

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

Taiane Menezes Conterato

**SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO
VACACAÍ MIRIM UTILIZANDO O MODELO CE-QUAL-W2**

Santa Maria, RS
2016

Taiane Menezes Conterato

**SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ
MIRIM UTILIZANDO O MODELO CE-QUAL-W2**

Dissertação apresentada ao Curso 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 título de **Mestre em Engenharia Civil**.

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

Santa Maria, RS
2016

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

Menezes Conterato, Taiane
Simulação da qualidade da água do reservatório do
Vacacaí Mirim utilizando o modelo CE-QUAL-W2 / Taiane
Menezes Conterato.-2016.
94 f.; 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. Modelos matemáticos 2. Simulação 3. Parâmetros de
qualidade da água I. Cauduro Gastaldini, Maria do Carmo
II. Título.

© 2016

Todos os direitos autorais reservados a Taiane Menezes Conterato. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
e-mail: taianeconteratto@gmail.com

Taiane Menezes Conterato

**SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ
MIRIM UTILIZANDO O MODELO CE-QUAL-W2**

Dissertação apresentada ao Curso 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 título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2016:



Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)



Rutinéia Tassi, Dra. (UFSM)



Lucia Helena Ribeiro Rodrigues, Dra. (UFRGS)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Enio e Carla, pela determinação e esforço, e ao meu querido avô Pedro Conterato (in memoriam), por sempre ter me incentivado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me dar saúde e perseverança para continuar atrás dos meus objetivos, superando as adversidades.

Aos meus pais Enio e Carla, que sempre apoiaram e auxiliaram os meus estudos, acreditando na minha capacidade.

À professora Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, pela orientação, amizade, ensinamentos e confiança em meu trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino gratuito e de qualidade, desde o ensino médio, graduação e na pós-graduação.

Aos servidores e professores do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelo apoio.

Ao grupo GHIDROS, pelas instalações utilizadas durante este estudo.

Ao colega Vinícius Kuchinski e ao bolsista de iniciação científica, Mateus Henrique Schmidt, que me ajudaram na realização deste estudo.

Aos colegas e amigos, pelas horas de descontração, risadas e companheirismo: Sizabeli Amaral, Osmar Schmidt Filho, Glaucia Pivetta, Marielle Medeiros, Roberta Lisboa, Adriano Kappes, Cristiane Graepin, Deise Michelotti e José Astério do Carmo.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida.

À FINEP pelo apoio à pesquisa.

A todos,

Muito Obrigada!

*“Viva como se fosse morrer amanhã.
Aprenda como se fosse viver para sempre.”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM UTILIZANDO O MODELO CE-QUAL-W2

AUTORA: Taiane Menezes Conterato
ORIENTADORA: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

A poluição e o uso inadequado das águas são problemas, frequentemente, abordados, pois a água é um recurso limitado, que necessita de uma melhor gestão e conservação. Para auxiliar os estudos referentes a lagos, rios, reservatórios e estuários, cada vez mais, têm sido usados modelos matemáticos de qualidade da água. O CE-QUAL-W2 é um software que simula a variação da qualidade da água nas direções vertical e horizontal, possui vários recursos, e já foi utilizado por diversos autores. Em Santa Maria, o reservatório do Vacacaí Mirim possui grande importância, visto que é responsável por fornecer parte da água que abastece a cidade. Porém, o reservatório tem sofrido com a poluição, vinda das áreas próximas ao mesmo. Logo, o modelo CE-QUAL-W2 foi utilizado para simular alguns parâmetros de qualidade da água do reservatório, como: temperatura da água, OD, DBO e *E.coli*. Utilizou-se resultados de monitoramento realizado nos anos de 2010 e 2011. Os erros médios absolutos (EMA's) das temperaturas simuladas, em relação às observadas, variaram de 0,4 a 3,1°C, e os erros padrões (EP's), de 0,4 a 3,5°C. Para o OD, os EMA's variaram de 0,5 a 1,9 mg/L e os EP's, de 0,7 a 2,2 mg/L. No caso da DBO, esta obteve EMA's entre 0,1 e 2,5 mg/L, e os EP's entre 0,1 e 2,5 mg/L. Por último, a simulação da *E.coli* obteve EMA's entre 1 e 230 NMP/100mL, e EP's, entre 1 e 235 NMP/100mL. Com base nos perfis simulados pelo CE-QUAL-W2, pode-se afirmar que os parâmetros OD e temperatura apresentaram os melhores resultados, e a *E.coli*, as maiores dificuldades para a calibração, devido à sua variabilidade e carência de dados. Na simulação de cenários, primeiramente, utilizou-se dados dos censos demográficos de 2000 e 2010, para estimar a população na bacia no ano de 2050. O aumento populacional foi de 56%. Embora a população no local tenha aumentado consideravelmente, a qualidade da água sofreu uma leve queda. Pois, o OD era 5,5 mg/L em 2010, e atingiu 4,4 mg/L em 2050, durante o verão, não prejudicando as demais estações. Em uma segunda previsão, admitiu-se a instalação de um empreendimento, que lançasse grande quantidade de efluente no reservatório, como um abatedouro de aves (125.000 aves/dia). Neste caso, a qualidade da água apresentou uma queda mais acentuada, com aumento da matéria orgânica, atingindo 5,1mg/L em alguns pontos, e diminuição do OD, com concentrações próximas a zero, não obedecendo os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005, para o abastecimento urbano. Dessa forma, pode-se afirmar que o modelo consegue representar o comportamento dos parâmetros de qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim, e realizar previsões, podendo ser útil, em demais estudos no local e na gestão do reservatório.

Palavras-chave: Modelos matemáticos. Simulação. Parâmetros de qualidade da água.

ABSTRACT

WATER QUALITY SIMULATION OF VACACAÍ MIRIM RESERVOIR USING CE-QUAL-W2 MODEL

AUTHOR: Taiane Menezes Conterato
ADVISOR: Maria do Carmo Cauduro Gastaldini

The pollution and inadequate use of waters are problems that have been discussed frequently, because the water is a limited resource, which needs better management and conservation. Mathematical models of water quality have been used to assist studies relating to lakes, rivers, reservoirs and estuaries. The CE-QUAL-W2 is a software that simulates the change in water quality in the vertical and horizontal directions, it has several resources, and has been used by many authors. In Santa Maria, the Vacacaí Mirim reservoir has great importance, since it is responsible to provide part of the water that supplies the city. However, the reservoir has suffered from pollution coming from near areas. So, CE-QUAL-W2 model was used to simulate some water quality parameters of the reservoir, such as: water temperature, DO, BOD, and *E.coli*. We used results of monitoring realized in the years 2010 and 2011. The mean absolute errors (MAE's) of the simulated temperatures, compared to observed, varied from 0.4 to 3.1°C, and standard errors (SE's), 0.4 to 3.5°C. For the DO, the MAE's varied from 0.5 to 1.9 mg /L and SE's, 0.7 to 2.2 mg /L. In the case of BOD, this obtained MAE's between 0.1 to 2.5 mg/L, and SE's between 0.1 to 2.5 mg/ L. Finally, the simulation of *E.coli* obtained MAE's between 1 and 230 MPN/100mL, and SE's between 1 to 235 MPN/100mL. Based on simulated profiles for CE-QUAL-W2, it might be said that parameters DO and temperature showed the best results, and *E. coli*, the biggest difficulties for calibration, due to their variability and lack of data. In the simulation scenario, firstly, it was used data by 2000 and 2010 demographic census, to estimate the population in the basin in 2050. The population increase was 56%. Although, the population at the local has increased considerably, the water quality has suffered a slight drop. Because, DO was 5.5 mg/L in 2010, and reach 4.4 mg/L in 2050, during the summer, not harming other seasons. In a second prediction, the installation of an enterprise was admitted, which launched large amount of wastewater in the reservoir, as a poultry slaughterhouse (125,000 chicken /day). In this case, the water quality showed a sharper declined, which increase in organic matter, reaching 5.1 mg/L at some points, and decreased of DO, with concentrations close to zero, not obeying the limits established by CONAMA Resolution 357/05, for the urban supply. In this way, we can said that the model simulates the behavior of water quality parameters in Vacacai Mirim reservoir, and makes predictions, it may be useful in other studies at the local and in reservoir management.

Keywords: Mathematical models. Simulation. Water quality parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço de oxigênio dissolvido.	22
Figura 2 - Características das zonas dos reservatórios: (A) zona fluvial; (B) zona de transição; (C) Zona lacustre; (a) epilímnio; (b) hipolímnio.	23
Figura 3 - Evolução dos modelos de qualidade da água.	26
Figura 4 - Localização dos pontos de monitoramento no reservatório do Vacacaí Mirim.	34
Figura 5 - Vazões lidas nas campanhas.	35
Figura 6 - Precipitações mensais ocorridas entre janeiro de 2010 e fevereiro de 2011.	36
Figura 7 - Perfil de temperatura da água no ponto 2.	37
Figura 8 - Perfil de temperatura da água no ponto 4.	38
Figura 9 - Variabilidade da temperatura da água nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).	38
Figura 10 - Variação do OD nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).	39
Figura 11 - Variação da DBO nas amostras de superfície (S) e profundidade (P). ...	40
Figura 12 - Concentração de E.coli nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).	40
Figura 13 - Curvas hipsométricas do reservatório.	41
Figura 14 - Tipos de uso do solo da bacia contribuinte ao reservatório do Vacacaí Mirim no ano de 2010.	42
Figura 15 - Localização do reservatório do Vacacaí Mirim.	44
Figura 16 - Precipitação sobre Santa Maria, durante os anos de 2010 e 2011.	47
Figura 17 - Temperatura do ar em Santa Maria, nos anos 2010 e 2011.	47
Figura 18 - Temperatura de ponto de orvalho em Santa Maria, nos anos de 2010 e 2011.	48
Figura 19 - Vistas superior, frontal e perfil longitudinal do reservatório, gerados pelo modelo CE-QUAL-W2.	56
Figura 20 - Elevações observadas e simuladas da superfície da água do reservatório do Vacacaí Mirim, com indicação dos dias julianos estudados.	58
Figura 21 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.	59
Figura 22 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.	60
Figura 23 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.	61
Figura 24 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.	61
Figura 25 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 02 de dezembro de 2010, dia juliano 336.	62
Figura 26 - Resultado da calibração do OD para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.	64
Figura 27 - Resultado da calibração do OD para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.	65
Figura 28 - Resultado da calibração do OD para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.	65
Figura 29 - Resultado da calibração do OD para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.	66

Figura 30 - Resultado da calibração do OD para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.....	66
Figura 31 - Resultado da calibração da DBO para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.	70
Figura 32 - Resultado da calibração da DBO para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.....	70
Figura 33 - Resultado da calibração da DBO para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.....	71
Figura 34 - Resultado da calibração da DBO para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.	71
Figura 35 - Resultado da calibração da DBO para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.	72
Figura 36 - Resultado da calibração da <i>E.coli</i> para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.....	74
Figura 37 - Resultado da calibração da <i>E.coli</i> para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.	75
Figura 38 - Resultado da calibração da <i>E.coli</i> para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.	75
Figura 39 - Resultado da calibração da <i>E.coli</i> para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.....	76
Figura 40 - Resultado da calibração da <i>E.coli</i> para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.	76
Figura 41 - Validação da temperatura para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406.....	78
Figura 42 - Validação do OD para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406. ...	79
Figura 43 - Validação da DBO para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406. .	79
Figura 44 - Validação da <i>E.coli</i> para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406. .	80
Figura 45 - Simulação de cenários considerando o aumento da população na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim- efeitos na DBO.	81
Figura 46 - Simulação de cenários considerando o aumento da população na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim- efeitos no OD.....	82
Figura 47 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 104, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	83
Figura 48 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 104, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	83
Figura 49 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 279, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	84
Figura 50 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 279, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	84
Figura 51 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 336, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	85
Figura 52 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 336, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. .	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas planas dos pontos de coleta.	34
Tabela 2 - Usos do solo da bacia do reservatório do Vacacaí Mirim nos anos de 2003 e 2010.	43
Tabela 3 - Datas das coletas transformadas em dias julianos.	45
Tabela 4 - Cotas observadas do reservatório do Vacacaí Mirim.	50
Tabela 5 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da temperatura da água, em relação aos dados observados.	59
Tabela 6 - Resultados dos parâmetros relacionados com a temperatura.	63
Tabela 7 - Erros médios absolutos e padrões da simulação do OD na água, em relação aos dados observados.	63
Tabela 8 - Taxas e constantes relacionados ao SOD.	68
Tabela 9 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da DBO na água, em relação aos dados observados.	69
Tabela 10 - Taxas e coeficientes relacionados à DBO.	73
Tabela 11 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da <i>E.coli</i> na água, dados em NMP/100mL, em relação aos valores observados.	73
Tabela 12 - Parâmetros e valores utilizados na calibração da <i>E.coli</i>	77
Tabela 13 - Erros médios absolutos e padrões da validação dos resultados.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CCC GCM	Canadian Climate Centre General Circulation Model
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
C.F	Coliforme fecal
Cfa	Clima subtropical úmido
cm	Centímetro
CMDT	Carga máxima total diária
CO ₂	Dióxido de carbono
Coef.	Coeficiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxigênio de 5 dias
DBO _C	Demanda bioquímica de oxigênio carbonácea
DBO _n	Demanda bioquímica de oxigênio nitrogenada
DNOS	Departamento Nacional de Obras e Saneamento
DQO	Demanda química de oxigênio
<i>E.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EMA	Erro médio absoluto
EP	Erro padrão
g	grama
GLVHT	Generalized Longitudinal-Vertical Hydrodynamics and Transport Model
ha	Hectare
IAP	Índice de qualidade da água bruta para fins de abastecimento público
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IQA	Índice de qualidade da água
IVA	Índice de qualidade de água para a proteção da vida aquática
KBOD	Taxa de decaimento da DBO no 5º dia, a 20°C (dia ⁻¹)
KBOD ₂₀	Taxa de decaimento da DBO a 20°C
Km	Quilômetro
Km ²	Quilômetro quadrado
L	Litro
LARM	Laterally Averaged Reservoir Model
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm	Milímetro
nº	Número
NH ₄ ⁺	Amônio
NMP	Número mais provável
NO ₂ ⁻	Nitrito

NO ₃ ⁻	Nitrato
O ₂	Oxigênio gasoso
OD	Oxigênio dissolvido
OMS	Organização Mundial da Saúde
P1,P2,P3, P4, P5	Pontos de monitoramento
pH	Potencial Hidrogeniônico
RBOD	Relação entra a DBO ₅ e a DBO última
s	Segundo
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SOD	Demanda bentônica
SST	Sólidos suspensos totais
T	Temperatura
TBOD	Coeficiente de ajuste da temperatura
TSED	Temperatura de sedimento
US	United States
USEPA	US Environmental Protection Agency
°C	Grau Celsius

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3 REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 SITUAÇÃO DAS ÁGUAS DOCES EM ZONAS URBANAS	17
3.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA	18
3.3 USOS DA ÁGUA E PADRÕES DE QUALIDADE	20
3.4 DIFERENÇAS BÁSICAS ENTRE RIOS E RESERVATÓRIOS	22
3.5 MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA	24
3.6 O MODELO CE-QUAL-W2	27
3.6.1 Aplicações do CE-QUAL-W2	29
4 ESTUDOS REALIZADOS NO RESERVATÓRIO	33
4.1 PONTOS DE MONITORAMENTO DO RESERVATÓRIO	33
4.2 VAZÃO E PRECIPITAÇÃO	35
4.3 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO	36
4.3.1 Obtenção e resultados dos parâmetros	36
4.4 BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM	40
5 METODOLOGIA	42
5.1 ÁREA DE ESTUDO	42
5.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS	45
5.3 BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO NO MODELO CE-QUAL-W2	46
5.4 DADOS METEOROLÓGICOS	46
5.5 PARÂMETROS CINÉTICOS	48
5.6 CALIBRAÇÃO	48
5.6.1 Calibração do nível do reservatório	50
5.6.2 Calibração da temperatura da água	51
5.6.3 Calibração do OD	51
5.6.4 Calibração da DBO	52
5.6.5 Calibração da <i>E.coli</i>	52
5.7 VALIDAÇÃO	53
5.8 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	53
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 REPRESENTAÇÃO DA BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO	56
6.2 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO	57
6.3 RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA	58
6.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO OD	63
6.5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA DBO	68
6.6 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA <i>E.COLI</i>	73
6.7 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	78
6.8 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	80
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	87
REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Rios e córregos são importantes componentes do ambiente natural e precisam ser protegidos das fontes de poluição, pois a sobrevivência do homem depende do uso sustentável das águas. Entretanto, os rios estão, frequentemente, sob a ameaça de diferentes poluentes, que incluem os convencionais (matéria orgânica, nutrientes inorgânicos e microrganismos) e substâncias perigosas (contaminantes orgânicos, metais pesados e fármacos). Embora a qualidade das águas dos rios possa ser influenciada por fenômenos naturais, como o clima e a geologia, as principais fontes de poluição estão relacionadas às atividades antrópicas: mineração, agricultura, silvicultura, pecuária e urbanização (DEKSISSA et al., 2004).

Em reservatórios, de acordo com Mustapha (2008), a deterioração das águas origina-se de uma entrada excessiva de nutrientes, eutrofização, acidificação, contaminação por metais pesados e poluentes orgânicos. Estes afetam o reservatório, não somente na sua função socioeconômica, como também, na sua biodiversidade.

Uma alternativa para auxiliar nos estudos referentes à qualidade de lagos, rios e reservatórios, é o uso de softwares de simulação. Estes incluem a análise do transporte de nutrientes e outros contribuintes. Além disso, a evolução dessas ferramentas tem permitido a realização de análises multidimensionais da hidrodinâmica da coluna d'água, gerando previsões mais adequadas dos processos físico-químicos e biológicos que ocorrem (ORLOB, 1983; THOMANN e MUELLER, 1987; CHAPRA, 1997; KUO e YANG, 2002; SILVA, 2006; KUO et al., 2006; SILVA, 2009).

Conforme Gastaldini et al. (2004), os modelos matemáticos para a simulação da qualidade da água têm sido empregados na tomada de decisões referentes à gestão dos recursos hídricos, proporcionando a simulação de eventos, de condições futuras e de alternativas para auxiliar o corpo hídrico, além de identificarem os fatores que afetam a qualidade da água, como o lançamento de poluentes.

O CE-QUAL-W2 é um modelo de qualidade da água que apresenta a capacidade de simular mais de 20 parâmetros, combinando algoritmos hidrodinâmicos com os de qualidade da água, avaliando as variações dos parâmetros ao longo dos eixos longitudinal e vertical. Ainda, aqueles que não forem utilizados podem ser omitidos, fornecendo uma maior simplicidade ao modelo. Ademais, possui grande aplicabilidade em reservatórios, podendo assim, ser utilizado para a avaliação das

características do reservatório do Vacacaí Mirim, situado na região central do Estado do Rio Grande do Sul.

Em Santa Maria, o reservatório do Vacacaí Mirim tem tido a qualidade de suas águas afetada, pois próximo ao mesmo tem ocorrido um aumento da urbanização, além de atividades agrícolas. Este reservatório foi implantado em 1972 e, atualmente, suas águas são utilizadas para o abastecimento doméstico e recreação (GASTALDINI et al., 2004). Ainda, segundo dados obtidos com a concessionária de abastecimento, Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), 30% de toda a água fornecida para a cidade provém deste reservatório. Dessa forma, torna-se fundamental o controle adequado da qualidade das águas do reservatório, para garantir a continuidade de seu uso pela população.

Assim, este estudo torna-se importante, pois será aplicado o modelo CE-QUAL-W2 para o reservatório do Vacacaí Mirim, afim de simular parâmetros como a temperatura, o oxigênio dissolvido, a demanda bioquímica de oxigênio e a *Escherichia coli*. Constituindo, dessa forma, uma ferramenta que poderá auxiliar na simulação de cenários, estudos futuros no local e na gestão do reservatório.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é analisar a qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim, considerando os parâmetros: temperatura da água, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e *Escherichia coli*, através do modelo CE-QUAL-W2.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar os dados de batimetria, vazão e qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim.

Realizar a calibração e validação do modelo matemático CE-QUAL-W2, para os parâmetros: temperatura da água, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e *Escherichia coli*, como subsídio à tomada de decisão sobre a gestão do reservatório.

Simular cenários futuros para o reservatório do Vacacaí Mirim, considerando o aumento da população no local e a instalação de um empreendimento na bacia, que potencialmente degradam a qualidade da água do reservatório.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 SITUAÇÃO DAS ÁGUAS DOCES EM ZONAS URBANAS

Devido à falta de tratamento adequado e ao desperdício, as águas, de forma geral, têm tido sua qualidade prejudicada. A importância da qualidade é citada na Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, da Política Nacional de Recursos Hídricos, que define, dentre seus objetivos: “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade da água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos.”

Porém, mesmo o Brasil tendo uma legislação relativa à proteção de regiões ribeirinhas, rios e córregos, esses corpos d’água são submetidos a impactos intensos, principalmente nas zonas urbanas. Muitas vezes, sendo transformados em canais para transporte de efluentes domésticos e drenagem pluvial (POMPEO, RIGOTTI e FREITAS FILHO, 2011).

Como relatado por Tucci (2008), os principais problemas relacionados à infraestrutura da água no ambiente urbano são a falta de tratamento de esgotos, o lançamento de efluentes nas redes de esgoto pluviais, a ausência de rede de drenagem em algumas cidades, o aumento das superfícies impermeabilizadas e a ocupação do leito de inundação ribeirinha. Além destes, o autor também cita a canalização dos rios urbanos como um fator prejudicial nas áreas urbanas, fazendo com que a carga de resíduos sólidos aumente. Ainda, a deterioração da qualidade da água e a ocupação de áreas contribuintes aos reservatórios são os principais causadores de futuros problemas no abastecimento da população.

Em relação aos poluentes, estes podem atingir os corpos hídricos de duas formas: através da poluição pontual e da difusa. Na primeira, o corpo d’água é atingido de forma concentrada, podendo ser citada, como exemplo, a descarga de um emissário em um rio. Já na difusa, os poluentes chegam ao corpo d’água distribuídos ao longo de parte de sua extensão, assim como a drenagem pluvial natural, descarregada em um corpo hídrico.

Com o aumento das fontes de poluição, atualmente, cerca de 1 bilhão de pessoas (um quinto da humanidade) não dispõe de água potável e quase 1,8 bilhão não tem acesso ao saneamento básico. Ainda, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 5 milhões de mortes ocorrem todos os anos, por falta de higiene ou má

qualidade da água. Além disso, acredita-se que 90% da água utilizada nos países em desenvolvimento retorna à natureza sem tratamento (GRAF, 2010).

3.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Uma das maneiras de avaliar o impacto da poluição nos corpos hídricos é através dos parâmetros de qualidade da água. Além disso, estes representam as características químicas, físicas e biológicas da água, apontando, desde o seu aspecto estético, até a sua capacidade de transmitir doenças.

Os parâmetros de qualidade da água são utilizados como indicadores dos diferentes usos da mesma, possibilitando o seu enquadramento. Segundo a ANA (2007), o enquadramento dos corpos d'água é o estabelecimento do nível de qualidade a ser alcançado ou mantido em um segmento de corpo d'água ao longo do tempo.

De acordo com Terzhevik et al. (2009), o oxigênio dissolvido (OD) é um dos principais parâmetros que permitem avaliar a qualidade da água de um corpo hídrico. Zhang et al. (2015) afirmam que o OD é essencial para uma boa qualidade da água e um ecossistema saudável, pois o oxigênio é necessário para manter a vida aquática e suprir as demandas para decompor a matéria orgânica.

Quando os níveis de OD na água caem abaixo de valores aceitáveis, a saúde do ecossistema aquático pode ser afetada significativamente, e impedir o uso da mesma para diversos fins, como o abastecimento urbano, por exemplo (JAZEN, SCHULZ e LAMON, 2008).

O OD está presente de forma natural na água, devido ao contato com a atmosfera, ou através dos organismos fotossintetizantes. Porém, o OD é utilizado pelas bactérias em seu metabolismo, para degradar a matéria orgânica, fazendo com que diminuam as taxas de oxigênio na água. Em locais onde ocorrem lançamentos de esgotos domésticos ou efluentes industriais, os corpos hídricos podem atingir situações anaeróbias, devido à grande demanda de oxigênio. Segundo Cox (2003), a redução do OD ou, até mesmo, condições anaeróbias, podem trazer um desequilíbrio ao ecossistema, ocasionando a mortandade de peixes, odores e alterações estéticas no sistema fluvial.

A velocidade do corpo receptor também interfere na variação do oxigênio na água, pois, se existe grande turbulência em um corpo hídrico, a superfície de contato

entre a massa líquida e a atmosfera aumenta, favorecendo a entrada de oxigênio. Outro fator que influencia nas taxas de OD, é a temperatura. Segundo Stefan e Fang (1994), em águas mais quentes, as concentrações de oxigênio são menores, já que a solubilidade desse gás diminui.

A respeito da temperatura, o fenômeno da estratificação térmica é fundamental nos estudos dos corpos hídricos, ocorrendo, principalmente, em lagos e reservatórios. De acordo com Elçi (2008), durante o verão, a estratificação térmica atua como uma barreira, restringindo a mistura da coluna d'água. Pois, a água aquecida do epilímnio torna-se incapaz de se mover através da água mais fria e densa do hipolímnio. Como resultado, a mistura incompleta da coluna d'água e a falta de luz para a fotossíntese no hipolímnio, pode fazer com que a água, nesta região, atinja condições anóxicas.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é a quantidade de oxigênio dissolvido requerida pelos organismos aeróbicos, para degradarem os componentes orgânicos presentes em uma amostra de água, a uma dada temperatura, durante determinado período de tempo (AHMED e SHAH, 2015). Comumente, na literatura, é utilizado o conceito de DBO₅, sendo a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica biodegradável, em um período de 5 dias a uma temperatura de 20°C.

Aumentos da DBO, num corpo d'água, são provocados por despejos de origem orgânica que podem induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática. Ademais, um elevado valor da DBO pode indicar um incremento da microflora presente, interferindo no equilíbrio da vida aquática, além de produzir sabores e odores desagradáveis e, ainda, podendo obstruir os filtros de areia, utilizados nas estações de tratamento de água (CETESB, 2009).

Outros parâmetros de grande relevância, devido aos seus potenciais patogênicos, são os indicadores de contaminação fecal, especialmente a *Escherichia coli* (*E.coli*). Esta ocorre em fezes de humanos e animais, sendo dificilmente encontrada em outros ambientes que não apresentem esse tipo de contaminação.

A *E.coli* é um membro do grupo coliforme, considerada a principal indicadora de contaminação fecal, não somente em águas para consumo humano, como também, para outras finalidades. Dois fatores principais levaram a *E.coli* a esta condição: em primeiro lugar, existem alguns coliformes de origem não-fecal no grupo

dos coliformes termotolerantes e, em segundo, foram desenvolvidos melhores testes para a determinação da *E.coli* (ODONKOR e AMPOFO, 2013).

3.3 USOS DA ÁGUA E PADRÕES DE QUALIDADE

Os ambientes aquáticos são utilizados, em todo o mundo, com distintas finalidades, entre as quais se destacam o abastecimento de água (doméstico e industrial), geração de energia, irrigação, navegação, pesca, aquicultura, harmonia paisagística, dessedentação de animais, preservação da fauna e da flora, criação de espécies, diluição e transporte de despejos.

Para avaliar a qualidade de um corpo hídrico são estabelecidos padrões de qualidade da água. Estes podem ser entendidos como concentrações máximas que determinados parâmetros (químicos, físicos e biológicos) devem apresentar para cada uso. A partir disso, algumas legislações informam a respeito dos parâmetros de qualidade da água e suas concentrações, como a Resolução CONAMA 357/2005 e a Portaria do Ministério da Saúde N° 2.914/2011. Na Resolução CONAMA 357/2005, as águas do território nacional são classificadas em doces, salinas e salobras. As águas doces podem ser divididas em cinco classes, considerando os seus usos (quadro 1).

Além dos parâmetros de qualidade da água, outros indicativos também são muito utilizados, como o IQA (Índice de qualidade da água), o IAP (índice de qualidade da água bruta para fins de abastecimento público) e o IVA (índice de qualidade de água para a proteção da vida aquática). Segundo a CETESB (2014), o primeiro considera os parâmetros OD, coliformes termotolerantes, pH, DBO, nitrogênio total, fosfato total, variação de temperatura, turbidez e sólidos totais, atribuindo-lhes pesos referentes à sua importância. A partir do cálculo do IQA é possível classificar as águas em ótimas, boas, regulares, ruins e péssimas. Dessa forma, o IQA se torna um índice de fácil entendimento e interpretação.

Já o IAP é composto por três grupos de parâmetros: o IQA, os parâmetros que avaliam a presença de substâncias tóxicas, e por parâmetros que influem na qualidade organoléptica da água, como manganês, ferro dissolvido e zinco. De acordo com CETESB (2013), o IVA considera o pH, o OD e a presença e concentração de contaminantes químicos tóxicos, além de seus efeitos sobre os organismos aquáticos (toxicidade).

Quadro 1 - Classificação e usos das águas doces.

Classes	Usos
Especial	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção; preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
I	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, 2000; irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; proteção das comunidades aquáticas em terras indígenas.
II	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº 274, 2000; irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; aquicultura e atividades de pesca.
III	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora; recreação de contato secundário e dessedentação de animais.
IV	Navegação; harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA nº 357 (2005).

Ainda, os padrões de qualidade da água podem ser divididos, basicamente, em três grupos: os padrões de lançamento no corpo receptor, que são requisitos que os efluentes deveriam apresentar para poderem ser descarregados na água; os padrões de qualidade do corpo receptor, que são aqueles que devem ser mantidos para que haja a preservação e controle da qualidade do corpo hídrico, de acordo com o seu uso específico; e os padrões de qualidade para determinado uso imediato, como para a irrigação e potabilidade.

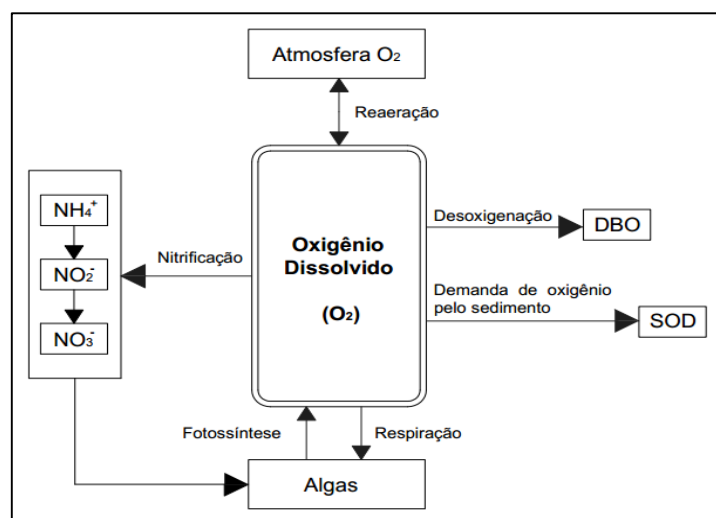
Essas condições e padrões de lançamento dos efluentes são regulamentados pela resolução CONAMA 430/2011, e por legislações estaduais. No Estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, tem-se a Resolução CONSEMA Nº 128/2006 da Secretaria do Meio Ambiente- RS já, a potabilidade é determinada através da Portaria do Ministério da Saúde Nº 2.914/2011.

3.4 DIFERENÇAS BÁSICAS ENTRE RIOS E RESERVATÓRIOS

Segundo James (1993), os usos da água de lagos e reservatórios são similares aos dos rios. Pois, são utilizados para lazer, pesca e abastecimento urbano, por exemplo. Porém, o ambiente lótico de um lago ou reservatório apresenta diferenças importantes, em relação aos rios. As principais diferenças são: lagos e reservatórios, raramente, recebem cargas de matéria orgânica muito grandes para causar depleção elevada de oxigênio; o tempo de detenção dos ambientes lóticos é muito maior do que na maioria dos rios; além disso, o tempo de resposta de lagos e reservatórios à poluição e na recuperação do corpo hídrico também é maior. Dessa forma, a modelagem desses locais também é diferente daquela que é realizada em rios.

Em se tratando do OD nos ambientes aquáticos, um dos processos mais importantes, envolvendo este gás, é a autodepuração. A introdução de matéria orgânica em um corpo d'água resulta, indiretamente, no consumo do OD, estando a autodepuração vinculada ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, por mecanismos essencialmente naturais. Segundo Ostroumov (2006), a expressão “autodepuração da água” leva à melhoria da qualidade da água, a partir da interação de fatores naturais, sem qualquer tentativa feita pelo homem para tratar ou purificar a água. Na figura 1, tem-se os principais fenômenos envolvendo oxigênio em um curso d'água.

Figura 1 - Balanço de oxigênio dissolvido.

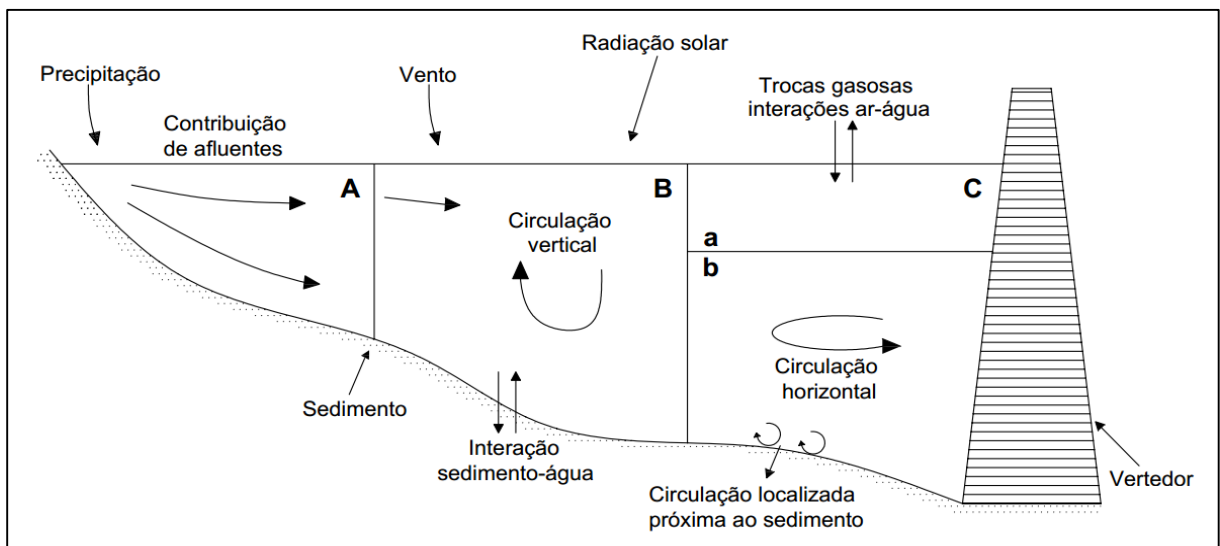


Fonte: Adaptado de Sakalauskienė (2001).

Em rios, o processo de autodepuração possui etapas que podem ser identificadas ao longo do tempo e na direção longitudinal do corpo hídrico. Segundo Chapra (1997), estas zonas podem ser divididas em: zona de águas limpas, zona de degradação, zona de decomposição ativa e zona de recuperação.

Já lagos e reservatórios podem ser divididos em: região de rio, zona de transição e região lacustre (RIBEIRO FILHO, 2006). De acordo com Soares et al. (2008), a influência lótica pode ser responsável por padrões longitudinais em reservatórios, criando três regiões distintas que podem ser definidas na base das suas características físicas, biológicas e químicas. As diferentes zonas, nas quais um reservatório pode ser dividido, são mostradas na figura 2.

Figura 2 - Características das zonas dos reservatórios: (A) zona fluvial; (B) zona de transição; (C) Zona lacustre; (a) epilímnio; (b) hipolímnio.



Fonte: Adaptado de Tundisi (1999).

A zona inicial é conhecida como ribeirinha, caracterizada por um intenso fluxo de nutrientes e redução da produção primária, com elevada turbidez. Na zona de transição ocorre uma maior sedimentação e aumento da luz na coluna d'água. Assim, a produção primária também aumenta. Por fim, na zona lacustre, onde as características se aproximam com as de um lago, a deposição de partículas inorgânicas é pequena e a penetração de luz estimula o crescimento do fitoplâncton (SOARES et al., 2008; WETZEL, 2001).

O oxigênio é um importante elemento químico em lagos e reservatório e, é produzido, principalmente, nas camadas superiores, devido à fotossíntese. Quando a

matéria orgânica sedimenta para os estratos mais profundos (hipolímnio), ocorre um consumo de OD. Ainda, fatores como a morfometria, a temperatura e a produtividade, influenciam no consumo de OD no hipolímnio (BEZERRA NETO e PINTO COELHO, 2001).

Em reservatórios, a escala espacial dos fenômenos, relacionados à qualidade da água, ocorre, preferencialmente, na direção vertical. Assim, considera-se que a predominância dos processos de transporte, nesses sistemas, acontece ao longo da profundidade, com poucas variações nas direções transversais e longitudinais. Outra característica importante nos reservatórios, relacionada à maior profundidade e à baixa velocidade longitudinal, é a estratificação térmica e química, principalmente na região próxima à barragem (FERREIRA e CUNHA, 2013).

Segundo Martins e Von Sperling (1997), mesmo os reservatórios e lagos sendo ecossistemas dinâmicos e complexos, apresentam variações sazonais cíclicas, caracterizadas por ciclos óxicos (ricos em O₂) e anóxicos (ausência de O₂). Assim, a estratificação térmica da coluna de água é, geralmente, acompanhada por déficit de OD e/ou anoxia do hipolímnio. Ainda, como ocorre pouca circulação de substâncias entre o epilímnio e o hipolímnio, além da estratificação térmica do reservatório, também ocorrerá estratificação química. Ou seja, gases e compostos orgânicos e inorgânicos apresentam distribuição não-homogênea na coluna da água.

3.5 MODELOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Um modelo de qualidade da água consiste, geralmente, de um conjunto de expressões matemáticas relacionando um ou mais parâmetros de qualidade como, por exemplo, a temperatura, pH, condutividade, DBO, sedimentos, OD, metais pesados, matéria orgânica e inorgânica, com um ou mais processos naturais. Assim, esses modelos são mais frequentemente usados para prever como modificações nos processos poderão alterar os parâmetros de qualidade da água (NAS e NAS, 2009).

O primeiro modelo numérico de qualidade da água foi o de Streeter e Phelps (1925), com o propósito de aumentar a eficiência das ações a serem tomadas no controle da poluição no rio Ohio, situado nos Estados Unidos. Este modelo se constitui, basicamente, de duas equações diferenciais de primeira ordem, que determinam a decomposição da matéria orgânica (DBO) e a reaeração atmosférica (equações 1 e 2).

$$dL/dt = - K_1 \cdot L \quad (1)$$

$$dD/dt = - K_1 \cdot L + K_2 \cdot D \quad (2)$$

Sendo:

dL/dt = taxa de desoxigenação da matéria orgânica;

L = DBO última (mg/L);

t = tempo (dia);

K_1 = coeficiente de desoxigenação (dia^{-1});

dD/dt = déficit de oxigênio no tempo;

D = déficit de oxigênio (mg/L);

K_2 = coeficiente de reaeração (dia^{-1}).

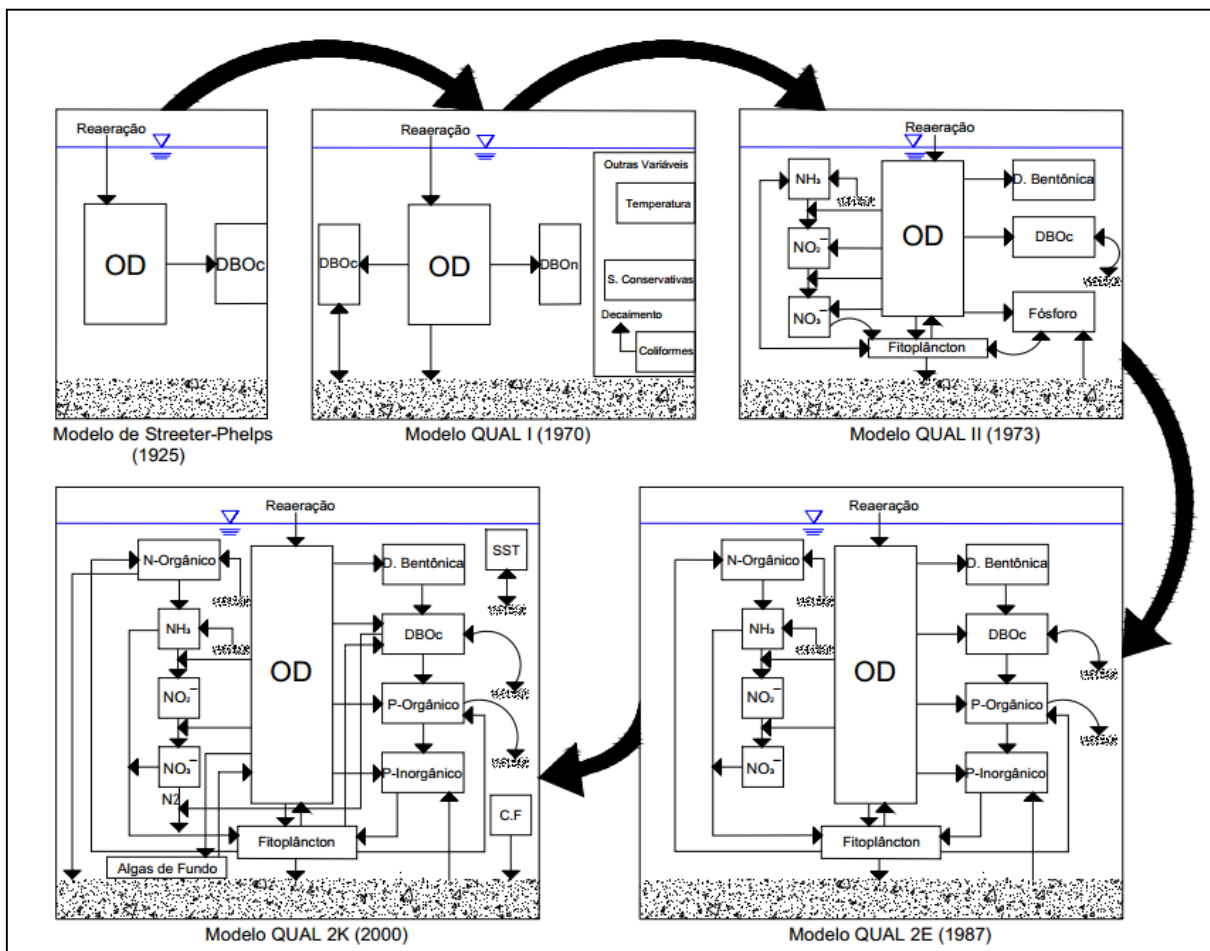
As equações de Streeter e Phelps contribuíram para o surgimento de vários modelos numéricos utilizados em aplicativos computacionais. Como exemplos, podem ser citados os modelos QUAL I e QUAL II das décadas de 70 e 80. Posteriormente, surgiram as versões QUAL 2E e QUAL-2K. Assim, os modelos têm sido muito utilizados, não só no controle de qualidade das águas, mas, também, para alertar a respeito de danos decorrentes da implantação de empreendimentos (BEZERRA, MENDONÇA e FRISCHKORN, 2008).

Gastaldini (1982) relata que o QUAL I é constituído por um conjunto de modelos interligados, capaz de simular as distribuições espaciais dos parâmetros de qualidade da água ao longo de um sistema fluvial unidimensional, em um regime hidráulico permanente. Simula os seguintes parâmetros: OD, demanda bioquímica carbonácea de oxigênio, demanda bioquímica nitrogenada de oxigênio, temperatura, mineral conservativo, densidade de coliformes e, ainda, é possível calcular a vazão mínima necessária para que o OD do escoamento não seja inferior a um valor pré-fixado.

O modelo QUAL II é uma modificação do QUAL I, sendo possível até dez parâmetros de qualidade da água, em regime permanente. Além disso, considera que o transporte de poluentes é feito por advecção e dispersão. Já, o QUAL 2E possui a capacidade de simular quinze parâmetros, atuando tanto em regime permanente, quanto no dinâmico. É um modelo unidimensional, pois o sistema pode ser constituído de um rio principal e suas ramificações, simulando cargas pontuais e não- pontuais (CHAPRA et al., 2006).

O QUAL-2K é um modelo de qualidade da água para rios e córregos que apresenta uma versão modernizada do QUAL 2E de Brown e Barnwell (1987). As semelhanças com o QUAL 2E estão nos seguintes aspectos: simula dados em uma só dimensão, pode trabalhar com dados pontuais e não-pontuais e todas as variáveis de qualidade da água são simuladas em uma escala de tempo diurna. Como novas ferramentas, pode ser citado o fato de o corpo hídrico poder ser segmentado em diferentes trechos, se adapta às situações anóxicas e o modelo simula o agrupamento de algas de fundo (USEPA, 2014). Na figura 3 está representado um esquema da evolução dos modelos desde 1925 até 2000.

Figura 3 - Evolução dos modelos de qualidade da água.



Fonte: Gonçalves (2009).

Outro modelo de qualidade da água que possui várias ferramentas é o CE-QUAL-W2. As características específicas para a sua aplicabilidade serão detalhadas no item 3.6.

3.6 O MODELO CE-QUAL-W2

O software CE-QUAL-W2 vem sendo desenvolvido desde 1975, por Edinger e Buchak, e sua versão original era conhecida como LARM (Laterally Averaged Reservoir Model). A primeira aplicação do LARM foi em um reservatório sem ramificações. Posteriormente, foram feitas modificações para permitir vários ramos e condições de contorno para zonas de estuários, resultando em um código conhecido por GLVHT (Generalized Longitudinal-Vertical Hydrodynamics and Transport Model). Em 1986, algoritmos de qualidade da água foram adicionados pelo grupo de modelagem da qualidade da água da US Army Engineer Waterways Experiment Station resultando, assim, no CE-QUAL-W2 (WATER QUALITY RESEARCH GROUP, 2014).

O CE-QUAL-W2 é um modelo bidimensional, simula as mudanças na qualidade da água nas direções longitudinal e vertical, assumindo homogeneidade lateral. O modelo tem sido aplicado em rios, lagos, reservatórios, estuários, bacias e suas combinações. Considera, também, o aumento de níveis de água, temperatura e velocidades. Além disso, qualquer combinação de constituintes pode ser incluída ou excluída em uma simulação, pois, sendo o algoritmo modular, permite que os constituintes sejam facilmente modificados através de sub-rotinas adicionais. Alguns dos parâmetros simulados no software são: sólidos suspensos, fitoplâncton, amônia, nitrito, nitrato, DBO, carbono total inorgânico, OD, sedimentos orgânicos, alcalinidade, coliformes (COLE e WELLS, 2013).

Para sua aplicação, são necessários dados batimétricos e meteorológicos (temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento e sua direção, radiação solar e precipitação). São requeridos, também, dados como volume de entrada e saída, evaporação, concentração dos constituintes de qualidade da água e parâmetros de hidráulica e cinética. Dessa forma, a disponibilidade e qualidade desses dados influencia diretamente na precisão do modelo e sua utilidade (ZYFI, GRAZHDANI e AHMETI, 2014).

O modelo possui limitações devido às várias hipóteses e aproximações utilizadas para simular a hidrodinâmica, transporte e processos de qualidade da água. O CE-QUAL-W2 descreve os gradientes nas direções longitudinal e vertical, assumindo que os gradientes laterais são desprezíveis. Logo, é mais aplicável a

reservatórios profundos e relativamente longos, não sendo apropriado para corpos d'água com variações laterais significativas (WILLIAMS, 2007).

O CE-QUAL-W2 é baseado em seis equações principais para descrever os movimentos dos fluidos. São elas: continuidade (equação 3), quantidade de movimento na direção horizontal (equação 4), quantidade de movimento na direção vertical (equação 5), superfície livre (equação 6), que é uma simplificação da equação da continuidade; estado (equação 7), que relaciona densidade, temperatura e concentração de substâncias dissolvidas; e transporte de constituintes (equação 8).

Segundo Cole e Wells (2013), as equações governantes a seguir, possuem simplificações, como a consideração das médias laterais, eliminação do efeito de Coriolis e da tensão de cisalhamento, devido à viscosidade.

O desenvolvimento completo das equações governantes do modelo CE-QUAL-W2 e outras simplificações podem ser encontrados em Cole e Wells (2013).

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

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \text{sen} \alpha - \frac{B}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = g \text{cos} \alpha \quad (5)$$

$$B \eta \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz \quad (6)$$

$$\rho = f(T_w, \varphi_{TDS}, \varphi_{SS}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial B \phi}{\partial t} + \frac{\partial UB \phi}{\partial x} + \frac{\partial WB \phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} = q_{\phi} B + S_{\phi} B \quad (8)$$

Sendo:

U = velocidade na direção horizontal; B = largura do corpo d'água; x = direção horizontal; W = velocidade na direção vertical; z = direção vertical; q = vazão lateral por unidade de largura; t = tempo; g = aceleração da gravidade; α = declividade do

canal em relação à horizontal; ρ = densidade; P = pressão; τ_x = tensão de cisalhamento média lateral na direção x ; τ_z = tensão de cisalhamento média lateral na direção z ; η = elevação até a superfície livre; h = profundidade d'água; $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{SS})$ = função de densidade depende da temperatura da água, sólidos totais dissolvidos ou salinidade, e inorgânicos sólidos suspensos; q_ϕ = é a taxa de fluxo de massa lateral (entrada/saída) do constituinte por unidade de volume; S_ϕ = termo cinético dos constituintes; Φ = concentração do constituinte (média lateral); D_x = coeficiente de dispersão de constituintes na direção longitudinal; D_z = coeficiente de dispersão de constituintes na direção vertical.

3.6.1 Aplicações do CE-QUAL-W2

O software CE-QUAL-W2 foi utilizado por Zyfi, Grazhdani e Ahmeti (2014), para simular a qualidade da água dos Lagos Prespa, localizados na Europa. Estes lagos estão situados na fronteira entre a Albânia, a Macedônia e a Grécia. Os autores avaliaram diversos parâmetros, em cinco locais diferentes, dentro da bacia. A respeito do OD, o modelo representou com precisão os efeitos sazonais da temperatura sobre a solubilidade do oxigênio. Ainda, comparando os dados obtidos pelo programa com valores medidos de oxigênio, ocorreu menos de 1 mg/L de diferença.

Rangel Peraza et al. (2012) usaram o CE-QUAL-W2 para simular a temperatura, o OD e a concentração dos sólidos dissolvidos totais do reservatório de Aguamilpa, um dos mais longos do México. Consideraram que os resultados para a temperatura da água foram satisfatórios e condizem com os perfis térmicos apresentados em outros corpos d'água em regiões tropicais. A respeito dos sólidos dissolvidos, o modelo conseguiu representar o aumento destes no reservatório, durante as épocas chuvosas, devido à erosão das regiões vizinhas.

O OD simulado aproximou-se dos valores observados em todos os locais de monitoramento do reservatório, apresentando diferenças entre $\pm 0,3$ mg. L⁻¹. Concluíram que as águas do reservatório, abaixo de 60 m da superfície, tornavam-se anóxicas em períodos frios do ano. Dessa forma, esta pesquisa serviu como um alerta, já que a tomada d'água do reservatório fica situada próxima a esta região, podendo causar problemas de saúde na população e a mortandade de peixes (RANGEL PERAZA et al., 2012).

Kuo et al. (2006) aplicaram o CE-QUAL-W2 para avaliar a estratificação térmica e a variação da qualidade da água nos reservatórios Te-Chi e Tseng-Wen em Taiwan. O modelo hidrodinâmico reproduziu bem as distribuições temporais e espaciais da temperatura nesses reservatórios. Foram simulados, também, parâmetros de qualidade da água como o OD, fósforo total, clorofila *a*, amônia, nitrito e nitrato; e os resultados do programa foram muito próximos aos obtidos em campo. Ainda, a análise da eutrofização dos reservatórios, a partir do modelo, resultou que, com a diminuição das cargas de fósforo de 30% a 55%, no Reservatório Te-Chi, haverá uma melhora da qualidade da água, passando a mesma da condição mesotrófica para oligotrófica.

Etemad-Shahidi et al. (2009) simularam a carga máxima total diária ou CMTD no reservatório Karkheh, o mais largo do Irã. Primeiramente, monitoraram dados de temperatura, nível e de SDT (sólidos dissolvidos totais), para a calibração e verificação, no período de 2000 a 2003. Obtiveram que os dados observados e os calculados pelo CE-QUAL-W2 apresentaram boa aproximação. A respeito da temperatura, a soma das diferenças entre os dados de campo e os simulados, foram de 0,74°C. Concluíram que, uma redução de 50% da CMTD fará com que o reservatório se enquadre nas normas do Irã em relação aos SDT.

Afshar e Saadatpour (2009) utilizaram o CE-QUAL-W2 para obter informações a respeito do processo da eutrofização do reservatório Karkheh, localizado no Irã. As águas do reservatório são usadas para irrigação, bem como, para o abastecimento de grandes cidades do Irã e até mesmo de países vizinhos. Para a simulação dos dados, o reservatório foi dividido em 66 segmentos, sendo ajustados a elevação, a temperatura da água e parâmetros de qualidade da água (OD, clorofila *a*, fósforo total, amônia e nitrato).

Neste reservatório, as variações térmicas foram simuladas, tanto longitudinalmente, quanto verticalmente e o modelo representou bem as estratificações térmicas sofridas. Ademais, o crescimento das algas foi detectado, quando as taxas de fosfato na superfície da água diminuíram. Logo, este trabalho indicou que a gestão do reservatório deve ser melhorada, a fim de atenuar as fontes de nutrientes que causam a eutrofização (AFSHAR e SAADATPOUR, 2009).

Fang et al. (2007) simularam a elevação e a temperatura da água do reservatório de Amistad, nos Estados Unidos. O erro quadrado médio da elevação foi de 0,07 m. Já, para a temperatura da água, variou de 0,32°C a 1,44°C. Este estudo foi realizado com dados de 2004 e aplicaram uma simulação de cenários com base

no aumento do CO₂ no local. A partir de dados da *Canadian Climate Centre General Circulation Model* (CCC GCM), aumentaram a temperatura do ar, as taxas de radiação, a velocidade do vento e a umidade relativa, considerando que a concentração de CO₂ atinja o dobro em uma data futura, em relação à taxa de 2004.

Com as modificações dos parâmetros meteorológicos, simularam novamente a temperatura no modelo. Este indicou que, na superfície, as taxas de aumento da temperatura foram de 2,2°C a 5,6°C e no fundo do reservatório, de 2,2°C a 9,5°C. Ainda, a estratificação da temperatura permanecerá por mais tempo, porém, será mais fraca. Logo, estes aumentos na temperatura da água causarão uma maior demanda de oxigênio e menores concentrações do mesmo no futuro (FANG et al., 2007).

Bonalumi et al. (2012) utilizaram o CE-QUAL-W2 para avaliar a estratificação térmica e a turbidez de dois reservatórios localizados nos Alpes Europeus. Estes são utilizados para a geração de energia elétrica e possuem uma diferença de altitude de 1200m. As águas do reservatório inferior são bombeadas para o superior e posteriormente, retornam, movendo turbinas. O lago superior recebe uma grande carga de sólidos, oriundas da bacia de contribuição. Já, o inferior possui águas muito claras.

Realizando a comparação entre a qualidade da água apresentada pelos mesmos com e sem a presença do sistema de energia elétrica, constataram que o sistema de energia causou elevação na temperatura da água de ambos os reservatórios, devido ao atrito com as turbinas, bombas e demais elementos. Além disso, a carga de sólidos aumentou no reservatório inferior, devido às trocas de águas entre os reservatórios. Com o uso do modelo, concluíram que os principais impactos sobre as temperaturas dos reservatórios acontecem em épocas quentes e secas, sendo a região, altamente influenciada por variáveis meteorológicas (BONALUMI et al., 2012).

Ebrahimi, Jabbari e Abbasi (2015) aplicaram o CE-QUAL-W2 para investigar o perfil térmico e a salinidade do reservatório Baft, localizado no Irã. Os autores verificaram que o reservatório apresenta estratificação térmica durante 9 meses do ano, atingindo a máxima variação entre agosto e setembro. Já, a salinidade varia de acordo com a estratificação térmica, tendo valores entre 220 a 310 mg/L. Porém, como os limites estabelecidos pela legislação do país são de até 500 mg/L, a água do reservatório é considerada própria para o consumo da população. Além disso, através da simulação, avaliaram que seria importante a descarga das águas das camadas

mais profundas no final do mês de agosto, visto que é quando as águas do reservatório atingem pior qualidade.

Deus et al. (2013) usaram o CE-QUAL-W2 no reservatório do Tucuruí, localizado no estado do Pará. Simularam diversos parâmetros, porém, o objetivo principal deste estudo foi determinar se as concentrações de fósforo e clorofila *a* afetariam o estado trófico do reservatório em um cenário futuro.

O reservatório do Tucuruí é utilizado para piscicultura, logo, com o aumento da eutrofização, existiria uma maior quantidade de matéria orgânica e nutrientes no local. O modelo mostrou que os aumentos das taxas de fósforo não alteraram, significativamente, as concentrações de clorofila *a*, fazendo com que o reservatório não tenha seu estado trófico alterado. Assim, através do CE-QUAL-W2, foi possível afirmar que a piscicultura pode evoluir na região, sem trazer prejuízos (DEUS et al., 2013).

Gastaldini et al. (2004) estudaram o perfil de OD e temperatura no ponto mais profundo do reservatório do Vacacaí Mirim (aproximadamente, 15 m), utilizando o CE-QUAL-W2. Observaram que, nos meses de inverno, ocorreu pouca estratificação, com no máximo uma variação de 2°C entre a superfície e o fundo; as concentrações de OD apresentaram pouca diminuição, ocorrendo anaerobiose a 1 m do fundo. Já, no verão, o reservatório apresentou-se completamente estratificado, com variações de temperatura de até 11°C e as concentrações de OD atingiram valores próximos a 0, a partir de 5 m de profundidade.

Sendo assim, o CE-QUAL-W2 é um modelo utilizado em diferentes locais do mundo, aplicável, em sua maioria, em lagos e reservatórios, representando de forma satisfatória estes locais e servindo para obter informações a respeito da qualidade da água do local, do impacto de obras sobre os corpos hídricos, das condições futuras e da adequabilidade do uso da água para abastecimento da população, piscicultura, entre outros.

4 ESTUDOS REALIZADOS NO RESERVATÓRIO

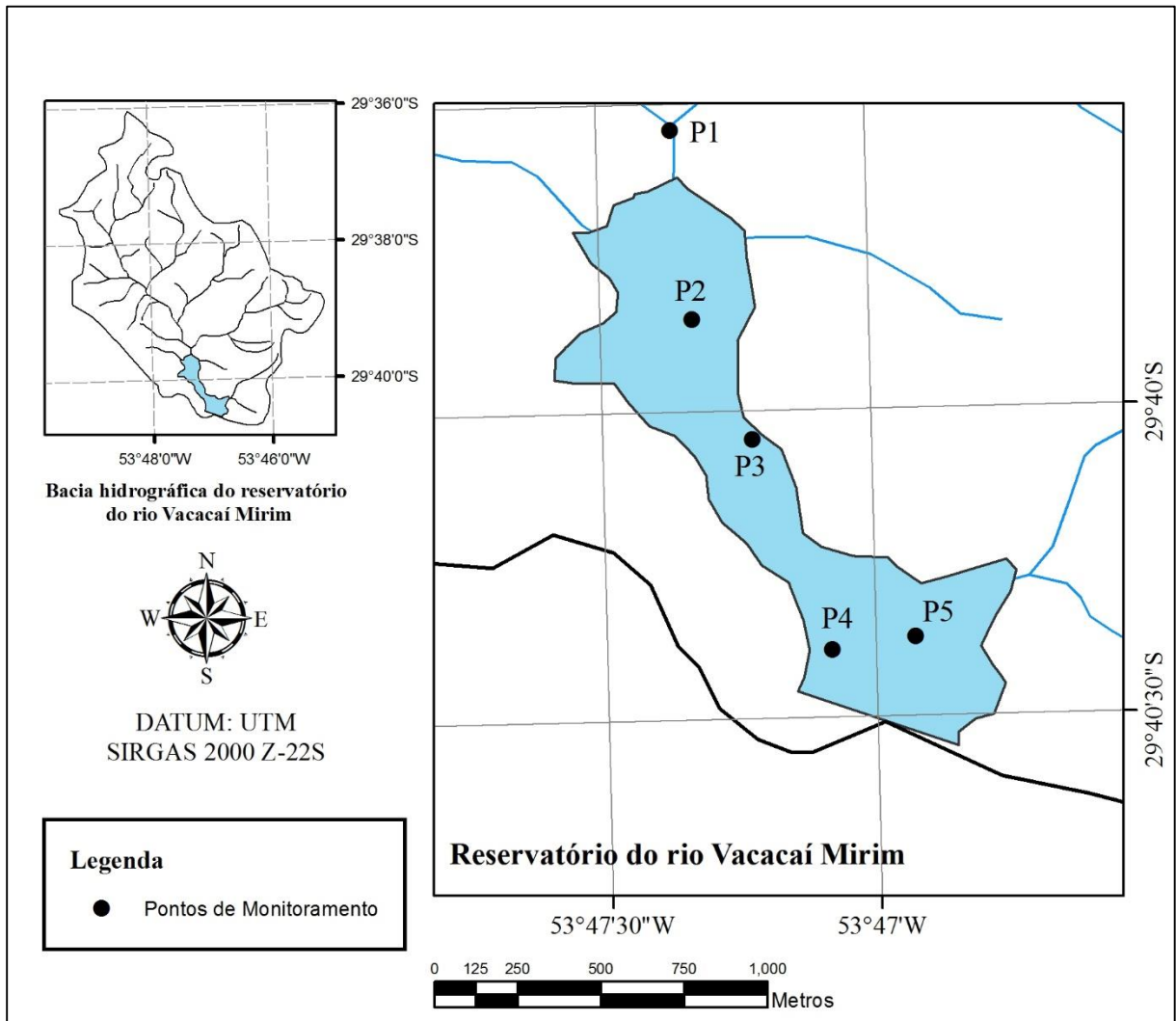
Neste item, será mostrada uma revisão sobre o trabalho de Burin (2011), pois, este autor realizou monitoramentos da qualidade da água do reservatório, e os resultados obtidos foram utilizados, como os dados de entrada, no modelo CE-QUAL-W2, para a calibração e validação. Além disso, será apresentada uma breve abordagem sobre o trabalho de Dill (2002), que foi utilizado para a composição da batimetria do reservatório, sendo esta, a base para as simulações no local.

4.1 PONTOS DE MONITORAMENTO DO RESERVATÓRIO

Burin (2011) monitorou alguns parâmetros de qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim, entre janeiro de 2010 e fevereiro de 2011, totalizando 8 campanhas, com um intervalo de 45 a 60 dias entre as mesmas, ocorrendo todas em tempo seco e no período da manhã. As campanhas ocorreram nos dias: 18/01/2010, 04/03/2010, 14/04/2010, 10/06/2010, 09/08/2010, 06/10/2010, 02/12/2010 e 10/02/2011. O autor avaliou os seguintes parâmetros: temperatura da água, pH, turbidez, condutividade, OD, DBO, DQO, *E.coli*, coliformes totais, fósforo total, clorofila *a*, fosfato dissolvido, amônia, nitrito, nitrato, nitrogênio total kjeldahl, sulfatos, cálcio, magnésio, cloreto, fluoreto, sódio, potássio, além dos sólidos totais, dissolvidos e suspensos.

Os pontos de coleta foram denominados de P1, P2, P3, P4 e P5. O ponto P1 está localizado próximo ao exutório do afluente principal; o ponto P2 situa-se na parte montante do reservatório, em um local que pode ser considerado raso; o ponto P3 está localizando no centro do reservatório, ao longo do eixo longitudinal; e os pontos P4 e P5 estão, respectivamente, no local de captação de água e próximo ao vertedor, cujas profundidades são mais acentuadas (BURIN, 2011). Na figura 4 está a localização dos pontos de coleta no reservatório, e na tabela 1, as coordenadas dos pontos.

Figura 4 - Localização dos pontos de monitoramento no reservatório do Vacacaí Mirim.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 - Coordenadas planas dos pontos de coleta.

Ponto	Latitude (N)	Longitude (E)
P1	6715741 m	230012 m
P2	6715174 m	230078 m
P3	6714816 m	230259 m
P4	6714186 m	230500 m
P5	6714226 m	230750 m

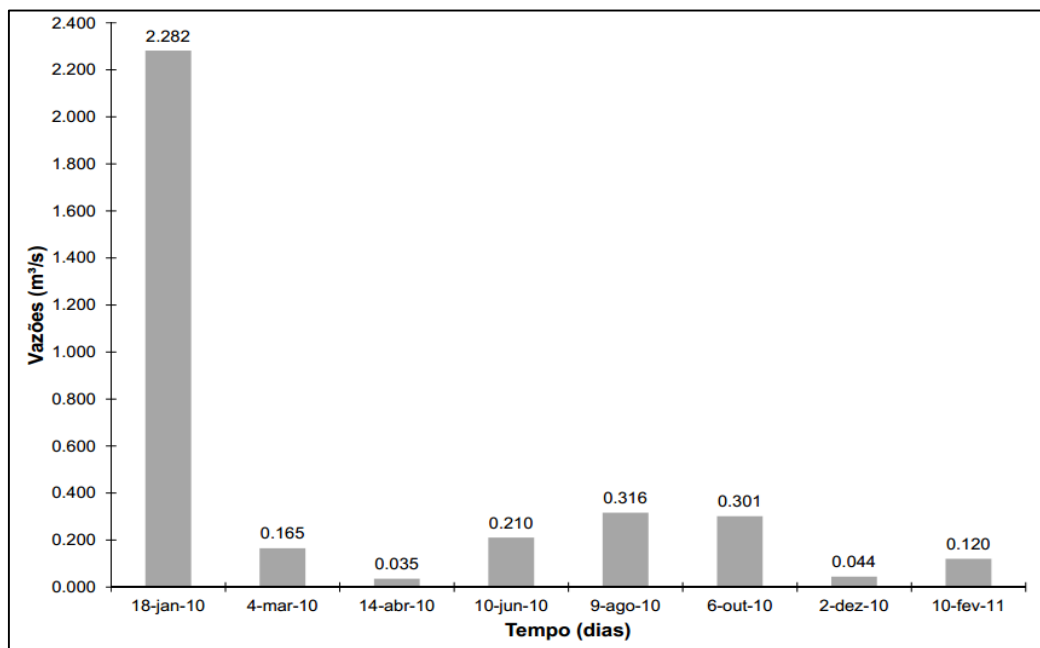
Fonte: Burin (2011).

4.2 VAZÃO E PRECIPITAÇÃO

A bacia hidrográfica do reservatório do Vacacaí Mirim possui um regime de distribuição de chuvas relativamente uniforme, porém, com importantes variações pluviométricas anuais, tanto no verão, quanto no inverno. No entanto, no início de 2010, ocorreram grandes volumes de chuva, sendo obtido um total mensal de 613 mm, em janeiro, bem acima da média histórica para o mês, que é de 141,1 mm. Já no final de 2010 e início de 2011, as precipitações foram mais escassas, possivelmente, devido ao fenômeno La Ninã (BURIN, 2011).

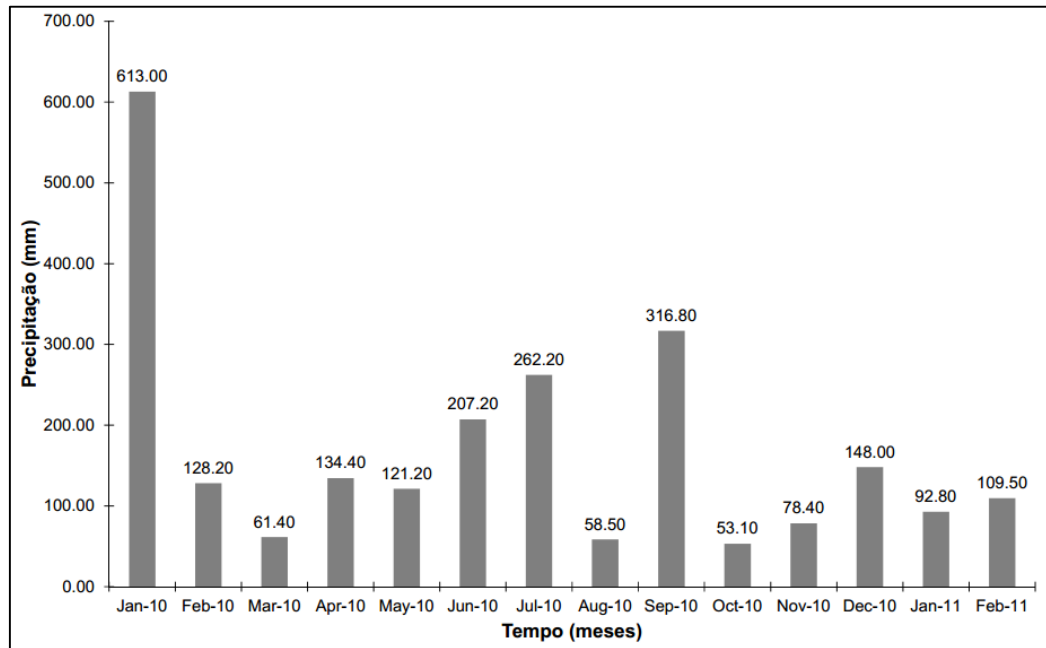
A respeito das vazões de entrada no reservatório, no trabalho de Burin (2011), estas foram obtidas por meio de leituras das velocidades da água no ponto P1. O autor utilizou o micromolinete marca OTT, modelo C2, ou o molinete marca OTT, modelo C31. Para o cálculo das vazões, aplicou o método da seção média, também conhecido como método de Simpson simplificado. A CORSAN capta água do reservatório do Vacacaí Mirim, para abastecer a cidade de Santa Maria, e as vazões de saída do reservatório são consideradas, como sendo as retiradas pela companhia. Na figura 5 são mostradas as vazões de entrada obtidas por Burin (2011), e na figura 6 têm-se as precipitações mensais que ocorreram no período de estudo.

Figura 5 - Vazões lidas nas campanhas.



Fonte: Adaptado de Burin (2011).

Figura 6 - Precipitações mensais ocorridas entre janeiro de 2010 e fevereiro de 2011.



Fonte: Adaptado de Burin (2011).

4.3 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO

Os parâmetros de qualidade da água que serão utilizados para a concepção deste trabalho são: OD, temperatura da água, DBO e *E.coli*. Logo, será apresentada uma revisão somente destes parâmetros, que foram obtidos por Burin (2011).

4.3.1 Obtenção e resultados dos parâmetros

Para a obtenção da temperatura e do OD na água do reservatório do Vacacaí Mirim, Burin (2011) utilizou um oxímetro, fazendo leituras dos dados a cada metro, formando, assim, perfis desses parâmetros em todos os pontos de monitoramento. Já, para os demais parâmetros, foram coletadas duas amostras: uma na superfície (S) (epilímnio), a aproximadamente 30 cm do nível d'água, e uma de profundidade (P) (hipolímnio), a cerca de 2 m do fundo.

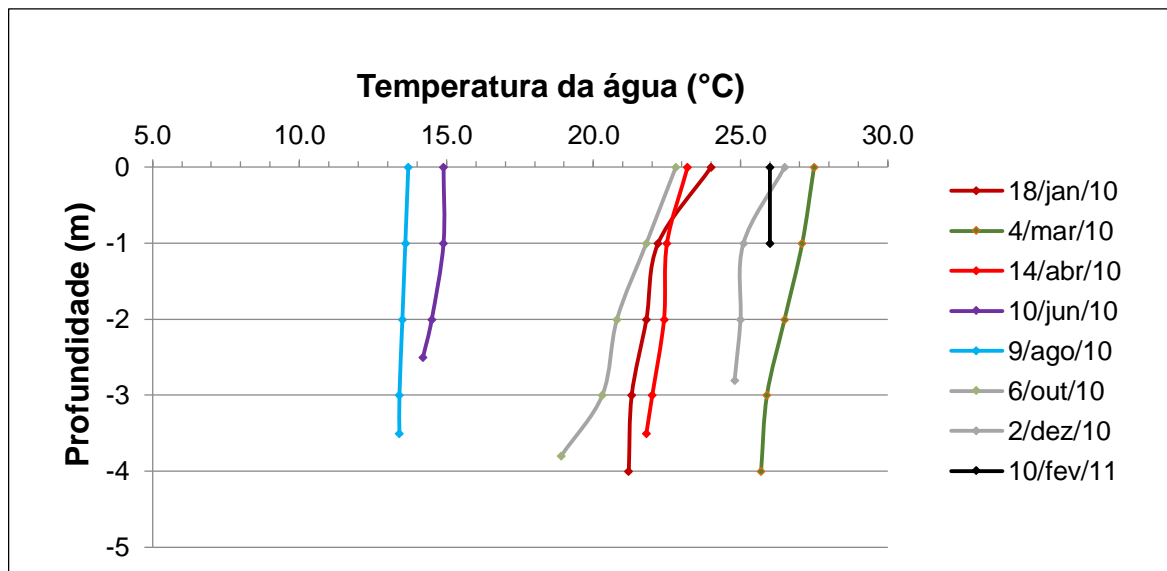
De acordo com Burin (2011), o ponto P2 situa-se em um local de, aproximadamente, 4 m de profundidade e apresentou, em boa parte do tempo, homogeneidade térmica, com fraca estratificação na primavera e verão. Porém, isto não influenciou, significativamente, a concentração de OD, que permaneceu quase

uniforme até o fundo. No ponto 3, que é mais profundo do que o anterior (8 m), ocorreu estratificação térmica nos meses quentes, com diferença máxima de 7,2°C entre a superfície e o fundo, em março de 2010. Porém, no inverno, a temperatura tornou-se mais uniforme na direção vertical.

Em relação ao OD no ponto P3, ocorreu estratificação química do mesmo, nos meses quentes, e uma forte diminuição desse gás, à medida que a profundidade aumenta (BURIN, 2011).

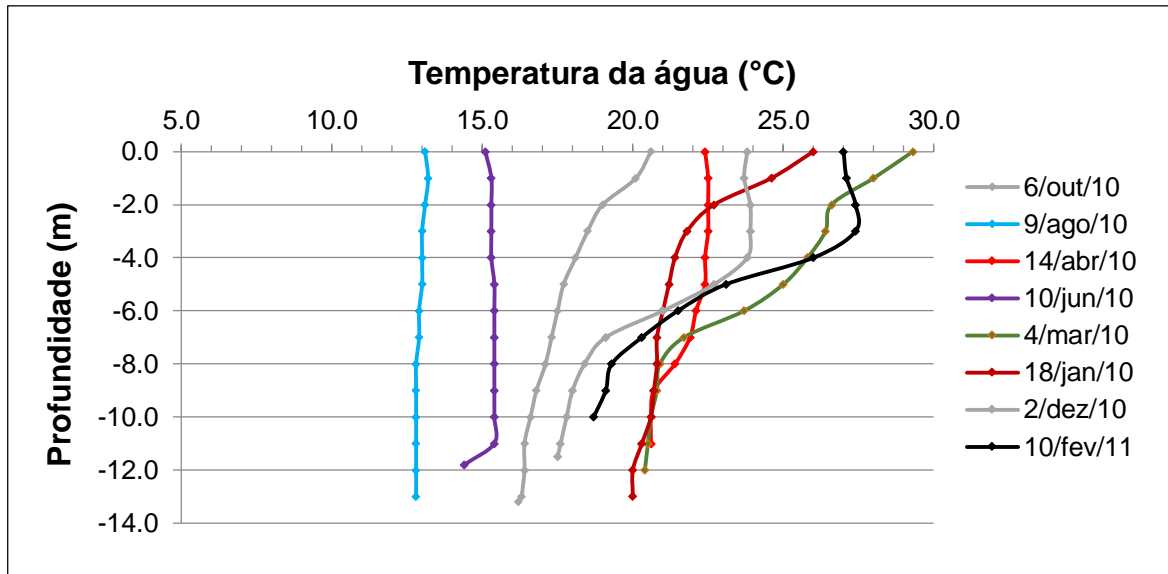
Nos pontos P4 e P5 ocorreram estratificações térmicas variáveis nos períodos de verão, outono e primavera, enquanto que, a temperatura foi uniforme no inverno. Os pontos apresentaram semelhança nos perfis de temperatura, já que estão situados em profundidades próximas (13 e 14 m, respectivamente). Foram verificadas maiores variações térmicas do que nos demais pontos. Em se tratando da concentração de oxigênio, estes pontos atingiram as menores taxas, por se tratarem de águas mais profundas (BURIN, 2011). Nas figuras 7 e 8 são mostrados os perfis das temperaturas nos pontos 2 e 4, que possuem características distintas, em relação ao comportamento dos parâmetros citados anteriormente.

Figura 7 - Perfil de temperatura da água no ponto 2.



Fonte: Burin (2011).

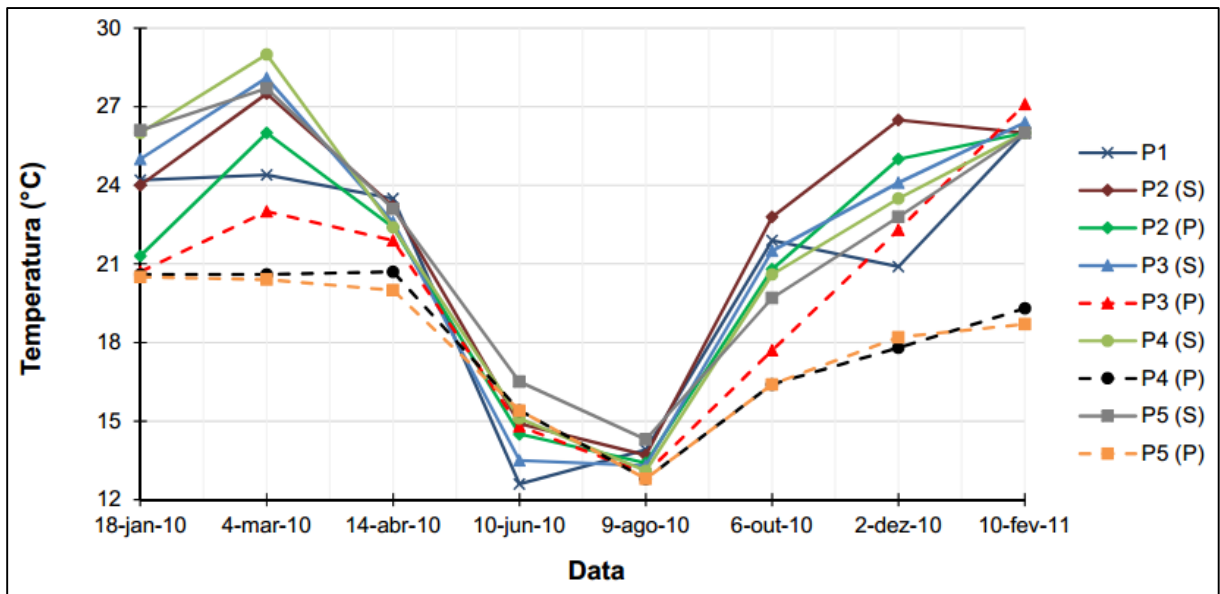
Figura 8 - Perfil de temperatura da água no ponto 4.



Fonte: Burin (2011).

A temperatura da água, em todo o reservatório, comportou-se como o mostrado na figura 9. Obteve-se um máximo de 29°C, no verão, e um mínimo de 12,6°C, no inverno. As maiores variações foram encontradas nos pontos da superfície.

Figura 9 - Variabilidade da temperatura da água nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).



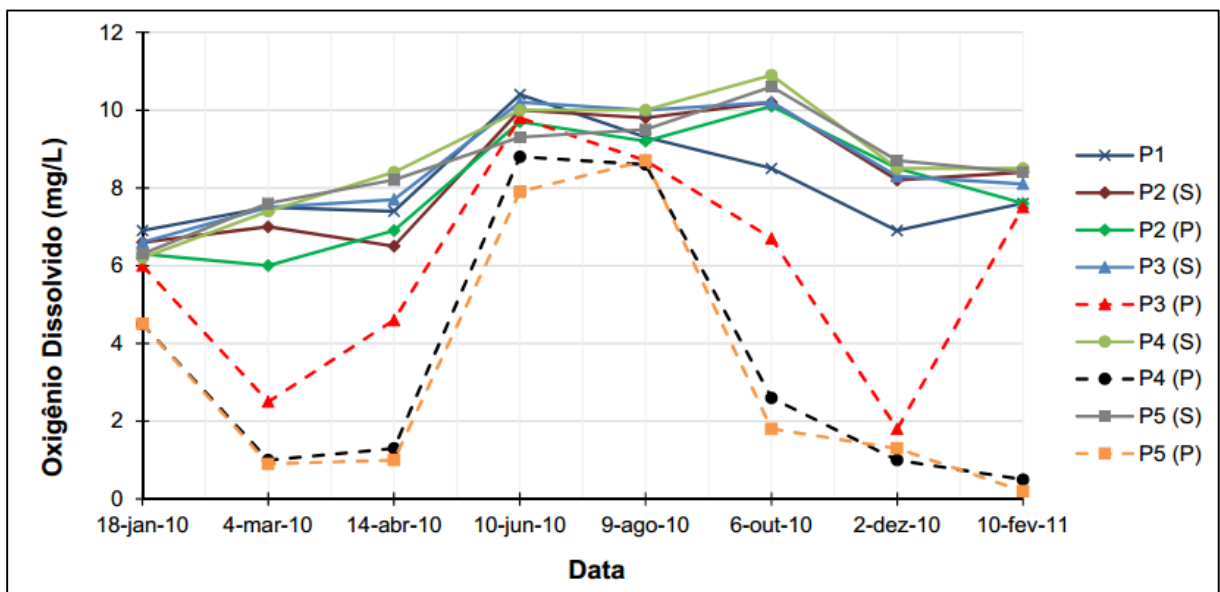
Fonte: Adaptado de Burin (2011).

Conforme Burin (2011), os pontos P3, P4 e P5 apresentaram os menores valores de OD no verão, devido à estratificação térmica, que impede a difusão de O_2 nas camadas inferiores, e ao consumo de oxigênio nas camadas profundas. Na figura 10 é mostrada a variação das concentrações de OD no reservatório.

A DBO apresentou valores altos em algumas campanhas, devido a um aumento das vazões do tributário, que trazem uma maior quantidade de matéria orgânica, e à ressuspensão de sedimentos. Além disso, quando os volumes do reservatório estiverem menores, a capacidade de diluição da matéria orgânica diminuirá. Por outro lado, as concentrações mais baixas de DBO indicaram que o reservatório diluiu bem a matéria orgânica lançada, ou que a carga que adentrou nele não era tão expressiva (BURIN, 2011). A variação da DBO é mostrada na figura 11.

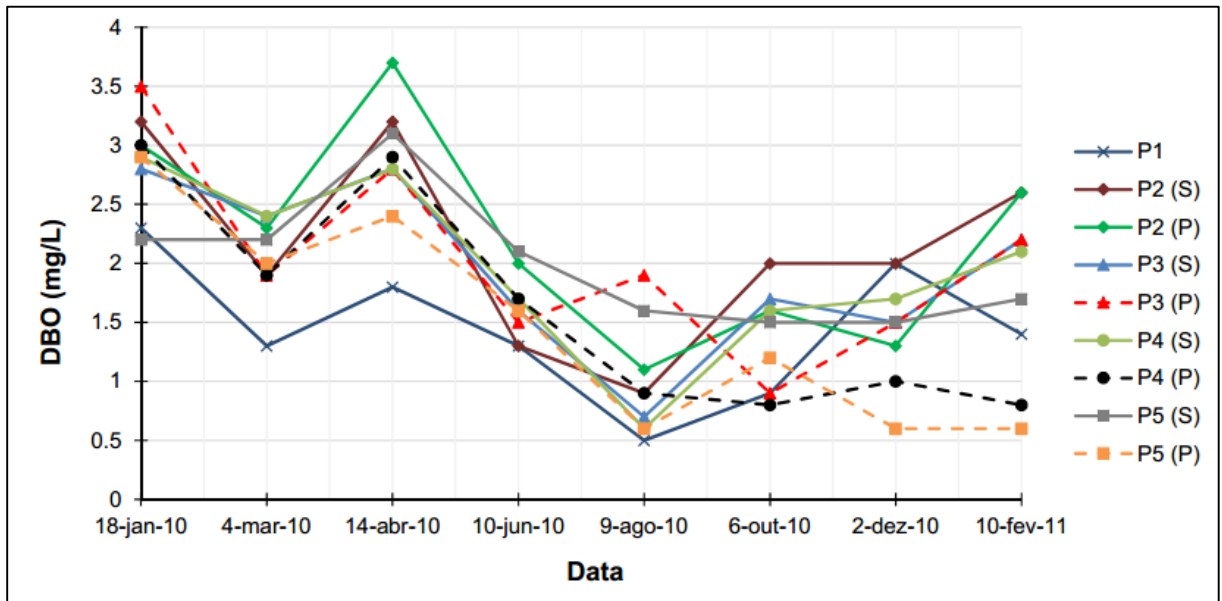
A respeito da *E.coli*, ocorreu uma redução da concentração, à medida que os pontos se afastam do exutório do rio principal, pois ocorre uma maior diluição da carga poluidora. Ainda, devido à associação da *E.coli* com as partículas de fundo, a concentração deste parâmetro aumentou em relação à profundidade. No dia 10 de junho de 2010, não foi possível determinar a *E.coli* em laboratório, para os pontos P4 e P5 (BURIN, 2011). Na figura 12 é mostrada a concentração da *E.coli* presente nas amostras coletadas.

Figura 10 - Variação do OD nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).



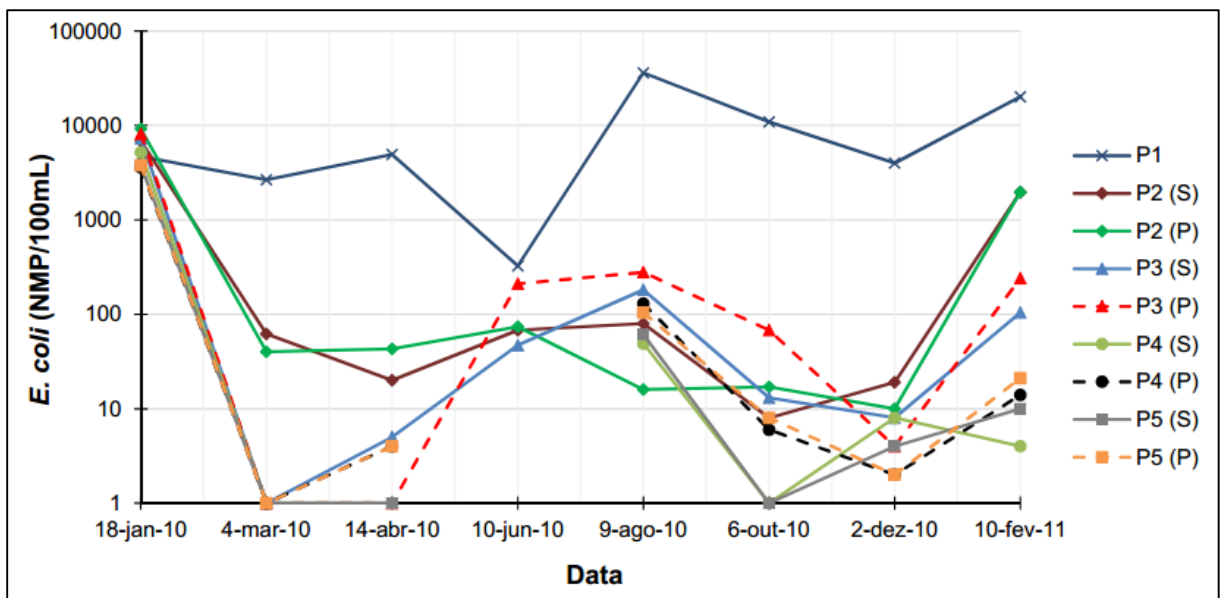
Fonte: Burin (2011).

Figura 11 - Variação da DBO nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).



Fonte: Burin (2011).

Figura 12 - Concentração de E.coli nas amostras de superfície (S) e profundidade (P).



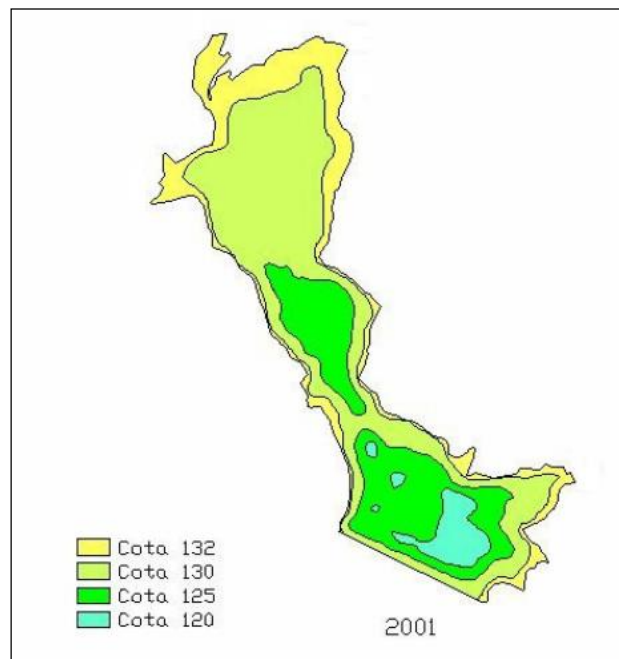
Fonte: Burin (2011).

4.4 BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ MIRIM

Dill (2002) utilizou um ecobatímetro, que auxilia na determinação do relevo de fundo de corpos hídricos, para determinar a batimetria do reservatório do Vacacaí

Mirim. Com estas informações, e a partir do uso de softwares como o DataGeosis 1.12 e o Surfer 32, o autor pôde gerar um mapa contendo as curvas de nível do reservatório (figura 13).

Figura 13 - Curvas hipsométricas do reservatório.



Fonte: Dill (2002).

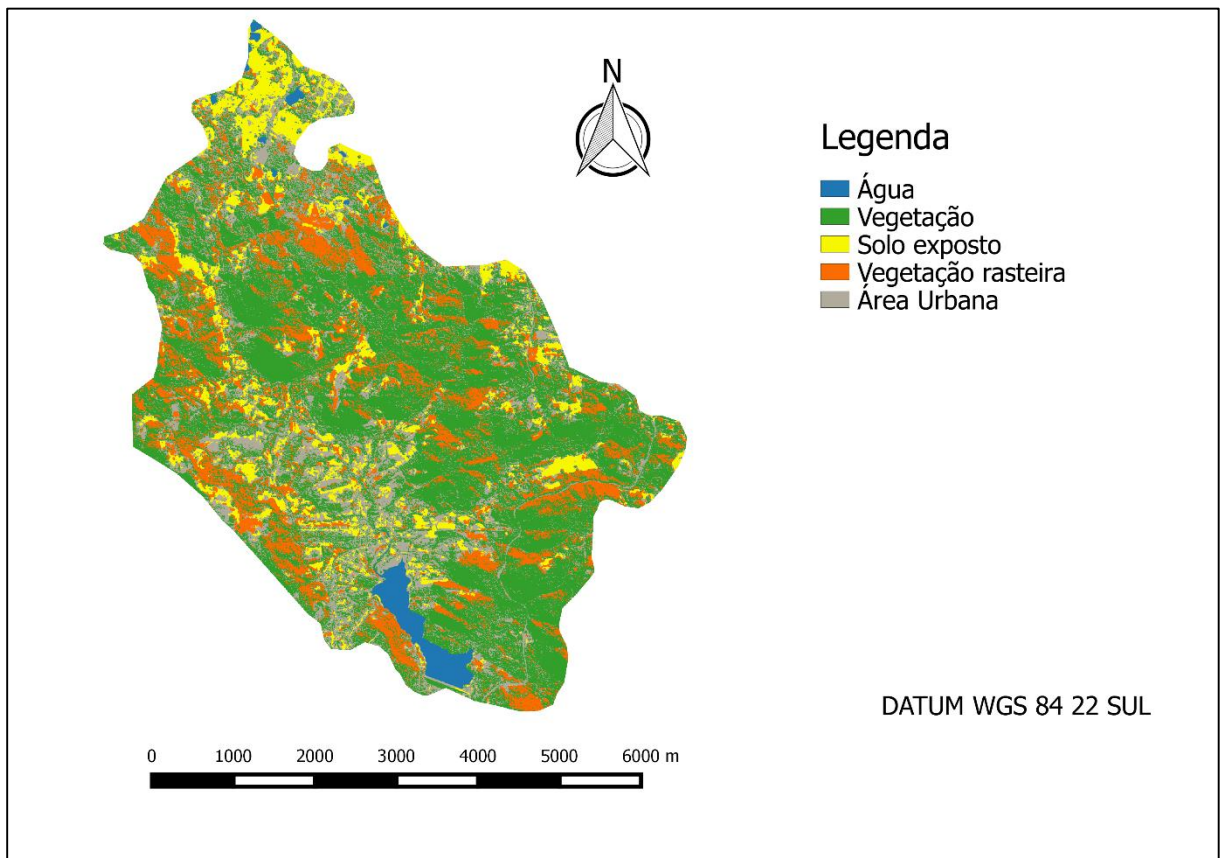
5 METODOLOGIA

5.1 ÁREA DE ESTUDO

No Rio Grande do Sul, podem ser identificados quatro tipos de compartimentos geológicos: região de planalto, depressão periférica, escudo sul-riograndense e planície costeira. Santa Maria, que está situada no centro do estado, ocupa áreas da região do planalto, da depressão periférica e uma de transição, denominada rebordo do planalto (GOLDANI, 2006).

A bacia do reservatório do Vacacaí Mirim, localizada em Santa Maria, possui uma área de 30,6 km². Nas proximidades do reservatório existem áreas urbanas e rurais. Logo, o reservatório recebe diferentes tipos de contribuições que impactam a qualidade de suas águas. Os tipos de uso do solo presentes na bacia em 2010, estão mostrados na figura 14.

Figura 14 - Tipos de uso do solo da bacia contribuinte ao reservatório do Vacacaí Mirim no ano de 2010.



Fonte: Próprio autor.

Goldani (2006) avaliou os tipos de uso do solo da bacia do reservatório do Vacacaí Mirim no ano de 2003. Naquela época, a vegetação arbórea ocupava 71,15% da área da bacia, no entanto, em 2010, este uso diminuiu para 49,83%, totalizando 1506,41 ha. Porém, permaneceu sendo predominante em relação aos demais usos. A vegetação rasteira teve pouca alteração, aumentando de 14,60% em 2003, para 17,57% em 2010.

As ocupações urbanas na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim não se restringem somente aos bairros Campestre e Menino Deus e às margens do reservatório, mas também, existem muitos sítios de lazer em locais estratégicos e bonitos, nas encostas, nos morros e nas margens dos riachos que abastecem o reservatório, além de outros tipos de aglomerações urbanas, como vilas (GOLDANI, 2006). Em 2003, o uso urbano representava 6,79% da área da bacia.

Entretanto, em 2010, ocorreu um grande crescimento da ocupação urbana no local, atingindo taxas de 21,14%, totalizando 639,06 ha. Dessa forma, este aumento populacional pode fazer com que a carga poluidora que adentra ao reservatório seja maior do que a anterior, impactando negativamente a qualidade da água. A porcentagem de água na bacia diminuiu de 2,38%, em 2003, para 2,02%, em 2010, e o solo exposto aumentou em 4,35%, o que traz indícios de desmatamento. Na tabela 2 tem-se os usos do solo na bacia para os anos de 2003 e 2010.

Tabela 2 - Usos do solo da bacia do reservatório do Vacacaí Mirim nos anos de 2003 e 2010.

Uso do solo	Ano 2003 (%)	Ano 2010 (%)	Área (ha)
Vegetação Arbórea	71,15	49,83	1506,41
Vegetação Rasteira	14,60	17,57	531,04
Área Urbana	6,79	21,14	639,06
Solo Exposto	5,08	9,43	285,16
Água	2,38	2,02	61,21

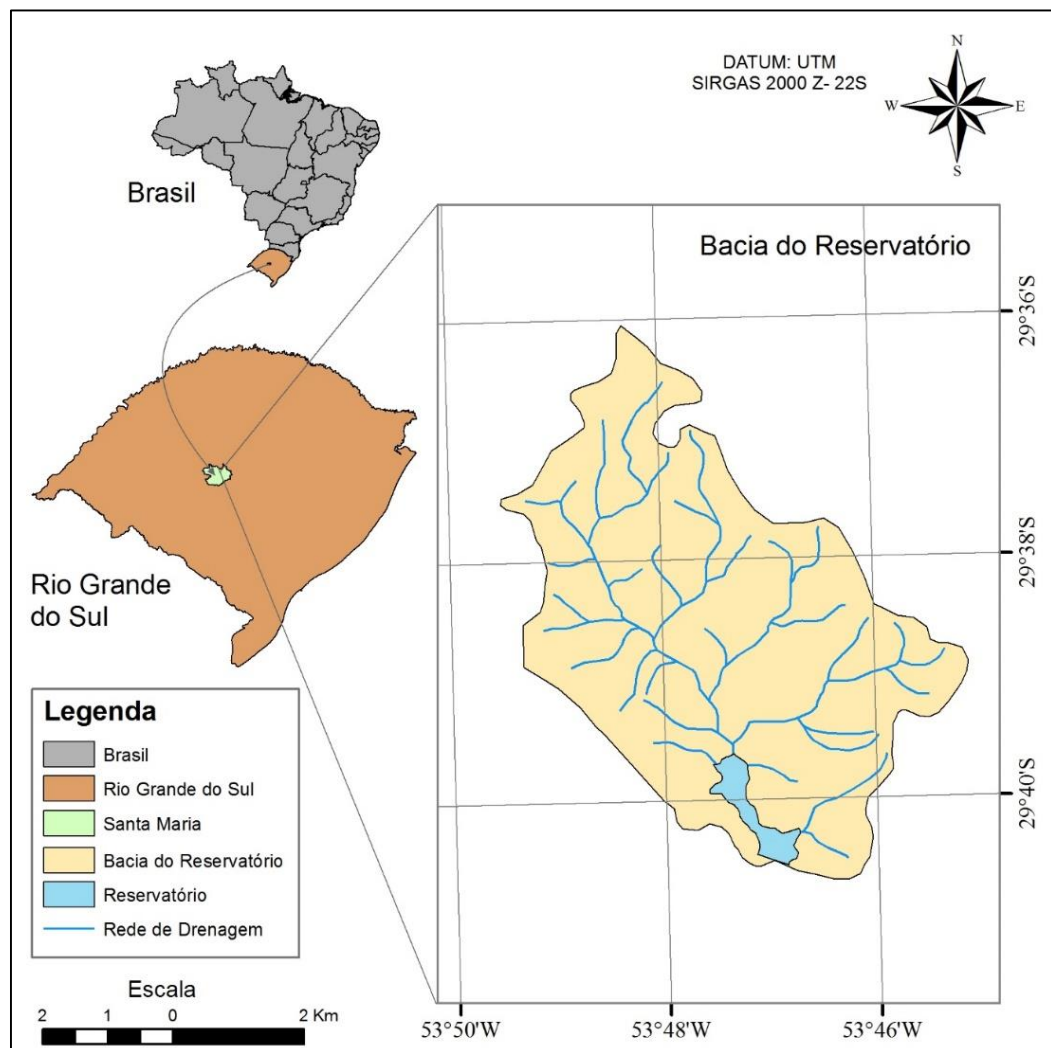
Fonte: Adaptado de Goldani (2006).

A bacia contribuinte ao reservatório possui uma elevada amplitude altimétrica entre as nascentes, com 457 m, e a entrada do reservatório, com 132 m (BURIN,

2011). O reservatório do Vacacaí Mirim encontra-se nas coordenadas geográficas 29°40'31" de latitude sul e 53°47'06" de longitude oeste. Seu anteprojeto foi elaborado em 1961, pelo antigo DNOS (Departamento Nacional de Obras e Saneamento) e começou a operar em 1972.

O reservatório possui área inundada de 0,723 km² e seu volume inicial era de 4,928 x10⁶ m³, porém, de acordo com Dill (2002), a capacidade de armazenamento, no ano de seu estudo, era de 3.477 x10⁶ m³. Essa redução deve-se ao assoreamento sofrido pelo reservatório. Ainda, o reservatório do Vacacaí Mirim conta com um perímetro de 6,4 km, um tempo de detenção médio de 87 dias e profundidade média de 4,7 m. A crista do seu vertedor situa-se na cota de 132 m (GASTALDINI et al., 2004). Na figura 15 é mostrada a localização do reservatório.

Figura 15 - Localização do reservatório do Vacacaí Mirim.



Fonte: Próprio autor.

5.2 DEFINIÇÕES BÁSICAS

Para este estudo, foi escolhido o modelo CE-QUAL-W2, por ser um dos que melhor se adapta a reservatórios, devido a suas características, citadas no item 3.6. A versão do software utilizada foi a 3.71, pois é a mais atual.

Os dados de qualidade da água utilizados neste trabalho, foram os obtidos por Burin (2011), entre 2010 e 2011. O intervalo de tempo considerado nestas simulações é diário. É importante salientar que o modelo CE-QUAL-W2 somente consegue realizar as leituras dos dados em dias julianos. Dessa forma, as datas das coletas ficaram conforme a tabela 3.

Tabela 3 - Datas das coletas transformadas em dias julianos.

Data	Dia Juliano
18/01/2010	18
04/03/2010	63
14/04/2010	104
10/06/2010	161
09/08/2010	221
06/10/2010	279
02/12/2010	336
10/02/2011	406

Dentre os parâmetros, que foram simulados no modelo, está a temperatura. Pois, segundo Cole e Wells (2013), esta possui influência sobre a densidade da água e não pode ser desconsiderada, já que altera as características hidrodinâmicas do corpo hídrico. Além disso, os efeitos da estratificação térmica, em um reservatório, são de suma importância para a determinação do comportamento dos demais parâmetros de qualidade e dos seres vivos existentes neste ecossistema.

Foram considerados o OD e a DBO, devido ao primeiro ser vital para o corpo d'água, e o segundo, um indicador da matéria orgânica presente. Logo, estão fortemente relacionados com a poluição e a degradação da qualidade da água. Por fim, a *E.coli*, que também é associada à poluição, estando presente nas fezes de

animais de sangue quente e, ainda, devido à escassez de trabalhos que simulem este parâmetro.

5.3 BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO NO MODELO CE-QUAL-W2

A primeira fase de aplicação do modelo é a composição da geometria do reservatório e sua batimetria. Estas são importantes, pois fornecem informações a respeito do volume do reservatório, possibilitando a quantificação das vazões e sendo a base para as demais simulações no local. Porém, para isso, é necessário a determinação da topografia do reservatório. Logo, com base no mapa de Dill (2002), que continha algumas cotas, fez-se o georreferenciamento do reservatório, através do software QuantumGIS. Assim, as demais curvas de nível puderam ser estimadas.

A partir disso, foi realizada a batimetria do reservatório no modelo CE-QUAL-W2. Assim, de acordo com Cole e Wells (2013), o reservatório foi discretizado longitudinal e verticalmente, formando células. No arquivo de entrada dos dados, que é constituído de uma planilha eletrônica, foram inseridas informações, a respeito dos comprimentos dos segmentos, espessura das camadas, larguras das células, número de corpos d'água (1, para o reservatório do Vacacaí Mirim), o ângulo de orientação de cada segmento (dado em radianos) e as profundidades das camadas. Ao final do processo, serão mostrados os perfis longitudinal e vertical do reservatório, além da divisão do mesmo em células.

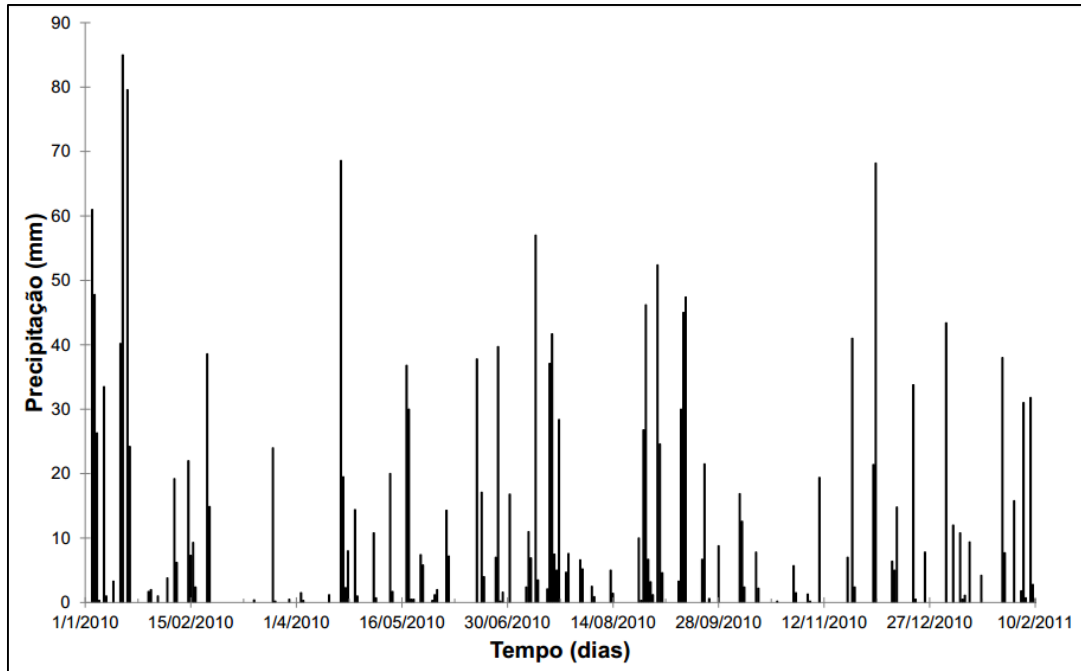
5.4 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos possuem grande influência sobre os parâmetros de qualidade da água do reservatório, principalmente sobre as amostras retiradas dos pontos mais superficiais. Foram utilizadas as seguintes informações meteorológicas no modelo: precipitação, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, nebulosidade, velocidade e direção do vento.

Essas variáveis foram obtidas, através do banco de dados do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), vinculado ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), para a cidade de Santa Maria, nos anos de 2010 e 2011. Esta estação fica localizada no Aeroporto de Santa Maria e foi escolhida, pois todas as variáveis climáticas necessárias, para o funcionamento do modelo, estão disponíveis nesta estação.

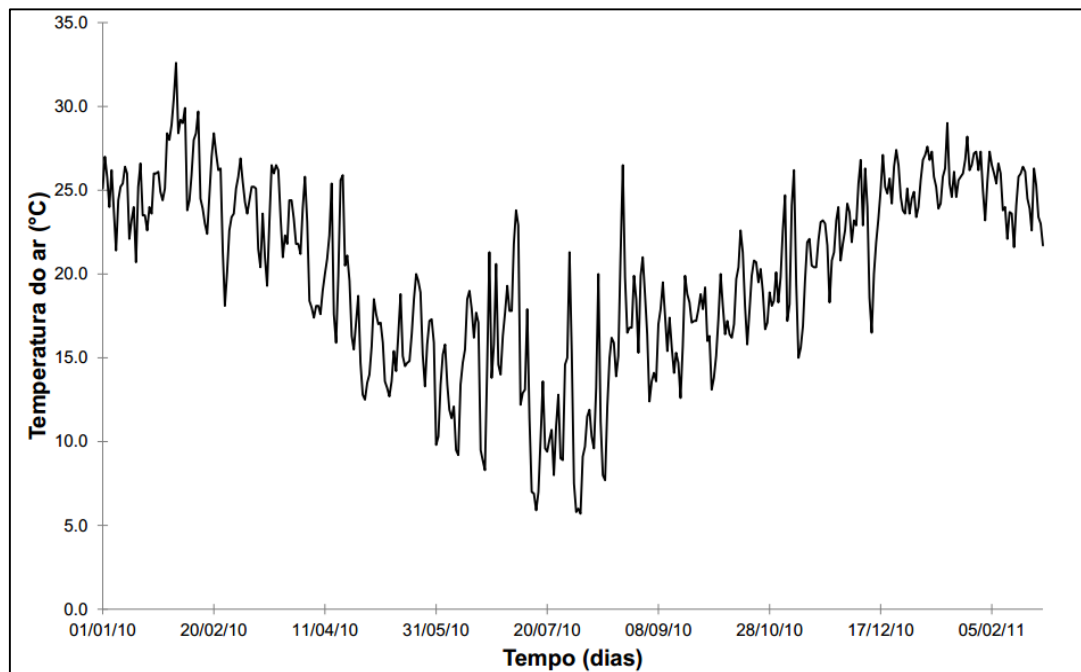
Nas figuras 16 a 18 são mostrados alguns dados meteorológicos, que foram usados na simulação do reservatório do Vacacaí Mirim, para o modelo CE-QUAL-W2.

Figura 16 - Precipitação sobre Santa Maria, durante os anos de 2010 e 2011.



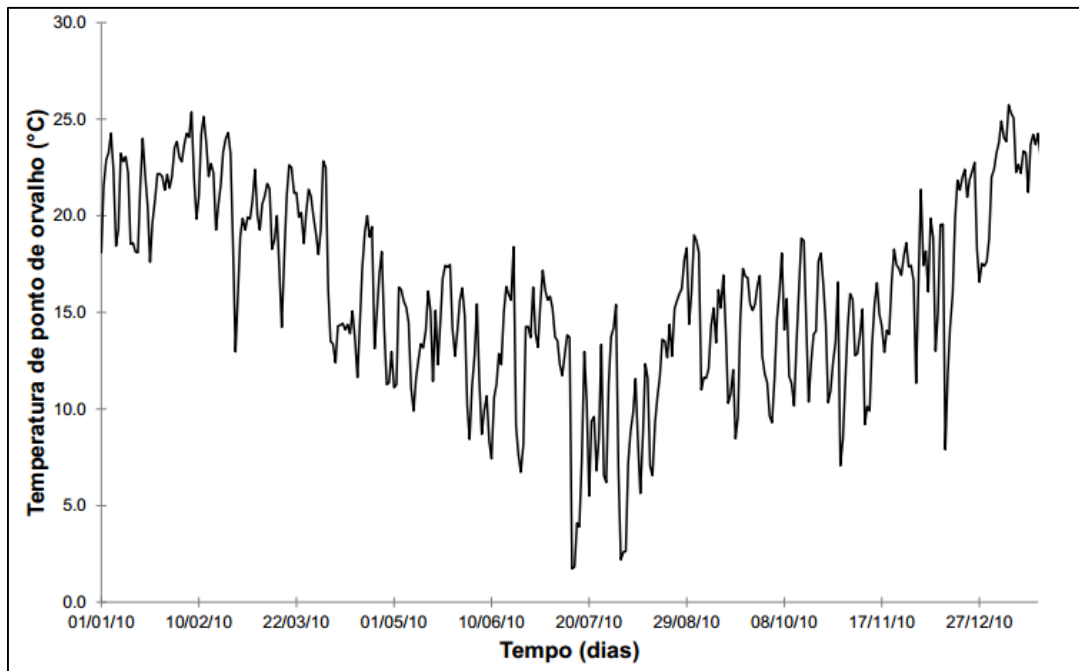
Fonte: CPTEC/ INPE (2015).

Figura 17 - Temperatura do ar em Santa Maria, nos anos 2010 e 2011.



Fonte: CPTEC/ INPE (2015).

Figura 18 - Temperatura de ponto de orvalho em Santa Maria, nos anos de 2010 e 2011.



Fonte: CPTEC/ INPE (2015).

5.5 PARÂMETROS CINÉTICOS

São coeficientes utilizados para ajustar os parâmetros de qualidade analisados, a fim de que seus comportamentos fiquem mais próximos da realidade. Essas taxas informam a respeito do decaimento ou formação dos constituintes. Geralmente, são utilizados os valores indicados pela literatura, porém, muitas vezes, estes são modificados para melhor representar determinada área de estudo.

Como não existem estudos no reservatório do Vacacaí Mirim, que indiquem os valores destes parâmetros cinéticos, partiu-se dos valores indicados por Cole e Wells (2013), e estes foram modificados para melhorar a calibração. Os parâmetros cinéticos e suas taxas de variação serão melhor detalhados nas etapas de calibração do OD, da temperatura da água, da DBO e da *E.coli*.

5.6 CALIBRAÇÃO

O ponto P1, localizado em um rio, e o P2, em um local raso, não representam as características de um reservatório. Logo, o modelo apresentará dificuldades nas

simulações destes pontos. Assim, serão apresentados somente os resultados das calibrações dos pontos P3, P4 e P5.

Para a obtenção de resultados mais próximos da realidade e para auxiliar na calibração, são necessárias características do reservatório, anteriores à primeira campanha a ser calibrada. Além disso, o tempo de detenção do reservatório é de 87 dias e não seria adequado considerar a primeira campanha (dia 18/01/2010), como sendo o primeiro dia a ser calibrado.

Visto que, existe carência de dados de monitoramento, anteriores a 2010, serão utilizados os dados das duas primeiras campanhas, do dia 18/01/2010 e do dia 04/03/2010, somente para fornecer as características iniciais do local. Dessa forma, as campanhas dos dias 14/04/2010, 10/06/2010, 09/08/2010, 06/10/2010 e 02/12/2010 foram as consideradas para a calibração. Já, o dia 10/02/2011 foi utilizado para a validação do modelo.

Neste estudo, realizou-se a calibração de forma manual, através de alterações nos parâmetros cinéticos, buscando os valores adequados. Para a quantificação dos erros, foram utilizadas as equações 9 e 10, da mesma forma como em Souza (2006).

$$EMA = \frac{\Sigma|\text{Simulado}-\text{Observado}|}{n^{\circ} \text{ de observações}} \quad (9)$$

$$EP = \sqrt{\frac{\Sigma(\text{Simulado}-\text{Observado})^2}{n^{\circ} \text{ observações}}} \quad (10)$$

Sendo:

EMA = erro médio absoluto;

EP = erro padrão.

O EMA indica o quanto os valores simulados divergem dos observados, em média. Já, o EP representa a dispersão dos valores simulados em relação aos observados (SOUZA, 2006).

5.6.1 Calibração do nível do reservatório

A calibração do nível do reservatório, no CE-QUAL-W2, foi realizada, através do equilíbrio entre as elevações observadas e as calculadas. Na tabela 4 têm-se as cotas observadas, nos dias das coletas das amostras por Burin (2011).

Tabela 4 - Cotas observadas do reservatório do Vacacaí Mirim.

Data	Cota (m)
18/01/2010	131,0
04/03/2010	130,0
14/04/2010	129,0
10/06/2010	130,0
09/08/2010	131,0
06/10/2010	131,0
02/12/2010	128,5

De acordo com Cole e Wells (2013), a calibração do nível do reservatório pode ser realizada, através do equilíbrio entre as vazões de entrada e saída. Foram utilizadas as vazões obtidas por Burin (2011), como sendo as de entrada no reservatório. Porém, como foram realizadas somente algumas campanhas, e os dados de vazão de saída no reservatório, fornecidos pela CORSAN, são valores médios, foi feito o ajuste manual das vazões, a fim de obter elevações mais próximas às observadas.

Outros fatores que podem influenciar nos níveis do reservatório são a precipitação e a evaporação. A primeira, já estará incluída na simulação, por meio dos dados meteorológicos. E, a respeito da evaporação, não existem informações específicas sobre esta no reservatório. Dessa forma, foram ajustadas as vazões, como sugerido pelo manual do modelo CE-QUAL-W2. Acredita-se que isto não influenciou nos demais resultados do modelo, pois, o objetivo deste trabalho é a simulação dos parâmetros de qualidade da água, e não, um estudo da hidrodinâmica do reservatório.

5.6.2 Calibração da temperatura da água

Após adequar a elevação da superfície da água, nos diferentes períodos, o primeiro parâmetro de qualidade da água que foi calibrado é a temperatura, devido à sua influência sobre os demais parâmetros.

Primeiramente, foram inseridos os perfis de temperatura obtidos por Burin (2011). Após a entrada destes dados, foi necessário ajustar algumas variáveis (parâmetros cinéticos), que auxiliam na calibração da temperatura da água no modelo. São elas: a porcentagem de radiação solar que atinge a superfície da água (*solar shading*); os coeficientes relacionados ao vento, que afetam a evaporação (*evaporative wind coefficients*); o coeficiente de extinção de luz (*light extinction*), que controla a profundidade atingida, pelos raios solares, na coluna da água. Ainda, é importante a temperatura de sedimento (TSED), que está relacionada com as trocas de calor entre o sedimento e a água; e o coeficiente *beta*, que controla a fração solar absorvida pela coluna d'água.

5.6.3 Calibração do OD

Primeiramente, foram lançados os dados observados de OD. Estes são compostos por perfis do OD, medidos nos pontos de estudo por Burin (2011). Para iniciar a calibração, o primeiro item que deve ser modificado é a demanda bentônica (SOD). O modelo permite que cada segmento, em que o reservatório foi dividido, tenha um valor diferente deste parâmetro, geralmente entre 0,1 e 1,0 g.O₂. m⁻².dia⁻¹, podendo ser maior.

Segundo Cole e Wells (2013), em reservatórios, o SOD varia espacialmente, devido às diferenças entre os padrões de sedimentação e a produção das algas. Juntamente com a adequação dos valores de SOD, para cada segmento, as taxas e constantes referentes a este parâmetro podem ser ajustadas, como a concentração inicial de sedimento, temperaturas de decaimento, entre outras.

Por fim, foram ajustadas algumas taxas referentes à reaeração. Como ainda não foi determinada uma equação que descreva a reaeração no reservatório do Vacacaí Mirim, utilizou-se as equações disponíveis no modelo. Dessa forma, as equações que governam a reaeração nos reservatórios foram alteradas, manualmente, e testadas, a fim de que seja encontrada aquela que mais se adapta à área de estudo, facilitando a calibração do modelo.

5.6.4 Calibração da DBO

Para a calibração da DBO, foram utilizados, como dados de entrada, os obtidos por Burin (2011). O modelo CE-QUAL-W2 permite que o usuário simule vários grupos com DBO's diferentes, vindas de diversas fontes. Porém, como neste estudo não existem dados tão específicos, a respeito das fontes de poluição, usou-se somente um grupo de parâmetros para simular a DBO.

A equação 11 descreve o comportamento da DBO no modelo CE-QUAL-W2.

$$KBOD = KBOD_{20} \cdot TBOD^{T-20} \quad (11)$$

Sendo:

KBOD= Taxa de decaimento da DBO no 5° dia (dia^{-1});

KBOD₂₀= Taxa de decaimento da DBO a 20°C (dia^{-1});

TBOD= coeficiente de ajuste da temperatura;

T = temperatura da água (°C).

Além disso, o modelo possibilita ajustar o parâmetro RBOD, utilizado para converter a DBO₅ para DBO última. Ainda, é apresentado o CBODS, parâmetro associado à taxa de sedimentação dos grupos de DBO's. Por fim, o CE-QUAL-W2 expõe a relação entre a estequiometria do fósforo, nitrogênio e carbono, e o decaimento da DBO. Estes apresentam valores fixos.

5.6.5 Calibração da *E.coli*

No modelo CE-QUAL-W2, os coliformes são considerados constituintes genéricos. Logo, na calibração, não ocorrem interações com as variáveis hidrodinâmicas e nem com outras, relacionadas à qualidade da água (COLE e WELLS, 2013).

A exceção é a temperatura, que exerce influência sobre os coliformes, estando presente na equação que rege o decaimento dos constituintes genéricos (equação 12).

$$K = K_0 + \left(K_1 \theta^{T-20} + \frac{w}{\Delta Z} \right) \Phi \quad (12)$$

Sendo:

K = taxa de decaimento do constituinte;

K_0 = coeficiente de decaimento de ordem zero;

K_1 = coeficiente de decaimento de primeira ordem;

θ = coeficiente de temperatura de Arrhenius;

T = temperatura;

w = velocidade de sedimentação;

Δz = profundidade em relação à superfície;

Φ = concentração do constituinte;

No modelo CE-QUAL-W2, os parâmetros cinéticos que podem ser modificados, para auxiliar a calibração dos coliformes são: o coeficiente de temperatura de Arrhenius, os coeficientes de decaimento de zero e primeira ordem, e a velocidade de sedimentação.

Em Cole e Wells (2013) não há indicação de valores ou taxas de variação dos parâmetros utilizados na calibração dos coliformes. Ainda, o CE-QUAL-W2 considera outros elementos como constituintes genéricos também, como o tempo de residência e os traçadores, denominando-os como constituintes genéricos 1, 2, 3 e assim por diante. Logo, na calibração, os coliformes somente são ativados no modelo, a partir do constituinte genérico 3.

5.7 VALIDAÇÃO

Neste trabalho, foi utilizada a campanha do dia 10/02/2011 (dia juliano 406), para realizar a validação do modelo. Assim, os resultados das variáveis utilizadas, na calibração, foram lançados no CE-QUAL-W2, para simular o dia 406.

5.8 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

Foram realizadas duas simulações de cenários futuros, para o reservatório do Vacacaí Mirim. A primeira foi baseada no aumento da população na bacia do reservatório. Para isso, foram utilizados dados dos setores censitários, fornecidos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia Estatística), nos anos 2000 e 2010.

Utilizou-se o método geométrico, para a estimativa da população no ano de 2050. Assim, a porcentagem de crescimento da população, entre 2010 e 2050, foi utilizada para majorar as cargas poluidoras e, conseqüentemente, a DBO.

As equações 13 e 14 mostram as etapas deste cálculo. Na primeira, é mostrada a equação da taxa de crescimento, e na segunda, a população futura.

$$r_g = \left(\sqrt[t]{\frac{P_f}{P_i}} \right) - 1 \quad (13)$$

$$P^t = P_i \times (1 + r_g)^t \quad (14)$$

Sendo:

r_g = taxa de crescimento geométrico;

t = tempo transcorrido entre as datas de referência;

P_f = população no fim do período;

P_i = população no início do período;

P^t = população em um tempo t ;

Para a segunda simulação de cenário, considerou-se a instalação de um abatedouro de aves na região da bacia do reservatório do Vacacaí Mirim. Escolheu-se um abatedouro, pois este é um tipo de empreendimento comum em várias cidades e que gera uma maior quantidade de efluentes.

Considerou-se os resultados do estudo de Fernandes Junior e Mendes (2006), em que foi coletado efluente de um abatedouro de aves e analisado diversos parâmetros. Neste empreendimento, eram abatidas cerca de 125.000 aves por dia. Assim, as concentrações de DBO e vazões dos efluentes, obtidos pelos autores, foram inseridas no modelo, a fim de obter o efeito dos mesmos sobre a DBO e o OD do reservatório.

Para a inserção dos dados, considerou-se a vazão de entrada, como sendo a soma entre a vazões medidas no ponto 1 e as vazões dos efluentes do abatedouro. E para calcular a DBO que entra no reservatório, considerou-se o resultado da equação 15.

$$DBO_{\text{entrada}} = \frac{Q_{P1} \cdot DBO_{P1} + Q_{\text{ef}} \cdot DBO_{\text{ef}}}{Q_{P1} + Q_{\text{ef}}} \quad (15)$$

Sendo:

DBO_{entrada} = DBO de entrada no reservatório;

DBO_{P1} = DBO do ponto P1;

DBO_{ef} = DBO do efluente do abatedouro;

Q_{P1} = Vazão do ponto P1;

Q_{ef} = Vazão do efluente do abatedouro;

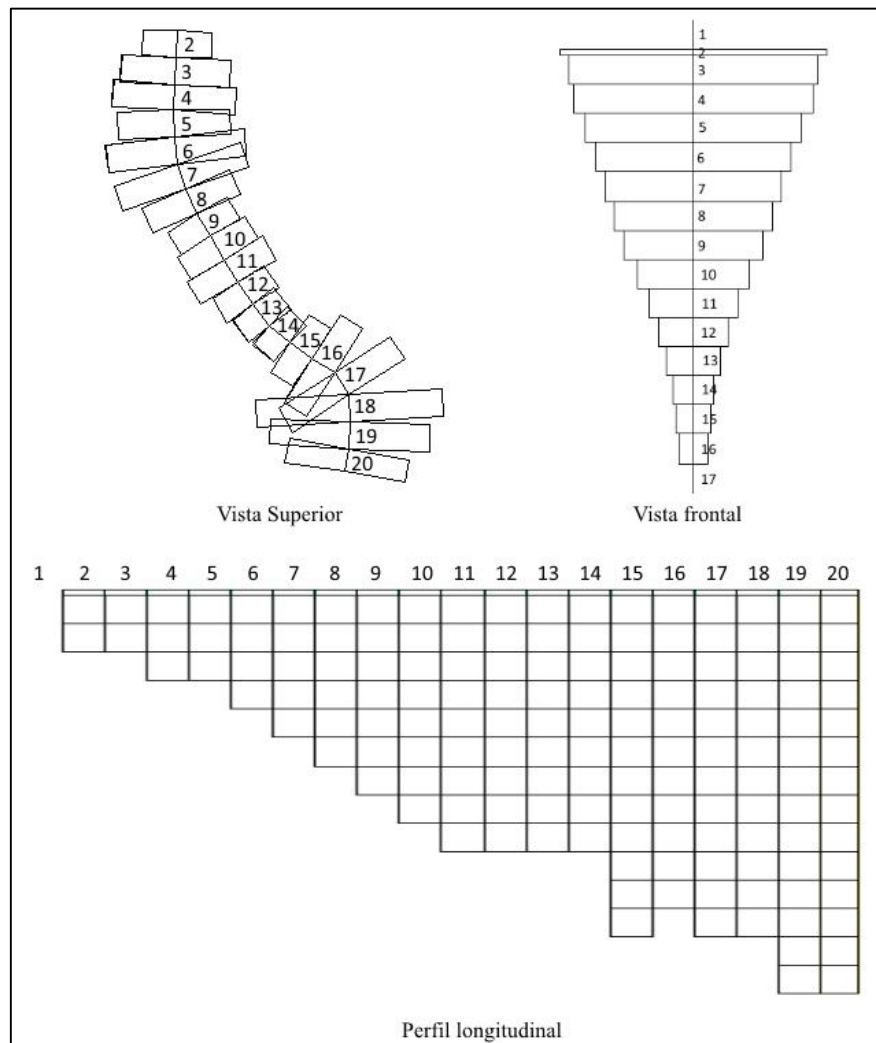
Por fim, é importante ressaltar, que foram alteradas as concentrações de DBO que adentram no reservatório pelo afluente principal, já que este modelo não considera a carga difusa na bacia.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 REPRESENTAÇÃO DA BATIMETRIA DO RESERVATÓRIO

Na figura 19 é mostrada a discretização do reservatório em células (vista superior), e os demais perfis longitudinal e frontal, gerados pelo modelo. Como a profundidade máxima do reservatório é de 14,2 m, a primeira camada apresenta 20cm de espessura e, as demais, 1 m.

Figura 19 - Vistas superior, frontal e perfil longitudinal do reservatório, gerados pelo modelo CE-QUAL-W2.



Os pontos P4, P5 e P3 estão localizados nos segmentos 20, 19 e 11, respectivamente. A partir destes perfis, é possível ter uma visão das aproximações do modelo, em relação à geometria do reservatório. Foram totalizados 21 segmentos

longitudinais e 17 camadas. O modelo não considera a primeira e a última camada para a simulação, e o mesmo ocorre com os segmentos, sendo atribuídos aos mesmos, espessuras e comprimentos iguais a 0. Assim, o reservatório foi dividido em células, com 100 m de comprimento, porém, o segmento 20 ficou com 89,78 m.

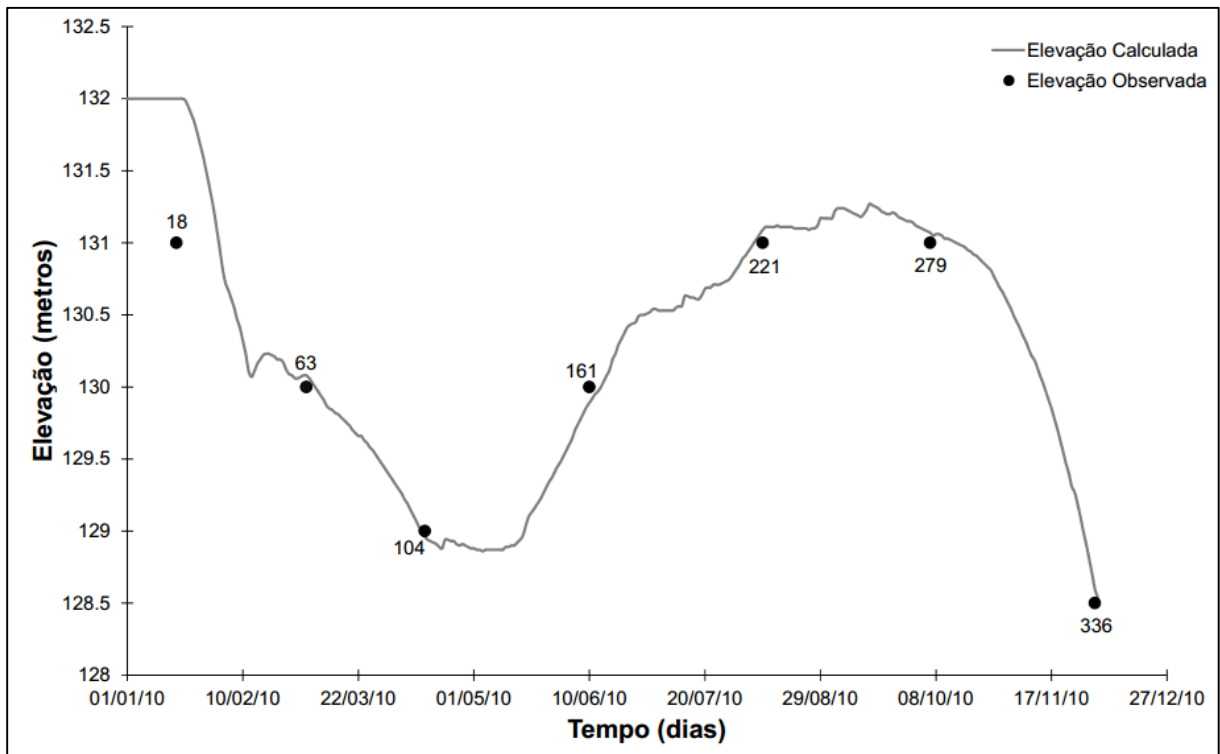
6.2 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO

Após o ajuste das vazões, o modelo simulou as elevações da superfície da água. Na figura 20 são mostradas as elevações observadas e calculadas, ao longo do ano de 2010. Ainda, juntamente com as cotas observadas, foram mostrados os dias julianos em que elas ocorreram, para facilitar a comparação dos dados e a visualização dos resultados. Para o reservatório do Vacacaí Mirim, o nível da água não ultrapassou os 132 m, visto que esta é a cota do vertedor. Assim, qualquer excesso de água transbordará sobre o mesmo. Deve ser salientado, que não é possível afirmar que alguns picos ou cotas representadas na figura 20 ocorreram realmente, pois, há escassez de dados sobre a elevação da superfície da água na época; logo, estes comportamentos dos níveis da água foram considerações realizadas pelo modelo.

Em relação aos níveis do reservatório, observou-se que a maior cota foi atingida no início de 2010. Isto deve ter sido motivado pelos grandes volumes de chuva que ocorreram na época, ocasionando maiores vazões de entrada no reservatório. Já, no final do ano, a elevação da superfície da água diminuiu, devido às menores vazões e ao período de pouca precipitação.

Os erros obtidos para a calibração da elevação, foram: $EMA = 0,21$ m e $EP = 0,39$ m. O maior erro obtido foi no dia 18/01/2010, que pode ter sido motivado pela carência de dados anteriores à esta data. Dessa forma, acredita-se que os resultados para a simulação do nível d'água, em geral, foram satisfatórios.

Figura 20 - Elevações observadas e simuladas da superfície da água do reservatório do Vacacaí Mirim, com indicação dos dias julianos estudados.



6.3 RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA

Nas figuras 21 a 25 estão os resultados das calibrações realizadas nas temperaturas da água do reservatório, para as campanhas dos dias julianos 104, 161, 221, 279 e 336. São mostrados os perfis de temperatura nos pontos P3, P4 e P5, além da imagem fornecida, pelo modelo CE-QUAL-W2, que representa o perfil longitudinal do reservatório e as diferentes temperaturas encontradas em um determinado dia.

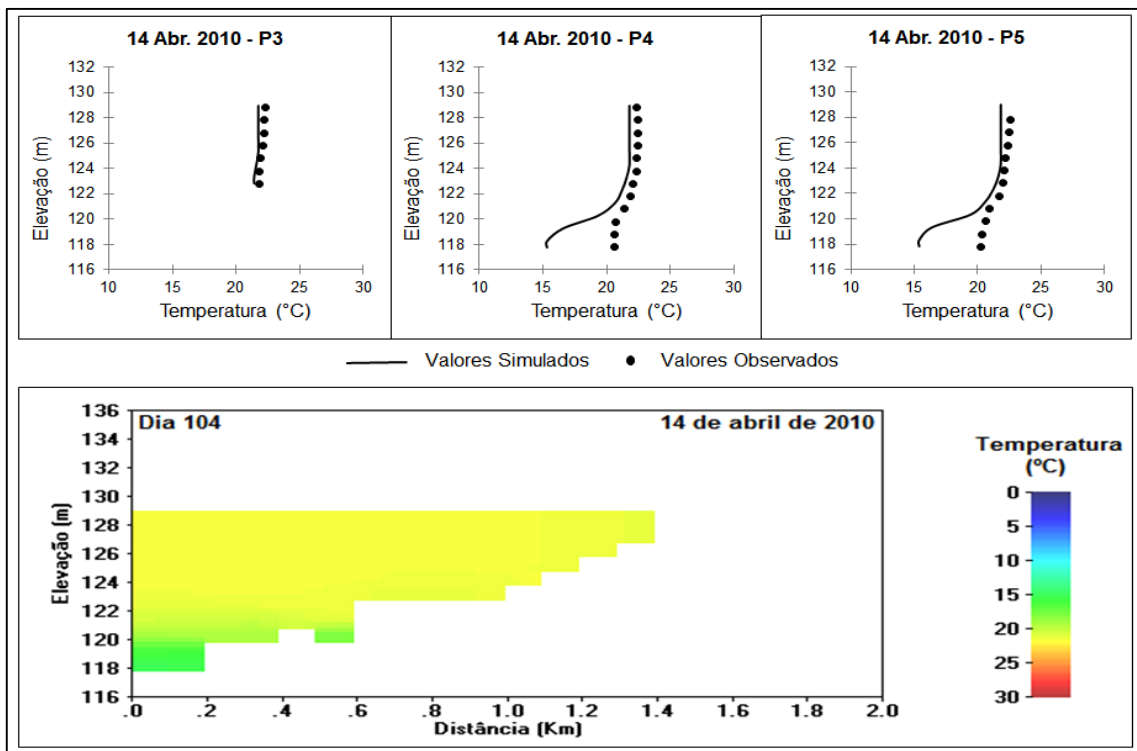
Foram calculados os erros para as calibrações da temperatura da água (tabela 5). Percebeu-se que o modelo simula, com maior precisão, perfis contendo temperaturas mais uniformes, como os que ocorrem em dias frios. Porém, o modelo é capaz de representar as estratificações térmicas, que ocorrem em épocas quentes, com perfis semelhantes aos observados. No entanto, apresentou uma tendência de subestimar a temperatura das camadas mais profundas, nos dias em que ocorreram as maiores variações na temperatura da água.

Tabela 5 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da temperatura da água, em relação aos dados observados.

Dia Juliano	P3		P4		P5	
	EMA(°C)	EP(°C)	EMA(°C)	EP(°C)	EMA(°C)	EP(°C)
104	0,4	0,4	1,9	2,6	1,6	2,3
161	1,9	2,0	0,9	0,9	0,7	0,7
221	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
279	0,9	1,0	0,9	1,0	0,9	1,0
336	1,8	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5

Os maiores erros ocorreram no dia 336. Estes devem ter sido motivados pela estratificação térmica mais intensa causando, conseqüentemente, maior variação nos dados. Considerando todos os pontos, a calibração atingiu melhores resultados para o dia 21, pois neste, a temperatura se comportou de maneira uniforme até o fundo do reservatório, tornando mais simples a calibração.

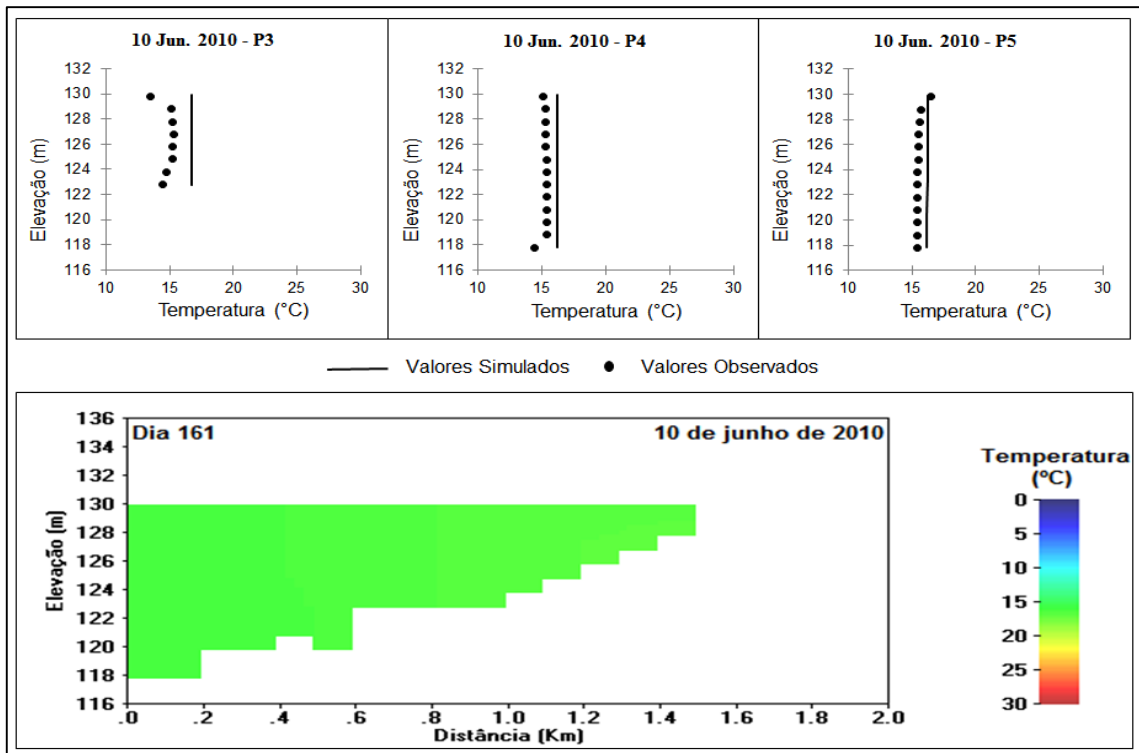
Figura 21 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.



No dia juliano 104, ocorreu uma leve estratificação térmica no reservatório. O CE-QUAL-W2 foi capaz de simular o comportamento da temperatura, principalmente

no ponto P3. Nos demais pontos, os resultados do modelo permaneceram próximos aos observados. Porém, verificou-se que o software subestimou as temperaturas nos pontos mais profundos do reservatório.

Figura 22 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.



Para o dia 161, figura 22, o modelo apresentou resultados bem próximos aos reais, com perfis semelhantes aos observados, porém, não coincidentes. Além disso, devido à época de inverno, não ocorreu estratificação térmica. No dia 9 de agosto, que atingiu temperaturas mais baixas, o modelo realizou a melhor simulação da temperatura, dentre as campanhas estudadas.

Na campanha de 6 de outubro de 2010, figura 24, ocorreu estratificação térmica, porém, não tão intensamente, visto que as camadas superficiais apresentaram mistura da coluna da água. Os perfis simulados pelo CE-QUAL-W2 ficaram próximos dos observados, porém, ocorreram diferenças nas temperaturas, tanto nas camadas mais superficiais, quanto nas mais profundas.

Figura 23 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.

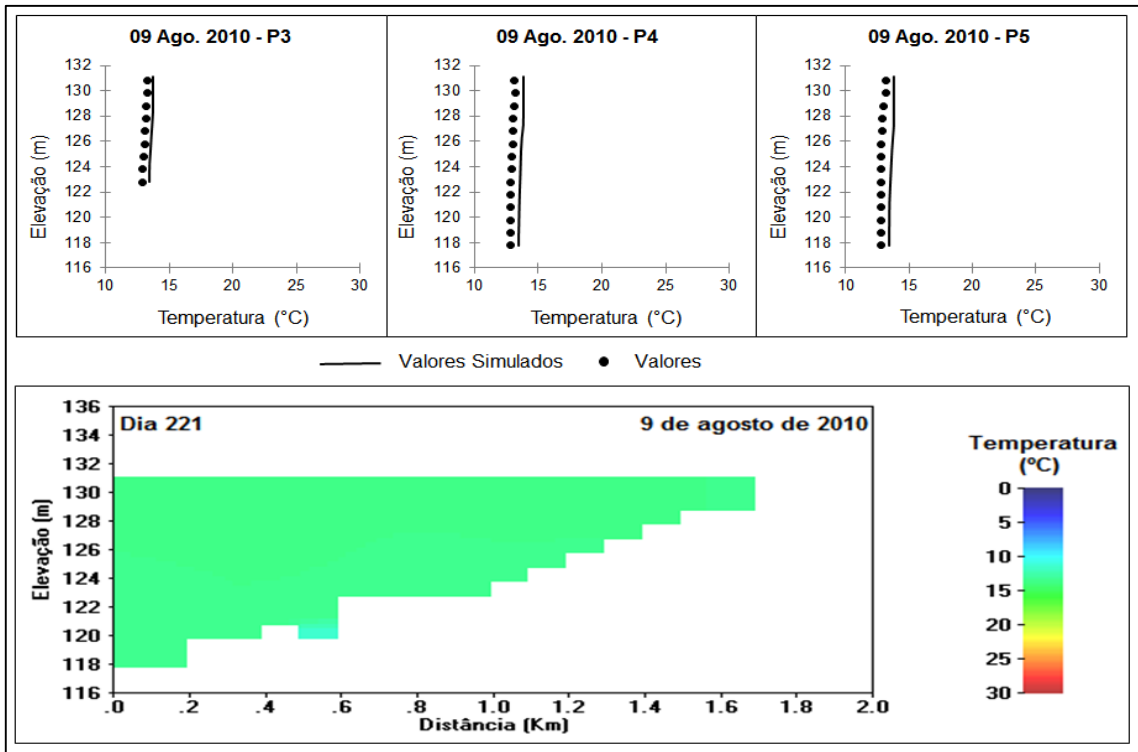
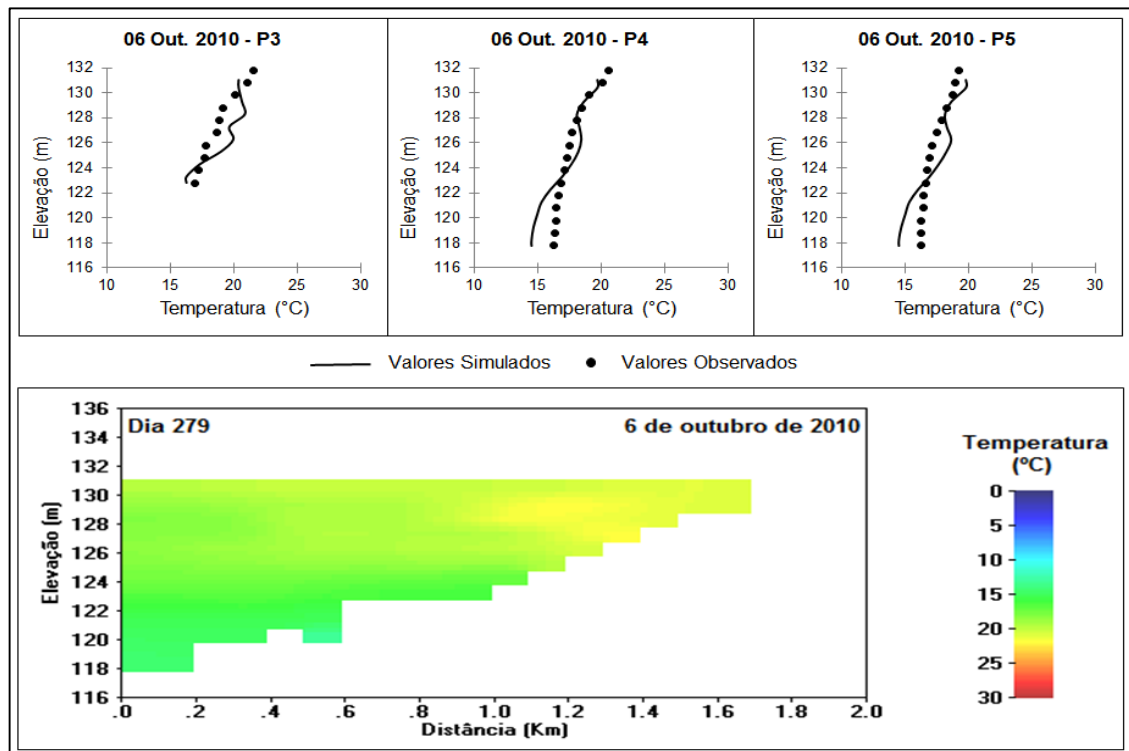
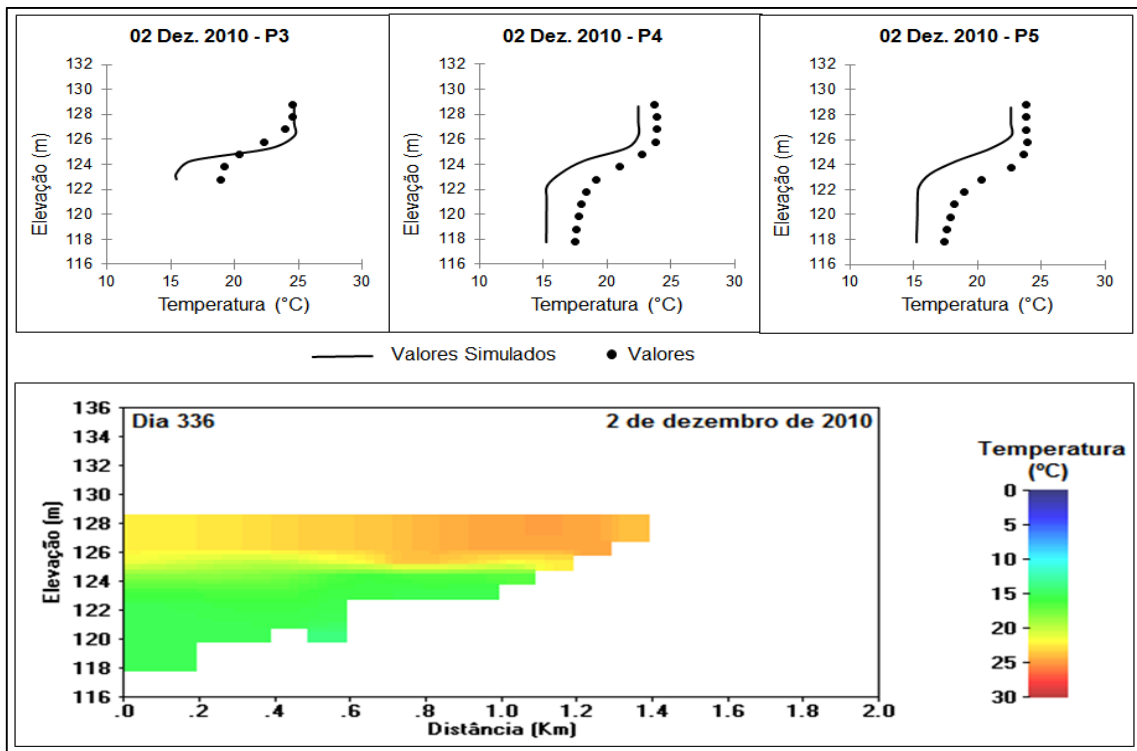


Figura 24 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.



Na figura 25, que mostra os resultados do dia 336, a estratificação térmica é mais visível, pois em temperaturas mais elevadas, este fenômeno, geralmente, está presente. As maiores temperaturas, em torno de 25°C, foram atingidas na superfície. Novamente, o modelo apresentou a tendência de diminuir as temperaturas das camadas mais profundas em alguns pontos.

Figura 25 - Resultado da calibração da temperatura da água para o dia 02 de dezembro de 2010, dia juliano 336.



Os resultados dos parâmetros finais da calibração estão mostrados na tabela 6. Shojaei (2014) simulou a temperatura do reservatório de Karkheh, situado no Irã, e encontrou bons resultados. Na calibração, o autor ressaltou que dois dos parâmetros mais importantes, para a determinação da estratificação térmica dos reservatórios, são o *light extinction* e o coeficiente *beta*. Em seu trabalho, os valores obtidos para estes parâmetros foram 0,22 e 0,45, respectivamente.

O primeiro valor foi bastante semelhante ao encontrado no reservatório do Vacacaí Mirim, e ambos estão próximos da faixa de variação indicada por Cole e Wells (2013), que é de 0,25 a 0,45. Já, para o coeficiente *beta*, não foi determinada uma taxa de variação específica, tendo sido encontrado na literatura, valores entre 0,24 e 0,69. O coeficiente *solar shading* varia de 0 (mínimo) a 1 (máximo). Bonalumi et al.

(2012), também considerou o valor, deste parâmetro, como sendo 1. Para os demais parâmetros cinéticos relacionados à temperatura, em Cole e Wells (2013), não foram determinadas taxas de variação.

Tabela 6 - Resultados dos parâmetros relacionados com a temperatura.

Coeficientes de calibração da temperatura	Valores adotados
Coef. de evaporação A ($Wm^{-2}mmHg^{-1}$)	0,01
Coef. de evaporação B ($Wm^{-2}mmHg^{-1}$)	0,70
Coeficiente de evaporação C	3,00
<i>Solar shading</i>	1,00
<i>Light extinction</i> (m^{-1})	0,25
Temperatura do sedimento ($^{\circ}C$)	10,00
Beta	0,31

Os demais parâmetros foram ajustados, testando manualmente os valores. Dessa forma, considera-se os resultados obtidos, como sendo satisfatórios, pois as temperaturas foram simuladas e os resultados ficaram próximos aos observados, obtendo baixos erros.

6.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO OD

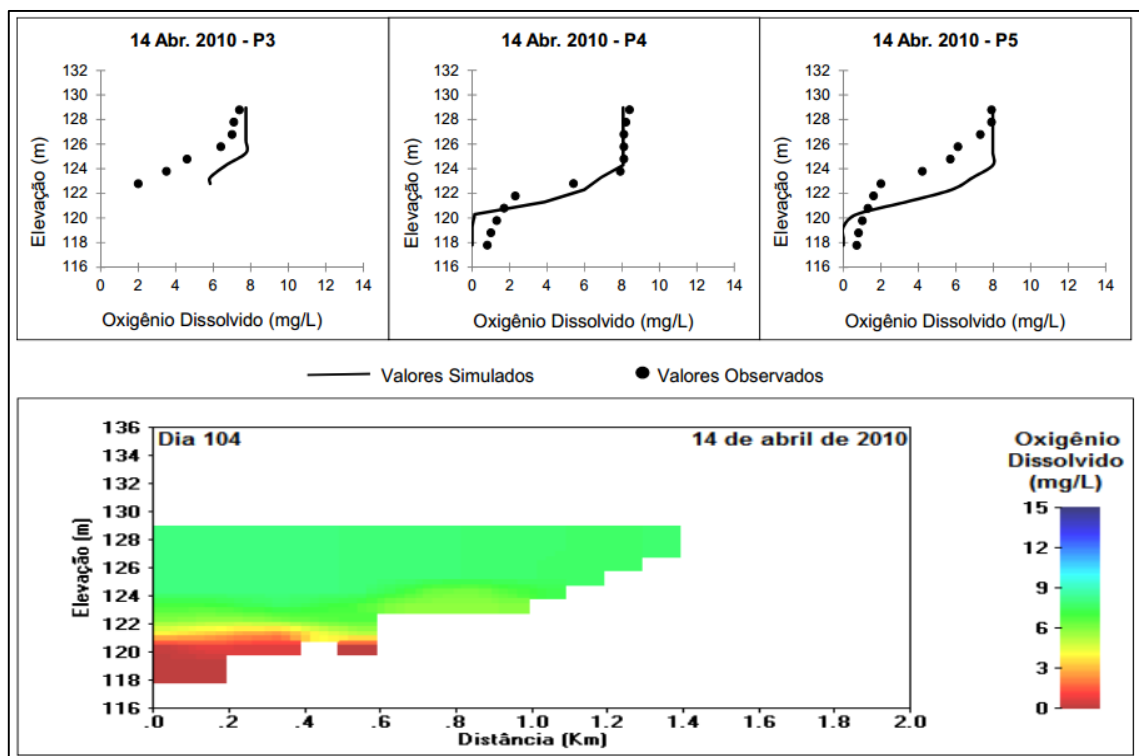
Nas figuras 26 a 30 estão os resultados da calibração do OD no reservatório, para as campanhas dos dias julianos 104, 161, 221, 279 e 336. Na tabela 7 são mostrados os erros médios absolutos e padrões da calibração do OD na água.

Tabela 7 - Erros médios absolutos e padrões da simulação do OD na água, em relação aos dados observados.

Dia juliano	P3		P4		P5	
	EMA(mg/L)	EP(mg/L)	EMA(mg/L)	EP(mg/L)	EMA(mg/L)	EP(mg/L)
104	1,6	2,0	0,7	0,9	1,4	1,7
161	1,9	2,2	0,9	2,0	0,6	0,7
221	0,5	0,7	1,0	1,3	1,5	1,7
279	1,9	2,1	1,4	1,9	1,9	2,1
336	1,4	1,8	0,9	0,9	1,0	1,1

O dia 279 apresentou os maiores erros na calibração, pois, foram obtidas as maiores variações nas concentrações de OD neste período, o que dificultou a simulação pelo modelo. Porém, em todos os pontos foram obtidos perfis semelhantes aos medidos, o que demonstra a capacidade do modelo em simular este parâmetro, em diferentes épocas.

Figura 26 - Resultado da calibração do OD para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.



O dia 104 apresentou uma variação bastante significativa de OD, com concentrações baixas nas maiores profundidades. Já, em 10 de junho de 2010, o OD é mais uniforme. Assim, o modelo simulou perfis semelhantes, porém, subestimou as concentrações deste parâmetro.

Observou-se uma maior facilidade do modelo em calibrar os perfis, que apresentaram uma maior homogeneidade dos valores de OD, como ocorreu no dia 9 de agosto de 2010. Dessa forma, o modelo conseguiu representar o comportamento da maioria dos dados, mas apresentou dificuldades em simular pontos deslocados dos demais. Nos dias 279 e 336, mesmo com a estratificação, o CE-QUAL-W2 apresentou perfis próximos aos observados, comprovando uma boa capacidade do modelo em calibrar a variação espacial e temporal do OD.

Figura 27 - Resultado da calibração do OD para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.

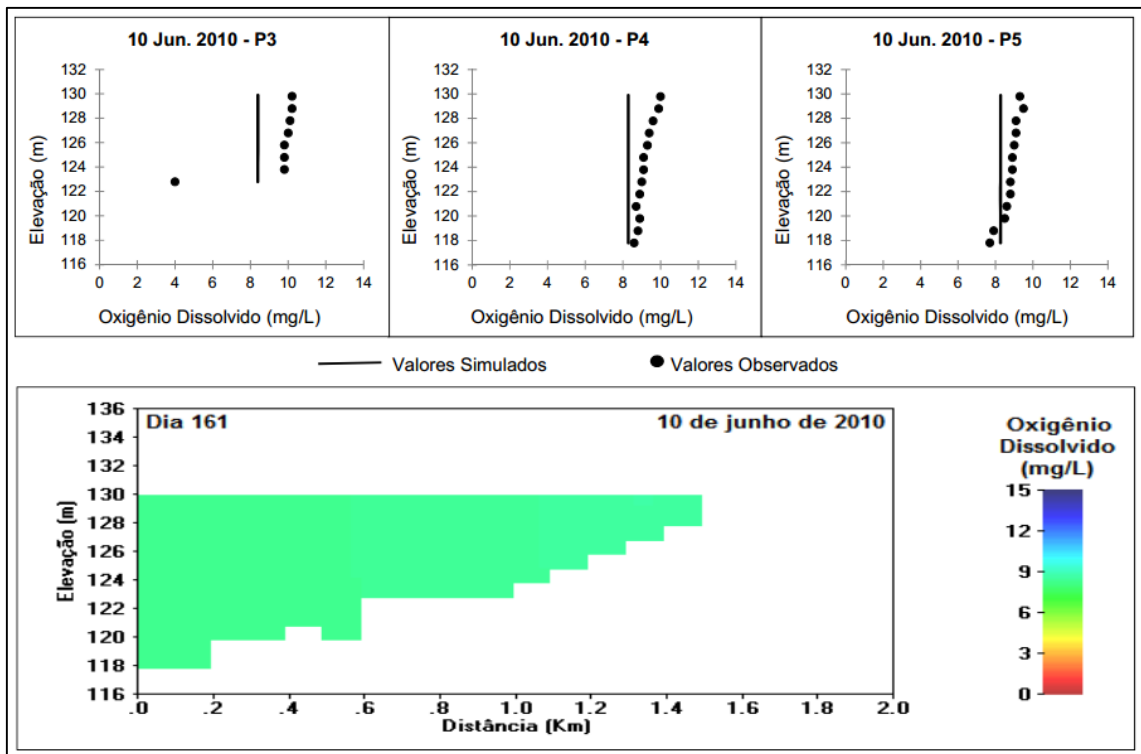


Figura 28 - Resultado da calibração do OD para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.

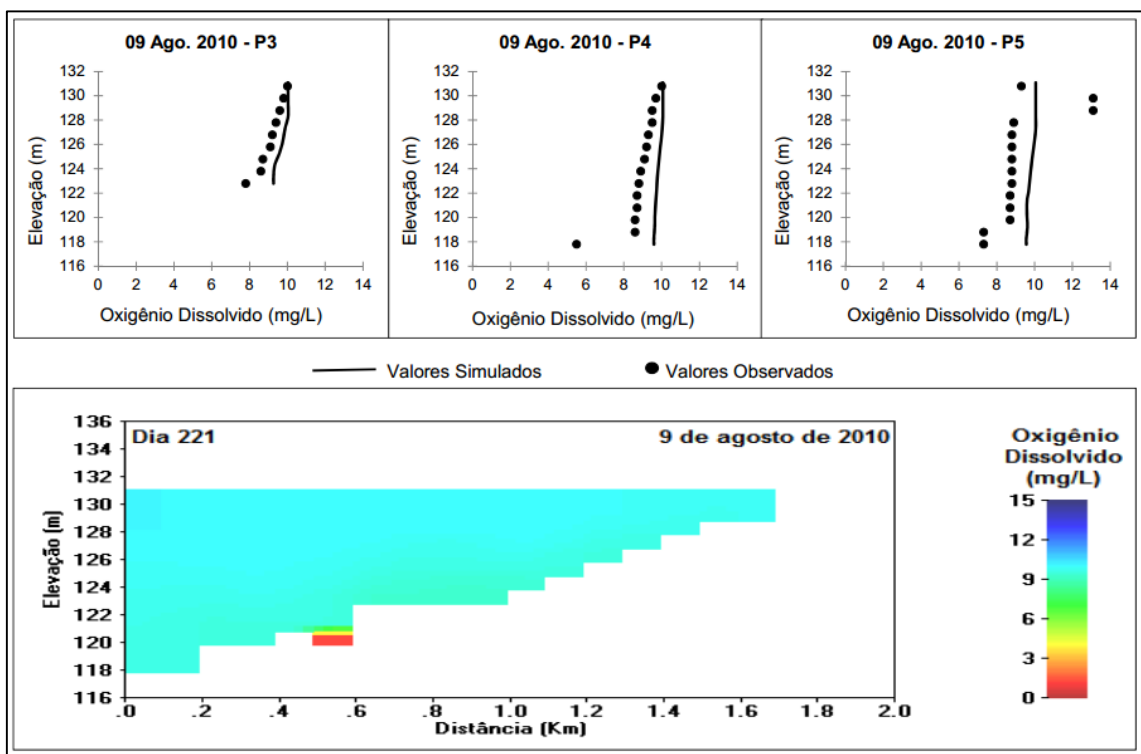


Figura 29 - Resultado da calibração do OD para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.

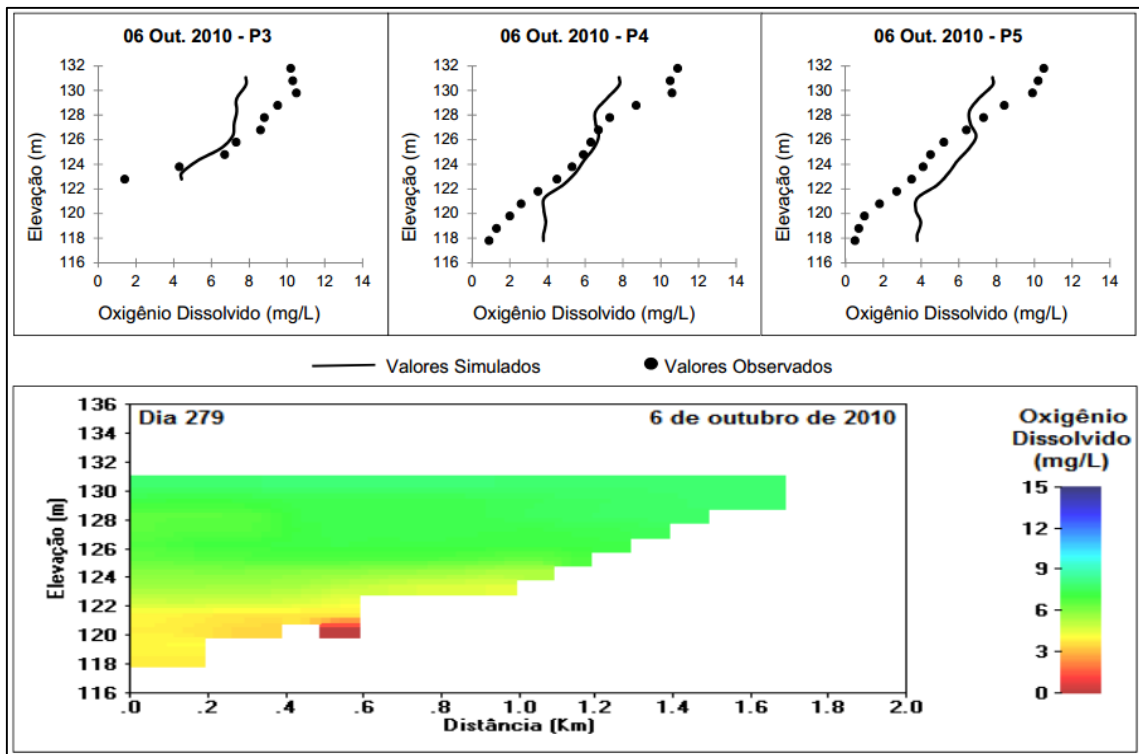
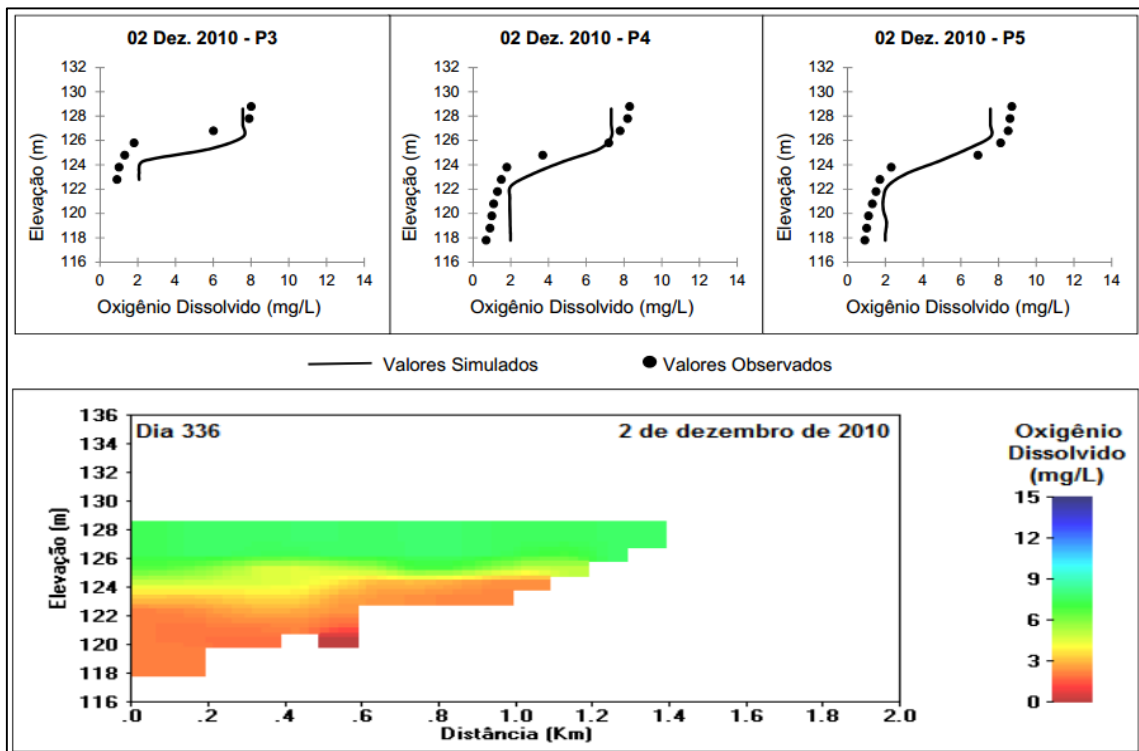


Figura 30 - Resultado da calibração do OD para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.



É importante destacar, que o parâmetro utilizado para a calibração, foi a demanda bentônica (SOD), porém, não é o único fator responsável pela calibração do OD. Logo, outros elementos como a fotossíntese, algas, macrófitas e zooplâncton, também deveriam ser alterados, para que seja aperfeiçoada esta calibração. Entretanto, a aplicação destes elementos não faz parte do objetivo deste estudo.

Rangel Peraza et al. (2012) relatam que o fitoplâncton e outras plantas aquáticas, que crescem na superfície, também produzem oxigênio, durante a fotossíntese, contribuindo para as concentrações de OD nas camadas da superfície da água.

Assim, como as algas e demais seres fotossintetizantes não foram considerados no modelo, o OD foi subestimado em alguns pontos, principalmente, os que estão mais próximos à superfície.

Os valores de SOD, na calibração, variaram entre 0,9 e 0,2 g O₂.m⁻²/dia. Como não existem valores deste parâmetro coletados em campo, ocorreram incertezas em relação ao SOD. Os menores valores de SOD foram obtidos nos pontos mais profundos e os maiores, nos pontos mais rasos.

O modelo apresenta outras taxas relacionadas ao SOD, que podem ser ajustadas. Porém, neste estudo, escolheu-se deixar estas variáveis com os valores indicados em Cole e Wells (2013), visto que, após alguns testes, estes não apresentaram modificações significativas na calibração do OD, para o reservatório do Vacacaí Mirim. Os valores utilizados estão descritos na tabela 8.

Dessa forma, considerando que os perfis de OD simulados e observados foram semelhantes e os erros foram baixos, nota-se a grande influência do SOD sobre a calibração do OD neste local.

Tabela 8 - Taxas e constantes relacionados ao SOD.

Nome do parâmetro	Descrição	Valor indicado (Cole e Wells, 2013)
SEDCI	Concentração inicial de sedimento (g/m ³)	0
SEDS	Velocidade de deposição do sedimento (m/d)	0,1
SEDK	Taxa de decaimento do sedimento (1/dia)	0,1
FSOD	Fração do SOD utilizada	1
FSED	Fração da concentração inicial de sedimento	1
SEDBR	Taxa de consumo de sedimento (1/dia)	0,01

Por fim, dentre as equações que governam a reaeração, disponíveis no modelo, escolheu-se a que mais se adaptava ao reservatório, favorecendo a calibração do OD. Esta é descrita segundo a equação 16.

$$Ka = \frac{K_L}{H} = \frac{0,64 + 0,128W^2}{H} \quad (16)$$

Sendo:

Ka = taxa de reaeração (dia⁻¹);

K_L = velocidade de reaeração (m. dia⁻¹);

H = profundidade (ft);

W = velocidade do vento (m. s⁻¹).

6.5 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA DBO

Nas figuras 31 a 35 estão os resultados da calibração da DBO no reservatório, para as campanhas dos dias julianos 104, 161, 221, 279 e 336. Na tabela 9 são mostrados os erros médios absolutos e padrões da calibração.

Tabela 9 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da DBO na água, em relação aos dados observados.

Dia juliano	P3		P4		P5	
	EMA(mg/L)	EP(mg/L)	EMA(mg/L)	EP(mg/L)	EMA(mg/L)	EP(mg/L)
104	0,4	0,4	1,2	1,5	0,9	1,2
161	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3
221	0,7	1,0	0,2	0,2	0,5	0,7
279	2,5	2,5	2,0	2,1	1,9	2,0
336	0,2	0,2	0,5	0,7	0,7	1,0

No dia 104 o modelo simulou perfis próximos aos observados, porém, subestimou a DBO das camadas mais profundas. O ponto P3 obteve a melhor calibração, com os menores erros, para este dia.

Observou-se que, em períodos onde a DBO foi mais baixa, como nos dias 10 de junho de 2010 e 9 de agosto de 2010, os pontos medidos apresentaram concentrações bastante próximas, e o modelo considerou a DBO, praticamente, constante. No dia 279 ocorreram os maiores erros, visto que o modelo superestimou a DBO, porém, as formas dos perfis simulados foram semelhantes aos medidos.

Ainda, no dia 336, a DBO apresentou concentrações baixas e o modelo obteve aproximação somente de 1 ponto observado. Em P3, a simulação foi mais correta, com um EMA de 0,2 mg/L e um EP de 0,2 mg/L.

Figura 31 - Resultado da calibração da DBO para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.

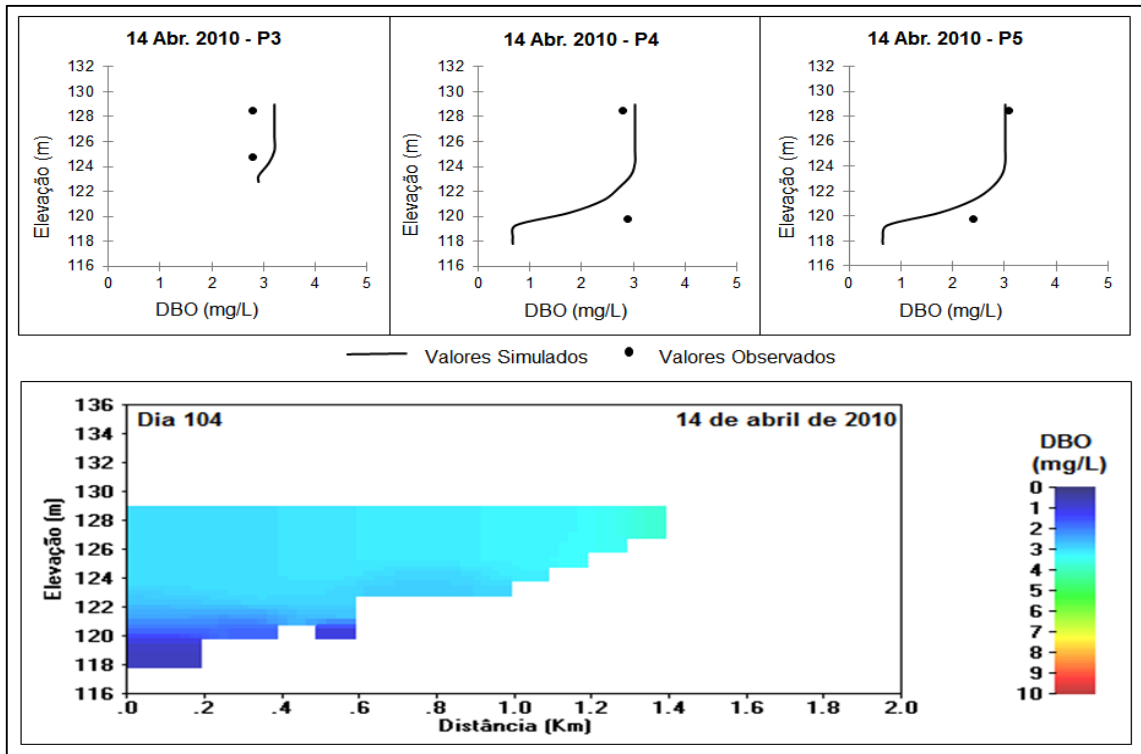


Figura 32 - Resultado da calibração da DBO para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.

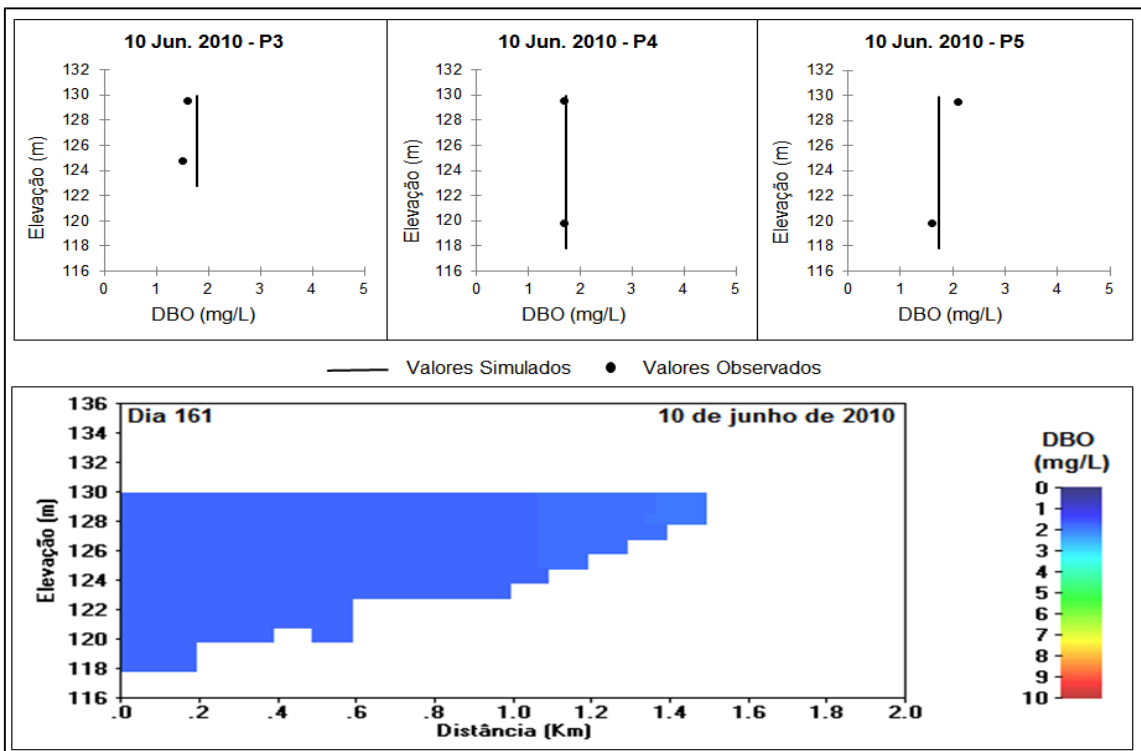


Figura 33 - Resultado da calibração da DBO para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.

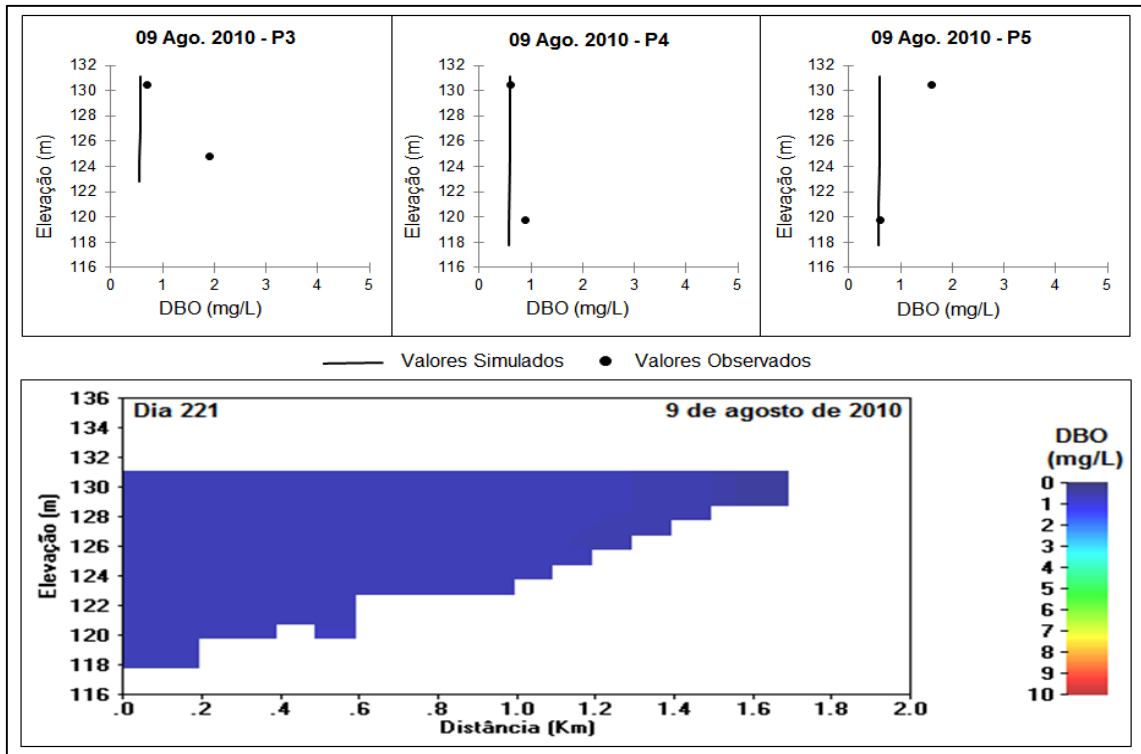


Figura 34 - Resultado da calibração da DBO para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.

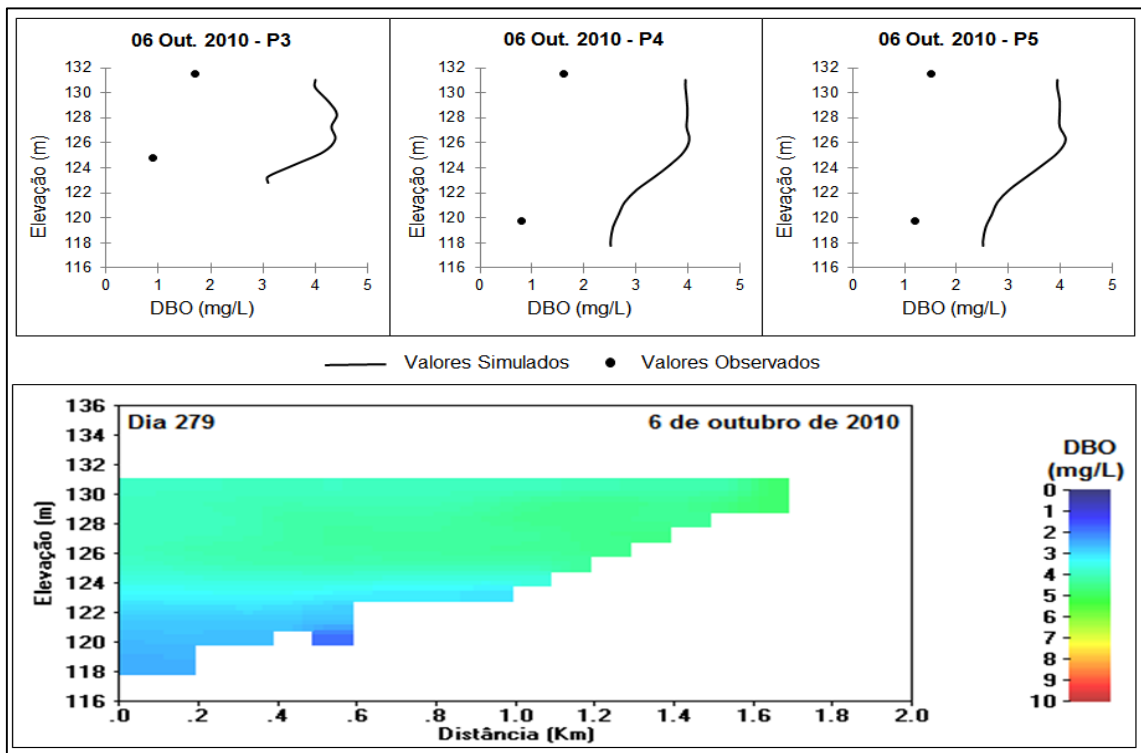
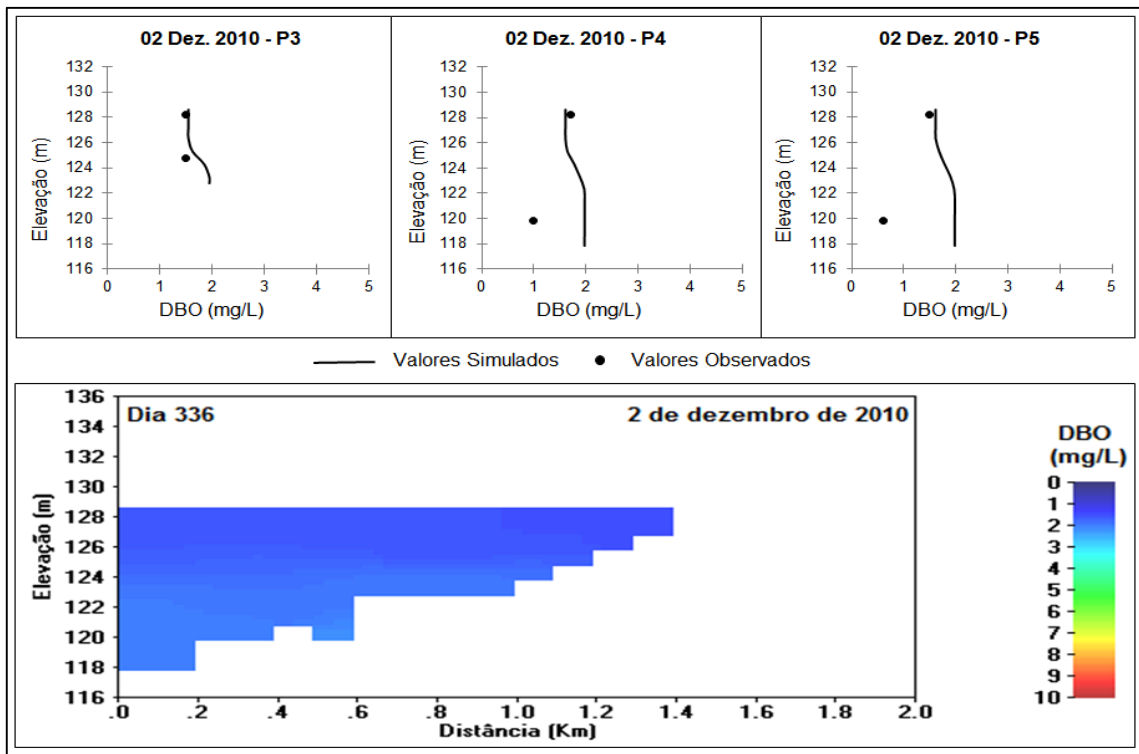


Figura 35 - Resultado da calibração da DBO para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.



Considerando todas as simulações, pode-se dizer, que o modelo apresentou boas aproximações para a calibração da DBO, embora, em alguns dias, a calibração não tenha coincidido com os dados observados. Acredita-se que, se existissem um maior número de dados observados para a DBO, o modelo poderia gerar resultados mais próximos dos reais.

Cole Wells (2013) sugerem alguns valores iniciais para a calibração dos parâmetros cinéticos, porém, não indicam taxas de variação dos mesmos. O único parâmetro modificado foi o KBOD. No restante dos parâmetros, aplicou-se os coeficientes indicados por Cole e Wells (2013), mostrados na tabela 10.

Ha e Lee (2008) simularam a DBO no CE-QUAL-W2, para o reservatório de Daecheong, na Coreia, alcançando bons resultados. O valor de KBOD encontrado foi de $0,05 \text{ dia}^{-1}$, TBOD de $1,01 \text{ }^\circ\text{C}$ e RBOD de 3. Dessa forma, valores baixos de KBOD, como o encontrado para o reservatório do Vacacaí Mirim, também já foram utilizados, auxiliando na calibração.

Tabela 10 - Taxas e coeficientes relacionados à DBO.

Parâmetros	Unidade	Valores indicados (Cole e Wells, 2013)	Valores utilizados
KBOD	dia ⁻¹	0,100	0,010
TBOD	°C	1,020	1,020
RBOD	-	1,850	1,850
CBODS	dia ⁻¹	0,000	0,000
CBOD-P	-	0,004	0,004
CBOD-N	-	0,060	0,060
CBOD-C	-	0,320	0,320

6.6 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA *E. COLI*

Nas figuras 36 a 40 estão os resultados da calibração da *E.coli* no reservatório, para as campanhas dos dias julianos 104, 161, 221, 279 e 336. Na tabela 11 são mostrados os erros médios absolutos e padrões da calibração.

Tabela 11 - Erros médios absolutos e padrões da simulação da *E.coli* na água, dados em NMP/100mL, em relação aos valores observados.

Dia juliano	P3		P4		P5	
	EMA	EP	EMA	EP	EMA	EP
104	3	4	1	1	1	1
161	127	151				
221	230	235	89	98	82	85
279	8	8	1	2	2	2
336	2	2	2	3	1	1

A respeito da calibração dos coliformes, não foram obtidos bons resultados. Primeiramente, acredita-se que duas amostras em cada ponto, não sejam suficientes para uma calibração adequada do comportamento dos coliformes. No dia 104, observou-se uma tentativa do modelo em simular os pontos mais profundos (P4 e P5), porém, o perfil calculado do ponto P3 ficou distante dos dados reais.

No dia 161, ocorreram problemas na análise dos coliformes, não sendo possível a obtenção das concentrações dos mesmos em laboratório, para os pontos

4 e 5. Além disso, o modelo não conseguiu simular as altas concentrações de coliformes para esta data.

O dia 221, para praticamente todos os parâmetros, apresentou maiores dificuldades para ser calibrado. Porém, não foi possível encontrar a verdadeira causa desse problema. Acredita-se que, alguma variação dos dados possa ter ocorrido, considerando que a estação meteorológica não está instalada perto do reservatório. Assim, uma alteração sofrida no reservatório pode não ter ocorrido no local da estação ou vice-versa.

Nos dias 279 e 336 foram obtidas boas calibrações, com perfis próximos aos reais. Segundo Burin (2011), a *E.coli* foi o parâmetro que apresentou a maior dispersão de valores dentre todas as variáveis estudadas. Além disso, observou-se uma maior dificuldade do modelo em calibrar concentrações de *E.coli* muito elevadas, apresentando melhores resultados para pequenas concentrações.

Figura 36 - Resultado da calibração da *E.coli* para o dia 14 de abril de 2010, dia juliano 104.

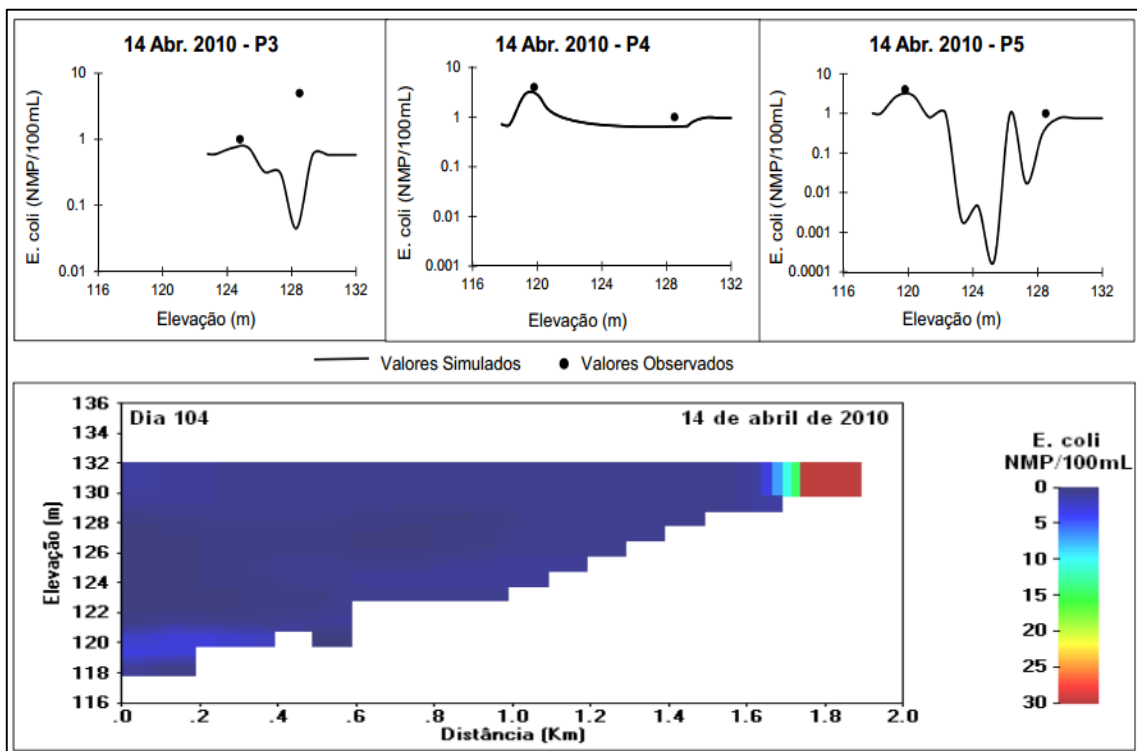


Figura 37 - Resultado da calibração da *E.coli* para o dia 10 de junho de 2010, dia juliano 161.

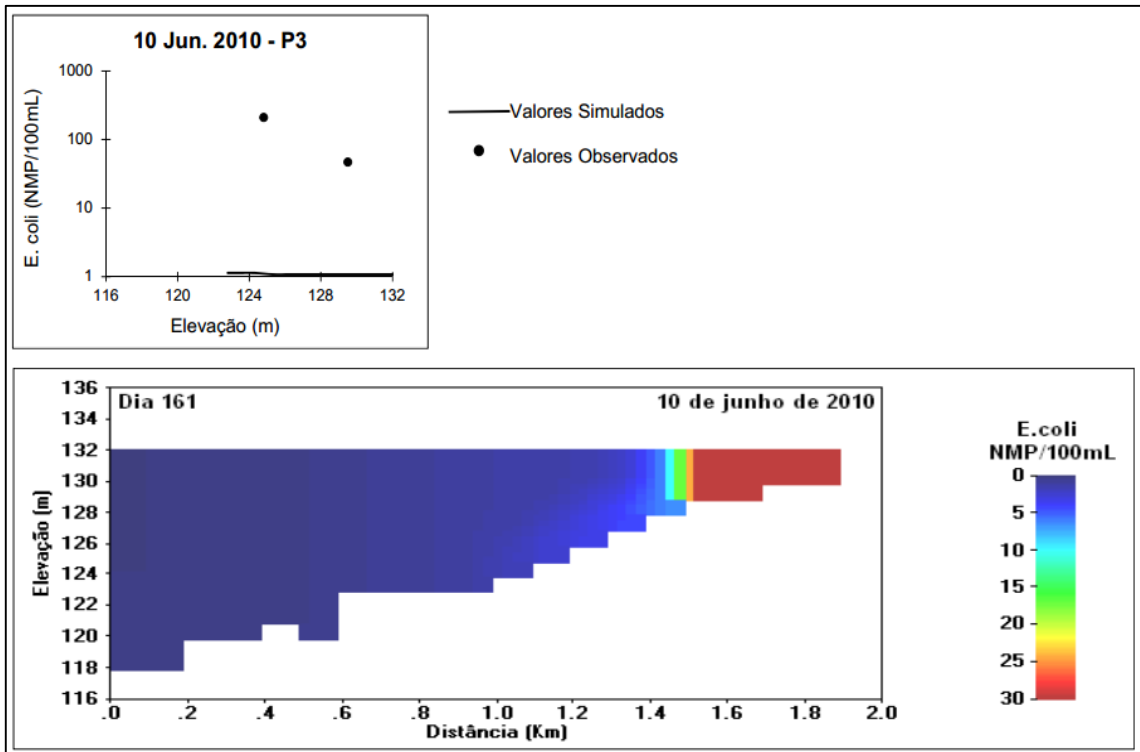


Figura 38 - Resultado da calibração da *E.coli* para o dia 9 de agosto de 2010, dia juliano 221.

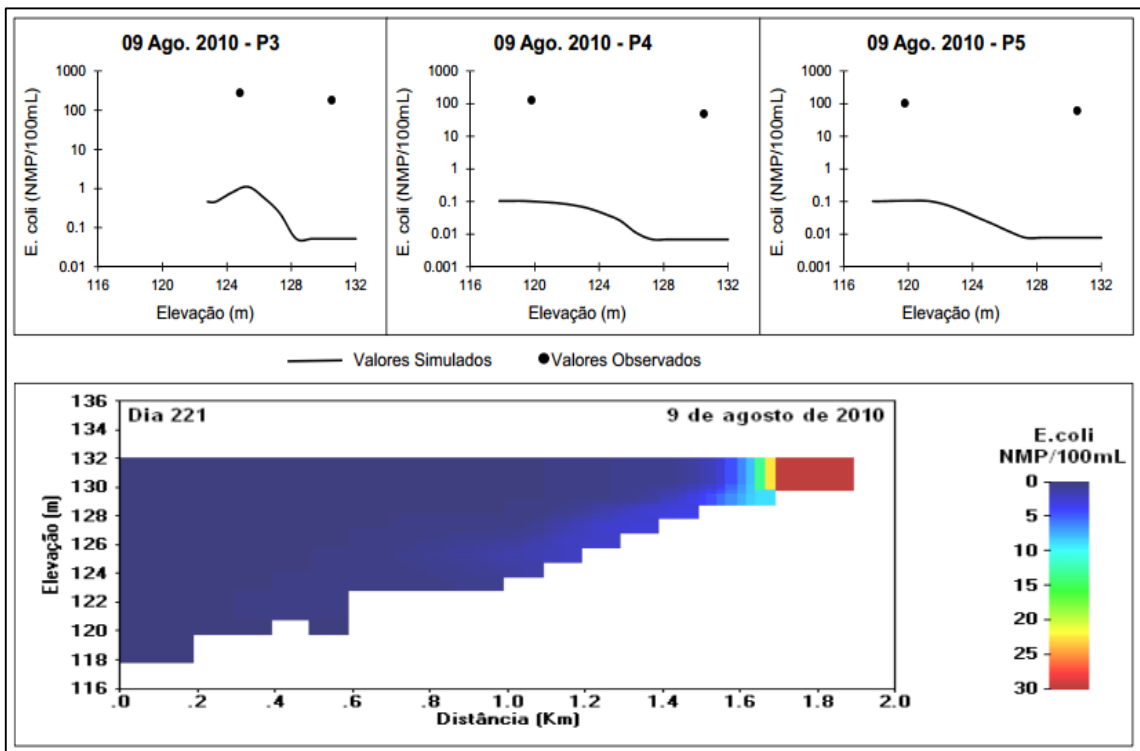


Figura 39 - Resultado da calibração da *E.coli* para o dia 6 de outubro de 2010, dia juliano 279.

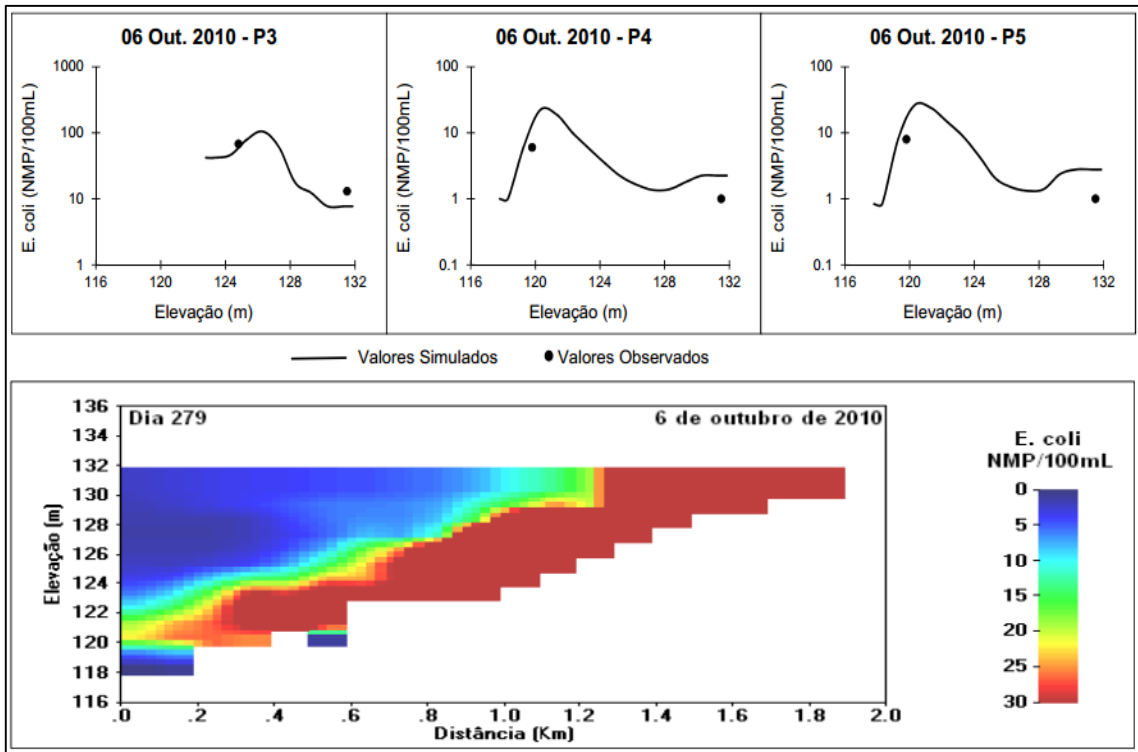
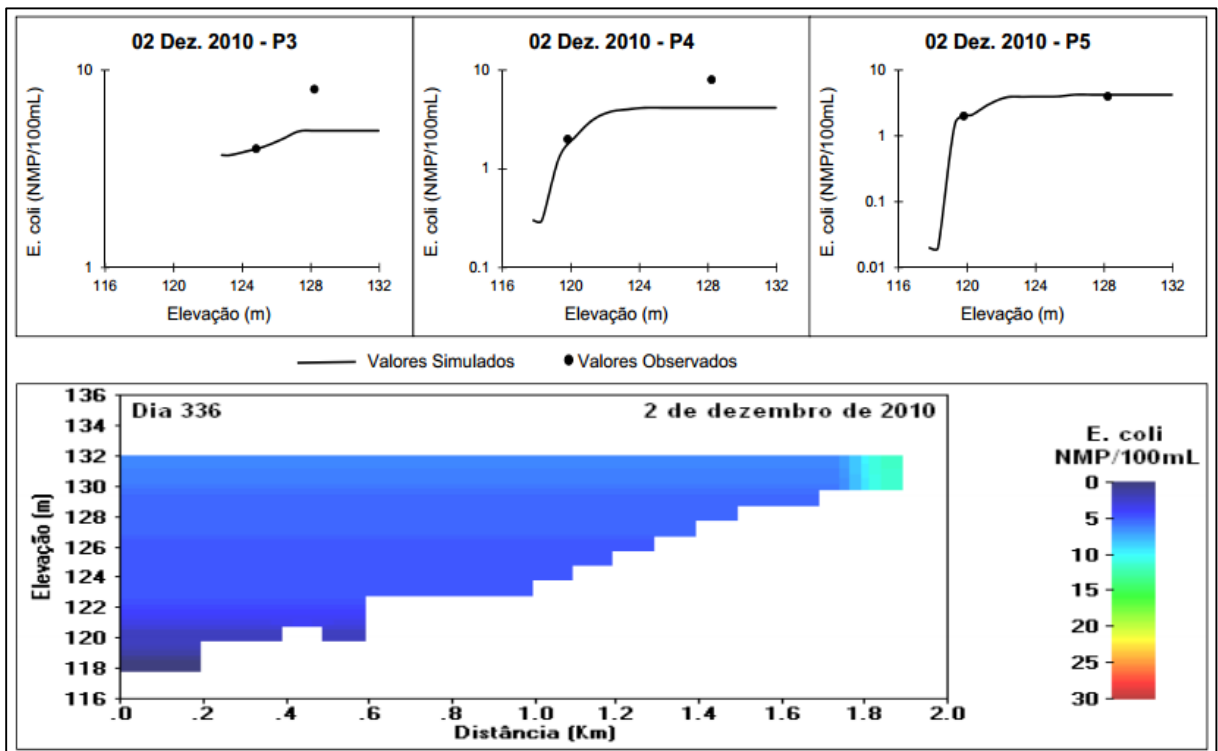


Figura 40 - Resultado da calibração da *E.coli* para o dia 2 de dezembro de 2010, dia juliano 336.



Os parâmetros que mais favoreceram a calibração da *E.coli* no reservatório do Vacacaí Mirim, foram o coeficiente de temperatura de Arrhenius (CGQ10) e a taxa de decaimento de primeira ordem (CG1DK). Os valores finais para a calibração estão mostrados na tabela 12.

No modelo é indicado o valor 1,04, como um ponto de partida, para a calibração do coeficiente de temperatura de Arrhenius. Além disso, Chapra (1997) indica que a variação típica para este parâmetro, em sistemas naturais, é de 1,02 a 1,08.

Souza (2006) calibrou os coliformes fecais para o Arroio Demétrio, situado no Brasil, somente utilizando a taxa de decaimento de primeira ordem, cujo valor obtido foi 1,0 dia⁻¹. Matthews (2007) simulou coliformes fecais, para o reservatório de Wachusett, nos EUA, e descreveu que a taxa de decaimento de primeira ordem é o mecanismo que mais influência na calibração deste parâmetro, para o local.

Kraft et al. (2004) utilizaram o CE-QUAL-W2 para simular coliformes no Rio Green, localizado nos Estados Unidos. Aplicaram o valor de 1,04 para o coeficiente de temperatura de Arrhenius e 0,2 dia⁻¹, para a taxa de decaimento de primeira ordem. Os autores simularam dois períodos diferentes. Entre 2001 e 2002, encontraram erros médios absolutos entre 14 e 75 (NMP/100mL) e erros padrões de 18 a 145,4 (NMP/100mL). Já, entre 1995 e 1996, os erros médios absolutos variaram entre 190 e 272 (NMP/100mL) e os padrões, entre 565 e 570 (NMP/100mL).

Assim, acredita-se que os coliformes são parâmetros difíceis de serem simulados, devido à sua variabilidade.

Tabela 12 - Parâmetros e valores utilizados na calibração da *E.coli*.

Nome do parâmetro	Descrição	Valores utilizados
CGQ10	Coef. temperatura de Arrhenius	1,02
CG0DK	Taxa de decaimento de ordem zero (mg/L/dia)	0
CG1DK	Taxa de decaimento de primeira ordem (1/dia)	1,75
CGS	Taxa de sedimentação (m/dia)	0

6.7 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram realizadas as validações para os constituintes temperatura, OD, DBO e *E.coli*. Estas são mostradas nas figuras 41 a 44. Na tabela 13, são mostrados os erros encontrados na validação dos parâmetros.

Tabela 13 - Erros médios absolutos e padrões da validação dos resultados.

Parâmetros	P3		P4		P5	
	EMA	EP	EMA	EP	EMA	EP
Temperatura (°C)	1,6	2,2	1,7	2,3	2,2	2,7
OD (mg/L)	1,8	2,8	1,1	1,7	2,2	3,4
DBO (mg/L)	1,7	1,7	1,2	1,2	1,1	1,1
<i>E.coli</i> (NMP/100mL)	155	175	1	2	8	8

Figura 41 - Validação da temperatura para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406.

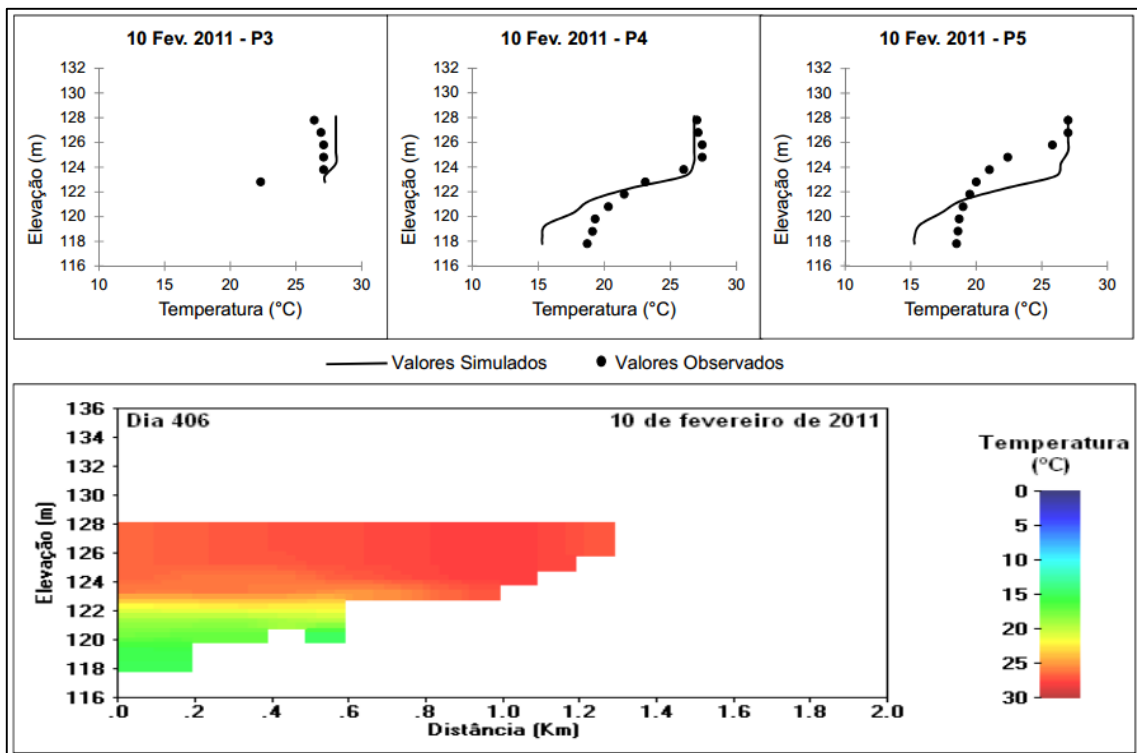


Figura 42 - Validação do OD para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406.

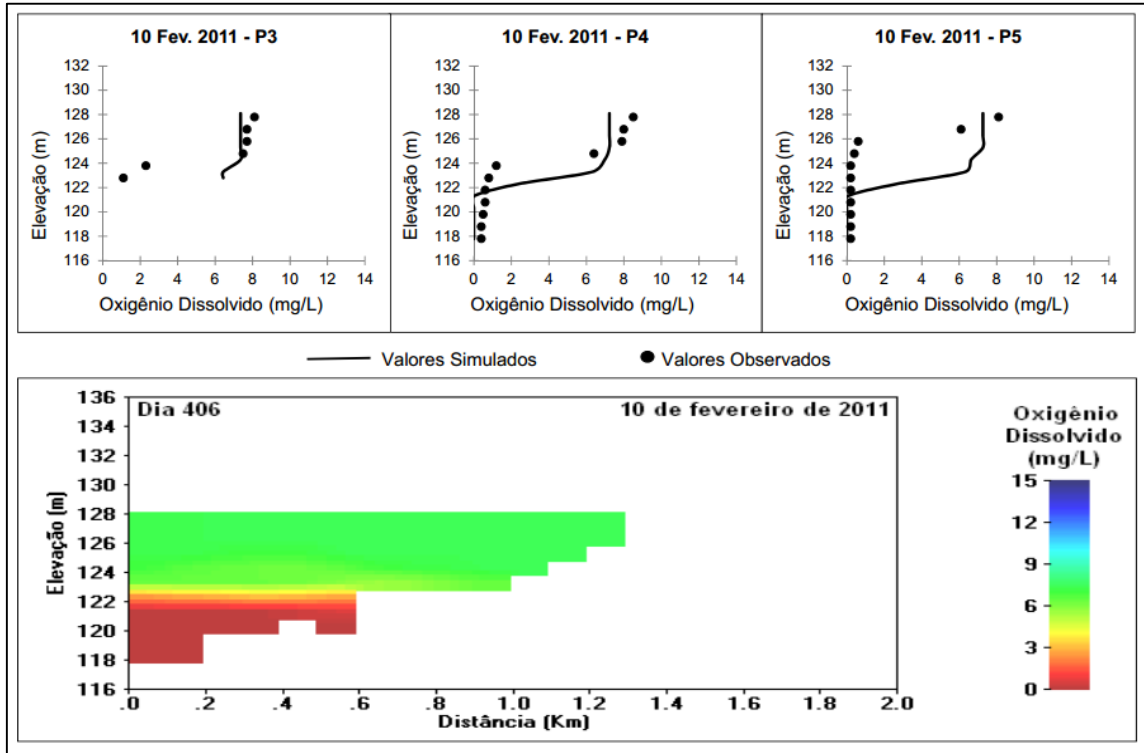


Figura 43 - Validação da DBO para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406.

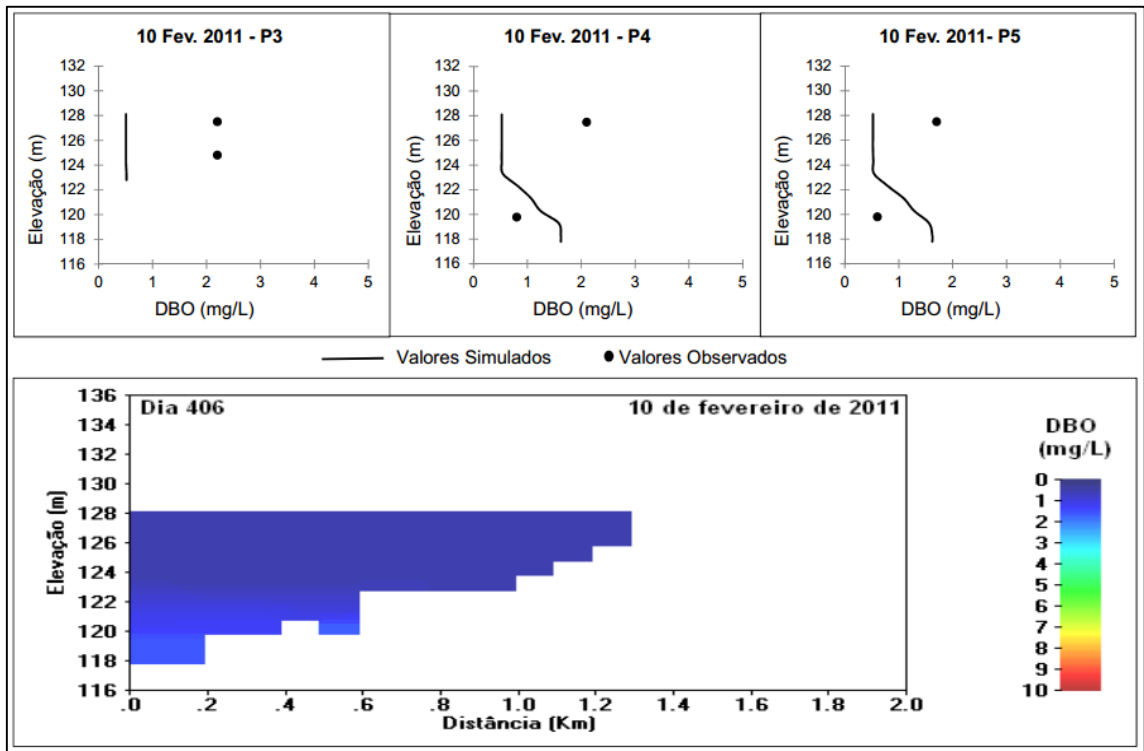
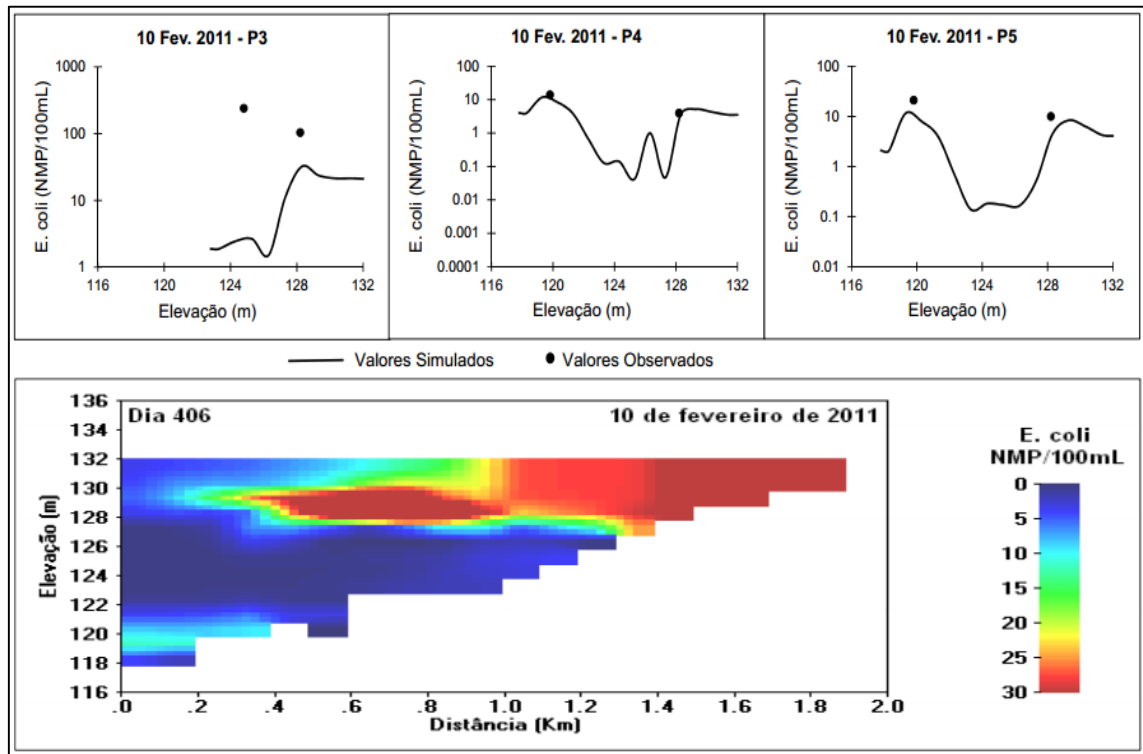


Figura 44 - Validação da *E.coli* para o dia 10 de fevereiro de 2011, dia juliano 406.



Para a temperatura e o OD, as validações foram satisfatórias. Já, para a DBO e a *E.coli*, os perfis obtidos não ficaram muito próximos aos reais, porém, os erros obtidos na DBO foram baixos. Para a *E.coli*, os erros apresentados na validação, somente refletiram as dificuldades, citadas anteriormente, para a calibração deste parâmetro, pois, apresentaram bons resultados nos pontos com concentrações menores e pior resultado para o ponto P3, que continha concentrações mais elevadas. Em geral, pode ser considerado que os coeficientes utilizados na calibração do modelo são coerentes.

6.8 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

A respeito da simulação de cenários, considerando o crescimento populacional na bacia, obteve-se que, em 2010, a população era de 2139 habitantes e em 2050, o estimado foi de 3343 habitantes, o que representa um crescimento de 56%. Dessa forma, essa porcentagem foi utilizada para majorar a DBO. Porém, mesmo com este aumento das cargas poluidoras, houve pouca alteração nos perfis de DBO e OD, ao longo do reservatório. O ponto que foi mais afetado, foi o P3, situado no centro do reservatório, cujos resultados são mostrados nas figuras 45 e 46.

Assim, para facilitar a comparação visual entre as concentrações dos parâmetros de 2010 e 2050, fez-se as médias aritméticas das concentrações para cada dia. Nas figuras 45 e 46 estão mostrados os resultados da simulação da DBO e do OD, para os anos de 2010 e 2050. Além disso, estes resultados são mostrados a partir do dia juliano 104, que foi o primeiro dia considerado na calibração dos resultados de 2010.

Figura 45 - Simulação de cenários considerando o aumento da população na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim- efeitos na DBO.

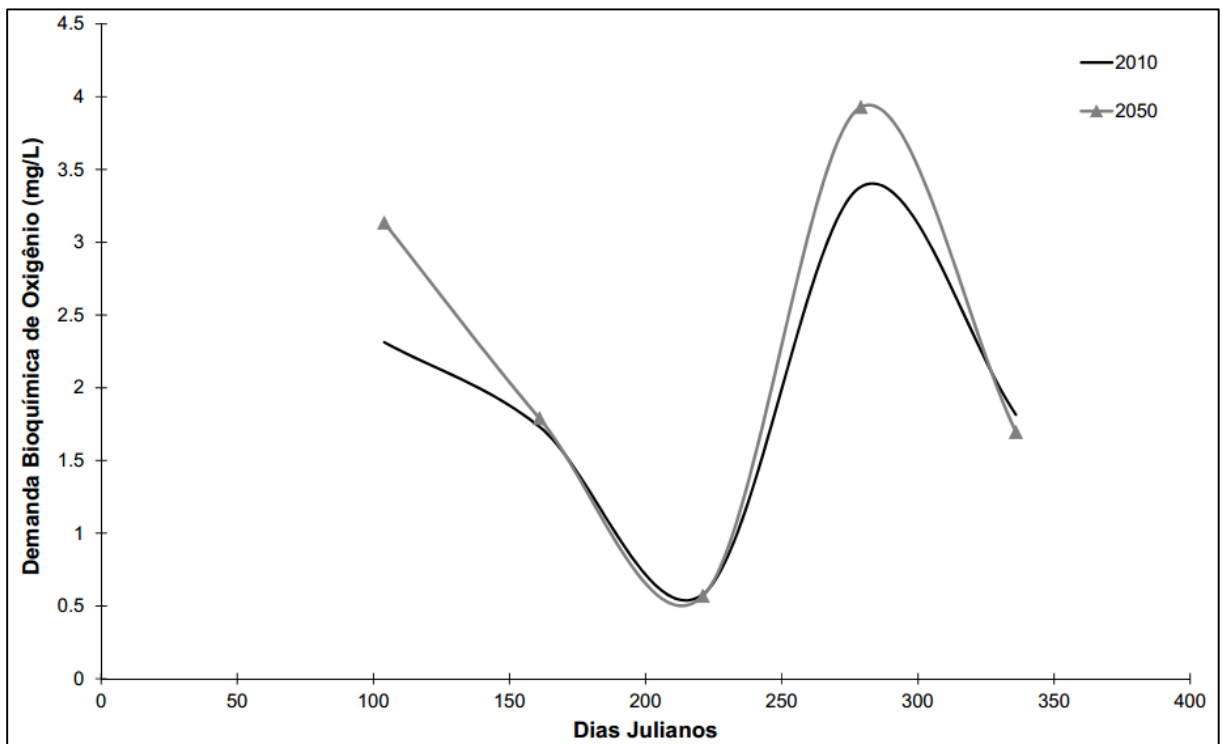
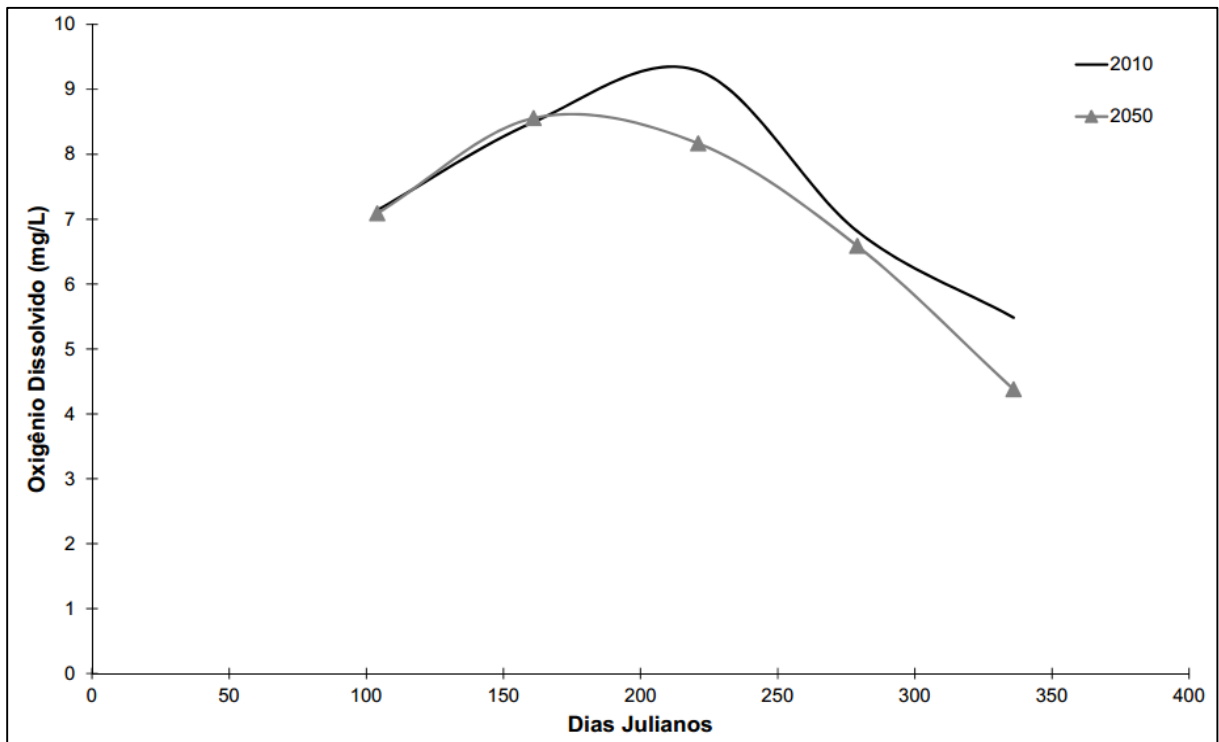


Figura 46 - Simulação de cenários considerando o aumento da população na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim- efeitos no OD.



Embora o aumento populacional esteja associado à degradação da qualidade da água, as respostas do modelo mostraram que as concentrações de DBO não se tornaram muito elevadas, continuando abaixo de 5 mg/L (a maior concentração de DBO média atingida foi de 3,9 mg/L, em 2050). Além disso, as DBO's médias tiveram concentrações bastante próximas ao longo do tempo.

O OD também foi pouco afetado, porém, comparando a projeção futura com a de 2010, próximo ao dia juliano 336, a concentração média deste parâmetro foi de 5,5 para 4,4 mg/L, apresentando uma queda na sua qualidade. Considerando somente estes valores médios, seria possível classificar as águas do reservatório, como pertencentes à classe 3, de acordo com a Resolução 357/2005 do CONAMA.

As figuras 47 a 52 mostram os resultados das simulações de cenários, considerando a implantação de um abatedouro de aves na bacia, lançando efluente bruto no reservatório. Os perfis analisados são referentes ao ponto P4, onde a água é captada. Nas figuras são mostrados os perfis dos parâmetros com e sem o abatedouro de aves (cenário atual), em alguns dos dias julianos, já apresentados.

Figura 47 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 104, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.

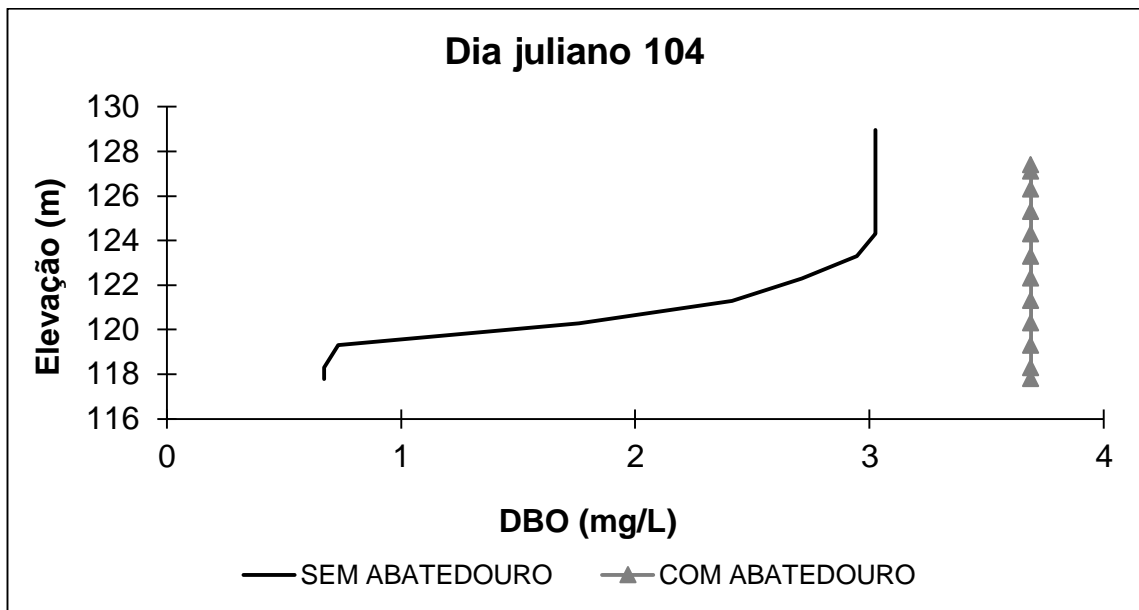
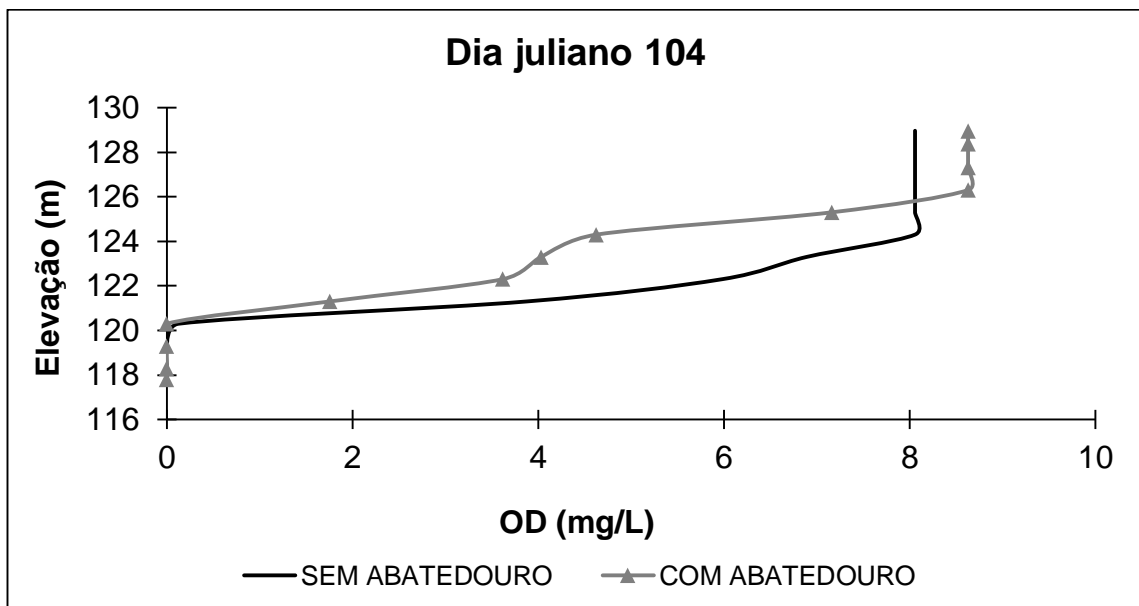


Figura 48 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 104, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.



No dia 104, a DBO aumentou no reservatório. Na camada mais profunda, próxima a 117 m, atingiu a concentração de 3,7 mg/L considerando a presença do abatedouro. Já, sem o mesmo, a DBO era de 0,7 mg/L. A respeito do OD, este sofreu redução em alguns pontos, principalmente abaixo da cota 124 m. Porém, abaixo da cota 120 m, os valores de OD já eram muito baixos e assim, permaneceram. No dia

juliano 279, também ocorreu um aumento da matéria orgânica, em sua maioria, nas camadas mais profundas, atingindo 5,1 mg/L. Logo, isto que afetou diretamente as concentrações de OD, deixando-as próximas a zero, o que não acontecia anteriormente.

Figura 49 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 279, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.

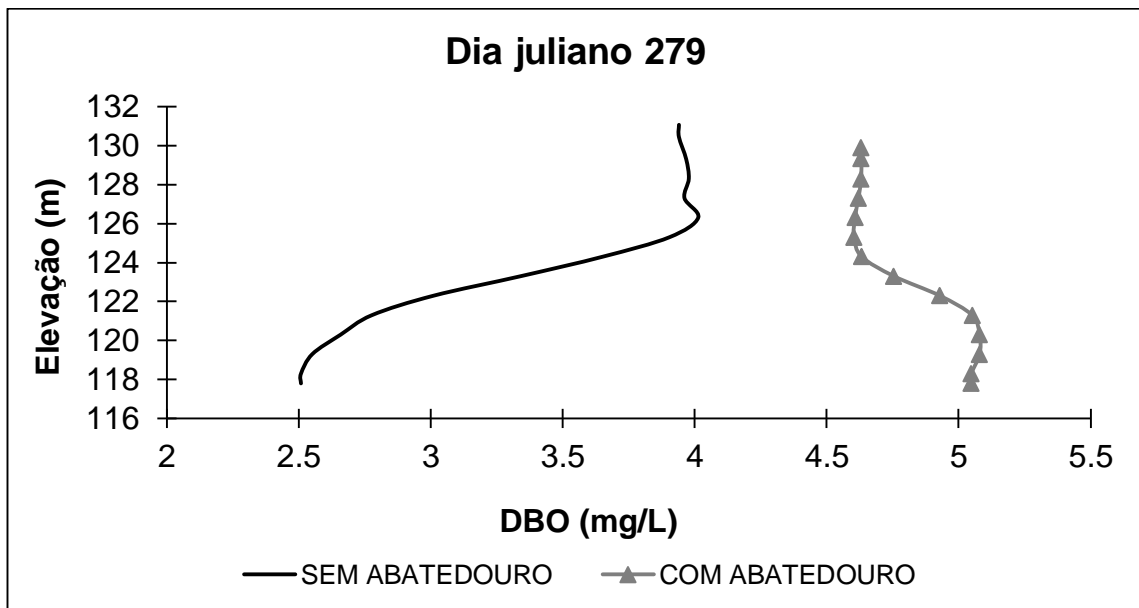


Figura 50 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 279, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.

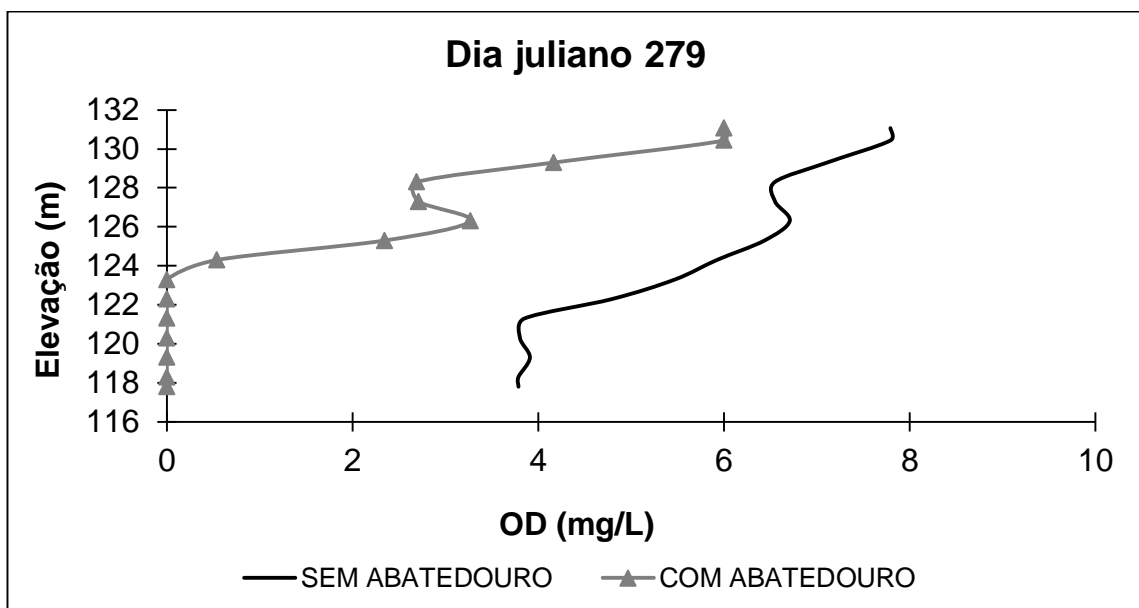


Figura 51 - Efeitos ocasionados na DBO do dia juliano 336, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.

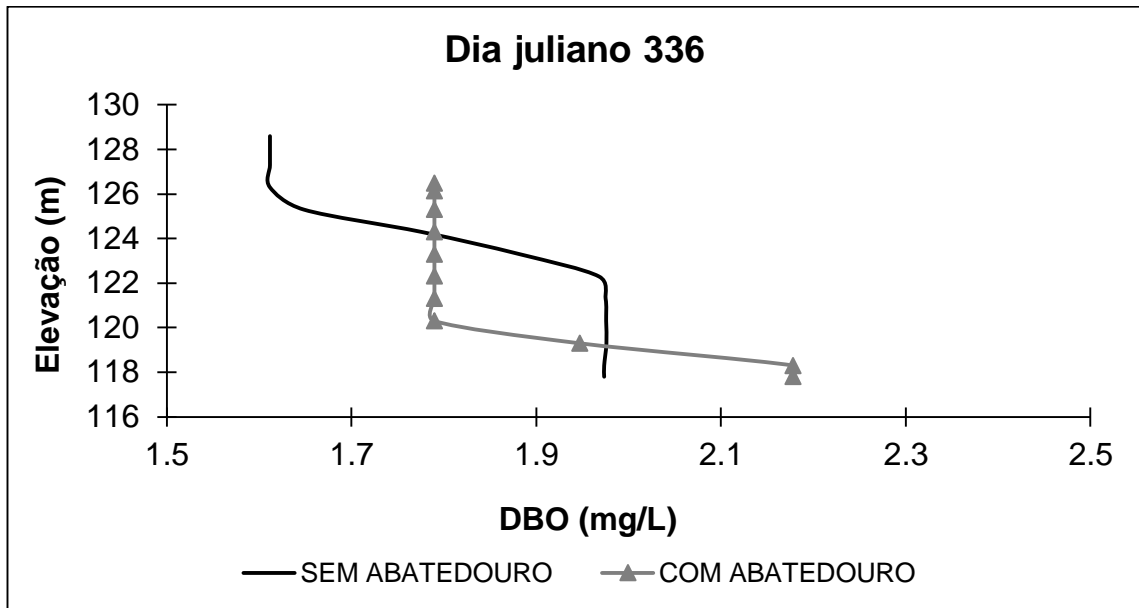
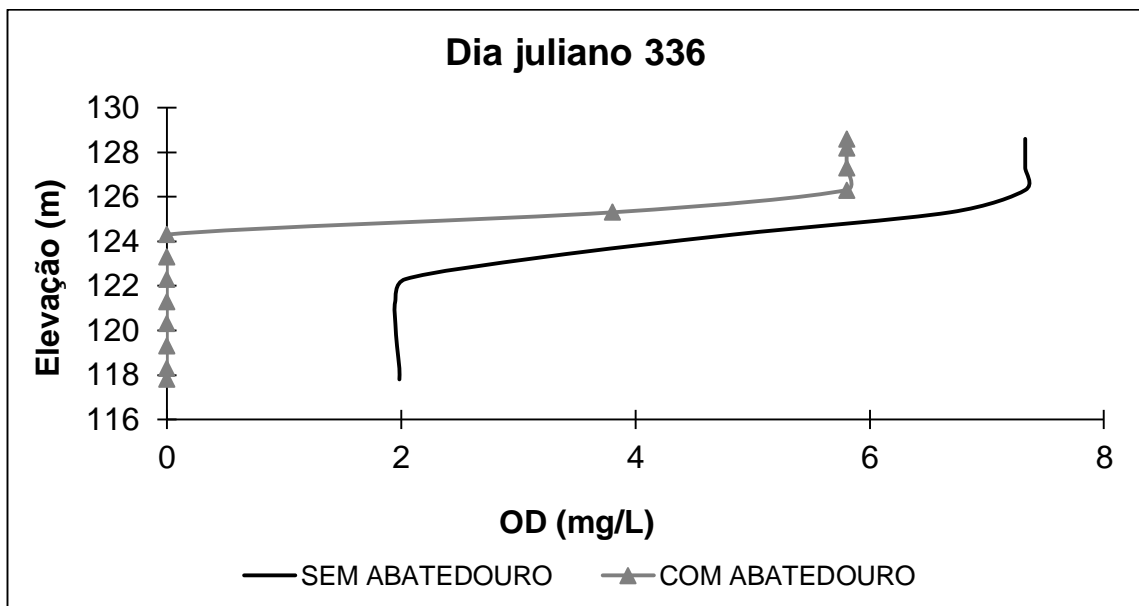


Figura 52 - Efeitos ocasionados no OD do dia juliano 336, considerando a instalação de um abatedouro de aves na bacia do reservatório do Vacacaí Mirim.



No dia 336, a DBO continuou com concentração baixa, menor que 2,3 mg/L. O OD já era baixo nas camadas mais profundas e atingiu valores anóxicos, considerando o abatedouro.

Analisando os perfis de DBO e OD no reservatório, têm-se que, em alguns dias, o oxigênio fica próximo a zero, com e sem a instalação do abatedouro de aves, o que não é recomendado pela Resolução CONAMA 357/2005, para o abastecimento urbano. Logo, as águas do reservatório podem ser consideradas impróprias em alguns pontos.

Um aumento populacional que, hipoteticamente, se comportasse de forma proporcional ao longo do tempo, não traria grandes alterações na qualidade da água, até 2050. Já, considerando a instalação de um empreendimento no local, como um abatedouro de aves, com o lançamento de efluente bruto no reservatório, tornaria necessário um tratamento de água mais avançado, pois esses despejos aumentam a carga orgânica no local e diminuem ainda mais, as concentrações de OD.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, ajustou-se um modelo matemático, para simular o comportamento dos parâmetros de qualidade da água do reservatório do Vacacaí Mirim, localizado no município de Santa Maria – RS. Utilizou-se o modelo CE-QUAL-W2, que já foi aplicado por diversos autores, e é indicado, principalmente, para lagos e reservatórios. Os parâmetros simulados foram: OD, DBO, temperatura e *E.coli*.

Os dados utilizados na calibração e validação, a respeito da qualidade da água do reservatório, foram coletados nos anos de 2010 e 2011, por Burin (2011). Os resultados da simulação foram satisfatórios, principalmente, para os parâmetros temperatura e OD. Acredita-se que, como existia um perfil de dados monitorados destes parâmetros, isto tenha facilitado a calibração. Dessa forma, os perfis simulados de OD e temperatura ficaram mais semelhantes aos observados, e os erros também foram menores. Os EMA's do OD ficaram entre 0,5 e 1,9 mg/L, e os da temperatura, de 0,4 a 3,1°C. Já, os EP's do OD variaram de 0,7 a 2,2 mg/L e para a temperatura, de 0,4 a 3,5°C.

Já, as concentrações da DBO, em alguns pontos, eram bastante próximas. Devido a isto, acredita-se que o modelo tenha tido dificuldades em representar estas pequenas variações, resultando em perfis, praticamente, verticais. Porém, em geral, os perfis de DBO calculados ficaram próximos aos reais, e os erros não foram muito elevados. Os EMA's da DBO variaram entre 0,1 e 2,5 mg/L e os EP's entre 0,1 e 2,5 mg/L. A respeito da *E.coli*, esta foi a que apresentou as simulações menos satisfatórias, com os EMA's entre 1 e 230 NMP/100mL e os EP's de 1 a 235 NMP/100mL. Logo, os dados de *E.coli* apresentam grande variabilidade e isto pode ser uma justificativa para os poucos trabalhos existentes, sobre este parâmetro, no modelo CE-QUAL-W2.

Para a validação dos resultados, foi utilizado um conjunto de dados de outra campanha, realizada no ano de 2011. Nesta etapa, os perfis simulados pelo modelo ficaram próximos aos medidos, apresentando erros de grandeza semelhante aos obtidos nas calibrações. Assim, os coeficientes utilizados na calibração do modelo, podem ser considerados como adequados e o modelo, como sendo válido.

Na simulação de cenários, considerou-se duas situações: um aumento da população na bacia e a instalação de um abatedouro de aves no local. Na primeira, a DBO que entrava no reservatório foi majorada, considerando um percentual de

aumento da população de 56%, entre 2010 e 2050. Porém, comparando as concentrações médias de OD e DBO nestes anos, não ocorreram grandes alterações na qualidade da água do reservatório. A maior concentração de DBO média atingida, em 2050, foi de 3,9 mg/L. Em relação ao OD, somente no verão, em torno do dia juliano 336, que este atingiu a concentração de 4,4 mg/L, abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005, para águas de classe 2.

Na segunda simulação de cenário, a instalação de um empreendimento, como um abatedouro de aves, fez com que uma grande quantidade de matéria orgânica fosse inserida no reservatório. Porém, o efluente acabou se diluindo no mesmo. No entanto, o poluente causou um aumento da DBO e uma diminuição do OD, fazendo com que alguns pontos se tornassem anóxicos. Logo, para a implantação de um empreendimento semelhante no local, seria necessário um tratamento mais avançado na água, para fins de abastecimento urbano.

Dessa forma, o modelo CE-QUAL-W2 mostrou-se aplicável ao reservatório do Vacacaí Mirim. Porém, algumas recomendações devem ser seguidas para a aplicação do software. Primeiramente, é necessário um estudo aprofundado sobre a inserção de dados no modelo e seu comportamento, pois o CE-QUAL-W2 possui algumas peculiaridades. Como a conversão das datas, o número de caracteres dos arquivos, além de arquivos básicos para que o modelo consiga realizar uma simulação.

Posteriormente, são necessárias várias informações de entrada, como a batimetria da área de estudo, dados meteorológicos e coletas de amostras da água, a fim de caracterizar alguns parâmetros de qualidade da água. Além disso, a qualidade e a quantidade de dados são fundamentais para um melhor resultado. Acredita-se que, a realização de novos monitoramentos dos parâmetros de qualidade da água, formando um banco de dados mais amplo para a inserção no modelo, poderia fazer com que o CE-QUAL-W2 fornecesse melhores resultados, principalmente, do parâmetro *E.coli*.

Portanto, o modelo CE-QUAL-W2 representou, satisfatoriamente, o reservatório, caracterizando o comportamento de alguns parâmetros no ano de 2010. Podendo ser utilizado para outros estudos futuros no local, como a avaliação de demais parâmetros ou a simulação de cenários.

REFERÊNCIAS

AFSHAR, A.; SAADATPOUR, M. Reservoir eutrophication modeling, sensitivity analysis, and assessment: application to Karkheh reservoir, Iran. **Environmental Engineering Science**, v.26, n.7, p. 1227- 1238, 2009.

AHMED, A. A. M.; SHAH, S. M. A. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to estimate the biological oxygen demand (BOD) of Surma River. **Journal of King Saud University – Engineering Sciences**, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363915000021>>. Acesso em: 20 maio. 2015. DOI: 10.1016/j.jkuses.2015.02.001.

ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Panorama do enquadramento dos corpos d'Água no Brasil**. Brasília, 2007.

BEZERRA, I. S. O.; MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção anaerobiose. **Revista Escola de Minas**, v.61, n.2, p. 249-255, 2008.

BEZERRA NETO, J. F.; PINTO COELHO, R. M. O déficit de oxigênio em um reservatório urbano: Lagoa do Nado, Belo Horizonte – MG. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v.13, n.1, p. 107-116, 2001.

BONALUMI, M. et al. Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. **Water Resources Research**, v. 48, n.8, p. 1-19, 2012.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

_____. Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**, Brasília, DF, 12 dez. 2011.

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, Athens, Georgia, 1987.

BURIN, R. **Variabilidade da qualidade da água e do estado trófico do reservatório do Vacacaí Mirim**. 2011. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CETESB- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. **Qualidade das águas superficiais do estado de São Paulo, Apêndice A.** São Paulo, 2009.

_____. Secretaria do Meio Ambiente. **Qualidade das águas superficiais do estado de São Paulo, Apêndice C.** São Paulo, 2014.

_____. Secretaria do Meio Ambiente. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem, Apêndice C.** São Paulo, 2013.

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

CHAPRA, S. et al. **A modeling framework for simulation river and stream water quality, version 2.04: QUAL2K- documentation and user's manual.** Washington: Environmental Protection Agency, Tufts University, the Washington Dept. of Ecology, 2006.

COLE, T.M.; WELLS, S. A. **CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model.** User manual. U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 2013. Versão 3.7.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 01 dez. 2014.

_____. Resolução n. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de afluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005; do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio. 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

CONSEMA - CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução 128, de 24 de novembro de 2006. Dispõe sobre a fixação de padrões de emissão de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, RS, 7 dez. 2006.

COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. **The Science of the Total Environment**, v. 314-316, p. 335-377, 2003.

DEKSISSA, T. et al. Simplifying dynamic river water quality modelling: a case of study of inorganic nitrogen dynamics in the Crocodile River (South Africa). **Water, Air & Soil Pollution**, v.155, p. 303-320, 2004.

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, 2013.

DILL, P. R. J. **Assoreamento do reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte**. 2002. 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

EBRAHIMI, M.; JABBARI, E.; ABBASI, H. Simulation of thermal stratification and salinity in dam reservoir using CE-QUAL-W2 software (case study: Baft Dam). **Journal of Civil Engineering and Urbanism**, v.5, n.1, p. 7-11, 2015.

ELÇI, S. Effects of thermal stratification and mixing on reservoir water quality. **Limnology**, v.9, n.2, p. 135-142, 2008.

ETEMAD-SHAHIDI, A. et al. Total dissolved solid modeling; Karkheh reservoir case example. **International Journal of Environmental Research**, v.3, n.4, p. 671- 680, 2009.

FANG, X. et al. Simulation of impacts of streamflow and climate conditions on Amistad Reservoir. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, n. 137, p. 14-20, 2007.

FERNANDES JUNIOR, J.; MENDES, O. **Gerenciamento de efluentes de abatedouros avícolas estudo de caso (Super Frango)**. 2006. 19p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2006.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.18, n.1, p. 83-93, 2013.

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

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. 104p. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

GONÇALVES, J. C. S. **Desenvolvimento de modelo numérico para a simulação da qualidade da água em rios utilizando o software Vesim PLE**. 2009. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GRAF, A. C. B. Água, bem mais precioso do milênio: o papel dos Estados. **Revista CEJ**, n. 12, p. 30-39, 2010.

HA, S. R.; LEE, J. Y. Application of CE-QUAL-W2 model to eutrophication simulation in Daecheong reservoir stratified by turbidity storms. In: WORLD LAKE CONFERENCE, 12., 2008, Japuir/ India. **Anais...** Japuir/ India, 2008.

INPE- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Centro de previsão de tempo e estudos climáticos**. Cachoeira Paulista, 2015. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

JAMES, A. **An introduction to water quality modeling**. West Sussex: John Wiley & Sons, 1993. 311p.

JAZEN, J. G.; SCHULZ, H. E.; LAMON, A. W. Medidas da concentração de oxigênio dissolvido na superfície da água. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.13, n.3, p. 278-283, 2008.

KRAFT, T. et al. Green River CE-QUAL-W2 project: A hydrodynamic and water quality study of the Green River King County, Washington. **Civil and Environmental Engineering**, 2004.

KUO, J. et al. Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan. **Environmental Modelling & Software**, v.21, p. 829- 844, 2006.

KUO, J. T.; Yang, M. D. Water quality modeling in reservoirs. In: SHEN, H. H. **Environmental fluid mechanics: theories and applications**. ASCE Engineering Mechanics Division, 2002. p. 377- 420.

MARTINS, M. L. N.; VON SPERLING, E. Dinâmica do ferro e do manganês no hipolímnio do reservatório Serra Azul em Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu/PR. **Anais ...** Rio de Janeiro/RJ: ABES, 1997. p.1525-1536.

MATTHEWS, T. P. **Modeling fate and transport of fecal coliform in Wachusett Reservoir**. 2007. 174p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Ambiental) – Universidade de Massachusetts, Amherst, 2007.

MUSTAPHA, M. K. Assessment of the Water Quality of Oyun Reservoir, Offa, Nigeria, Using Selected Physico-Chemical Parameters. **Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v.8, p. 309-318, 2008.

NAS, S. S.; NAS, E. Water quality modeling and dissolved oxygen balance in streams: a point source Streeter- Phelps application in the case of the Harsit Stream. **Clean- Soil, Air, Water**, v. 37, n.1, p. 67-74, 2009.

ODONKOR, S. T.; AMPOFO, J. K. *Escherichia Coli* as an indicator of bacteriological quality of water: an overview. **Microbiology Research**, v.4, n.2, p. 5-11, 2013.

ORLOB, G. T. One- dimensional models for simulation of water quality in lakes and reservoirs. In: ORLOG, G. T.; JOHN, G. T. **Mathematical modeling of water quality: streams, lakes and reservoirs**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1983. p. 227- 273.

OSTROUMOV, S. A. Biomachinery for maintaining water quality and natural water self-purification in marine and estuarine systems: element of a qualitative theory. **International Journal of Oceans and Oceanography**, v.1, n.1, p. 111-118, 2006.

POMPEO, C. A.; RIGOTTI, J. A.; FREITAS FILHO, M. D. Urban stream condition assessment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12., 2011, Porto Alegre/RS. **Anais...** Porto Alegre/RS, 2011.

RANGEL-PERAZA, J. G. et al. Modelling approach for characterizing thermal stratification and assessing water quality for a large tropical reservoir. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v.17, n.2, p. 119-129, 2012.

RIBEIRO FILHO, R. A. **Relações tróficas e limnológicas no reservatório de Itaipu: uma análise do impacto da biomassa pesqueira nas comunidades planctônicas**. 2006. 139f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)- Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SAKALAUSKIENĖ, G. Dissolved oxygen balance model for Neris. **Nonlinear Analysis: Modelling and Control**, Lituânia, v.6, n.1, p. 105-131, abr. 2001.

SHOJAEI, N. **Automatic calibration of water quality and hydrodynamic model (CE-QUAL-W2)**. 2014. 100p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civil e Ambiental) – Portland State University, Portland, 2014.

SILVA, G. V. **Simulação bidimensional da qualidade da água do lago do Descoberto (DF/GO)**. 2009. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, H. L. G. **Modelagem bidimensional do fósforo com vistas a gestão de bacias hidrográficas- estudo de caso: Reservatório de Fiú, Paraná**. 2006. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SOARES, M. C. S. et al. The effects of water retention time and watershed features on the limnology of two tropical reservoirs in Brazil. **Lakes & Reservoirs**, v.13, p. 257-269, 2008.

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. 144 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

STEFAN, H.G.; FANG, X. Model simulations of dissolved oxygen characteristics of Minnesota Lakes: Past and Future. **Environmental Management**, v.18, n.1, p. 73-92, 1994.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. **A study of the pollution and natural purification of the Ohio river**. Public Health Bulletin, v.3, n.146, U.S Public Health Service, 1925. 75p.

TERZHEVIK, A. et al. Some features of the thermal and dissolved oxygen structure in boreal, shallow ice-covered Lake Vendyurskoe, Russia. **Aquatic Ecology**, v.43, n.3, p. 617- 627, 2009.

THOMANN, V. R.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. Harper & Row, 1987. 644 p.

TUCCI, C. M. E. Águas urbanas. **Revista Estudos Avançados**, v.22, n.63, p. 97-112, 2008.

TUNDISI, J. G. Reservatórios como sistemas complexos: Teorias, Aplicações e perspectivas para usos múltiplos. In: HENRY, R. **Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais**. Botucatu: Fundibio- Fapesp, 1999. cap. 1, p. 19- 38.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **River and Stream Water Quality Model: QUAL 2K**. Disponível em <<http://epa.gov/athens/wwqts/html/qual2k.html>>. Acesso em: 26 nov. 2014.

WATER QUALITY RESEARCH GROUP. **CE-QUAL-W2**: hydrodynamic and water quality model. Disponível em: <<http://www.ce.pdx.edu/w2/>>. Acesso em: 27 nov. 2014.

WETZEL, R. G. **Limnology: Lakes and river ecosystems**. San Diego: Academic Press, 2001. 1006p.

WILLIAMS, N. T. **Modeling dissolved oxygen in Lake Powell using CE-QUAL-W2**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade Brigham Young, Provo, 2007.

ZHANG, Y. et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). **Water Research**, v.75, p. 249-258, 2015.

ZYFI, A.; GRAZHDANI, S.; AHMETI, A. Application of CE-QUAL-W2 model to water quality simulation in Prespa Lakes. **International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology**, v.3, n.5, p. 21- 29, 2014.