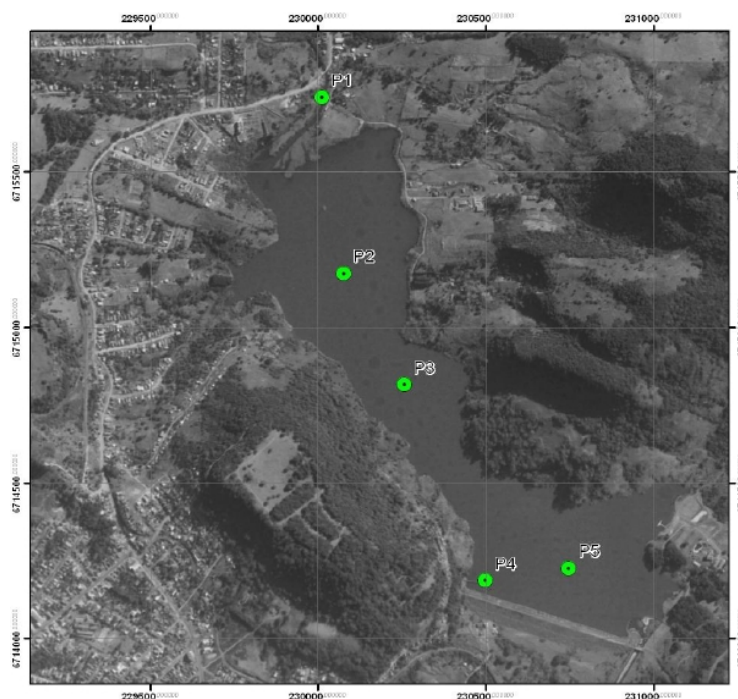
Os dados referentes aos parâmetros de qualidade da água serão os dados coletados na pesquisa de dissertação de Burin (2011). A figura 3 mostra a localização dos pontos de coleta de amostras. Os parâmetros avaliados, que foram utilizados nesta dissertação e a metodologia utilizada para sua determinação, estão mostrados na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de qualidade da água utilizados e suas metodologias de determinação.

Parâmetros de qualidade amostrados	Metodologia	Limite de detecção	Local de análise
Amônia	Cromatografia iônica	0,05 mg/L	LABEFLO
Clorofila <i>a</i>	Espectrofotometria na faixa de luz visível	-	LEMA
Fosfato solúvel	Cromatografia iônica	0,05 mg/L	LABEFLO
Fósforo total	ICP-OES	0,04 mg/L	LAQIA
Nitrato	Cromatografia iônica	0,05 mg/L	LABEFLO
Nitrito	Cromatografia iônica	0,05 mg/L	LABEFLO
Oxigênio dissolvido	Oxímetro	0,1 mg/L	<i>In situ</i>
Temperatura	Oxímetro	0,01°C	<i>In situ</i>

Notas: *in situ*: determinação em campo, no momento da coleta; ICP-OES: espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado; LABEFLO: Laboratório de Ecologia Florestal – CCR/UFSM; LEMA: Laboratório de Engenharia e Meio Ambiente – CT/UFSM; LAQIA: Laboratório de Análises Químicas Industriais e Ambientais – CCNE/UFSM.

Figura 3 - Pontos de amostragem no reservatório do rio Vacacaí Mirim.



Fonte: Adaptado de Burin (2011).

Nos pontos do interior do reservatório (P2, P3, P4 e P5), ao mesmo tempo em que eram coletadas as amostras de água, também eram avaliadas a profundidade do disco de Secchi, e os perfis de temperatura e oxigênio dissolvido. Foram oito campanhas de coleta de campo no período de janeiro/2010 e fevereiro/2011 (BURIN, 2011).

Portanto, o período estudado para a análise de sensibilidade, verificação e confirmação dos dados de entrada, compreendeu as informações coletadas por Burin (2011). Além disso, é importante salientar que o modelo CE-QUAL-W2 utiliza o calendário juliano para a realização das simulações, por isso, estabeleceu-se que o dia 01/01/2010 como o primeiro dia juliano. A tabela 6 mostra como as oito campanhas foram utilizadas para a modelagem da eutrofização.

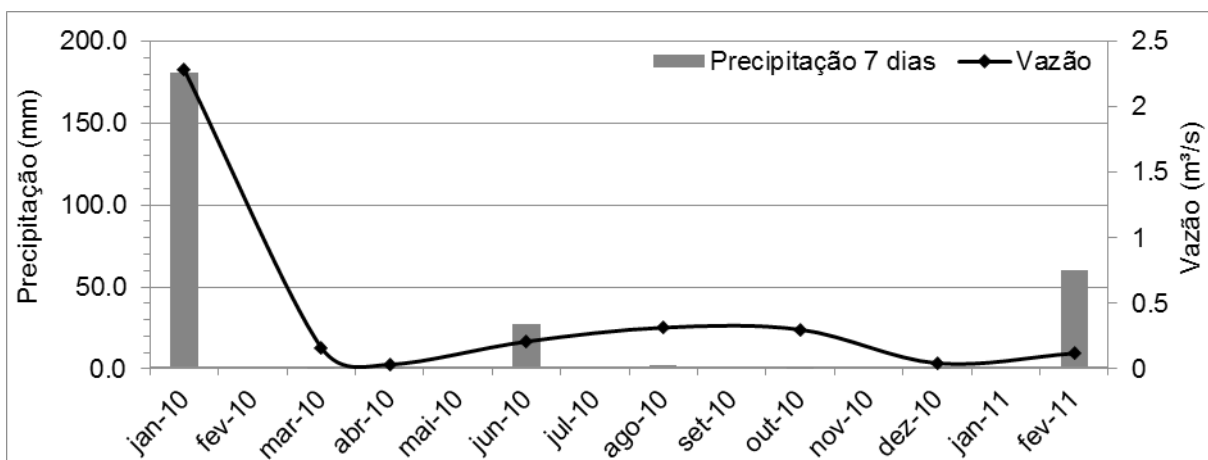
Tabela 6 - Campanhas de qualidade da água e sua utilização para a modelagem

Dia Gregoriano	Dia Juliano	Utilização
18/01/2010	18	Ajuste hidrodinâmico
04/03/2010	63	Ajuste hidrodinâmico
14/04/2010	104	Calibração
10/06/2010	161	Calibração
09/08/2010	221	Calibração
06/10/2010	279	Calibração
02/12/2010	336	Calibração
10/02/2011	406	Validação

4.1.1 Vazão e precipitação

Os dados hidráulicos utilizados na pesquisa foram obtidos por Burin (2011). As campanhas iniciaram-se em janeiro de 2010, porém aquele ano foi um ano atípico, devido à influência do fenômeno *El Niño*, provocando precipitações elevadas, sendo registrados valores de 613 mm de chuva no primeiro mês de campanhas. Em contra partida, nos meses finais de 2010 e início de 2011 a precipitação foi abaixo da média, possivelmente influenciada pelo fenômeno *La Niña*. Os dados de precipitação são mostrados na figura 4.

Figura 4 - Precipitação acumulada nos sete dias anteriores a cada campanha e vazão afluente no reservatório.



Fonte: Burin (2011).

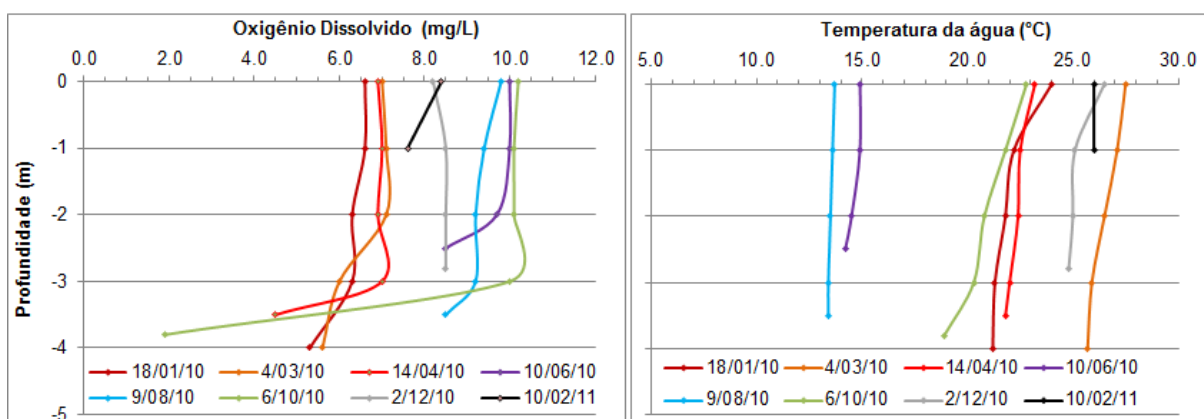
4.1.2 Estratificação do reservatório

Para a verificação do fenômeno de estratificação, os dados de temperatura da água e também de oxigênio dissolvido em diferentes profundidades do reservatório do Vacacaí Mirim, foram obtidos na dissertação de Burin (2011). Estes dados serviram para alimentar o modelo, juntamente com os dados de qualidade da água e de meteorologia.

Com relação aos pontos de coleta, o P2 situa-se numa posição relativamente rasa, com profundidade máxima de aproximadamente 4 m quando a água atinge a crista do vertedor. Já o P3 apresenta profundidade mais elevada em comparação ao P2, quando o nível do reservatório coincide com a crista a profundidade é aproximadamente 8 m. Já os pontos 4 e 5 estão situados em local de maior profundidade, sendo o Ponto 5 o mais profundo, alcançando 16 m.

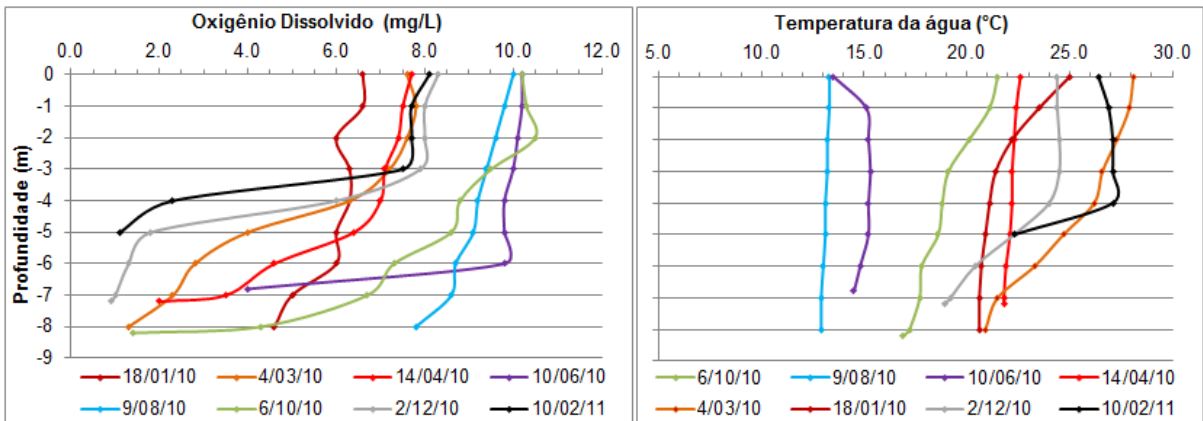
Os dados de Burin (2011) são apresentados na forma de perfis longitudinais. A figura 5 apresenta os perfis de oxigênio dissolvido e temperatura da água para o P2, enquanto que a figura 6 apresenta os mesmos perfis para o P3. Da mesma forma, as figuras 7 e 8 apresentam os perfis para os pontos P4 e P5, respectivamente.

Figura 5 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P2.



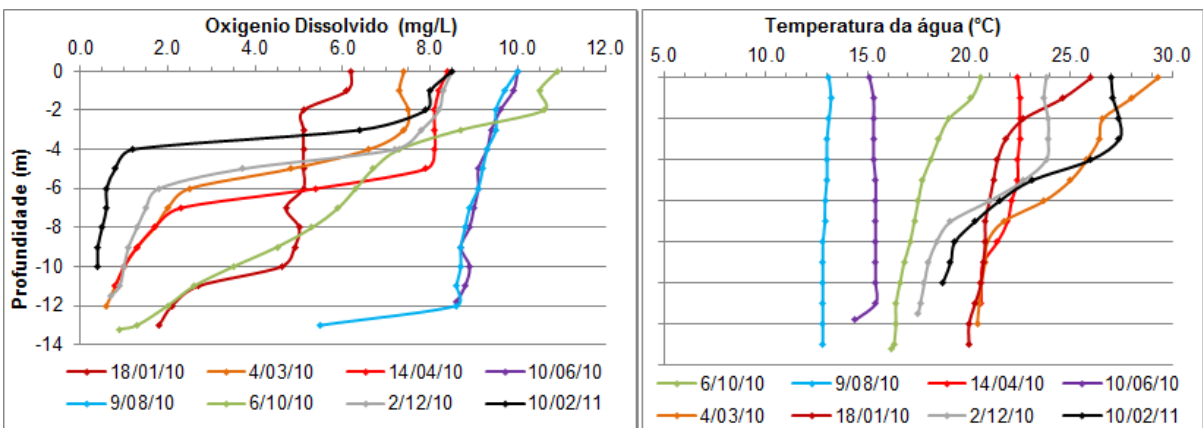
Fonte: Burin (2011).

Figura 6 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P3.



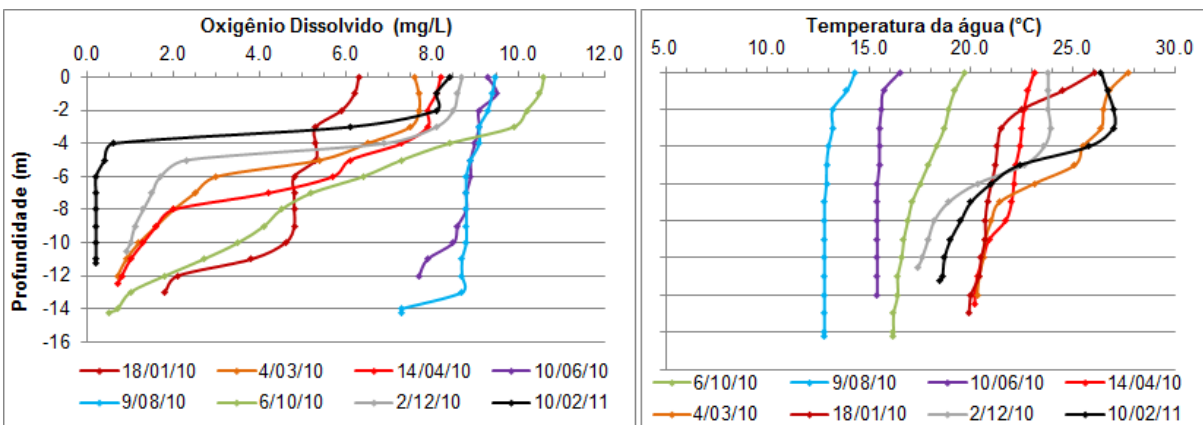
Fonte: Burin (2011).

Figura 7 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P4.



Fonte: Burin (2011).

Figura 8 - Perfis de temperatura e oxigênio dissolvido da água no ponto P5.



Fonte: Burin (2011).

4.1.3 Qualidade da água

Os parâmetros de qualidade da água que foram utilizados neste estudo, novamente, são os obtidos por Burin (2011). A tabela 7 mostra os valores médios, máximos, mínimos e coeficiente de variação dos parâmetros avaliados no reservatório para as oito campanhas de campo.

Tabela 7 - Resultados dos parâmetros investigados no reservatório do Vacacaí Mirim.

Parâmetros	Média	CV (%)	Máximo	Mínimo
Temperatura (°C)	20,7	22,8	29	12,6
OD (mg/L)	7,0	42	10,9	0,2
Clorofila a (µg/L)	17	81,3	50,5	0,5
PT (µg/L)	31,6	254,6	459	**
PO ₄ ⁻ solúvel (mg/L)	0,05	103,4	0,14	**
Amônia NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,10	315,9	1,53	**
Nitrito NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,03	83,2	0,07	**
Nitrato NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,205	112,7	0,85	**

*Média geométrica; **Teores abaixo do limite de detecção; CV = coeficiente de variação.

Fonte: Adaptado de Burin (2011).

4.1.4 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). A estação utilizada é a que se encontra na cidade de Santa Maria-RS.

Estes dados compreendem os seguintes parâmetros: ponto de orvalho, velocidade do vento, temperatura do ar, insolação. Além disso, a direção do vento também será utilizada, porém não será apresentada como forma de gráfico.

Os dados supracitados compreendem o período de um ano, entre 01/01/2010 até 10/02/2011, com intervalos de tempo de 9 horas durante a noite e 3 horas durante o dia.

4.1.5 Parâmetros cinéticos

Os parâmetros cinéticos são dados importantes para a modelagem, pois fornecem informações com relação às fontes e sumidouros dos constituintes em análise. Como são parâmetros de difícil mensuração, é possível adotar valores coerentes para uma simulação inicial e posteriormente ajustá-los na etapa de calibração.

O manual do usuário do modelo CE-QUAL-W2 versão 3.71 (Cole e Wells, 2013) traz valores de referência para os parâmetros cinéticos utilizados no modelo. Souza (2006) apresentou um resumo dos parâmetros, suas descrições, valores de referência e unidades. Assim, o quadro 2 mostra os valores de referência atualizados conforme Cole e Wells (2013).

Quadro 2 - Parâmetros de referência utilizados no modelo CE-QUAL-W2.

Parâmetro	Valor de Ref.	Unidade	Descrição
CG1DK	0,20 - 2,59	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de 1ª ordem de coliformes termotolerantes
KBOD	0,25	dia ⁻¹	Taxa de decaimento da DBO ₅
RBOD	1,85	-	Relação entre DBO ₅ e DBO _U
CBODP	0,004	-	Relação estequiométrica do fósforo e decaimento de DBO
CBODN	0,06	-	Relação estequiométrica do nitrogênio e decaimento de DBO
CBODC	0,32	-	Relação estequiométrica do carbono e decaimento de DBO
PO4R	0,001	-	Taxa de liberação de fósforo pelo sedimento, fração de SOD
NH4REL	0,001	-	Taxa de liberação de N-amoniaco pelo sedimento, fração de SOD
NH4DK	0,001 - 1,30	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de N-amoniaco
NO3DK	0,05 - 0,15	dia ⁻¹	Taxa de decaimento de nitrato
NO3S	0,001	m/dia	Taxa de desnitrificação pelo sedimento
CO2REL	1,20	-	Taxa de liberação de dióxido de carbono pelo sedimento, fração de SOD
O2NH4	4,57	-	Relação estequiométrica do oxigênio e N-amoniaco durante a nitrificação
O2LIM	0,1	mg/L	Concentração de OD na qual inicia o processo anaeróbico
SOD	0,1 - 5,8	gO ₂ /m ² dia	Demanda de oxigênio pelo sedimento por segmento

Fonte: Adaptado de Souza (2006); Cole e Wells (2013).

4.2 CALIBRAÇÃO

Para Chapra (1997), a calibração nada mais é do que o ajuste dos parâmetros cinéticos para que o resultado calculado seja o mais próximo possível dos dados observados. Para isso, outros dados como as condições iniciais, as características físicas da área de estudo, as condições de contorno e as características hidráulicas já devem ter sido ajustadas, para que não haja mais fontes de incertezas.

Chapra (1997) recomenda duas técnicas de calibração, a calibração manual por tentativa e erro ou a utilização técnicas automatizadas, como a utilização de funções-objetivos. Para a realização deste trabalho foi utilizada a técnica de calibração manual, por tentativa e erro, por ser um método simples e muito eficiente, haja vista que depende apenas da experiência do utilizador.

Com base nisto, o modelo foi calibrado ao longo do ano de 2010, deixando de fora as duas primeiras campanhas, devido ao ajuste hidrodinâmico, e utilizando as cinco subseqüentes campanhas realizadas por Burin (2011), contemplando o período do verão e inverno. Desta forma, pretende-se obter uma melhor calibração para o modelo de acordo com as variações climáticas da região.

Para se avaliar a precisão da calibração, foram utilizada duas medidas de erro: o erro absoluto médio (EAM) e a raiz do erro quadrático médio (REQM). Historicamente, a REQM foi popular devido à sua relevância teórica em modelagem estatística, porém são mais sensíveis a *outliers* que o EAM (HYNDMAN e KOEHLER, 2006).

Desta maneira, a utilização de ambos, em conjunto, serve para se ter um melhor embasamento para a análise do resultado. O erro absoluto médio está expresso na equação 7, enquanto a raiz do erro quadrático médio é mostrada na equação 8.

$$EAM = \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (7)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (8)$$

4.3 CONFIRMAÇÃO

A etapa de confirmação ou validação do modelo significa testar o modelo para situações similares às quais ele foi calibrado, objetivando alcançar resultados semelhantes. Caso isso ocorra, confirma que o modelo é válido para se utilizar em tais condições, por exemplo, em período chuvoso. Se isso não acontecer, então o modelo deve ser analisado novamente, para se discutir as possíveis razões para tal discrepância e posteriormente agregar novas caracterizações e um refinamento do modelo (CHAPRA, 1997).

Para a confirmação, após o modelo devidamente calibrado para as campanhas citadas anteriormente, foi utilizada a campanha final (dia 02 de fevereiro de 2011, ou seja, dia juliano 406) para se confirmar a aplicabilidade do mesmo.

4.4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

Para a simulação da qualidade da água do reservatório em cenários futuros, optou-se por avaliar as características quantitativas de volume precipitado, situação de estiagem e também o aporte de nutrientes, e, portanto, seus impactos na qualidade da água do reservatório do rio Vacacaí Mirim. Assim, o modelo aplicado constitui uma ferramenta importante para estudos da capacidade de assimilação do reservatório para situações extremas e também para a gestão do mesmo.

A bibliografia recente tem utilizado diferentes formas de se fazer previsão de cenários, desde a utilização de séries históricas até a utilização de softwares para se fazer a simulação. Assim, de caráter informativo e para nortear as simulações que foram feitas neste trabalho, o quadro 3 mostra como os autores tem feito a simulação de cenários ao se utilizar o modelo CE-QUAL-W2.

Baseando-se no quadro 3 e tendo em vista a carência de dados para a realização de uma pesquisa de série histórica, quatro cenários foram simulados para o reservatório do Vacacaí Mirim e posterior análise, correlação entre eles e avaliação da qualidade da água através dos valores de referência da Classe 3 da Resolução CONAMA 357/2005 e do índice estado trófico (IET).

Quadro 3 - Métodos de simulação de cenários utilizados na bibliografia recente utilizando o modelo CE-QUAL-W2.

Autores	Simulação de cenários utilizada
Diogo et al. (2008)	Dois cenários de simulação, um deles com a redução de 90% da carga de nutrientes (assumindo que toda a captação de esgoto seja feita e ela tenha uma eficiência no tratamento de 90%) e outra a redução total da carga de nutrientes lançados por Portugal, pois a bacia é dividida entre dois países (península ibérica).
Deus et al. (2013)	Foi utilizado apenas um cenário: acréscimo da carga de fósforo no reservatório, aumentando de 10 até 100%.
Liu e Chen (2013)	Neste trabalho as simulações de cenários foram realizadas utilizando diferentes alturas de captação da água, para a melhor visualização e entendimento da estratificação térmica do reservatório.
Matonse et al. (2013)	Os pesquisadores fizeram uso de diferentes softwares para fazer projeções climáticas para os anos de 2046, 2065, 2080 e 2099. Essas projeções foram para os seguintes parâmetros: temperatura, precipitação, evapotranspiração e neve.
Zouabi e Gueddari (2014)	As simulações de cenário foram para um período de seca, reduzindo assim a vazão de entrada, velocidade do vento, e a cobertura de nuvens em 60%, além de aumentar a temperatura em 5°C; e para um período chuvoso, onde o volume de chuvas foi aumentado em 50x.
Park et al. (2015)	Avaliaram a sensibilidade das algas e, por conseguinte, da concentração de clorofila <i>a</i> diante de um aquecimento global. Assim, aumentaram gradativamente a temperatura do reservatório em 0,5°C até se chegar a um aumento total de 5°C.

Para justificar, foram utilizados os limites da Classe 3, pois o reservatório é utilizado para abastecimento humano e, para sua utilização, a água é submetida a tratamento. Os cenários propostos a seguir foram realizados utilizando a mesma série de dados utilizados para as simulações anteriores (calibração e confirmação), porém a série foi ajustada diferentemente para a realização de cada um dos cenários. Assim, tem-se:

1) Período de estiagem: foi continuada a situação de estiagem em que se encontra o reservatório no período nos meses de dezembro a fevereiro de 2011 e verificada a qualidade da água nos dois meses subsequentes, março e abril. Período simulado: dezembro/2010 a abril/2011.

2) Período de grandes chuvas: foram duas simulações, uma com o aumento do volume precipitado em 20x, outra com o aumento do volume precipitado em 50x. Período simulado: janeiro/2010 a dezembro/2010.

3) Aumento da carga de nutrientes: foram três simulações, uma com o aumento dos nutrientes de entrada (fosfato, fósforo total, amônia, nitrito e nitrato) em 33%, outra com o aumento em 66% e a última com o aumento em 99%. Sabe-se que há um decaimento na concentração de OD, porém como os valores de DBO são baixos (menos de 5 mg/L) o OD não foi modificado. Período simulado: janeiro/2010 a dezembro/2010.

4) Redução da carga de nutrientes: foram três simulações, uma com a redução dos nutrientes de entrada (fosfato, fósforo total, amônia, nitrito e nitrato) em 33%, outra com uma redução em 66% e a última com uma diminuição de 99%. O OD não foi modificado pelo mesmo motivo da simulação de cenário de aumento da carga de nutrientes. Período simulado: janeiro/2010 a dezembro/2010.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são mostrados os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo CE-QUAL-W2, respeitando a metodologia citada e comentada anteriormente.

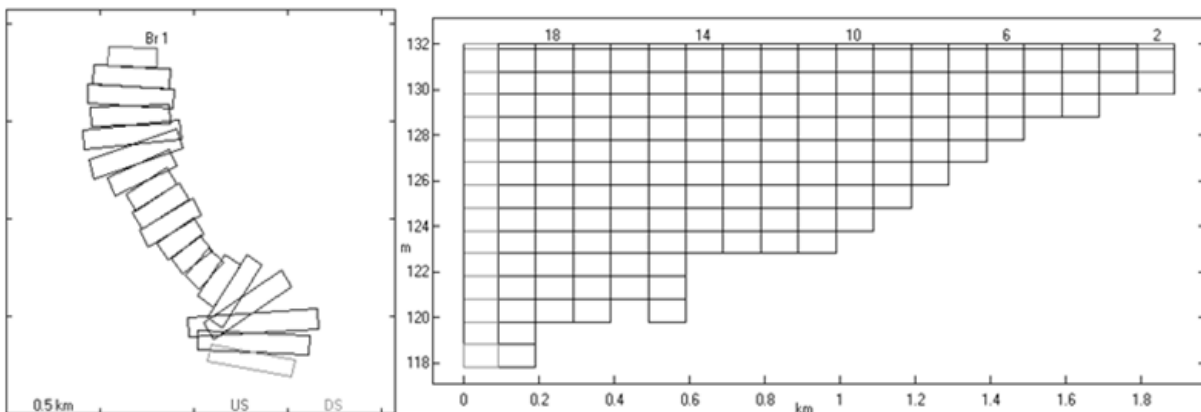
5.1 APLICAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO CE-QUAL-W2

5.1.1 Batimetria do reservatório do rio Vacacaí Mirim

Para a aplicação do CE-QUAL-W2, primeiramente foi realizada a inserção da batimetria do reservatório. O resultado da batimetria é representado na figura 9, onde a parte esquerda da figura mostra o reservatório em vista superior e a parte direita da figura representa o perfil longitudinal de jusante a montante.

Ainda, a figura 9 é capaz de representar, por meio da forma como é apresentada a batimetria, a divisão do reservatório para se implantar no modelo. São 18 segmentos de 100 metros e um menor, de 89,80 metros. Com relação à elevação, o reservatório foi dividido em 14 camadas de 1 metro e a última camada, superior, de 0,20 metros. Dessa forma, o volume do reservatório obtido pelo modelo CE-QUAL-W2 foi de 3,41 milhões de m^3 , comparando com a batimetria obtida por Dill (2002) de 3,47 milhões de m^3 , uma precisão de aproximadamente 98%.

Figura 9 - Batimetria do reservatório no modelo CE-QUAL-W2.



5.1.2 Características hidrodinâmicas e a elevação superficial

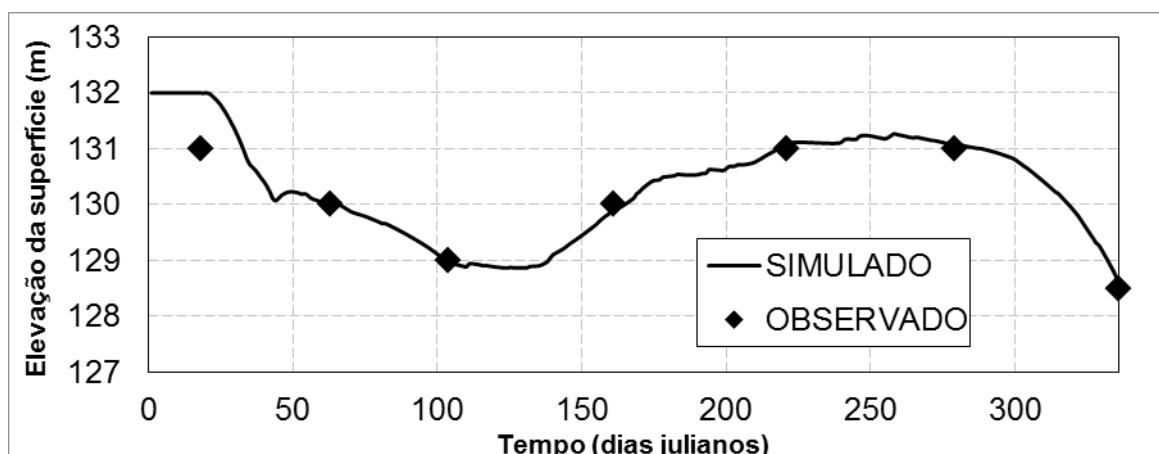
Posteriormente, após os ajustes da batimetria do reservatório do rio Vacacaí Mirim no modelo CE-QUAL-W2, foram inseridos os dados para se fazer os ajustes das condições hidrológicas: vazão de entrada e temperatura, vazão de saída, precipitação, condições meteorológicas (temperatura do ar, ponto de orvalho, velocidade do vento, direção do vento e cobertura de nuvens).

A correta inclusão dos dados de vazão diminui as incertezas geradas pelas simulações do modelo. Além disso, o baixo número de campanhas e a falta de dados da vazão de saída, especialmente a vazão de retirada da concessionária de abastecimento público da cidade de Santa Maria, fazem com que se tenha uma grande lacuna para a calibração da elevação da superfície.

Assim, a figura 10 exibe a elevação da superfície do reservatório. Destaca-se que o reservatório possui um vertedouro na cota de 132 metros. O modelo W2 tem a opção de se adicionar estruturas hidráulicas ao longo do trecho em estudo, desta forma o vertedouro existente foi inserido e apresentou resultado satisfatório durante as simulações.

As vazões de saída foram ajustadas para as médias de consumo populacional da cidade de Santa Maria (informação cedida pela concessionária) com variação na retirada para os períodos de verão e inverno. O consumo médio é de 28.000 m³/dia e 24.000 m³/dia, respectivamente, para os períodos de verão e inverno.

Figura 10 - Elevação da superfície do reservatório entre 01/01/2010 até 02/12/2010.



Ainda sobre as características hidrodinâmicas do reservatório, o início do ano de 2010 foi um ano extremamente atípico, com precipitações acumuladas muito elevadas. Por exemplo, o mês de Janeiro obteve valores de aproximadamente 406 mm (INMET, 2015), alterando as características do reservatório.

Por conta disso, para fins de ajustes hidrológicos do modelo (especialmente com relação ao tempo de detenção do reservatório), as primeiras duas campanhas – 18/01/2010 e 04/03/2010 – foram consideradas. Entretanto, para fins de modelagem da qualidade da água, elas foram desconsideradas, pois a falta de dados hidrodinâmicos do período antecedente e também toda a variação inesperada acabaram alterando as características da qualidade da água, e assim, inviabilizando a sua modelagem de forma adequada.

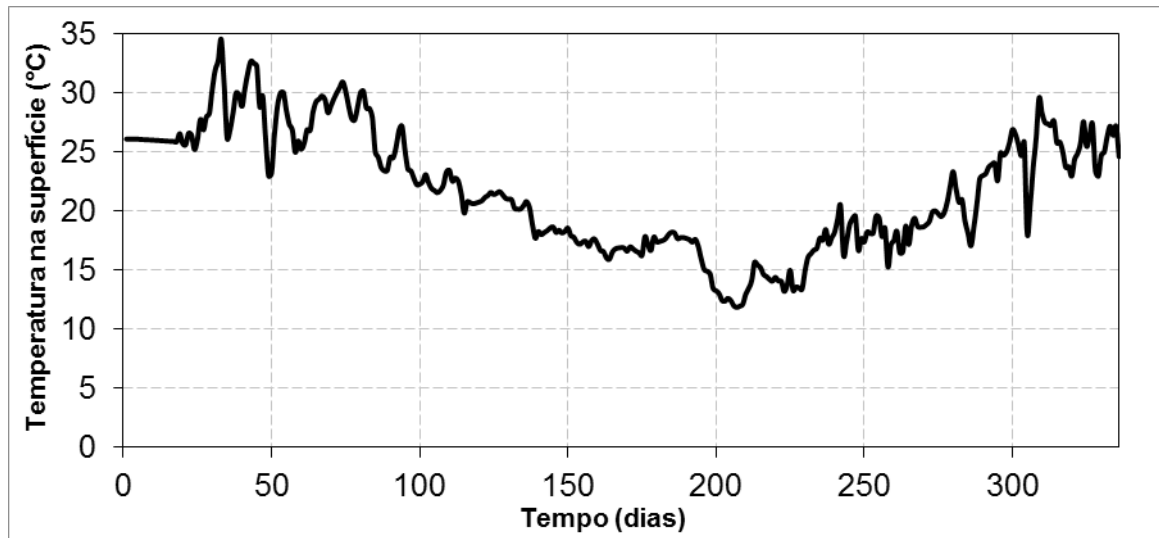
5.1.3 Perfis de temperatura e a estratificação térmica do reservatório

Como recomendado pelo modelo CE-QUAL-W2, através do seu “*wiki*” (CE-QUAL-W2, 2015), os primeiros passos na modelagem utilizando o W2 são a calibração da superfície de elevação, que engloba toda a parte hidrodinâmica do reservatório e, posteriormente a calibração da temperatura. E, a partir dessas duas calibrações iniciais, prosseguir com a modelagem dos parâmetros de qualidade da água.

Seguindo o indicado, os resultados da calibração da temperatura são mostrados por meio das imagens que se seguem. A figura 11 exhibe a temperatura na superfície do reservatório do rio Vacacaí Mirim ao longo de todo o período simulado. Ao analisar a figura, há percepção do clima subtropical ao se verificar a transição entre o verão e o inverno pelo clima de outono e, também, de primavera.

Não apenas a temperatura da superfície, mas também foi possível simular os perfis de temperatura ao longo do reservatório devido aos dados obtidos por Burin (2011). Assim, comparando os valores simulados pelo modelo com os valores observados.

Figura 11 - Temperatura na superfície do reservatório entre 01/01/2010 até 02/12/2010.



Ainda, segundo as orientações encontradas em CE-QUAL-W2 (2015), é sugerido pela publicação que na etapa de calibração da temperatura, se não houver como ajustá-la ao calibrar parâmetros relacionados, deve-se atentar aos dados meteorológicos. Pois, geralmente os dados meteorológicos disponíveis são de estações localizadas em instituições governamentais, como por exemplo, aeroportos, normalmente distantes das áreas de estudo e podendo provocar resultados simulados inesperados.

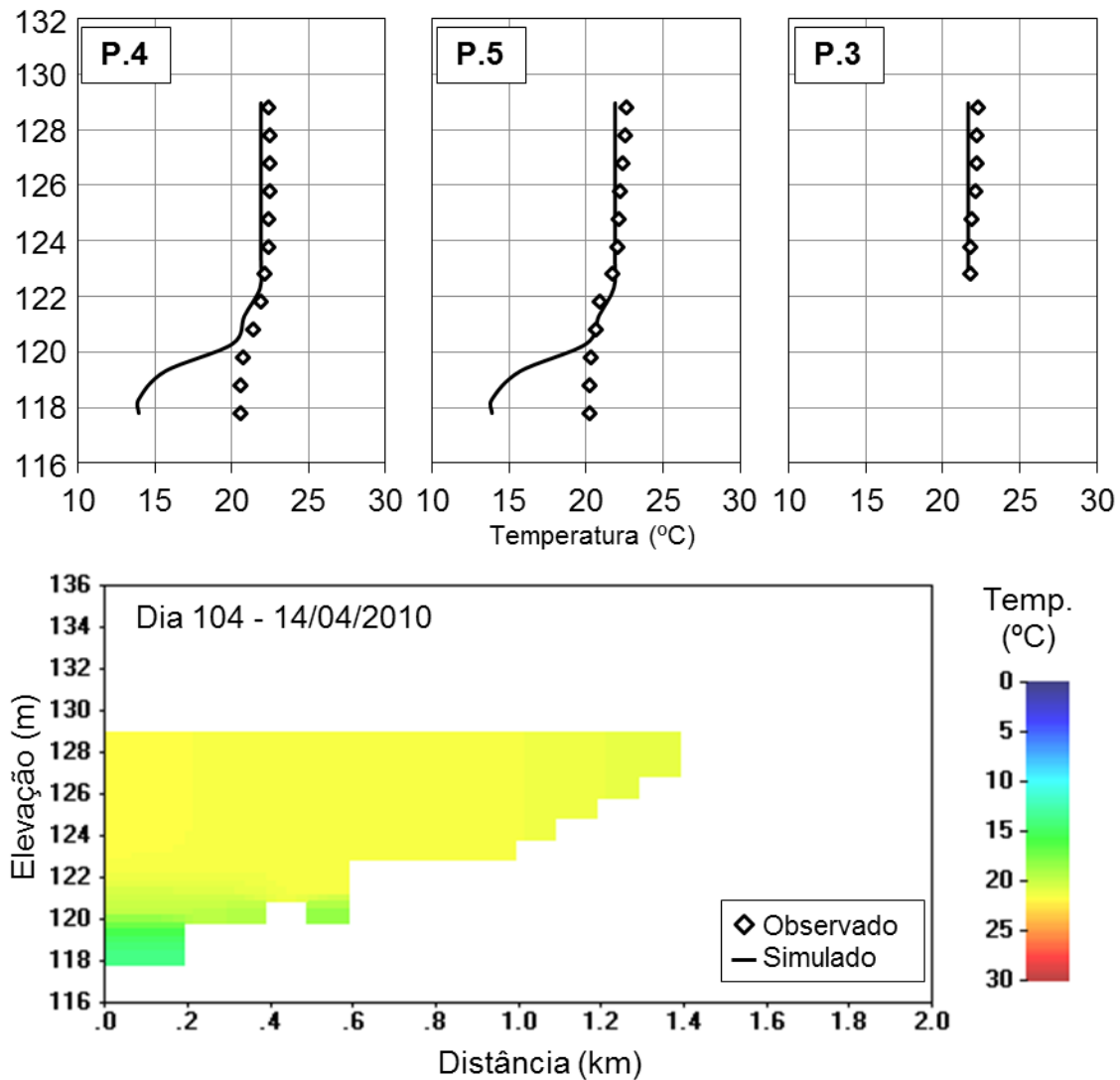
Foram utilizados para esta etapa da calibração os pontos P3, P4, e P5. O ponto P1 foi deixado de fora, pois se situa na entrada do reservatório do Vacacaí Mirim, não podendo configurar-se um perfil de temperatura. Já o P2 foi excluído, visto que está localizado na parte mais a montante do reservatório, por isso a mais rasa, apresentando muita variação nos resultados.

As figuras 12, 13, 14, 15 e 16 apresentam os perfis de temperatura para os pontos P4, P5 e P3, além também a temperatura do perfil longitudinal do reservatório para os dias 104 (14/04/2010), 161 (10/06/2010), 221 (09/08/2010), 279 (06/10/2010) e 336 (02/12/2010) respectivamente.

Após deixar as duas primeiras campanhas, realizadas nos dias 18 e 63, para o ajuste dos dados hidrológicos, a primeira campanha utilizada na calibração da temperatura foi a do dia 14 de abril de 2010. De caráter informativo, a temperatura do ar no horário da coleta era aproximadamente 20,2°C.

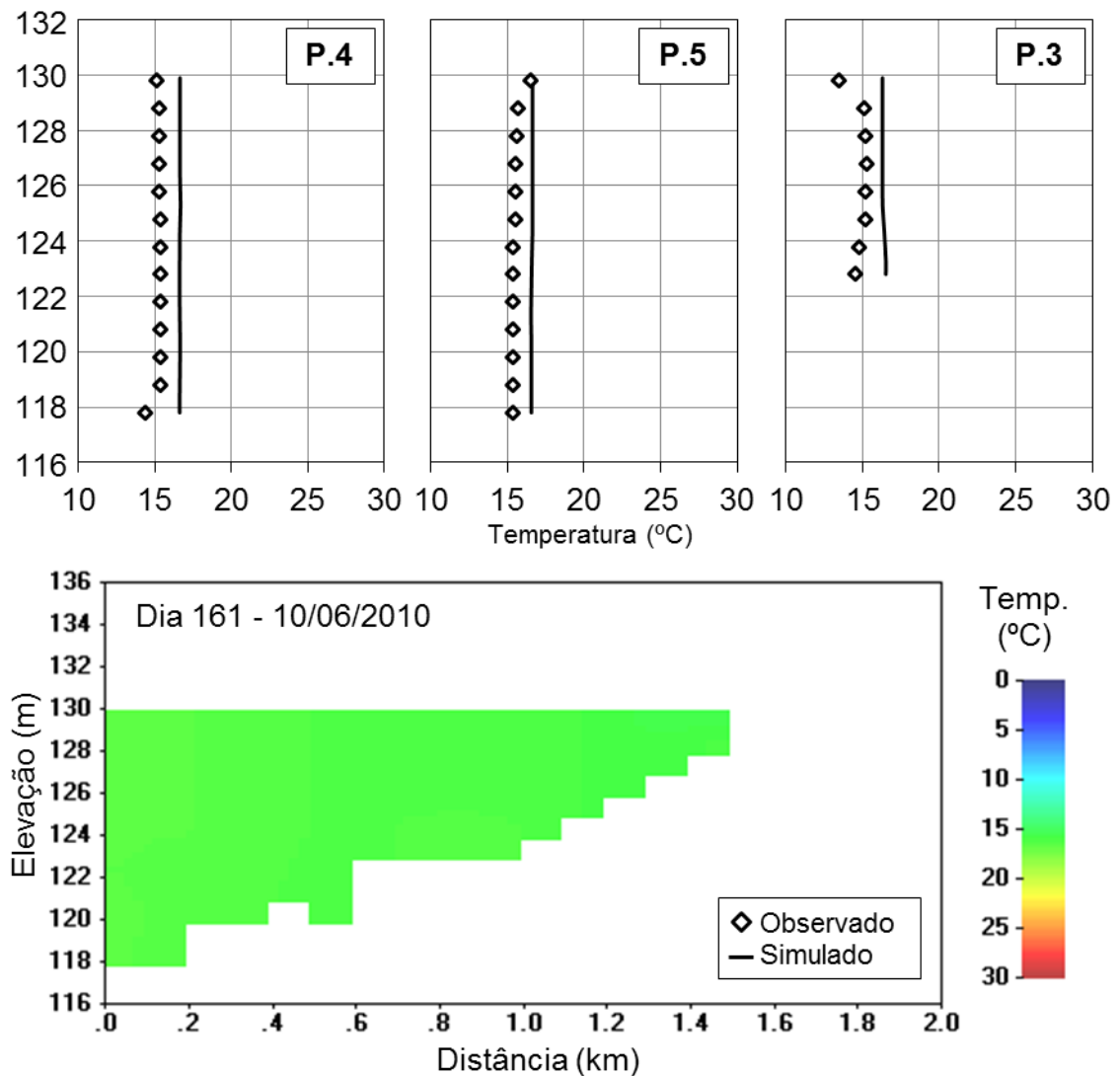
Os resultados obtidos após a calibração estão mostrados na figura 12, mostrando uma boa acurácia nos resultados simulados, uma vez que o EAM nos pontos P4, P5 e P3 é 1,36, 1,24 e 0,38°C, respectivamente e a REQM para os mesmos pontos é 0,34, 0,31 e 0,08°C respectivamente.

Figura 12 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 14/04/2010.



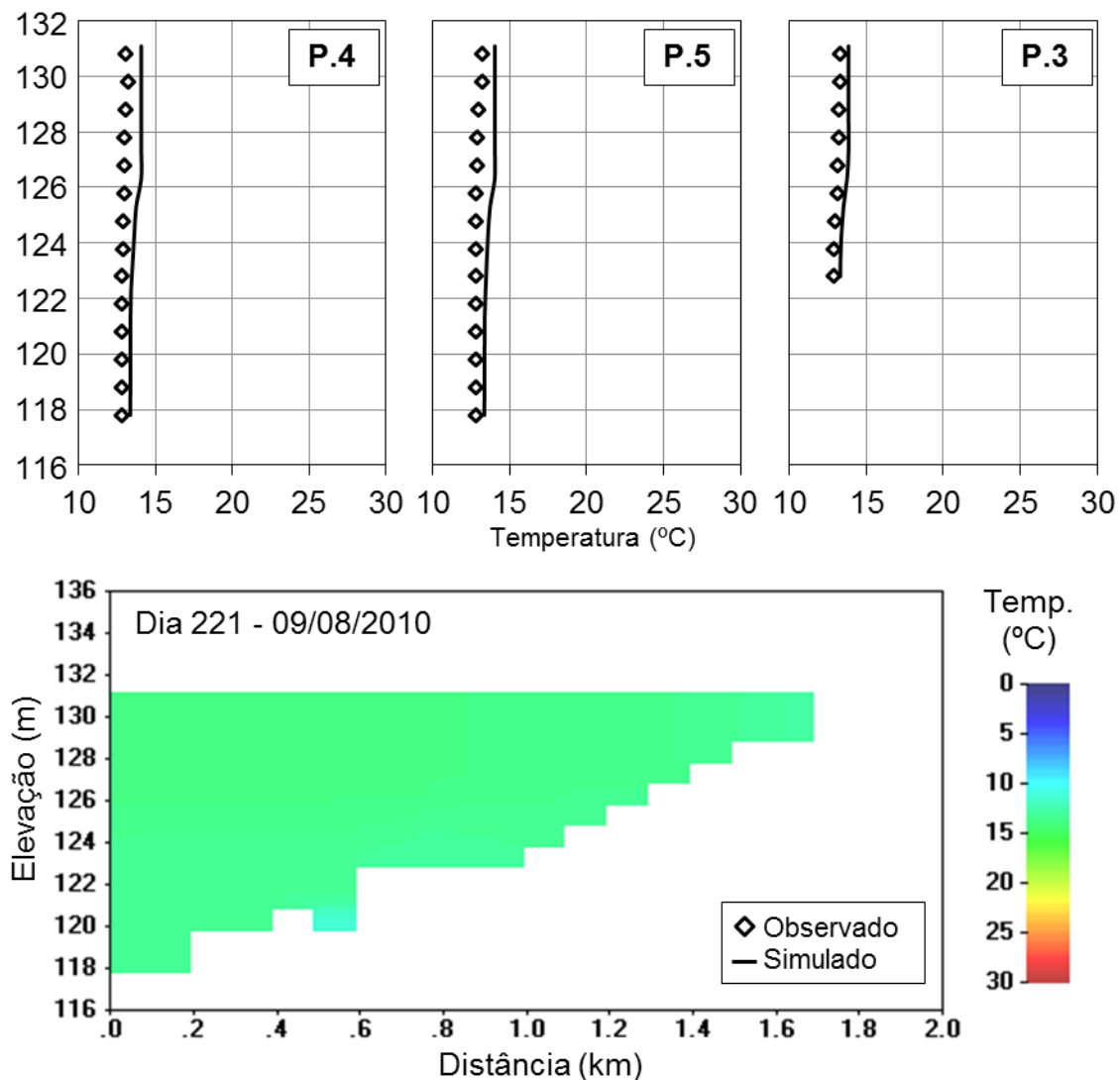
Confrontando os dados simulados e observados de temperatura do dia 10 de junho de 2010, temperatura do ar no horário da coleta era de aproximadamente 5,3°C. A figura 13 corrobora os resultados expressivos na calibração. Isso ocorre, efetivamente, ao apresentar um EAM no ponto P4 de 1,38, da mesma forma, o erro no P5 foi de 1,07 e, por fim, um erro de 1,51°C no ponto P3. Da mesma forma, a REQM para o P4 é 0,34, para o P5 é de 0,26 e para o P3 é de 0,37°C.

Figura 13 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



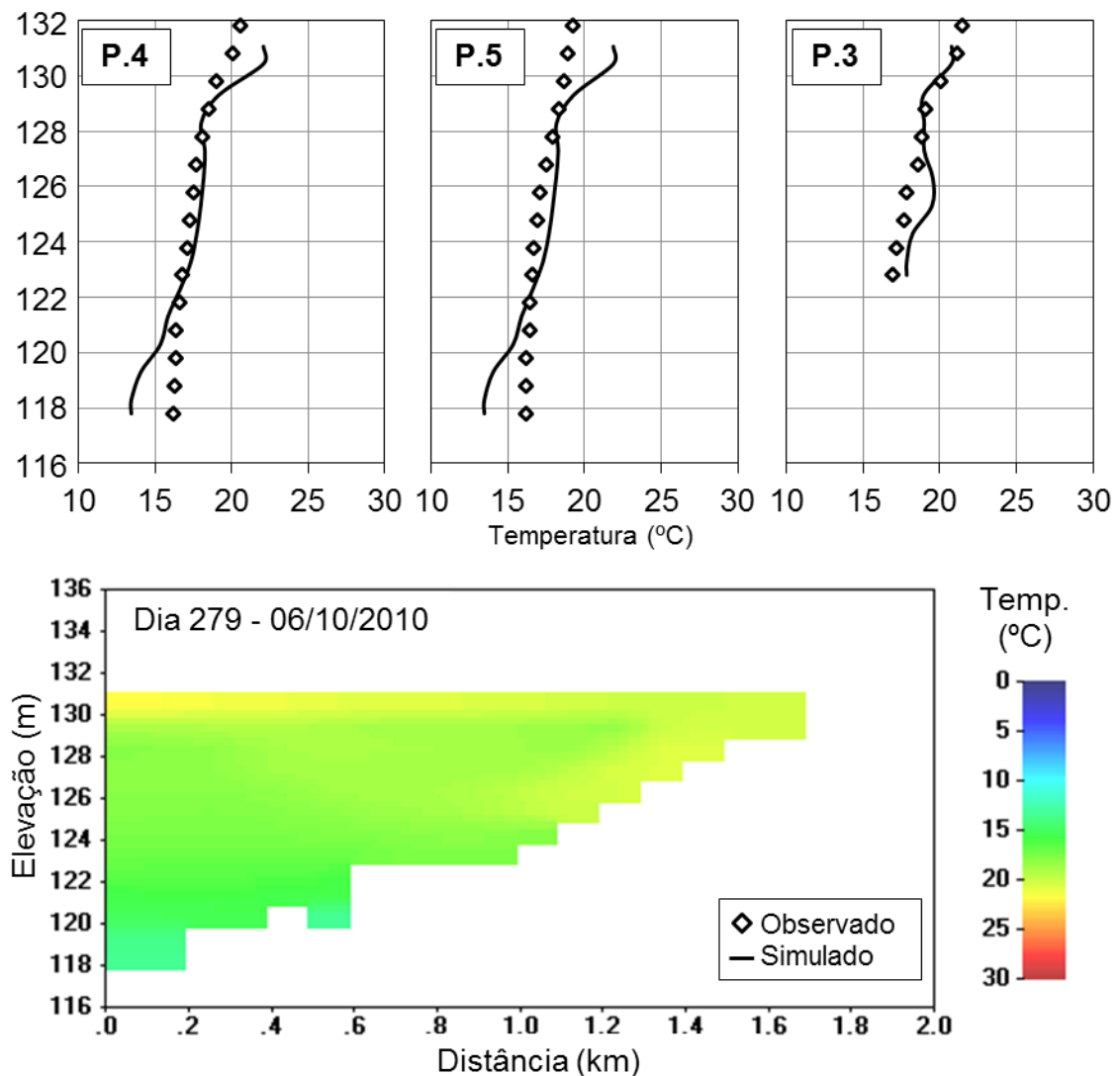
A simulação para o dia 09 de agosto de 2010, temperatura do ar no horário da coleta era aproximadamente 6,7°C, é mostrada na figura 14. Reflete a redução dos níveis de temperatura em todo o reservatório, praticamente obtendo o mesmo valor de temperatura (aproximadamente 13°C) em toda sua extensão. A simulação obtida foi ao encontro dos valores observados para este dia, apresentando um EAM para os pontos P4, P5 e P3 de 0,84, 0,81 e 0,59°C, respectivamente. Por sua vez, a REQM para os pontos P4, P5 e P3 é de 0,22, 0,23 e 0,16°C.

Figura 14 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



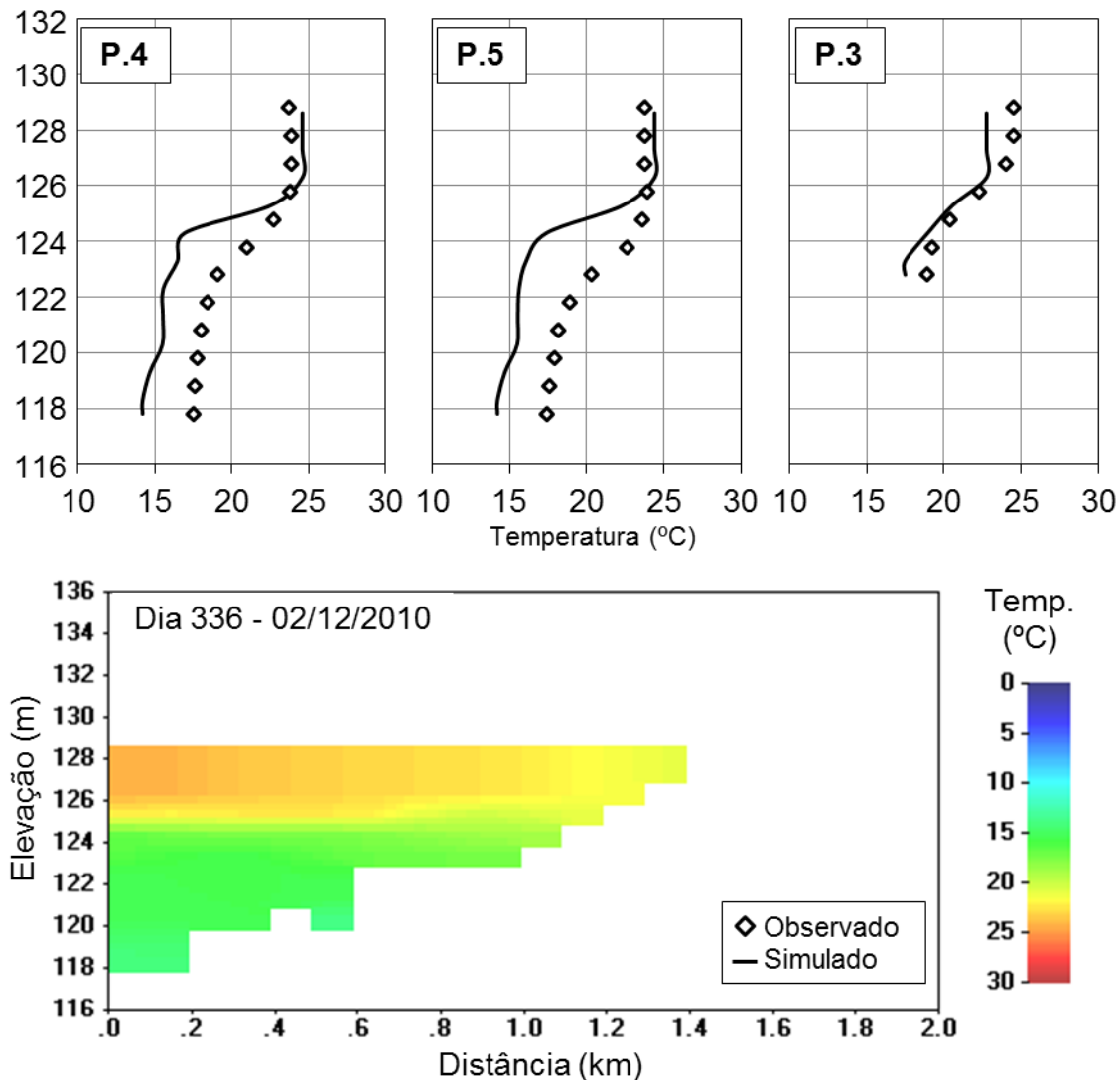
Ainda sobre os resultados da simulação da temperatura, a figura 15 apresenta os resultados simulados e os valores observados para o dia 06 de outubro de 2010, onde a temperatura do ar no horário da coleta era aproximadamente 9,7°C. É possível notar um aumento da temperatura na superfície do reservatório, devido ao aumento da temperatura do ar, em virtude da mudança de clima de inverno para a primavera. Com relação aos resultados obtidos, um EAM de 1,26 para o P4, 1,05 para o P5 e 0,73°C para P3. Para a REQM, têm-se valores de 0,26, 0,31 e 0,17°C para os pontos P4, P5 e P3, respectivamente.

Figura 15 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Ao se aproximar do verão, a simulação do dia 02 de dezembro de 2010, mostrada na figura 16, evidencia um aumento na temperatura superficial do reservatório como um todo (temperatura do ar no horário da coleta era aproximadamente $20,7^{\circ}\text{C}$). Assim, começa o início de um processo de estratificação do reservatório, que é corroborado com perfis de temperatura simulados e observados, para os pontos P4, P5 e P3. Os resultados expuseram um EAM de 2,28 para o P4, 1,97 para P5 e $1,00^{\circ}\text{C}$ para o P3 e, também, a REQM de 0,49 para o P4, 0,56 para o P5 e de $0,19^{\circ}\text{C}$ para o P3.

Figura 16 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de temperatura do reservatório para o dia 02 de dezembro 2010.



Os resultados obtidos para a calibração da temperatura no dia 336, em 02/12/2010 não foram exatamente tão precisos quanto os anteriores, que estiveram todos com um EAM abaixo de $1,50^{\circ}\text{C}$. Entretanto, para o dia 336, o erro ficou próximo de $2,30^{\circ}\text{C}$ e uma diferença de temperatura no metalímnio para o P5 de aproximadamente 5°C . Essa discrepância pode ter ocorrido devido à mudança climática ocorrida não ter sido bem representada pelo modelo. Essa alteração ocasionou num grande aumento da temperatura superficial e também se registrou um dos níveis mais baixos da elevação de superfície do reservatório.

Para efeito de comparação, Deus et al. (2013) também fizeram o uso do modelo CE-QUAL-W2 para a simulação da qualidade da água e obtiveram resultados satisfatórios na representação dos perfis de temperatura ao longo do reservatório do Tucuruí. O modelo representou com muita precisão a estratificação térmica que ocorreu no reservatório durante períodos de estiagem (entre setembro e dezembro), com uma diferença de temperatura média entre a região de topo e a região profunda em torno de 9°C .

De forma parecida, Lee et al. (2012) utilizaram o modelo CE-QUAL-W2 para validar a simulação dos efeitos das mudanças climáticas na estrutura termal de lagos na área de clima de monção na Ásia. Os resultados obtidos para a calibração da temperatura foram satisfatórios, apresentando um erro médio de 3,17 e uma raiz do erro quadrado médio de $13,02^{\circ}\text{C}$.

Também utilizando o modelo CE-QUAL-W2, Liu e Chen (2013) obtiveram valores de 0,47 e $0,62^{\circ}\text{C}$ para o erro absoluto médio e a raiz do erro quadrado médio, respectivamente. Segundo os autores, os resultados obtidos na simulação estiveram perto de imitar os valores observados nos perfis de temperatura do reservatório Shihmen.

Yu et al. (2010) também fizeram o uso do modelo CE-QUAL-W2 para a simulação da temperatura na represa Daecheong, obtendo valores calculados muito próximos aos valores observados. Na mesma linha, Zou et al. (2014) apresentaram os resultados da simulação da temperatura na superfície do lago Chenghai, sendo que os resultados obtidos foram expressivos, mostrando a capacidade do modelo em representar a temperatura de maneira precisa.

Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) aplicaram o modelo CE-QUAL-W2 para simulação dos perfis de temperatura na represa Sejnane. Foi obtido um erro absoluto médio variando entre 0,42 e 0,66°C e a raiz quadrada do erro médio variando entre 0,55 e 0,87°C.

5.1.4 Perfis de oxigênio dissolvido do reservatório

O manual do modelo CE-QUAL-W2, em Cole e Wells (2013), apresenta uma sequência lógica para que se faça a calibração e os ajustes do oxigênio dissolvido no reservatório. Primeiramente, o modelo já deve estar calibrado ao reservatório, no que diz respeito às características hidrodinâmicas e à temperatura.

Posteriormente, o início da calibração do oxigênio dissolvido dá-se com os ajustes da demanda bentônica, com relações cinéticas de ordem zero e de primeira ordem, para cada segmento. Para isto, seguiu-se a sugestão dos autores, para que se faça o ajuste da demanda bentônica (valores de referência apresentados na tabela 8 para os valores de demanda bentônica - SOD) com relação de ordem zero e a utilização dos valores padrões do modelo para as taxas relacionadas à sedimentação (valores padrões mostrados na tabela 9), pois o modelo é capaz de representar diferentes regimes de qualidade da água sem a necessidade do operador recorrer a extensas manipulações dos parâmetros específicos para o local de estudo.

Tabela 8 – Valores da literatura de demanda bentônica.

Local	SOD (g O ₂ m ⁻² dia ⁻¹)	Referência
Lago Cayuga, NY	0,3 – 1,0	Newbold & Liggett (1974 apud COLE e WELLS, 2013)
Lago Sammamish, WA	1,0	Bella (1970 apud COLE e WELLS, 2013)
Lago Lyndon B. Johnson, TX	1,7 – 5,8	Schnoor & Fruh (1979 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Saginaw, MI	0,1 – 5,3	Chiaro & Burke (1980 apud COLE e WELLS, 2013)

Fonte: Cole e Wells (2013).

Após os ajustes relacionados à sedimentação e à demanda bentônica, foram feitos acertos na calibração dos parâmetros referentes à fotossíntese e à respiração:

as algas, as epífitas, as macrófitas e o zooplâncton. Para, posteriormente se fazer os ajustes nos parâmetros que envolvem a reaeração atmosférica.

Tabela 9 – Parâmetros relacionados à sedimentação.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão
SEDCI	Concentração inicial de sedimento (g m ⁻²)	0,0
SEDK	Taxa de decaimento de sedimento (dia ⁻¹)	0,1
SEDS	Decantação de sedimentos (m dia ⁻¹)	0,1
FSOD	Fração da demanda bentônica de ordem zero utilizada	1,0
FSED	Fração da concentração inicial de sedimento da relação de primeira ordem	1,0
SEDBR	Taxa de deposição de sedimento (dia ⁻¹)	0,01

Fonte: Adaptado de Cole e Wells (2013).

Enfim, após análise visual, as equações de número 1, 5 e 8 (apresentadas na tabela 10) foram as equações que apresentaram os melhores resultados na simulação. Diante disso, se escolheu a realização do EAM e REQM entre os valores simulados e os valores observados, para cada uma das equações, para a escolha da equação que represente a reaeração do reservatório com o menor erro possível.

Tabela 10 - Equação de reaeração para lagos em função do vento a 20°C.

#	Equação	Referência
1	$K_a = \frac{K_L}{H} = \frac{0,864 \cdot W}{H}$	Broecker et al. (1978 apud COLE e WELLS, 2013)
5	$K_a = \frac{K_L}{H} = \frac{D_{O_2}}{(200-60 \cdot W^{0,5}) \cdot 10^{-6} H}$	Chen e Kanwisher (1963 apud COLE e WELLS, 2013)
8	$K_a = \frac{K_L}{H} = \frac{0,64 + 0,128 \cdot W^{0,5}}{H}$	Smith (1978 apud COLE e WELLS, 2013)

D_{O_2} = difusão molecular do oxigênio (m² s⁻¹), K_L = velocidade de reaeração, W = vel. do vento (m s⁻¹)
 Fonte: Adaptado de Cole e Wells (2013).

Assim, a equação de número 1, de Broecker (1978 apud COLE e WELLS, 2013), apresentou um valor de EAM de 1,27 mg/L e de REQM de 0,49 mg/L. Em contra partida, a equação de número 5, de Chen e Kanwisher (1963 apud COLE e

WELLS, 2013), apresentou um valor de EAM de 1,36 mg/L e de REQM de 0,52 mg/L. E, por fim, a equação de número 8, de Smith (1978 apud COLE e WELLS, 2013), apresentou um EAM de 1,36 mg/L e um REQM de 0,51 mg/L.

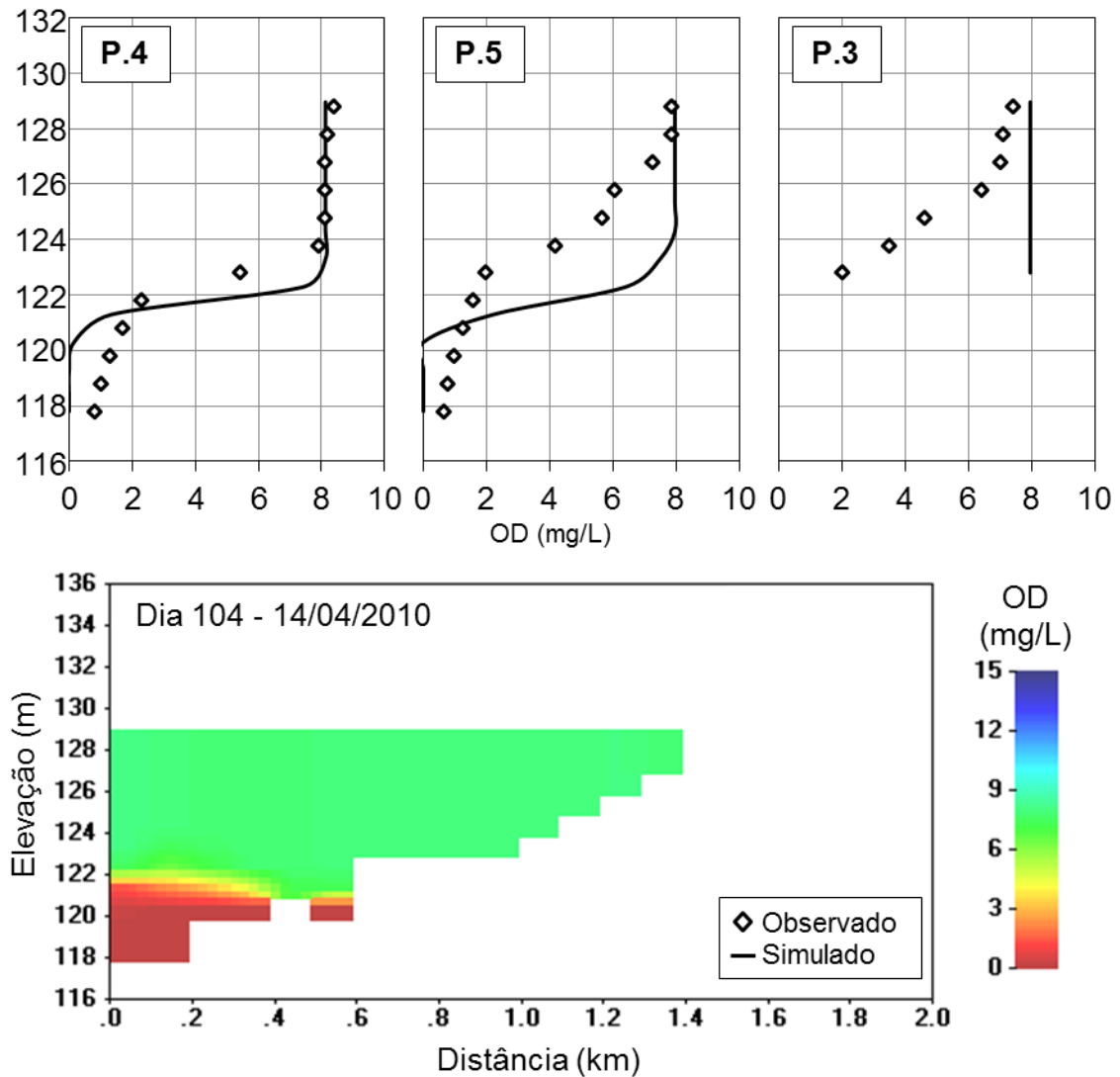
Portanto, a equação escolhida para a representação da reaeração nas simulações do reservatório do rio Vacacaí Mirim foi a equação número 1.

A partir disso, simularam-se os perfis de oxigênio dissolvido para o reservatório para os pontos P3, P4 e P5, de modo que os pontos P4 e P5 são os mais importantes do ponto de vista da qualidade da água, pois são os pontos mais a jusante do reservatório, e por isso, do ponto de vista da qualidade da água, os mais críticos. Devido às características de transição que o P3 representa, entre o rio Vacacaí Mirim e o reservatório do mesmo, por vezes não foi possível representar de maneira fiel o OD, pois o modelo foi calibrado para representar um reservatório.

Então, depois da calibração, a figura 17 mostra os perfis de oxigênio dissolvido para o reservatório nos pontos P3, P4 e P5 no dia 14 de abril de 2010. Essa data, que se situa no início do outono, mostra em conjunto com a figura 16, que o reservatório está saindo de uma estratificação, com valores baixos de temperatura na parte mais profunda e também valores baixos de oxigênio dissolvido.

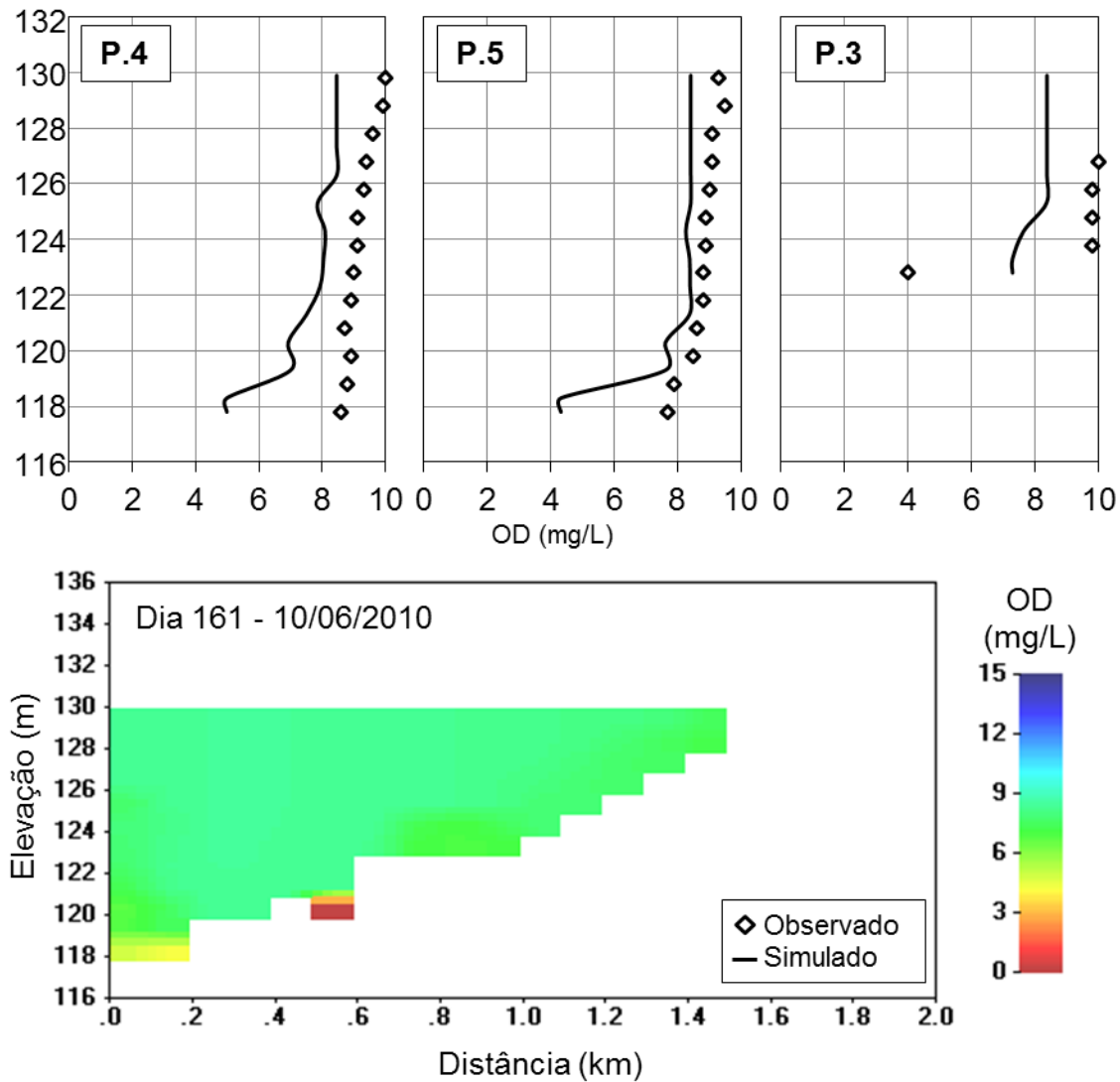
Na medida em que se sobe a elevação do reservatório, o oxigênio dissolvido aumenta, evidenciando o processo de estratificação do mesmo. Os resultados simulados apresentaram boa precisão em comparação com os valores observados, com um EAM e um REQM de 0,98 mg/L e 0,37 mg/L para o P4, para o P5 1,87 mg/L e 0,85 mg/L e para o P3 2,53 mg/L e 0,90 mg/L, respectivamente.

Figura 17 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



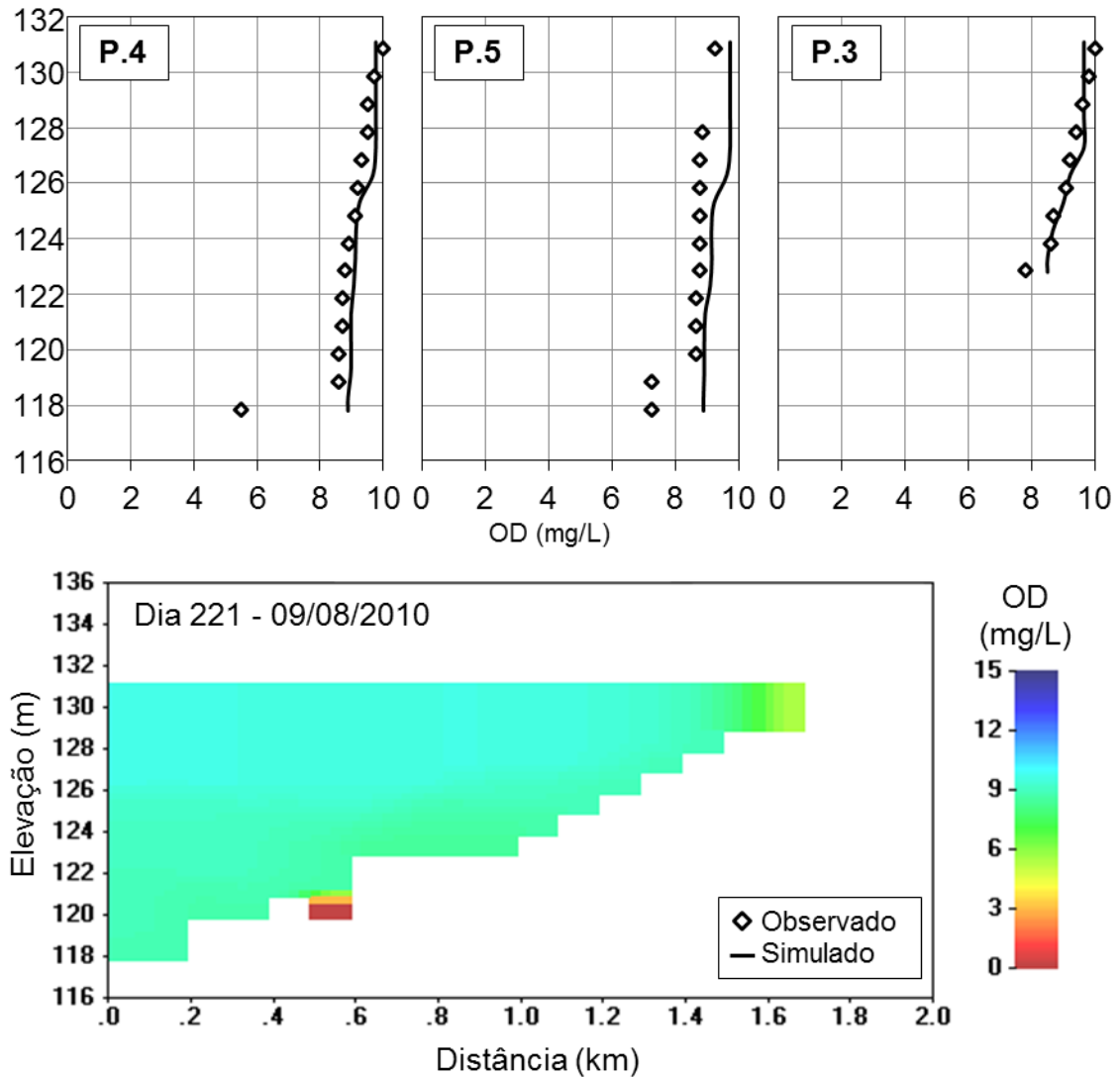
A figura 18 mostra os perfis de temperatura para o dia 10 de junho de 2010, no final do outono, e da mesma forma que a temperatura (figura 13), os valores de oxigênio dissolvido no reservatório começam a se uniformizar. Isso ocorreu devido a mudança climática, com o aumento das chuvas, a diminuição da temperatura, e portanto, a movimentação das águas do reservatório. Os resultados simulados, em comparação com os valores observados, apresentaram um EAM de 1,44 e uma REQM de 0,54 para o P4, para o P5 os valores do EAM e da REQM foram de 0,81 e de 0,32, por fim, o ERM e a REQM para P3 foram de 1,90 mg/L e de 0,67 mg/L.

Figura 18 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



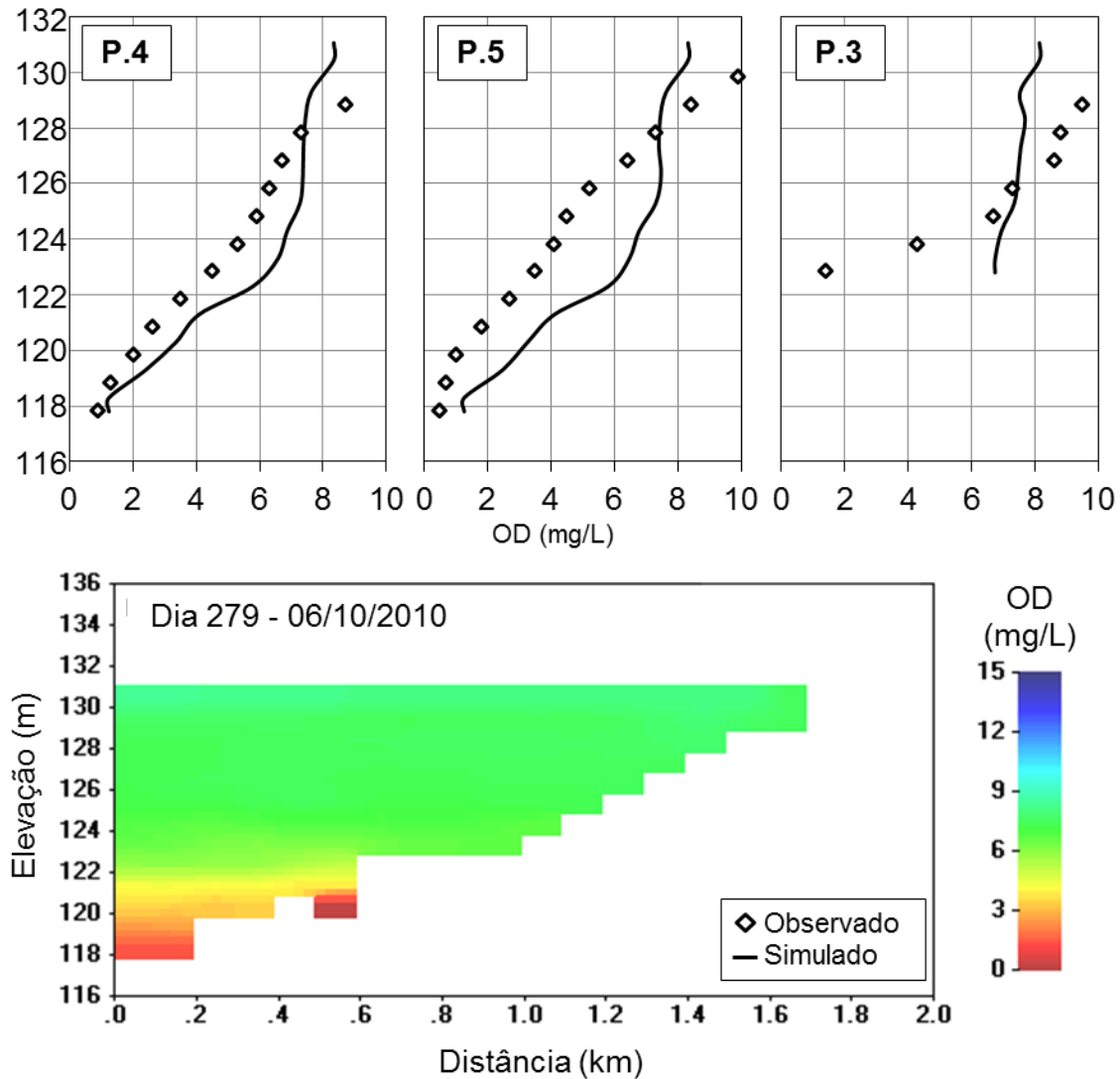
Em pleno inverno, a campanha do dia 221, em 09 de agosto de 2010, mostrado na figura 19, apresenta os perfis de OD para os pontos P3, P4 e P5. Os valores de OD foram bastante elevados, entre 8 e 10 mg/L, se aproximando e superando o valor de saturação de 8,90 mg/L (20°C e 130m de altitude). Novamente, o aumento das chuvas, devido às características da estação e também da temperatura do reservatório (figura 14), mostram que o reservatório acabou se desestratificando. Ao confrontar os resultados simulados com os valores observados, tem-se um EAM e uma REQM de 0,52 e 0,17 para P4, 1,07 e 0,35 para P5 e 0,28 mg/L e 0,09 mg/L para o P3, respectivamente.

Figura 19 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



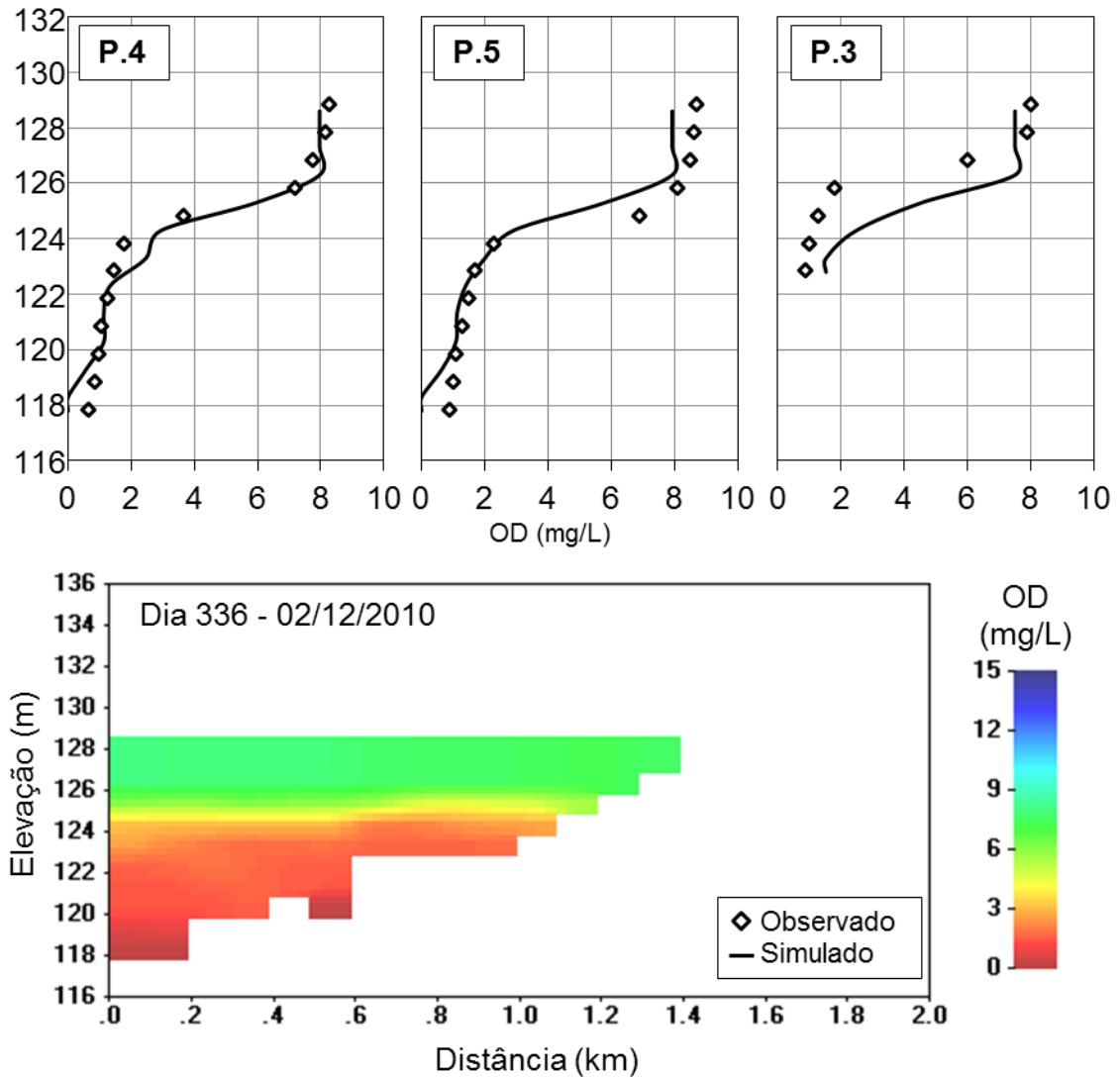
Para o dia 6 de outubro de 2010, mostrada na figura 20, os valores simulados assemelham-se aos observados, com pequena mediana. Para explicar a baixa precisão, não há precipitação acumulada nos sete dias que antecedem a coleta, porém, ao se averiguar um período de 20 dias precedentes a coleta, verifica-se valores próximos a 150 mm ao se acumular a precipitação. Assim, os valores observados na superfície apresentaram concentração superior a de saturação para o local, mas o simulado não. A precisão entre a simulação e os valores observados, para o P4 o EAM é de 1,09 e a REQM 0,44, o P5 tem um EAM de 1,55 e uma REQM de 0,68 e o P3 apresenta um EAM de 1,95 mg/L e um REQM de 0,72 mg/L.

Figura 20 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Para o dia 2 de dezembro de 2010, os resultados obtidos foram bons (figura 21). Para os pontos mais a jusante do reservatório, os valores simulados ficaram muito próximos dos valores observados, como pode ser notado pelos EAM de 0,59 e 0,48 mg/L e da REQM de 0,30 e 0,23 para P4 e P5 respectivamente. Para o P3, numa porção mais rasa do reservatório, obtiveram-se valores para o EAM e a REQM de 1,93 mg/L e 0,85 mg/L. É possível observar que a estratificação térmica está acentuada, com valores próximos a saturação do oxigênio dissolvido na superfície do reservatório e próximos a zero na parte mais profunda. Confirmando, assim, o que foi verificado na simulação da temperatura.

Figura 21 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de oxigênio dissolvido do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



Apesar de algumas variações, o resultado geral é satisfatório, mostrando que o modelo CE-QUAL-W2 pode ser utilizado neste reservatório não só para a simulação da concentração do OD, mas também, como visto anteriormente, da temperatura e das características hidrodinâmicas do mesmo. O resultado obtido nas simulações da concentração do oxigênio dissolvido para o reservatório do rio Vacacaí Mirim vai ao encontro com resultados encontrados na literatura.

Por exemplo, Deus et al. (2013) utilizaram o CE-QUAL-W2 e obtiveram uma variação sazonal do oxigênio dissolvido no reservatório bem simulado em comparação com dados de campo. A variação temporal dos perfis verticais de

concentração de OD segue um padrão muito semelhante ao resultado obtido para a temperatura.

Além disso, durante os primeiros meses do ano, a concentração de OD é relativamente uniforme em toda a coluna de água e do início de setembro em diante, é possível observar a variação da concentração de OD ao longo das alterações de coluna de água de maneira semelhante como a temperatura. Verificando, assim, que durante este período (setembro em diante) a temperatura da água é superior à superfície levando a estratificação térmica da coluna de água. A estratificação impede que o oxigênio da superfície chegue às camadas mais profundas, onde o consumo de oxigênio é intensificado pela mineralização da matéria orgânica depositada no fundo (DEUS et al., 2013).

Também utilizando o modelo CE-QUAL-W2 para a simulação da concentração do OD em reservatório, Yu et al. (2010) obtiveram resultados satisfatórios. A tendência sazonal da temperatura e do OD foi bem reproduzida pelo modelo, mostrando que os níveis de oxigênio dissolvido na superfície dependem fortemente da temperatura da água.

Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) confirmam que o modelo é capaz de prever os padrões espaço-temporais de temperatura, oxigênio dissolvido, entre outros parâmetros, com uma boa correlação entre os dados de simulação e de campo. Para tal, apresentam perfis de OD que sua forma e precisão ilustram a capacidade do modelo para reproduzir observações sob condições variáveis, confirmando com os valores da REQM variando entre 0,57 e 0,67 mg/L (OD) e o erro absoluto médio variando entre 0,43 e 0,51 mg/L.

Zhang et al. (2015) compararam a habilidade do modelo CE-QUAL-W2 em simular as interações dos sedimentos com os nutrientes e o oxigênio dissolvido com outros dois modelos similares. Para a simulação do oxigênio dissolvido, o modelo CE-QUAL-W2 apresentou um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,56, um erro percentual de -8,7% e um R^2 de 0,69.

5.1.5 Calibração do nitrogênio do reservatório

5.1.5.1. Amônia

Para a calibração da amônia, além dos valores ajustados para os outros parâmetros já calibrados, o modelo CE-QUAL-W2 permite o ajuste da amônia por meio da calibração de dois parâmetros. Segundo Cole e Wells (2013), os parâmetros são os mostrados na tabela 11 e valores de referência da literatura são mostrados na tabela 12.

Tabela 11 - Parâmetros para calibração da amônia no modelo CE-QUA-W2.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão
NH4REL	Taxa de ressuspensão de amônia dos sedimentos (fração de SOD)	0,0
NH4DK	Taxa de decaimento da amônia (dia ⁻¹)	0,1

Fonte: Cole e Wells (2013).

Tabela 12 - Valores de referência na literatura para a taxa de decaimento da amônia.

Local	NH4DK	Referência
Rio Grand, IL	0,80	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)
Lago Grasmere, UK	0,001 – 0,013	Hall (1982 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Truckee, NV	0,9 – 1,30	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Mohawk, NY	0,23 – 0,40	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Ohio	0,25	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Big Blue, NB	0,17 – 0,25	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)
Rio Flint, MI	0,76 – 0,95	Bansal (1976 apud COLE e WELLS, 2013)

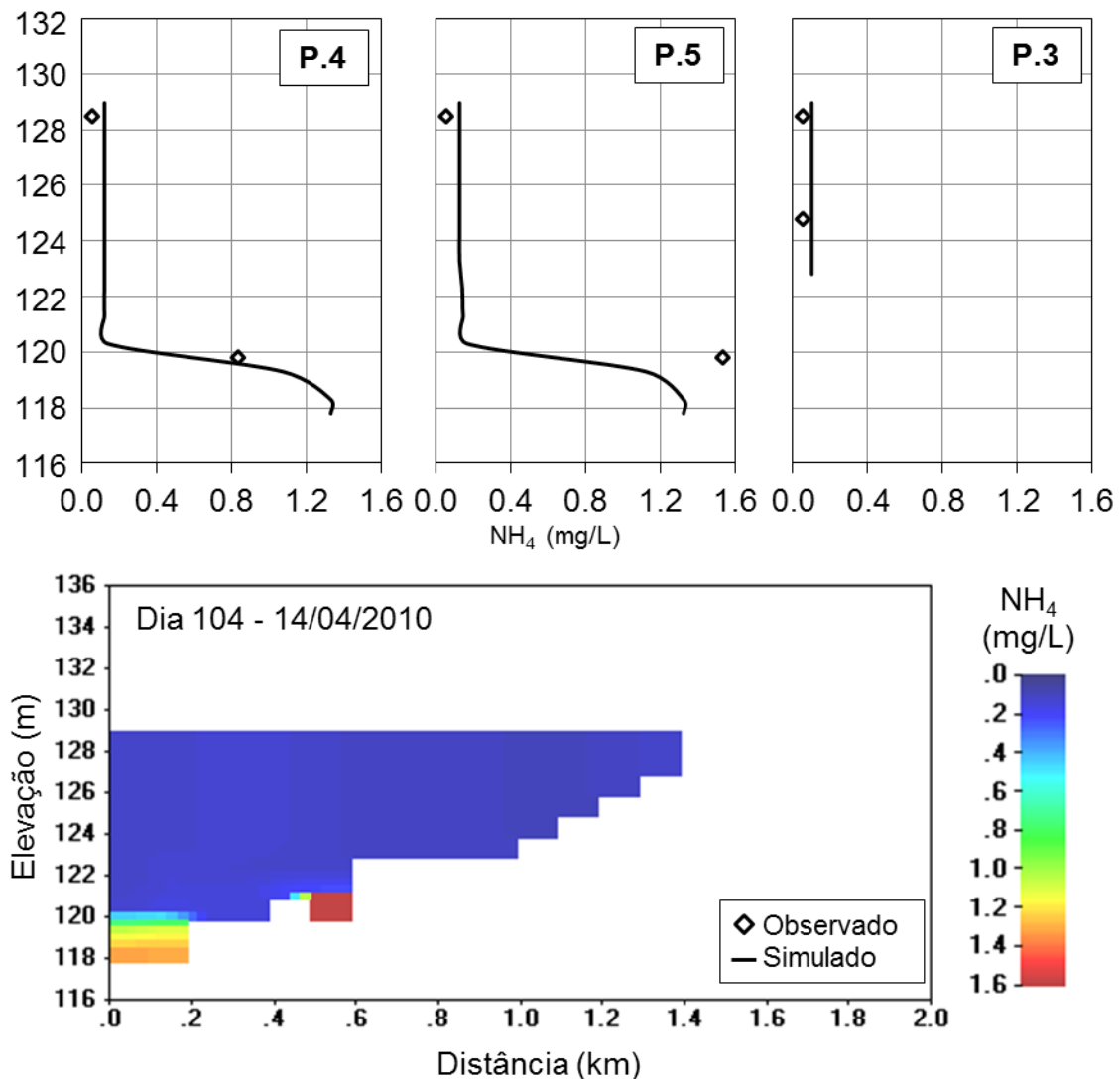
Fonte: Cole e Wells (2013).

Baseado nos valores de referência da literatura e nos resultados da calibração para o reservatório rio Vacacaí Mirim, os valores de NH4REL e NH4DK que melhor se ajustaram foram 0,17 e 0,15, respectivamente.

Assim, foram geradas as figuras de número 22, 23, 24, 25 e 26 que correspondem aos perfis de amônia no reservatório para os dias 104, 161, 221, 279 e 336.

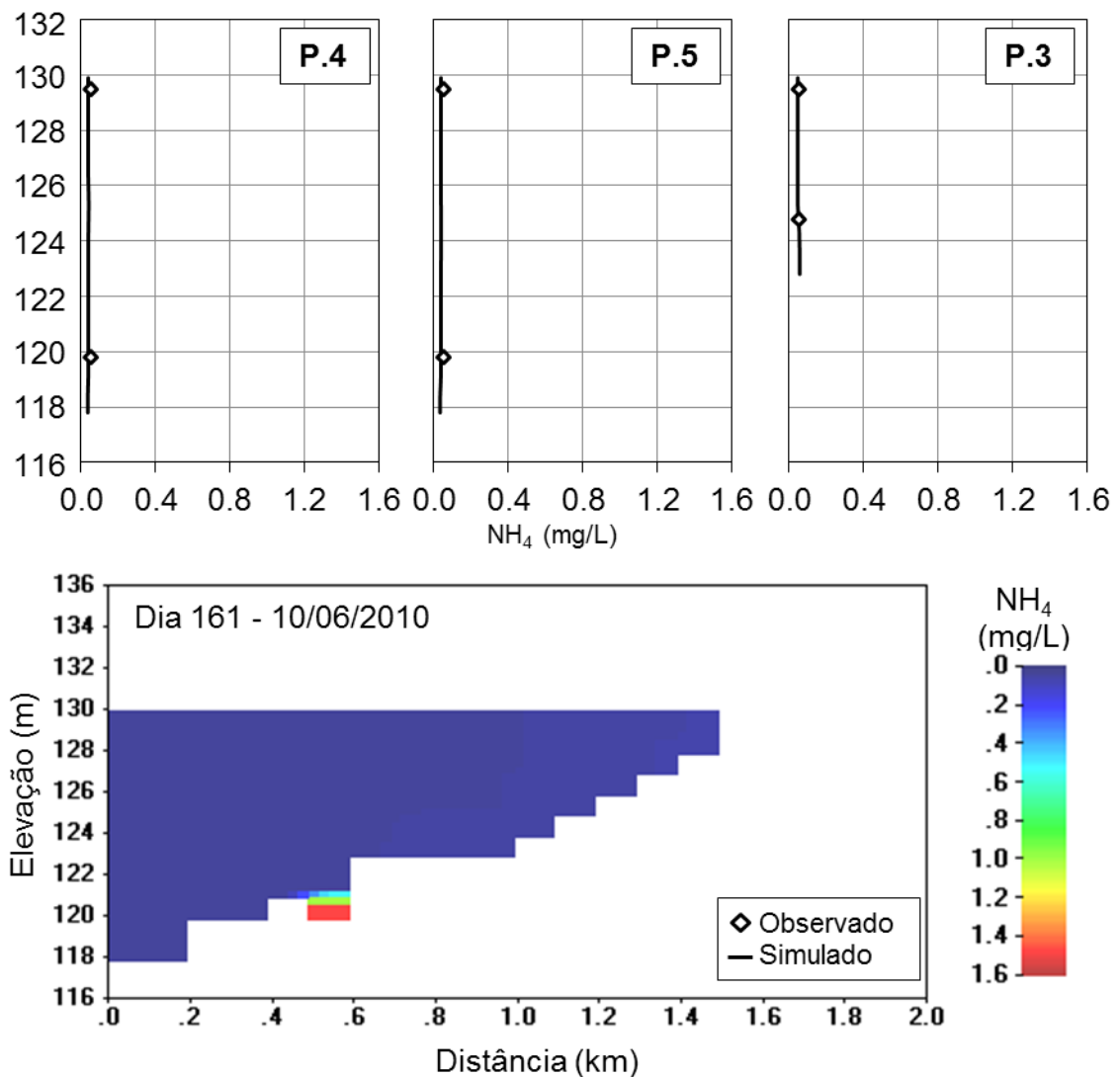
A figura 22 mostra o perfil simulado da amônia para os pontos P3, P4 e P5 para o dia 14 de abril de 2010. A representação da amônia para o dia 104 apresenta uma boa correspondência em comparação com os valores observados, o que é confirmado com os EAM e REQM de 0,16 e 0,22 para o P4, de 0,24 e 0,30 para o P5 e de 0,05 mg/L e 0,16 mg/L para o P3, respectivamente.

Figura 22 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



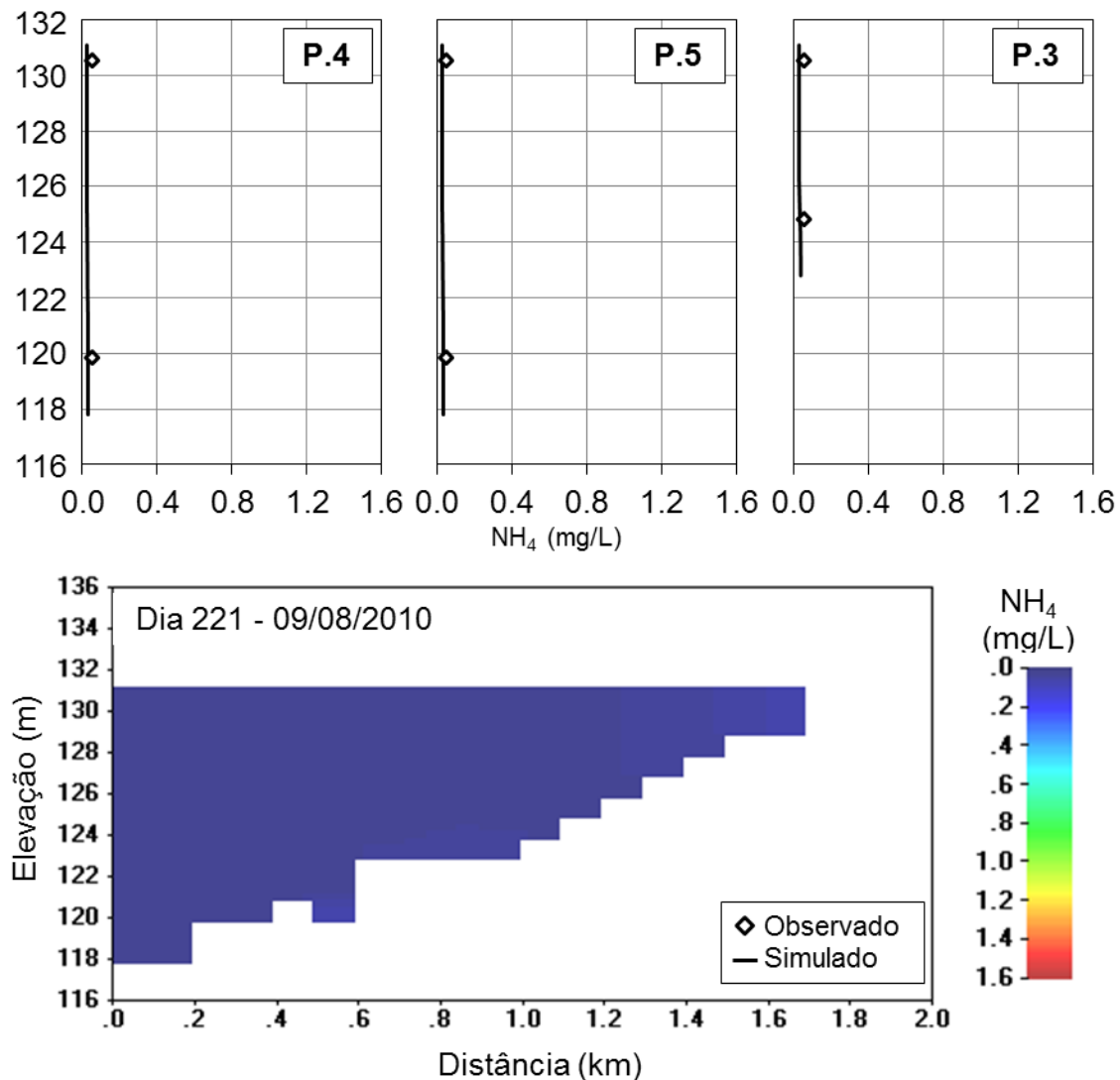
Após a alta concentração de amônia que continha no hipólímnio do reservatório na campanha do dia 14 de abril de 2010, os níveis foram diminuindo, chegando próximo ao zero para quase todos os pontos no reservatório, conforme a figura 23 mostra. Os valores simulados para a amônia na campanha do dia 161, equivalente ao dia 10/06/2010, foram próximos aos observados, o P4 apresentou EAM de 0,01 REQM de 0,06. Na mesma linha, o P5 apresentou EAM de 0,01 e REQM 0,06 e, por fim, para o P3 o EAM foi de 0,00 mg/L e REQM de 0,02 mg/L.

Figura 23 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



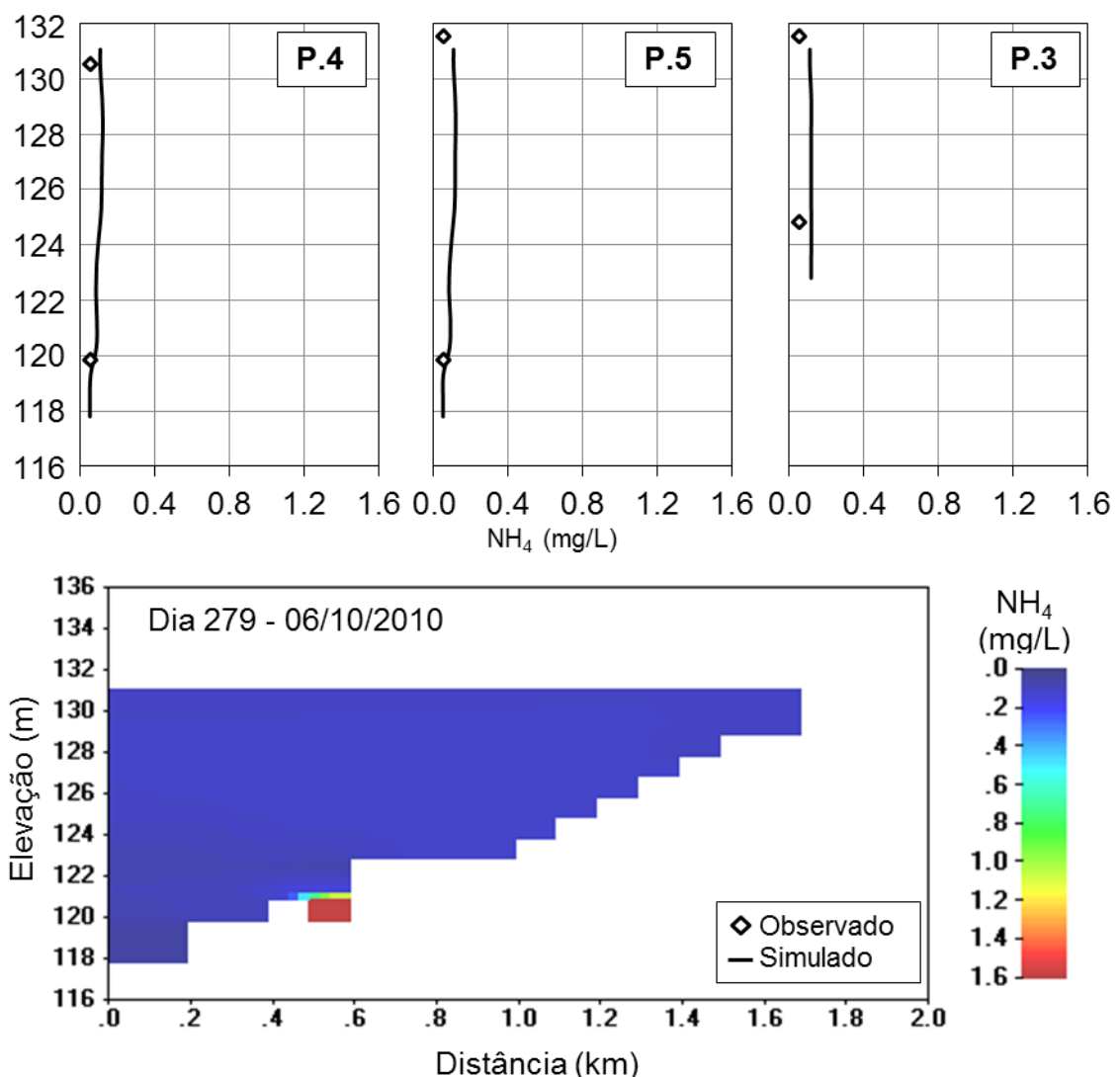
Seguindo a simulação da amônia, para o dia 09 de agosto de 2010 os valores do reservatório chegam muito próximos à zero, tanto nos valores observados como nos valores simulados, significando que está ocorrendo a nitrificação do reservatório. Todos os valores simulados da amônia foram iguais à zero, conforme a figura 24. Para o P4 o EAM foi de 0,02 e REQM foi de 0,14, para P5 foi de 0,02 e 0,14 e para o P3 foi de 0,02 mg/L e 0,14 mg/L.

Figura 24 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



Um pequeno aumento na amônia em todo o reservatório no dia 06 de outubro de 2010 pode ser notado ao analisar a figura 25. A simulação acompanhou o aumento que aconteceu com os valores observado e os valores do EAM para os pontos P4, P5 e P3 foram 0,03, 0,03 e 0,06 mg/L, respectivamente. Para a REQM, os valores foram de 0,09 para o P4, 0,09 para o P5 e 0,19 mg/L para o P3.

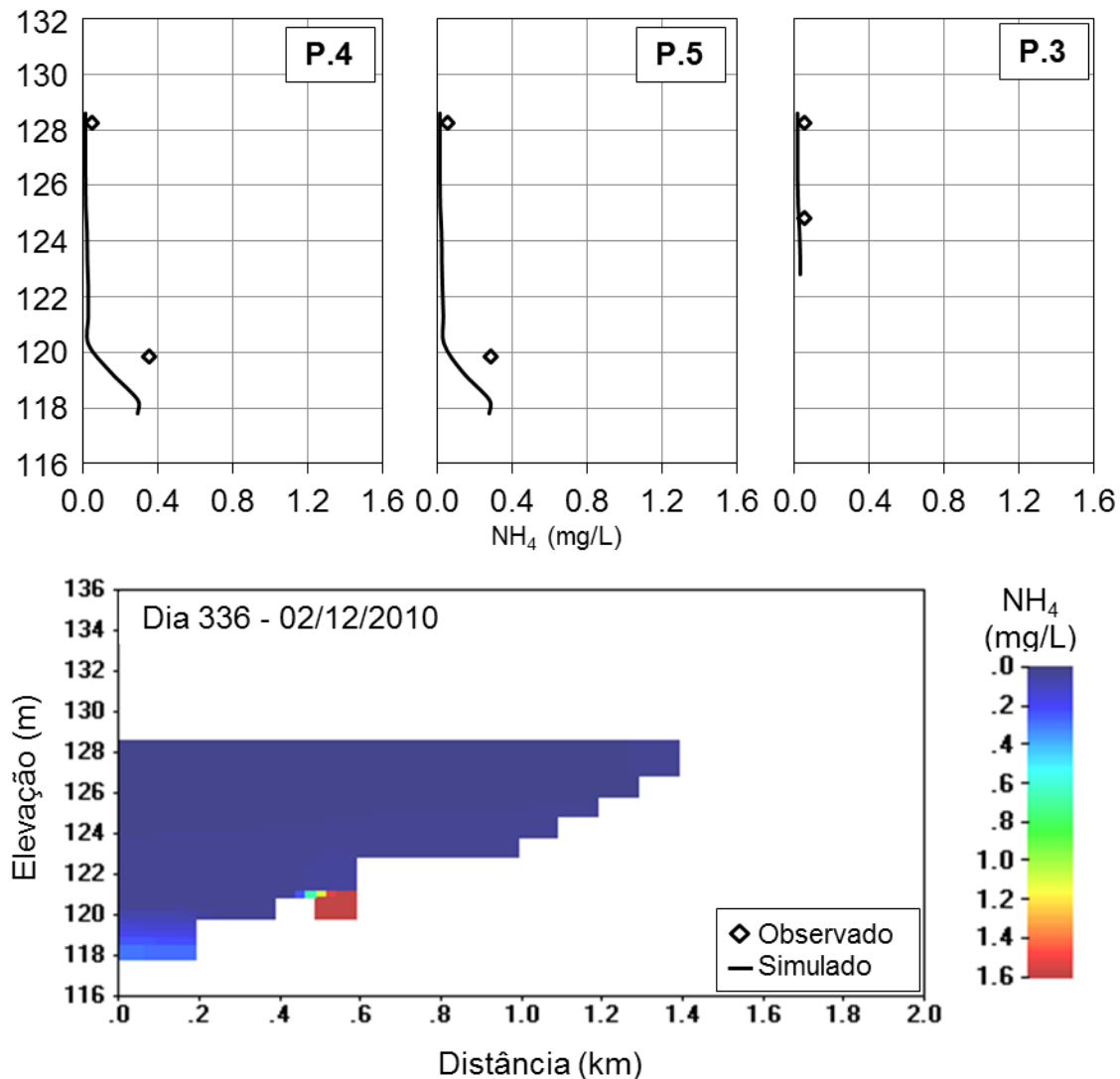
Figura 25 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 06 de junho de 2010.



Chegando no dia 336, em 02 de dezembro de 2010, com o aumento da temperatura, junto com o verão, tem-se novamente um aumento da amônia no hipolímnio, conforme o que aconteceu no início da simulação (no início do outono).

Os valores simulados para a amônia no reservatório foram próximos dos valores observados, onde o P4 obteve um EAM de 0,13 e uma REQM de 0,48, enquanto o P5 foi de EAM 0,09 e a REQM de 0,39, e por fim, o EAM do P3 foi de 0,03 mg/L e a REQM de 0,21 mg/L. Os perfis de amônia, mostrados na figura 26, indicam que os valores simulados foram próximos dos valores observados, acompanhando o aumento da amônia no hipolímnio.

Figura 26 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de amônia do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



Em suma, um EAM médio de aproximadamente 0,06 mg/L para as comparações entre as simulações e os valores observados de amônia e a REQM média para as mesmas simulações de aproximadamente 0,18 mg/L, o modelo se mostrou capaz de simular a amônia do reservatório de maneira satisfatória.

Além disso, os perfis em profundidade dos valores obtidos por Burin (2011) e os valores simulados pelo modelo mostraram uma similaridade, mostrando que o modelo é capaz de simular de maneira adequada valores de qualidade da água para a amônia em um reservatório, desde que já ajustado sua batimetria, suas características hidrodinâmicas e a temperatura.

Deus et al. (2013) consideraram um bom ajuste do modelo W2 ao reservatório do Rio Tucuruí quando encontraram valores de erro médio absoluto variando entre 0,0263 e 0,1320 (mg/L) e valores de REQM variando entre 0,03 e 0,15 (mg/L), para as médias anuais de variação entre 2007 e 2011. Desta forma, possibilitou a caracterização espacial do reservatório frente à carga de nutrientes que estava sendo incorporada pelo mesmo.

Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) calibraram o modelo W2 para o reservatório Sejnane (Tunísia), e obtiveram resultados semelhantes aos encontrados por Deus et al. (2013). A precisão da calibração da amônia resultou em valores de erro médio absoluto variando entre 0,01 e 0,08 (mg/L) e a REQM variou entre 0,02 a 0,10 (mg/L) para uma série de monitoramento entre 2002 e 2011.

Zhang et al. (2015) ao comparar o modelo W2 com outros dois modelos que simulam as interações entre os sedimentos, nutrientes e oxigênio dissolvido, obtiveram precisões de 0,67 para o coeficiente Nash-Sutcliffe, 6,4% no erro percentual e 0,75 no R^2 .

Liu et al (2015) utilizaram o modelo SWAT em conformidade com o modelo W2 para avaliar a retenção de nitrogênio na bacia do reservatório do rio Shamnei. O SWAT foi utilizado para a simulação hidrológica da bacia enquanto o CE-QUAL-W2 simulou a parte hidrodinâmica, térmica e as características de saída do reservatório. A precisão da simulação foi mensurada ao comparar os valores observados da superfície de elevação com os valores simulados, encontrando um EAM de 0,03 mg/L e a REQM de 0,04 mg/L, confirmando a aplicabilidade do modelo para a simulação de amônia no reservatório.

5.1.5.2. Nitrito e nitrato

O modelo CE-QUAL-W2, na versão 3.71 que é a versão utilizada para estas simulações, utiliza o nitrito e nitrato somados no mesmo compartimento. Desta forma, este compartimento representa as taxas de desnitrificação na coluna d'água e da coluna d'água para os sedimentos (COLE e WELLS, 2013).

Para tal, o modelo utiliza três parâmetros calibráveis que são mostrados na tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros calibráveis do nitrito e nitrato e seus valores padrões para o modelo CE-QUAL-W2.

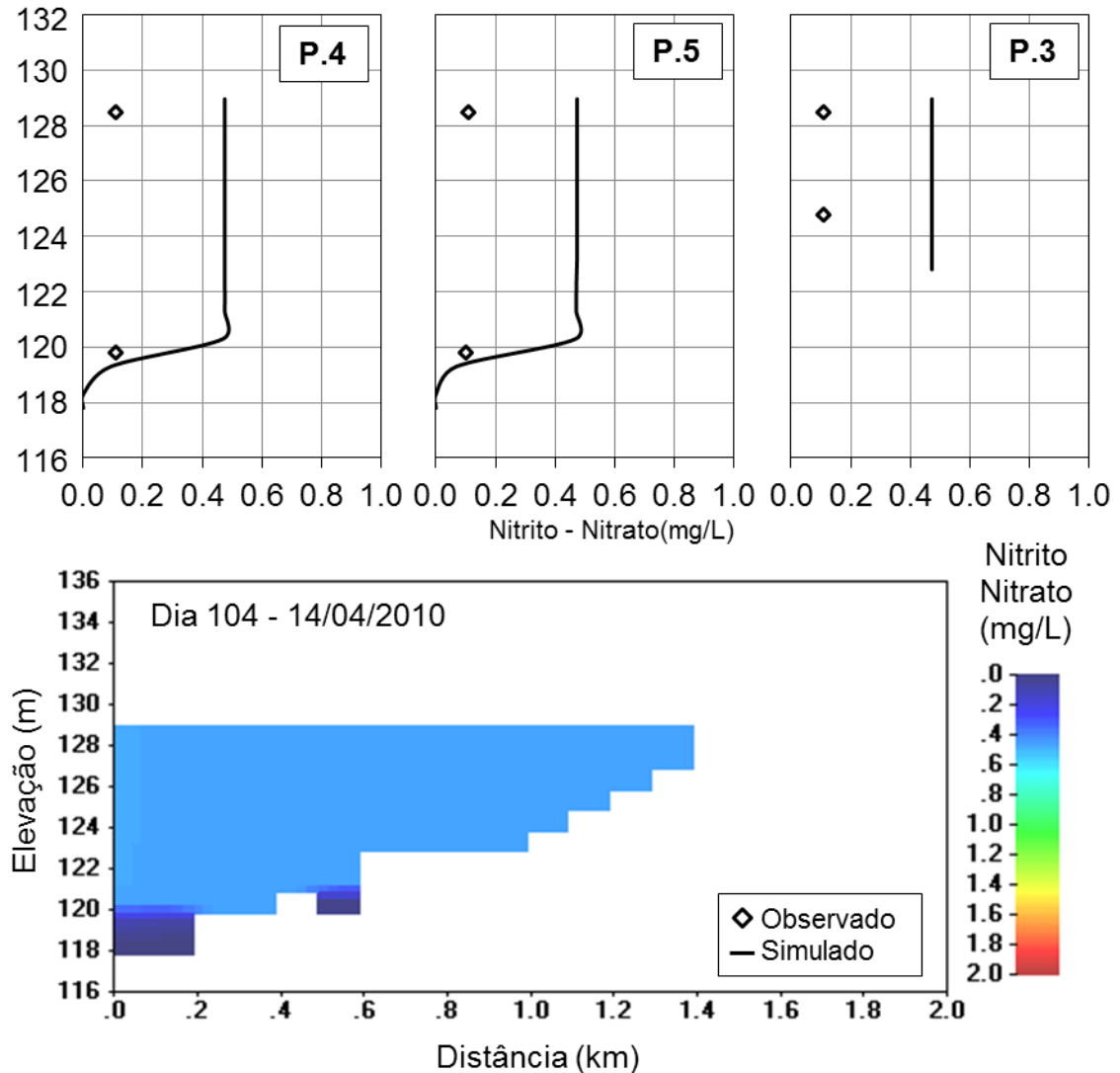
Parâmetro	Descrição	Valor Padrão
NO3DK	Taxa de decaimento do nitrito (dia^{-1})	0,03
NO3S	Taxa de desnitrificação dos sedimentos, em ($\text{m}\cdot\text{dia}^{-1}$)	0,001
FNO3SED	Fração de $\text{NO}_3\text{-N}$ difundida nos sedimentos que se torna N orgânico (o resto é desnitrificado)	0,00

Fonte: Cole e Wells (2013).

Os parâmetros da calibração foram $0,50 \text{ dia}^{-1}$ para NO3DK, $0,001 \text{ m dia}^{-1}$ para NO3S, e 0 para FNO3SED.

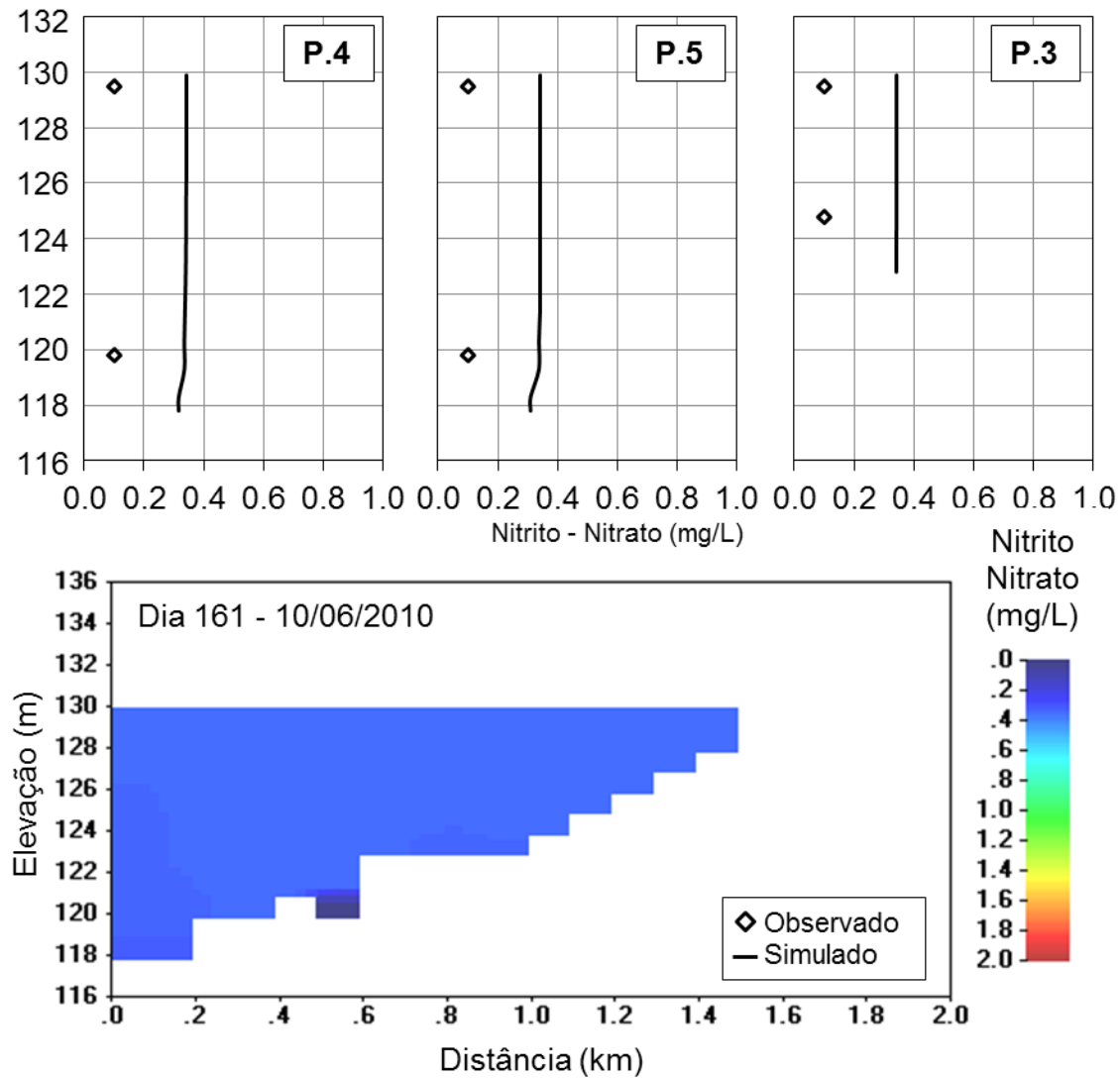
A calibração do nitrito-nitrato para o reservatório do Vacacaí Mirim começou no dia 104, em 14 de abril de 2010 e é mostrada na figura 27. Os valores simulados obtidos foram bem próximos aos valores observados por Burin (2011), conforme o EAM e a REQM a seguir. Para o P4 o EAM foi de 0,36 e REQM de 0,53, para o P5 obteve-se 0,37 e 0,53, e para P3 0,36 mg/L e 0,53 mg/L.

Figura 27 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



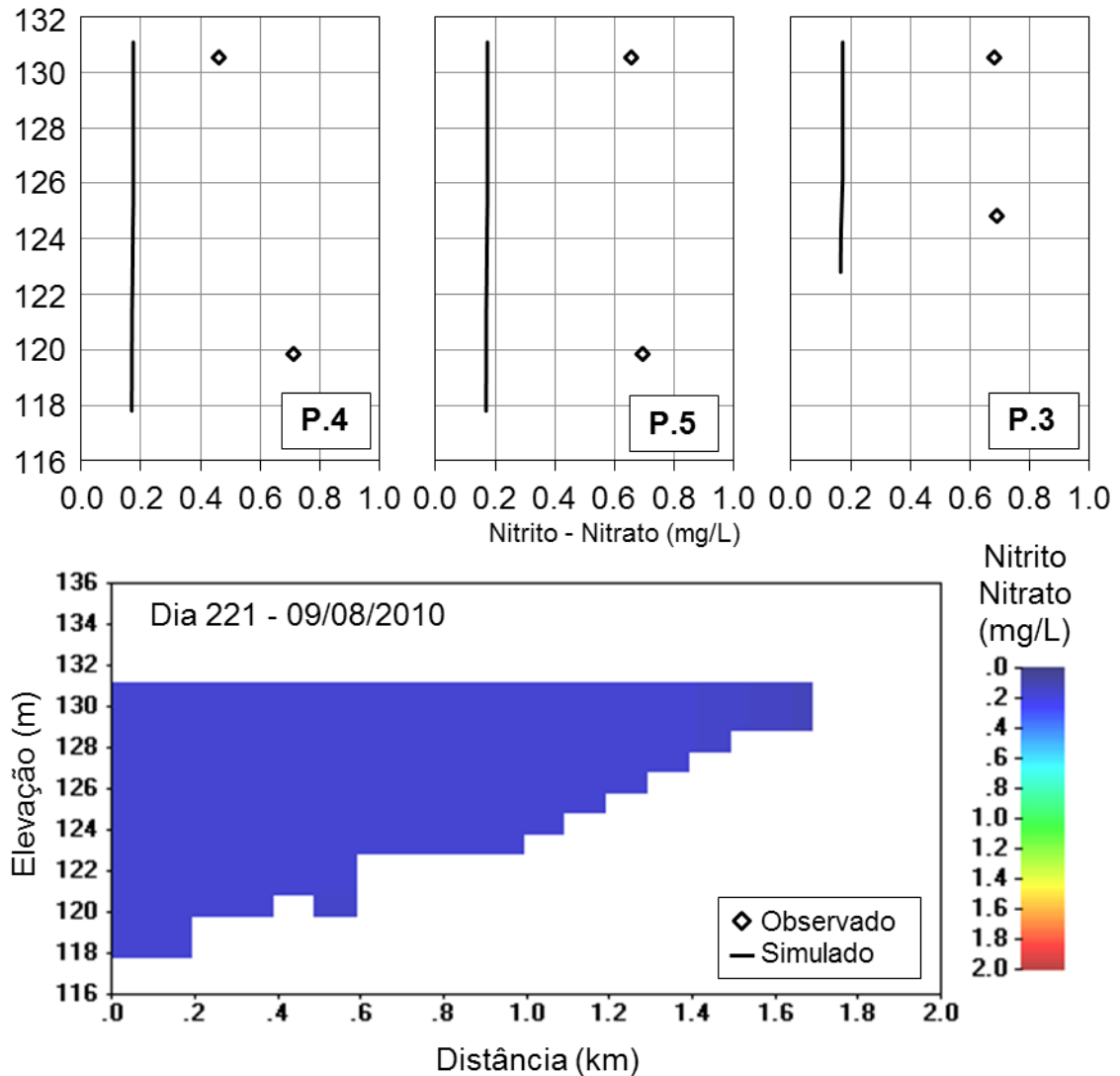
Avançando, no dia 161, representado pela data 10 de junho de 2010, os valores simulados para nitrito e nitrato continuaram próximos dos valores observados. A figura 28 mostra os perfis em coluna para os pontos observados e também o perfil longitudinal de nitrito-nitrato para o reservatório. A precisão da simulação foi medida com um EAM de 0,24 e REQM de 0,41 para o P4, EAM de 0,24 e REQM de 0,41 para P5 e EAM de 0,24 mg/L e REQM de 0,28 mg/L para o P3.

Figura 28 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



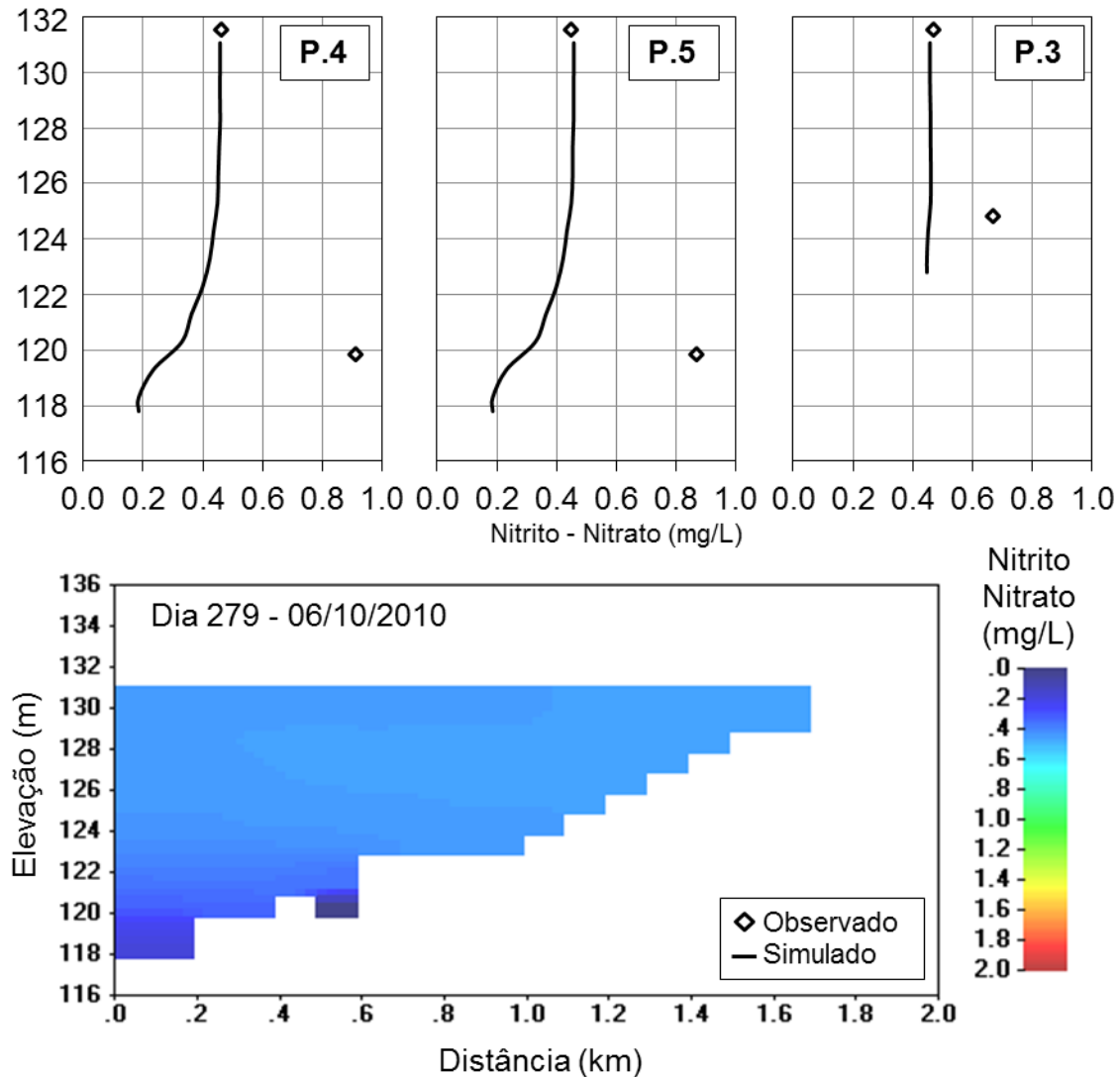
Para o dia 221, equivalente a 09 de agosto de 2010, a calibração não se mostrou adequada. Isso pode ser notado na figura 29, onde os perfis simulados de nitrito-nitrato não acompanharam os valores observados. Da mesma forma que a amônia (figura 24), os valores calculados foram zero, sendo assim os valores do EAM foram bastante altos, variando entre 0,41 e 0,51 mg/L. Semelhantemente, a REQM os valores para o P4, P5 e P3 foram de 1,00, 1,23 e 1,25 mg/L, respectivamente.

Figura 29 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



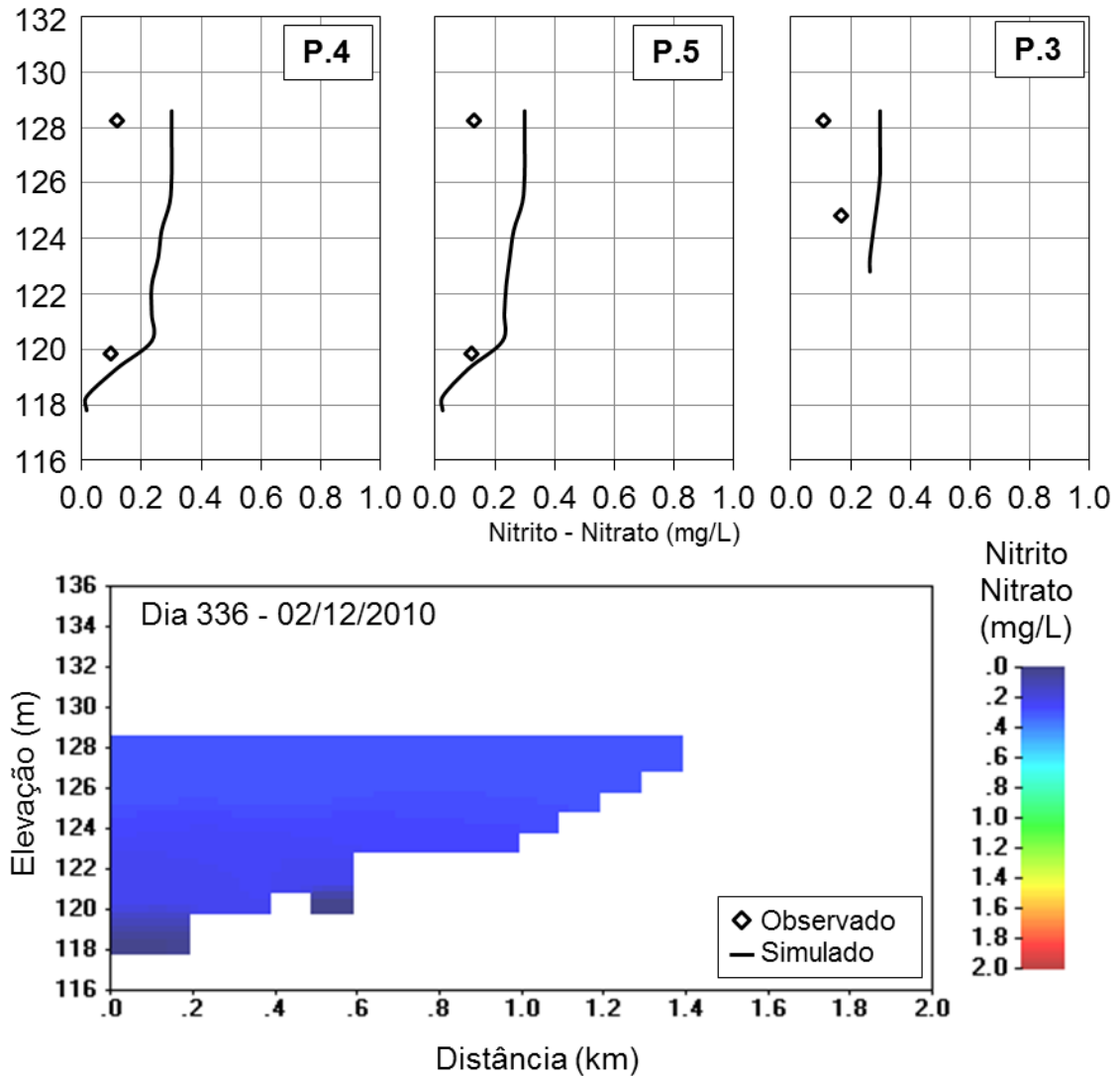
Seguindo a simulação, no dia 06 de outubro de 2010 (dia 279) a calibração se mostrou mais precisa, porém, ao contrário do dia 221, os valores simulados se aproximam dos valores observados, principalmente na superfície, conforme pode ser analisado na figura 30. Apesar dos valores da superfície estarem relativamente bons, ao descer em profundidade nos perfis, os valores simulados se afastam dos observados, essa imprecisão é notada ao se analisar os EAM, que foram de 0,29 para P4, de 0,27 para o P5 e de 0,11 mg/L para P3. Ainda, a REQM para o P4 foi de 0,51, para P5 de 0,48 e para P3 de 0,16 mg/L.

Figura 30 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Por fim, para o último dia simulado, 02 de dezembro de 2010 (dia 336), os valores calculados voltaram a apresentar bom resultado em comparação com os valores observados, conforme pode ser visto na figura 31. Os perfis mostrados na figura mostram que a precisão da calibração para o dia 336 bem próximo do esperado, da mesma forma que aconteceu com a amônia (figura 26). Os valores do EAM para os pontos P4, P5 e P3 foram de 0,10, 0,09 e 0,15 mg/L, respectivamente, enquanto os valores da REQM para os mesmos pontos foram de 0,19, 0,17 e 0,27 mg/L.

Figura 31 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de nitrito/nitrato do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



Excetuando o dia 336, a simulação do nitrito/nitrato não teve uma boa precisão, ora a simulação estava com valores superiores aos observados, ora com valores inferiores. A princípio, essa variação não era esperada, uma vez que a simulação da amônia se mostrou bastante acertada. Uma possível explicação: por ser um compartimento que considere as duas formas de nitrogênio juntas e os dados de qualidade foram obtidos em separados, o modelo não tenha conseguido retratar de maneira adequada os processos de nitrificação e desnitrificação.

Para dar um maior embasamento, valores encontrados na literatura, como os de Deus et al. (2013) mostram que é possível utilizar o modelo W2 para a simulação de nitrito/nitrato. Isso é possível, pois os valores de erro médio absoluto obtidos para a simulação de nitrito/nitrato variaram entre 1,03 a 1,38 mg/L e a REQM variou de 1,28 a 2,10 mg/L.

Diogo et al. (2008) utilizaram o modelo W2 para simular cenários de diminuição da carga de nutrientes no reservatório do rio Guadiana, na parte portuguesa da Península Ibérica. Apesar de não apresentar a precisão da calibração na publicação, os resultados gráficos mostram uma boa precisão ao comparar os valores simulados com os valores observados, confirmando a aplicabilidade do modelo para simulações de nitrito e nitrato, inclusive para períodos longos (966 dias de simulação).

Zhang et al. (2015) ao utilizarem o modelo CE-QUAL-W2, obtiveram uma precisão na simulação, em comparação do resultado observado com o calculado, de 0,91 para o coeficiente Nash-Sutcliffe, de -6,2% no erro percentual e de 0,93 no R^2 .

Liu et al. (2015), ao avaliarem a retenção de nitrogênio no reservatório do rio Shanmei, utilizaram o modelo CE-QUAL-W2 para as simulações. Com relação a precisão do modelo, os resultados da simulação para nitrito/nitrato em comparação com os resultados observados foram de 0,38 mg/L para o EAM e 0,56 mg/L para a REQM. Os autores confirmam o sucesso da utilização do modelo CE-QUAL-W2 para a simulação dos nutrientes no reservatório em estudo.

5.1.6 Calibração do fósforo do reservatório

5.1.6.1. Fosfato

O fosfato é referenciado no modelo como fósforo (P) e além dos parâmetros calibráveis, que são mostrados na tabela 14, também conta com outros parâmetros e relações estequiométricas que consideram as interações que ocorrem do nutriente com as algas, macrófitas, zooplâncton, entre outros.

Tabela 14 - Parâmetros calibráveis para o fosfato no modelo CE-QUAL-W2.

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão
PO4R	Taxa de liberação de sedimentos (fração de SOD em g/m ² /dia)	0,001
PARTP	Coefficiente de particionamento do fosfato em sólidos suspensos	0,0

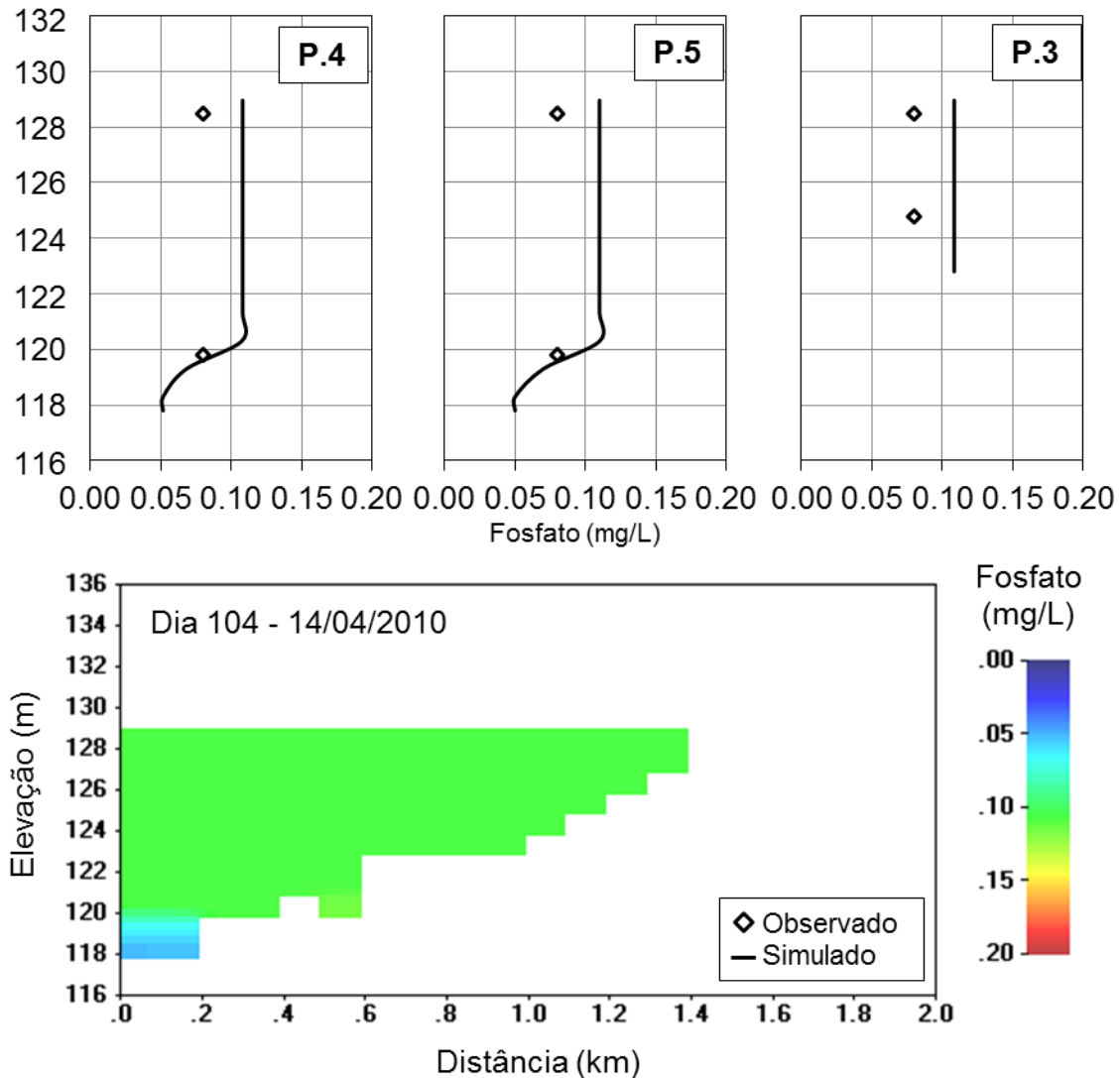
Fonte: Cole e Wells (2013).

Valores de referência da literatura trazidos no manual por Cole e Wells (2013) variam entre 0,57 até 21 mg/m²/dia do valor de PO4R. Entretanto, para o valor de PARTP, o manual recomenda que não se utilize valor diferente de zero. Pois, da maneira como as equações estão dispostas na atual versão do modelo, a não ser que se tenha conhecimento de fração de fósforo sendo absorvida por sólidos suspensos inorgânicos, não se deve alterar este valor.

Com base nisso, para este reservatório, os valores mais adequados obtidos na calibração foram 0,0005 g/m²/dia para o PO4R e 0,0001 para o PARTP. A precisão da calibração pode ser verificada nas figuras 32 a 36.

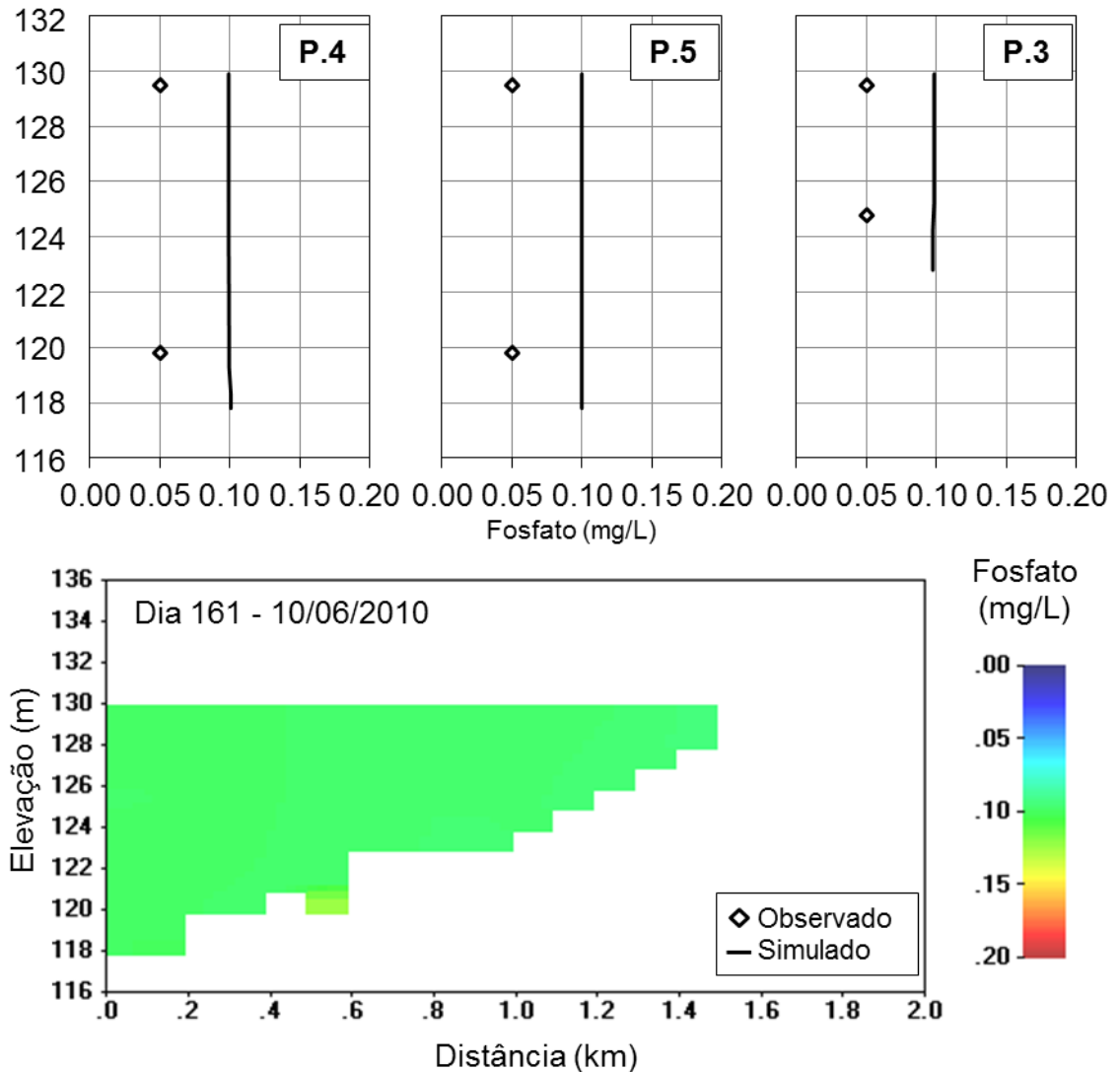
A figura 32 mostra o resultado das simulações para o fosfato no dia 14 de abril de 2010. A simulação apresenta resultados satisfatórios, apesar dos valores elevados na superfície nos pontos P4 e P5 que é registrado na simulação, porém não nos valores observados. O EAM para a simulação do dia 104 foi de 0,03 para P5, 0,03 para o P4 e 0,03 mg/L para o P3, enquanto a REQM foi de 0,09, 0,08 e 0,09 para os pontos citados anteriormente.

Figura 32 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



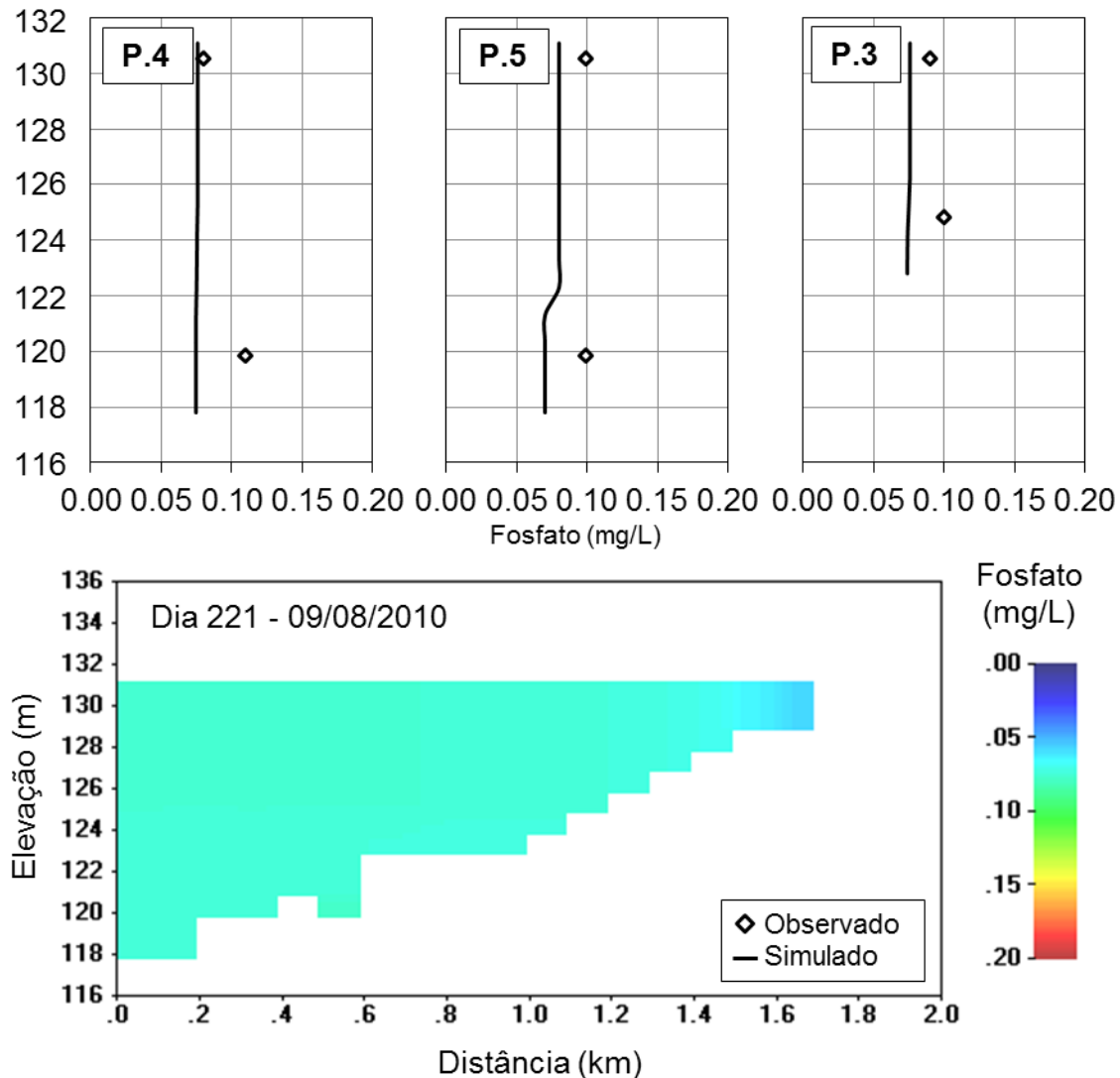
Para a simulação do dia 10 de junho, mostrada na figura 33, verifica-se uma leve diminuição da concentração do fosfato. Também se registra um pequeno distanciamento entre os valores simulados e os valores calculados conforme os valores dos erros, em comparação com a simulação da campanha anterior. Para o P5 o EAM foi de 0,05 e a REQM 0,16, para o P4 foram 0,05 e REQM de 0,19 e para o P3 os valores ficaram em 0,05 mg/L e 0,15 mg/L.

Figura 33 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



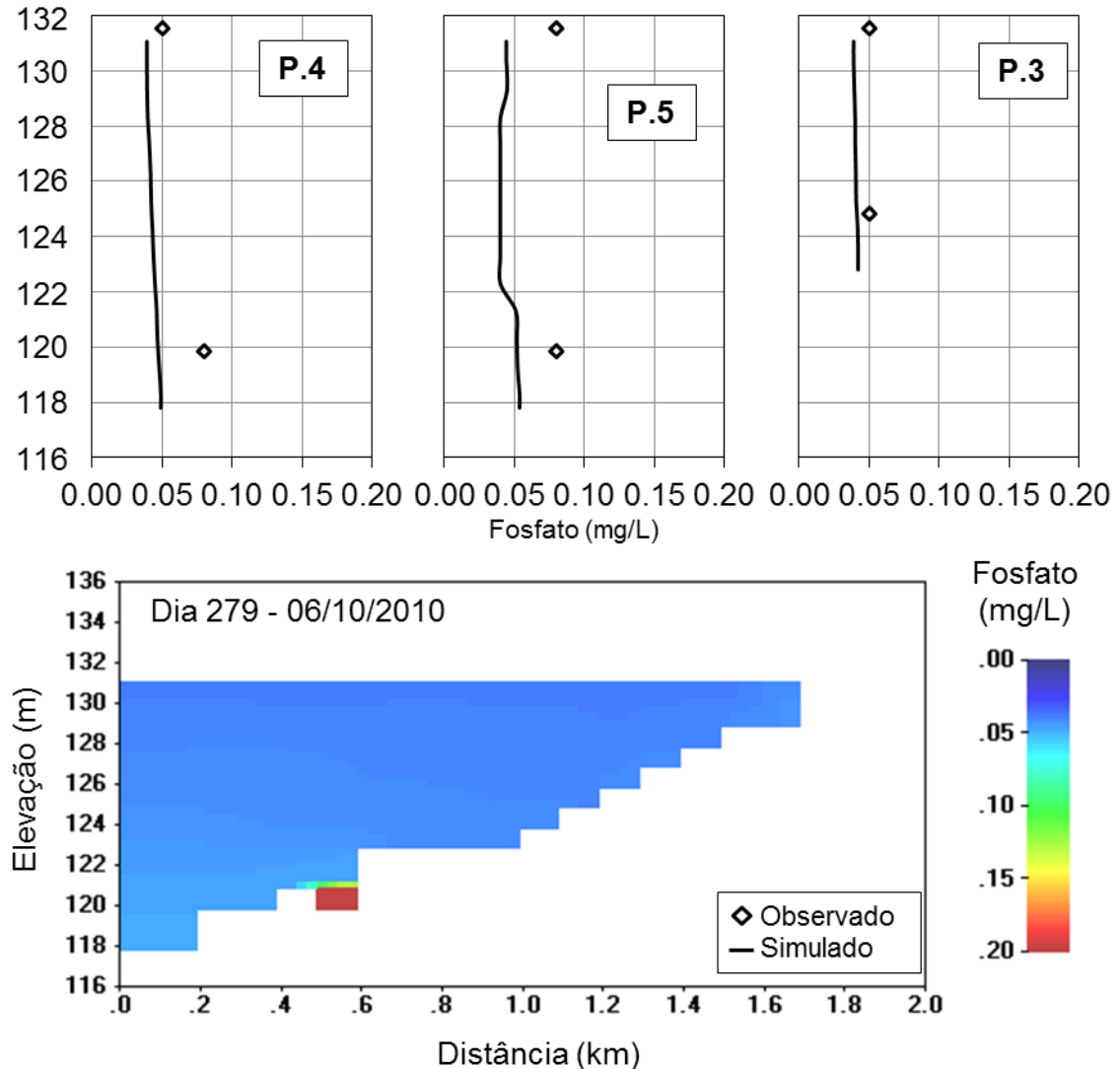
A simulação para a data 09 de agosto de 2010 se mostrou mais ajustada que nos dias anteriores, sendo os valores em superfície bem próximos aos observados, como pode ser verificado na figura 34. Os perfis simulados de fosfato apresentaram valores menores do que valores observados. O EAM e a REQM para o P5 foram de 0,03 e 0,09, para P4 foram de 0,02 e 0,07 e para o P3 foram de 0,02 mg/L e de 0,07 mg/L.

Figura 34 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



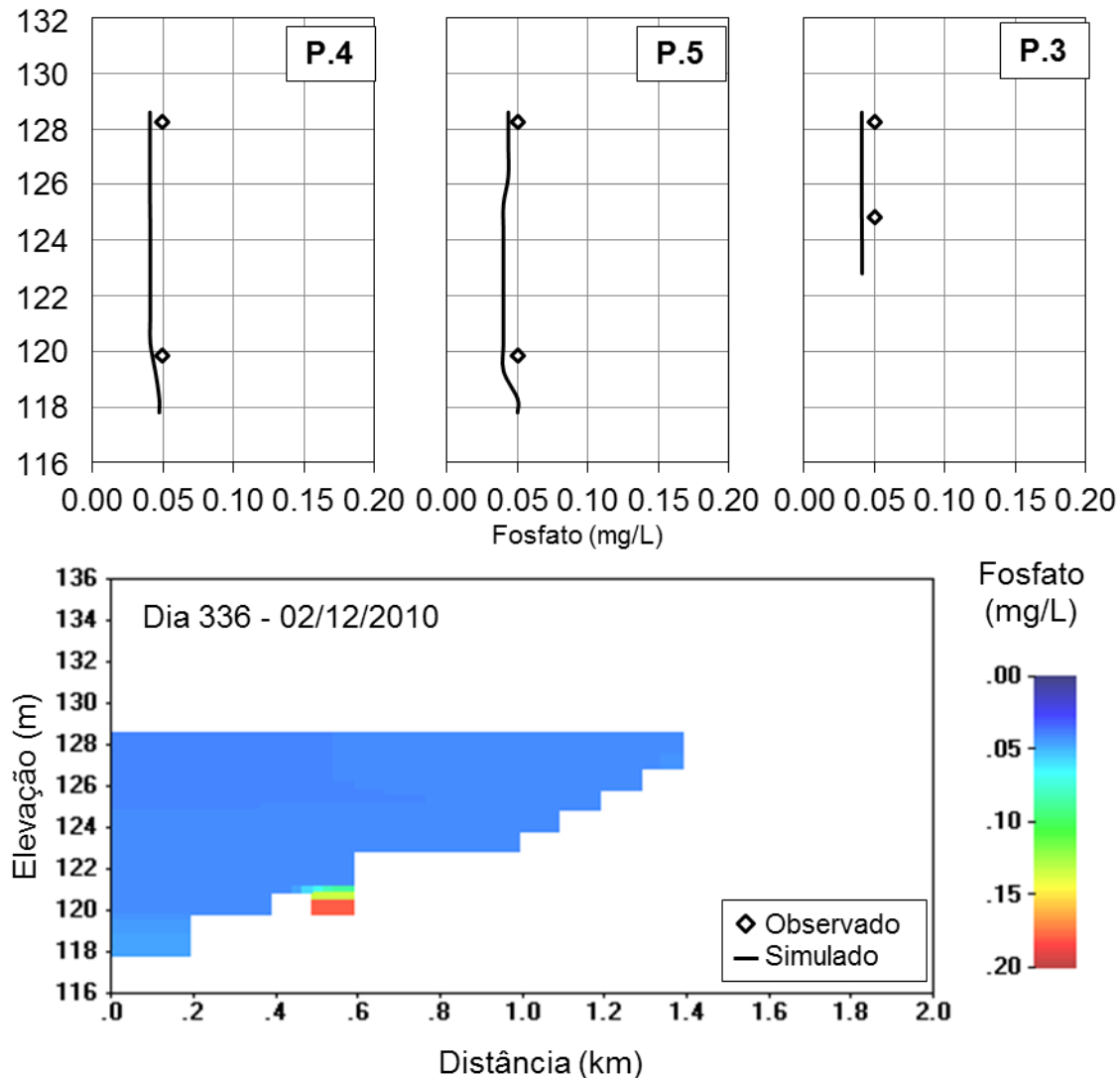
Para o dia 06 de outubro de 2010 (mostrada na figura 35), a simulação apresenta melhoras, com o P3 simulado muito próximo dos valores observados, porém os valores observados continuam mais elevados que os valores simulados. O EAM dos pontos P5, P4 e P3 foram 0,03, 0,02 e 0,01 mg/L, respectivamente, enquanto a REQM foram de 0,15, 0,10 e 0,05 mg/L, respectivamente.

Figura 35 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Por fim, a simulação para o dia 02 de dezembro de 2010, mostrada na figura 36, apresenta-se adequada, reafirmando o acontecido nas primeiras campanhas, onde o perfil simulado do fosfato para P3, P4 e P5 foram ao encontro do perfil observado. Para avaliar a precisão da calibração, os valores de EAM e REQM para o P5 foram de 0,01 e 0,04; para o P4 foram de 0,01 e 0,04 e para P3 foram de 0,01 mg/L e de 0,04 mg/L.

Figura 36 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fosfato do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



As simulações de fosfato para o reservatório do Vacacaí Mirim, utilizando o modelo CE-QUAL-W2 foram satisfatórias. Inclusive para o problemático dia 221, as simulações foram precisas, com valores de EAM numa faixa de 0,01 até 0,05 mg/L, sendo 0,03 mg/L o valor médio. Da mesma forma, com a REQM, valores variaram entre 0,04 até 0,15 mg/L, sendo o valor médio 0,09 mg/L.

Diogo et al. (2008) avaliaram a qualidade da água ao se reduzir a entrada de nutrientes no reservatório do rio Guadiana. Como o modelo já havia sido confirmado a aplicabilidade do mesmo, o autor não reproduziu a precisão das simulações. Apesar disso, é possível notar pelos gráficos apresentados que o modelo consegue simular com sucesso as variações do fosfato no reservatório.

Deus et al. (2013), ao utilizarem o modelo W2 para a avaliação do impacto da piscicultura na qualidade da água do rio Tucuruí, obtiveram valores muito bons para a simulação, uma vez que o EAM variou entre 0,0012 a 0,0038 mg/L e a REQM de 0,0017 até 0,0048 mg/L para o fosfato.

A utilização do modelo CE-QUAL-W2 por Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) para a modelagem da qualidade da água em um reservatório estratificado (Tunísia) se mostrou adequada. Pois, a precisão da simulação em termos de fosfato variou de 0,002 a 0,006 mg/L no EAM e 0,004 a 0,010 mg/L na REQM, confirmando a capacidade do modelo em simular o fosfato.

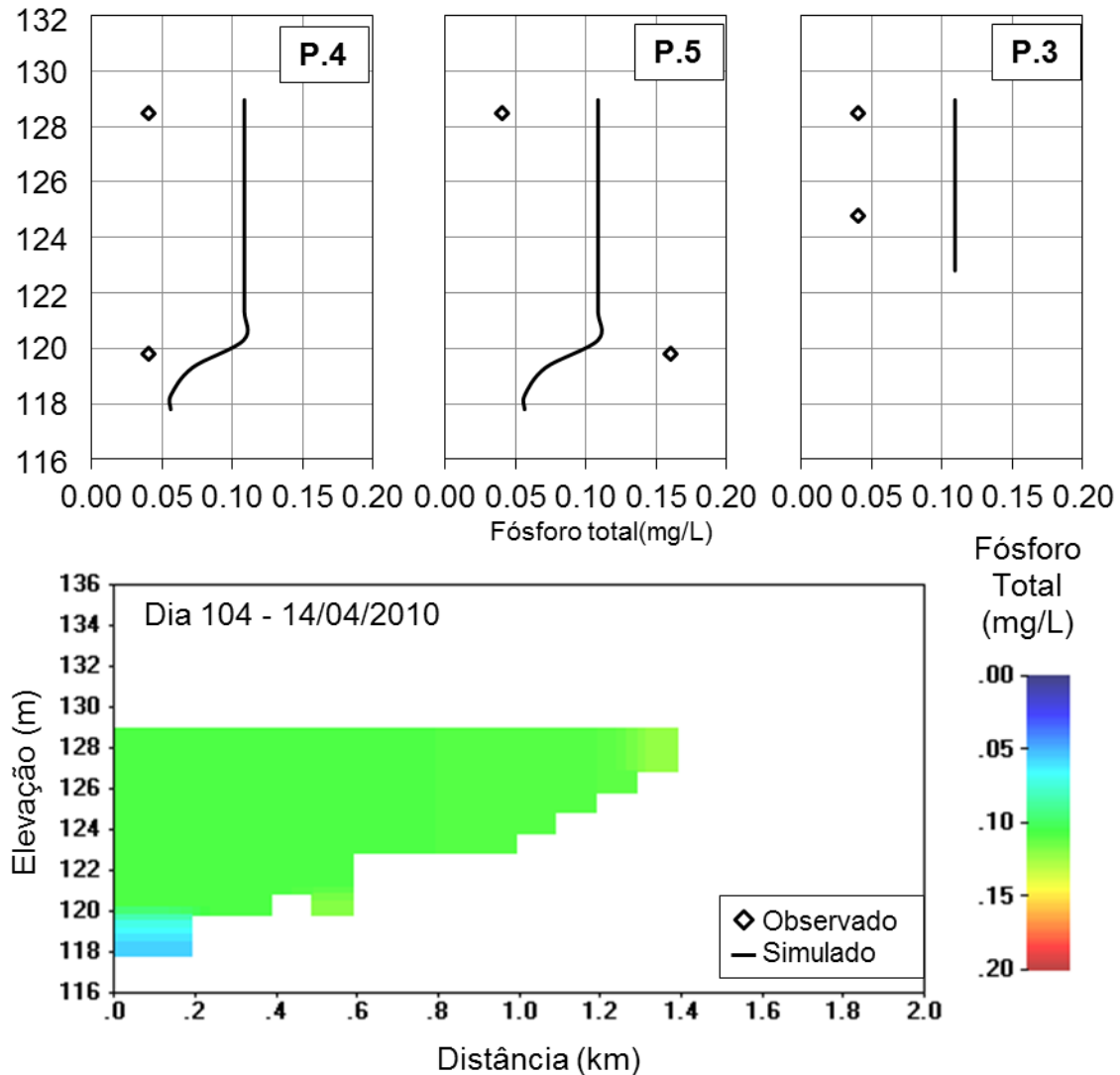
Zhang et al. (2015) avaliaram a integração entre a demanda bentônica do rio Minnesota. Os resultados obtidos pelos pesquisadores foram considerados bons, pois o R^2 para o fosfato foi de 0,75 mg/L, o coeficiente de Nash-Sutcliffe foi de 0,62 mg/L e o erro percentual de 25,6%.

5.1.6.2. Fósforo total

No modelo W2, o fósforo total também é um constituinte derivativo. Sendo assim, não é possível alterar parâmetros para a calibração do fósforo total, porém os resultados obtidos nas simulações foram satisfatórios.

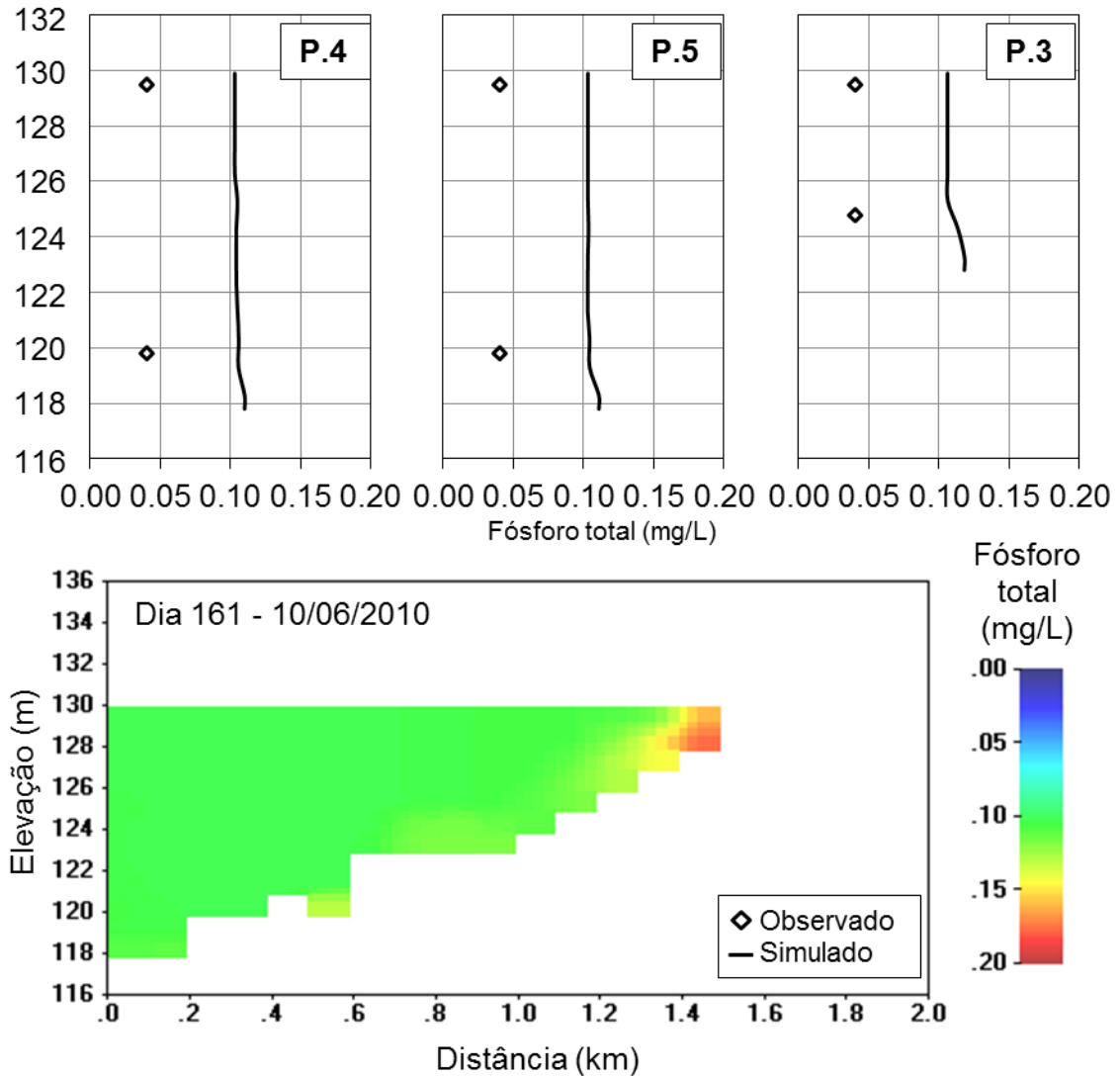
A figura 37 exhibe os resultados da simulação do fósforo total para a campanha em 14 de abril de 2010. Obteve-se um EAM no P5 de 0,05, P4 de 0,06 e P3 de 0,07 mg/L. A REQM do P3 foi 0,21 e para ambos P4 de 0,16 e P5 de 0,18 mg/L. Os resultados obtidos foram razoáveis, sendo os resultados de grande parte da simulação maior do que o resultado observado.

Figura 37 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



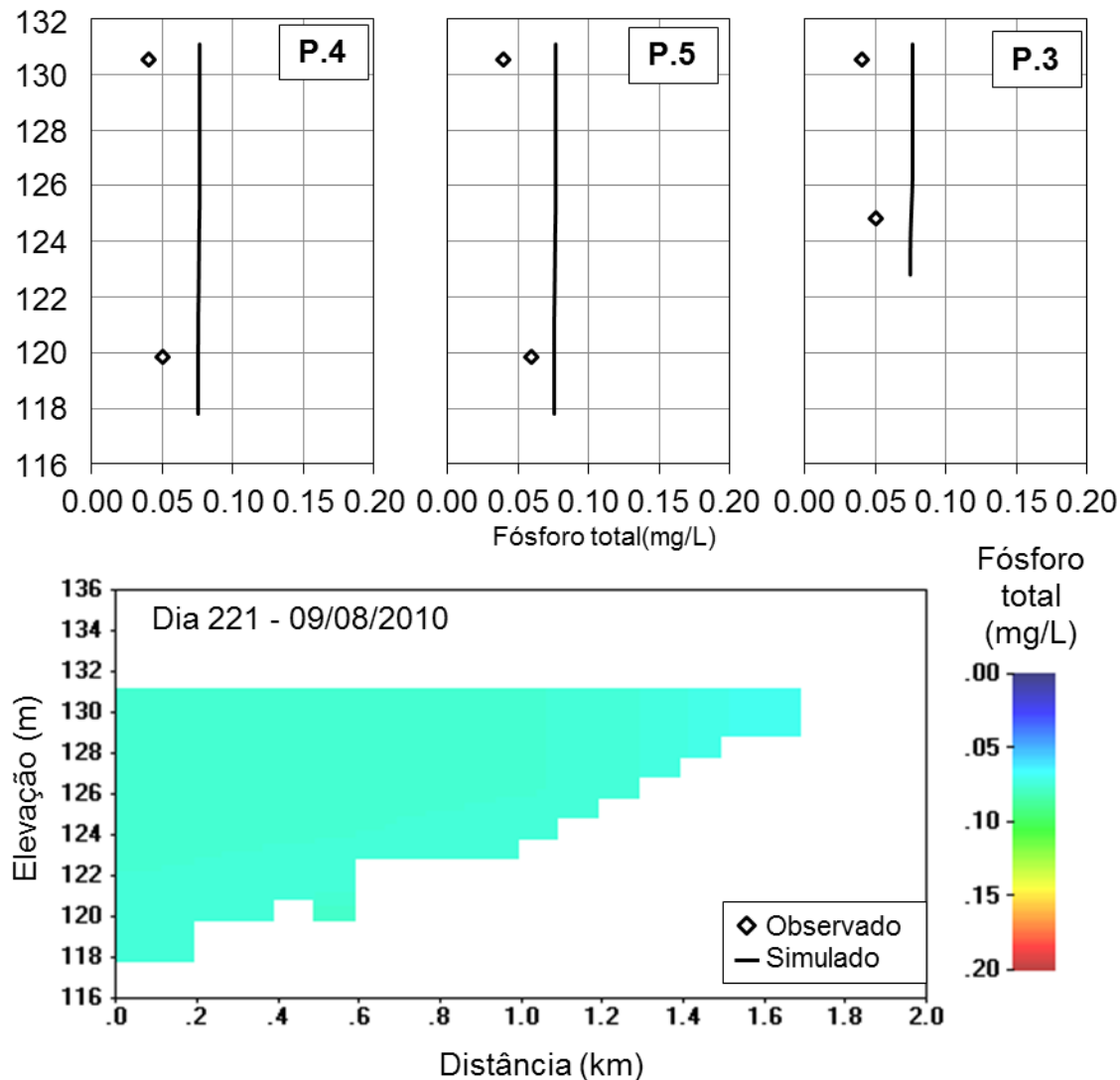
A figura 38 mostra os resultados da simulação do fósforo total para o dia 161, em 10 de junho de 2010. O resultado da simulação mostra o fósforo total variando entre 0,10 a 0,12 mg/L em praticamente toda a extensão do reservatório, sendo os valores da simulação maiores que os valores observados. A precisão da simulação, por meio do EAM, para o P5, P4 e P3 foi de 0,06, 0,06 e 0,07 mg/L e a REQM foi de 0,20, 0,20 e 0,21 mg/L, respectivamente.

Figura 38 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



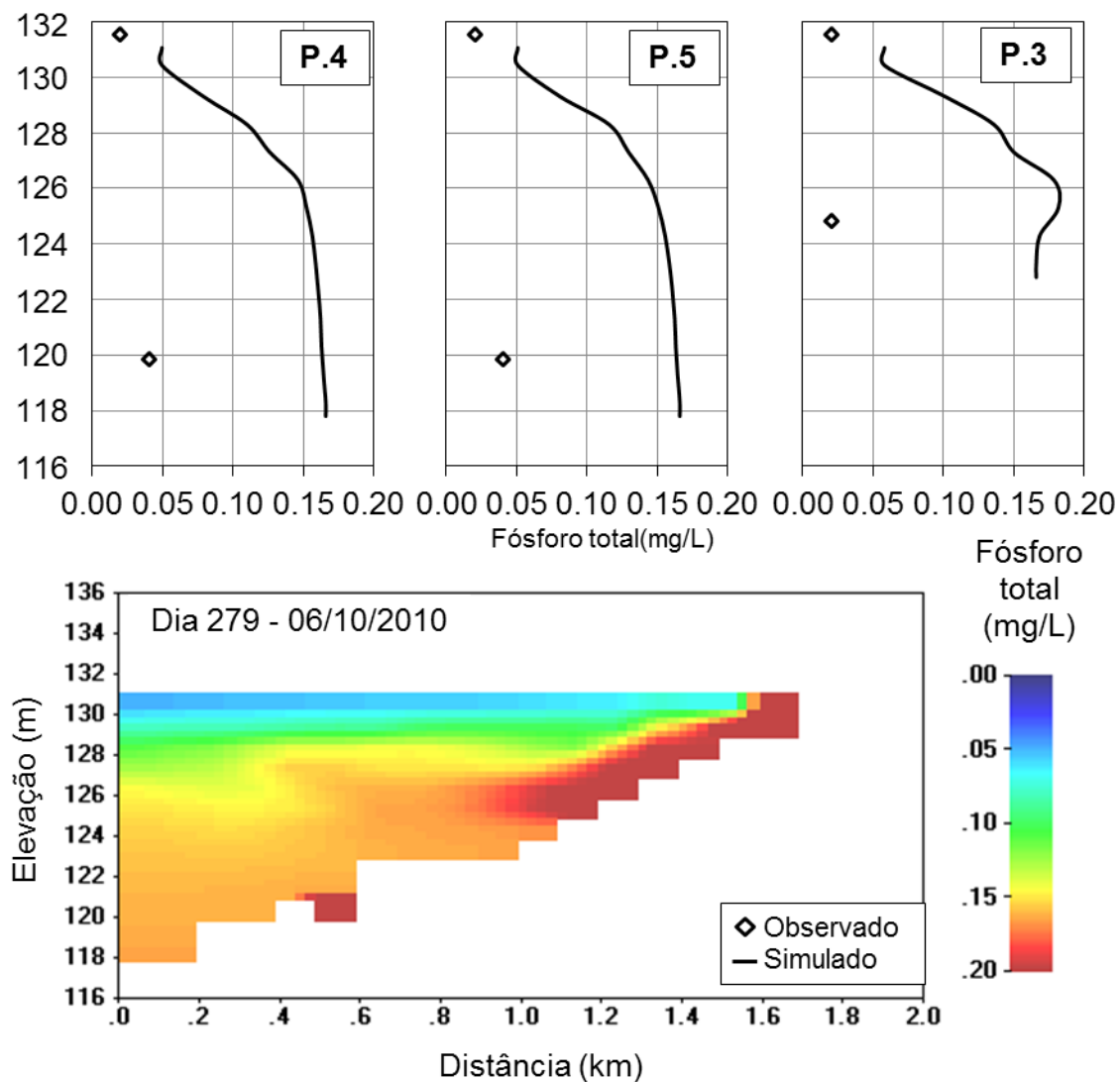
Chegando ao dia 221, em 09 de agosto de 2010, a simulação apresentou uma diminuição do fósforo em toda a extensão do reservatório, como pode ser visto na figura 39, chegando a valores próximos a 0,08 mg/L em toda a sua extensão. A precisão da simulação para o P5 ficou em 0,03 para o EAM e 0,09 para a REQM, para o P4 ficou em 0,03 e 0,11 e para o P3 foi de 0,03 mg/L e 0,11 mg/L. Vale notar que, diferentemente das simulações dos outros parâmetros, onde o dia 09 de agosto apresentava sempre o pior resultado nas simulações, para o fósforo total o resultado foi mais preciso.

Figura 39 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



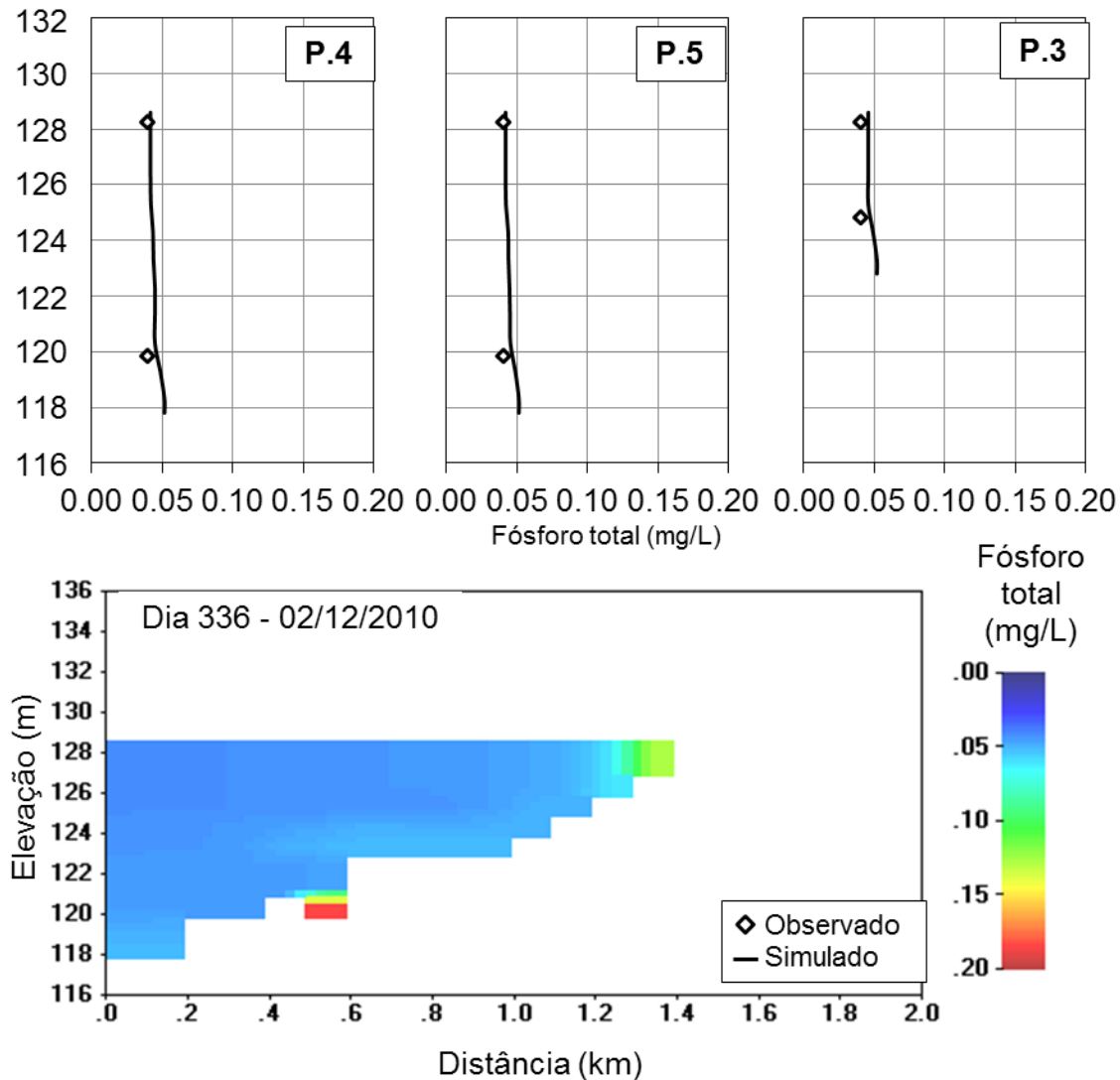
Reflexo da entrada de fósforo no reservatório, a campanha do dia 279, em 06 de outubro de 2010, mostra um aumento da concentração principalmente considerando a termoclina e a profundidade do reservatório (figura 40). A concentração varia entre 0,05 a 0,17 mg/L de fósforo total, porém os valores simulados não se aproximaram dos valores observados. Assim, a precisão da simulação, em comparação com os dados observados é dada pelo EAM e pela REQM, que são de 0,08 e 0,22 para o P5, 0,08 e 0,22 para o P4 e 0,10 mg/L e 0,27 mg/L para o P3.

Figura 40 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Por fim, na última campanha de simulação do fósforo total, têm-se na figura 41 os resultados obtidos do modelo W2 para o dia 336, ou seja, 02 de dezembro de 2010. A simulação mostra uma diminuição no fósforo total em praticamente todo o reservatório, sendo a sua concentração aproximadamente 0,05 mg/L. A precisão da simulação, bastante satisfatória (reflexo da simulação do fosfato para a última campanha - figura 45) apresenta um EAM de 0,00 para P5, de 0,01 para P4 e de 0,01 mg/L para P3, já a REQM apresenta um valor de 0,02, 0,02 e 0,03 mg/L, para os mesmos pontos, respectivamente.

Figura 41 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



Os comentários a respeito da calibração do fósforo total ficam comprometidos, uma vez que não se pode ajustar os parâmetros de calibração, sendo ele inteiramente derivado do fosfato. Além disso, os valores de fósforo total obtidos nas coletas no reservatório foram, na sua maioria muito pequenos, ficando abaixo do limite de detecção do equipamento utilizado para fazer a análise do constituinte. Corroborando, tem-se o fato das publicações não citarem a simulação do fósforo total, inviabilizando a comparação do presente trabalho com a bibliografia recente.

5.1.7 Calibração da clorofila a

A clorofila a no modelo CE-QUAL-W2 v3.71 é simulada por meio das fontes de fitoplâncton (algas, perifiton e epifiton, macrófitas) e também do zooplâncton. Devido à falta de dados para se ajustar os parâmetros relacionados às fontes citadas anteriormente, optou-se por ativar todas as fontes de clorofila, porém deixá-las com seus valores padrão oriundos do manual do modelo - em Cole e Wells, 2013 - com exceção do compartimento das algas.

Os parâmetros calibráveis referentes às algas no modelo, estão mostrados na tabela 15. A partir dos valores padrões, cada um deles foi ajustado respeitando os limites de referência. Com relação ao reservatório, Burin (2011) relatou a predominância de algas diatomáceas em todas as campanhas realizadas, destacando a presença da espécie *Aulacoseira granulata*, porém, o manual do modelo não consta informações a respeito dos parâmetros para esta espécie.

Tabela 15 - Parâmetros de calibração das algas

Parâmetro	Descrição	Valor Padrão
AG	Máxima taxa de crescimento das algas (dia ⁻¹)	2,00
AR	Máxima taxa de respiração das algas (dia ⁻¹)	0,04
AE	Máxima taxa de excreção das algas (dia ⁻¹)	0,04
AM	Máxima taxa de mortalidade das algas (dia ⁻¹)	0,10
AS	Taxa de deposição de algas (dia ⁻¹)	0,10
AHSP	Constante de meia-saturação para fósforo limitado (g·m ⁻³)	0,003
AHSN	Constante de meia-saturação para nitrogênio limitado (g·m ⁻³)	0,014
AHSSI	Constante de meia-saturação para sílica limitada (g·m ⁻³)	0,0
ASAT	Intensidade de saturação da luz em taxa máxima fotossintética (W·m ⁻²)	100

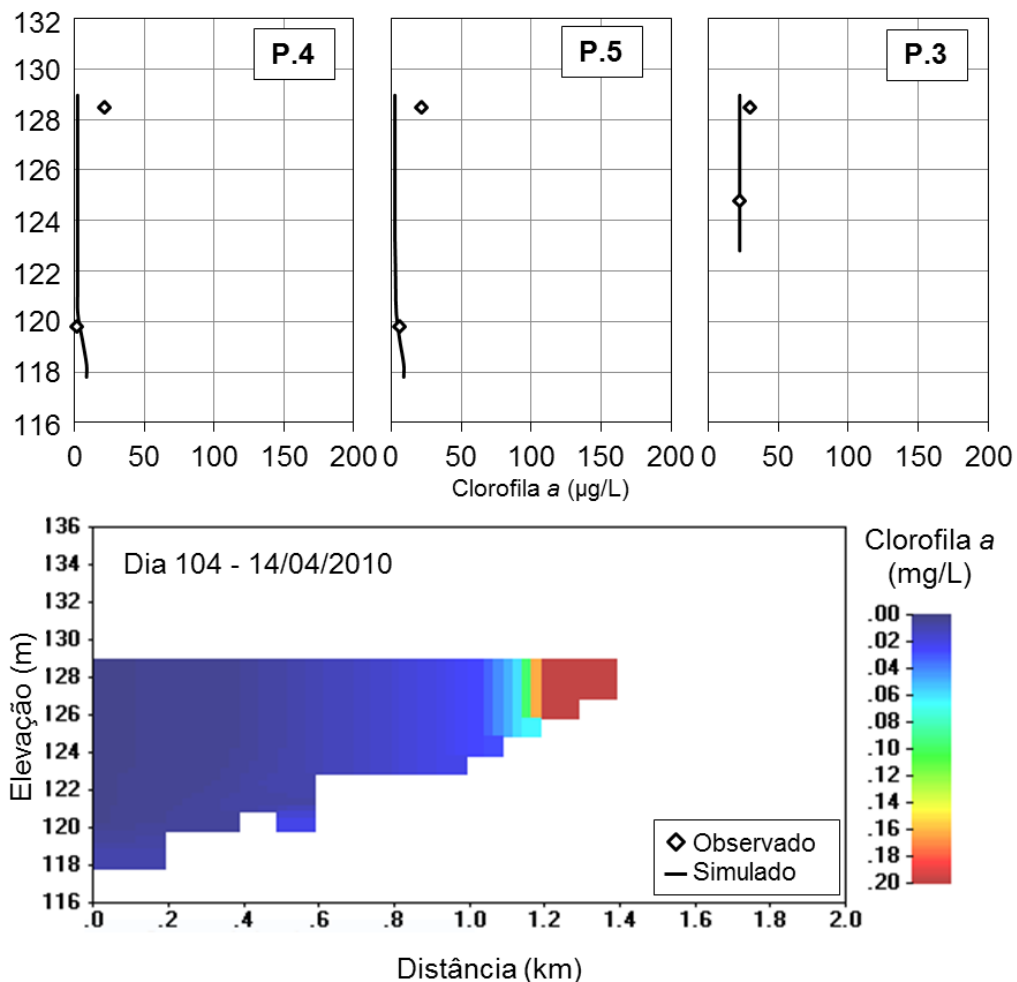
Fonte: Adaptado de Cole e Wells (2013).

Após inúmeras simulações, a calibração mais adequada, onde os valores observados e os valores calculados foram mais próximos, teve os seguintes parâmetros ajustados: 1,00 dia⁻¹ para AG, 0,92 dia⁻¹ para AR, 0,044 dia⁻¹ para AE, 0,03 dia⁻¹ para AM, 0,1 dia⁻¹ para AS, 0,05 g·m⁻³ para AHSP, 0,05 g·m⁻³ para AHSN,

0,08 g·m⁻³ para AHSSI. Os resultados das simulações são mostrados nas figuras 42, 43, 44, 45 e 46 para os dias 104, 161, 221, 279 e 336, respectivamente.

Para a simulação do dia 104, em 14 de abril de 2010 e mostrada na figura 42, os valores de clorofila *a* na parte mais profunda do reservatório foram razoáveis, apresentado um EAM de 11,48 e 10,40 para os pontos P4 e P5, enquanto que para o P3 de 3,70 µg/L. Já para a REQM os valores foram 6,37, 6,43 e 0,78 µg/L para P4, P5 e P3, respectivamente.

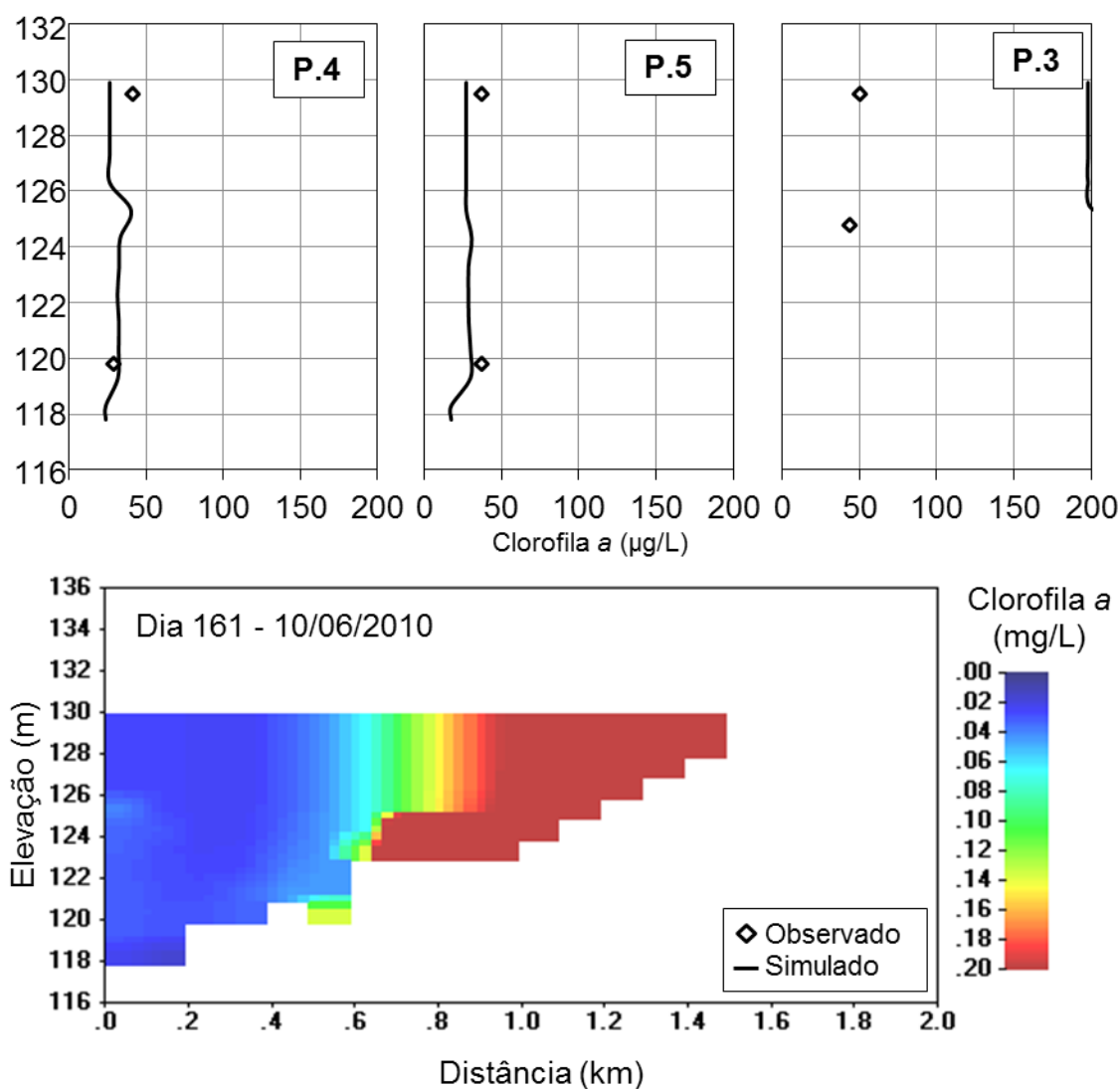
Figura 42 - Perfis de clorofila *a* simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila *a* do reservatório para o dia 14 de abril de 2010.



Para o dia 10 de junho de 2010, mostrado na figura 43, há um aumento na distribuição da clorofila *a* ao longo do perfil longitudinal do reservatório nos valores simulados. Esse aumento também é notado nos valores observados. O problema da simulação da clorofila *a* está no P3, onde os valores tem amplitude de

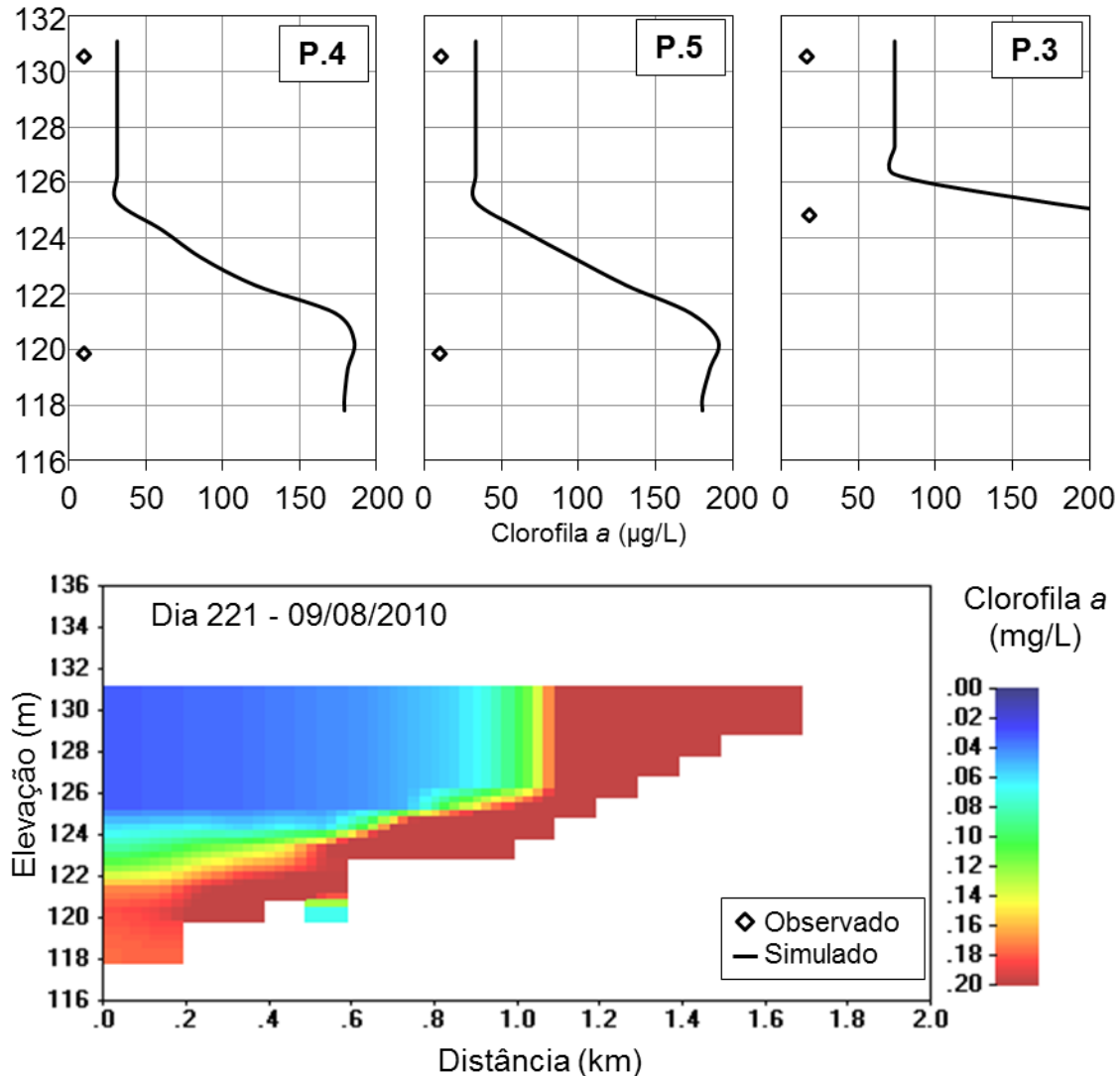
aproximadamente 200 até 710 $\mu\text{g/L}$. Dessa forma, tem-se um EAM de 9,18 para P4, 8,51 para P5 e 343,12 $\mu\text{g/L}$ para P3. Da mesma forma, para a REQM, tem-se 1,75 para P4, 1,60 para P5 e 16,40 $\mu\text{g/L}$ para P3.

Figura 43 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 10 de junho de 2010.



Para a simulação do dia 221, em 09 de agosto de 2010, registrou-se novamente uma distorção nos dados simulados, principalmente ao descer na coluna d'água (figura 44). A precisão da simulação, por meio do EAM para o P4 foi de 96,40 para P5 de 97,93 e para o P3 de 168,00 $\mu\text{g/L}$, e para a REQM foi de 8,27 para o P4, 8,27 para P5 e 11,40 $\mu\text{g/L}$ para P3.

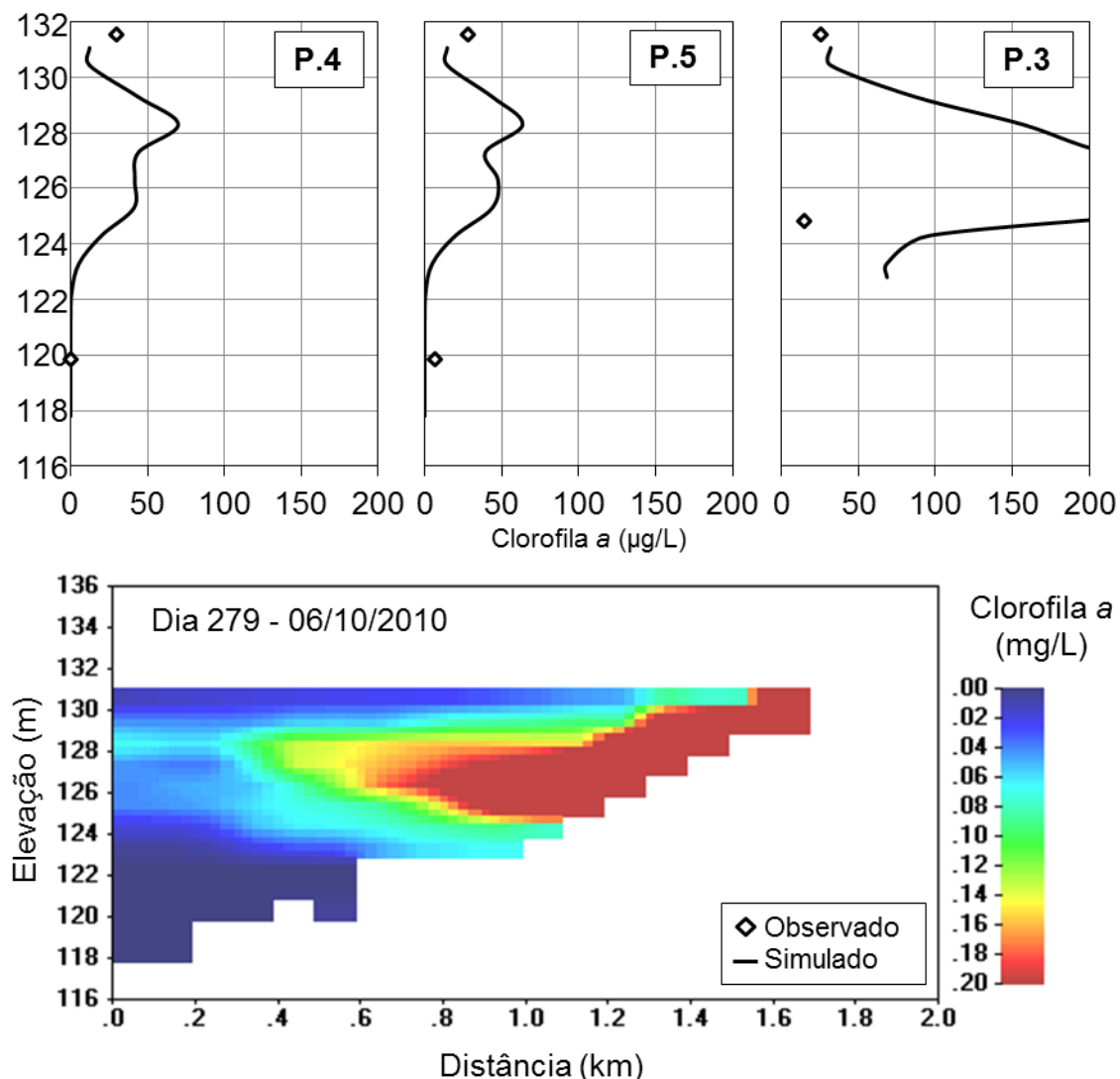
Figura 44 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 09 de agosto de 2010.



Chegando ao dia 6 de outubro de 2010 (figura 45), a simulação mostra um comportamento curioso, pois os pontos observados tem boa precisão e vão ao encontro dos valores simulados, porém entre eles há uma grande variação no metalímnio que não pode ser confirmada devido à falta de dados.

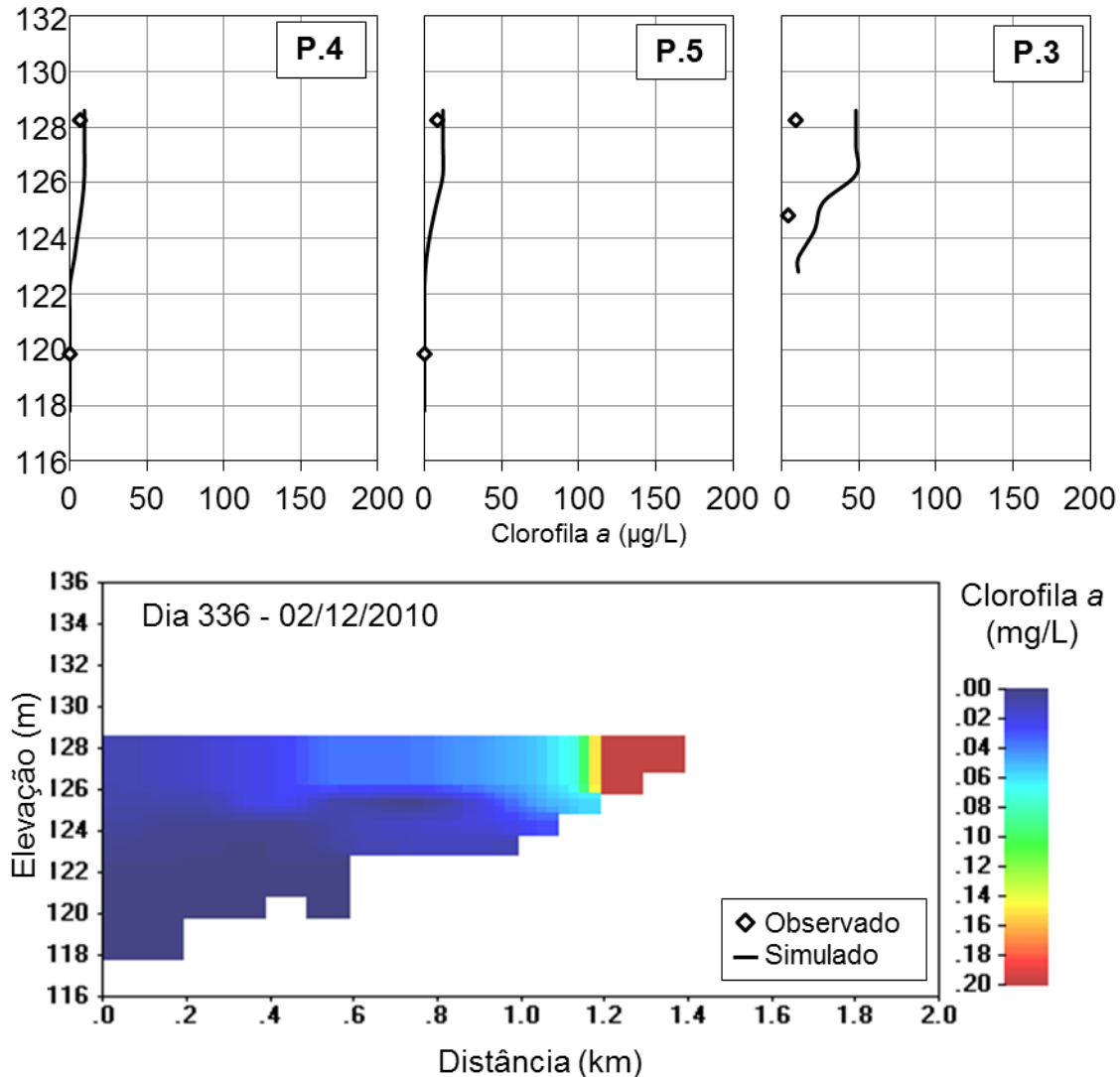
Além disso, novamente o P3 O EAM do P4 foi de 8,64, para P5 foi de 9,98 e para P3 foi de 134,07 $\mu\text{g/L}$, enquanto a REQM foi de 34,21, 2,80 e 8,45 $\mu\text{g/L}$, para os mesmos pontos.

Figura 45 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 06 de outubro de 2010.



Enfim, ao chegar ao último dia simulado, o dia 02 de dezembro de 2010, é possível verificar na figura 46 uma diminuição na concentração de clorofila *a* ao longo do reservatório. Essa diminuição chega a extinguir a concentração no hipolimnion. A precisão da simulação é verificada pelo EAM de 1,16, 2,05 e 28,23 µg/L para os pontos P4, P5 e P3, respectivamente. Não foi possível realizar o REQM para o P4, mas para P5 o valor foi de 0,59 µg/L e para P3 de 4,69 µg/L.

Figura 46 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de clorofila a do reservatório para o dia 02 de dezembro de 2010.



A calibração da clorofila *a*, apesar da falta de dados para os parâmetros relacionados aos perifítons e epífitas, às macrófitas e ao zooplâncton, resultou em valores simulados que se aproximaram, em grande parte das simulações, dos valores observados. É possível notar que para os pontos mais profundos do reservatório (P4 e P5) as concentrações simuladas de clorofila *a* foram razoavelmente próximas dos valores observados, apesar da grande variação de concentração.

Deus et al. (2013) apresentaram a clorofila *a* como um dos parâmetros simulados pelo modelo para se avaliar o impacto da piscicultura na qualidade da água. Conforme os autores, o modelo CE-QUAL-W2 reproduziu de forma adequada a concentração de clorofila *a* do reservatório, o EAM foi de 1,13 µg/L para os cinco anos simulados, enquanto que a REQM foi de 1,47 µg/L para o mesmo intervalo.

Park et al. (2015) utilizaram o modelo CE-QUAL-W2 para avaliar a resposta da concentração de clorofila *a* no reservatório Yeongsan (Coreia do Sul) frente a diferentes cenários de estresse. Inicialmente foi simulada a clorofila para uma série de dados observados de quatro anos e os resultados obtidos na simulação foram satisfatórios, apresentando variação entre 2,39 a 4,13 µg/L para o EAM e de 2,99 a 5,32 µg/L para a REQM.

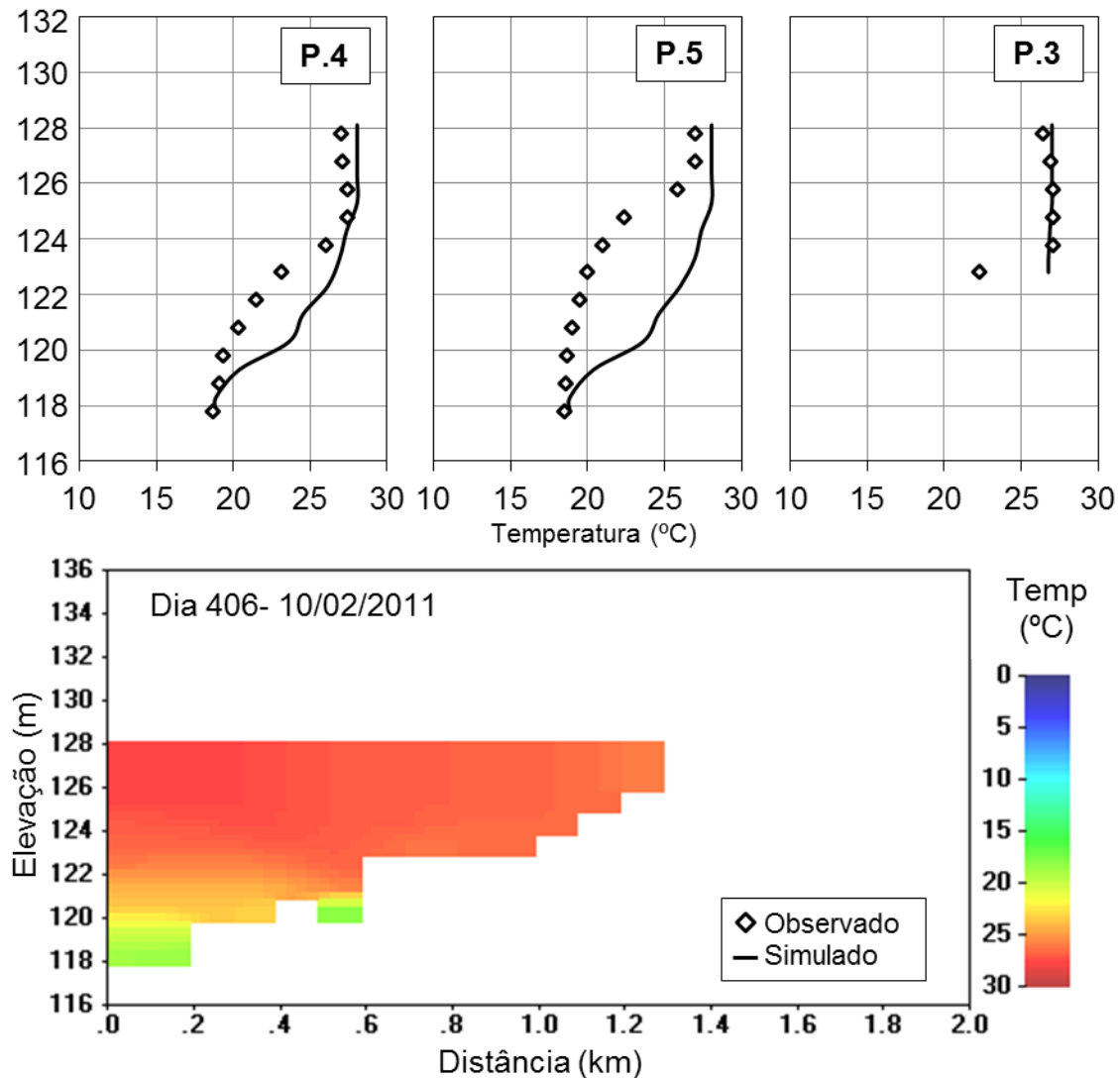
Zouabi-Aloui e Gueddari (2014) avaliaram a concentração de clorofila *a* utilizando o modelo W2 em um reservatório estratificado na parte sul do Mediterrâneo. Os resultados EAM variando entre 0,64 a 1,02 µg/L e a REQM variando entre 0,94 a 1,38 µg/L, assim, os autores confirmaram a aplicabilidade do modelo para a área em estudo, possibilitando assim novas análises de cenários futuros, para prever o comportamento do reservatório.

5.2 CONFIRMAÇÃO DO MODELO CE-QUAL-W2

Após a calibração do modelo, a campanha do dia 02 de fevereiro de 2011 foi utilizada para a confirmação do modelo aplicado ao reservatório do Vacacaí Mirim. É possível observar nas imagens subsequentes, que a simulação do dia 406 foi satisfatória, apresentando a temperatura elevada na superfície e em quase toda a profundidade do reservatório, confirmando o que era esperado para o reservatório sendo a data próxima do final do verão.

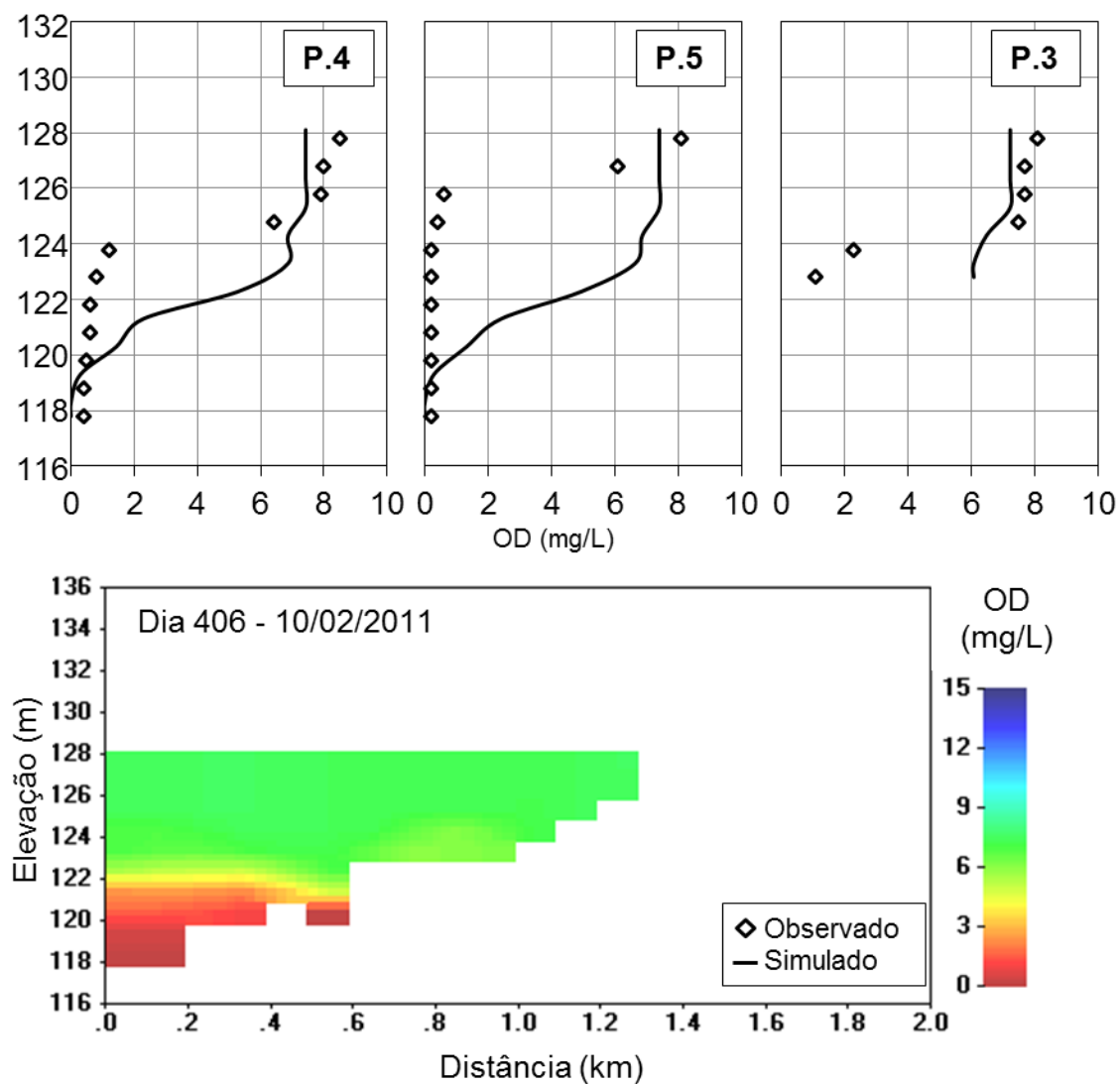
A simulação da temperatura para o dia 406 (02/02/2011) é mostrada na figura 47. Os perfis de temperatura simulados mostraram-se com uma precisão adequada para a simulação, esta precisão pode ser confirmada pelo EAM dos pontos P4, P5 e P3 de 3,04, 1,32 e 0,97°C, respectivamente. Além disso, tem-se a REQM dos pontos P4, P5 e P3 de 0,27, 0,60 e 0,19°C.

Figura 47 - Perfis de temperatura simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



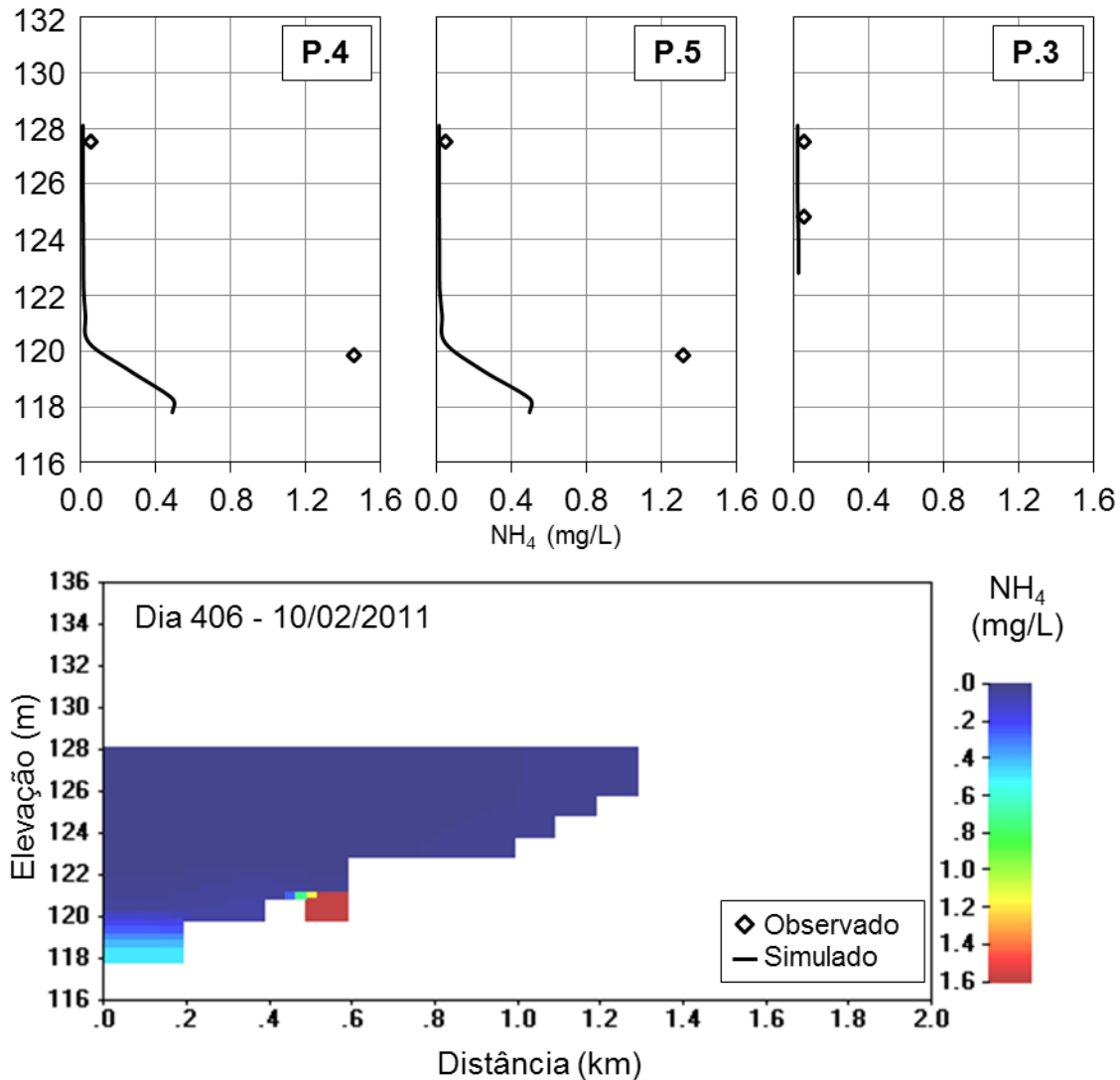
Com relação aos parâmetros de qualidade, o oxigênio dissolvido simulado na campanha do dia 02 de fevereiro de 2011 (figura 48) apresentou resultados satisfatórios. Porém, apesar dos pontos P4 e P5 apresentarem uma concentração maior de oxigênio do que os valores observados em profundidade, na superfície os valores se equivalem. A precisão por meio do EAM é de 1,72 para P4, 3,32 para P5 e 1,93 mg/L para o P3, para a REQM é de 0,81 para P4, 1,43 para P5 e 0,77 mg/L para o P3.

Figura 48 - Perfis de oxigênio dissolvido simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



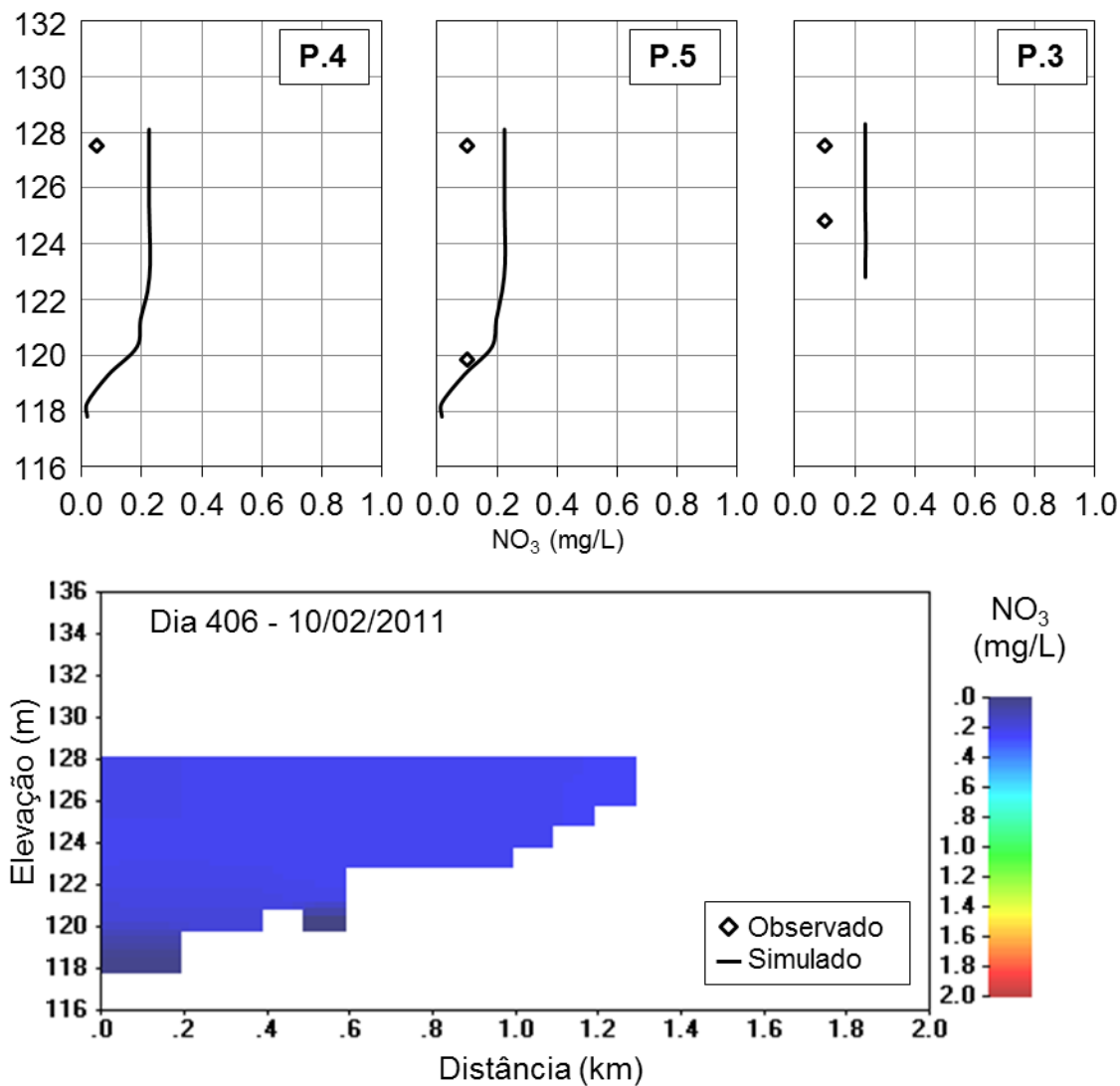
A confirmação do nitrogênio começa pela confirmação da amônia. A simulação foi ao encontro dos valores observados, inclusive em relação à profundidade, onde há um aumento na concentração, o que é retratado pela simulação (mostrado na figura 49). A precisão da simulação não foi muito satisfatória, uma vez que a concentração dos valores observados foi mais alta que a simulada. O EAM do ponto P4 foi de 0,62, do ponto P5 de 0,56 e do ponto P3 de 0,03 mg/L, a REQM dos mesmos pontos foi de 1,36, 1,27 e 0,23 mg/L.

Figura 49 - Perfis de amônia simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



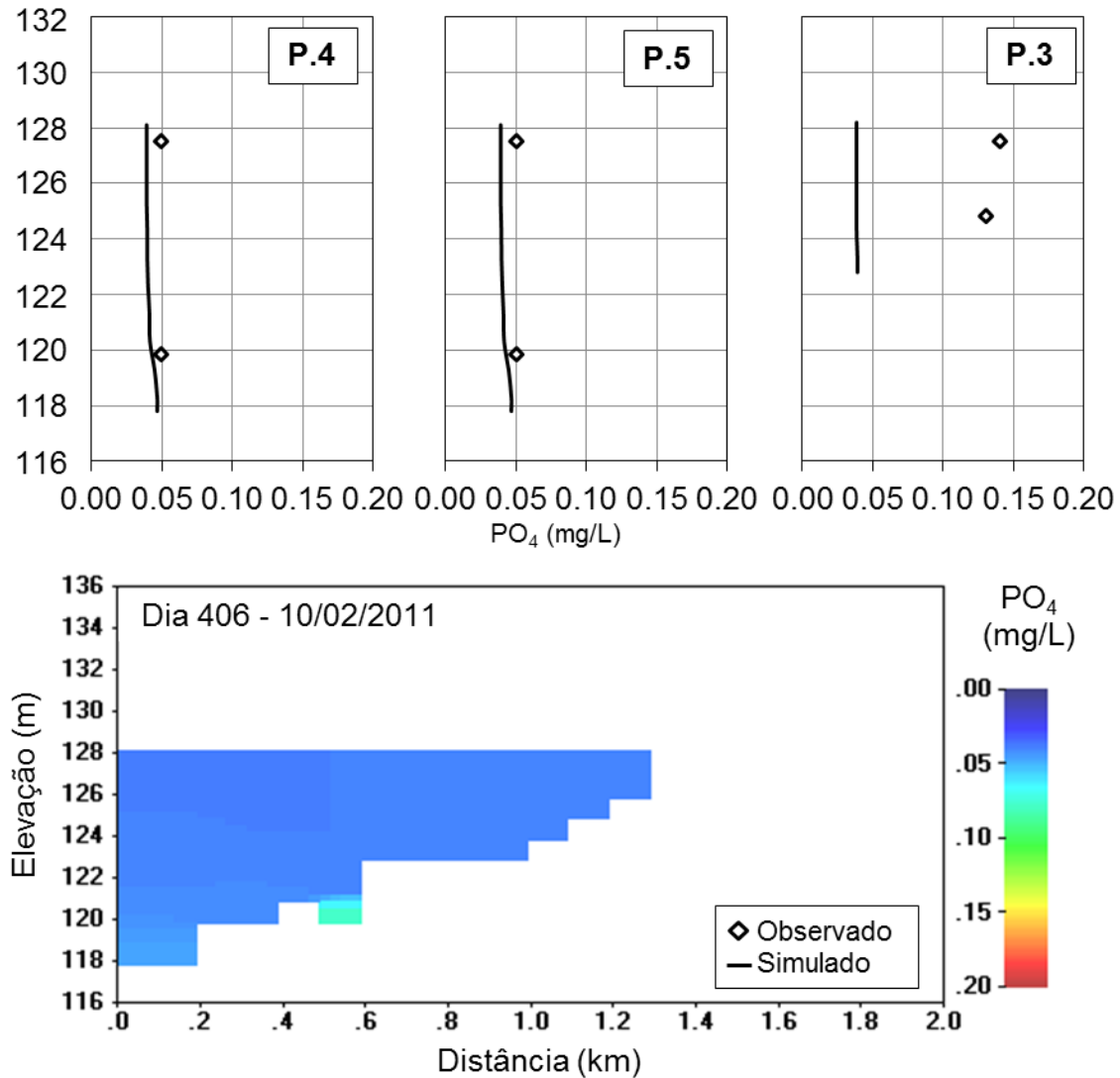
Enfim, a simulação do nitrito/nitrato se mostra adequada para o modelo, confirmando a aplicação do CE-QUAL-W2, como pode ser visto na figura 50, onde os perfis simulados se aproximam dos valores observados. A precisão da simulação é medida no EAM de 0,07 para P4 e P5 e 0,13 mg/L para P3, além da REQM que foi de 0,15 para P4 e P5 e 0,28 mg/L.

Figura 50 - Perfis de nitrito/nitrato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



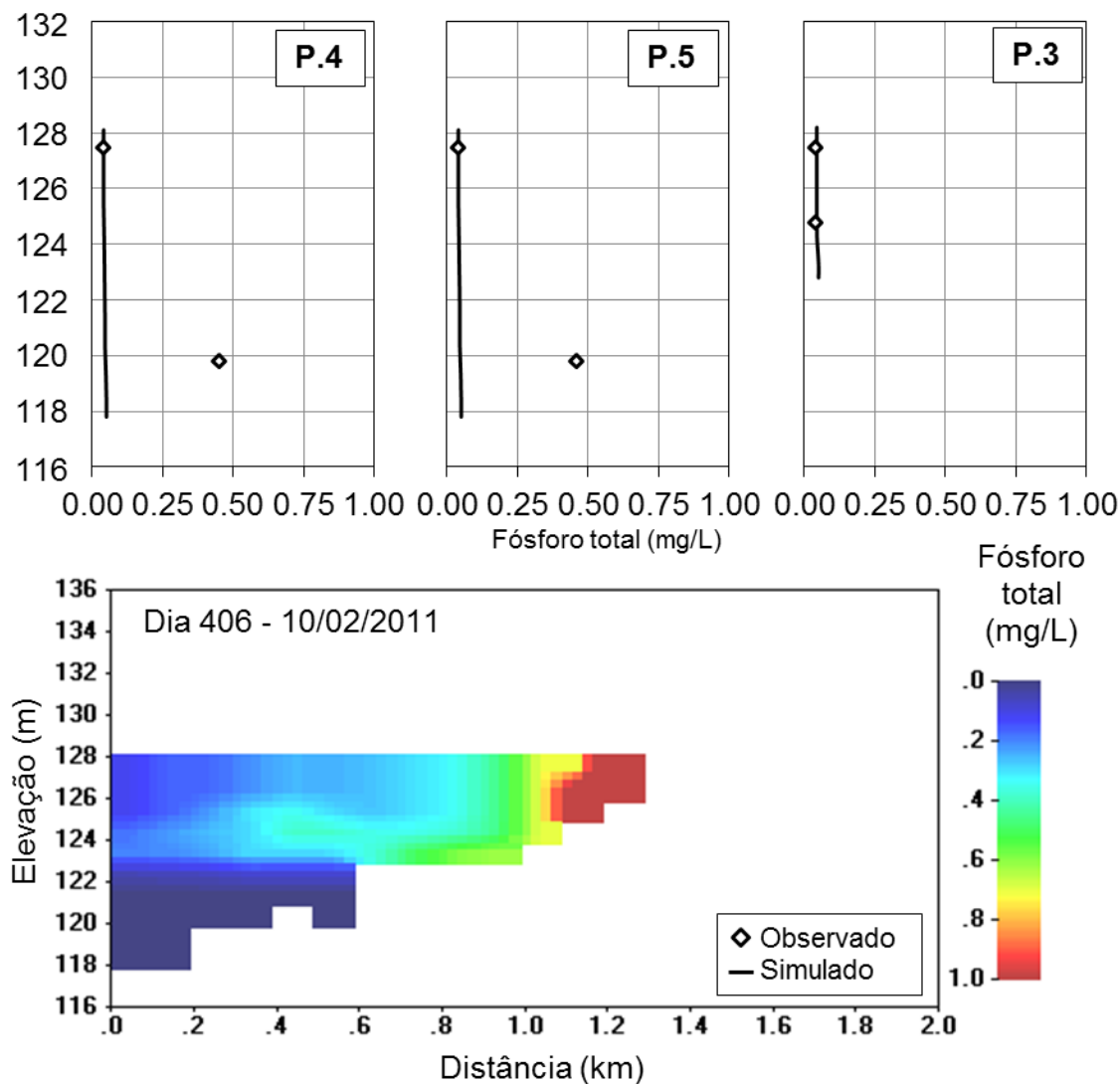
A simulação do fósforo para o dia 406, em 02 de fevereiro de 2011, é mostrada na figura 51. A figura mostra a precisão da simulação, com os valores simulados muito próximos dos valores observados para os pontos em profundidade, P4 e P5. A precisão da simulação, através do EAM é de 0,01 para P4 e P5 e de 0,10 mg/L para P3, enquanto a REQM é de 0,04 para P4 e P5 e de 0,49 mg/L para P3.

Figura 51 - Perfis de fosfato simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



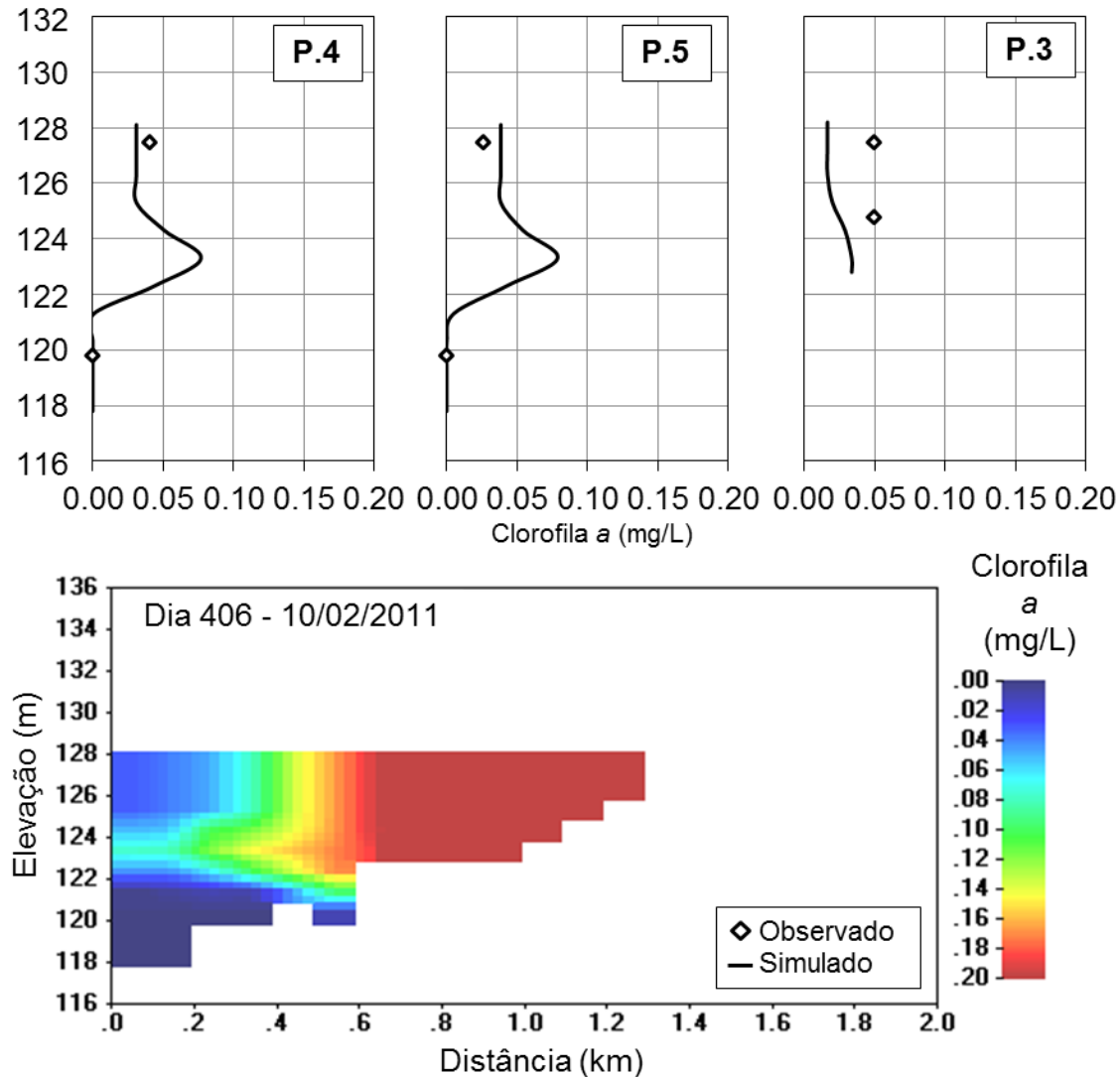
Continuando, para finalizar o fósforo, tem-se a simulação do fósforo total, que é mostrada na figura 52. A figura 52 mostra os perfis simulados de fósforo total do modelo em comparação com os valores observados. É possível verificar que a simulação do fósforo total na região do epilímnio é compatível com os valores observados, em contrapartida, na região do hipolímnio, há um acréscimo dos valores observados que não é retratado na simulação. A precisão da simulação, pelo EAM é de 0,21 para P5, 0,20 para P4 e 0,00 mg/L para P3, e pela REQM é de 0,93, 0,91 e 0,02 mg/L, respectivamente.

Figura 52 - Perfis de fósforo total simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



Por fim, a confirmação da clorofila *a* é mostrada na figura 53. Apesar das inúmeras incertezas com relação à clorofila *a*, conforme comentado anteriormente, o modelo representou de maneira adequada as interações entre algas, macrófitas, epifíton, perifíton e fitoplâncton, uma vez que as simulações se aproximaram das observações. O EAM da simulação para o P4 foi de 0,00, para P3 foi de 0,01 e para P3 foi de 0,03 mg/L, da mesma forma, a REQM para os mesmos pontos foram de 0,03, 0,03 e 0,19 mg/L, respectivamente.

Figura 53 - Perfis de clorofila a simulados e observados para os pontos P3, P4 e P5 e perfil longitudinal de fósforo total do reservatório para confirmação do dia 02 de fevereiro de 2011.



Assim, diversas dificuldades foram encontradas para implantação do modelo, por exemplo: a falta de dados da batimetria do reservatório (a última foi realizada em 2001, enquanto os dados de qualidade são de 2010), o limitado número de campanhas, resultando em menor quantidade de dados para alimentar o modelo em sua calibração, incertezas relacionadas aos dados hidrodinâmicos e a influência da distância entre a estação meteorológica utilizada e a área de estudo na temperatura do reservatório.

Contudo, o modelo foi capaz de representar o reservatório do rio Vacacaí Mirim de maneira adequada. Desde a batimetria, o balanço hídrico e até os

inúmeros parâmetros de qualidade relacionados à eutrofização, o modelo apresentou resultados satisfatórios para grande parte das simulações. Ainda, conseguiu simular de forma adequada a campanha do dia 02 de fevereiro de 2011, que havia ficado de fora da calibração, justamente com a finalidade de se verificar a capacidade de simulação do modelo.

Desta maneira, o modelo CE-QUAL-W2 se confirmou como ferramenta poderosa para a simulação da qualidade da água do reservatório, Assim, pode ser utilizado por gestores para inúmeras atividades, desde previsão de cenários extremos à tomada de decisões.

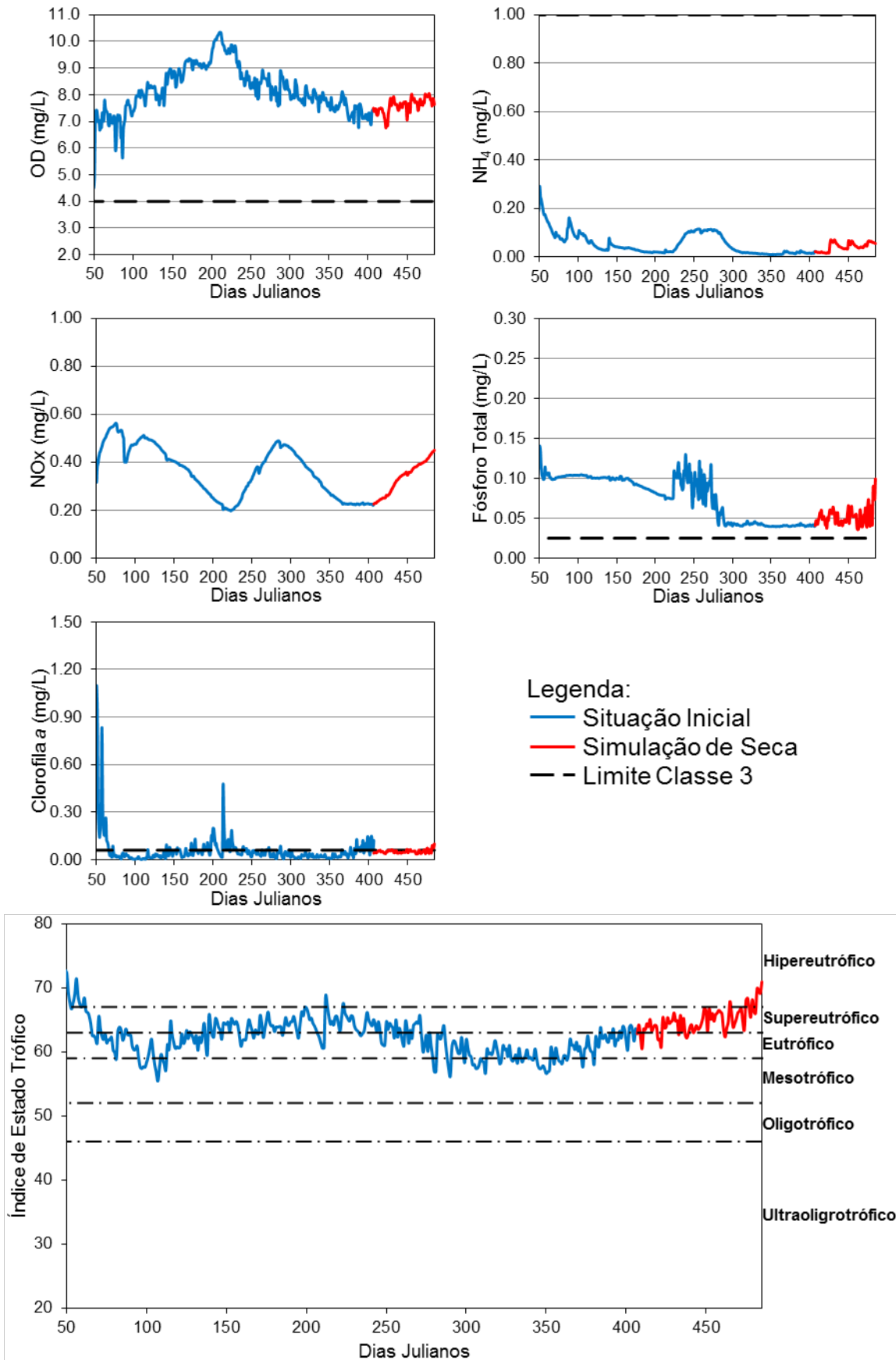
Abre-se, portanto, a possibilidade da utilização do modelo para a simulação de cenários. O próximo passo do trabalho foi a utilização do modelo para se prever situações extremas, onde haja excesso de nutrientes ou escassez de recursos. Essas simulações são importantes para que se tenha um maior conhecimento da área em estudo, planejar ações mitigadoras para que, se por ventura algum destes cenários venha a acontecer, os gestores estejam preparados para os possíveis impactos.

5.3 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

A etapa de simulação de cenários, conforme dito anteriormente, serve como base para estudos futuros, planejamento de ações e conhecimento total do objeto em estudo, para saber seu comportamento em diferentes situações.

As figuras 54 a 57 mostram os resultados das simulações de cenários para o reservatório do rio Vacacaí Mirim, utilizando o modelo CE-QUAL-W2 para o último ponto a jusante do reservatório, na sua superfície e compara os resultados com os valores de referência para a Classe 3 da Res. CONAMA 357/2005 e com o Índice de Estado Trófico (ANA (2012)). A figura 58 mostra o resultado da simulação da situação de estiagem (manutenção das condições em que o reservatório se encontrava na época de dez/2010), enquanto que a figura 59 mostra o resultado da simulação para um cenário de aumento de precipitação (aumentos de 20 e 50x de volume precipitado). Além disso, a figura 60 mostra o resultado da simulação para o aumento da carga de poluentes na entrada do reservatório (aumentos de 33, 66 e 99%), ao tempo que a figura 61 mostra o resultado da simulação para um cenário de redução da concentração dos poluentes (reduções de 33, 66 e 99%).

Figura 54 - Simulação de cenário de estiagem.



Como é possível notar, no resultado da simulação do cenário de estiagem (figura 54), a qualidade da água no reservatório piora ao longo do tempo. A situação de estiagem começa próximo ao dia 318 (15/11/2010) e se estende até o último dia simulado (30/04/2011).

É possível verificar que houve aumento na concentração dos nutrientes como um todo e com a elevada temperatura do reservatório – final do verão/início do outono – propiciou-se um cenário ideal para a proliferação de algas. Assim, em conjunto com o aumento dos nutrientes (fósforo total, amônia e nitrito/nitrato) há um aumento na clorofila *a* e conseqüentemente um aumento do estado trófico do reservatório.

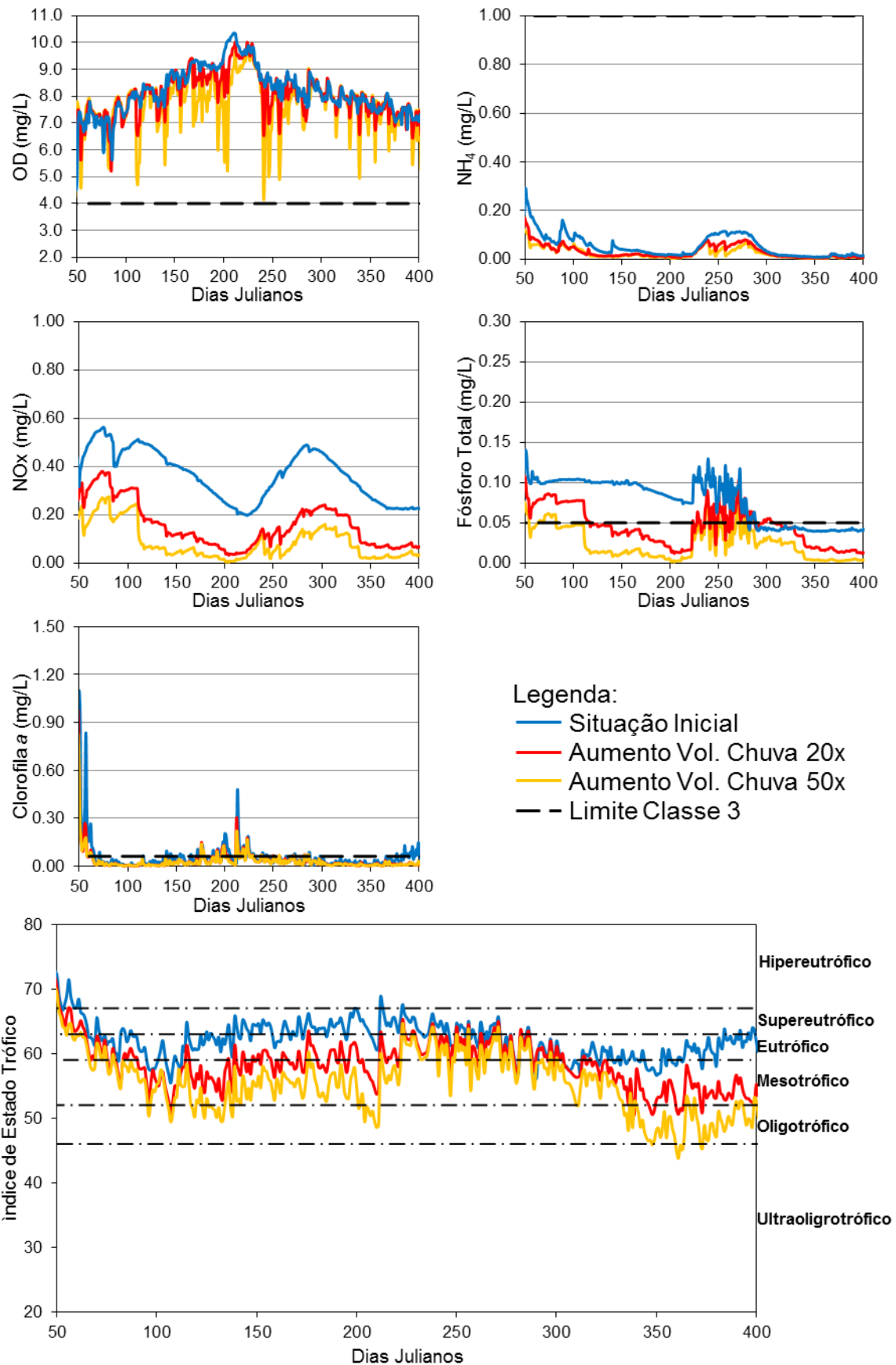
Logo, com um aumento das algas devido à eutrofização, há também um aumento no OD, mantendo a tendência que vinha apresentando ao final da situação inicial aumentando de aproximadamente 7 para próximo de 8 mg/L. Esse aumento se dá devido a fotossíntese realizada pelas algas, liberando oxigênio para o corpo hídrico.

Desta forma, o índice de estado trófico do reservatório, que variou ao longo do tempo entre mesotrófico e supereutrófico, no final da simulação de estiagem acabou atingindo o seu último patamar, hipereutrófico. Assim, evidencia-se que um cenário de seca como a que estava acontecendo no verão de 2010 é prejudicial à qualidade da água do reservatório.

Com relação à qualidade da água como um todo, o compartimento do nitrogênio (nitrito/nitrato e amônia) não excedeu os limites dos valores de referência da Classe 3 (Res. CONAMA 357/2005), entretanto, o fósforo total excede o limite de 0,05 mg/L e também a clorofila *a* excede o limite de 0,06 mg/L ao longo de toda a série simulada.

Baseado nisso, pode-se afirmar que o reservatório não se classifica nos valores de referência na Classe 3 (Res. CONAMA 357/2005), pois os valores de clorofila *a* e fósforo total excedem os limites. Dessa forma não é possível utilizar de tratamento convencional (coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e fluoretação) para se fazer o aproveitamento desta água para abastecimento público.

Figura 55 - Simulação de cenário de aumento de precipitação.



Após a simulação para o cenário de aumento do volume precipitado (figura 55), têm-se então, em comparação a situação inicial, o volume precipitado aumentado em 20x e aumentado em 50x. Vale a observação de que esse aumento da precipitação não gera aumento no escoamento superficial, portanto, não aumenta a vazão de entrada no reservatório, apenas influencia o balanço hídrico pelo volume precipitado que incide diretamente no reservatório.

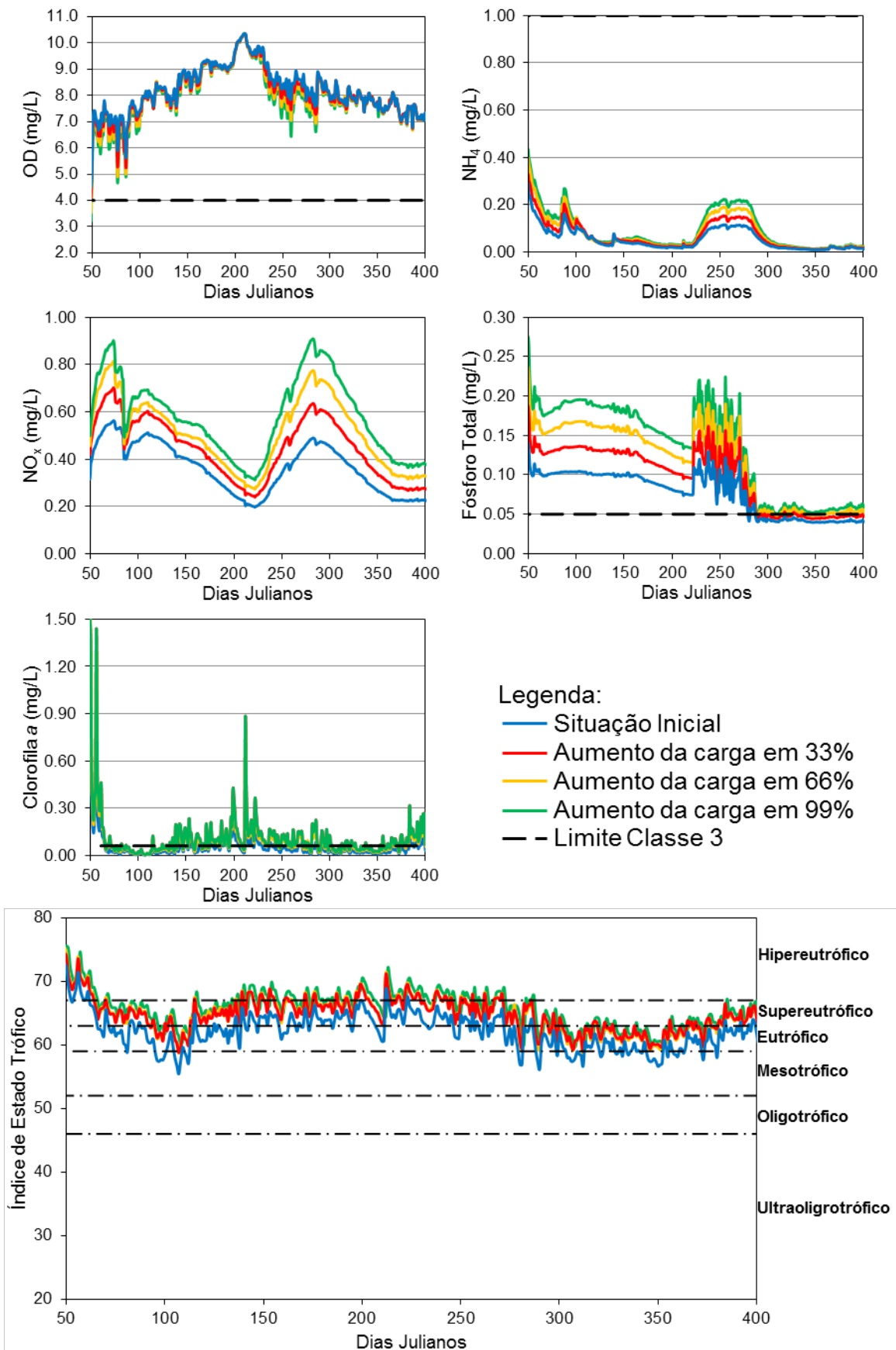
O que se esperava com o aumento da precipitação era uma diminuição da concentração dos nutrientes na água, uma vez que seu volume nas situações propostas são maiores que o volume na situação inicial. Assim, ocorre uma diluição dos parâmetros, diminuindo sua concentração.

Esse comportamento é confirmado nos nutrientes após a simulação: amônia, nitrito/nitrato e o fósforo total. Ao longo de todo o período os nutrientes são menores do que seu valor na situação inicial. Para corroborar, os valores da clorofila *a* também são menores, evidenciando a amenização do processo de eutrofização.

Assim, o IET demonstra essa diminuição de maneira visual, onde se pode perceber que o nível de eutrofização do reservatório varia na maior parte do tempo entre supereutrófico e eutrófico. Com o aumento do volume precipitado em 20x, percebe-se claramente a redução do nível de trofia, permanecendo na maior parte do tempo entre eutrófico e mesotrófico. Por fim, com o aumento de 50x do volume precipitado, diminui-se ainda mais o IET do reservatório.

Da mesma forma que a simulação do cenário de estiagem, os valores referentes ao OD, NO_x, e NH₄ estão dentro dos limites pré-estabelecidos para a Classe 3, porém a clorofila *a* e o fósforo total novamente estão com concentrações acima do limite, principalmente com o volume de chuva aumentado em 20x. Quando esse volume passa para 50x o valor inicial, a diluição é tamanha a ponto de reduzir a concentração do fósforo total e da clorofila *a* abaixo do limite da Classe 3 durante boa parte do período simulado.

Figura 56 - Simulação de cenário de aumento da carga de poluentes.



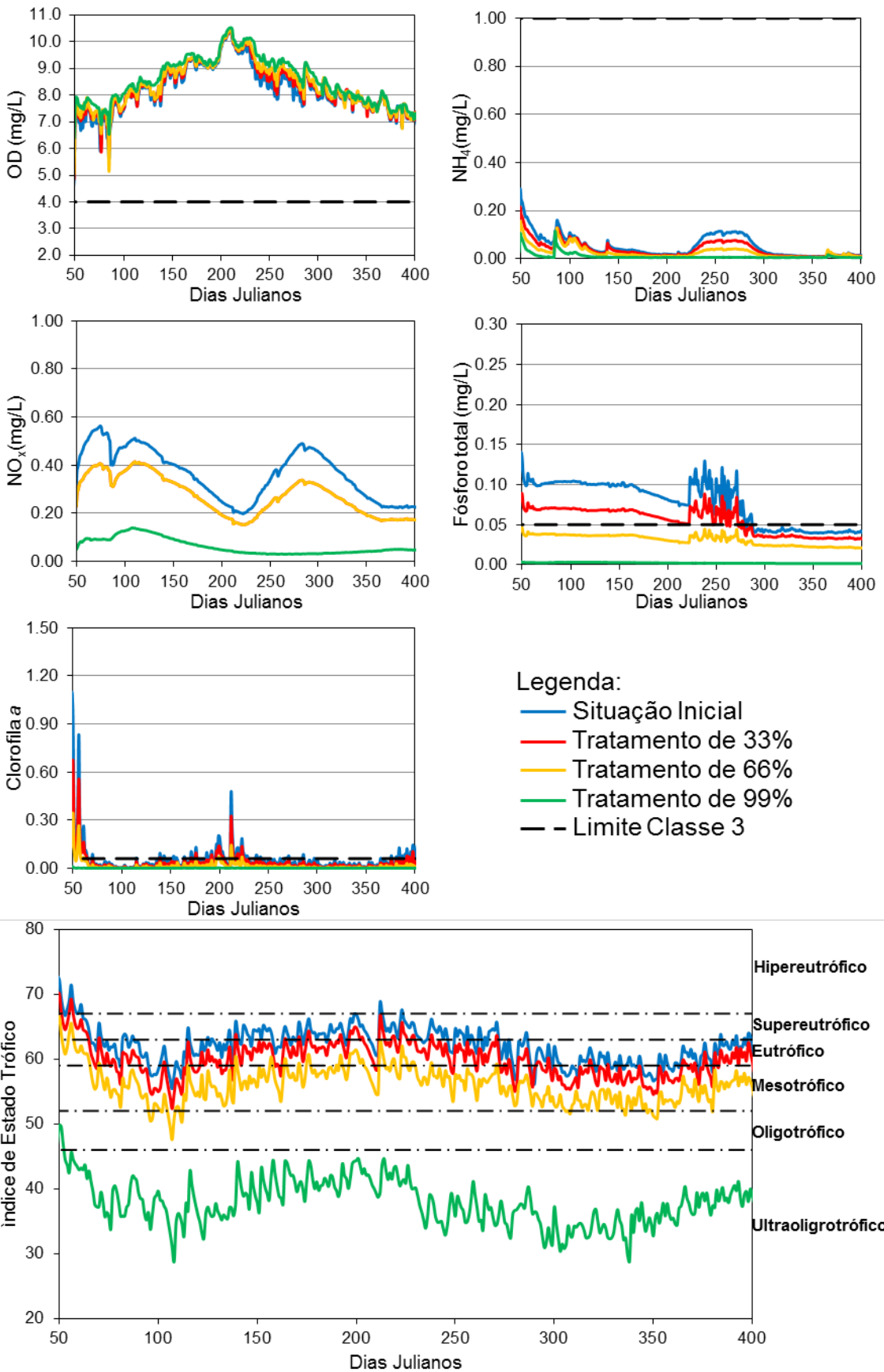
Com relação ao cenário de aumento de carga, conforme mostrado na figura 56, além da situação inicial são três simulações diferentes, a primeira com 33% de aumento nas concentrações na entrada do reservatório. A segunda, da mesma forma, porém com 66% de aumento nas concentrações e a terceira com aumento de 99% das concentrações.

Fica claro que com o aumento da carga de nutrientes há uma piora na qualidade da água como um todo, desde o oxigênio dissolvido até a clorofila *a*. Essa piora se dá devido ao aumento populacional na área, o que de fato vem acontecendo ao longo dos últimos anos, como pode ser visto na variação do uso e ocupação do solo (Tabela 1).

O OD atinge níveis críticos no início da simulação, abaixo de 5 mg/L na parte mais superficial do reservatório, porém ficando acima do limite da Classe 3 (4,00 mg/L) e evidenciando que o aumento em 66 e 99% da carga na entrada do reservatório pode vir a causar problemas na qualidade da água. Além disso, apesar de os valores de nitrito/nitrato e amônia não atingirem os limites da Classe em questão, há um aumento considerável das concentrações que não pode ser ignorado.

Esse aumento do aporte de nutrientes, obviamente, cria um ambiente adequado para o aumento da quantidade de algas presentes, o que pode ser verificado ao se analisar o oxigênio dissolvido no final da simulação, entre os dias de 300 até 400. Os valores da concentração de OD, tanto para a situação inicial quanto para os cenários simulados são equivalentes, legitimado pelo aumento de clorofila *a* e pelo aumento do IET.

Figura 57 - Simulação de cenário de tratamento da carga poluidora.



O cenário proposto de redução da concentração dos parâmetros na entrada do reservatório é mostrado na figura 57, onde além da situação inicial são três simulações distintas. A primeira simulação é com redução de 33% das concentrações na entrada do reservatório. A segunda simulação ocorre no mesmo sentido, porém com 66% de redução nas concentrações e a terceira com redução de 99% das concentrações.

A situação proposta seria simular um tratamento prévio dos efluentes que são lançados diretamente e sem tratamento algum e verificar o impacto desse tratamento na qualidade da água do reservatório. Esse impacto, como previsto, mostrou que a diminuição da concentração dos parâmetros na entrada do reservatório melhora a qualidade da água, a começar pelo OD, cuja concentração não ultrapassa valores inferiores a 7 mg/L.

Da mesma forma acontece com a situação do aporte de nutrientes. Com uma redução de 66% da concentração na entrada do reservatório há uma boa resposta na redução da concentração do fósforo total, com os valores chegando próximos ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para a Classe 3 (0,05 mg/L). O mesmo percentual de redução ocasiona na concentração de clorofila a abaixo do limite estabelecido para a classe 3 (0,03 mg/L) em boa parte do período simulado.

O grau de eutrofização do reservatório também é reduzido conforme a redução do aporte de nutrientes. Se na situação inicial o reservatório varia entre eutrófico e supereutrófico, na redução em 33% o IET já classifica, em alguns intervalos de tempo, o reservatório como mesotrófico. A redução de 66% faz com que o reservatório seja classificado na maior parte do tempo como mesotrófico, ou seja, possíveis alterações na qualidade da água, mas em níveis aceitáveis. Já com a redução em 99% o IET do reservatório é de ultraoligotrófico, com produtividade de algas baixíssima e concentração de nutrientes insignificantes para a qualidade da água.

De modo geral, as simulações de um cenário de estiagem fizeram com que a qualidade da água do reservatório piorasse, aumentando a concentração dos nutrientes, deixando o ambiente propício para o aumento da eutrofização.

Em contrapartida, as simulações do cenário de aumento da precipitação melhoraram a qualidade da água, uma vez que aumentou o volume de água no reservatório e, por consequência, diluiu os nutrientes, fazendo com que sua concentração diminuísse, o que refletiu na diminuição da clorofila *a* e no IET do reservatório.

Ainda, a simulação do aumento da carga de nutrientes na entrada do reservatório exemplifica na prática o impacto do aumento populacional desordenado para a qualidade da água. A qualidade da água nestas simulações claramente piorou, porém não tanto quanto a situação de estiagem. É possível concluir que um período de estiagem grande é muito mais prejudicial ao reservatório que um crescimento populacional desordenado, pois além de reduzir o volume do reservatório a degradação do recurso hídrico é mais acentuada.

De forma antagônica, o cenário que propunha o tratamento dos efluentes ao reduzir o aporte de nutrientes na entrada do reservatório revelou que o mínimo tratamento já reflete em benefícios à qualidade da água. Por exemplo, com 33% de redução o IET do reservatório passou de supereutrófico/eutrófico para eutrófico/mesotrófico e ainda é registrada uma diminuição considerável do fósforo total. Essa redução acentua-se quando o tratamento aumenta para 66%, chegando próximo ao limite da Classe 3, proposta pela Resolução CONAMA 357/2005.

O que fica claro, após essas inúmeras simulações é que a eutrofização é um fenômeno importante para a qualidade da água. Em um primeiro momento, durante sua proliferação, as algas contribuem com o aumento do OD. Essa proliferação, além dos diversos problemas ambientais ao corpo hídrico que já foram discutidos anteriormente, num segundo momento causa um consumo excessivo de oxigênio para que sua matéria orgânica seja degradada.

Esse não é um fenômeno que ocorre normalmente, sendo necessário um processo de antropização da bacia para que as condições necessárias de eutrofização aconteçam. Isso pôde ser verificado quando houve um aumento no aporte de nutrientes. Esse aumento causou, não só um acréscimo na concentração dos nutrientes, como também na quantidade de algas. Assim, com as condições ideais e sem os nutrientes como fator limitante, o reservatório atingiu níveis elevados do fenômeno da eutrofização, reproduzido pelo IET que chegou a valores acima de 70 (hipereutrófico).

Para uma melhor discussão dos resultados da simulação dos cenários para o reservatório do rio Vacacaí Mirim, alguns trabalhos que abordaram simulações de cenários relacionados à eutrofização são comentados. É possível verificar semelhanças no comportamento dos ecossistemas, principalmente no que diz respeito ao rebaixamento do nível de trofia devido a redução do aporte de nutrientes.

Assim, o cenário de seca simulado por Zouabi e Gueddari (2014) configurou-se num decréscimo da vazão de entrada, da cobertura de nuvens e da velocidade do vento por 60%, além de um aumento da temperatura de 5°C comparado com o ano de referência. Se a superfície do reservatório estiver abaixo de 49m não haverá vazão de retirada. Os resultados indicam um aumento na temperatura na coluna da água na ordem de 1,5 a 5°C no verão e de 0,3 a 1,2°C no inverno. O oxigênio dissolvido tem sua oxiclina diminuída de 5 a 7 metros de espessura para 2 a 4 metros e, ao final tende a chegar com valores próximos a zero.

Ao simular um cenário de chuvas intensas no verão, Zouabi e Gueddari (2014) aumentaram o volume precipitado em 50x para o mês de agosto (2005). Como resultado, houve um aumento do nível do reservatório em 6 metros, ainda, há um aumento na temperatura superficial em 1,7°C, enquanto a temperatura em profundidade permanece inalterada. Os autores confirmam através da simulação que chuvas intensas de verão causam alterações na estrutura térmica do reservatório, uma vez que a chuva tem densidade superior a água do reservatório.

No trabalho de Diogo et al. (2008) a implementação do cenário 1, com 90% de redução da entrada de nutrientes no sistema, teve pouca influência na concentração média de fósforo no reservatório. Da mesma forma, a influência na concentração média de clorofila *a* também foi limitada, exceto em uma redução num pico registrado em 2003. No cenário 2, a redução de 100% dos nutrientes na entrada do reservatório, há uma diminuição mais significativa, principalmente na clorofila *a*. Ambos os cenários, além da situação base, mostram que o reservatório de Alqueva é bastante eutrofizado. Mesmo com a redução total de nutrientes originados na parte lusa do reservatório (o reservatório é binacional entre Portugal e Espanha), os resultados obtidos não são suficientes para promover uma melhora considerável na qualidade da água.

Deus et al. (2013), após a validação do modelo ao reservatório, utilizaram o CE-QUAL-W2 para a previsão do impacto da piscicultura no estado trófico do sistema utilizando a concentração de fósforo e clorofila *a* como indicadores. Os cenários mostram que um aumento de 30% em 2007 e pelo menos 10% entre 2008 e 2011 resulta em uma mudança no índice de estado trófico de oligotrófico para mesotrófico, porém de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 o reservatório Tucuruí não é considerado contaminado. Ainda, os resultados mostram que a razão N:P do reservatório Tucuruí é próximo de 100, identificando o fósforo como o nutriente limitante. Assim, estratégias para reduzir os níveis de fósforo no reservatório podem dar importante contribuição para a redução dos níveis de eutrofização do mesmo.

Os resultados obtidos para as simulações de estiagem, seca, aumento e redução da carga poluidora foram corroborados pelos trabalhos recentemente publicados na literatura. Principalmente nas situações onde o cenário simulado neste trabalho era similar com a situação simulada na bibliografia, como em Zouabi e Gueddari (2014) e Diogo et al. (2008)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o processo de eutrofização que ocorreu no reservatório do rio Vacacaí Mirim, nos anos de 2010 e 2011, por meio da modelagem da qualidade da água através do modelo CE-QUAL-W2.

O estudo do reservatório do Vacacaí Mirim foi a primeira etapa realizada nesta pesquisa. A correta representação da batimetria do reservatório, juntamente com o processo hidrodinâmico bem definido, são etapas preliminares do processo de modelagem da qualidade da água em reservatório e tem fundamental importância na precisão dos resultados posteriores à modelagem. A batimetria do reservatório no modelo obteve um volume de 3,41 Mm³, uma diferença percentual de -0,017 para o valor encontrado por Dill (2002). Sabendo que o reservatório passa por processo de assoreamento, acredita-se que há uma diferença entre o valor medido em 2002 e o valor do volume em 2010, validando a batimetria do modelo.

De posse da batimetria, das condições de contorno e dos parâmetros de entrada do modelo, foi realizada a calibração do CE-QUAL-W2. A calibração foi executada de maneira manual, observando a variabilidade das respostas do modelo frente à perturbação dos parâmetros.

Os resultados obtidos na calibração foram muito bons para alguns parâmetros, como para a temperatura, OD e NH₄, com os valores simulados bem próximos aos valores observados. Obteve-se valores de EAM entre 0,31 e 2,28°C para temperatura e REQM de 0,16 a 0,56°C, EAM entre 0,28 e 2,53 mg/L e REQM de 0,09 e 0,90 mg/L para o OD e EAM entre 0,00 e 0,24 mg/L e REQM entre 0,02 e 0,48 mg/L para NH₄.

E, resultados de razoáveis a bons para outros parâmetros como NO_x, fosfato, fósforo total e clorofila: valores de EAM entre 0,11 e 0,51 mg/L para NO_x e REQM de 0,16 a 1,25 mg/L, EAM entre 0,01 e 0,05 mg/L e REQM de 0,05 e 0,19 mg/L para o PO₄, EAM entre 0,03 e 0,10 mg/L e REQM de 0,09 e 0,27 mg/L para o PT e EAM entre 0,00 e 0,34 mg/L e REQM entre 0,00 e 0,03 mg/L para clorofila *a*. Essa maior variação se deu devido aos poucos dados observados disponíveis para a calibração, e também da baixa concentração destes parâmetros, pois qualquer variação da concentração resulta em erros consideráveis.

Com o modelo ajustado e calibrado, foi possível propor cenários críticos, com a finalidade de se entender o comportamento do reservatório frente a situações extremas. E, assim, avaliou-se a qualidade da água do reservatório frente ao IET e a Resolução CONAMA 357/2005. Os resultados obtidos são listados a seguir.

O primeiro cenário proposto foi de continuação da estiagem que assolava o verão de 2011, este cenário mostrou que a estiagem é prejudicial para a qualidade da água, atingindo os picos de concentração de nutrientes encontrados ao longo do ano em pouco mais de 30 dias. Esse aumento da concentração dos nutrientes ocasiona em uma água de qualidade piorada, prejudicando a classificação do reservatório nos valores de referência estabelecidos para a Classe 3, além do aumento do índice de estado trófico, para hipereutrófico e, por último do esvaziamento do reservatório.

De forma antagônica, o segundo cenário proposto foi de aumento do volume precipitado em 20 e 50x. Após as simulações, o resultado foi de uma diluição dos constituintes, diminuindo sua concentração, conseqüentemente mantendo o reservatório em grande parte do tempo dentro dos limites estabelecidos para a Classe 3, da Resolução CONAMA 357/2005. Há uma diminuição da concentração do OD, que pode ser explicada devido ao aumento da poluição difusa, dado o grande volume de chuva. Como implicação da diminuição da concentração dos nutrientes, o índice de estado trófico do reservatório é classificado em mesotrófico e oligotrófico.

O terceiro cenário é o de aumento da carga poluidora, que seria ocasionado devido ao aumento populacional que de fato vem ocorrendo na região. Foram três faixas de aumento, 33, 66 e 99% da carga de entrada no reservatório. Os resultados obtidos mostram que para o OD, NH₄ e NO_x não há problema com relação ao atendimento dos valores de referência para a classe 3, estabelecidos na Resolução CONAMA 357/2005. Por outro lado, PT e clorofila *a* estão acima dos limites estabelecidos, resultando numa água imprópria para o consumo mesmo após tratamento avançado. Além disso, há também o aumento do grau de trofia do reservatório, alcançando em boa parte do tempo seu nível máximo, hipereutrófico.

E, por fim, o último cenário simulado foi o da diminuição da carga de entrada no reservatório, significando um aumento do tratamento dos efluentes das casas a montante do reservatório. Novamente, foram propostas reduções de 33, 66 e 99% da carga, sendo que a partir de 66% já se tem consideráveis ganhos de qualidade

da água, com apenas alguns picos de concentração de clorofila *a* excedendo o limite da Classe 3. Legitimando, com o mesmo percentual de redução, o índice de estado trófico do reservatório na maior parte do tempo é classificado como mesotrófico, cuja classificação é caracterizada como nível aceitável de eutrofização.

Em suma, o modelo CE-QUAL-W2 se mostrou adequado para a simulação da eutrofização do reservatório do rio Vacacaí Mirim. Conseguiu representar os processos hidrodinâmicos, o comportamento térmico e as interações entre a fauna, a flora e o impacto da urbanização na bacia de drenagem no reservatório. Além disso, foi possível expor as limitações do reservatório frente as situações de estiagem e do aumento populacional sem que haja planejamento.

Enfatizando o uso do modelo aplicado ao reservatório, a Resolução CONAMA 430/2011 não estabelece padrões específicos de nutrientes a serem atendidos no lançamento de efluente sanitário. Ficou evidente nas simulações que os níveis de concentração dos nutrientes são prejudiciais para a qualidade da água, principalmente os níveis de fósforo total. Assim, recomenda-se uma revisão da Res. CONAMA 430/2011 para que se tenha uma maior proteção dos corpos hídricos.

Como forma de continuidade desta pesquisa, sugere-se para trabalhos futuros:

- Atualizar a batimetria do reservatório, de modo que a nova batimetria seja inserida no modelo a fim de se minimizar os erros ao diminuir o espaço temporal entre a batimetria e os dados de entrada do modelo.

- Otimizar os parâmetros observados de qualidade da água, de modo que estes sejam utilizados não só para a caracterização do reservatório, mas que também possam ser utilizados para a modelagem da qualidade da água.

- Realizar um novo monitoramento hidrodinâmico e de qualidade da água a fim de se realizar a comparação dos resultados obtidos por Burin (2011) e a nova pesquisa. Desta forma, pode-se identificar resultados *outliers* e o por quê de sua ocorrência.

- Realização nova simulação com os novos dados de entrada obtidos e verificar o comportamento do modelo CE-QUAL-W2 e o reservatório do Vacacaí Mirim frente a um novo conjunto de dados.

- Elaborar um mecanismo de calibração automática do modelo CE-QUAL-W2 visando facilitar sua operação e reduzir o tempo gasto com a etapa de calibração manual.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas - ANA. **Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012**. Brasília: Ana, 264 p, 2012.
- BOCANIOV, S. A. et al. Internal waves and mixing in a stratified reservoir: Insights from three-dimensional modeling. **Limnologia - Ecology and Management of Inland Waters**, v. 49, p. 52–67, nov. 2014.
- BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) – Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em janeiro de 2015.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso em janeiro de 2015.
- BROWN, L. C.; BARNWELL, T. O. **The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual**. Department of Civil Engineering, Tufts University and Environmental Research Laboratory, USEPA, Cooperative Agreement N.º 811883, Athens, Georgia, USA, 1987
- BURIN, R. **Variabilidade da qualificação da água e do estado trófico do reservatório do Vacacaí Mirim. 2011**. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- CAÑEDO-ARGÜELLES, M. et al. Annual characterisation of four Mediterranean coastal lagoons subjected to intense human activity. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, Research and Management for the conservation of coastal lagoon ecosystems. v. 114, p. 59–69, dez. 2012.
- CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnol. Oceanogr.** v. 22, n. 2, p. 361–369. 1977.
- CAVALCANTI, P. et al. Contamination from an affluent of Furnas reservoir by trace metals. **Braz. J. Biol.**, v. 74, n. 4, p.877-885, 2014.
- CE-QUAL-W2. **Wiki**. Disponível em: <http://www.cequalw2wiki.com/CE-QUAL-W2_Wiki>. Acesso em: jan. 2015.
- CHALAR, G. et al. Trophic assessment of streams in Uruguay: A Trophic State Index for Benthic Invertebrates (TSI-BI). **Ecological Indicators**, v. 11, n. 2, p.362-369, mar. 2011.

CHAPRA, S. C. **Surface water-quality modeling**. Nova Iorque: WCB Mcgraw-Hill, -1997, 844 p.

CHRISTIA, C. et al. Assessment of ecological quality of coastal lagoons with a combination of phytobenthic and water quality indices. **Marine Pollution Bulletin**, v. 86, n. 1–2, p. 411–423; set. 2014.

COLE, T.M., WELLS, S.A. **CE-QUAL-W2 A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.7**. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR. 783p. 2013.

CONROY, J. D. et al. “Dead Zone” dynamics in Lake Erie: the importance of weather and sampling intensity for calculated hypolimnetic oxygen depletion rates. **Aquatic Sciences**, v. 73, n. 2, p. 289–304, mai. 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2005. **Resolução Conama no 357**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acesso em 31/05/2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. 2011. **Resolução Conama no 430**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>> Acesso em 20/11/2015.

CUNHA, D. G. F. et al. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). **Ecological Engineering**, v. 60, p. 126–134, 2013a.

CUNHA, D. G. F. et al. Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005–2009). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 18, n. 2, p.159-168, 2013b.

DEUS, R. et al. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 1–12, abr. 2013.

DILL, P. R. J. **Assoreamento do reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte**. 2002. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DIOGO, P.A. et al. Reservoir phosphorous sources evaluation and water quality modeling in a transboundary watershed. **Desalination**, v. 226, n. 1-3, p.200-214, jun. 2008.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. et al. Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.12 – n. 4, p. 399-409, 2007.

GASTALDINI, M. C. C. **Análise do mecanismo de autodepuração do rio Jacaré-Guaçu através de modelo de qualidade da água.** 1982. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

GASTALDINI, M. C. C. et al. Influência das características hidrológicas na avaliação da qualidade da água do reservatório do arroio Vacacaí-Mirim. In: Congresso Interamericano De Engenharia Sanitária E Ambiental, 27. **Anais...** . Porto Alegre: Aidis, 10p. 2000.

GASTALDINI, M. C. C. et al. Inter-relações entre dados de monitoramento de qualidade da água e hidrológico - Aplicação ao reservatório do Arroio Vacacaí-Mirim. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 6, n.1, p. 24-30, 2001.

GASTALDINI, M. C. C. et al. Aplicação de Modelo Matemático a Dados de Ciclos de Estratificação Térmica e de Qualidade da Água do Reservatório do Vacacaí Mirim. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* , v.9,n.1, p.27 35,2004.

GOLDANI, J. Z. **Ocupação antrópica e sócio-ambiental na área de captação do DNOS Santa Maria-RS.** 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geomática, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B.. Another look at measures of forecast accuracy. **International Journal Of Forecasting**, v. 22, n. 4, p.679-688, out. 2006.

LAMPARELLI, M. C. **Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento.** 2004. 238 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

LEE, H. W. et al. Effects of climate change on the thermal structure of lakes in the Asian Monsoon Area. **Climatic Change**, v. 112, n. 3-4, p. 859–880, jun. 2012.

LIU, W. et al. Impact of phosphorus load reduction on water quality in a stratified reservoir-eutrophication modeling study. **Environmental Monitoring And Assessment**, v. 159, n. 1-4, p.393-406, nov. 2008.

LIU, M. et al. A coupled modeling approach to evaluate nitrogen retention within the Shanmei Reservoir watershed, China. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, p.1-10, jun. 2015.

LIU, W. C.; CHEN, W. B. Modeling hydrothermal, suspended solids transport and residence time in a deep reservoir. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, n. 2, p. 251–260, mar. 2013.

MATONSE, A. H. et al. Investigating the impact of climate change on New York City's

primary water supply. **Climatic Change**, v. 116, n. 3-4, p. 437–456, fev. 2013.

MORETTO, D. L. et al. Calibration of water quality index (WQI) based on Resolution nº 357/2005 of the Environment National Council (CONAMA). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p.29-42, 2012.

PARK, Y. et al. Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. **Science of The Total Environment**, v. 466–467, p. 871–880, jan. 2014.

PARK, Y. et al. Stressor–response modeling using the 2D water quality model and regression trees to predict chlorophyll-a in a reservoir system. **Journal Of Hydrology**, v. 529, p.805-815, out. 2015.

PARSA, J.; SHAHIDI, A. E. Prediction of tidal excursion length in estuaries due to the environmental changes. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 7, n. 4, p. 675–686, set. 2010.

PSU, Portland State University. Water Quality Resesearch Group: Hydrodynamic and Water Quality Model. Disponível em: <<http://www.ce.pdx.edu/w2/>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

SAADATPOUR, M.; AFSHAR, A. Multi Objective Simulation-Optimization Approach in Pollution Spill Response Management Model in Reservoirs. **Water Resources Management**, v. 27, n. 6, p. 1851–1865, abr. 2013.

SHOKRI, A. et al. Multi-Objective Quantity–Quality Reservoir Operation in Sudden Pollution. **Water Resources Management**, v. 28, n. 2, p. 567–586, jan. 2014.

SILVA, G. V. Simulação bidimensional da qualidade da água do lago do Descorberto (DF/GO). 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SOUZA, R. S. **Simulação hidrodinâmica da qualidade da água. Estudo de caso: ajuste do modelo CE-QUAL-W2 à sub-bacia do arroio Demétrio, bacia hidrográfica do rio Gravataí/RS**. 2006. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B.. A study of the pollution and natural purification of the Ohio River: III. **Factors concerned in the phenomena of the oxidation and reaeration**. Public Health Bulletin, Washington, v. 146, p.1-80, fev. 1925.

SULIS, A. et al. Using reservoir trophic-state indexes in optimisation modelling of water-resource systems. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 6, p. 731–738, jun. 2011.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 632 p.

USEPA, United States Environmental Protection Agency. **River and Stream Water Quality Model (QUAL2K)**. Disponível em: <<http://epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Vol. 1. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. SEGRAC. Belo Horizonte. 452 p. 2005

WANG, C. Y. et al. Floating treatment wetland nutrient removal through vegetation harvest and observations from a field study. **Ecological Engineering**, Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857414002274>>. Acesso em: 28 out. 2014.

WANG, S. et al. Modeling Turbidity Intrusion Processes in Flooding Season of a Canyon-Shaped Reservoir, South China. **Procedia Environmental Sciences**, 2012. 18th Biennial ISEM Conference on Ecological Modelling for Global Change and Coupled Human and Natural System. v. 13, p. 1327–1337. 2012.

XU, F. L. et al. The variations of exergies and structural exergies along eutrophication gradients in Chinese and Italian lakes. **Ecological Modelling**, Wetlands in China. v. 222, n. 2, p. 337–350, jan. 2011.

YU, S. J. et al. Effect of a seasonal diffuse pollution migration on natural organic matter behavior in a stratified dam reservoir. **Journal of Environmental Sciences**, v. 22, n. 6, p. 908–914, jun. 2010.

ZHANG, Z.; SUN, B.; JOHNSON, B. E.. Integration of a benthic sediment diagenesis module into the two dimensional hydrodynamic and water quality model – CE-QUAL-W2. **Ecological Modelling**, v. 297, p.213-231, fev. 2015.

ZOU, R. et al. Uncertainty-based analysis on water quality response to water diversions for Lake Chenghai: A multiple-pattern inverse modeling approach. **Journal of Hydrology**, v. 514, p. 1–14, jun. 2014.

ZOUABI-ALOUI, B.; GUEDDARI, M. Two-dimensional modelling of hydrodynamics and water quality of a stratified dam reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea. **Environmental Earth Sciences**, p. 1–15, abr. 2014.

ZOUABI-ALOUI, B.; ADELANA, S. M.; GUEDDARI, M. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach. **Environmental Monitoring And Assessment**, v. 187, n. 5, p 1–19., abr. 2015.