



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**ARTHUR JORDAN DE AZEVEDO TONÉ**

**ANÁLISE E MODELAGEM DE FÓSFORO EM RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS**

**FORTALEZA  
2016**

**ARTHUR JORDAN DE AZEVEDO TONÉ**

**ANÁLISE E MODELAGEM DE FÓSFORO EM RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, Área de Concentração: Recursos Hídricos, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

**FORTALEZA**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

T626a Toné, Arthur Jordan de Azevedo.

Análise e modelagem de fósforo em reservatórios localizados em regiões semiáridas / Arthur Jordan de Azevedo Toné. – 2016.

173 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Modelagem de qualidade de água. 2. Balanço de massa. 3. Eutrofização. 4. Região semiárida. 5. Coeficiente de decaimento de fósforo. I. Título.

CDD 627

---

**ARTHUR JORDAN DE AZEVEDO TONÉ**

**ANÁLISE E MODELAGEM DE FÓSFORO EM RESERVATÓRIOS  
LOCALIZADOS EM REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, Área de Concentração: Recursos Hídricos, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto

Aprovada em: 04/11/2016.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. César Rossas Mota Filho

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e a Nossa Senhora, por terem me dado a graça de chegar, com a ajuda deles, até aqui.

À minha amada esposa Talyta, por ter sido um recanto amoroso que me fortalecia em cada novo dia.

Aos meus filhos Samuel e Letícia, cujos sacrifícios de amor diários que exigem me elevam ao céu.

À toda minha família, por todo amor e apoio dados.

Ao Professor Iran, meu caro orientador, por todo apoio, paciência, companheirismo, conselhos e dedicação dedicados a mim nos últimos quatro anos e a quem tenho como modelo de professor e profissional e a quem tento imitar.

A cada um dos professores do Mestrado em Recursos Hídricos do DEHA, por toda dedicação e apoio para com cada um de seus alunos.

Aos meus caros amigos e alunos, pelas conversas, risadas, alegrias, dores e, sobretudo, orações.

“Somos servos inúteis: fizemos o que devíamos fazer.” (São Lucas 17,10).

## RESUMO

Entende-se por eutrofização o processo pelo qual os corpos hídricos são enriquecidos por nutrientes, frequentemente tendo o fósforo como limitante, com a subsequente deterioração de suas águas devido ao crescimento excessivo de organismos fototróficos. O fato de a concentração de fósforo total servir de indicador do estado trófico e do quão densa é a biomassa algal em lagos e reservatórios, o fez objeto de diversos modelos desenvolvidos em vista à previsão de sua concentração e dos fatores que a influenciam. As altas taxas de evaporação e temperatura médias anuais, somadas aos altos valores de tempo de retenção hidráulica (TR) e a grande variabilidade das concentrações de fósforo total nos reservatórios em regiões semiáridas, exigem que se faça uso de um modelo calibrado para os dados desta região, visto serem essencialmente diferentes daqueles de reservatórios localizados em regiões temperadas e tropicais. Neste sentido, a partir dos dados de 33 reservatórios do semiárido nordestino, analisou-se um modelo simples de balanço de massa para lagos e reservatórios em mistura completa, com apenas o coeficiente de decaimento de fósforo ( $k$ ) necessário à calibração. A análise dos dados obtidos verificou que as concentrações médias de fósforo total nos reservatórios do semiárido brasileiro superam aquelas encontradas em lagos e reservatórios tropicais e temperados, dentre os quais os escoceses, neozelandeses, norte-americanos, canadenses e brasileiros, em outras regiões do país. Além disso, as cargas afluentes de fósforo aos reservatórios analisados são da mesma ordem de grandeza daquelas a reservatórios de demais regiões do país, ainda que seus tempos de retenção hidráulica sejam em geral maiores que aqueles de reservatórios em regiões de clima temperado e tropical, inclusive brasileiros. Da calibração obteve-se a nova relação  $k = 4/\sqrt{TR}$  para o semiárido brasileiro, duas vezes maior que aquela proposta para lagos e reservatórios tropicais e quatro vezes maior que aquela para os de região temperada, para o mesmo TR, condizente com os efeitos das maiores temperaturas, que resultam em menores viscosidades da água e maiores taxas de consumo de fósforo. O modelo calibrado se ajustou satisfatoriamente aos valores dos dados de 30 dos 33 reservatórios nordestinos analisados, com elevado coeficiente de correlação (0,88) e foi validado com os dados de 08 reservatórios do semiárido sul-africano. A avaliação de cenários futuros demonstrou a utilidade do modelo proposto para simulação de diferentes impactos nos reservatórios por ocasião de variações em seus volumes, vazões de entrada, cargas afluentes de fósforo e porcentagens

de remoção da carga afluente. Desta maneira, o modelo proposto pode ser satisfatoriamente utilizado na modelagem de reservatórios do semiárido em geral e como ferramenta para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos em tais regiões.

**Palavras-Chave:** Modelagem de qualidade de água. Balanço de massa. Eutrofização. Região semiárida. Fósforo Total. Coeficiente de decaimento de fósforo. Reservatórios. Tempo de retenção hidráulica. Gestão dos Recursos Hídricos.

## ABSTRACT

Eutrophication is the process by which water bodies are enriched with nutrients, often having phosphorus as limiting nutrient, with subsequent deterioration of its water quality due to excessive growth of aquatic phototrophic organisms. The fact that total phosphorus concentration is an indicator of trophic state and how dense is the algal biomass in lakes and reservoirs made it object of several models developed in order to predict its concentration and the factors that influence it. The high evaporation rates and average annual temperature, in addition to high hydraulic retention times (TR) values and great variability of total phosphorus concentrations, in reservoirs of semiarid regions requires a calibrated model for such systems as they are essentially different from those in temperate and tropical regions. In this sense, data from 33 reservoirs of Brazilian semiarid region were collected and a simple mass balance model for completely mixed lakes and reservoirs were analyzed, with only the phosphorus decay coefficient requiring ( $k$ ) calibration. From the data obtained, it was found that the average total phosphorus concentrations in the studied reservoirs exceed those concentrations in temperate and tropical lakes and reservoirs, among which the Scots, New Zealanders, Americans, Canadians and Brazilians (in other regions of the country). Besides, the phosphorus loading to the analyzed reservoirs are of the same order of magnitude of those in other regions of Brazil, although having hydraulic retention times generally higher than those of temperate and tropical reservoirs, including Brazilians. From calibration the new relationship  $k = 4/\sqrt{TR}$  was obtained for Brazilian semiarid region, the double of that proposed for tropical lakes and reservoirs and four times higher than that proposed for those in temperate region, for the same TR, and it is consistent with the effects of higher temperatures which results in lower water viscosities and higher phosphorus consumption rates. The calibrated model was well adjusted to the data values of 30 of the 33 reservoirs of Brazilian semiarid region, with a high correlation coefficient (0,88) and it was validated with data from 08 reservoirs of the South African semiarid. The assessment of future scenarios demonstrated the usefulness of the proposed model for simulating different impacts in the reservoirs due to variations in their volume, inflows, phosphorus loads and removal percentages of affluent load. In this way, the model can be successfully used in modeling semiarid reservoirs in general and as a tool for more efficient management of water resources in these regions.

**Keywords:** Water quality modeling. Mass balance. Eutrophication. Semi-arid region. Total phosphorus. Phosphorus decay coefficient. Reservoirs. Hydraulic retention time. Water management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Classificação trófica dos reservatórios cearenses definida pelo IET.....	16
Figura 02 – Zonas oriundas dos gradientes existentes em reservatórios.....	23
Figura 03 – Efeitos do vento na circulação em reservatórios.....	23
Figura 04 – Camadas da estratificação térmica em lagos.....	25
Figura 05 – Causas da poluição hídrica no nordeste brasileiro.....	31
Figura 06 – Probabilidade de ocorrência de limitação por fósforo ou nitrogênio em lagos tropicais (linha contínua) e temperados (linha tracejada).....	39
Figura 07 – Correlação entre as concentrações de clorofila <i>a</i> e fósforo total em lagos durante o verão.....	40
Figura 08 – Comparação entre PT <sub>observado</sub> e PT <sub>previsto</sub> para as diferentes hipóteses de <i>k</i> ....	45
Figura 09 – Representação esquemática do modelo de Chapra & Canale (1991) que considera a iteração entre o lago e seus sedimentos.....	46
Figura 10 – Região nordeste brasileira.....	48
Figura 11 – Semiárido brasileiro.....	49
Figura 12 – Principais áreas de incidência de secas nos estados do nordeste.....	50
Figura 13 – Volumes armazenados nos reservatórios cearenses em 28 de setembro de 2016.....	51
Figura 14 – Bacias hidrográficas no estado do Ceará.....	53
Figura 15 – Tipos climáticos no Ceará.....	54
Figura 16 – Mapa hidrológico do estado do Rio Grande do Norte.....	55
Figura 17 – Tipos climáticos do estado do Rio Grande do Norte.....	56
Figura 18 – Distribuição dos reservatórios na Paraíba.....	57
Figura 19 – Distribuição dos reservatórios em Pernambuco.....	58
Figura 20 – Tipos climáticos de Pernambuco.....	59

Figura 21 – Tipos climáticos da Bahia.....	60
Figura 22 – Localização espacial dos reservatórios analisados no nordeste brasileiro.....	63
Figura 23 – Variação do estado trófico do reservatório Edson Queiroz entre 2008 e 2016.....	64
Figura 24 – Porcentagem de ocorrência das classes de estado trófico no reservatório Edson Queiroz durante o período de estudo analisado.....	64
Figura 25 – Variáveis limnológicas e estado trófico do reservatório Edson Queiroz entre 2008 e 2016.....	65
Figura 26 – Variação do volume no reservatório Edson Queiroz.....	69
Figura 27 – Valores diários do volume no reservatório Edson Queiroz.....	70
Figura 28 – Localização espacial dos reservatórios sul-africanos.....	76
Figura 29 – Exemplo de balanço hídrico, do reservatório Allemanskraal, com vazões de saída ao rio e à irrigação.....	76
Figura 30 – Exemplo de balanço hídrico, do reservatório Bronkhorstspruit, com vazão de saída total por ano.....	77
Figura 31 – Variação da concentração de fósforo total em torno da média geral nos reservatórios cearenses.....	87
Figura 32 – Variação temporal do fósforo total entre junho de 2010 e março de 2011 nos açudes Gargalheiras/RN e Cruzeta/RN, não constando de dados em fevereiro de 2011 no açude Cruzeta.....	88
Figura 33 – Variação temporal do fósforo total entre maio de 2011 e março de 2012 no açude Dourado/RN.....	89
Figura 34 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Passagem das Traíras/RN.....	89
Figura 35 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Boqueirão das Parelhas/RN.....	90

Figura 36 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Itans/RN.....	90
Figura 37 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Sabugi/RN.....	91
Figura 38 – Variação da concentração de fósforo em torno da média geral nos reservatórios norte rio-grandenses.....	98
Figura 39 – Variação temporal do fósforo total nos meses de março de 2008 a junho de 2011, com coletas bimestrais no açude Camalaú/PB.....	99
Figura 40 – Variação temporal do fósforo total e do volume no açude Epitácio Pessoa/PB entre 1991 a 2008.....	100
Figura 41 – Variação da concentração de fósforo total em torno da média geral nos reservatórios paraibanos.....	105
Figura 42 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Sobradinho/BA entre janeiro de 2007 e janeiro de 2008.....	106
Figura 43 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Tapacurá/PE entre maio de 1999 e agosto de 2000.....	106
Figura 44 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Gavião comparado a valores de referência de diferentes autores.....	112
Figura 45 – Variação temporal de clorofila <i>a</i> no reservatório Gavião comparado a valores de referência de diferentes autores.....	113
Figura 46 – Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila <i>a</i> no reservatório Gavião.....	114
Figura 47 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Banabuiú comparado a valores de referência de diferentes autores.....	116
Figura 48 – Variação temporal de clorofila <i>a</i> no reservatório Banabuiú comparado a valores de referência de diferentes autores.....	117

Figura 49 – Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila <i>a</i> no reservatório Banabuiú.....	118
Figura 50 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Castanhão comparado a valores de referência de diferentes autores.....	120
Figura 51 – Variação temporal de clorofila <i>a</i> no reservatório Castanhão comparado a valores de referência de diferentes autores.....	121
Figura 52 – Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila <i>a</i> no reservatório Castanhão.....	122
Figura 53 – Valores de <i>k</i> do semiárido calculados em comparação os que seriam obtidos pelas equações de lagos em climas tropical (SALAS & MARTINO, 1991) e temperado (VOLLENWEIDER, 1976).....	132
Figura 54 – Temperatura em cinco grandes lagos e rios europeus.....	133
Figura 55 – Curva da equação proposta para $k = f(TR)$ .....	137
Figura 56 – Comparação entre os <i>k</i> obtidos segundo: a) Equação de Vollenweider (1976); b) Equação transiente de Chapra (1975) calibrada.....	139
Figura 57 – Valores de <i>k</i> calculados para os reservatórios do semiárido brasileiro para a) Solução permanente; b) Solução transiente.....	141
Figura 58 – Validação da Equação $k = 4/\sqrt{TR}$ para o semiárido em geral.....	144
Figura 59 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Gavião.....	145
Figura 60 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Banabuiú.....	146
Figura 61 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Castanhão.....	146
Figura 62 – Variação da [PT] para 88% de remoção da carga de fósforo ao Gavião.....	147
Figura 63 – Variação da [PT] para 99,13% de remoção da carga de fósforo ao Banabuiú	147
Figura 64 – Variação da [PT] para 94,10% de remoção da carga de fósforo ao Castanhão.....	148

Figura 65 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Gavião.....	148
Figura 66 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Banabuiú.....	149
Figura 67 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Castanhão.....	149

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Comparação de aspectos morfológicos em lagos e reservatórios.....	26
Tabela 02 – Principais diferenças entre lagos e reservatórios.....	27
Tabela 03 – IET em relação aos graus de trofia em corpos hídricos.....	34
Tabela 04 – Caracterização detalhada dos graus de trofia em corpos hídricos.....	35
Tabela 05 – Graus de trofia em função da [PT] para diversos autores.....	36
Tabela 06 – Características gerais dos reservatórios analisados.....	62
Tabela 07 – Inventários ambientais dos reservatórios cearenses.....	67
Tabela 08 – Reservatórios sul-africanos utilizados na validação do modelo.....	75
Tabela 09 – Dados de concentração de fósforo total nos reservatórios cearenses analisados.....	79
Tabela 10 – Estatística descritiva dos dados de concentração de fósforo total nos reservatórios cearenses analisados.....	81
Tabela 11 – Estado trófico dos reservatórios cearenses analisados com base em diversas classificações tróficas.....	83
Tabela 12 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total nos reservatórios norte rio-grandenses analisados.....	92
Tabela 13 – Estado trófico dos reservatórios norte rio-grandenses analisados com base em diversas classificações tróficas.....	93
Tabela 14 – Comparação das concentrações de fósforo total com os dados de Eskinazi-Sant'Anna <i>et al.</i> (2007).....	97
Tabela 15 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total nos reservatórios paraibanos analisados.....	102
Tabela 16 – Estado trófico dos reservatórios paraibanos analisados com base em diversas classificações tróficas.....	102

Tabela 17 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total no reservatório Sobradinho/BA.....	107
Tabela 18 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total no reservatório Tapacurá/PE.....	107
Tabela 19 – Estado trófico dos reservatórios na Bahia e em Pernambuco analisados com base em diversas classificações tróficas.....	107
Tabela 20 – Carga de fósforo de entrada, saída e balanço entre janeiro e maio de 2011 no reservatório Gavião.....	123
Tabela 21 – Carga de fósforo aos reservatórios do semiárido brasileiro analisados.....	124
Tabela 22 – Dados hidrológicos dos reservatórios cearenses analisados.....	127
Tabela 23 – Dados hidrológicos dos demais reservatórios nordestinos analisados.....	128
Tabela 24 – Cálculo de $k$ para os reservatórios cearenses.....	130
Tabela 25 – Cálculo de $k$ para os demais reservatórios do semiárido brasileiro analisados.....	131
Tabela 26 – Dados utilizados na Equação 2.16 de Vollenweider (1976).....	138
Tabela 27 – Dados para utilização na solução permanente (Equação 5.27) do modelo calibrado.....	140
Tabela 28 – Dados dos reservatórios africanos para validação.....	143

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADAPAR	Agência de Defesa Agropecuária do Paraná
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
BA	Bahia
CCME	<i>Canadian Council of Ministers of the Environment</i>
C.Eng.	Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos da América
CE	Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
Cla	Clorofila <i>a</i>
[Cla]	Concentração de clorofila <i>a</i> em $\mu\text{g}.\text{L}^{-1}$
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEHA	Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EA	<i>Environment Agency</i>
ECMWS	<i>Environment Canada Manitoba Water Stewardship</i>
EEA	<i>European Environmental Agency</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FUNCENE	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GCIS	<i>Government Communication and Information System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IET	Índice de Estado Trófico
IETC	<i>International Environmental Technology Centre</i>
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
L	Litros
LABOMAR	Instituto de Ciências do Mar
MDA	<i>Minnesota Department of Agriculture</i>

mg	Miligramma
$\mu\text{g}$	Microgramma
mm	Milímetros
MPCA	<i>Minnesota Pollution Control Agency</i>
NT	Nitrogênio Total
[NT]	Concentração de Nitrogênio Total em mg.L <sup>-1</sup>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PT	Fósforo Total
[PT]	Concentração de Fósforo Total em mg.L <sup>-1</sup>
PE	Pernambuco
PB	Paraíba
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RN	Rio Grande do Norte
SCIENTEC	Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia
SEI	Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia
SEPA	<i>Scottish Environment Protection Agency</i>
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WRC	<i>Waikato Regional Council</i>

## SUMÁRIO

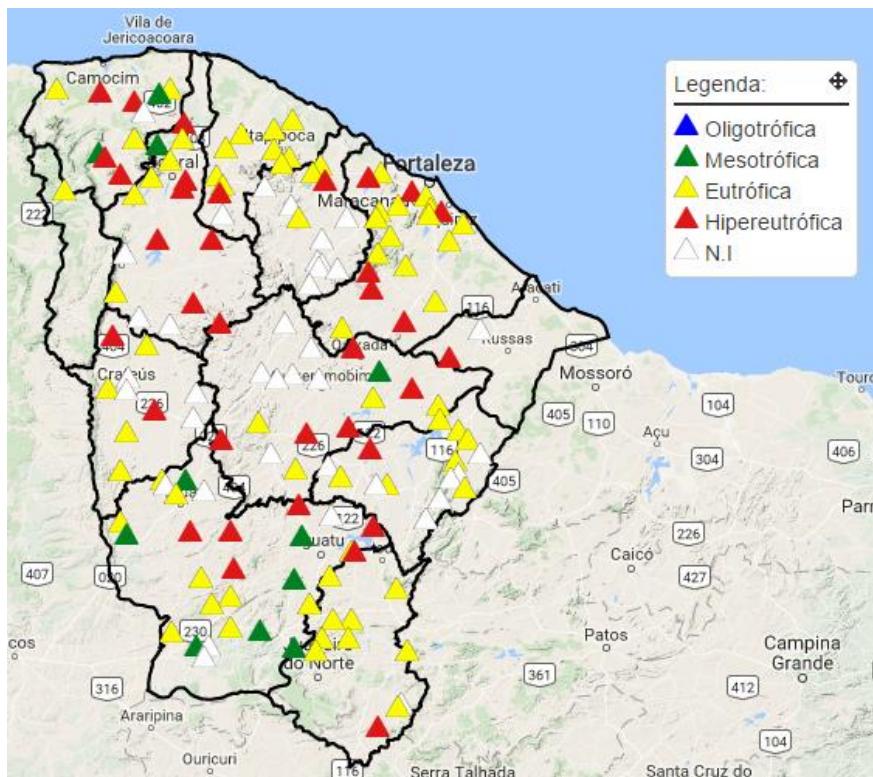
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Objetivo Geral .....</i></b>	<b>18</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Objetivos Específicos .....</i></b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Qualidade da água em reservatórios .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2</b>	<b>Aspectos gerais da eutrofização em reservatórios .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>Influência do fósforo nos processos eutróficos .....</b>	<b>36</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem de fósforo em lagos e reservatórios .....</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO .....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1</b>	<b>Coleta e processamento dos dados dos reservatórios nordestinos .....</b>	<b>61</b>
<b>4.1.1</b>	<b><i>Concentração de fósforo total .....</i></b>	<b>63</b>
<b>4.1.2</b>	<b><i>Carga afluente de fósforo total .....</i></b>	<b>66</b>
<b>4.1.3</b>	<b><i>Volume médio dos reservatórios no período modelado .....</i></b>	<b>69</b>
<b>4.1.4</b>	<b><i>Vazão de entrada dos reservatórios .....</i></b>	<b>71</b>
<b>4.1.5</b>	<b><i>Vazão de saída dos reservatórios .....</i></b>	<b>71</b>
<b>4.2</b>	<b>Adequabilidade e calibração do modelo de Chapra (1975) aos reservatórios do semiárido brasileiro .....</b>	<b>73</b>
<b>4.3</b>	<b>Validação do modelo com reservatórios sul-africanos .....</b>	<b>74</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise de cenários .....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>5.1</b>	<b>Dados dos reservatórios do semiárido brasileiro .....</b>	<b>78</b>
<b>5.1.1</b>	<b><i>Concentração de fósforo total .....</i></b>	<b>78</b>
<b>5.1.2</b>	<b><i>Carga afluente de fósforo total .....</i></b>	<b>123</b>
<b>5.1.3</b>	<b><i>Dados hidrológicos dos reservatórios .....</i></b>	<b>125</b>
<b>5.2</b>	<b>Adequação e calibração do modelo de Chapra (1975) ao semiárido brasileiro .....</b>	<b>128</b>
<b>5.3</b>	<b>Validação do modelo de Chapra (1975) ao semiárido brasileiro .....</b>	<b>142</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise de cenários .....</b>	<b>144</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>150</b>

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	152
--------------------------	-----

## 1. INTRODUÇÃO

A eutrofização em lagos e reservatórios tem se caracterizado como um crescente problema global, acelerada particularmente por nutrientes oriundos de esgotos domésticos não tratados e atividades agrícolas. A proliferação de organismos fototróficos dela decorrente vem elevando os custos de tratamento das águas de reservatórios que abastecem diversos municípios. A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), por exemplo, tem encontrado problemas como o entupimento de filtros, decorrente do excessivo número de algas, na Estação de Tratamento de Água (ETA) instalada junto ao reservatório Gavião que abastece a grande Fortaleza. De fato, verifica-se que a maioria dos reservatórios nordestinos apresenta avançado grau de deterioração da qualidade de suas águas em virtude de processos de eutrofização (THOMANN & MUELLER, 1987; STRASKRABA *et al.*, 1993; VON SPERLING, 1996; AMORIM, 2002; MEDIONDO, 2016). A maioria dos açudes do Ceará, neste sentido, são considerados eutróficos ou hipereutróficos, conforme se vê na Figura 01 (sendo “N.I” os reservatórios não classificados). Fato que se repete nos demais estados do nordeste brasileiro (MONTEIRO *et al.*, 2007; LUNA, 2008; MESQUITA, 2009).

Figura 01 – Classificação trófica dos reservatórios cearenses definida pelo IET



Fonte: CEARÁ (2016a).

Straskraba *et al.* (1993) indicam que a maioria dos reservatórios são limitados por fósforo, o que é confirmado nos trabalhos de Paulino *et al.* (2003), em reservatórios do semiárido cearense, e Salas & Martino (2001), em reservatórios tropicais, sendo sua concentração particularmente alta nos sedimentos devido a precipitações de fosfato férrico. Esta concentração é elevada, contudo, não somente nos sedimentos mas também em toda coluna de água em reservatórios nordestinos. Reservatórios como o Acarape do Meio, no semiárido cearense, chegou a atingir uma concentração de fósforo total de aproximadamente 5 mg/L, em 08 de agosto de 2012, concentração tão elevada que é própria de lagoas de estabilização (MOSS, 1988 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008; CEARÁ, 2016a). Elevadas concentrações de fósforo total também são vistas nos reservatórios do semiárido paraibano, norte rio-grandense, pernambucano e bahiano (COSTA *et al.*, 2009; MESQUITA, 2009; AZEVEDO, 2012; BEZERRA *et al.*, 2014; PERNAMBUCO, 2016d). Corroboram para isto as altas temperaturas, altas taxas de evaporação e os altos tempos de retenção hidráulica (TR) nos reservatórios da região (LEWIS, 2000; BARBOSA, 2002; ANA, 2012), ainda que somente pelo fato de se localizarem em latitudes tropicais tenham maior facilidade de ocorrência de seus processos eutróficos, com efeitos mais severos e de maior duração (LEWIS, 2000).

O fato da concentração de fósforo total servir de indicador do estado trófico e do quanto densa é a população de organismos fototróficos em lagos e reservatórios, conforme é indicado pela concentração de clorofila *a*, e ser geralmente considerado seu nutriente limitante, aliado ao fato de ser o mais eficientemente controlado com as atuais tecnologias, o torna objeto de cuidadosa análise no gerenciamento de recursos hídricos (VOLLENWEIDER, 1968; DILLON & RIGLER, 1974a.; RAST & LEE, 1978; RECKHOW *et al.*, 1980; MOSS, 2010). A previsão de fósforo total através de modelos caracteriza-se, então, como uma ferramenta fundamental em tal gerenciamento. As características próprias dos reservatórios em regiões semiáridas, entretanto, exigem que se faça uso de um modelo calibrado para os dados desta região, visto serem essencialmente diferentes daquelas dos reservatórios em regiões temperadas e tropicais (SALAS & MARTINO, 1991; NURNBERG, 1996; COSTA, 2004; ANTONELO, 2006; HIJO, 2009; NOVO, 2011; VIDAL, 2011; ARAÚJO, 2016; CEARÁ, 2016a). A existência de um modelo assim calibrado, e validado para o semiárido em geral, permitirá uma gestão dos recursos hídricos da região mais condizente com a situação local,

favorecendo a previsão de cenários futuros de qualidade de água e a adoção de medidas preventivas e/ou corretivas a eles correlacionadas.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

- Propor modelo de previsão de concentração de fósforo total para reservatórios em regiões semiáridas.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Comparar os dados dos reservatórios do semiárido brasileiro (concentração de fósforo total, tempo de retenção hidráulica, carga afluente fósforo, volumes e vazões de entrada e saída) com os dados de reservatórios brasileiros, em outras regiões do país, e de outros países a fim de evidenciar as diferenças em seus valores próprias das características da região em estudo.
- Verificar se o balanço de massa para lagos e reservatórios em mistura completa (mesma concentração de nutrientes ao longo de todos os pontos na massa líquida (NUNES, 2008)), com apenas o parâmetro coeficiente de decaimento de fósforo necessário à calibração ( $k$ ) (CANALE & SEO, 1996b), proposto por Chapra (1975) é preferível aos modelos de fósforo mais complexos na análise do semiárido brasileiro.
- Calibrar o modelo de Chapra (1975) para os reservatórios do semiárido brasileiro com os dados de trinta e três reservatórios da região, propondo uma nova relação  $k = f(TR)$  que melhor os ajuste quando comparada as relações  $k = f(TR)$  para reservatórios tropicais (SALAS & MARTINO, 1991) e temperados (VOLLENWEIDER, 1976).
- Validar o modelo de Chapra (1975) com dados de oito reservatórios do semiárido sul-africano, propondo o referido modelo, uma vez calibrado e validado, como ferramenta de gestão dos recursos hídricos para a região semiárida brasileira e geral.
- Analisar cenários de qualidade de água futuros, fazendo uso do modelo proposto, a fim de se indicar suas possíveis utilizações e averiguar diferentes impactos nos reservatórios analisados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Qualidade da água em reservatórios

Entende-se por qualidade da água a medida do estado dos recursos hídricos necessária para subsistência das espécies bióticas e satisfação das necessidades humanas (NDUNGU, 2014). É definida como sendo as propriedades físicas, químicas, biológicas e organolépticas da água (UNITED NATIONS, 1997). Tal definição engloba os três principais componentes dos corpos hídricos (hidrológico, físico-químico e biológico), permitindo uma completa avaliação do recurso hídrico (MEYBECK & HELMER, 1996). CETESB (2009) indica alguns parâmetros de qualidade de água relacionados aos três componentes citados, dentre os quais citam-se: temperatura, transparência, turbidez, carbono orgânico total, demanda bioquímica de oxigênio, ferro, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico, clorofila, fósforo e nitrogênio. Tais parâmetros possuem influência individual nos reservatórios a depender de fatores como clima, latitude, longitude, afluência de cargas poluidoras, dentre outros.

A demanda de água não se resume apenas ao aspecto quantitativo. Requisitos qualitativos estão atrelados aos vários usos da água que, quando não observados, limitam seu aproveitamento (ANA, 2012). Ainda que para determinados usos os requisitos de qualidade sejam semelhantes (comparar o estudo da composição aniônica de águas mineiras oriundas de 37 fontes naturais brasileiras de Rebelo & Araújo (1999), com o estudo da composição química da água de um sistema de piscicultura no parque aquícola do reservatório Ilha Solteira de Mallasen *et al.* (2012)), as demandas de cada usuário terão sua própria exigência quanto à quantidade e qualidade da água, além de sua própria influência no recurso hídrico. A falta de compatibilidade entre as demandas dos usuários poderá restringir as atividades entre eles: a exigência de concentração máxima de parâmetros inorgânicos, por exemplo, diferirá para águas destinadas a abastecimento humano daquelas destinadas à harmonia paisagística. O conhecimento da qualidade da água, portanto, é um fator essencial para a gestão dos recursos hídricos de uma dada região (MEYBECK *et al.*, 1996; BRASIL, 2005; ANA, 2012).

As múltiplas demandas de água, crescentes em todos os países (SHIKLOMANOV, 1998), oriundas da sociedade de consumo, da produção industrial e agrícola, intensificam-se à medida da diversificação das atividades econômicas, gerando impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos (TUNDISI, 2003a). Entre os

principais impactos decorrentes de atividades antrópicas, citam-se: a alteração do fluxo de rios e do transporte de sedimentos e nutrientes com a construção de represas; alteração da drenagem, com aumento da sedimentação e inibição da recarga natural de aquíferos, devido ao desmatamento do solo; alteração do ciclo hidrológico e poluição dos recursos hídricos com o crescimento dos padrões gerais de consumo humano decorrente, em parte, do crescimento da população (TUNDISI, 2003b).

Em conjunto com a demanda por grandes volumes de água, os impactos em sua qualidade exigem a introdução de novas tecnologias para o monitoramento, tratamento e gestão dos recursos hídricos. O tratamento da água, por sua vez, se enquadra entre as prioridades fundamentais no Brasil em face da disparidade entre a distribuição desigual do volume de água no país e a disponibilidade dos recursos hídricos, limitada por aspectos qualitativos (ver, por exemplo, atual quadro trófico do Ceará disponível em CEARÁ (2016a)). No que se refere ao monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, é fundamental uma gestão por bacias hidrográficas, visto nela se integrarem os processos sociais, econômicos e biogeofísicos, favorecendo uma integração institucional e de pesquisa com a gestão, e integrada, contemplando não somente o ciclo de águas atmosféricas, subterrâneas e superficiais, como também os usos múltiplos dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. A participação dos usuários, gestores e setores públicos em tal gestão deverá ser um dos seus principais eixos, favorecendo a sustentabilidade da oferta e demanda de água (ROGERS, 2006; TUNDISI, 2003a; TUNDISI, 2008).

Ainda que exista atualmente uma transição na gestão dos recursos hídricos em vista a uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva (TUNDISI & TUNDISI, 2008), a percepção geral entre os profissionais que lidam com os recursos hídricos é de uma crise em tal gestão. A consequência da má gestão em muitos países é vista sobretudo na falta de abastecimento de água à população, chegando à cifra de mais de um bilhão de pessoas sem abastecimento, especialmente os mais pobres (particularmente aqueles em países subdesenvolvidos) (COSGROVE, 2006; HANEMANN, 2006). Além disso, ainda que ocorra algum tipo de acesso à água, dado ela ser um bem essencial sem o qual a população não pode sobreviver, tal acesso não se dá em condições sanitárias adequadas (AGUIRRE, 2006). É o que Hanemann (2006) classifica como “heterogeneidade da água”: além das dimensões quantitativas e qualitativas, a água também é influenciada por sua localização, seu controle (timing) e sua variabilidade. É o que resume Aguirre (2006) quando diz que “nem toda água é igual”. Por causa disso, Hanemann (2006, p. 90) exemplifica que “um

litro de água não é necessariamente o mesmo que outro litro de água se este é disponível em uma localização diferente, em um diferente ponto no tempo, com uma diferente qualidade, ou com uma diferente probabilidade de ocorrência”.

Princípio unificador de tudo quanto correlaciona-se às águas no planeta, o ciclo hidrológico tem papel fundamental nesta heterogeneidade da água. Volumes evaporados em diferentes localidades, por exemplo, não necessariamente serão precipitados nos locais de origem visto as dinâmicas próprias dos movimentos atmosféricos e terrestres. Não somente isto, fatores como: incidência da radiação solar distinta entre regiões mais próximas ao equador daquelas mais distantes; variabilidade do solo e coberturas vegetais; volume de vapor de água na atmosfera; dentre outros favorecem a variabilidade própria do ciclo hidrológico (SILVEIRA, 1993; ESTEVES, 1998; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Os fluxos e as reservas de água dos componentes do ciclo hidrológico global (precipitação, evaporação e transpiração, escoamento superficial e subterrâneo) impactam a distribuição das águas continentais, tornando-se indispensável a consecução de estratégias para predição das disponibilidades hídricas futuras (VILLELA & MATOS, 1975). Ainda que a maior parte das reservas de água esteja armazenada em oceanos, os lagos e rios armazem cerca de 90.000 km<sup>3</sup> de água e se caracterizam como as principais fontes abastecimento humano, ainda que tal valor seja apenas 0,26% das reservas de água doce globais. O Brasil, por sua vez, contém de 12% a 16% de toda água doce do mundo, ainda que as menores disponibilidades hídricas do país vigorem justamente onde se requer maiores níveis de utilização de água por ano (TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Dentre os componentes do ciclo hidrológico, o escoamento superficial tem importante destaque na deterioração da qualidade de água em bacias hidrográficas, particularmente em lagos e reservatórios. Nos trabalhos de Meneses Filho & Tucci (2003), Vivacqua (2005) e Kemerich *et al.* (2013) evidencia-se a deterioração da qualidade de água através do carreamento de nutrientes existentes nos solos. Von Sperling (1996) destaca ainda que a adição de fertilizantes ao solo, a retirada das matas para plantação de vegetais agricultáveis (diminuindo, dessa forma, a capacidade de infiltração do solo) e, sobretudo, a ocupação urbana favorecem um elevado aporte de nutrientes através do escoamento superficial, particularmente fósforo e nitrogênio.

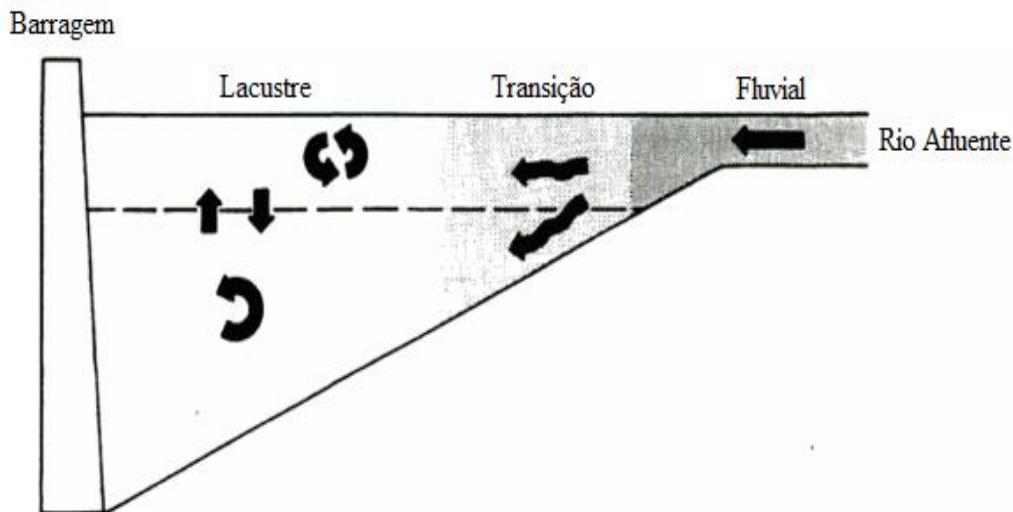
Um dos fatores de mais expressivo impacto na qualidade das águas superficiais e presentes em todos os continentes, os reservatórios destacam-se na grande variedade de impactos negativos que causam aos recursos hídricos de uma dada região. Considerados como um estágio entre ambiente lótico e lêntico, são bacias artificiais providas de uma fonte fluvial, com capacidade de armazenamento volumétrico superior a  $10^6$  m<sup>3</sup> de água, e são construídos para diversas finalidades, dentre as quais a regularização dos regimes de vazões de rios intermitentes em regiões semiáridas (STRASKRABA *et al.*, 1993; ESTEVES, 1998; ANA, 2012), seus impactos negativos compreendem desde a redução do oxigênio dissolvido em sua região mais profunda e os subsequentes impactos sobre a biodiversidade aquática até a propagação de doenças transmissíveis via contato com a água e a elevação da taxa de sedimentação localizada à montante do reservatório em seus afluentes (ESTEVES, 1998; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008).

Estimativas do total de águas contidas nos reservatórios em todo mundo progridem com o passar dos anos. Shiklomanov & Rodda (2003) estimavam que tal valor superava 5750 km<sup>3</sup>, com área superficial da ordem de 400.000 km<sup>2</sup>. Cinco anos depois, Tundisi & Matsumura Tundisi (2008) já estimavam em 10.000 km<sup>3</sup> represados, com área superficial aproximada em 650.000 km<sup>2</sup>. Os reservatórios diferenciam-se dos lagos por características geográficas, morfológicas, hidrológicas e limnológicas. A começar por esta última classe, os reservatórios diferem destes por apresentarem, a depender de fatores hidráulicos (de modo particular o tipo de tomada de água), instabilidade em seus processos limnológicos. Diferenciam-se ainda dos lagos por se localizarem em regiões predominantemente não glaciais, possuírem ampla variação do seu nível de água, além de taxas de evaporação que superam as taxas de precipitação (ESTEVES, 1998; WETZEL, 1990 *apud* AMORIM, 2001).

Tundisi & Matsumura Tundisi (2008), entretanto, indicam que a diferença básica está nos reservatórios possuírem saídas de fundo ou de superfície (vertedouros ou turbinas) que promovem gradientes verticais e horizontais, além de fluxos contínuos até à barragem (Figura 02). Alguns dos fatores envolvidos em tais mecanismos de circulação envolvem a afluência de rios com a produção de gradientes longitudinais e variabilidade espacial dentro do reservatório, além de aspectos climatológicos como a velocidade do vento e a precipitação dos quais procedem gradientes verticais e turbulências. Visto a baixa profundidade da maioria dos reservatórios (< 30 metros), a ação do vento sobre suas superfícies promove com bastante frequência circulação completa em seu interior

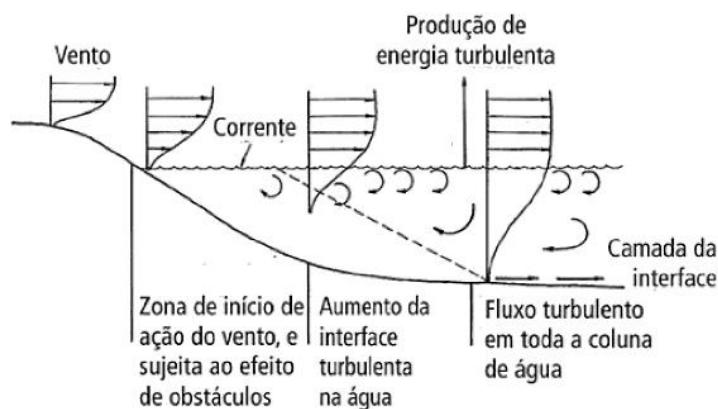
(TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008), conforme visto na Figura 03, favorecendo situações mais próximas à mistura completa nos reservatórios.

Figura 02 – Zonas oriundas dos gradientes existentes em reservatórios



Fonte: Thornton *et al.* (1981 *apud* THORNTON, 1990).

Figura 03 – Efeito do vento na circulação em reservatórios



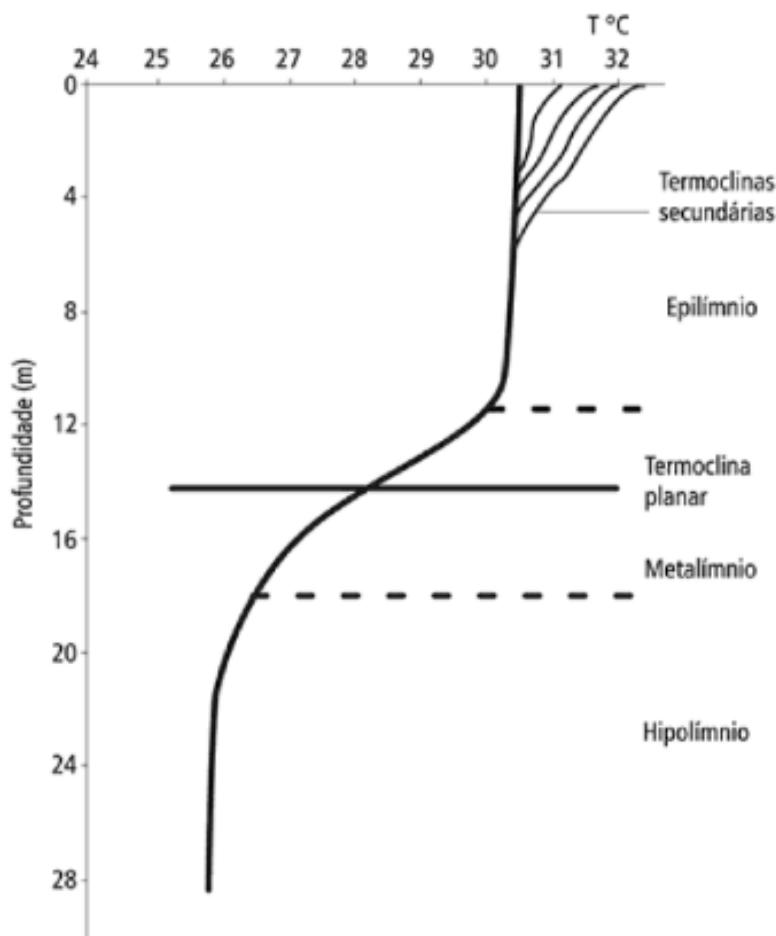
Fonte: Adaptado de TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI (2008).

Correlacionando-se à circulação interna dos reservatórios e favorecida em regiões com elevadas temperaturas, a estratificação térmica tem bastante influência na qualidade das águas em tais sistemas hídricos. A incidência de radiação, cujo comprimento de onda supere os 740 nm, é absorvida nas camadas superficiais dos reservatórios (particularmente o primeiro metro de água de profundidade). Transformando-se em energia térmica após a absorção, tal energia se propaga ao longo do volume do corpo hídrico por condução. Neste processo, a ação do vento favorece a redistribuição do calor

por todo reservatório ao promover a turbulência de suas águas. A elevação da temperatura na região mais superficial do reservatório, contudo, gerará camadas d'água em seu interior com diferentes densidades, impedindo-as de se misturarem, que, caso a ação do vento não supere tal barreira física, a energia térmica não terá distribuição uniforme, e o reservatório estará estratificado termicamente. Neste caso, é justamente este gradiente vertical de temperatura e densidade o principal fator que determina as características essenciais do funcionamento no interior do corpo hídrico lêntico. As camadas superiores do reservatório, mais quentes e menos densas, denominam-se epilímnio, enquanto que as camadas inferiores, mais frias e mais densas, são denominadas hipolímnio. A região entre tais camadas denomina-se mesolímnio ou metalímnio, cujos limites não são fáceis de se definir, e que possui diminuição gradual da temperatura quando comparada ao epilímnio (VON SPERLING, 1996; ESTEVES, 1998; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008).

A ocorrência de termoclinas se dá tanto no epilímnio (devido ao aquecimento superficial diurno e o subsequente resfriamento noturno) quanto no mesolímnio. Neste último, denomina-se termoclina planar um dado plano imaginário a dividir, no interior do reservatório, uma região com incidência luminosa e circulação completa e produtiva, de outra sem incidência luminosa, com baixa circulação e onde vigoram processos como decomposição de biomassa (Figura 04). Justamente abaixo de tal patamar é possível verificar condições de completa ausência de oxigênio dissolvido, além da presença de compostos de ferro reduzidos, aspectos estes que prejudicam a qualidade das águas em lagos e reservatórios (VON SPERLING, 1996; ESTEVES, 1998; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). O impacto da ação do vento e do gradiente térmico, que juntamente com a afluência do rio constituem as principais forças das quais depende a estratificação térmica em reservatórios (STRASKRABA *et al.*, 1993), sobre a qualidade das águas em tais corpos hídricos é visto nos trabalhos de Amorim (2001) e Araújo (2016).

Figura 04 – Camadas da estratificação térmica em lagos



Fonte: Tundisi & Matsumura Tundisi (2008).

O impacto da profundidade nas condições limnológicas dos reservatórios é vista sobretudo no fato de que, em lagos rasos, pelo fato da região hipolimnética ser menor que a de lagos profundos, com consequente maior região epilimnética, os efeitos do aporte de cargas de nutrientes aos lagos rasos à deterioração da qualidade de suas águas são muito mais impactantes. Para o caso de lagos com profundidade média inferior a 20 metros, a biomassa oriunda do epilimnio só é completamente degradada no hipolímnio, desoxigenando-o, com a subsequente produção de nutrientes que, com a ação do vento e os efeitos da mistura (Figura 03), ascende-os às camadas superiores aumentando a produção de biomassa no corpo hídrico (BERNHARDT, 1995 *apud* AMORIM, 2001).

Quanto aos aspectos morfológicos dos reservatórios que interferem na qualidade de suas águas, Thornton *et al.* (1981 *apud* THORNTON, 1984) compararam suas características gerais com as dos lagos e verificam que, de modo geral, os reservatórios possuem desde maior área de drenagem até maior lámina de água escoada. Com base em

trezentos e nove lagos e cento e sete reservatórios, a comparação citada é vista conforme Tabela 01 abaixo.

Tabela 01 – Comparação de aspectos morfológicos em lagos e reservatórios

Variáveis	Lagos Naturais (n = 309)	Reservatórios do C.Eng. (n = 107)	Probabilidade média de que sejam iguais
Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	222	3228	< 0,001
Área Superficial (km <sup>2</sup> )	5,6	34,5	< 0,001
Área de Drenagem/Área Superficial	33	93	< 0,001
Profundidade Média (m)	4,5	6,9	< 0,001
Profundidade Máxima (m)	10,7	19,8	< 0,001
Desenvolvimento do Perímetro	2,9 (n=34) <sup>1</sup>	9,0 (n=179) <sup>2</sup>	< 0,001
Lâmina Escoada (m/ano)	6,5	19	< 0,001
Tempo de Retenção Hidráulica (anos)	0,74	0,37	< 0,001

<sup>1</sup> Hutchinson, 1957

<sup>2</sup> Leidy & Jenkins, 1977

Fonte: Thornton *et al.* (1981 *apud* Thornton, 1984).

Thornton (1984) destaca que uma maior razão entre as áreas de drenagem e superficial indica afluências maiores de cargas e compostos aos reservatórios, juntamente com menores valores de tempo de retenção hidráulica; enquanto maiores desenvolvimentos do perímetro indicam maiores possibilidades da existência de enseadas e braços de rios em reservatórios que em lagos. Uma comparação mais pormenorizada entre lagos e reservatórios é vista na Tabela 02.

Tabela 02. – Principais diferenças entre lagos e reservatórios

Propriedades	Lagos	Reservatórios
Flutuação do nível da água	Pequena, estável	Grande, irregular a depender de regras operativas e de manejo
Estratificação Térmica	Depende do regime natural	Variável, irregular
Entrada de água	Depender de pequenos tributários e fontes difusas superficiais ou subterrâneas	Depende de tributários superficiais
Saída de água	Relativamente estável, superficial	Irregular. Depende de regras operativas e de manejo, várias profundidades da coluna d'água
Tempo de retenção hidráulica	Longo, de um a vários anos	Variável de dias a anos
Padrão de oxigênio dissolvido	Pequena variação horizontal, gradiente vertical com oxigênio máximo mais comum que mínimo a partir do metalímnio	Grande variação. Gradiente vertical com oxigênio mínimo mais comum que máximo a partir do metalímnio
Extinção de Luz	Gradientes verticais predominantes, baixa extinção de luz	Gradientes horizontais predominantes, extinção irregular de luz
Carga externa de nutrientes	Cargas moderadas por influência biogeoquímica de ecótonos	Mais alta que em lagos, função dos rios tributários e tipo de solo
Dinâmica de nutrientes	Predominam gradientes verticais, pequena carga interna em lagos não eutrofizados pela ação antrópica	Predominam gradientes horizontais, dependem da taxa de sedimentação, tempo de retenção hidráulica e regime hidráulico
Fitoplâncton	Limitado pela disponibilidade de luz e nutrientes inorgânicos, podem formar florações sazonais	Limitado pela disponibilidade de luz, nutrientes inorgânicos e tempo de retenção hidráulica, podem formar florações
Fauna bentônica	Diversidade e produtividade moderada	Baixa diversidade e produtividade limitada pela flutuação do nível da água

Fonte: Adaptado de XAVIER (2005).

Dentre as características morfológicas destacadas, merece particular destaque a influência do tempo de retenção hidráulica na qualidade das águas dos reservatórios. Chapra (1997) define o tempo de retenção hidráulica (TR), ou ainda tempo de residência hidráulica, de um elemento E como sendo o tempo médio em que uma fração, seja molécula ou partícula, de E permanece no sistema analisado. Ainda que seu cálculo possa se proceder a partir de modelos eulerianos ou lagrangeanos (GAZE, 2005), Straskraba *et al.* (1993), Chapra (1997), Tundisi & Matsumura Tundisi (2008) e Brezonik & Arnold (2011) o expressam simplificadamente como a relação entre o volume do sistema (V), neste caso o reservatório, e a vazão média afluente ( $Q_a$ ) conforme Equação 2.1 abaixo.

$$TR = \frac{V}{Q_a} \quad (2.1)$$

Sendo,

V - volume do reservatório em m<sup>3</sup>;

$Q_a$  – vazão afluente média ao reservatório (m<sup>3</sup>/ano);

TR – tempo de retenção hidráulica (anos).

Chapra (1997) considera que, para os casos em que a precipitação se iguala à evaporação, TR pode ser calculado utilizando-se a vazão de saída do reservatório. Ainda que os valores de precipitação e evaporação mensais sejam aproximadamente os mesmos em alguns meses do ano para lagos temperados (caso do Lago Winnipeg, Canadá, conforme trabalho do Environment Canada Manitoba Water Stewardship (2011)), o volume de água evaporado em reservatórios do semiárido brasileiro e sul-africanos chega a ser aproximadamente três vezes e meio maior que o volume precipitado em tais regiões, conforme se vê no reservatório Allemanskraal, na África do Sul (MOLLE, 1989; HARDING, 2008; CEARÁ, 2009; MARENKO *et al.*, 2011). Dessa forma, a equivalência entre entrada e saída de água própria de lagos (THORNTON, 1984) não se verifica em climas equatoriais.

Straskraba *et al.* (1993) salientam que dado que V e  $Q_a$  variam ao longo do ano, seja devido aos aspectos funcionais do reservatório, seja por aspectos sazonais, há casos em que convém o cálculo do TR médio a partir do cálculo da média dos tempos de retenção hidráulica em distintos períodos de tempo no reservatório analisado. Ainda que

o valor de TR não evidencie nenhuma informação a respeito do tempo de retenção de nutrientes no corpo hídrico, ele se distingue como um parâmetro limnológico útil por possibilitar comparações entre reservatórios distintos.

A influência do TR na qualidade das águas dos reservatórios correlaciona-se aos efeitos da ação do vento e aos gradientes de densidade anteriormente citados. Neste caso, maiores valores de TR indicam maior influência destes dois fatores no reservatório. Além disso, as zonas anteriormente citadas na Figura 02 dependem não somente de características morfométricas, mas principalmente do TR. Esta dependência, contudo, varia entre reservatórios em regiões de climas distintos. Para os localizados em regiões temperadas, para  $TR < 10$  dias, o reservatório como um todo passa a ser classificado como zona fluvial, enquanto que para  $TR > 200$  dias, a maior parte do reservatório é zona lacustre. Quanto à estratificação térmica, verifica-se que reservatórios com TR entre 10 e 100 dias vem a desenvolver tal processo, permanecendo as camadas d'água, misturadas pela ação do vento, separadas, ainda que no hipolímnio se verifique circulações intensas. Para reservatórios de  $TR >> 100$  dias, caso dos totalmente estratificados, além da estratificação comum aos lagos há a afluência de águas ao hipolímnio a fim de substituir aquelas tomadas pelas saídas de água em tal região (STRASKRABA *et al.*, 1993).

A influência do TR nos reservatórios, no que tange aos compostos químicos nele presentes, é vista no fato das cargas de nutrientes, para o caso em que a concentração do composto químico não varia no afluxo ao reservatório ( $Q_a$ ), diminuírem exponencialmente com o aumento de TR. Tal concentração, no entanto, na maioria das vezes depende de  $Q_a$ , consequentemente de TR (Equação 2.1), e, para o caso de uma dependência positiva, tal qual se dá com o fosfato e nitrato, a carga diminuirá hiperbolicamente com o aumento de TR. A presença de sedimentos, importante fator na distribuição de compostos químicos nos reservatórios que influenciam na qualidade de suas águas, também é influenciada pela magnitude do TR. Neste caso, baixos valores de TR implicam em pouca sedimentação no reservatório, enquanto altos valores de TR influenciam significativamente a química no interior de tal corpo hídrico (STRASKRABA *et al.*, 1993; ESTEVES, 1998). Considerando este aspecto qualitativo da água referente a presença de compostos químicos, verifica-se particularmente que a retenção de fósforo nos reservatórios é consideravelmente influenciada pelo valor de TR, de tal modo que Straskraba *et al.* (1993), citando dados de Wilhelmus *et al.* (1978), verifica que a retenção de fósforo chega a 90% em reservatórios na parte mais ocidental

da Alemanha para TR > 30 dias, enquanto tal porcentagem cai para 10% quando TR é menor que tal valor.

Para o caso dos reservatórios em regiões semiáridas, altos valores de TR são observados, aumentando o tempo para renovação de suas águas e, consequentemente, deteriorando sua qualidade ao aumentar as concentrações de nutrientes (particularmente pela maior retenção de cargas de nutrientes, caso do fósforo, nos sedimentos (SOUZA *et al.*, 2003)) em paralelo às altas temperaturas e taxas de evaporação na região. Tais fatores aceleram a eutrofização nos reservatórios do semiárido brasileiro e sul-africano, visto aumentarem a eficiência no uso dos nutrientes nos processos como fotossíntese, biodegradação e biossíntese (LEWIS, 2000; BARBOSA, 2002; HARDING, 2008; ANA, 2012).

## **2.2. Aspectos gerais da eutrofização em reservatórios**

Entende-se por eutrofização, neste caso, o processo pelo qual os corpos hídricos são enriquecidos por nutrientes com a subsequente deterioração de suas águas devido ao crescimento excessivo de organismos fototróficos (VOLLENWEIDER, 1968; THOMANN & MUELLER, 1987; ESTEVES, 1998; IETC, 2002; MEDIONDO, 2016; ZHANG, 2013). Visto, contudo, que outros fatores podem vir a determinar o processo de eutrofização, tais como turbidez da água (PENNOCK & SHARP, 1986) e predação de peixes e consumo de plantas (CARPENTER *et al.*, 1985), é possível definir a eutrofização relacionando-a com o aumento da biomassa de fitoplâncton, sem fazer referência aos nutrientes (MEEUWIG, 1998). Em latitudes tropicais, os processos eutróficos são mais fáceis de ocorrer, além de produzirem efeitos mais severos nas águas continentais, e com maior tempo de duração ao longo do ano (LEWIS, 2000). No caso dos reservatórios, as causas principais de eutrofização são atividades agrícolas e, sobretudo, a afluência de esgotos sem o devido tratamento (STRASKRABA *et al.*, 1993). No nordeste do Brasil, corroboram outras fontes de nutrientes aos corpos hídricos (Figura 05):

Figura 05 – Causas de poluição hídrica no nordeste brasileiro

Impacto	AL	BA	CE	MA	PB	PE	PI	RN	SE
Agrotóxico				x					
Agricultura		x							
Aquicultura			x						
Carcinicultura							x	x	
Desmatamento				x	x	x		x	
Efluentes industriais	x	x	x	x	x	x	x		x
Efluentes agroindustrial									
Erosão				x		x	x		
Esgotos domésticos	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Indústria sucroalcooleira					x	x	x		
Mineiração		x	x	x				x	
Resíduos sólidos							x		
Rizicultura							x		
Salinas							x		
Salinização				x		x	x	x	

Fonte: ANA (2012).

A eutrofização tem se caracterizado como um problema global em vista do contínuo crescimento da população mundial (estimado em cem milhões de pessoas por ano) e o subsequente aumento da poluição hídrica decorrente de diferentes fontes antrópicas. Estima-se que a produção per capita de nutrientes, particularmente daqueles considerados os mais importantes na eutrofização de reservatórios, caso do fósforo e do nitrogênio (VOLLENWEIDER, 1968), seja de 4 gramas de fósforo e 15 gramas de nitrogênio por ano, o que permite ter uma visão mais ampla da gravidade de tal processo nos corpos hídricos atuais (MEDIONDO, 2016). Jeppesen *et al.* (2005) observam que nos últimos séculos a crescente urbanização e as intensas práticas de agricultura intensiva destacam-se entre as principais causas de eutrofização em lagos. Numa pesquisa feita com 217 lagos pelo Comitê Internacional de Ambientes Lacustres e o Programa Ambiental das Nações Unidas, verificou-se que em todos os lagos, nos últimos 50 anos, o nível de eutrofização elevou-se. Os efeitos da eutrofização já são bastante conhecidos: proliferação de macrófitas, aumento de sedimentos com a perda de habitat de peixes, desoxigenação da água com mortandade de peixes, produção de sustâncias tóxicas por espécies cianofíceas, perda de biodiversidade, além de impactos econômicos com o aumento do custo de tratamento da água, podendo ela, inclusive, tornar-se inaproveitável

ao abastecimento público e ainda como ambiente de lazer (ESTEVES, 1998; IETC, 2002; MEDIONDO, 2016).

Uma das estratégias mais utilizadas nas últimas décadas, particularmente nos países europeus e norte-americanos, para combater a eutrofização tem sido a redução das cargas externas de nutrientes aos corpos hídricos. Esta prática é eficaz em muitos lagos, evidenciada particularmente com a diminuição da proliferação de algas em tais corpos hídricos. Tal estratégia, contudo, nem sempre é eficaz na reversão da eutrofização. Ainda sobre a pesquisa nos 217 lagos, nesse sentido, verificou-se que no ano 2000 a carga afluente de nutrientes em 66 lagos foi reduzida, mantendo, contudo, altas concentrações de nutrientes em suas águas. Algumas das medidas, em paralelo à redução das cargas externas de nutrientes, a serem tomadas para recuperação dos lagos e reservatórios são: aeração das camadas mais profundas do corpo hídrico ou da coluna d'água como um todo; remoção de massas d'água; retirada de sedimentos por succão; dentre outras (ESTEVES, 1998; IETC, 2002; JEPPESEN *et al.*, 2005; MEDIONDO, 2016).

Durante o processo eutrófico, o corpo hídrico, neste caso o reservatório, passa da condição inicial de oligotrófico para mesotrófico e então eutrófico, ou até mesmo hipereutrófico (ESTEVES, 1998). Este processo, que quando natural pode vir a levar milhares de anos para ocorrer, pode vir a ser consideravelmente acelerado por atividades antrópicas e leva o nome de eutrofização artificial ou cultural (CHAPRA, 1997), cuja reversibilidade é dificultada pela carga interna e seus constantes efeitos nos ciclos biogeoquímicos dos corpos hídricos (TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Os diversos graus de trofia fazem referência ao quanto enriquecido por nutrientes o reservatório se encontra em dado momento. Em termos gerais, pode-se dizer que (CHAPRA, 1997):

- Oligotrófico: pouco enriquecido por nutrientes;
- Mesotrófico: enriquecido moderadamente por nutrientes;
- Eutrófico: bem enriquecido por nutrientes;
- Hipereutrófico: excessivamente enriquecido por nutrientes.

Sendo os três primeiros graus de trofia os mais tradicionais (CARLSON, 1977). As classificações do estado trófico, contudo, variam entre autores e são especificadas em

função dos parâmetros de qualidade de água, alguns dos quais citados na seção 2.1, sobretudo fósforo total, nitrogênio total, clorofila e oxigênio dissolvido. Carlson (1977), ao incorporar os diferentes aspectos de tais estados tróficos evidenciados pela grande variedade de parâmetros de qualidade de água, parâmetros estes que são correlacionados entre si, propôs um índice de estado trófico (TSI), variando de 0 a 100, onde a cada divisão principal (10, 20, 30, 40, etc) há uma duplicação na biomassa do corpo hídrico. De tal forma que o TSI, em relação a profundidade do disco de Secchi (transparência), a concentração de clorofila *a* ou de fósforo total, é calculado conforme as Equações 2.2 a 2.4, respectivamente:

$$TSI(Transp) = 10\left(6 - \frac{\ln Transp}{\ln 2}\right) \quad (2.2)$$

$$TSI(Cla) = 10\left(6 - \frac{2,04 - 0,68 \ln Cla}{\ln 2}\right) \quad (2.3)$$

$$TSI(PT) = 10\left(6 - \frac{\ln \frac{48}{PT}}{\ln 2}\right) \quad (2.4)$$

Sendo o valor da transparência em relação à superfície da água em metros e as concentrações de clorofila *a* e fósforo total em  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . A utilização do índice de Carlson (1977) permite, de modo particular, comparações entre reservatórios sobre a mesma base uniforme. No entanto, algumas de suas limitações consiste em ter sido desenvolvido por meio de dados de corpos hídricos em clima temperado e para lagos e reservatórios que tenham o fósforo como nutriente limitante. No Brasil, a avaliação do estado trófico é frequentemente realizada a partir da modificação do TSI de Carlson (1977) por Toledo Júnior *et al.* (1983) para reservatórios em clima tropical (ANA, 2012). Neste caso, as equações supracitadas são modificadas para a seguinte forma final (com o acréscimo do IET médio e o referente ao ortofosfato solúvel ( $\text{PO}_4$ )):

$$IET(Transp) = 10\left(6 - \frac{0,64 + \ln Transp}{\ln 2}\right) \quad (2.5)$$

$$IET(Cla) = 10\left(6 - \frac{2,04 - 0,695 \ln Cla}{\ln 2}\right) \quad (2.6)$$

$$IET(PO_4) = 10 \left( 6 - \frac{\ln \frac{21,67}{PO_4}}{\ln 2} \right) \quad (2.7)$$

$$IET(PT) = 10 \left( 6 - \frac{\ln \frac{80,32}{PT}}{\ln 2} \right) \quad (2.8)$$

$$IETméd = \frac{IET(Transp) + 2[(IET(PT) + IET(PO_4) + IET(Cla))]}{7} \quad (2.9)$$

O estado trófico dos reservatórios, a partir dos valores calculados para o IETméd, é classificado conforme a Tabela 03 abaixo (TOLEDO JÚNIOR *et al.*, 1983). Diversos trabalhos utilizam o índice de Carlson (1977), modificado ou não por Toledo Júnior *et al.* (1983), na classificação do estado trófico dos reservatórios do semiárido brasileiro (PAULINO *et al.*, 2013), dentre os quais citam-se: Duarte *et al.* (1998), Antonello (2006), Araújo Júnior (2009), Vilar (2009), Lima & Severi (2014), Lima (2016). Visto as particularidades climáticas, hidrológicas e geográficas do semiárido brasileiro, a serem mais detalhadas no Capítulo 3, índices de estado trófico tem sido propostos para tal região: caso dos trabalhos de Barros (2013) e Rolim (2016).

Tabela 03 – IET em relação aos graus de trofia em corpos hídricos

Graus de Trofia	
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59
Eutrófico	59 < IET ≤ 63
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67
Hipereutrófico	IET ≥ 67

Fonte: Toledo Júnior *et al.*, 1983.

A definição de novos níveis tróficos (ultraoligotrófico, oligomesotrófico, mesoeutrófico, supereutrófico, etc), inclusive, permite análises mais pormenorizadas dos

corpos hídricos (Tabela 04). Algumas das classificações tróficas para vários autores (VOLLENWEIDER, 1965; VOLLENWEIDER, 1968; EPA, 1983; THOMANN & MUELLER, 1987; VON SPERLING, 1994; NURNBERG, 1996; SALAS & MARTINO, 2001) em função da concentração de fósforo total é vista conforme Tabela 04.

Tabela 04 – Caracterização detalhada dos graus de trofia em corpos hídricos

	CLASSE DE TROFIA				
	Ultra-oligotrófico	Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Nutrientes	Concentração muito baixa, reciclagem lenta.	Baixa concentração, reciclagem lenta.	Média concentração, reciclagem lenta.	Alta concentração, reciclagem acelerada.	Concentração muito alta, reciclagem acelerada.
Illuminação	Alta transparéncia.	Alta transparéncia na zona eufótica.	Transparéncia limitada por turbidez abiógénica/biogénica.	Zona eufótica limitada por turbidez biogénica.	Zona eufótica limitada por alta turbidez biogénica.
Biomassa	Bastante baixa.	Reduzida.	Média.	Alta.	Bastante alta.
Algas verdes e/ou cianofíceas	Baixa.	Baixa.	Variável.	Alta.	Bastante alta.
Macrófitas	Baixa ou ausente.	Baixa.	Variável.	Alta ou Baixa.	Baixa .
Dinâmica da produção	Bastante Baixa.	Baixa.	Média.	Alta.	Alta a instável.
Dinâmica do oxigênio na camada superior	Normalmente saturado.	Normalmente saturado.	Variável em torno da supersaturação.	Frequentemente supersaturado.	Bastante instável, de supersaturado a ausente.
Dinâmica do oxigênio na camada inferior	Normalmente saturado.	Normalmente saturado.	Variável abaixo da saturação.	Abaixo da saturação ou completamente ausente.	Bastante instável, de supersaturado a ausente.
Bacia hidrográfica	Lagos profundos, em bacias pouco alteradas.	Lagos profundos, em bacias pouco alteradas.	Lagos de profundidade variável, bacias alteradas	Lagos rasos, em bacias muito alteradas	Lagos rasos, em bacias muito alteradas.
Prejuízo aos usos múltiplos	Baixo.	Baixo.	Variável.	Alto.	Bastante alto.

Fonte: Xavier (2005).

Tabela 05 – Graus de trofia em função da [PT] para diversos autores

Autor Nutriente	Oligotrófico	Oligomesotrófico	Mesotrófico	Mesoeutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
Vollenweider (1965)						
Fósforo Total	< 0,010	0,010 – 0,020	0,020 – 0,050	0,050 – 0,100	> 0,100	
TSI	< 37	37 – 47	47 – 61	61 - 71	> 71	
Vollenweider (1968)						
Fósforo Total	< 0,005	0,005 – 0,010		0,010 – 0,030	0,030 – 0,100	> 0,100
TSI	< 27	27 - 37		37 - 53	53 - 71	> 71
EPA (1983)						
Fósforo Total	< 0,010		0,010 – 0,020		> 0,020	
TSI	< 37		37 – 47		> 47	
Thomann & Mueller (1987)						
Fósforo Total	< 0,010		0,010 – 0,020		> 0,020	
TSI	< 37		37 – 47		> 47	
Von Sperling (1994)						
Fósforo Total	< 0,010 – 0,020		0,010 – 0,050		0,025 – 0,100	> 0,100
TSI	< 37 - 47		37 – 61		51 - 71	> 71
Nürnberg (1996)						
Fósforo Total	< 0,010		0,010 – 0,030		0,030 – 0,100	> 0,100
TSI	< 37		37 – 53		53 - 71	> 71
Salas & Martino (2001)						
Fósforo Total	< 0,0213		0,0213 - 0,0396		0,0396 - 0,1187	> 0,1187
TSI	48		48 - 57		57 - 73	> 73

Fonte: Adaptado dos autores acima relacionados.

### 2.3. Influência do fósforo nos processos eutróficos

A presença de fósforo em ambientes aquáticos ocorre sob a forma de fosfato, que é geralmente o principal nutriente limitante da produtividade de biomassa em águas continentais (ESTEVES, 1998). Ainda que a classificação do fosfato varie entre autores (CCME, 2004; MPCA, 2008), Esteves (1998) a expõe mais sumariamente, classificando as diferentes formas de fosfato em fosfato inorgânico dissolvido ou ortofosfato, fosfato orgânico dissolvido, fosfato particulado, fósforo total dissolvido e fósforo total, sendo este último o somatório do fósforo presente num corpo hídrico (MESNER & GEIGER, 2010). Relacionado à nutrição da biota aquática e sua principal fonte, sendo componente das moléculas de ácidos nucléicos e adenosina trifosfato, o ortofosfato, forma mais simples e significativa do fosfato, é o que tem maior relevância para as pesquisas limnológicas por ser preferencialmente absorvido pelos organismos fototróficos quando comparado as demais frações do fosfato (CORRELL, 1998; ESTEVES, 1998; CCME, 2004; MDA, 2004; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Pelo fato do fósforo, contudo, ser um elemento biologicamente ativo e bastante dinâmico, podendo ser hidrolisado em ortofosfato tão logo seja introduzido num corpo hídrico receptor, muitos pesquisadores fazem uso do fósforo sob a forma de fósforo total, visto englobar as demais formas citadas (SALAS & MARTINO, 1991; CORRELL, 1998; MOSS, 2010).

Conforme dito anteriormente e visto na Figura 05, a eutrofização cultural está correlacionada a diferentes fatores antrópicos, desde o aumento da população até o uso excessivo de produtos de limpeza ricos em compostos químicos que aceleram os processos eutróficos em lagos e reservatórios. Estes fatores corroboram para o acúmulo de nutrientes em tais corpos hídricos, dentre os quais destacam-se o nitrogênio e o fósforo, considerados elementos estimuladores da eutrofização por agirem como nutrientes limitantes da produção primária de ecossistemas (ESTEVES, 1998).

Nutriente limitante, neste caso, é aquele caracterizado por ser essencial ao crescimento de uma determinada população, de tal modo que, caso sua concentração seja diminuta, também diminuta será a taxa de crescimento desta população em determinado corpo hídrico, ao passo que, caso sua concentração aumente, a taxa de crescimento referida também sofrerá aumento. Para o caso em que a concentração deste nutriente se eleve ao ponto de torna-se excessiva no sistema, um outro nutriente passará a ser o limitante do crescimento da população analisada (VON SPERLING, 1996). Neste caso, o fósforo, considerado um dos principais nutrientes presentes nas águas continentais, juntamente com o nitrogênio e o carbono, é frequentemente o nutriente limitante do total de biomassa em lagos e reservatórios (RECKHOW, 1980; TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Thomann & Mueller (1987), contudo, propõem que, com relação ao nitrogênio, o nutriente limitante do crescimento de algas dependerá de suas concentrações nas águas continentais com base na seguinte relação:

- $[NT]/[PT] \gg 10$ : fósforo como nutriente limitante;
- $[NT]/[PT] \ll 10$ : nitrogênio como nutriente limitante.

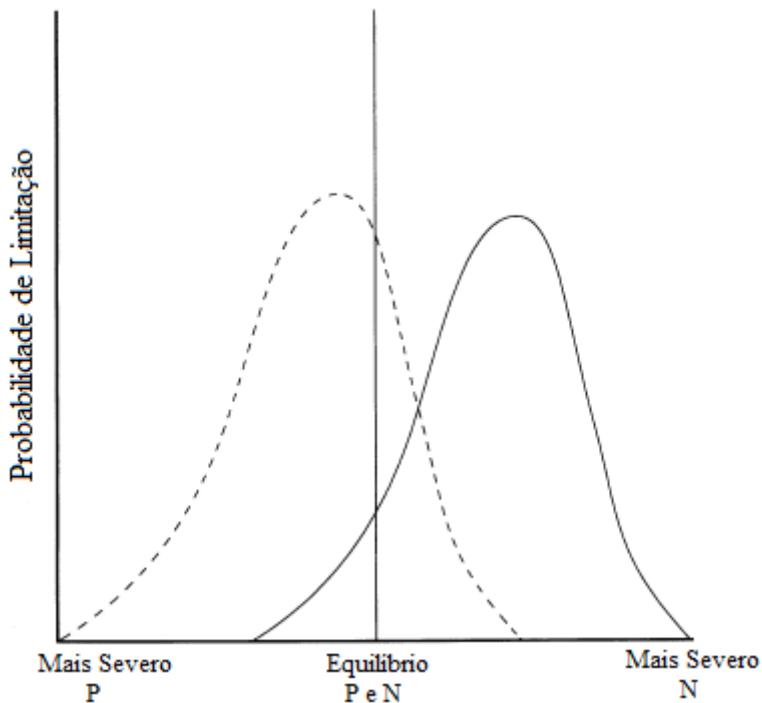
Vollenweider (1983 *apud* SALAS & MARTINO, 2001), da mesma forma, propõe que o fósforo será o nutriente limitante caso a relação entre a concentração de nitrogênio e ele seja superior a 9. A produtividade das algas pelo fósforo correlaciona-se com o fato de ele desempenhar a função intracelular de sínteses moleculares, além do transporte de íons, vindo a estar disponível para absorção dos organismos fototróficos na forma de ortofosfato em moléculas orgânicas, oriundas da decomposição de organismos. Nesse sentido, as concentrações de fósforo sempre são abaixo daquelas necessárias para uma acelerada e sustentável taxa de crescimento das algas, sendo portanto sua concentração nas águas continentais o limite para produção de biomassa total (TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Não há, contudo, unanimidade dos pesquisadores

quanto ao papel limitante do fósforo em tal processo. Ainda assim, o fósforo é o principal nutriente analisado no gerenciamento dos recursos hídricos visto ser ele, dentre os demais nutrientes presentes nos corpos hídricos, o mais eficazmente controlado fazendo uso das atuais tecnologias. Tal facilidade no controle do fósforo é unânime entre os pesquisadores. Isto é visto no fato do fósforo, diferentemente do nitrogênio e do carbono, só se encontrar à disposição dos organismos fototróficos via cargas externas e internas, ambas passíveis de controle (RECKHOW, 1980; MEEUWIG, 1998).

Meeuwig & Peters (1996), com dados de 37 lagos do mundo, verifica que a razão média entre as concentrações de nitrogênio e fósforo é 29, chegando a um valor máximo de 106,50 e mínimo de 3,40, o que teoricamente viria a indicar o fósforo como nutriente limitante em tais lagos. Straskraba *et al.* (1993) indica que o fósforo, de fato, é o nutriente limitante na maioria dos reservatórios. Salas & Martino (2001), analisando lagos e reservatórios tropicais, verifica que o fósforo é o nutriente limitante na maioria destes corpos hídricos. Paulino *et al.* (2003) indicam que a COGERH considera que há limitação por fósforo nos reservatórios quando a relação entre as concentrações de nitrogênio e ele superam 22. Ainda assim, tendo sido avaliados 435 resultados de qualidade de água dos reservatórios cearenses entre 2008 e 2011, verificou-se em 65% das relações [NT]/[PT] maior que 22, sendo, neste caso, o fósforo o nutriente limitante na maior parte dos reservatórios do semiárido cearense.

Lewis (2000) indica que lagos tropicais com estratificação sazonal apresentam uma limitação de nutrientes severa, devido a separação progressiva do suprimento de nutriente oriunda das demandas internas ao corpo hídrico, fazendo com que nutrientes livres sejam acumulados no hipolímnio, sendo, contudo, o crescimento de organismos fototróficos condicionado primeiramente pela camada do epilímnio. Lewis (2000) ainda indica que a limitação em corpos hídricos lênticos em regiões temperadas por fósforo ou nitrogênio é comum naqueles sem elevada poluição antrópica. A probabilidade de que a produção total de biomassa seja limitada por nitrogênio ou fósforo será condicionada pela localização geográfica do lago ou reservatório, conforme exposto na Figura 06.

Figura 06 – Probabilidade de ocorrência de limitação por fósforo ou nitrogênio em lagos tropicais (linha contínua) e temperados (linha tracejada).



Fonte: Autor (2016).

Moss (2010) explica ainda que, com base nos dados de vários lagos, a concentração de fósforo em corpos hídricos lênticos pode ser facilmente correlacionada seja com a média, seja com o valor máximo, da concentração de clorofila *a* em suas águas (Figura 07). Neste caso, tal correlação permitiria prever, em vista a concentrações de clorofila *a* desejadas, as devidas reduções das cargas afluentes de fósforo. Chapra (1997) elenca algumas das tentativas de modelagem do nível de clorofila *a* como função da concentração de fósforo total (Equações 2.10 e 2.11), dentre as quais de Dillon & Rigler (1974a) e Rast & Lee (1978), indicando que tais modelos muitas vezes são correlações de ambos os dados em escala logarítmica. Salas & Martino (2001), por sua vez, também expõem uma correlação entre tais nutrientes analisando vinte reservatórios tropicais, conforme Equação 2.12.

- Dillon & Rigler (1974a):

$$\log(Cl_a) = 1,583 \log(PT) - 1,134 \quad (2.10)$$

- Rast & Lee (1978):

$$\log(Cla) = 0,76 \log(PT) - 0,259 \quad (2.11)$$

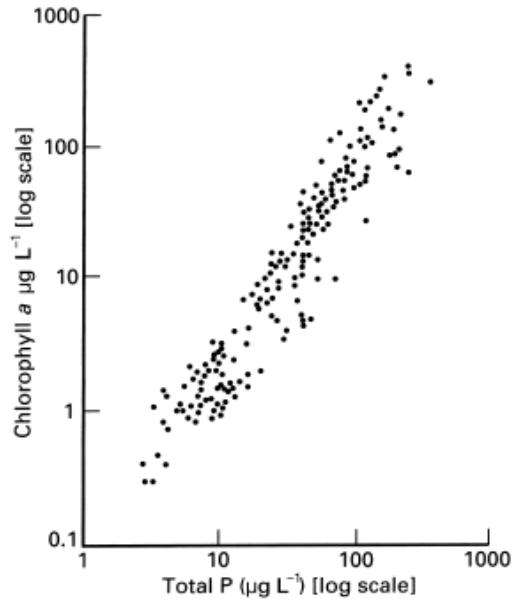
- Salas & Martino (2001):

$$Cla = 332PT^{1,21} \quad (2.12)$$

Todas as equações citadas evidenciam maiores valores de clorofila *a* para maiores valores de concentração de fósforo total. Os modelos citados, contudo, consideram que os lagos ou reservatórios são limitados por fósforo. Ainda que este seja o caso da maioria dos reservatórios (Straskraba *et al.* (1993)), particularmente os do semiárido brasileiro (DIAS, 2009; PAULINO *et al.*, 2013), Smith (1982) fornece um modelo que considera a possível limitação por nitrogênio no corpo hídrico (Equação 2.13):

$$\log(Cla) = 1,55(\log(PT) - \log \frac{6,404}{0,0204(\frac{[NT]}{[PT]}) + 0,334}) \quad (2.13)$$

Figura 07 – Correlação entre as concentrações de clorofila *a* e fósforo total em lagos durante o verão



Fonte: Moss (2010).

## 2.4. Modelagem de fósforo em lagos e reservatórios

Como se viu nas seções precedentes (Tabelas 02 e 04; Figura 07), a partir da concentração de fósforo total é possível indicar o estado trófico do corpo hídrico (VOLLENWEIDER, 1968), obter correlações com a concentração de clorofila *a* (DILLON & RIGLER, 1974a; JONES & BACHMANN, 1976; RAST & LEE, 1978) e com a demanda hipolimnética de oxigênio por unidade de área (CHAPRA & CANALE, 1991), dentre outras. Por causa destas correlações e de seu impacto nos processos eutróficos (STRASKRABA *et al.* 1993), vários modelos foram propostos com o fim de prever as concentrações de fósforo total em corpos hídricos lênticos e os fatores que as influenciam (VOLLENWEIDER, 1969; DILLON & RIGLER, 1974b; CHAPRA, 1975; JONES & BACHMANN, 1976; CANFIELD & BACHMANN, 1981; BRETT & BENJAMIN, 2008).

O modelo de Vollenweider (1969) é tido como fundamento dos modelos posteriores (CANFIELD & BACHMANN, 1981) e caracteriza-se como um balanço de massa aplicado a lagos de mistura completa que, a partir de dados morfométricos e hidráulicos, permite prever a concentração de fósforo total nos termos da Equação 2.14 (CHAPRA, 1997; BRETT & BENJAMIN, 2008). A solução no estado permanente é evidenciada na Equação 2.15.

$$V \frac{dPT}{dt} = W - Q_s PT - kVPT \quad (2.14)$$

$$PT = \frac{W}{Q_s + kV} \quad (2.15)$$

Sendo:

- V: volume do lago ( $\text{m}^3$ );
- PT: concentração de fósforo total ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ );
- t: tempo (ano);
- W: carga afluente de fósforo ao lago ( $\text{mg} \cdot \text{ano}^{-1}$ );
- $Q_s$ : vazão de saída do lago ( $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ );
- $k$ : coeficiente de decaimento do fósforo ( $\text{ano}^{-1}$ ).

Vollenweider (1976), mais tarde, desenvolve a Equação 2.14 e obtém o modelo de previsão da concentração de fósforo total em corpos hídricos lênticos (Equação 2.16) mais conhecido internacionalmente (VON SPERLING, 1996):

$$PT = \frac{L}{z\left(\frac{1}{TR} + k\right)} = \frac{W}{V\left(\frac{1}{TR} + k\right)} \quad (2.16)$$

Sendo:

- L: carga afluente de fósforo ao lago por unidade de área ( $\text{mg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ );
- z: profundidade média do lago (m).

Dillon & Rigler (1974b), por sua vez, reformularam o modelo de Vollenweider (1969), considerando que a concentração de fósforo total no corpo hídrico é função de seu coeficiente de retenção, não fazendo uso de  $k$ , nos seguintes termos:

$$PT = \frac{L(1-R)}{q_s} \quad (2.17)$$

Sendo:

- R: coeficiente de retenção de fósforo;
- $q_s$ : carga hidráulica de saída do lago,  $q_s = Q_s/A_s$  ( $\text{m.ano}^{-1}$ );
- $A_s$ : área superficial do lago ( $\text{m}^2$ ).

Chapra (1975) argumenta que, enquanto a Equação 2.14 considera a perda de fósforo como uniforme ao longo de todo volume do corpo hídrico, uma estratégia mais realista seria expressá-la como uma remoção de fósforo na região mais profunda do lago. Para tanto, ele assume que a área superficial do corpo hídrico corresponde a área em que se dá a sedimentação de fósforo, de tal modo que o balanço de massa passa a ser representado como (Equação 2.18):

$$V \frac{dPT}{dt} = W - Q_s PT - v_s A_s PT \quad (2.18)$$

Sendo:

- $v_s$ : velocidade de sedimentação aparente ( $\text{m.ano}^{-1}$ ).

Neste caso,  $k$  é expresso como função de  $v_s$  através da seguinte relação (CHAPRA, 1975, 1997):

$$v_s A_s PT = v_s A_s PT \times \frac{z}{z} = \frac{v_s}{z} (A_s z) PT = k VPT \quad (2.19)$$

Dessa forma,

$$k = \frac{v_s}{z} \quad (2.20)$$

Rearranjando os termos da Equação 2.18, obtém-se:

$$V \frac{dPT}{dt} = W - Q_s PT - v_s A_s PT \quad (2.21)$$

$$V \frac{dPT}{dt} = W - (Q_s + v_s A_s) PT \quad (2.22)$$

$$\frac{dPT}{dt} = \frac{W}{V} - \frac{(Q_s + v_s A_s) PT}{V} \quad (2.23)$$

Chamando de  $\lambda$  a taxa de recuperação do corpo hídrico (CHAPRA & CANALE, 1991), teremos que:

$$\lambda = \frac{Q_s + v_{sed} A_{sup}}{V} = \frac{Q_s}{V} + \frac{v_{sed}}{z} = \frac{Q_s}{V} + k \quad (2.24)$$

Dessa forma, a Equação 2.23 será dada por:

$$\frac{dPT}{dt} + \lambda PT = \frac{W}{V} \quad (2.25)$$

Cuja soluções transiente e permanente são dadas, respectivamente, por (CHAPRA, 1975, 1997):

$$PT(t) = PT_o e^{-\lambda t} + \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{-\lambda t}) = PT_o e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t} + \frac{W}{\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)V} (1 - e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t}) \quad (2.26)$$

$$PT = \frac{W}{\lambda V} = \frac{W}{Q_s + kV} \quad (2.27)$$

A dificuldade da utilização de tais equações reside na ausência de métodos conhecidos para medir-se o coeficiente de decaimento do fósforo de forma experimental e direta. A metodologia mais comum para seu cálculo, dispondo de informações hidrológicas e qualitativas de lagos e reservatórios, é a substituição dos demais parâmetros da equação de Vollenweider (1976) (Equação 2.16) desenvolvida predominantemente para lagos temperados (SALAS & MARTINO, 1991; VON SPERLING, 1996; SALAS & MARTINO, 2001). Vollenweider (1976) estima, através de uma relação empírica, que  $k$  correlaciona-se com TR para lagos temperados segundo a Equação 2.28. Salas & Martino (1991), com base nos dados de 27 reservatórios tropicais, estimam que a relação entre  $k$  e TR é o dobro daquela para lagos temperados de Vollenweider (1976) (Equação 2.29), visto que as maiores temperaturas na região tropical estimulam a taxa de produção de biomassa algal ( $k_f$ ) e aumentam os valores da velocidade de sedimentação nos lagos (CASTAGNINO, 1982).

$$k_{temperado} = \frac{1}{\sqrt{TR}} \quad (2.28)$$

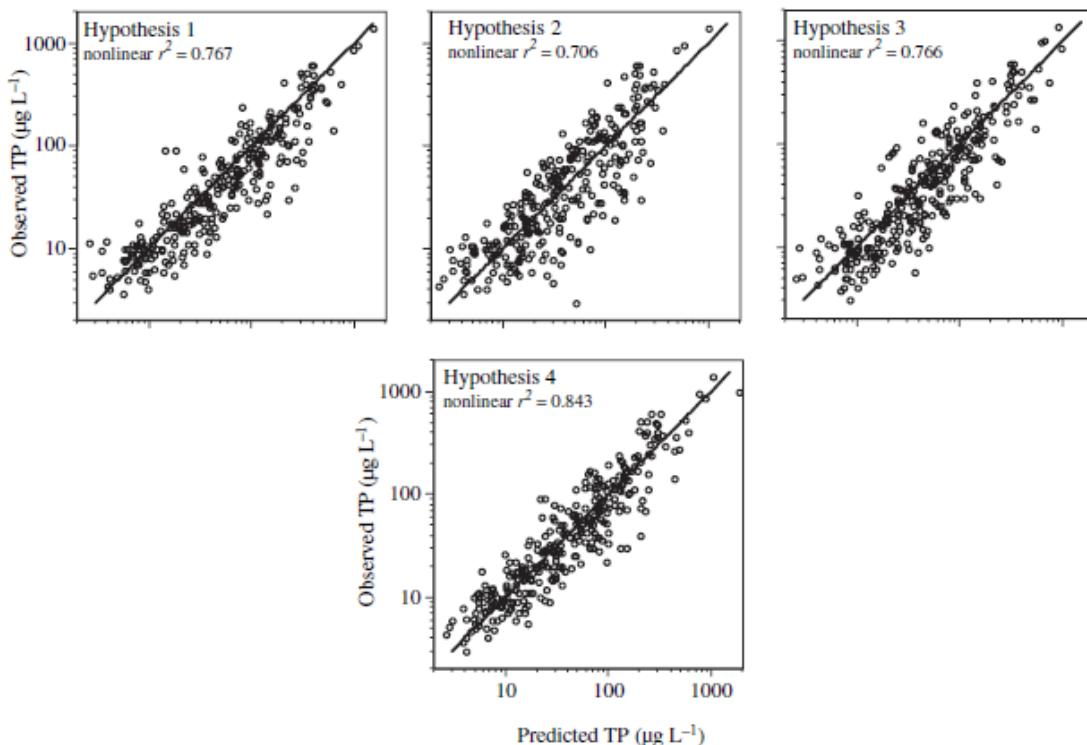
$$k_{tropical} = \frac{2}{\sqrt{TR}} \quad (2.29)$$

Brett & Benjamin (2008) testaram, para 305 lagos norte americanos e europeus, qual a melhor relação para  $k$  que, quando aplicado aos modelos de fósforo mais citados na literatura, mais aproximam os valores de concentração de fósforo total previstos daqueles observados. Neste caso, testaram as seguintes hipóteses quanto ao  $k$ :

- H1:  $k$  é constante em todos os lagos,  $k = c_1$ , sendo  $c_1$  uma constante qualquer;
- H2:  $k$  é inversamente proporcional a TR,  $k = c_2/TR$ , sendo  $c_2$  uma constante qualquer;
- H3:  $k$  é função da velocidade de sedimentação do fósforo e da profundidade média (Equação 2.19);
- H4:  $k$  é uma função inversa de TR,  $k = c_3 TR^x$ , sendo  $c_3$  e  $x$  constantes.

Após a estimativa dos parâmetros ótimos para cada hipótese (Excel® e SPSS®), plotaram-se os valores da concentração de fósforo total observados contra os valores ótimos previstos para cada hipótese elencada conforme Figura 08 (com a diagonal representando um perfeito ajuste entre ambos os valores):

Figura 08 – Comparação entre  $PT_{\text{observado}}$  e  $PT_{\text{previsto}}$  para as diferentes hipóteses de  $k$



Fonte: Adaptado de Brett & Benjamin (2008).

Desta forma, Brett & Benjamin (2008) argumentam que expressar  $k$  como uma função inversa de TR nos termos  $k = c_3 \text{TR}^x$  melhor ajustam os valores previstos de PT aos observados que as demais relações analisadas. Indicam ainda que o valor ótimo obtido para a constante  $x$  é  $-0,53 \pm 0,03$ , o que confirma as equações de Vollenweider (1976) e Salas & Martino (1991).

Chapra & Canale (1991) indicam que o modelo de Chapra (1975) tem sido questionado quando utilizado em lagos eutróficos por não considerar a elevação de fósforo no corpo hídrico devido as interações entre água-sedimento em tais sistemas. Nesse sentido, eles propõem um modelo para previsão da concentração de fósforo total, tendo em conta tais interações, que é formulado conforme Equações 2.30 e 2.31. A representação esquemática do modelo pode ser vista conforme Figura 09.

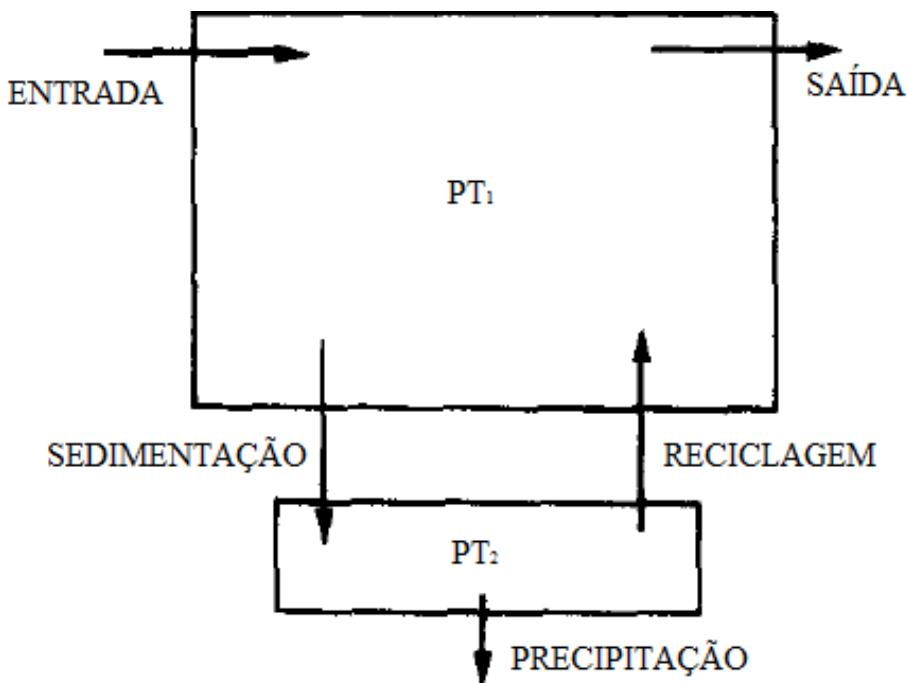
$$V_1 \frac{dPT_1}{dt} = W - QPT_1 - v_s A_2 PT_1 + v_r A_2 PT_2 \quad (2.30)$$

$$V_2 \frac{dPT_2}{dt} = v_s A_2 PT_1 - v_r A_2 PT_2 - v_b A_2 PT_2 \quad (2.31)$$

Sendo:

- $A_2$ : área superficial da zona de deposição ( $m^2$ );
- $v_r$ : coeficiente de transferência de massa de reciclagem de fósforo do sedimento para a água ( $m \cdot ano^{-1}$ );
- $v_b$ : coeficiente de transferência de massa de precipitação de fósforo das camadas superficiais de sedimento para as mais profundas ( $m \cdot ano^{-1}$ );

Figura 09 – Representação esquemática do modelo de Chapra & Canale (1991) que considera a iteração entre o lago e seus sedimentos.



Fonte: Chapra & Canale (1991).

Canale & Seo (1996a), contudo, ao verificar entre diferentes modelos de fósforo, dentre eles o de Chapra (1977), que é um desenvolvimento do modelo de Chapra (1975) expresso pela Equação 2.18, sendo, da mesma forma, para lagos de mistura completa e tendo apenas  $k$  como termo de perda de fósforo, e de Chapra & Canale (1991), qual

melhor se ajustava aos dados observados no lago Shagawa/Minnesota, verifica que, para os casos onde a variabilidade dos dados analisados venha a exceder em aproximadamente 50% a média geral, modelos mais simples devem ser priorizados ante aos mais complexos. Não somente isto, indicam que para os casos onde as incertezas dos parâmetros utilizados nos modelos aumentam, modelos menos complexos vem a gerar menores erros quando comparados aos mais complexos e, por isso, devem ser preferidos frente a estes. Neste caso, sendo o modelo de Chapra (1975) um dos mais simples, contendo apenas um coeficiente de perda de fósforo ( $k$ ) e somente ele sendo necessário à calibração (CANALE & SEO, 1996b), ele deve ser preferido aos demais modelos mais complexos de fósforo expostos pela literatura nos casos acima referidos. A verificação se é preferível utilizar o modelo de Chapra (1975) (Equação 2.26) na análise dos reservatórios em regiões semiáridas (segundo os critérios citados de Canale & Seo (1996b)) e, se sim, seguir-se a sua calibração e validação são alguns dos objetivos específicos desta pesquisa, conforme apresentado no Capítulo 1.

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO**

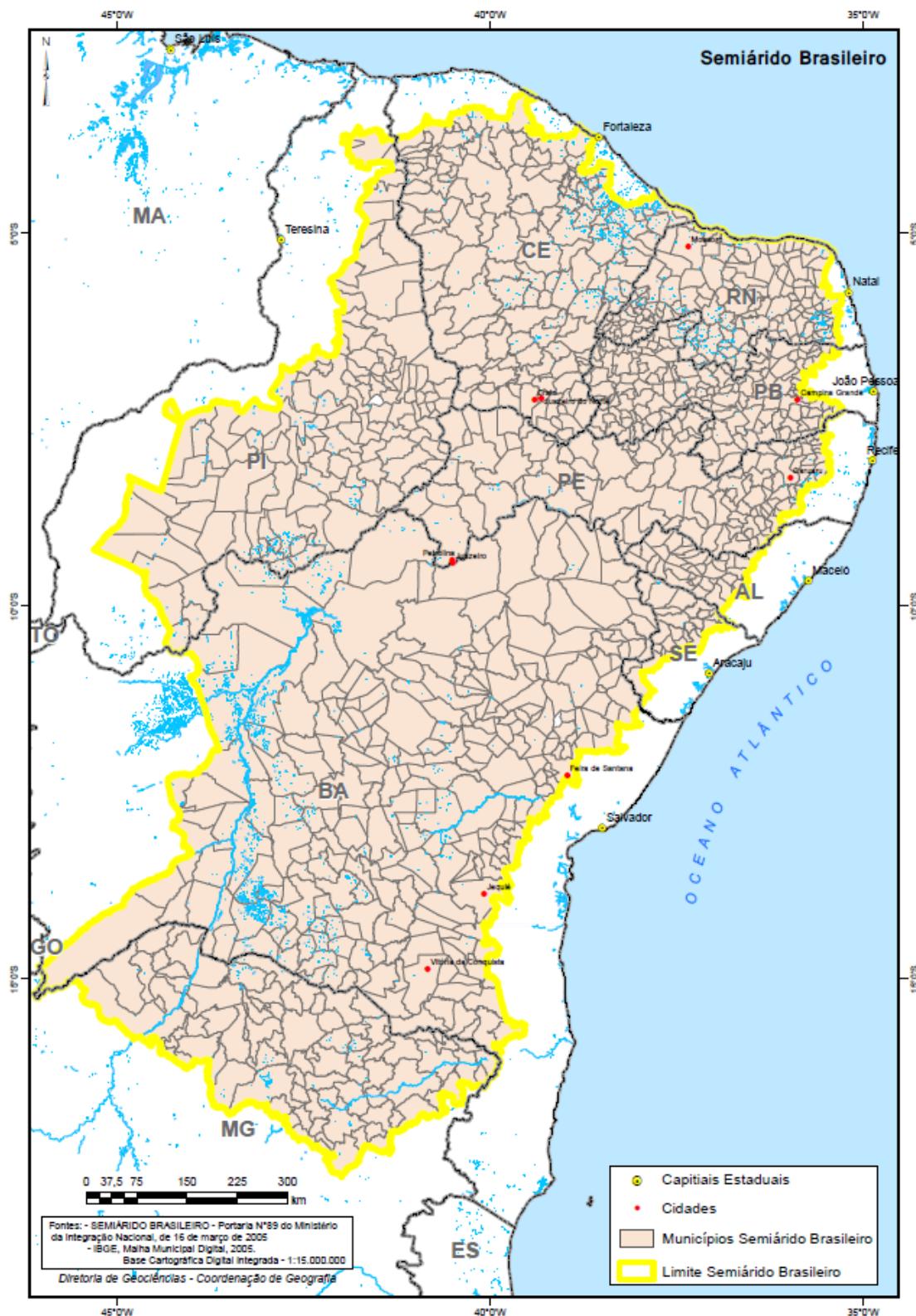
O semiárido brasileiro possui 89,5% de sua extensão na região nordeste do país (Figuras 10 e 11), com área total de 982.563,3 km<sup>2</sup>, e é caracterizado sobretudo pelo déficit hídrico natural, ainda que no período chuvoso (dois meses, em geral) se tenha excedente hídrico, e pela falta de equilíbrio entre as ofertas e demandas de recursos hídricos. Caracteriza-se como uma região com elevada densidade demográfica, elevados índices de pobreza e altos riscos de seca, superando 60% (MMA, 2005; CEARÁ, 2009; ANA, 2012; IBGE, 2016a; IBGE, 2016b). O Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste (BRASIL, 1987) aponta uma amplitude térmica na região entre 1°C e 40,8 °C, com temperaturas médias oscilando entre 19,1 °C e 24,3 °C, ainda que em trabalhos mais recentes se encontrem valores de temperatura média nos reservatórios mais elevados que o limite médio máximo citado (COSTA, 2004; ANTONELLO, 2006; HIJO, 2009; COGERH, 2011b; NOVO, 2011; VIDAL, 2011; ARAÚJO, 2016). Isto condiz com os dados de ANA (2012) que apontam um aumento aproximado de 0,8 °C por década no nordeste brasileiro.

Figura 10 – Região nordeste brasileira



Fonte: IBGE (2016c).

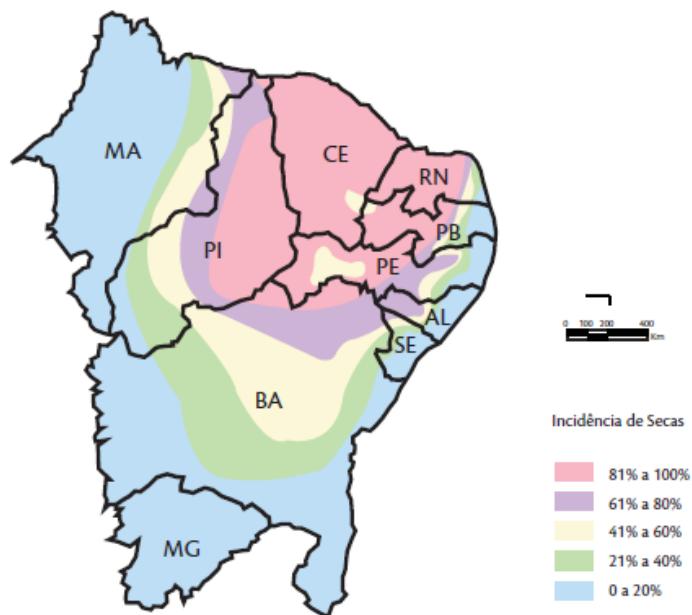
Figura 11 – Semiárido brasileiro



Fonte: IBGE (2016d).

O alto risco de seca na região tornou-se notório e gera diversos impactos, dentre eles: eliminação da cobertura vegetal; aumento dos processos erosivos no solo; deterioração da qualidade e quantidade das águas nos corpos hídricos da região, com influência principal nos escoamentos superficiais. A porcentagem de secas no nordeste brasileiro é exposta na Figura 12.

Figura 12 – Principais áreas de incidência de secas nos estados do nordeste



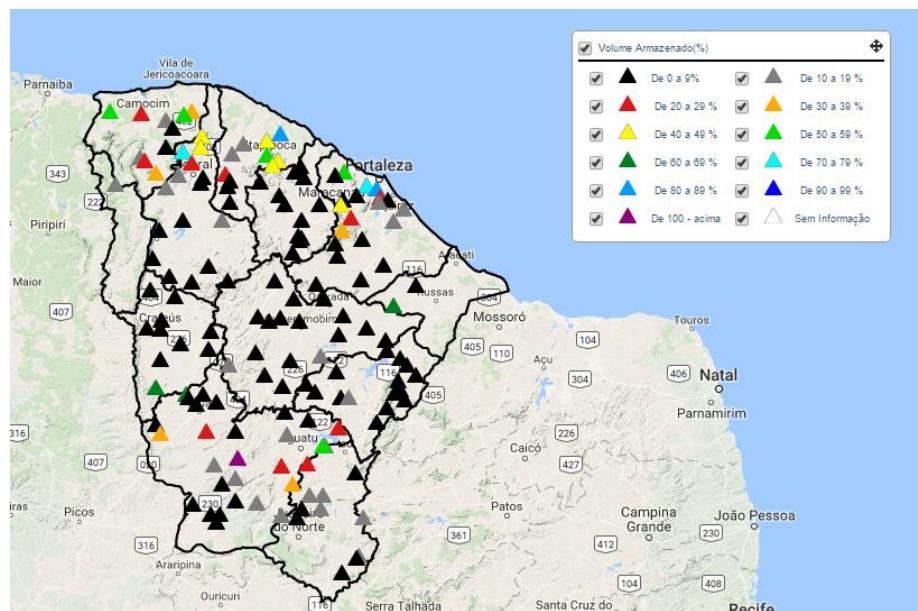
Fonte: ANA (2012).

No que se refere às precipitações na região, verifica-se irregularidade temporal e espacial na distribuição das chuvas, com médias pluviométricas anuais inferiores a 800 mm, ainda que esta irregularidade não seja uniforme ao longo de todo nordeste brasileiro, com um maior número de dias de chuvas no semiárido que no litoral. Em paralelo aos baixos índices pluviométricos, praticamente em todo território a lâmina de água evaporada em muito supera a precipitada. Neste caso, a evaporação média anual é da ordem de 1796 mm, mais que o dobro da média anual precipitada na região. A elevação da concentração de nutrientes em reservatórios decorrente das altas taxas de evaporação, correlacionadas às elevadas temperaturas, é um dos principais fatores que influenciam na qualidade das águas continentais na região (LEWIS, 2000; SILVA *et al.*, 2011; ANA, 2012).

Além da referida irregularidade pluviométrica e altas taxas de evaporação, o tipo de solo no nordeste brasileiro tem importante impacto no regime de escoamento de águas dos rios. Cerca de 70% da região semiárida encontra-se sobre embasamento cristalino, onde majoritariamente predominam solos rasos com poucas trocas de água entre os rios e os solos adjacentes. Tais fatores corroboram para que o regime hidrológico da maioria dos rios nordestinos seja intermitente, com escoamento médio em 3 ou 4 meses do ano, localizados desde a região setentrional da Bahia até o Ceará. A construção de açudes no nordeste brasileiro, nesse sentido, visou a regularização dos regimes de vazões dos diversos rios intermitentes da região, sendo eles destinados para usos múltiplos que vão desde o abastecimento público à aquicultura ou lazer (CIRILO, 2008; ANA, 2012).

Ainda que tal prática tenha sido recorrente ao longo dos anos, os reservatórios não impedem os eventuais impactos da escassez de água, por prolongamento de períodos de seca. O Ceará, por exemplo, apresenta atualmente 60% do seu território em condição de seca extrema (Figura 13), considerada a pior em mais de um século (FUNCENE, 2016a; FUNCENE, 2016b), com volume médio armazenado dos 153 reservatórios cearenses monitorados pela COGERH igual a 8,80% do volume total, com 129 reservatórios com volume médio armazenado inferior a 30% de sua capacidade máxima.

Figura 13 – Volumes armazenados nos reservatórios cearenses em 28 de setembro de 2016



Fonte: CEARÁ, 2016b.

A influência na qualidade de água dos reservatórios nordestinos por parte do regime hidrológico dos rios que os originam é vista de modo particular na renovação da massa de água em tais corpos hídricos. Neste caso, a falta de afluência aos reservatórios durante o período seco aumenta as concentrações de nutrientes neles existentes. A afluência de água no período chuvoso, por sua vez, dilui os nutrientes no volume armazenado e tende a melhorar sua qualidade, sobretudo nos períodos de vertimento em que se dá início ao processo de renovação da água nos reservatórios. O tempo de retenção hidráulica, definido na seção 2.1, é um indicador da renovação da massa de água, visto representar o tempo médio de retenção da água no sistema analisado. Desta forma, maiores valores de TR indicam maiores tempos para renovação das águas dos reservatórios, favorecendo maiores impactos em seus recursos hídricos. Os valores de TR variam dependendo do regime hidrológico do rio que alimenta os reservatórios: para aqueles alimentados por rios considerados permanentes, o TR encontra-se aproximadamente entre 20 e 40 dias; para os alimentados por rios intermitentes, TR oscila entre valores menores que 100 dias até superiores a 1000 dias (ANA, 2012).

Conforme visto na Figura 10, o Nordeste é composto pelos seguintes estados: Maranhão, Piauí, Alagoas, Sergipe, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Bahia. Uma breve descrição dos cinco últimos estados é exposta a seguir (ANA, 2006; ANA, 2010; ANA, 2012):

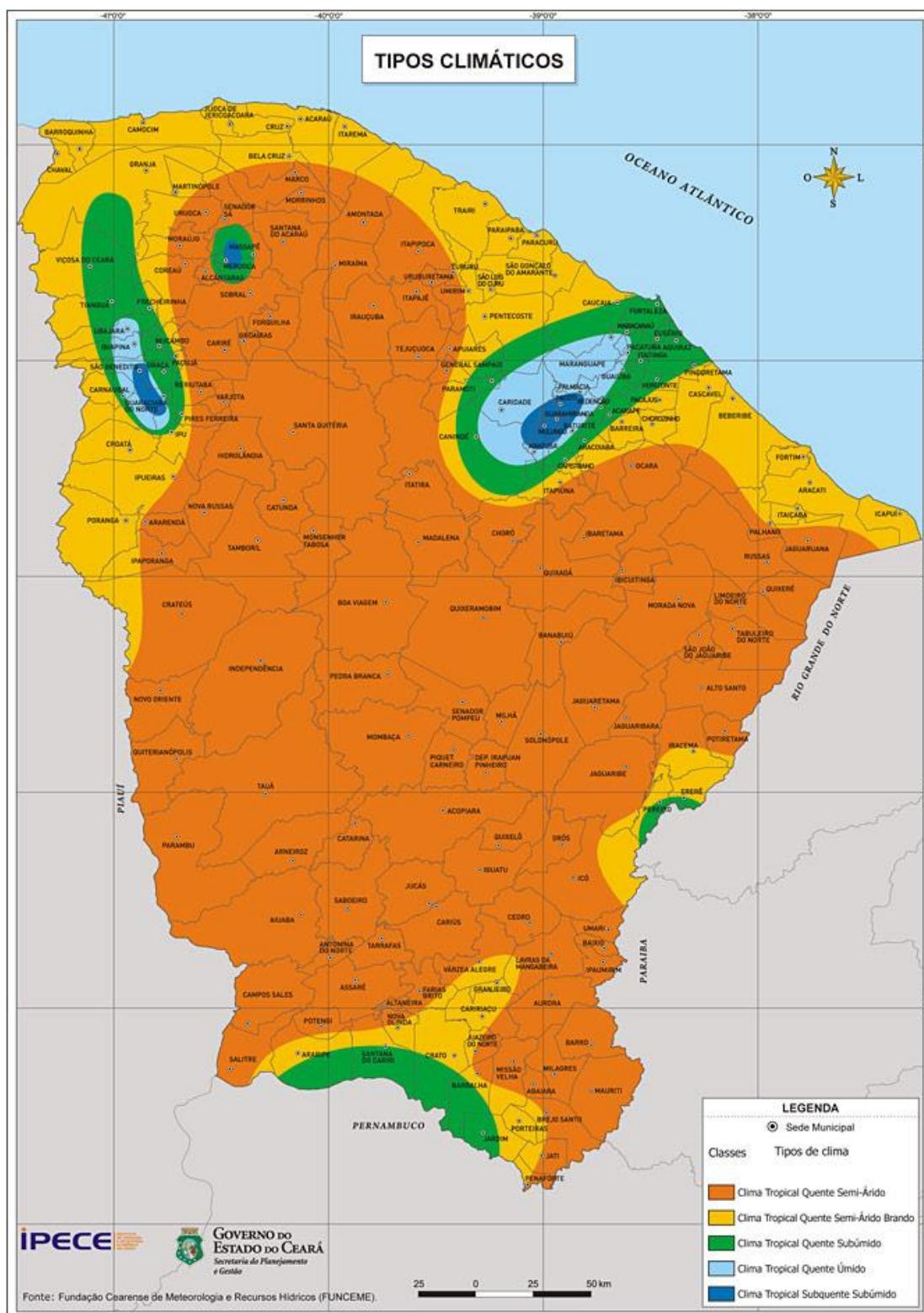
- Ceará: É o estado com o maior número de reservatórios (118), possuindo cada um capacidade volumétrica igual ou maior que 10 hm<sup>3</sup>. Apresenta a maior volume total de armazenamento do Nordeste (17500 hm<sup>3</sup>) e vazão regularizada (100 m<sup>3</sup>/s). Possui índices pluviométricos, para o ano de 2015, entre 201,80 e 1700 mm, estando a maioria dos municípios (69) com índices entre 400,01 e 600 mm (IPECE, 2016a). Os reservatórios do estado dividem-se em doze bacias hidrográficas, conforme exposto na Figura 14. A distribuição dos reservatórios no estado e seu clima podem ser vistos na Figura 13 e 15, respectivamente.

Figura 14 – Bacias hidrográficas no estado do Ceará



Fonte: IPECE (2016b).

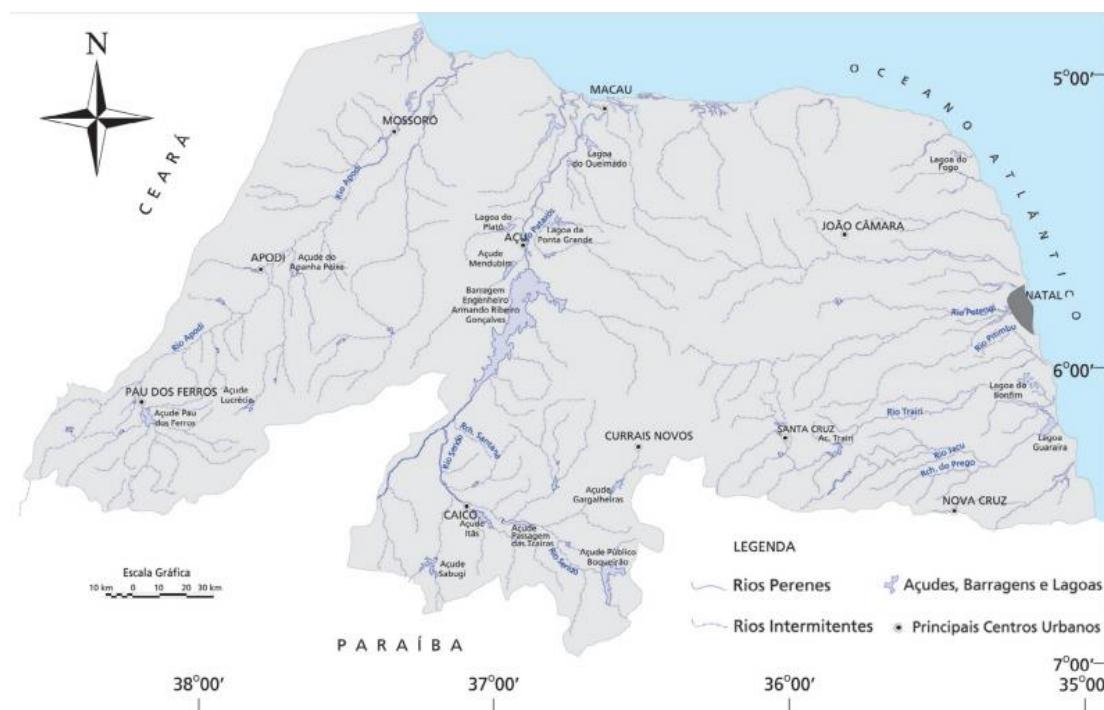
Figura 15 – Tipos climáticos no Ceará



Fonte: IPECE (2016c).

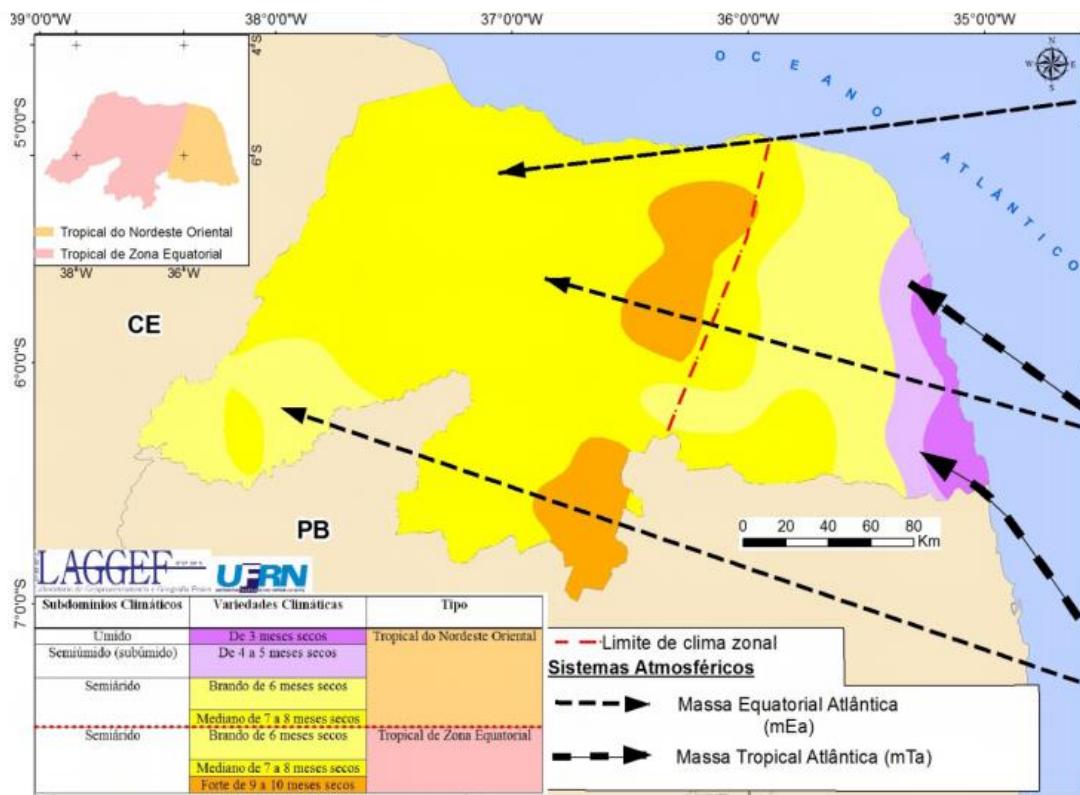
- Rio Grande do Norte: Encontra-se inserido na região de menor disponibilidade hídrica do Brasil (Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental), com precipitações pluviométricas máximas da ordem de 1106,8 mm ao ano (DINIZ & PEREIRA, 2015) e possui 51% de seus municípios abastecidos unicamente por corpos hídricos superficiais. Os reservatórios e rios do estado podem ser vistos na Figura 16. Dentre estes, o maior é o Arnaldo Ribeiro Gonçalves com capacidade volumétrica de 2400 hm<sup>3</sup> e vazão regularizada com 100% de garantia de 15 m<sup>3</sup>/s. Os tipos climáticos do estado são vistos na Figura 17.

Figura 16 – Mapa hidrológico do estado do Rio Grande do Norte



Fonte: Vital (2016).

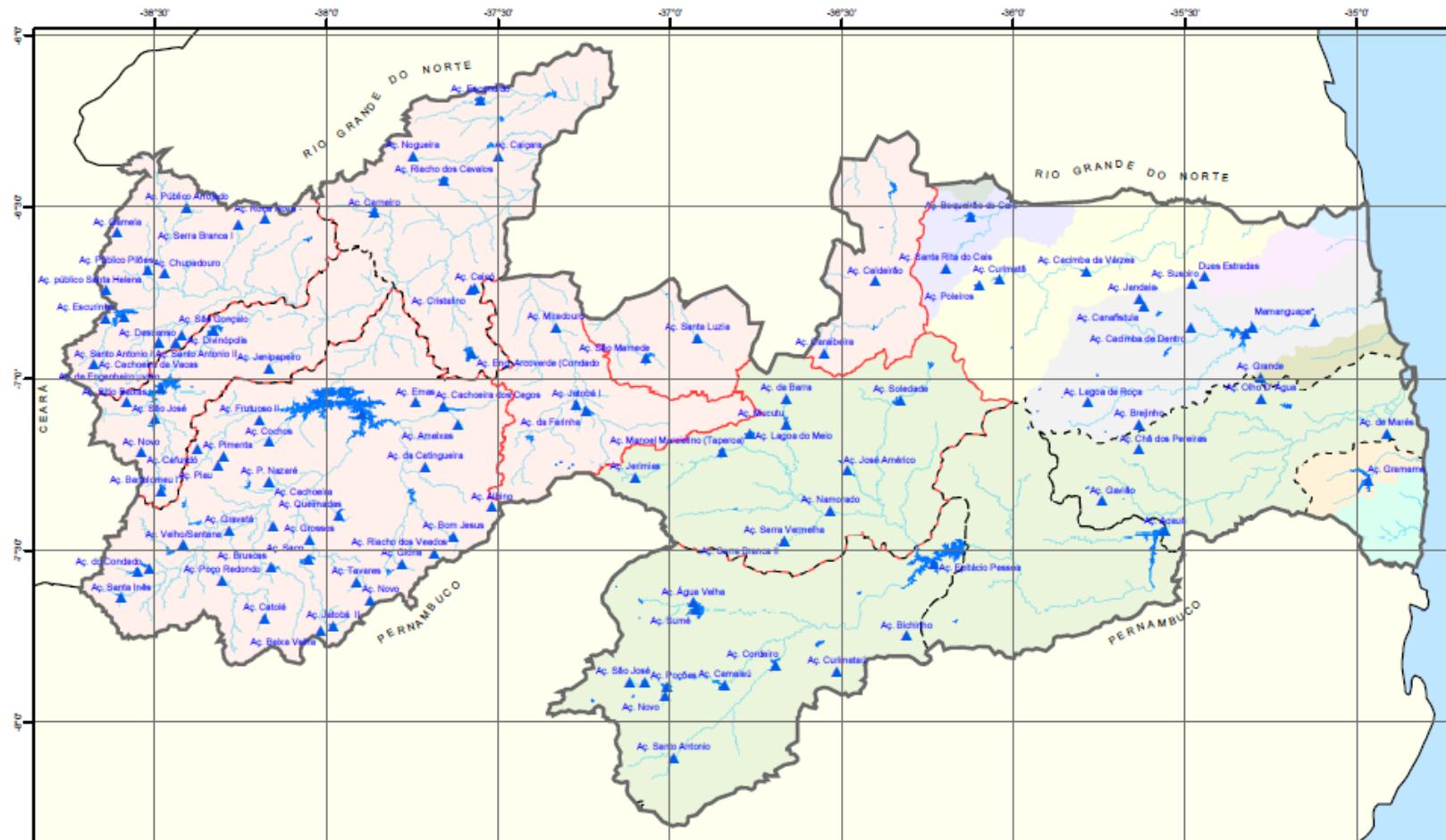
Figura 17 – Tipos climáticos do estado do Rio Grande do Norte



Fonte: Diniz & Pereira (2015).

- Paraíba: O estado possui 223 municípios, sendo 76% deles de abastecimento oriundo unicamente de corpos hídricos superficiais, índices pluviométricos médios variando entre 200 e 2000 mm (AESÁ, 2006) e quase toda sua área localizada no semiárido nordestino (IBGE, 2016d). Os reservatórios mais importantes da região estão localizados nas bacias dos rios Piranhas-Açu e Paraíba. Dentre eles, o reservatório Coremas-Mãe d'Água, de capacidade volumétrica igual a 1400 hm<sup>3</sup>, pereniza o rio Piranhas, enquanto que o reservatório Epitácio Pessoa abastece o município de Campina Grande. A distribuição dos reservatórios na região é exposta na Figura 18.

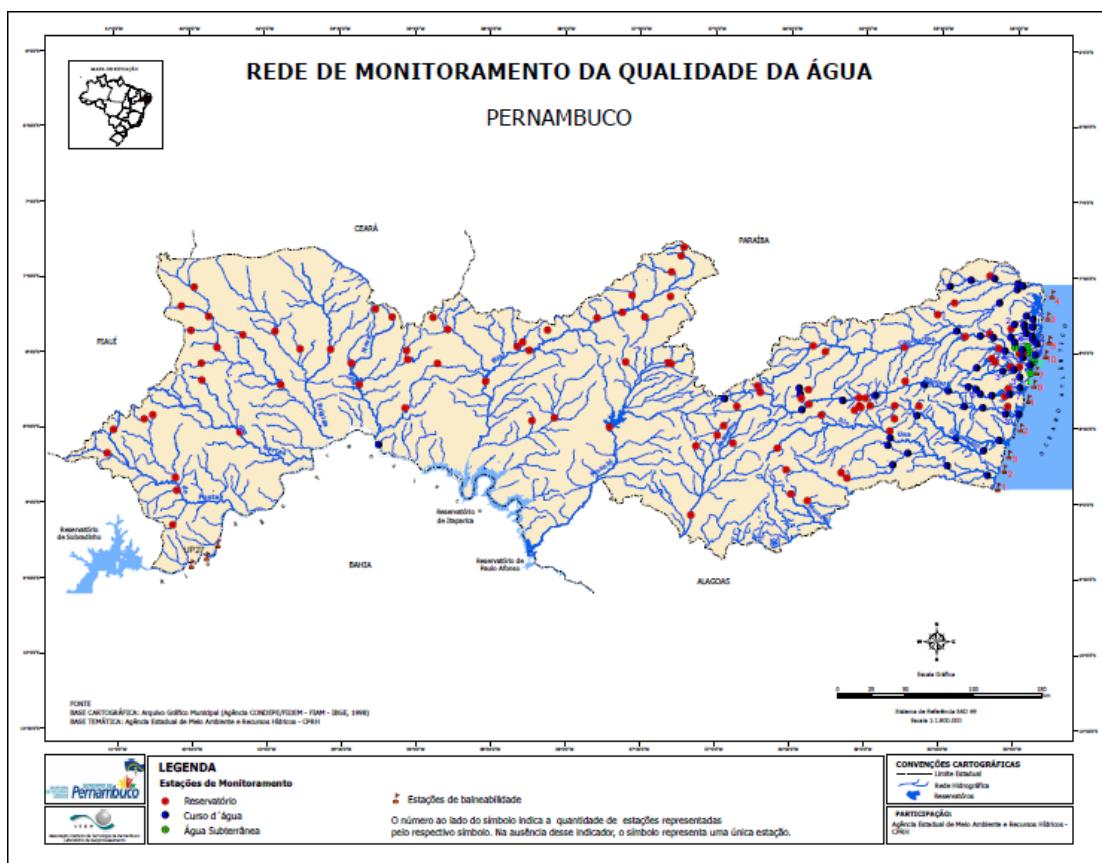
Figura 18 – Distribuição dos reservatórios na Paraíba



Fonte: AESA (2009).

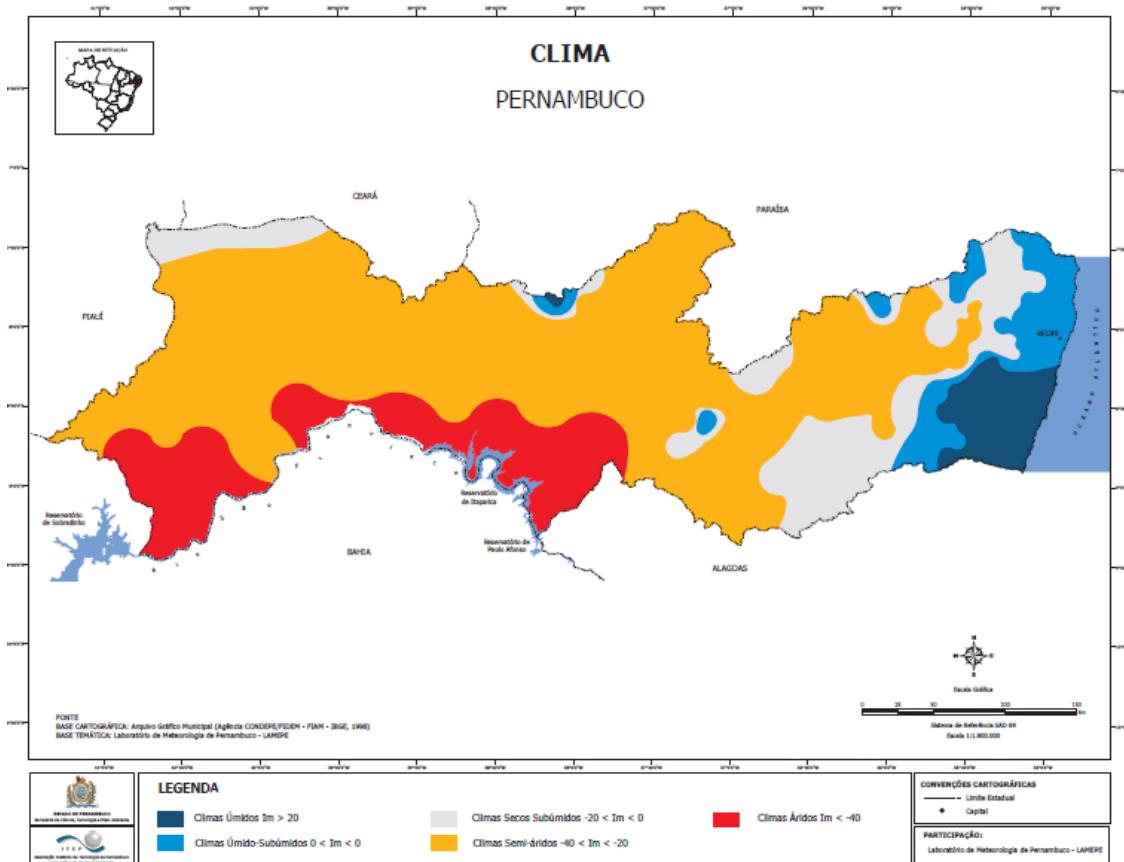
- Pernambuco: Possui pequena disponibilidade hídrica superficial, o que é justificado em parte por 80% de seu território estar sobre embasamento cristalino, com sua parte mais oriental inserida na Região Hidrográfica do São Francisco, sendo o rio São Francisco a principal fonte de abastecimento nos municípios localizados na região semiárida. Os índices pluviométricos mais frequentes variam entre 400 e 700 mm (PERNAMBUCO, 2016a). A distribuição dos reservatórios e os tipos climáticos na região podem ser vistos conforme Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Distribuição dos reservatórios em Pernambuco



Fonte: Pernambuco (2016b).

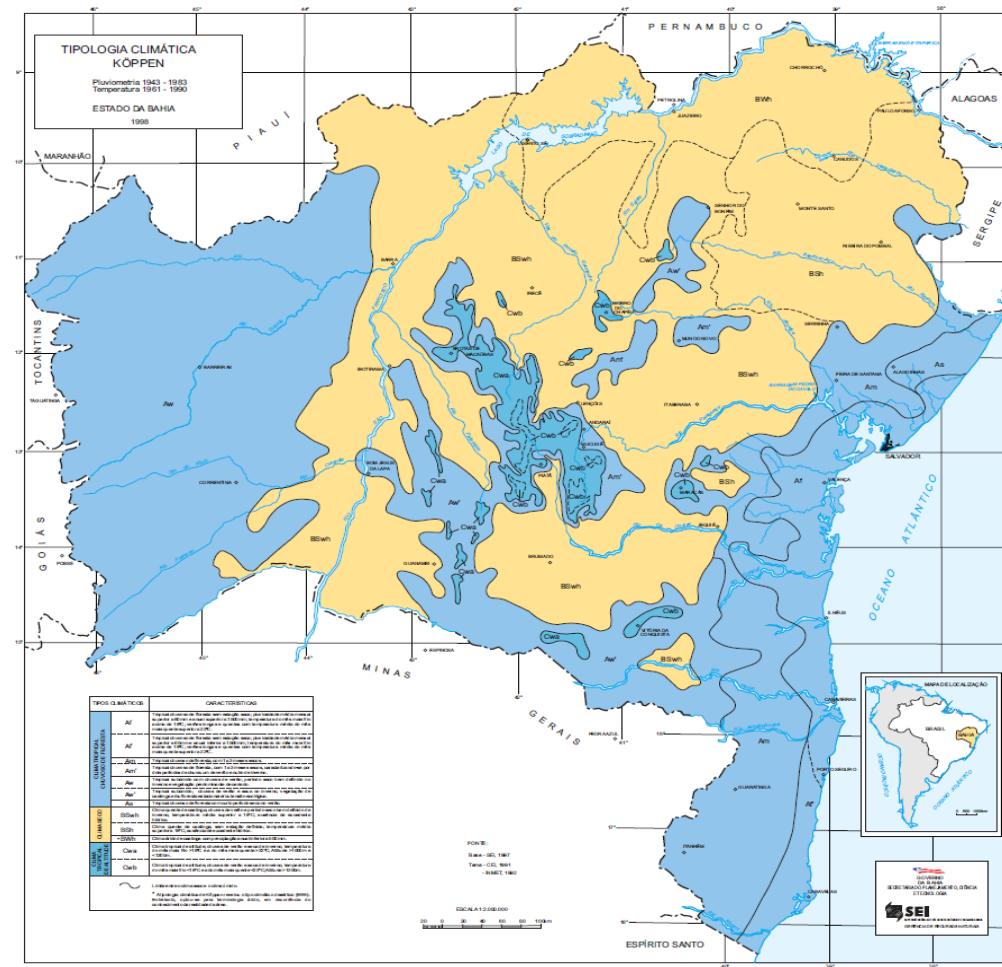
Figura 20 – Tipos climáticos de Pernambuco



Fonte: Pernambuco (2016c).

- Bahia: Seu território insere-se na Região Hidrográfica do São Francisco e do Atlântico Norte, com 70% de sua área com clima árido e semiárido, possuindo índices pluviométricos entre 438 e 2033 mm (Dourado *et al.*, 2013). Tais regiões não possuem elevadas disponibilidades hídricas e seus rios são majoritariamente intermitentes. Seus reservatórios possuem altas capacidades volumétricas, dentre eles o Sobradinho, que permitem ser utilizados para múltiplos fins. Os tipos climáticos no estado são expostos na Figura 21.

Figura 21 – Tipos climáticos da Bahia



Fonte: SEI (2016).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Coleta e processamento dos dados dos reservatórios nordestinos

A coleta dos dados dos reservatórios do semiárido brasileiro constitui a etapa inicial do processo de modelagem, sendo eles necessários à obtenção do TR e do  $k$  durante a calibração do modelo. A validação do modelo à região em estudo, por sua vez, constitui a etapa posterior à calibração. Os dados a serem obtidos, expostos nas Equações 2.1 e 2.26, são:

- Concentrações de fósforo total (PT) no reservatório em diferentes períodos;
- Carga afluente de fósforo total ao reservatório (W);
- Volume médio do reservatório no período modelado (V);
- Vazão de entrada e saída no mesmo período ( $Q_a$  e  $Q_s$ , respectivamente);

Dado o tempo de residência hidráulica dos reservatórios analisados ser obtido conforme Equação 2.1, estando o período de modelagem ( $t$ ) subordinado a tal valor. Procurou-se analisar os reservatórios do nordeste brasileiro cujos dados eram expostos na literatura ou fornecidos por órgãos gestores dos recursos hídricos ou do meio ambiente dos respectivos estados, totalizando 33 reservatórios estudados. Os reservatórios escolhidos e suas principais características, além de sua localização geográfica no Nordeste brasileiro podem ser vistos na Tabela 06 e na Figura 22 respectivamente.

Tabela 06 – Características gerais dos reservatórios analisados

<b>Reservatório</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ano de Inauguração</b>	<b>Capacidade Inicial (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Ceará</b>			
Forquilha	F	1921	50,13
Orós	O	1961	1940,00
Castanhão	C	1995	6700,00
Gavião	G	1973	33,30
Banabuiú	B	1966	1601,00
Acarape do Meio	AM	1924	29,60
Santo Anastácio	SN	1918	0,51
Arrebita	A	1992	18,53
General Sampaio	GS	1935	322,20
Pacajus	PJ	1993	232,00
Quincoé	QC	1990	4,30
Itaúna	I	2001	77,50
Sítios Novos	SN	1999	126,00
Curral Velho	CV	2007	12,17
Colina	CL	1988	4,29
Rosário	RO	1999	47,22
Rivaldo de Carvalho	RC	1966	20,10
Flor do Campo	FC	1999	105,00
Edson Queiroz	EQ	1987	254,00
Caxitoré	CX	1962	202,00
Canafístula	CF	1992	13,11
Olho d'Água	OD	1998	21,00
<b>Rio Grande do Norte</b>			
Gargalheiras	GG	1959	40,00
Cruzeta	CZ	1929	23,55
Dourado	DR	1982	10,32
Passagem das Traíras	PT	1994	49,70
Boqueirão das Parelhas	BP	1988	84,79
Itans	IT	1935	81,75
Sabugi	SB	1965	60,34
<b>Paraíba</b>			
Camalaú	CM	-	48,11
Epitácio Pessoa	EP	1957	411,69
<b>Bahia</b>			
Sobradinho	SO	1979	34100,00
<b>Pernambuco</b>			
Tapacurá	TP	1973	94,20

Fonte: Autor (2016).

Figura 22 – Localização espacial dos reservatórios analisados no nordeste brasileiro



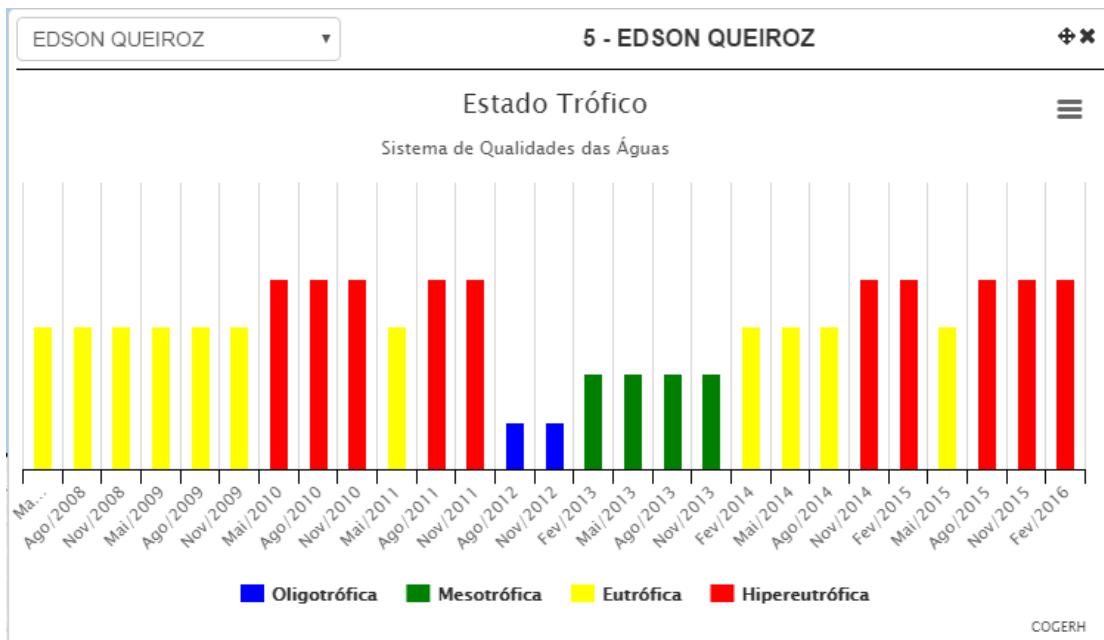
Fonte: Autor (2016).

Cabe ressaltar, contudo, que apenas para o reservatório Santo Anastácio os dados de TR e  $k$  foram obtidos diretamente da literatura. Neste caso, Araújo (2016), fazendo uso das Equações 2.1 e 2.26, obteve os dados acima listados e calculou os valores de TR e  $k$  para o referido açude.

#### **4.1.1. Concentração de Fósforo Total**

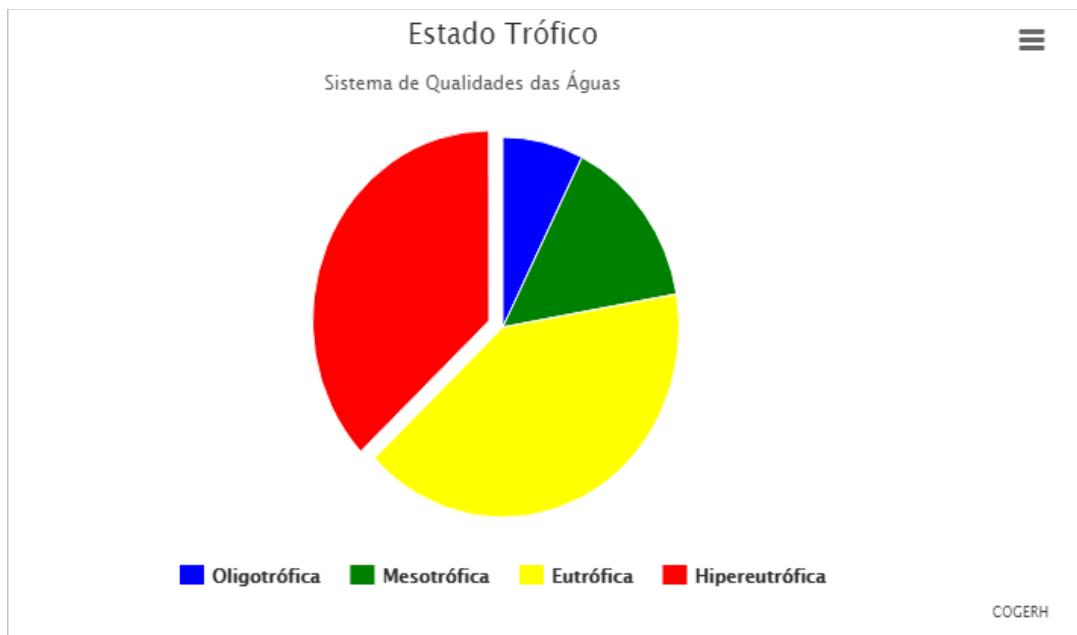
As concentrações de fósforo total nos reservatórios cearenses, com exceção do Santo Anastácio, foram obtidas através do Portal Hidrológico do Ceará, em sua opção “Sistema de Qualidades das Águas: Estado Trófico” (CEARÁ, 2016a). Neste caso, para cada reservatório analisado, o Portal fornece os valores de suas principais variáveis limnológicas ao longo do tempo, oriundas de amostras predominantemente coletadas a cem metros da barragem, em trinta centímetros de profundidade e com frequência trimestral, classificando-o quanto ao seu estado trófico com base em tais valores (conforme exemplificado para o reservatório Edson Queiroz nas Figuras 23, 24 e 25 abaixo). Os dados de concentração de fósforo total disponíveis vão de 2008 a 2016, com algumas exceções com dados até 2015. Considerou-se, para efeito de cálculo, que as concentrações de fósforo total disponibilizadas pelo Portal Hidrológico do Ceará eram representativas dos reservatórios analisados.

Figura 23 – Variação do estado trófico do reservatório Edson Queiroz entre 2008 e 2016.



Fonte: CEARÁ (2016a).

Figura 24 – Porcentagem de ocorrência das classes de estado trófico no reservatório Edson Queiroz durante o período de estudo analisado.



Fonte: CEARÁ (2016a).

Figura 25 – Variáveis limnológicas e estado trófico do reservatório Edson Queiroz entre 2008 e 2016.

Ponto	Data	[Nt]	[Pt]	cl@	Cont.Cianob.	Transp.	Classe	Info.
EDQ-01	13/05/2008		< 1,000	30,30			Eutrófica	▲
EDQ-01	20/08/2008		0,041	13,40	244.194		Eutrófica	▲
EDQ-01	10/11/2008				510.823		Eutrófica	▲ Número alto de cianobactérias
EDQ-01	23/06/2009				328.176		Eutrófica	▲ Número alto de cianobactérias
EDQ-01	07/08/2009				448.188		Eutrófica	▲ Número alto de cianobactérias
EDQ-01	13/11/2009				675.508		Eutrófica	▲ Número alto de cianobactérias
EDQ-01	06/05/2010	0,834	0,090	71,60	1.495.021	0,45	Hipereutrófica	▲ Número muito alto de cianobactérias
EDQ-01	05/08/2010				691.727		Hipereutrófica	▲ Número muito alto de cianobactérias
EDQ-01	30/11/2010	0,871	0,137	79,30	713.070	0,44	Hipereutrófica	▲ Número muito alto de cianobactérias
EDQ-01	03/05/2011				344.969		Eutrófica	▲ Mantém as condições ambientais anteriores
EDQ-01	29/08/2011				597.981		Hipereutrófica	▲ Número muito alto de cianobactérias
EDQ-01	13/12/2011		0,010	51,60	517.238	0,60	Hipereutrófica	▲ Número muito alto de cianobactérias
EDQ-01	21/09/2012		< 0,010	83,30	194.779	0,60	Oligotrófica	▲
EDQ-01	28/11/2012	< 0,100	0,034	12,70	28.029	1,25	Oligotrófica	▲
EDQ-01	20/02/2013		0,034	14,95	46.468		Mesotrófica	▲
EDQ-01	23/05/2013	2,184	0,025	11,20	15.940	1,40	Mesotrófica	▲
EDQ-01	19/09/2013	0,766	0,051		178.066	1,30	Mesotrófica	▲
EDQ-01	13/11/2013	0,891	0,070		145.848	1,30	Mesotrófica	▲
EDQ-01	19/02/2014	2,000	0,071	53,74	229.645	0,70	Eutrófica	▲
EDQ-01	29/05/2014	1,990	0,132	38,34	154.479		Eutrófica	▲
EDQ-01	03/09/2014	5,240	0,058	79,49	137.163	0,50	Eutrófica	▲
EDQ-01	04/12/2014	2,080	0,048	162,19	668.864	0,40	Hipereutrófica	▲
EDQ-01	25/02/2015	3,460	0,067	57,07	3.182.890		Hipereutrófica	▲
EDQ-01	20/05/2015	3,010	0,100	130,53	165.365	0,30	Eutrófica	▲
EDQ-01	19/08/2015	2,820	0,104	146,10	803.496		Hipereutrófica	▲
EDQ-01	25/11/2015	4,287	0,116	142,92	1.238.917		Hipereutrófica	▲
EDQ-01	21/01/2016	4,163	0,135	120,32	683.876	0,40	Hipereutrófica	▲

\*[PT]: fósforo total(mg/L); cl@: clorofila-a (µg/L); [Nt]: Nitrogênio (mg/L); Cont.Cianob.: Cont. Cianobactérias (Cél/mL); Transp.: Transparéncia (m).

Fonte: CEARÁ (2016a).

Os dados de fósforo total nos reservatórios do Rio Grande do Norte foram obtidos na literatura. Para os açudes Gargalheiras e Cruzeta, Bezerra *et al.* (2014), a partir de amostragens mensais, expuseram a variação temporal da concentração de fósforo total no período compreendido entre junho a dezembro de 2010 (período seco) e de janeiro a abril

de 2011 (período chuvoso). Por sua vez, Oliveira (2012) fornece a variação temporal da concentração de fósforo total no reservatório Dourado através de monitoramento mensal durante o período que se estende de maio de 2011 a julho de 2011, período chuvoso, e de agosto de 2011 a março de 2012 (período seco). Por fim, Mesquita (2009) fornece os dados de concentração de fósforo total, em formato de tabela, nos reservatórios Passagem das Traíras, Boqueirão das Parelhas, Itans e Sabugi a partir de coletas realizadas mensalmente nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008, considerado período de estiagem na região.

As concentrações de fósforo total nos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, no semiárido paraibano, de maneira similar, foram obtidas através dos trabalhos Azevedo (2012) e Araújo Júnior (2009), respectivamente. A abrangência dos dados para o açude Camalaú compreende o período entre março de 2008 a junho de 2011, enquanto os dados do açude Epitácio Pessoa abarcam o período entre 1991 a 2008.

Para o reservatório Sobradinho, no semiárido bahiano, utilizaram-se os dados de Costa *et al.* (2009) que, a partir de amostragens trimestrais de janeiro de 2007 a janeiro de 2008 em trechos lótico, de transição e lêntico, fornecem a variação da concentração de fósforo total no referido açude. Por fim, para o reservatório Tapacurá, no semiárido pernambucano, Pernambuco (2016) fornece os dados de concentração de fósforo total no reservatório entre maio de 1999 e agosto de 2000.

#### **4.1.2. Carga afluente de fósforo total**

A partir de inventários ambientais dos reservatórios cearenses fornecidos pela COGERH, foram obtidas as cargas afluentes de fósforo total aos açudes analisados. Neste caso, a COGERH estimou a carga de nutrientes, em toneladas por ano, identificando e levantando os principais pontos de poluição difusa (pecuária, agricultura e solos) e pontual (psicultura, esgoto e cargas oriundas dos afluentes), dentro da área de influência delimitada, que aceleram o processo de eutrofização no reservatório (citadas na Figura 05). Neste caso, tal área de influência é aquela na qual o somatório das cargas pontuais e difusas dos nutrientes, subtraída da sedimentação, se iguala à concentração de fósforo total média representativa do reservatório (COGERH, 2011d). Dessa forma, para cada reservatório cearense analisado, com exceção dos reservatórios Gavião e Santo Anastácio, segue, na Tabela 07 abaixo, o respectivo inventário ambiental consultado.

Tabela 07 – Inventários ambientais dos reservatórios cearenses.

Lago	Inventário Ambiental
<b>Ceará</b>	
Forquilha	COGERH, 2007
Orós	COGERH, 2011a
Castanhão	COGERH, 2011b
Banabuiú	COGERH, 2011c
Acarape do Meio	COGERH, 2008a
Arrebita	COGERH, 2011d
General Sampaio	COGERH, 2011e
Pacajus	COGERH, 2011f
Quincoé	COGERH, 2011g
Itaúna	COGERH, 2011h
Sítios Novos	COGERH, 2008b
Curral Velho	COGERH, 2012
Colina	COGERH, 2010
Rosário	COGERH, 2011i
Rivaldo de Carvalho	COGERH, 2011j
Flor do Campo	COGERH, 2011k
Edson Queiroz	COGERH, 2011l
Caxitoré	COGERH, 2011m
Canafistula	COGERH, 2011n
Olho d'Água	COGERH, 2008c

Fonte: Autor (2016).

Verifica-se que as cargas de fósforo aos reservatórios inventariados têm como sua principal origem as fontes de poluição pontual antes que as difusas. Para o Castanhão, por exemplo, a proporção é de 99,43% das cargas de fósforo oriundas de fontes pontuais e somente 0,57% oriundas de fontes difusas (COGERH, 2011b). Pelo fato da COGERH ainda não disponibilizar atualmente o inventário ambiental do reservatório Gavião, seus dados foram obtidos através da literatura. Diferentemente da estimativa da carga anual média afluente de fósforo aos reservatórios cearenses, Vidal (2011) expõe o fluxo de entrada de fósforo de janeiro a maio de 2011 no açude Gavião. Com tais dados, calculou-se a média dos valores da carga afluente de fósforo total entre os referidos meses e considerou-se, para efeito de cálculo, o valor encontrado como a carga anual média

afluente de fósforo no reservatório à semelhança dos dados fornecidos pela COGERH nos inventários ambientais.

As cargas afluentes de fósforo aos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta foram obtidas, da mesma forma, do trabalho de Bezerra *et al.* (2014), oriundas da multiplicação entre a vazão de entrada da água nos referidos açudes e sua concentração média de fósforo no período de estudo analisado. Para o reservatório Dourado, Oliveira (2012) fornece o valor da carga afluente de fósforo no açude pela composição das cargas de entrada mensais oriundas dos rios e da precipitação pluvial. As cargas afluentes de fósforo dos reservatórios Passagem das Traíras, Boqueirão das Parelhas, Itans e Sabugi foram obtidas do trabalho de Mesquita (2009) pela sua utilização do modelo empírico de Dillon & Rigler (1974b). Neste caso, Mesquita (2009) dispõe dos dados de R,  $q_s$  e PT (Equação 2.17) que, sendo conhecidos, permitem obter o valor da carga anual de fósforo total por unidade de área em cada reservatório. Multiplicando, em seguida, tal valor pela área média da bacia hidráulica no período de estudo, obteve-se a carga afluente de fósforo nos referidos açudes.

Da mesma forma que o reservatório anterior, a carga afluente de fósforo ao reservatório Camalaú foi obtida através da Equação 2.17 de Dillon & Rigler (1974b) utilizada por Azevedo (2012). Tendo ele exposto os demais dados de tal equação, calculou-se a carga anual de fósforo total por unidade de área e, após a multiplicação pela área da bacia hidráulica no período analisado, obteve-se a carga afluente de fósforo ao reservatório citado. Por sua vez, a carga afluente de fósforo ao reservatório Epitácio Pessoa foi obtida do trabalho de Silva Júnior (2013) pela composição da carga de entrada dos seus seis tributários, dada pela multiplicação da vazão afluente com a concentração de fósforo na entrada do reservatório para cada tributário.

A carga afluente de fósforo ao reservatório Sobradinho foi estimada pela composição dos dados de Lima & Severi (2014) e da CHESF (2016). Neste caso, Lima & Severi (2014) fornecem as vazões afluentes ao reservatório Sobradinho nos meses de dezembro de 2007 e março, junho e setembro de 2008. Além disso, a CHESF (2016) fornece, em diferentes profundidades no mesmo ponto de amostragem, o valor da concentração de fósforo total à montante da barragem do referido reservatório em janeiro de 2016. Nesse caso, para efeito de cálculo, considerou-se que a média das vazões afluentes nos meses analisados por Lima & Severi (2014) se identificava com a vazão

média afluente anual no reservatório, enquanto que a média dos valores de concentração de fósforo total, medidos pela CHESF (2016), correspondia aproximadamente ao valor da concentração de fósforo total na interface entre o Rio São Francisco e o reservatório Sobradinho, sendo a carga afluente de fósforo ao reservatório obtida pela multiplicação de ambos valores.

A carga afluente de fósforo total no reservatório Tapacurá também foi obtida através da utilização da equação empírica de Dillon & Rigler (1974b). Para tanto, a carga de fósforo foi obtida através da composição dos dados de Gunkel *et al.* (2003) e Pernambuco (2010), calculando-se a carga anual de fósforo total por unidade de área e, semelhantemente aos demais reservatórios, obtendo-se a carga afluente de fósforo total pela multiplicação da área da bacia hidráulica com tal valor.

#### **4.1.3. Volume médio dos reservatórios no período modelado**

Os volumes médios nos reservatórios cearenses, com exceção do Santo Anastácio, foram, da mesma forma, obtidos através do Portal Hidrológico do Ceará, em sua opção “Volume Armazenado - Reservatórios” (CEARÁ, 2016b). Neste caso, para cada reservatório analisado, o Portal fornece os valores diários de seu volume em diferentes anos (conforme exemplificado para o reservatório Edson Queiroz nas Figuras 26 e 27 abaixo).

Figura 26 – Variação do volume no reservatório Edson Queiroz.



Fonte: CEARÁ (2016b).

Figura 27 – Valores diários do volume no reservatório Edson Queiroz.

Gráfico/Arquivo					
Gráfico	Dados				
Mostrar 10 registros por página		Procurar			
Data	Cota (m)	Volume (hm <sup>3</sup> )	Volume (%)		
2016-08-10	185,97	34,66	13,65		
2016-08-09	185,98	34,74	13,68		
2016-08-08	185,99	34,81	13,70		
2016-08-07	185,99	34,81	13,70		
2016-08-06	186,01	34,95	13,76		
2016-08-05	186,02	35,02	13,79		
2016-08-04	186,03	35,10	13,82		
2016-08-03	186,04	35,17	13,85		
2016-08-02	186,05	35,24	13,87		
2016-08-01	186,06	35,31	13,90		

Exibindo de 1 a 10 de 4,598 registros

Primeiro Anterior 1 2 3 4 5 ... 460 Próximo Último

Fonte: CEARÁ (2016b).

Para os reservatórios Gargalheiras e Cruzeta, Bezerra *et al.* (2014) expuseram o volume médio de cada um durante o período de tempo analisado. Oliveira (2012) expõe a variação do volume no reservatório Dourado durante o período de tempo por ele analisado. Para os reservatórios Passagem das Traíras, Boqueirão das Parelhas, Itans e Sabugi, Mesquita (2009) apresenta o monitoramento hidrológico dos quatro reservatórios com os valores mensais do volume acumulado entre janeiro de 2002 e dezembro de 2008.

Os volumes médios dos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa foram obtidos através dos trabalhos de Azevedo (2012) e Araújo Júnior (2009), respectivamente, que expuseram a variação do volume dos açudes ao longo do período de tempo estudado. O volume médio do reservatório Sobradinho foi obtido através da ONS (2016), que fornece o percentual de volume acumulado no referido açude em cada mês do ano, entre os anos 2000 e 2016. O volume médio anual do reservatório Tapacurá, por fim, foi obtido através do trabalho de Pernambuco (2010).

#### **4.1.4. Vazão de entrada dos reservatórios**

A vazão de entrada dos reservatórios cearenses, com exceção do Gavião, não foi obtida diretamente da literatura. Neste caso, os inventários ambientais consultados, expostos na seção 4.1.2., fornecem o TR médio de cada reservatório cearense. Visto que o TR é calculado conforme a Equação 2.1, obteve-se a vazão de entrada para cada reservatório cearense, no período analisado, multiplicando o TR médio dado pelo volume médio no mesmo período. Para o reservatório Gavião, por sua vez, Vidal (2011) expõe a vazão afluente entre janeiro e maio de 2011. Calculou-se, dessa forma, a média das vazões de entrada nos referidos meses e considerou-se, para efeito de cálculo, o valor encontrado como a vazão de entrada anual média em tal açude.

A vazão de entrada anual média de todos os reservatórios norte rio-grandenses foi obtida do trabalho de Melo (2008), com base nos dados de SCIENTEC (1998). A vazão de entrada anual média ao reservatório Camalaú foi obtida do trabalho de Farias (2009) que fornece a vazão mensal entre 1933 e 1991. Para o reservatório Epitácio Pessoa, obteve-se a vazão de entrada anual média pela composição da vazão de entrada oriunda de cada tributário do referido açude fornecidas por Silva Júnior (2013), obtidas no período entre 1994 e 2008.

Lima & Severi (2014) fornecem a vazão de entrada do reservatório Sobradinho nos meses de dezembro de 2007 e março, junho e setembro de 2008. Obteve-se, dessa maneira, a média de tais vazões e, para efeito de cálculo, considerou-se que tal média correspondia a vazão de entrada anual média ao reservatório analisado. Para o reservatório Tapacurá, obteve-se sua vazão afluente média pelo trabalho de Pernambuco (2010), além de outros dados como a evaporação média e o vertimento médio, usados para obtenção da vazão de saída média do reservatório.

#### **4.1.5. Vazão de saída dos reservatórios**

A vazão de saída dos reservatórios cearenses foi obtida, da mesma forma, pelo Portal Hidrológico do Ceará, em sua opção “Volume Armazenado - Reservatórios” (CEARÁ, 2016b). Neste caso, para efeito de cálculo, considerou-se que a vazão de saída atual disponibilizada em Ceará (2016b) correspondia a vazão de saída anual média nos reservatórios cearenses. O Portal Hidrológico, contudo, não apontava nenhuma vazão de saída nos reservatórios Arrebita, Quincoé, Curral Velho, Colina, Rivaldo de Carvalho e

Flor do Campo. Para os reservatórios Quincoé e Curral Velho, neste caso, administrados pelo DNOCS, obteve-se a vazão de saída pelo Monitoramento de Reservatórios (DNOCS, 2016a) calculando-se a média das últimas vazões de saída em tais açudes e, considerando, para efeito de cálculo, que o valor encontrado correspondia a vazão de saída média anual. Para o reservatório Quincoé, as últimas vazões de saída medidas pelo DNOCS (2016a) são em setembro de 2008, outubro de 2008 e dezembro de 2010. Para o reservatório Curral Velho, as últimas vazões de saída medidas foram em janeiro, fevereiro, março e maio de 2014 (DNOCS, 2016a). Para os demais reservatórios citados, por falta de dados, considerou-se a vazão regularizada como a vazão de saída anual média a ser utilizada na calibração do modelo de Chapra (1975). Somente os inventários ambientais dos reservatórios Arrebita (COGERH, 2011d) e Flor do Campo (COGERH, 2011k) dispunham de suas vazões regularizadas, as quais foram utilizadas no modelo. Para os reservatórios Colina e Rivaldo de Carvalho, obteve-se a vazão regularizada através do trabalho de Cavalcante Filho *et al.* (2011), que a fornecem considerando três capacidades adimensionais em cada um (razão entre a capacidade do açude e seu volume afluente médio anual) e saída de água sazonal, sendo o valor utilizado no modelo a média das três vazões regularizadas expostas para ambos reservatórios.

Para os reservatórios Gargalheiras e Cruzeta, Bezerra *et al.* (2014) expuseram a vazão de saída mensal média de ambos os açudes no período de tempo analisado. O mesmo acontece para o reservatório Dourado, no trabalho de Oliveira (2012). Mesquita (2009), por fim, fornece a vazão de saída anual média dos reservatórios Passagem das Traíras, Boqueirão das Parelhas, Itans e Sabugi.

A vazão de saída anual média também é fornecida por Azevedo (2012) para o reservatório Camalaú. Para o reservatório Epitácio Pessoa, por falta de dados, também se considerou sua vazão de saída anual média como correspondente a vazão regularizada. Tal vazão foi obtida através de DNOCS (2016b).

O mesmo raciocínio da vazão de entrada ao reservatório Sobradinho seguiu-se para sua vazão de saída, com os dados de Lima & Severi (2014) nos meses de dezembro de 2007 e março, junho e setembro de 2008. Por fim, a vazão de saída média anual do reservatório Tapacurá foi obtida pela subtração da vazão de entrada pela evaporação média e vertimento médio expostos no trabalho de Pernambuco (2010).

#### **4.2. Adequabilidade e calibração do modelo de Chapra (1975) aos reservatórios do semiárido brasileiro.**

Conforme dito no Capítulo 2, Canale & Seo (1996a) oferecem dois critérios que permitem verificar se o modelo de Chapra (1975) é preferível ao demais modelos mais complexos de previsão de fósforo: variabilidade dos dados elevada, excedendo em aproximadamente 50% a média geral, e incerteza dos parâmetros utilizados na modelagem (incerteza esta que aumenta para modelagens de longo prazo). Como procura-se compreender o comportamento dos reservatórios em regiões semiáridas a longo prazo, a verificação da adequabilidade da Equação 2.26 à região em estudo tratou de analisar se o coeficiente de variação dos dados de concentração de fósforo total dos referidos açudes era aproximadamente igual ou superior a 50%.

Após atestar que o modelo de Chapra (1975) era preferível aos mais complexos para o semiárido brasileiro, seguiu-se para sua calibração e validação. Dessa forma, sucede-se, em primeiro lugar, ao cálculo dos respectivos TR e a definição dos tempos de modelagem, correlacionados com aquele.

Conforme a Equação 2.1, o tempo de residência hidráulica é calculado dividindo-se o volume médio no período modelado, pela vazão de entrada média no mesmo período. Visto que as concentrações de fósforo total obtidas abrangem diferentes meses ou anos, é possível, para o mesmo reservatório, definir diferentes períodos de modelagem a fim de melhor representar o que nele se sucede. Dessa forma, para cada reservatório, definiu-se, majoritariamente, três períodos de modelagem ( $t$ ), obtendo-se, em seguida, o volume médio, as vazões de entrada e saída médias e o TR médio (Equação 2.1) durante cada período, além das concentrações de fósforo total em seu começo e fim. Contudo, os TR dos reservatórios cearenses, conforme dito anteriormente, com exceção do Gavião e do Santo Anastácio, foram obtidos dos inventários ambientais citados. Procurou-se definir períodos de tempo que, após a obtenção do TR, fossem razoavelmente próximos a seu valor (SHEN *et al.*, 2002) a fim de garantir mistura total no reservatório. Houve casos, entretanto, em que isto não foi possível devido à pequena abrangência de dados de concentração de fósforo total em tais açudes.

Dispondo de todos os dados da Equação 2.26 de Chapra (1975), resta obter o valor de  $\lambda$  para cada período de modelagem nos reservatórios. Neste caso, deve-se calcular um valor de  $\lambda$  tal que a parte à direita da igualdade na Equação 2.26 seja igual à concentração

de fósforo total ao final do período de modelagem. Fez-se uso do Excel® neste processo. Pela Equação 2.24,  $k$  é obtido subtraindo-se  $Q_s/V$  do valor do  $\lambda$  calculado. Dessa forma, para cada reservatório, obtém-se TR e  $k$  para cada um dos três períodos de modelagem. Dado se buscar compreender o comportamento nos reservatórios a longo prazo, calculou-se a média de tais valores e considerou-se o resultado encontrado como o TR e  $k$  médios representativos do reservatório analisado. Para os reservatórios que apresentavam  $k$  excessivamente discrepantes com os dos demais ou que possuíam uma pequena abrangência de dados de concentração de fósforo, foram considerados apenas um ou dois períodos de modelagem na calibração. Por fim, plotaram-se os dados ( $Tr;k$ ) obtidos em um gráfico de dispersão, ainda através do Excel®, e comparou-se com os gráficos obtidos da Equação 2.29 (Salas & Martino, 1991), para reservatórios tropicais, e da Equação 2.28 (Vollenweider, 1976), para reservatórios temperados.

Em seguida, estimaram-se os parâmetros da relação  $k = c_3 TR^x$  (relação que melhor ajusta os valores previstos de PT aos observados (BRETT & BENJAMIN, 2008)) através da consideração da influência das características do semiárido brasileiro na velocidade de sedimentação do fósforo ( $v_s$ ) e na taxa de crescimento do fitoplâncton ( $k_f$ ) seguindo a metodologia de Castagnino (1982). Com base em tal estimativa, analisaram-se três equações  $k = f(TR)$ , com suas respectivas curvas, e escolheu-se aquela equação cuja curva apresentava maior coeficiente de relação e menor desvio com os dados de  $k$  obtidos. Desta forma, o único parâmetro necessário à calibração na Equação 2.26 ( $k$ ) (CANALE & SEO, 1996b) pode ser validado com os dados dos reservatórios sul-africanos.

#### **4.3. Validação do modelo com reservatórios sul-africanos**

A validação do modelo proposto, como dito anteriormente, utiliza dados oriundos de uma região distinta do semiárido brasileiro, mas com características similares. Os reservatórios da África do Sul, nesse caso, compartilham com os reservatórios nordestinos não poucas similaridades, quais sejam (GCIS, 2015): baixo índice pluviométrico, com uma média anual de 464 mm (abaixo de 860 mm, considerada a média pluviométrica mundial); chuvas concentradas em poucos meses do ano na maior parte do país; temperaturas médias anuais abaixo de 30°C, dentre outras. Selecionou-se, nesse sentido, oito reservatórios sul-africanos a fim de validar a curva do modelo calibrado para a região semiárida em geral.

Os oito reservatórios sul-africanos (Tabela 08 e Figura 28) foram selecionados do Report to the Water Research Commission (HARDING, 2008) com os dados necessários, com exceção da vazão de saída, conforme seção 4.1, à obtenção do  $k$  em cada reservatório obtidos diretamente do mesmo trabalho. A vazão de saída, por sua vez, foi obtida do balanço hidrológico dos oito reservatórios, conforme apresenta Harding (2008). Neste caso, Harding (2008) expõe, em alguns reservatórios, a vazão de saída que é destinada aos rios e à irrigação entre os anos de 1990 e 2006 (Figura 29). Somaram-se tais valores para cada ano e considerou-se sua média como a vazão de saída anual média do reservatório analisado. Em outros reservatórios, Harding (2008) já expõe sua vazão de saída total em cada ano durante o mesmo período de tempo citado (Figura 30). Utilizou-se, desta maneira, a média de tais valores anuais como a vazão de saída anual média dos referidos reservatórios. Os anos com denotação “0 M” (Figuras 29 e 30), que indica falta de dados, seja na coluna “Total River Releases”, “Irrigation” ou “Total Outflow” não foram considerados no cálculo. Por fim, seguindo a mesma metodologia detalhada na seção 4.2, calcularam-se os coeficientes de decaimento nos reservatórios sul-africanos e plotaram-se os resultados sobre o gráfico obtido da calibração do modelo em vista a validá-lo.

Tabela 08 – Reservatórios sul-africanos utilizados na validação do modelo

<b>Reservatório</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ano de Inauguração</b>	<b>Capacidade Inicial (hm<sup>3</sup>)</b>
<b>África do Sul</b>			
Allemanskraal	AL	1960	0,1745
Bronkhorstspruit	BR	1950	57,9130
Ervenis	ER	1960	212,3400
Grootdraai	GR	1981	350,0000
Klipvoor	KV	1970	47,0000
Laing	L	1950	19,8600
Roodeplaat	RP	1959	43,4720
Vaal	VL	1938	2609,7990

Fonte: Autor (2016).

Figura 28 – Localização espacial dos reservatórios sul-africanos



Fonte: Autor (2016).

Figura 29 – Exemplo de balanço hídrico, do reservatório Allemanskraal, com vazões de saída ao rio e à irrigação

Date	Gauge Reading (m)	Contents (Ml)	Tot River Releases (Ml)	Irrigation (Ml)	Gross Evap (Ml)	Rain (Ml)	Streamflow Calculated (Ml)
1990-01-01	11.539	142824	279	39526	36146 E	11518	28545 E
1991-01-01	9.869	106935	28131	30659	35104 E	15049 &	106776 E
1992-01-01	11.193	134866	313	52017	32728 E	6644 &	38342 E
1993-01-01	9.232	94795	677	48398	26176 E	11404 &	30896 E
1994-01-01	7.256	61844	690	55869	20443 E	6135 &	31565 E
1995-01-01	3.802	23542	387	15951	12189	4963 &	64449 &
1996-01-01	7.363	63427	971	27959	26317 E	14311 &	90528 E
1997-01-01	10.173	113020	0 M	39541	38493 E	18898	0 M
1998-01-01	11.723	147166	40428	45628	40455 E	19280 &	125180 E
1999-01-01	12.450	165115	0 M	57919	38009 E	13434 &	0 M
2000-01-01	10.467	119102	871	48091	35531 E	16104 &	72165 E
2001-01-01	10.646	122878	766	55500	30751 E	14881	104123 E
2002-01-01	12.043	154865	748	55639	34909 E	11500 &	17184 E
2003-01-01	9.094	92253	652	55935	24425 E	6658	13398 E
2004-01-01	4.753	31296	0 M	17013 Q	14838	3130	0 M
2005-01-01	3.096	16827	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M
2006-01-01	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M

Fonte: Harding (2008).

Figura 30 – Exemplo de balanço hídrico, do reservatório Bronkhorstspruit, com vazão de saída total por ano.

Date	Gauge Reading (m)	Contents (Ml)	Total Outflow (Ml)	Industry and Town (Ml)	River Releases (Ml)	Gross Evap (Ml)	Rain (Ml)	Calculated Streamflow (Ml)
1990-01-01	13.948	54888	34894	304	930	10609 E	5806 &	40271 E
1991-01-01	14.017	55462	29411	332	801	10133 E	6465 &	36187 E
1992-01-01	14.383	58571	14948	318	11337	10579 E	3567 &	2427 E
1993-01-01	11.842	39039	12067	313	10720	7996 E	4329 &	10720 E
1994-01-01	11.072	34024	10165	211	8788	8213 E	3642 &	8946 E
1995-01-01	10.099	28235	15073	175	8495	7043 E	4941 &	47849 E
1996-01-01	14.422	58910	246386	50	2276	10374 E	8574	246555 E
1997-01-01	14.306	57279	144487	45	2984	10354 E	7323 &	148221 E
1998-01-01	14.388	57982	0 M	66	12248	10719 E	5384 &	0 M
1999-01-01	14.387	57970	29136	91	19521	10375	5025 &	16204 &
2000-01-01	12.033	39687	223436	14	5507	9662 E	9813 &	241116 E
2001-01-01	14.334	57518	19864	13	19835	9582 E	4623 &	13516 E
2002-01-01	12.940	46211	20982	19	20963	8870 E	3255	4304 E
2003-01-01	9.419	23918	18555	29	18526	5961 E	2370	4081 E
2004-01-01	4.637	5853	9258 Q	247	9011	5668 Q	3242 Q	26314 Q
2005-01-01	8.735 Q	20482 Q	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M
2006-01-01	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M	0 M

Fonte: Harding (2008).

#### 4.4. Análise de cenários

A fim de indicar possíveis utilizações do modelo de fósforo total, validado para o semiárido em geral, procedeu-se à avaliação de possíveis cenários futuros de impacto na qualidade dos recursos hídricos dos reservatórios do semiárido brasileiro. Neste caso, simularam-se: (I) quais seriam os efeitos na concentração de fósforo total nos corpos hídricos para diversos valores de carga de fósforo afluente; (II) qual a menor porcentagem de remoção da carga afluente de fósforo aos reservatórios analisados a fim de que obedecam, no menor tempo possível, ao limite estabelecido pela CONAMA Nº 357/05; (III) qual o impacto na concentração de fósforo total decorrente do assoreamento e da redução da vazão afluente nos reservatórios analisados. Em todos os cenários, foram utilizados os últimos dados de concentração de fósforo total e volume médio obtidos, conforme seções 4.1.1. e 4.1.3., como concentração de fósforo total e volume iniciais para análise dos cenários futuros. Todos os cenários foram simulados fazendo uso do Excel®.

Para o Cenário I, calculou-se a variação da concentração de fósforo total, fazendo uso da Equação 2.26, para valores de W iguais a 0, 0,5W, 1W e 2W em cada reservatório analisado. O período de tempo simulado foi entre 0 a 3650 dias (ou entre 0 a 10 anos). Quando as concentrações não mais variavam com o tempo, verificou-se que o reservatório havia chegado ao estado permanente. O mesmo intervalo de tempo foi utilizado nos demais cenários. Para o Cenário II, modificou-se a Equação 2.26, acrescentado o termo *p* (porcentagem de remoção da carga afluente de fósforo), da seguinte forma:

$$PT(t) = PT_o e^{-\lambda t} + \frac{(1 - (p/100))W}{(\frac{Q_s}{V} + k_{calibrado})V} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.1)$$

Nesse sentido, para cada reservatório analisado na avaliação de cenários, obteve-se o menor  $p$  no qual PT fosse igual ao limite do CONAMA Nº 357/05. Para o Cenário III, comparou-se o impacto na variação da concentração de fósforo total considerando o volume assoreado em 20% ao ano, sendo 1,70% ao mês, com o impacto oriundo de tal assoreamento somado a redução em 50% da vazão de entrada ao reservatório analisado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Dados dos reservatórios do semiárido brasileiro

#### 5.1.1. Concentração de fósforo total

As concentrações de fósforo total observadas ao longo do tempo para os reservatórios cearenses podem ser vistas na Tabela 09 abaixo. A abrangência dos dados de fósforo disponibilizados pelo Portal Hidrológico do Ceará compreende o período entre 09 de janeiro de 2008 e 06 de abril de 2016, ainda que muitos reservatórios disponham de dados em intervalos de tempo menores que este. A Tabela 10, por sua vez, expõe a estatística descritiva de tais dados. A concentração média de fósforo total nos reservatórios Caxitoré, Gavião, General Sampaio, Banabauí, Acarape do Meio e Castanhão aproxima-se dos valores medidos nos trabalhos de Amorim (2001), Hijo (2009), Mendes *et al.* (2012), Lima (2016).

Tabela 09 – Dados de concentração de fósforo total nos reservatórios cearenses analisados

Forquilha		Orós		Castanhão		Gavião		Banabuiú		Acarape do Meio		Arrebita		General Sampaio		Pacajus		Quincoé		Itaíma	
Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)								
09/01/2008	0,260	06/05/2008	1,460	06/05/2008	0,050	19/05/2008	0,032	18/06/2008	0,280	20/05/2008	0,063	03/09/2008	0,017	21/05/2008	0,015	09/07/2008	0,044	12/08/2008	0,162	16/02/2011	0,029
03/09/2008	0,002	28/05/2009	0,084	07/08/2008	0,049	21/07/2008	0,037	27/08/2008	0,186	17/06/2008	0,040	08/08/2012	0,047	01/09/2008	0,089	14/08/2008	0,068	17/01/2011	0,140	28/02/2012	0,046
18/03/2009	0,938	24/05/2012	0,030	12/05/2010	0,059	12/08/2008	0,059	22/02/2010	0,043	29/07/2008	0,093	07/11/2012	0,033	27/11/2008	0,116	13/11/2008	0,096	25/07/2012	0,180	09/08/2012	0,044
30/06/2009	0,095	09/08/2012	0,036	25/07/2010	0,099	08/09/2008	0,079	04/05/2010	0,034	04/08/2008	0,097	28/02/2013	0,029	06/01/2009	0,406	23/07/2009	0,154	09/04/2013	0,256	22/11/2012	0,039
10/03/2011	0,088	13/11/2012	0,022	04/08/2010	0,105	20/10/2008	0,108	18/01/2011	0,061	23/09/2008	0,324	15/05/2013	0,034	22/07/2009	0,125	24/03/2010	0,049	06/05/2014	0,747	19/02/2013	0,029
24/01/2012	0,033	25/02/2013	0,035	24/11/2010	0,015	17/11/2008	0,055	14/07/2011	0,058	14/10/2008	0,062	07/08/2013	0,032	19/08/2009	2,145	23/05/2011	0,140	20/08/2014	0,062	14/05/2013	0,023
08/08/2012	0,037	06/11/2013	0,062	08/02/2011	0,011	01/12/2008	0,078	14/02/2012	0,038	11/11/2008	0,137	29/10/2013	0,070	12/11/2009	0,196	27/06/2012	0,247	16/10/2014	0,051	13/08/2013	0,025
07/11/2012	0,038	11/02/2014	0,087	20/12/2011	0,011	27/07/2009	0,083	26/04/2012	0,021	09/12/2008	0,113	06/02/2014	0,127	04/08/2010	0,068	19/09/2012	0,260	13/01/2015	0,094	05/11/2013	0,089
28/02/2013	0,021	22/05/2014	0,096	03/05/2012	0,021	24/08/2009	0,073	16/01/2013	0,030	29/07/2009	0,188	20/05/2014	0,118	25/11/2010	0,093	11/12/2012	0,077	06/05/2015	0,323	11/02/2014	0,034
15/05/2013	0,028	21/08/2014	0,069	20/05/2013	0,020	21/09/2009	0,044	07/05/2014	0,074	25/08/2009	0,168	13/08/2014	0,044	16/05/2011	0,107	06/03/2013	0,130	06/04/2016	0,091	28/05/2014	0,060
07/08/2013	0,025	23/10/2014	0,051	13/05/2014	0,026	19/10/2009	0,234	24/07/2014	0,057	22/09/2009	0,062	12/11/2014	0,080	18/06/2012	0,086	04/06/2013	0,166	02/09/2014	0,033		
29/10/2013	0,023	10/03/2015	0,059	07/08/2014	0,051	03/11/2009	0,215	04/11/2014	0,051	13/10/2009	0,059	03/03/2015	0,055	07/03/2013	0,022	19/09/2013	0,120			18/11/2014	0,045
06/02/2014	0,198	01/06/2015	0,073	04/12/2014	0,048	14/12/2009	0,075	27/01/2015	0,062	10/11/2009	0,399	07/05/2015	0,055	08/05/2013	0,101	11/12/2013	0,104			03/02/2015	0,066
20/05/2014	0,103	10/08/2015	0,060	04/03/2015	0,064	22/03/2010	0,039	23/04/2015	0,095	08/12/2009	0,060	11/08/2015	0,067	07/08/2013	0,127	30/01/2014	0,266			05/05/2015	0,029
13/08/2014	0,076	30/11/2015	0,065	21/05/2015	0,087	12/04/2010	0,117	04/08/2015	0,112	16/03/2010	0,063	10/11/2015	0,073	23/04/2014	0,098	21/05/2014	0,158			24/11/2015	0,057
12/11/2014	0,125	15/03/2016	0,058	11/08/2015	0,074	17/05/2010	0,072	04/11/2015	0,088	13/04/2010	0,022	16/02/2016	0,092	30/07/2014	0,085	13/08/2014	0,206			02/02/2016	0,039
03/03/2015	0,185			02/12/2015	0,101	16/06/2010	0,043	04/02/2016	0,087	25/05/2010	0,146			30/10/2014	0,069	05/02/2015	0,077				
07/05/2015	0,121			21/01/2016	0,090	27/07/2010	0,024			27/07/2010	0,028			12/01/2015	0,073	05/03/2015	0,232				
11/08/2015	0,132					02/08/2010	0,078			19/10/2010	0,066			15/07/2015	0,078	08/04/2015	0,096				
10/11/2015	0,241					13/09/2010	0,060			17/11/2010	0,063			22/10/2015	0,077	07/05/2015	0,054				
16/02/2016	0,200					04/10/2010	0,048			21/02/2011	0,067			25/02/2016	0,092	09/06/2015	0,207				
						16/11/2010	0,121			16/03/2011	0,055					06/08/2015	0,196				
						18/01/2011	0,209			14/04/2011	0,140					11/11/2015	0,575				
						17/02/2011	0,118			10/05/2011	0,043					03/12/2015	0,146				
						15/03/2011	0,132			15/05/2012	0,093					17/02/2016	0,116				
						18/04/2011	0,219			12/06/2012	0,198										
						23/05/2011	0,070			17/07/2012	0,263										
						16/05/2012	0,127			08/08/2012	5,062										
						13/06/2012	0,148			04/09/2012	0,246										
						18/07/2012	0,098			16/10/2012	0,353										
						05/09/2012	0,090			13/12/2012	0,202										
						17/10/2012	0,053			20/02/2013	0,175										
						07/11/2012	0,043			10/04/2013	0,138										
						19/02/2013	0,086			15/05/2013	0,262										
						12/02/2014	0,051			12/06/2013	0,330										
						11/03/2014	0,068			14/08/2013	0,267										
						06/08/2014	0,071			15/01/2014	0,162										
						06/01/2015	0,112			13/02/2014	0,198										
						03/02/2015	0,096			12/03/2014	0,211										
						03/03/2015	0,135			07/05/2014	0,181										
						31/03/2015	0,099			07/08/2014	0,247										
						05/05/2015	0,220			07/01/2015	0,054										
						03/06/2015	0,028			04/02/2015	0,113										
						04/08/2015	0,050			04/03/2015	0,226										
						04/11/2015	0,054			07/04/2015	0,114										
						01/12/2015	0,028			06/05/2015	0,193										
						11/02/2016	0,113			02/06/2015	0,107										
										05/08/2015	0,141										
										05/11/2015	0,144										
										02/12/2015	0,109										
										16/02/2016	0,056										

Fonte: CEARÁ (2016a).

Tabela 09 – Dados de concentração de fósforo total nos reservatórios cearenses analisados (CONTINUAÇÃO)

Sítios Novos		Curral Velho		Colina		Rosário		Rivaldo de Carvalho		Flor do Campo		Edson Queiroz		Caxitoré		Canafistula		Olho D'Água	
Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)	Data	PT (mg/L)
11/06/2008	0,043	03/03/2010	0,067	16/09/2008	0,313	17/12/2010	0,112	12/08/2008	0,162	15/03/2010	0,090	20/08/2008	0,041	28/11/2008	0,251	01/07/2008	0,270	08/12/2008	0,032
20/08/2008	0,019	20/01/2011	0,021	15/03/2010	0,099	03/06/2011	0,027	24/07/2012	0,027	14/06/2010	0,086	06/05/2010	0,090	09/09/2009	0,117	30/03/2010	0,034	23/06/2010	0,026
17/12/2008	0,137	16/08/2011	0,045	05/05/2010	0,666	18/09/2012	0,081	08/04/2013	0,021	30/11/2010	0,076	30/11/2010	0,137	04/11/2010	0,098	17/05/2010	0,049	17/12/2010	0,180
22/07/2009	0,587	26/07/2012	0,175	30/11/2010	0,078	29/11/2013	0,475	18/07/2013	0,020	24/05/2012	0,056	13/12/2011	0,010	19/05/2011	0,109	17/11/2010	0,057	02/06/2011	0,020
23/09/2009	0,198	26/07/2012	0,195	24/04/2012	0,762	26/08/2014	0,023	14/01/2014	0,185	29/08/2012	0,027	28/11/2012	0,034	16/05/2012	0,175	23/02/2011	0,056	18/10/2011	0,026
11/03/2010	0,145	17/04/2013	0,040	10/09/2012	0,599	02/12/2014	0,010	12/05/2014	0,111	23/10/2012	0,034	20/02/2013	0,034	20/02/2013	0,146	10/05/2012	0,021	12/09/2012	0,049
21/07/2010	0,087	25/07/2013	0,020	18/10/2012	0,141	26/01/2015	0,021	25/08/2014	0,079	14/02/2013	0,034	23/05/2013	0,025	09/05/2013	0,200	21/11/2012	0,100	05/12/2012	0,028
13/10/2010	0,186	15/10/2013	0,058	14/02/2013	0,810	21/05/2015	0,027	14/10/2014	0,083	23/04/2013	0,046	19/09/2013	0,051	08/08/2013	0,071	27/02/2013	0,060	04/12/2013	0,128
01/03/2011	0,248	30/04/2014	0,093	24/04/2013	0,685	12/08/2015	0,027	11/02/2015	0,124	17/09/2013	0,026	13/11/2013	0,070	22/01/2014	0,146	09/05/2013	0,090	21/05/2014	0,096
04/05/2011	0,461	29/07/2014	0,100	07/05/2015	0,273	05/11/2015	0,046	20/05/2015	0,130	06/11/2013	0,060	19/02/2014	0,071	24/04/2014	0,118	13/08/2013	0,130	03/09/2014	0,023
01/08/2012	0,240	13/11/2014	0,059	17/02/2016	0,313	24/02/2016	0,041	21/07/2015	0,098	16/01/2014	0,257	29/05/2014	0,132	31/07/2014	0,032	29/11/2013	0,474	04/12/2014	0,024
29/10/2012	0,155	24/02/2015	0,090					10/11/2015	0,175	22/04/2014	0,337	03/09/2014	0,058	30/10/2014	0,069	13/02/2014	0,310	02/02/2015	0,024
31/01/2013	0,193	12/05/2015	0,145					17/03/2016	0,241	24/07/2014	0,430	04/12/2014	0,048	13/01/2015	0,080	20/05/2014	0,161	19/05/2015	0,020
24/04/2013	0,175	20/08/2015	0,072							30/10/2014	0,450	25/02/2015	0,067	21/05/2015	0,098	14/08/2014	0,111	13/08/2015	0,021
02/08/2013	0,351	09/12/2015	0,073							07/05/2015	0,287	20/05/2015	0,100	16/07/2015	0,078	10/12/2014	0,149	22/10/2015	0,020
06/02/2014	0,356	26/01/2016	0,087							17/02/2016	0,342	19/08/2015	0,104	20/10/2015	0,063	10/03/2015	0,252	02/03/2016	0,021
28/05/2014	0,364											25/11/2015	0,116	21/01/2016	0,054	28/04/2015	0,268		
19/08/2014	0,362											21/01/2016	0,135			28/01/2016	0,464		
15/01/2015	0,319																		
03/02/2015	0,566																		
03/03/2015	0,591																		
31/03/2015	0,439																		
05/05/2015	0,208																		
03/06/2015	0,137																		
01/07/2015	0,110																		
04/08/2015	0,137																		
03/11/2015	0,370																		
01/12/2015	0,277																		
11/02/2016	0,256																		

Fonte: CEARÁ (2016a).

Tabela 10 – Estatística descritiva dos dados de concentração de fósforo total nos reservatórios cearenses analisados

RESERVATÓRIOS	MÉDIA (mg/L)	MÁXIMO (mg/L)	MÍNIMO (mg/L)	$\Delta$ (mg/L)	DESVIO PADRÃO (mg/L)	CV (%)
Forquilha	0,141	0,938	0,002	0,936	0,198	140,247
Orós	0,147	1,460	0,022	1,438	0,351	239,172
Castanhão	0,055	0,105	0,011	0,094	0,033	59,829
Gavião	0,091	0,234	0,024	0,210	0,055	59,770
Banabuiú	0,081	0,280	0,021	0,259	0,064	79,523
Acarape do Meio	0,243	5,062	0,022	5,040	0,694	285,464
Arrebita	0,061	0,127	0,017	0,110	0,032	52,102
General Sampaio	0,203	2,145	0,015	2,130	0,452	222,245
Pacajus	0,159	0,575	0,044	0,531	0,109	68,682
Quincoé	0,211	0,747	0,051	0,696	0,207	98,356
Itaúna	0,043	0,089	0,023	0,066	0,018	41,089
Sítios Novos	0,266	0,591	0,019	0,572	0,157	58,890
Curral Velho	0,084	0,195	0,020	0,175	0,050	60,162
Colina	0,431	0,810	0,078	0,732	0,278	64,531
Rosário	0,081	0,475	0,010	0,465	0,134	165,717
Rivaldo de Carvalho	0,112	0,241	0,020	0,221	0,068	60,449
Flor do Campo	0,165	0,450	0,026	0,424	0,156	94,645
Edson Queiroz	0,074	0,137	0,010	0,127	0,040	54,188
Caxitoré	0,112	0,251	0,032	0,219	0,057	50,719
Canafistula	0,170	0,474	0,021	0,453	0,140	82,669
Olho d'Água	0,046	0,180	0,020	0,160	0,047	102,125
GERAL	0,147	5,062	0,002	5,060	0,297	202,062

Fonte: Autor (2016) com dados de CEARÁ (2016a).

A Resolução CONAMA Nº 357/2005 define, para corpos hídricos lênticos, o limite máximo de 0,030 mg/L de concentração de fósforo total referente à classe 02 de qualidade de água, com uso destinado, sobremaneira, ao abastecimento humano (posterior ao tratamento convencional) e à irrigação de hortaliças e plantas frutíferas. A classificação dos reservatórios no semiárido brasileiro, nesse caso, como de classe 02 de qualidade obedece ao artigo 42 da mesma Resolução que assim o prescreve para os casos em que não se tenha sido ainda aprovado os respectivos enquadramentos, sendo este o caso de todos os reservatórios na região semiárida brasileira (LIMA, 2016). Ainda assim, a concentração média de fósforo total de cada um dos vinte e um reservatórios cearenses analisados (dados de TR e  $k$  do Santo Anastácio obtidos pelo trabalho de Araújo (2016)) encontra-se acima do valor máximo definido. Não somente isto, a média geral da concentração de fósforo total (0,147 mg/L) é quase 500% maior que o valor estabelecido pela Resolução.

Os valores limites, em mg/L, que delimitam os estados tróficos em lagos das classificações sugeridas por Vollenweider (1965), Vollenweider (1968), EPA (1983), Thomann & Mueller (1987), Von Sperling (1994), Nurnberg (1996) e Salas & Martino (2001) a partir da concentração de fósforo total neles presentes, conforme Tabela 05, foram transformados fazendo uso do índice de Carlson (1977), Equações 2.2 a 2.4, a fim de permitir comparações posteriores sobre a mesma base uniforme. O estado trófico dos reservatórios cearenses analisados, segundo as diversas classificações sugeridas e com o respectivo TSI, é exposto na Tabela 11.

Tabela 11 – Estado trófico dos reservatórios cearenses analisados com base em diversas classificações tróficas

RESERVATÓRIOS	[PT]méd (mg/L)	TSI Carlson (1977)	Vollenweider (1965)	Vollenweider (1968)	EPA (1983)	Thomann & Mueller (1987)	Von Sperling (1994)	Nurnberg (1996)	Salas & Martino (2001)
Forquilha	0,141	76	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Orós	0,147	76	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Castanhão	0,055	62	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Gavião	0,091	69	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Banabuiú	0,081	68	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Acarape do Meio	0,243	83	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Arrebita	0,061	63	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
General Sampaio	0,203	81	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Pacajus	0,159	77	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Quincoé	0,211	81	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Itaúna	0,043	58	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico
Sítios Novos	0,266	85	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Curral Velho	0,084	68	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Colina	0,431	92	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Rosário	0,081	68	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Rivaldo de Carvalho	0,112	72	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico
Flor do Campo	0,165	78	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Edson Queiroz	0,074	66	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Caxitoré	0,112	72	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico
Canafistula	0,170	78	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Olho d'Água	0,046	59	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico
GERAL	0,147	76	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico

Fonte: Autor (2016).

Dos vinte e um reservatórios cearenses, apenas o Itaúna e o Olho d'Água foram classificados como Mesotróficos segunda a classificação de Vollenweider (1965) e Von Sperling (1994), ainda que para as demais classificações tenham sido considerados como Eutróficos. De fato, todos os demais reservatórios foram majoritariamente classificados como Eutróficos ou Hipereutróficos, visto sua elevada concentração de fósforo total. Visto a relação existente entre fósforo total e clorofila *a* em corpos hídricos lênticos (CHAPRA, 1997; ESTEVES, 1998; MOSS, 2010), espera-se que a concentração deste nutriente, particularmente na biomassa e na fração de algas verdes e/ou cianofíceas, em tais reservatórios seja elevada (VOLLENWEIDER, 1983 *apud* SALAS & MARTINO, 1991), o que é confirmado pelos trabalhos de Amorim (2001), Braga (2006), Hijo (2009) e Mendes *et al.* (2012) em sete dos vinte e um reservatórios analisados. Segundo Moss (1988 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008), concentrações de fósforo total em torno de 0,100 mg/L é característico de lagos eutrofizados localizados em regiões urbanas altamente populosas com afluência de esgotos, o que é visto nos reservatórios do nordeste brasileiro (COGERH, 2011e) e confirmado pelos valores encontrados na maioria dos reservatórios cearenses analisados.

Merece particular destaque a classificação da EPA (1983) e de Salas & Martino (2001). Os limites que delimitam os estados tróficos, propostos pela EPA (1983), classificam razoavelmente bem os lagos em zonas temperadas, particularmente os estadunidenses (MOSS, 2010). Os corpos hídricos em zonas tropicais se encontram claramente fora de tais limites (EPA, 1983). É o que se vê pela classificação de Salas & Martino (2001), proposta como um sistema de classificação para lagos tropicais, com base em 40 lagos de 16 países. Salas & Martino (2001) definiram como lagos tropicais aqueles nos quais a temperatura mínima seja de 10°C, em condições normais, com uma média anual mínima de 15 °C. Os reservatórios brasileiros utilizados em tal classificação são oriundos dos estados de Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro. As temperaturas dos reservatórios do semiárido brasileiro, conforme visto no Capítulo 3, contudo, são mais elevadas que aquelas expostas para lagos tropicais, com temperaturas médias chegando a 30,8 °C (ESKINAZI-SANT'ANNA *et al.*, 2007). Visto o grau de trofia em tais reservatórios ser eutrófico ou hipereutrófico (Tabela 11), condições anaeróbicas se instalam no hipolímnio com predominância de compostos de ferro reduzidos que, em paralelo às elevadas temperaturas da água em tal região, impedem a precipitação do fosfato pelos íons de ferro, fazendo-o permanecer solúvel (MOORE *et al.*, 1991; VON

SPERLING, 1996; ESTEVES, 1998; LEWIS, 2000; MOSS, 2010), aumentando assim a sua concentração e justificando os valores elevados nos reservatórios do semiárido brasileiro. Ainda assim, as concentrações máximas de fósforo total observadas no Orós (1,460 mg/L), Acarape do Meio (5,062 mg/L) e General Sampaio (2,145), sobretudo no Acarape do Meio, correspondem a valores de lagoas de estabilização ou de tanques de cultivo de peixe bastante fertilizados (MOSS, 1988 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Isto indica não só a influência da temperatura e radiação solar na concentração elevada de fósforo, mas a grande afluência de cargas de fósforo por fontes artificiais, sobretudo esgotos domésticos (VON SPERLING, 1996; ESTEVES, 1998; LEWIS, 2000).

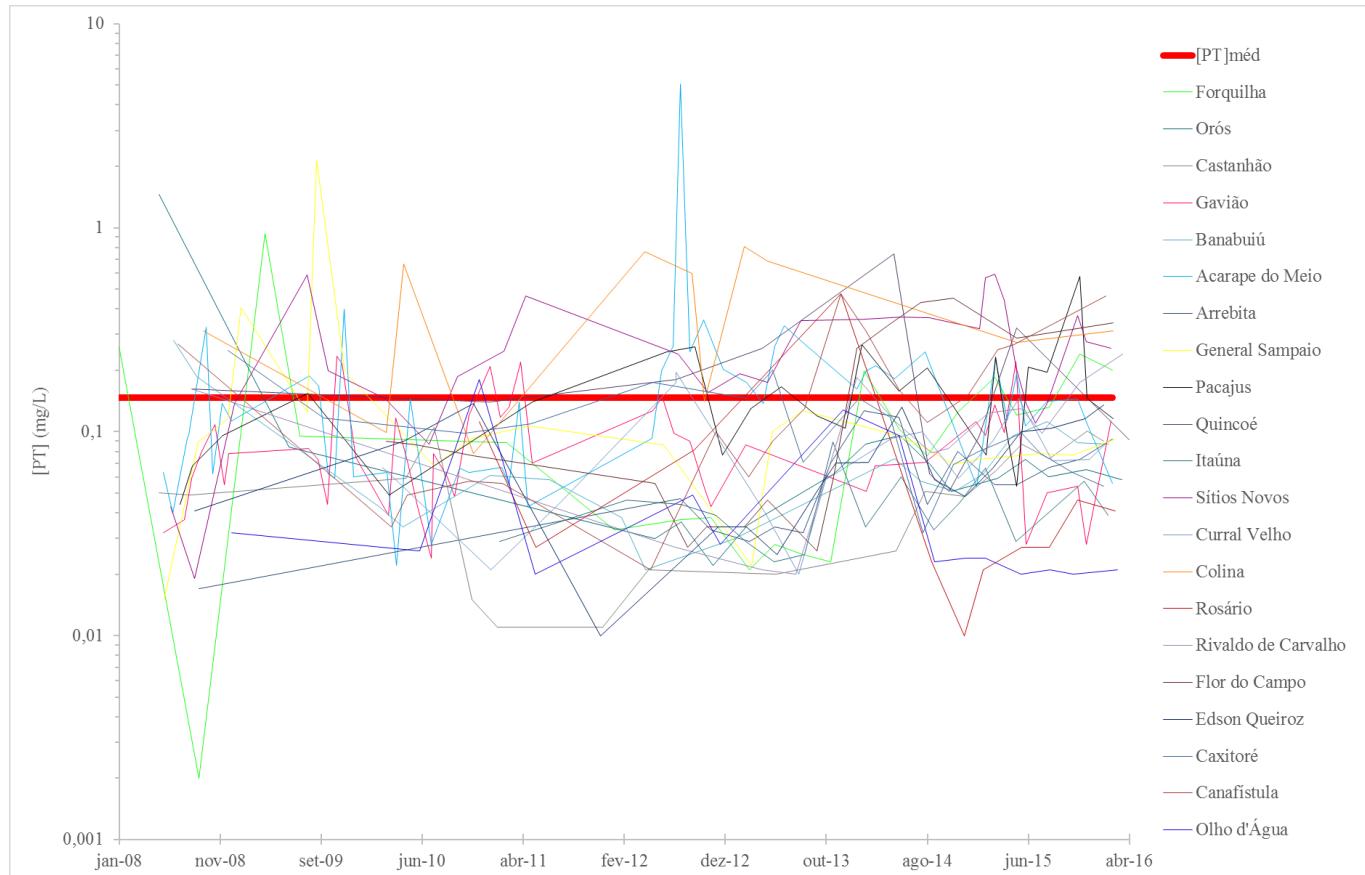
Interessante notar que a mediana da concentração de fósforo total em 241 lagos do mundo, apresentada por Nurnberg (1996), corresponde a 0,0146 mg/L, com amplitude entre 0,002 e 0,9 mg/L. Nesse caso, constata-se que todos os reservatórios cearenses presentes na Tabela 10 apresentam concentração média de fósforo total acima da mediana característica para os lagos do mundo. Percebe-se ainda que, enquanto todos os reservatórios obedecem ao limite mínimo de 0,002 mg/L, quatro reservatórios (Forquilha, Orós, Acarape do Meio e General Sampaio) possuem valores acima do referido limite máximo de 0,900 mg/L (0,938; 1,460; 5,062; 2,145).

Isto é confirmado pelas classificações tróficas e concentrações de fósforo total nos lagos de diferentes países e nos dos demais estados brasileiros. A classificação trófica dos reservatórios escoceses definida pela Scottish Environmental Protection Agency (SEPA, 2016a) considera, semelhantemente às classificações expostas na Tabela 05, como hipereutróficos os corpos hídricos lênticos com concentração de fósforo total superior a 0,100 mg/L (verifica-se uma melhora na qualidade das águas dos lagos escoceses entre 2013 e 2014 (SEPA, 2016b)). Os lagos da Nova Zelândia, por sua vez, têm classificação trófica, conforme a Waikato Regional Council (WRC, 2016a), em relação ao fósforo total (mg/L): oligotrófico - < 0,010; mesotrófico – entre 0,01 e 0,02; eutrófico – entre 0,02 e 0,05; supereutrófico – entre 0,05 e 0,100; hipereutrófico – acima de 0,100. Para os lagos do Reino Unido, a Environmental Agency (2010) considera que os lagos com concentração média anual de fósforo total até 0,005 mg/L são classificados como de ótima qualidade; os com concentração média entre 0,005 e 0,008 mg/L são tidos como de qualidade boa; entre 0,008 e 0,016 mg/L, como de qualidade moderada; entre 0,016 e 0,032 mg/L, de qualidade ruim. Já Shortreed & Morton (2003) expõem os valores de

concentração de fósforo total no Owikeno Lake (Canadá) durante a primavera entre 0,0034 e 0,0054 mg/L. Já para reservatórios brasileiros, Pires *et al.* (2015) encontram os seguintes valores médios de concentração de fósforo total para quatro reservatórios paulistas (Billings, Guarapiranga, Jundaí e Palva Castro): 0,32 mg/L; 0,14 mg/L; 0,04 mg/L; <0,007 mg/L, respectivamente. Lamparelli (2004), por sua vez, analisando 22 reservatórios paulistas, verifica que a maioria dos reservatórios (7) possuem concentração média de fósforo total igual a 0,045 mg/L, enquanto que 16 deles possuem concentração média menor ou igual a 0,035 mg/L. Dessa forma, verifica-se, a partir da Tabela 10, que os reservatórios cearenses (e, como se verá, do semiárido brasileiro) possuem concentrações de fósforo total bastante superiores as encontradas nos países de clima temperado e nos reservatórios de demais estados do Brasil (SALAS & MARTINO, 2001). Tal fato corrobora com as características particulares do semiárido brasileiro que influenciam na dinâmica do fósforo nos reservatórios em tal região.

Percebe-se uma grande variação ao redor da média dos dados de fósforo total nos reservatórios cearenses (Tabela 10 e Figura 31), chegando a quase 286% de variação no Acarape do Meio. Isto pode indicar a presença de um maior aporte de fósforo ao reservatório em determinadas épocas do ano. De fato, na bacia hidrográfica do Acarape do Meio encontram-se lavouras de arroz, milho e feijão com a utilização de agrotóxicos do tipo FOLISUPER, composto organofosforado, cuja aplicação varia em intervalos de 7 a 14 dias, mas que só deve ser utilizado quando as pragas atingem determinado nível de dano econômico. Tal fato, além do fato de que parte do esgoto coletado na bacia hidrográfica retorna ao reservatório sem tratamento, explica de maneira razoável o elevado coeficiente de variação no açude (COGERH, 2008a; ADAPAR, 2016).

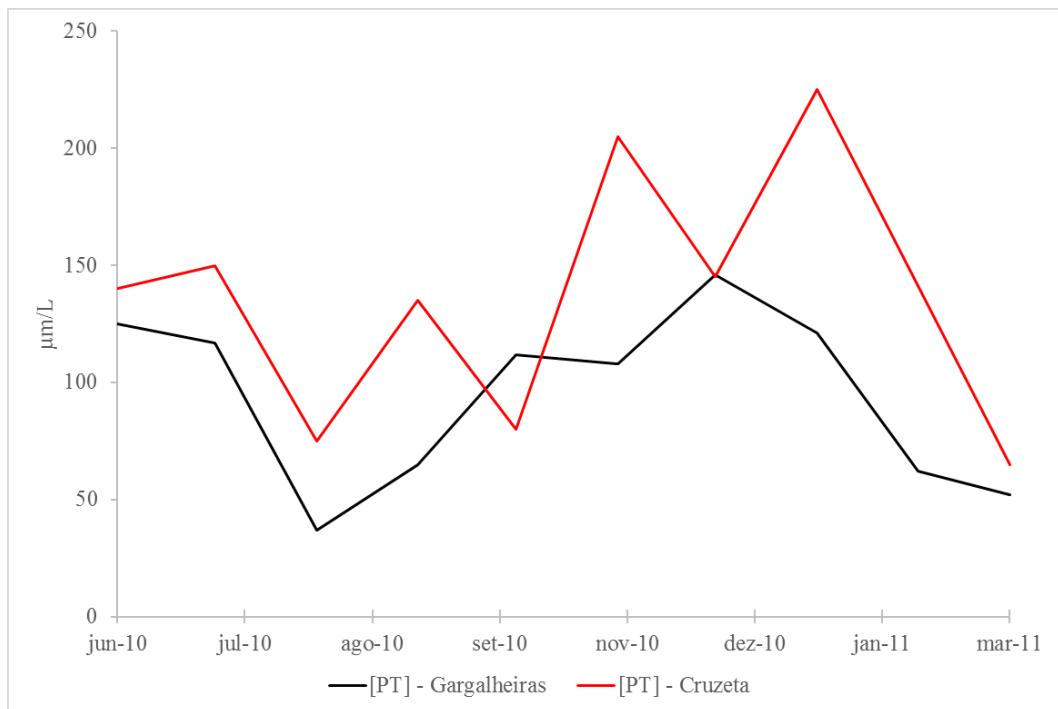
Figura 31 – Variação da concentração de fósforo total ao redor da média geral nos reservatórios cearenses



Fonte: Autor (2016).

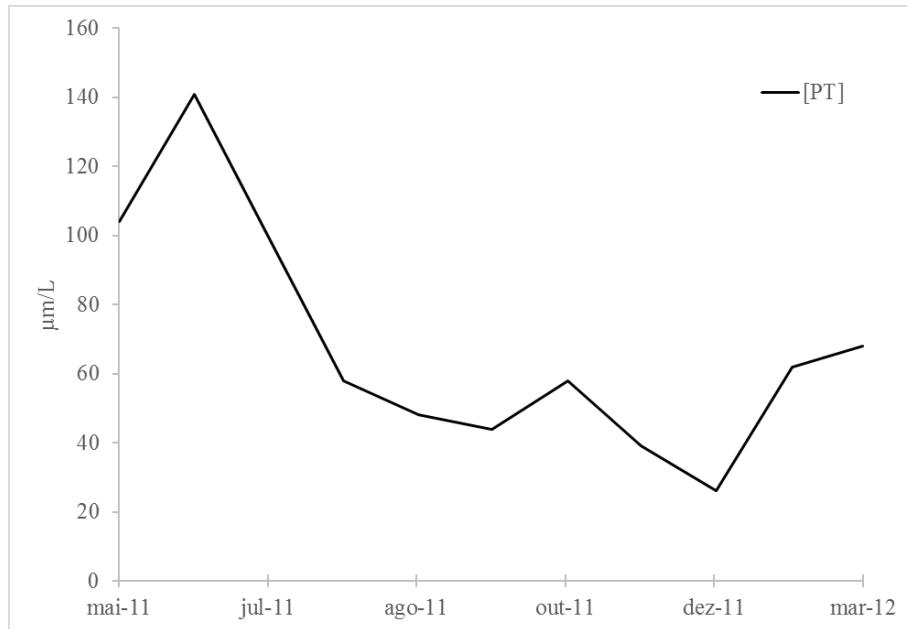
Os dados de concentração de fósforo total para os reservatórios Gargalheiras e Cruzeta, Rio Grande do Norte, podem ser vistos conforme Figura 32. A variação das concentrações de fósforo total para o reservatório Dourado é vista na Figura 33, enquanto que a variação para os reservatórios Passagem das Traíras, Boqueirão das Parelhas, Itans e Sabugi são vistas conforme Figuras 34 a 37, respectivamente.

Figura 32 – Variação temporal do fósforo total entre junho de 2010 e março de 2011 nos açudes Gargalheiras/RN e Cruzeta/RN, não constando de dados em fevereiro de 2011 no açude Cruzeta.



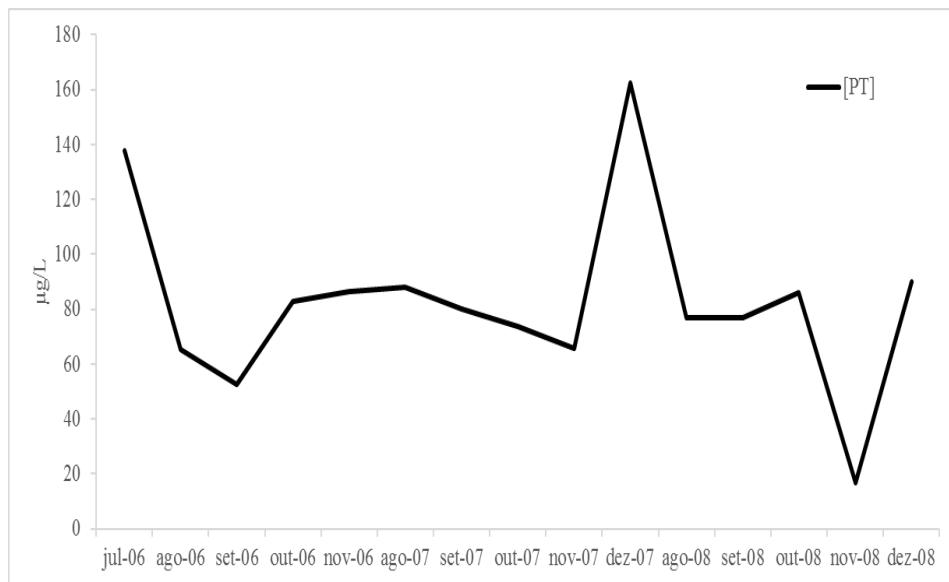
Fonte: Autor (2016) com dados de Bezerra *et al.* (2014).

Figura 33 – Variação temporal do fósforo total entre maio de 2011 e março de 2012 no açude Dourado/RN.



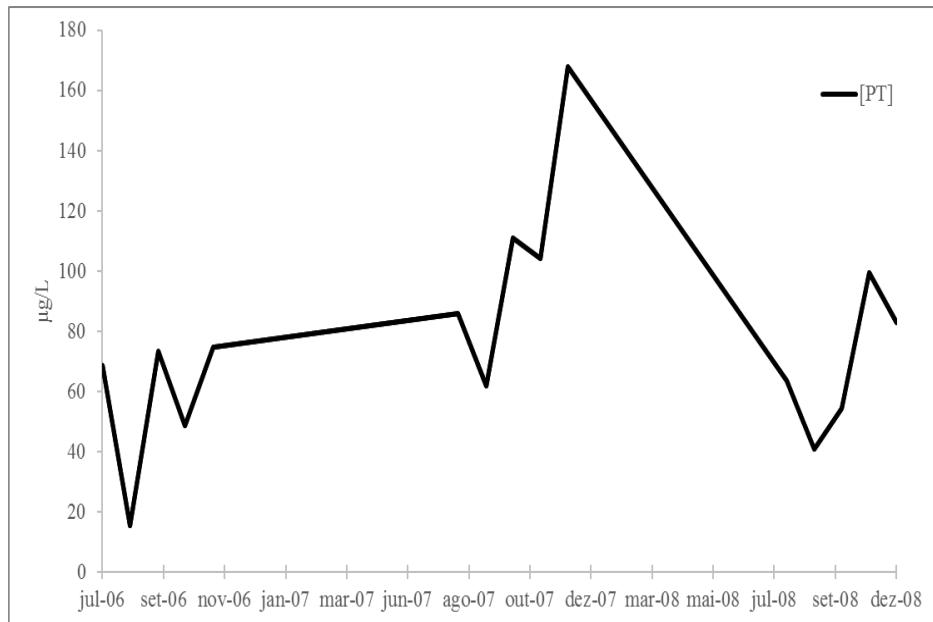
Fonte: Autor (2016) com dados de Oliveira (2012).

Figura 34 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Passagem das Traíras/RN.



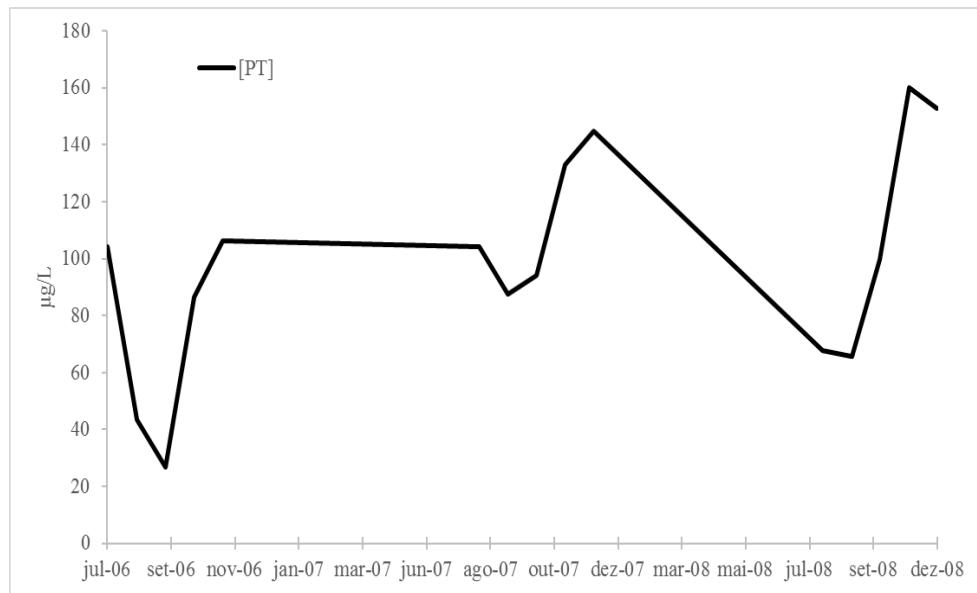
Fonte: Autor (2016) com dados de Mesquita (2009).

Figura 35 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Boqueirão das Parelhas/RN.



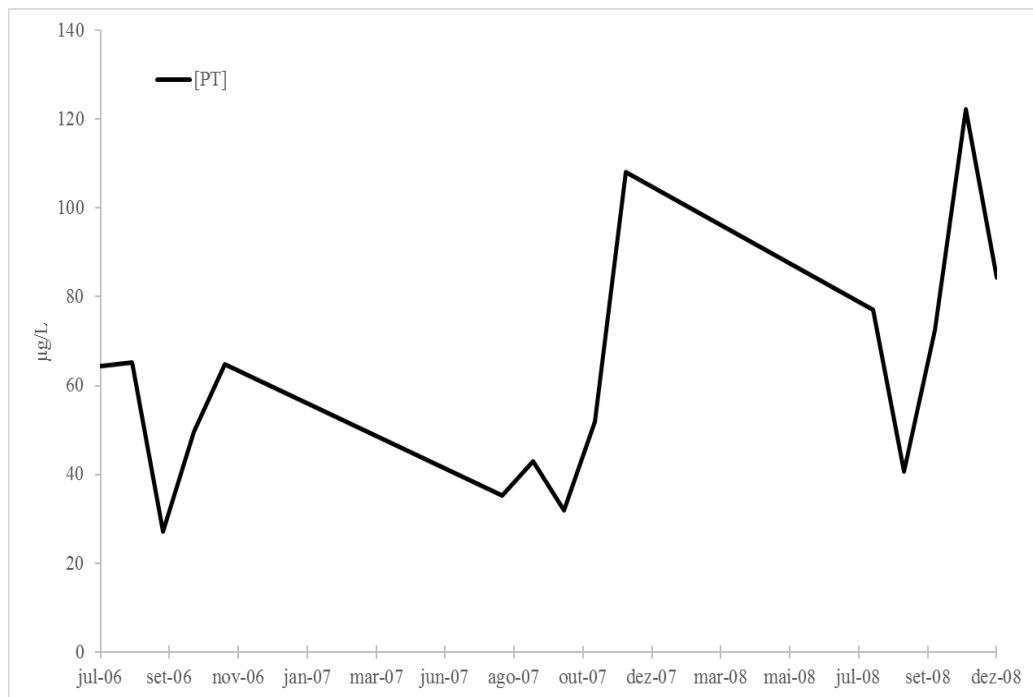
Fonte: Autor (2016) com dados de Mesquita (2009).

Figura 36 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Itans/RN.



Fonte: Autor (2016) com dados de Mesquita (2009).

Figura 37 – Variação temporal do fósforo total nos meses de julho a novembro de 2006, agosto a dezembro de 2007 e agosto a dezembro de 2008 no açude Sabugi/RN.



Fonte: Autor (2016) com dados de Mesquita (2009).

A estatística descritiva de tais dados encontra-se na Tabela 12. É interessante notar que as concentrações médias em cada um dos reservatórios norte rio-grandenses, ainda que acima do limite máximo de 0,03 mg/L da CONAMA N° 357/05 para corpos hídricos lênticos de classe 02, são majoritariamente menores que as concentrações médias dos reservatórios cearenses. De fato, a média geral das concentrações de fósforo cearenses (0,147 mg/L) é quase o dobro da média geral dos reservatórios do Rio Grande do Norte (0,086 mg/L). Ainda assim, tal concentração chega a ser quase duas vezes maior que concentrações média de fósforo em lagos tropicais, como é o caso do Lago Paranoá (ALTAFIN *et al.*, 1995), Distrito Federal, e outros elencados por Salas & Martino (1991). As diversas classificações de grau de trofia, nesse sentido, consideram os reservatórios analisados como eutróficos (Tabela 13), ainda que com valores mais próximos da média calculada, o que demonstra o menor coeficiente de variação.

Tabela 12 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total nos reservatórios norte rio-grandenses analisados

RESERVATÓRIO	MÉDIA (mg/L)	MÁXIMO (mg/L)	MÍNIMO (mg/L)	$\Delta$ (mg/L)	DESVIO PADRÃO (mg/L)	CV (%)
RIO GRANDE DO NORTE						
Gargalheiras	0,095	0,150	0,038	0,112	0,039	40,836
Cruzeta	0,136	0,225	0,065	0,160	0,056	41,133
Dourado	0,068	0,141	0,026	0,115	0,034	49,796
Passagem das Traíras	0,083	0,162	0,017	0,146	0,033	40,158
Boqueirão de Parelhas	0,077	0,168	0,016	0,153	0,036	46,292
Itans	0,098	0,160	0,027	0,133	0,038	39,043
Sabugi	0,063	0,122	0,027	0,095	0,027	43,790
GERAL	0,086	0,225	0,016	0,210	0,041	48,075

Fonte: Autor (2016).

Tabela 13 – Estado trófico dos reservatórios norte rio-grandenses analisados com base em diversas classificações tróficas

RESERVATÓRIOS	[PT]méd (mg/L)	TSI Carlson (1977)	Vollenweider (1965)	Vollenweider (1968)	EPA (1983)	Thomann & Mueller (1987)	Von Sperling (1994)	Numberg (1996)	Salas & Martino (2001)
Gargalheiras	0,095	70	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Cruzeta	0,136	75	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Dourado	0,068	65	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Passagem das Traíras	0,083	68	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Boqueirão das Parelhas	0,077	67	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Itans	0,098	70	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Sabugi	0,063	64	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Geral	0,086	68	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico

Fonte: Autor (2016).

Nurnberg (1996) evidencia, além dos parâmetros com base em 241 reservatórios do mundo, a mediana da concentração de fósforo total de 72 lagos estadunidenses como sendo 0,0081 mg/L, com amplitude entre 0,0033 e 0,107 mg/L. A menor concentração média de fósforo total nos reservatórios norte rio-grandenses (no reservatório Sabugi) ainda é quase oito vezes maior que a mediana proposta, ainda que se encontre dentro da amplitude exposta. Em relação aos 241 lagos do mundo, todos os norte rio-grandenses analisados, diferentemente de alguns reservatórios cearenses, encontram-se dentro da amplitude de variação da concentração de fósforo total (0,002 – 0,900 mg/L) e possuem média geral mais próxima da mediana de 0,0146 mg/L. As concentrações de fósforo total próximas a 0,100 mg/L, conforme dito anteriormente, são próprias de lagos eutrofizados em regiões urbanas com grande afluência de esgotos (MOSS, 1988 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008), o que é confirmado pelas pesquisas de Mesquita (2009) e Oliveira (2012). Comparando os dados da Tabela 12 com as classificações tróficas dos países de clima temperado anteriormente citados, verifica-se que os reservatórios norte rio-grandenses, à semelhança dos cearenses, são considerados de qualidade deteriorada com elevados valores de concentração de fósforo total: para a classificação escocesa (SEPA, 2016a), os reservatórios do Rio Grande do Norte são eutróficos, sendo o Cruzeta hipereutrófico; para a classificação neozelandesa (WRC, 2016a), os reservatórios são supereutróficos, sendo o Cruzeta hipereutrófico; para a classificação britânica (EA, 2010), todos os reservatórios do Rio Grande do Norte são de qualidade ruim; comparados ao lago Owikeno (SHORTREED & MORTON, 2003), no Canadá, as concentrações chegam a ser aproximadamente 25 vezes maiores; comparados aos reservatórios brasileiros elencados por Salas & Martino (2001), Lamparelli (2004) e Pires *et al.* (2015) nos estados de Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro, os dados de fósforo total nos reservatórios analisados são majoritariamente maiores.

Alguns reservatórios do semiárido brasileiro, ainda que tendo características similares, possuem concentrações de fósforo total inferiores à concentração média geral nos reservatórios norte rio-grandenses. É o caso dos reservatórios Jacarecica I/SE (GARCIA *et al.*, 2012), com concentração média de fósforo total igual a 0,08 mg/L; Jabiberi e Taboca (LIMA *et al.*, 2014), ambos em Sergipe, com concentrações médias de fósforo total no período chuvoso iguais a 0,01 mg/L e 0,05 mg/L, respectivamente, e com concentrações médias no período seco iguais a 0,061 e 0,01 mg/L; Duas Unas/PE (SANTOS & FLORENCIO, 2001), com concentração média igual a 0,051 mg/L. Pela

classificação de Salas & Martino (2001), tais reservatórios são classificados como: Jacarecica I – eutrófico; Jabiberi – oligotrófico, no período chuvoso e eutrófico, no período seco; Taboca – eutrófico, no período chuvoso e oligotrófico, no período seco; Duas Unas – eutrófico. Considerar a carga interna de fósforo oriunda dos sedimentos como fator de maior relevância para os valores mais elevados de concentração média de fósforo total nos reservatórios norte rio-grandenses parece não ser a atitude mais razoável. Ainda que somente a temperatura venha a explicar boa parte das variações na concentração fósforo total nos reservatórios, as temperaturas dos reservatórios de Sergipe e o de Pernambuco citados são bastante semelhantes com os do Rio Grande do Norte por estarem todos no semiárido brasileiro. Além disso, fatores químicos que influenciam em maiores acréscimos de liberação de fósforo oriundos dos sedimentos como pH elevado e concentração elevada de nitrato são, às vezes, até maiores nos reservatórios citados que nos norte rio-grandenses (LASERAS, 1991; JENSEN & ANDERSEN, 1992; SONDERGAARD *et al.*, 2003; OLIVEIRA, 2012; LIMA *et al.*, 2014). A influência de cargas externas de fósforo aos reservatórios do Rio Grande do Norte parece, portanto, ter maior relevância nas concentrações elevadas neles existentes, como a classificação de Moss (1988 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008) evidencia.

Eskinazi-Sant'Anna *et al.* (2007), a partir de amostragens trimestrais entre 2002 e 2004, apresenta os valores de concentração média de fósforo total para cinco dos sete reservatórios do Rio Grande do Norte analisados nos períodos seco e chuvoso. As concentrações médias da Tabela 12 compreendem ambos os períodos, de modo que a Tabela 14 abaixo apresenta a concentração média de fósforo total nos reservatórios estudados durante a estiagem e a chuva, a fim de melhor comparar com os dados de Eskinazi-Sant'Anna *et al.* (2007).

Pela análise da Tabela 14 se vê que as concentrações de fósforo total nos cinco reservatórios analisados chegam a ser quase 13 vezes maiores, durante o período seco, entre os anos de 2002 a 2004 quando comparadas aos anos 2006 e 2008. Sabe-se, contudo, que entre os anos de 2004 e 2008, todos os reservatórios da Tabela 12 atingiram a capacidade máxima e verteram. Ora, as duas ou três renovações de água nos referidos reservatórios, durante os anos citados, favorece uma maior diluição dos nutrientes presentes na massa de água e, por causa disto, há uma considerável melhora em sua qualidade. Nesse aspecto, particular destaque tem o vertimento sobre a renovação das águas em tais reservatórios. Estes fatores certamente devem ter contribuído para os

menores valores de concentração de fósforo entre 2006 e 2008 (MESQUITA, 2009; ANA, 2012). Visto que os dados do Itans, Boqueirão das Parelhas, Passagem das Traíras e Sabugi foram medidos durante o período de estiagem, não foi possível compará-los, durante o período chuvoso, com os dados de Eskinazi-Sant'Anna *et al.* (2007). A concentração média de fósforo total no reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, o maior e mais profundo na bacia hidrográfica Piranhas-Assu, ainda é expressa por Eskinazi-Sant'Anna *et al.* (2007): 0,100 mg/L, no período seco; 0,090 mg/L, no período chuvoso. Tais valores são bastante próximos da média geral dos reservatórios norte rio-grandenses citada na Tabela 12.

A Figura 38 expõe a variação da concentração de fósforo total nos reservatórios norte rio-grandenses analisados. O espaço em branco no meio da Figura 38 refere-se ao fato de não se dispor de dados para os reservatórios analisados entre dezembro de 2008 e junho de 2010. Como a Tabela 12 evidencia, os dados de fósforo estão mais próximos da média geral calculada. Enquanto que o maior coeficiente de variação nos reservatórios cearenses chegava a quase 286%, o maior valor de tais reservatórios chega a quase 50%. Certamente uma possível causa de tão grande diferença entre os dois coeficientes de variação se encontre na abrangência de dados dos reservatórios cearenses ser em geral de oito anos, enquanto os dados dos reservatórios norte rio-grandenses ser de um a dois anos, aproximadamente.

Tabela 14 – Comparação das concentrações de fósforo total com os dados de Eskinazi-Sant'Anna *et al.* (2007).

Período	Reservatórios	Abrangência dos Dados	[PT]méd (mg/L)	Referência	Abrangência dos Dados	[PT]méd (mg/L)	Referência	Col.7/Col.4
Seco	Gargalheiras	2002 - 2004	0,100	Eskinaze-Sant'Anna <i>et al.</i> (2007)	jun/10 - dez/10	0,095	Bezerra <i>et al.</i> (2014)	1,053
	Itans		0,800		jul/06 - nov/06	0,098		8,163
	Boqueirão das Parelhas		0,100		ago/07 - dez/07	0,077	Mesquita (2009)	1,299
	Passagem das Traíras		0,100		ago/08 - dez/08	0,083		1,205
	Sabugi		0,800			0,063		12,698
Chuvoso	Gargalheiras	2002 - 2004	0,300		jan/11 - abr/11	0,095	Bezerra <i>et al.</i> (2014)	3,158
	Itans		0,200			0,098		
	Boqueirão das Parelhas		0,200			0,077		
	Passagem das Traíras		0,080			0,083		
	Sabugi		0,060			0,063		

Fonte: Autor (2016).

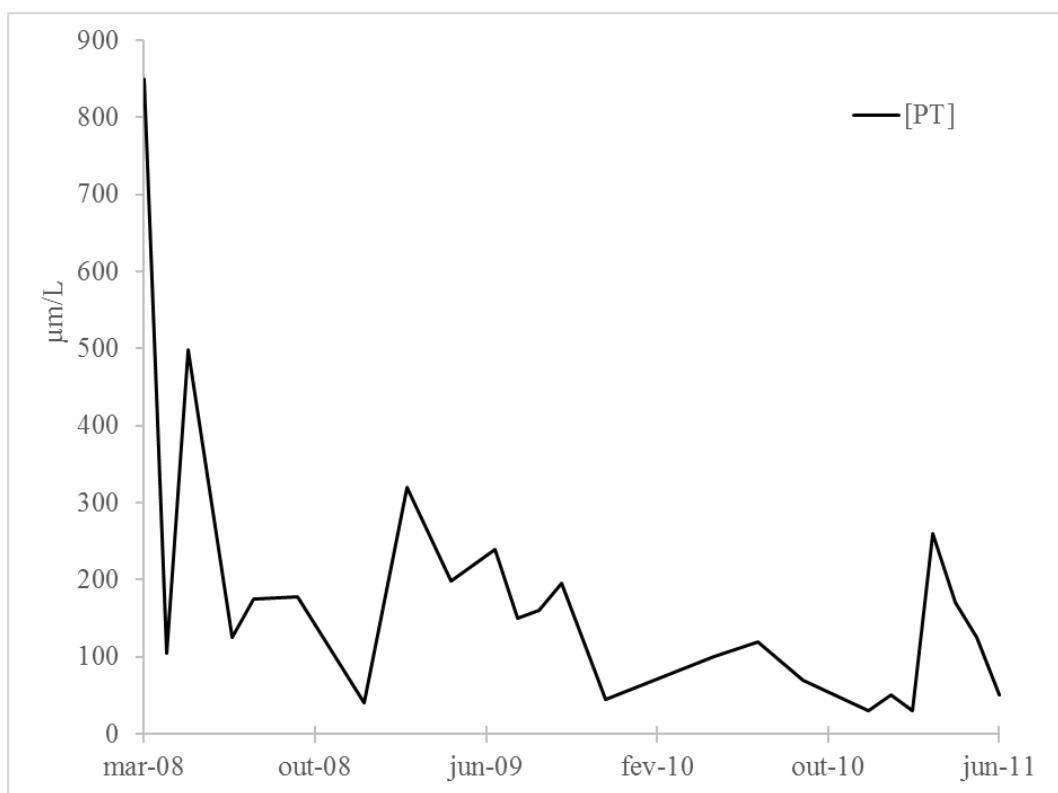
Figura 38 – Variação da concentração de fósforo total ao redor da média geral nos reservatórios norte rio-grandenses



Fonte: Autor (2016).

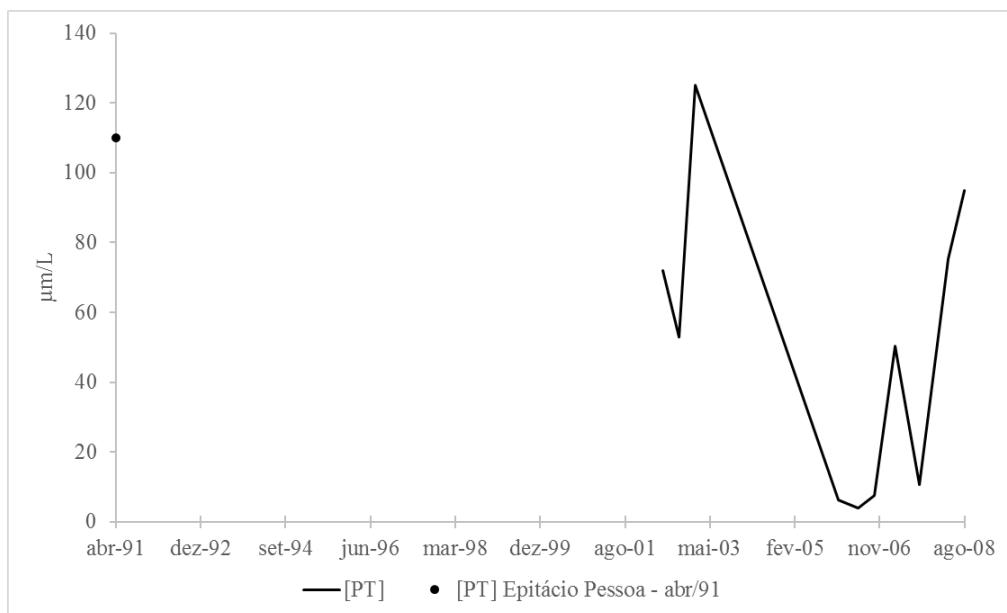
Os dados de concentração de fósforo total para os reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa, na Paraíba, podem ser vistos nas Figuras 39 e 40, respectivamente. Menores concentrações de fósforo total na superfície que no fundo observadas no açude Camalaú (AZEVEDO, 2012) correlaciona-se ao fato de que nas águas superficiais dos reservatórios geralmente se processa um rápido consumo do fósforo por produtores primários, além de sua associação com sedimentos (WETZEL, 1975; RYDIN, 2000; FRAZEN *et al.*, 2009).

Figura 39 – Variação temporal do fósforo total nos meses de março de 2008 a junho de 2011, com coletas bimestrais no açude Camalaú/PB.



Fonte: Autor (2016) com dados de Azevedo (2012).

Figura 40 – Variação temporal do fósforo total e do volume no açude Epitácio Pessoa/PB entre 1991 a 2008.



Fonte: Autor (2016) com dados de Araújo Júnior (2009).

A estatística descritiva dos dados dos reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa é exposta na Tabela 15. A classificação quanto aos graus de trofia é exposta na Tabela 16.

Comparando os valores da Tabela 15 com os das Tabela 12 e 10, verifica-se que, de todos os reservatórios até aqui discutidos, somente quatro reservatórios cearenses ultrapassam o limite máximo de concentração de fósforo total de Nurnberg (1996) para lagos no mundo. Mesmo que o reservatório Epitácio Pessoa tenha uma das menores concentrações médias de fósforo total até agora analisadas, ainda assim foi classificado majoritariamente como eutrófico nas classificações elencadas. Nem ele, nem o reservatório Camalaú, como aconteceu com os cearenses e os norte rio-grandenses, estão abaixo do limite máximo da CONAMA Nº 357/05 de 0,030 mg/L para classe 02 de qualidade.

Com relação às classificações tróficas dos países de clima temperado anteriormente citados, verifica-se, da mesma forma que os demais reservatórios do semiárido brasileiro até aqui analisados, que os reservatórios paraibanos são considerados de qualidade deteriorada com elevados valores de concentração de fósforo total: para a classificação escocesa (SEPA, 2016a), o Camalaú é hipereutrófico enquanto o Epitácio

Pessoa é eutrófico; para a classificação neozelandesa (WRC, 2016a), o Camalaú é hipereutrófico e o Epitácio Pessoa supereutrófico; para a classificação britânica (EA, 2010), todos os reservatórios paraibanos são de qualidade ruim; comparados ao lago Owikeno (SHORTREED & MORTON, 2003), no Canadá, a concentração média no Camalaú chega a ser aproximadamente 33 vezes maior, enquanto que a do Epitácio Pessoa vem a ser aproximadamente 10 vezes superior à concentração de fósforo total mais alta no lago Owikeno; comparados aos reservatórios brasileiros elencados por Salas & Martino (2001), Lamparelli (2004) e Pires *et al.* (2015) nos estados de Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro, os dados de fósforo total nos reservatórios paraibanos analisados são majoritariamente bastante superiores.

Tabela 15 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total nos reservatórios paraibanos analisados

RESERVATÓRIO	MÉDIA (mg/L)	MÁXIMO (mg/L)	MÍNIMO (mg/L)	$\Delta$ (mg/L)	DESVIO PADRÃO (mg/L)	CV (%)
PARAÍBA						
Camalaú	0,179	0,850	0,030	0,820	0,178	99,940
Epitácio Pessoa	0,055	0,125	0,004	0,121	0,044	79,575
GERAL	0,140	0,850	0,004	0,846	0,160	114,136

Fonte: Autor (2016).

Tabela 16 – Estado trófico dos reservatórios paraibanos analisados com base em diversas classificações tróficas

RESERVATÓRIOS	[PT]méd (mg/L)	TSI Carlson (1977)	Vollenweider (1965)	Vollenweider (1968)	EPA (1983)	Thomann & Mueller (1987)	Von Sperling (1994)	Nurnberg (1996)	Salas & Martino (2001)
Camalaú	0,179	79	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico
Epitácio Pessoa	0,055	62	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Geral	0,140	75	Eutrófico	Hipereutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico	Hipereutrófico

Fonte: Autor (2016).

O valor da concentração média de fósforo total no Epitácio Pessoa (0,055 mg/L) manteve-se aproximadamente igual no período de setembro de 2010 a setembro de 2011, conforme medido por Dias (2012), com valor correspondente a 0,051 mg/L em tal período. De março a agosto de 2011 o reservatório Epitácio Pessoa sangrou, somente deixando de verter em setembro de 2011, ainda que estando com 99,30% de sua capacidade volumétrica máxima (AESÁ, 2016). A renovação de água provinda de tal vertimento em seis meses consecutivos certamente contribuiu, mesmo que não expressivamente em face da proximidade dos valores medidos por Azevedo (2012) e Dias (2012), para o menor valor de concentração de fósforo total em 2010-2011. A proximidade de tais valores mesmo em meio a renovação da água ressalta a importância dos outros fatores que atuam no ciclo do fósforo (ANA, 2012). Já para o reservatório Camalaú, a concentração média de fósforo total medida entre setembro de 2010 e setembro de 2011 foi 0,0597 mg/L (DIAS, 2012), valor que corresponde a 33% da concentração média para tal reservatório conforme Tabela 15. Tal fato, contudo, condiz com as medições de Azevedo (2012) presentes na Figura 39, onde se vê que nos meses de setembro e dezembro de 2010 e janeiro e fevereiro de 2011 as concentrações de fósforo total são aproximadamente 0,050 mg/L tanto na superfície, quanto na região mais profunda do reservatório.

Dias (2012) ainda expõe a concentração média de fósforo total, no mesmo período, para o reservatório Poções como sendo 0,113 mg/L. Carvalho (2007), com medições entre dezembro de 2006 e março de 2007, obtém a concentração média de fósforo total para o reservatório Bodocongó igual a 2 mg/L com amplitude de valores entre 0,11 mg/L e 5,5 mg/L. Tais dados são confirmados pelo trabalho de Medeiros *et al.* (2006) cujas concentrações de fósforo total medidas no referido açude, em novembro de 2003, estão próximas de 0,500 mg/L. Comparando com os dados do Camalaú e Epitácio Pessoa (Tabela 15), percebe-se que os valores estão razoavelmente próximos aos do reservatório Poções, enquanto que os dados do Bodocongó são extremamente elevados. As razões que justificam a elevada concentração de fósforo total em tal açude residem principalmente na afluência de esgotos clandestinos ao reservatório oriundos do complexo industrial de Bodocongó e de Campina Grande e no despejo direto de resíduos sólidos provindos de regiões urbanas no entorno do açude (Carvalho, 2007). Mesmo que se tenha o aporte de nutrientes provindos do período da tilapicultura (caso das rações não consumidas) no reservatório Camalaú (Azevedo, 2012) e de esgotos ao Epitácio Pessoa

(Araújo Júnior, 2009), tal aporte não é tão elevado quanto no Bodocongó (Carvalho, 2007).

Arruda (2009) fornece a concentração média de fósforo total para o reservatório Acauã entre agosto de 2007 e agosto de 2008 de valor igual a 0,2077 mg/L, no período seco, e 0,40881 mg/L, no período chuvoso. Luna (2008) fornece, para o mesmo reservatório, no período entre novembro de 2005 e dezembro de 2006, uma concentração média de fósforo total da ordem de 0,040 mg/L, com amplitude de valores próximo de zero até 0,090 mg/L. Já Vilar (2009) expõe as concentrações médias de fósforo total em quatro reservatórios paraibanos entre setembro de 2006 e fevereiro de 2008 cujos valores são: Roque – 0,16671 mg/L, no período seco, e 0,0893 mg/L, no período chuvoso; Bola I – 0,03909 mg/L, no período seco, e 0,07433 mg/L, no período chuvoso; Luiz Heleno – 0,12814 mg/L, no período seco, e 0,11822 mg/L, no período chuvoso; Namorados – 0,06467 mg/L, no período seco, e 0,09044 mg/L, no período chuvoso. Percebe-se que os reservatórios Camalaú e Epitácio Pessoa possuem valores próximos de concentração média de fósforo total dos demais reservatórios citados do semiárido paraibano.

A Figura 41 expõe a variação da concentração de fósforo total nos reservatórios paraibanos analisados. Ao contrário dos reservatórios norte rio-grandenses, os dados de fósforo dos reservatórios paraibanos apresentam grande variação dos dados ao entorno da média geral. Com o coeficiente de variação geral chegando a aproximadamente 115%, é de se crer que uma causa possível para tal valor seja os maiores aportes de fósforo em determinados períodos do ano em ambos os reservatórios (caso da tilapicultura no Camalaú).

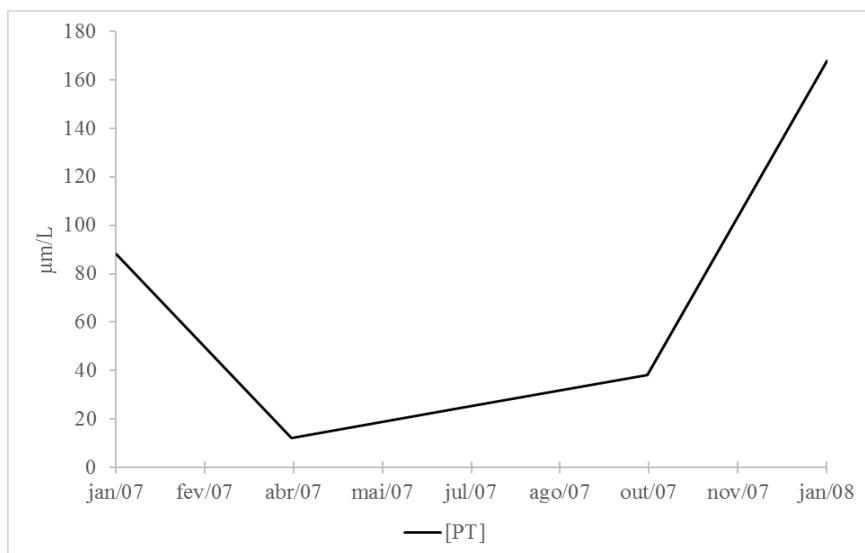
Figura 41 – Variação da concentração de fósforo total em torno da média geral nos reservatórios paraibanos



Fonte: Autor (2016).

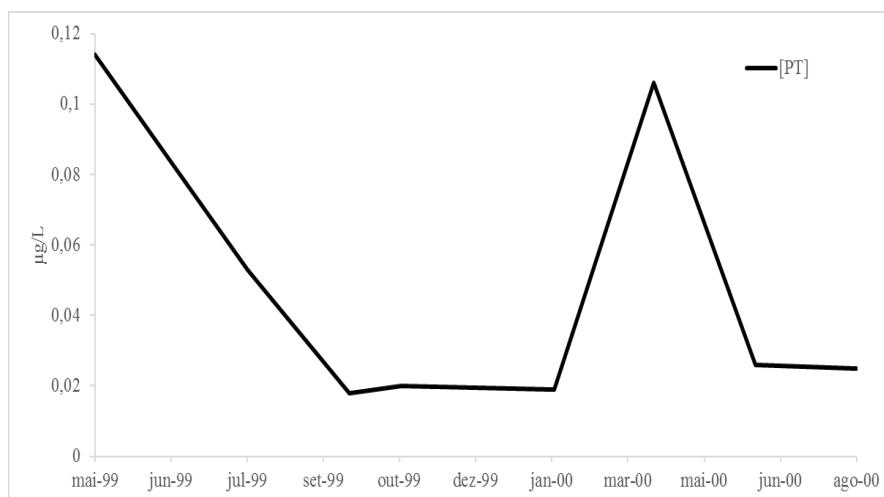
Os dados de concentração de fósforo total para os reservatórios Sobradinho e Tapacurá, na Bahia e em Pernambuco, respectivamente, podem ser vistos conforme Figuras 42 e 43. A estatística descritiva de tais dados é exposta nas Tabelas 17 e 18. A classificação quanto aos graus de trofia é exposta na Tabela 19.

Figura 42 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Sobradinho/BA entre janeiro de 2007 e janeiro de 2008.



Fonte: Costa *et al.* (2009).

Figura 43 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Tapacurá/PE entre maio de 1999 e agosto de 2000.



Fonte: Autor (2016) com dados de Pernambuco (2016d).

Tabela 17 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total no reservatório Sobradinho/BA

RESERVATÓRIO	MÉDIA (mg/L)	MÁXIMO (mg/L)	MÍNIMO (mg/L)	$\Delta$ (mg/L)	DESVIO PADRÃO (mg/L)	CV (%)
BAHIA						
Sobradinho	0,066	0,168	0,012	0,156	0,064	96,336

Fonte: Autor (2016).

Tabela 18 – Estatística descritiva das concentrações de fósforo total no reservatório Tapacurá/PE

RESERVATÓRIO	MÉDIA (mg/L)	MÁXIMO (mg/L)	MÍNIMO (mg/L)	$\Delta$ (mg/L)	DESVIO PADRÃO (mg/L)	CV (%)
PERNAMBUCO						
Tapacurá	0,048	0,114	0,018	0,096	0,040	84,296

Fonte: Autor (2016).

Tabela 19 – Estado trófico dos reservatórios na Bahia e em Pernambuco analisados com base em diversas classificações tróficas

RESERVATÓRIOS	[PT]méd (mg/L)	TSI Carlson (1977)	Vollenweider (1965)	Vollenweider (1968)	EPA (1983)	Thomann & Mueller (1987)	Von Sperling (1994)	Nurnberg (1996)	Salas & Martino (2001)
Sobradinho	0,066	65	Mesoeutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico
Tapacurá	0,048	60	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico	Eutrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Eutrófico

Fonte: Autor (2016).

As concentrações médias de fósforo total para os reservatórios Sobradinho e Tapacurá apresentam um padrão de comportamento semelhante aos dos demais reservatórios do semiárido brasileiro analisados ou utilizados para comparação. Nesse sentido, são classificados majoritariamente como eutróficos, estão além do limite máximo de concentração de fósforo total estabelecido pelo CONAMA Nº 357/05, as cargas de fósforo oriundas do escoamento superficial na época chuvosa têm papel relevante no aumento da concentração de fósforo interna ao reservatório; cargas de fósforo oriundas de regiões urbanas tem, da mesma forma, papel relevante na manutenção e elevação das concentrações de fósforo em tais reservatórios; possuem altas temperaturas, ph elevado, taxas elevadas de nitrato, condições propícias para liberação de fósforo no hipolímnio com a presença de íons de ferro reduzidos, etc (LASERAS, 1991; GUNKEL *et al.*, 2003; COSTA, 2004; COSTA *et al.*, 2009). Novamente isto é visto em relação às classificações tróficas dos países de clima temperado e das concentrações de fósforo total nos reservatórios em Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro. Neste caso, para a classificação escocesa (SEPA, 2016a), o Sobradinho e o Tapacurá são eutróficos; para a classificação neozelandesa (WRC, 2016a), o Sobradinho e o Tapacurá são eutróficos, da mesma forma; para a classificação britânica (EA, 2010), ambos reservatórios são de qualidade ruim; comparados ao lago Owikeno (SHORTREED & MORTON, 2003), no Canadá, a concentração média no Sobradinho chega a ser aproximadamente 12 vezes maior, enquanto que a do Tapacurá vem a ser aproximadamente 8 vezes superior à concentração de fósforo total mais alta no lago Owikeno; comparados aos reservatórios brasileiros elencados por Salas & Martino (2001), Lamparelli (2004) e Pires *et al.* (2015) nos estados de Brasília, São Paulo e Rio de Janeiro, os dados de fósforo total em ambos reservatórios analisados são majoritariamente superiores.

A concentração de fósforo total média do Sobradinho calculada através dos dados de Costa *et al.* (2009), entre janeiro de 2007 e janeiro de 2008, se aproxima dos dados de concentração de fósforo total de Costa (2004), medidos em 62 pontos de coleta no reservatório entre 17 junho a 10 de agosto de 2002, cuja concentração média na superfície é igual a 0,0853 mg/L e no fundo igual a 0,0834 mg/L. Além disso, se aproxima também dos dados de concentração de fósforo total medidos por Lima & Severi (2014) entre dezembro de 2007 e setembro de 2008. Já os dados do reservatório Tapacurá (PERNAMBUCO, 2016d) estão de acordo com os dados de Gunkel *et al.* (2003) que, com base em dados medidos em março, abril e dezembro de 2002 e janeiro e fevereiro de

2003, delimita os intervalos de variação da concentração de fósforo total no epilímnio do reservatório entre 0,030 e 0,100 mg/L, enquanto que no hipolímnio a variação encontra-se entre 0,140 e 0,180 mg/L, ainda que a concentração do Tapacurá (Tabela 18) não seja tão elevada quando comparada a outros reservatórios pernambucanos como o Saco I (MONTEIRO *et al.*, 2007), o Duas Unas (SANTOS & FLORENCIO, 2001) e o Arcoverde (DIAS, 2009).

Visto a correlação existente entre elevações da concentração de fósforo total com subsequentes elevações da clorofila-a em corpos hídricos lênticos (CHAPRA, 1997; ESTEVES, 1998; MOSS, 2010) e, dado que a proliferação de organismos fototróficos própria da eutrofização aumenta os custos de tratamento da água (VON SPERLING, 1996; AMORIM, 2002), é interessante apresentar graficamente a variação de fósforo total (Tabela 10) juntamente com a variação de clorofila-a (CEARÁ, 2016a) a fim de se observar, qualitativamente, e discutir se tal relação é evidente ou não nos reservatórios do semiárido brasileiro, fato este de relevante interesse na gestão de recursos hídricos na região. Nesse sentido, escolheram-se os reservatórios Gavião, Banabuiú e Castanhão (sendo o Gavião de pequeno porte e os demais de médio porte, segundo classificação de STRASKRABA & TUNDISI (1999) *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008) para análise da variação do fósforo total juntamente com a de clorofila-a. Dentre estes reservatórios, a CAGECE já enfrenta problemas no tratamento da água oriunda do Gavião devido ao entupimento dos filtros da ETA decorrente do excesso de algas nele existentes (AMORIM, 2002).

Em cada um dos gráficos da variação de fósforo total e clorofila-a foram utilizados intervalos de dados oriundos de diversos trabalhos nos referidos açudes escolhidos (BRAGA (2006); FREIRE (2007); HIJO (2009); VIDAL & CAPELO NETO (2014)) a fim de comparar com os dados utilizados na calibração do modelo oriundos do Portal Hidrológico do Ceará (CEARÁ, 2016a). O limite máximo para classificar o reservatório como eutrófico proposto por Salas & Martino (2001) para lagos tropicais também foi utilizado como referência para comparação. Além disso, os dados apresentados e discutidos para os reservatórios Tapacurá (PERNAMBUKO, 2016d), Epitácio Pessoa (ARAÚJO JÚNIOR, 2009) e Sobradinho (LIMA & SEVERI (2014) visto COSTA *et al.* (2009) não disponibilizar valores de concentração de clorofila-a em tal reservatório) foram também utilizados para comparação com os dados do Gavião, Banabuiú e Castanhão por serem classificados como reservatórios pequeno, médio e grande,

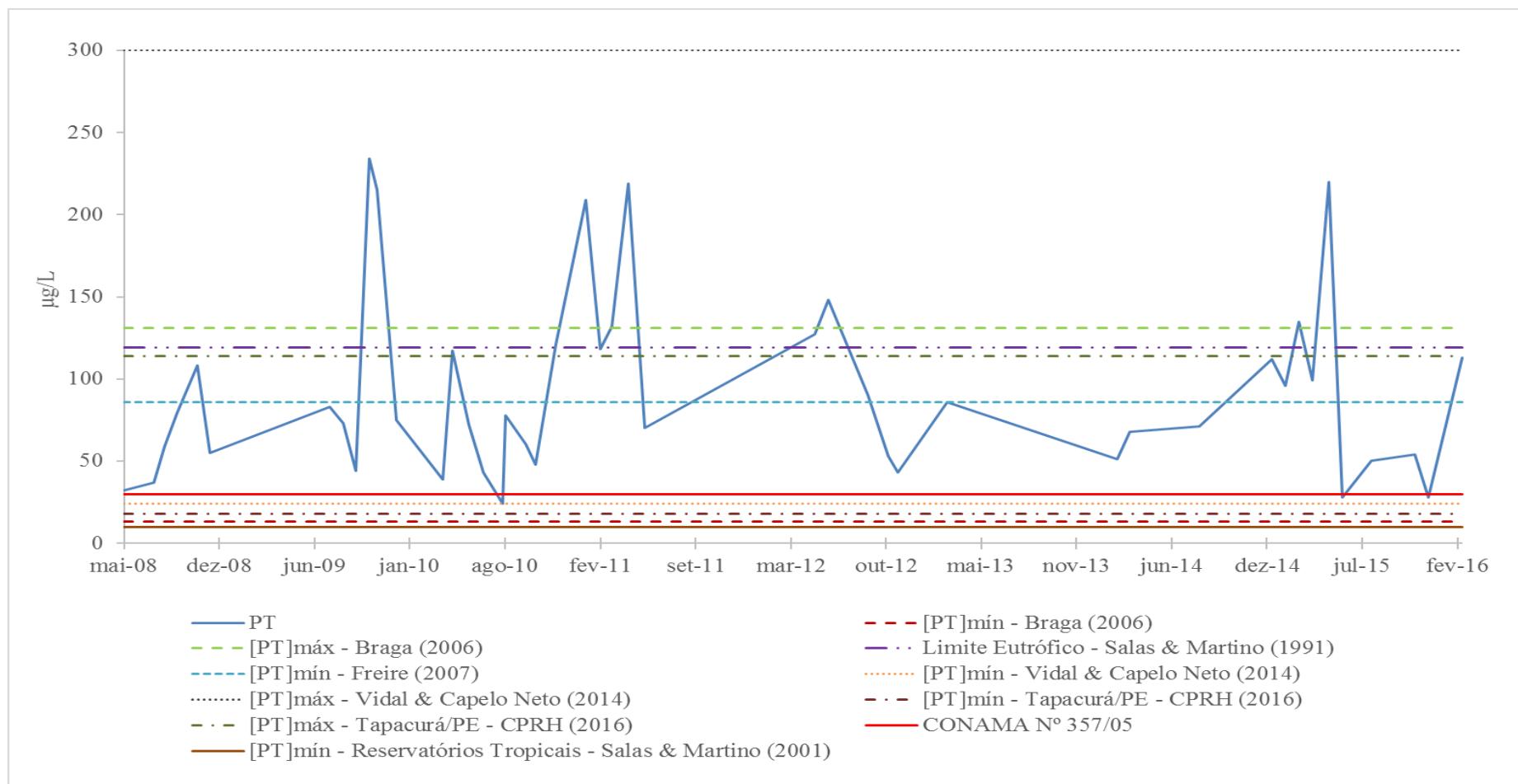
respectivamente, segundo a classificação de Straskraba & Tundisi (1999 *apud* TUNDISI & MATSUMURA TUNDISI, 2008). Mesmo o Castanhão não sendo considerado um reservatório grande em tal classificação, por sua grande extensão de sua bacia hidrográfica (ocupando quase metade do território do Ceará) e sua grande capacidade volumétrica (COGERH, 2011b) não se julgou inopportuna a comparação dos dados de fósforo total e clorofila-a em tal reservatório com os dados do Sobradinho.

As Figuras 44 e 45 evidenciam a variação de fósforo total e clorofila-a, respectivamente, para o reservatório Gavião. Verifica-se que somente em três pontos da série de dados as concentrações de fósforo total estão abaixo do limite estabelecido pela CONAMA Nº 357/05. Nota-se que durante alguns meses o Gavião encontra-se com valores de [PT] maiores que o limite de grau eutrófico para lagos tropicais sugerido por Salas & Martino (2001), superando inclusive o limite máximo exposto Braga (2006) em tal reservatório. Em comparação com o reservatório Tapacurá (PERNAMBUCO, 2016d), boa parte das concentrações de fósforo no Gavião obedecem estão dentro da amplitude de variação do fósforo total naquele açude, ainda que em alguns momentos a [PT] atinja valores quase duas vezes maiores que seu limite máximo. Vê-se ainda que as concentrações de fósforo total, na maior parte do tempo, estão abaixo da concentração mínima medida por Freire (2007) entre novembro de 1988 e dezembro 1998, evidenciando uma diminuição da concentração de fósforo total no Gavião nas décadas posteriores a tal trabalho. O comportamento da clorofila-a, por sua vez, permanece um maior número de meses abaixo do limite estabelecido pela CONAMA 357/05 quando comparada ao fósforo total. Percebe-se ainda que a variação da clorofila-a, ainda que supere consideravelmente, por quase um ano, os limites de Salas & Martino (2001), do reservatório Tapacurá (PERNAMBUCO, 2016d) e de Freire (2007), ainda assim permanece abaixo do limite máximo de clorofila-a medido por Vidal & Capelo Neto (2014).

A Figura 46 fornece a variação da concentração de fósforo total juntamente com a variação de clorofila-a para o reservatório Gavião. Ainda que Freire (2007) exponha um coeficiente de correlação entre ambas as concentrações de 0,6560 em tal reservatório e, de modo geral, as pesquisas evidenciem essa correlação de crescimento paralelo entre [PT] e [Cla] (CHAPRA, 1997; ESTEVES, 1998; MOSS, 2010), a análise qualitativa do gráfico evidencia, em alguns meses, um aumento da concentração de fósforo total com particular queda da concentração de clorofila-a. Os maiores valores de [PT] foram

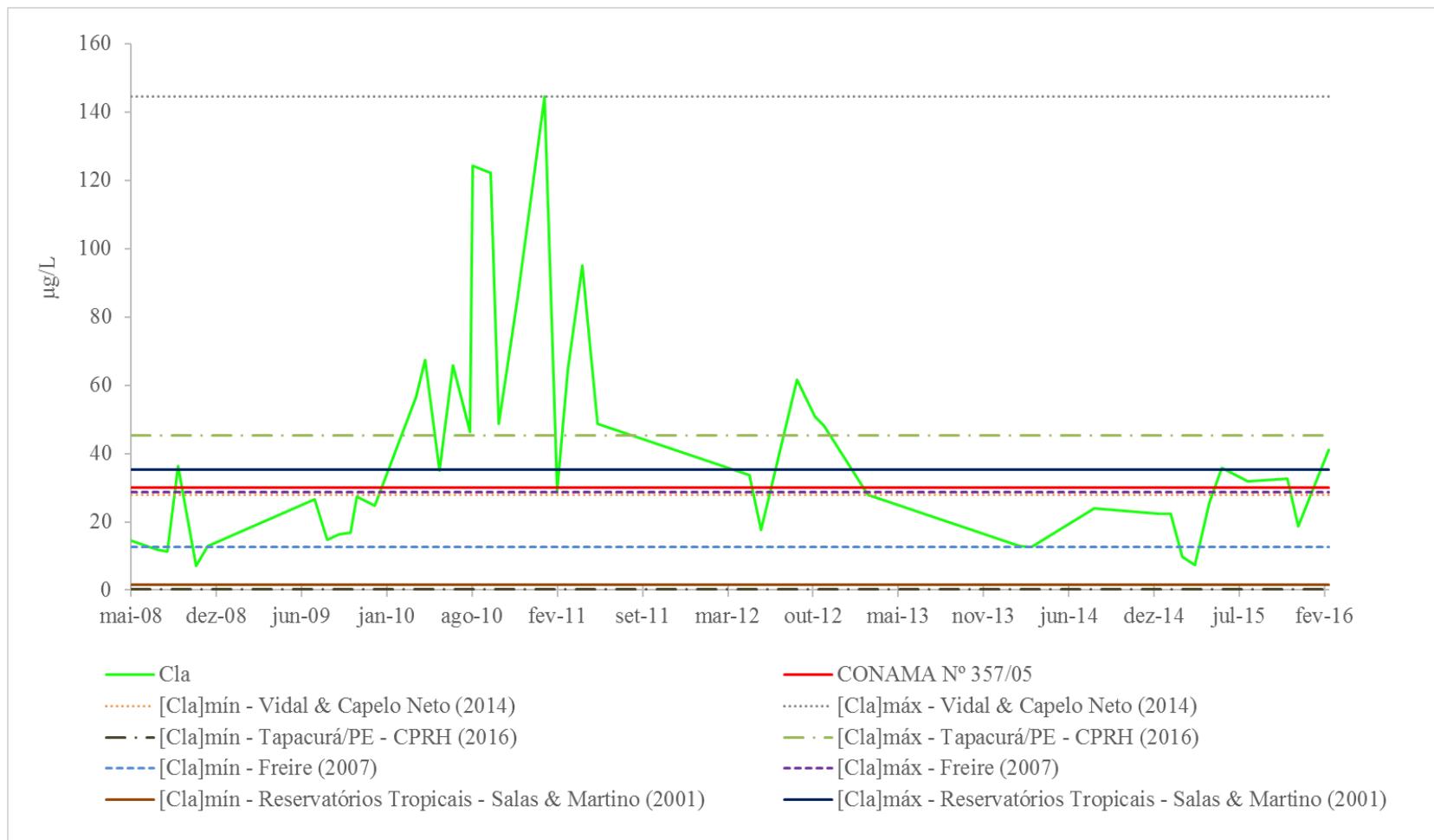
observados quando o reservatório chegava próximo de sua capacidade volumétrica máxima, mesmos pontos onde se observava as maiores quedas de [Cla].

Figura 44 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Gavião comparado a valores de referência de diferentes autores



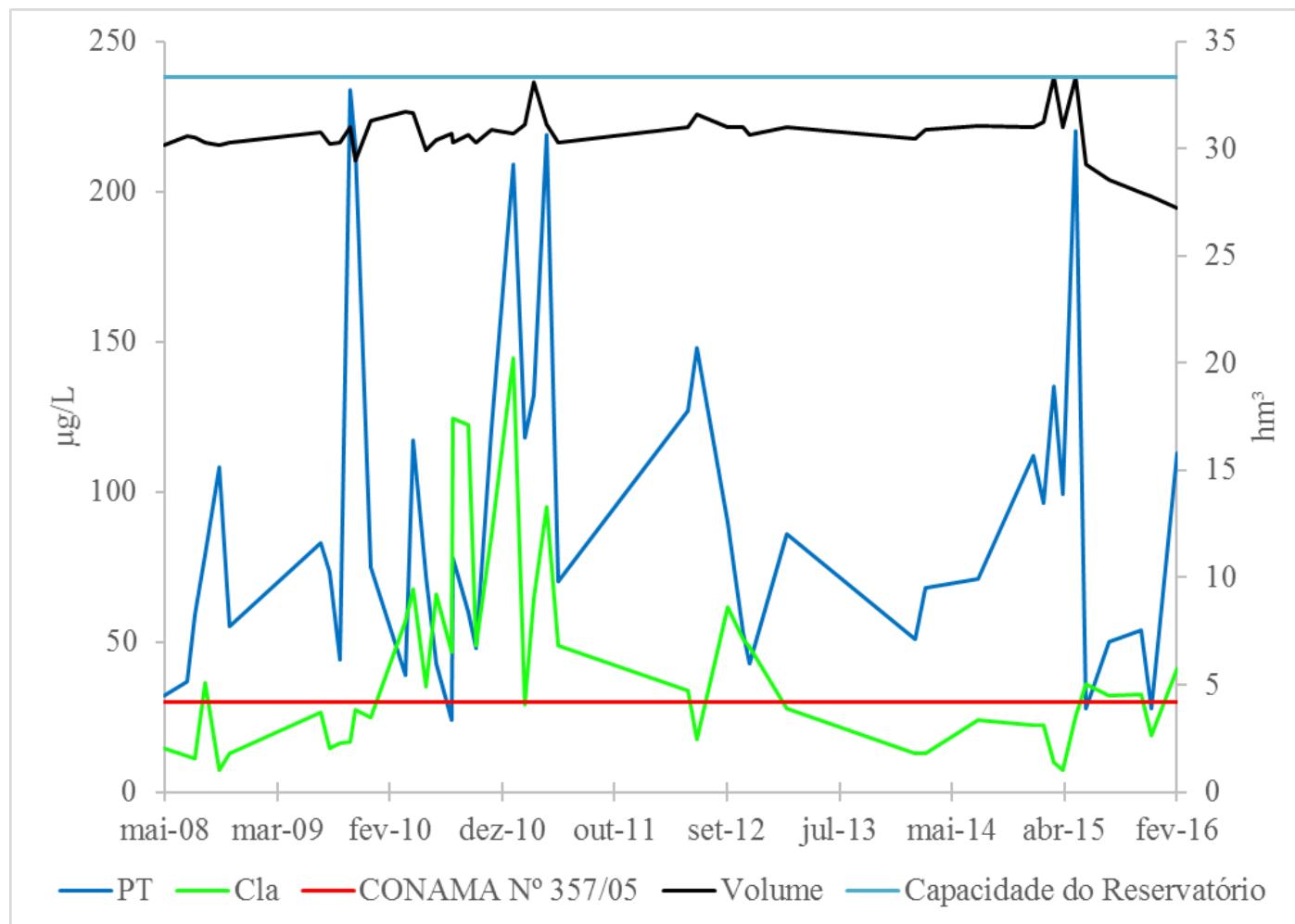
Fonte: Autor (2016).

Figura 45 – Variação temporal de clorofila *a* no reservatório Gavião comparado a valores de referência de diferentes autores



Fonte: Autor (2016).

Figura 46 - Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila *a* no reservatório Gavião

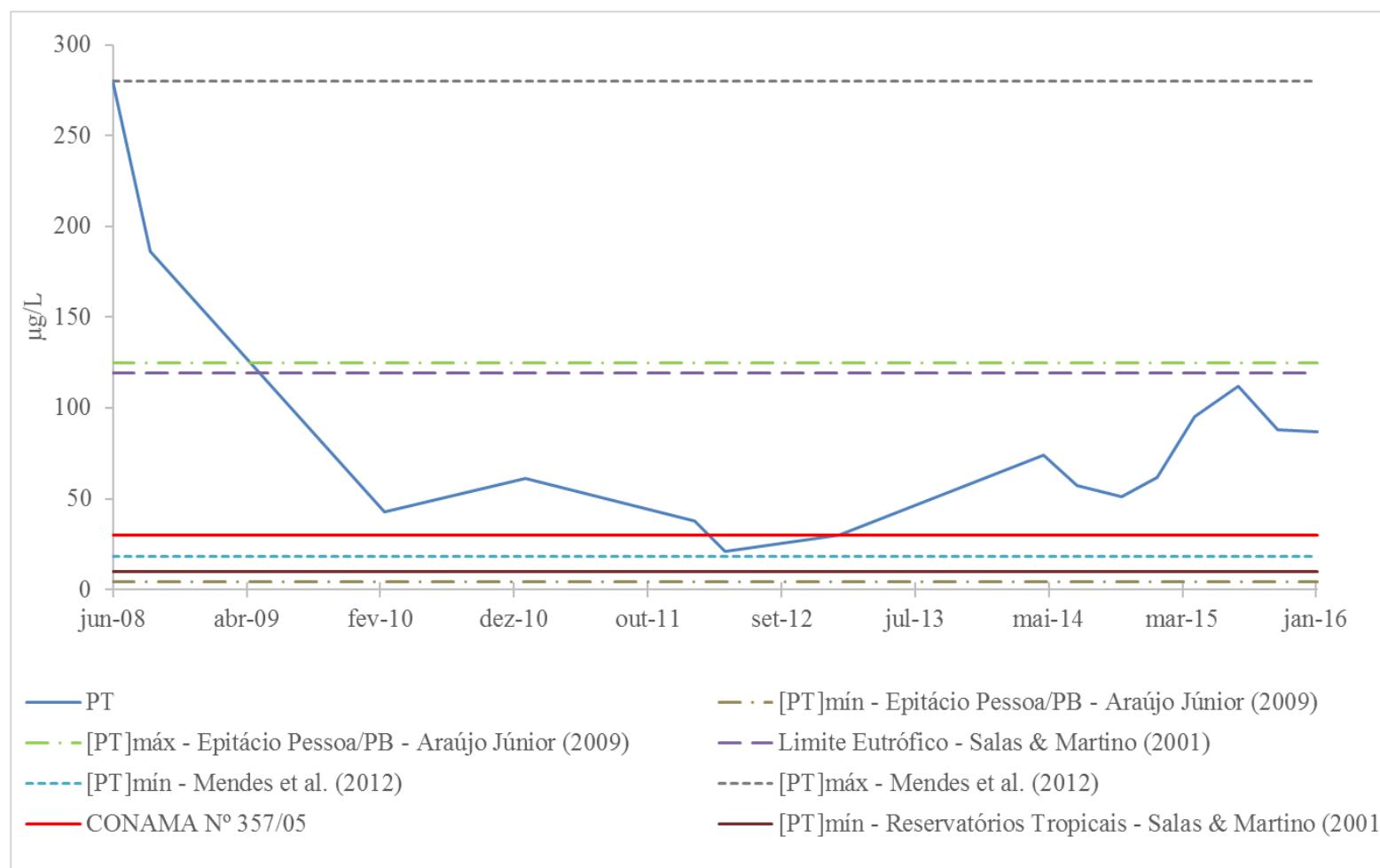


Fonte: Autor (2016).

As Figuras 47 e 48 evidenciam a variação de fósforo total e clorofila-a, respectivamente, para o reservatório Banabuiú. Verifica-se, semelhantemente ao caso do Gavião, que somente em poucos meses a concentração de fósforo total encontra-se abaixo do limite estabelecido pela CONAMA Nº 357/05. Interessante notar que, ao contrário do Gavião, o Banabuiú possui uma concentração de fósforo total interna própria de reservatórios de clima tropical (SALAS & MARTINO, 2001), ainda que no começo da série de fósforo, durante aproximadamente um ano e meio, as concentrações estejam acima do limite eutrófico para tais corpos hídricos. Da mesma forma, as concentrações analisadas, em sua grande parte, estão dentro da amplitude de concentração de fósforo total para o reservatório Epitácio Pessoa (ARAÚJO JÚNIOR, 2009), condizente com as características semelhantes entre os dois reservatórios. Por fim, Mendes *et al.* (2012) mediram uma concentração máxima no Banabuiú no valor de 0,280 mg/L, o que, de fato, não veio a ser superado pelos dados analisados. A concentração de clorofila-a, ainda melhor que o caso do Gavião, durante boa parte do tempo em estudo permanece abaixo do limite do CONAMA 357/05, obedece ao limite máximo de Salas & Martino (2001) e está abaixo da concentração máxima de clorofila-a medida por Mendes *et al.* (2012). A diferença significante está em que, durante todo o tempo analisado, a variação da [Cla] está acima da concentração máxima de [Cla] medida por Araújo Junior (2009). Tal fato condiz com a diferença de TSI entre os dois açudes (CARLSON, 1977). Verifica-se que, enquanto o Epitácio Pessoa possui TSI de 62, o Banabuiú possui TSI igual a 68 ou, em outras palavras, uma biomassa cerca de 50% maior entre deste comparado àquele.

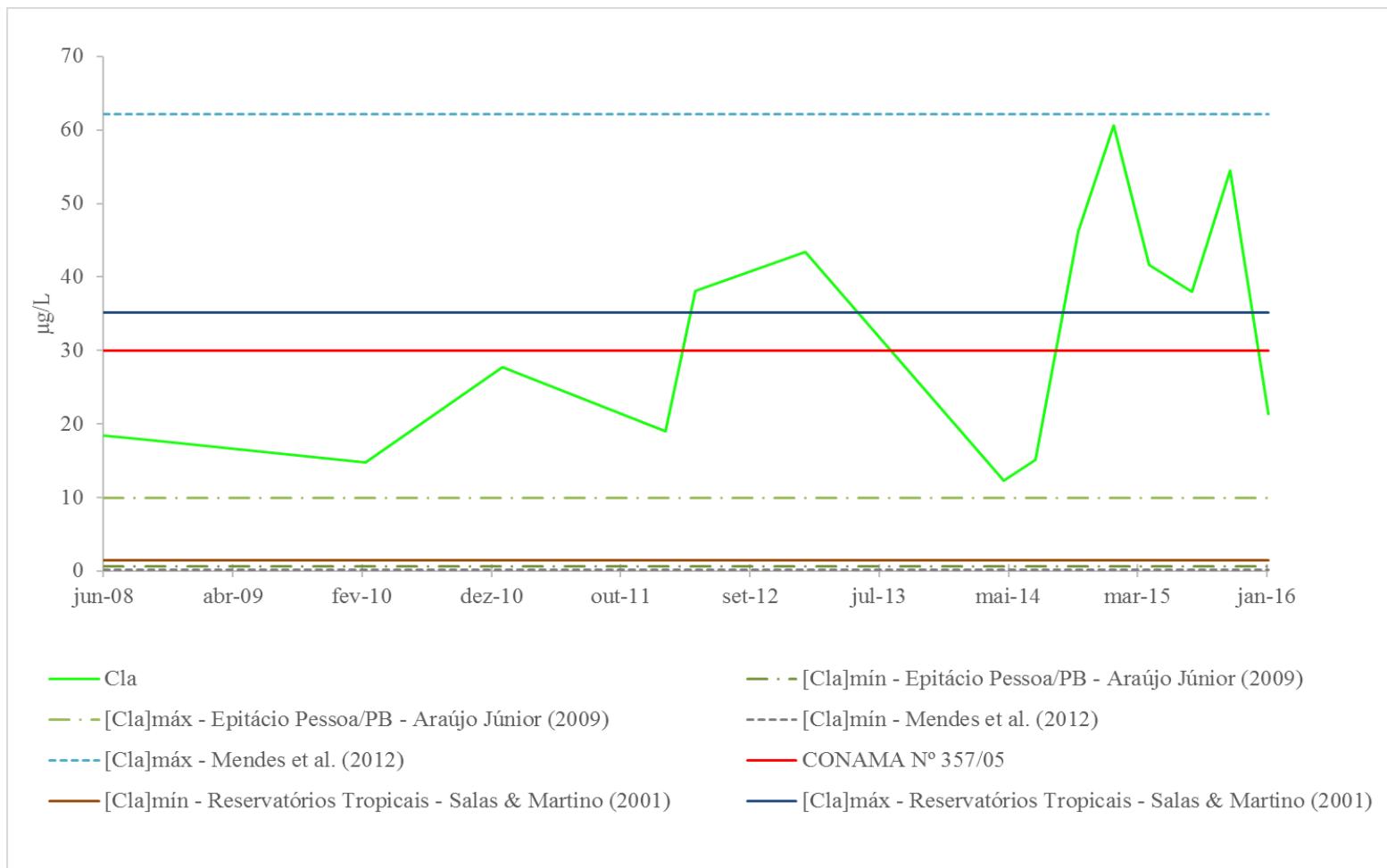
A Figura 49 fornece a variação da concentração de fósforo total juntamente com a variação de clorofila-a para o reservatório Banabuiú. Diferentemente do reservatório Gavião, a análise qualitativa entre as duas variações parece indicar uma correlação aos moldes daquelas presentes nos trabalhos de Chapra (1997) e Moss (2010), existindo somente ao redor de setembro de 2012 uma queda da [PT] com elevação da [Cla].

Figura 47 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Banabuiú comparado a valores de referência de diferentes autores



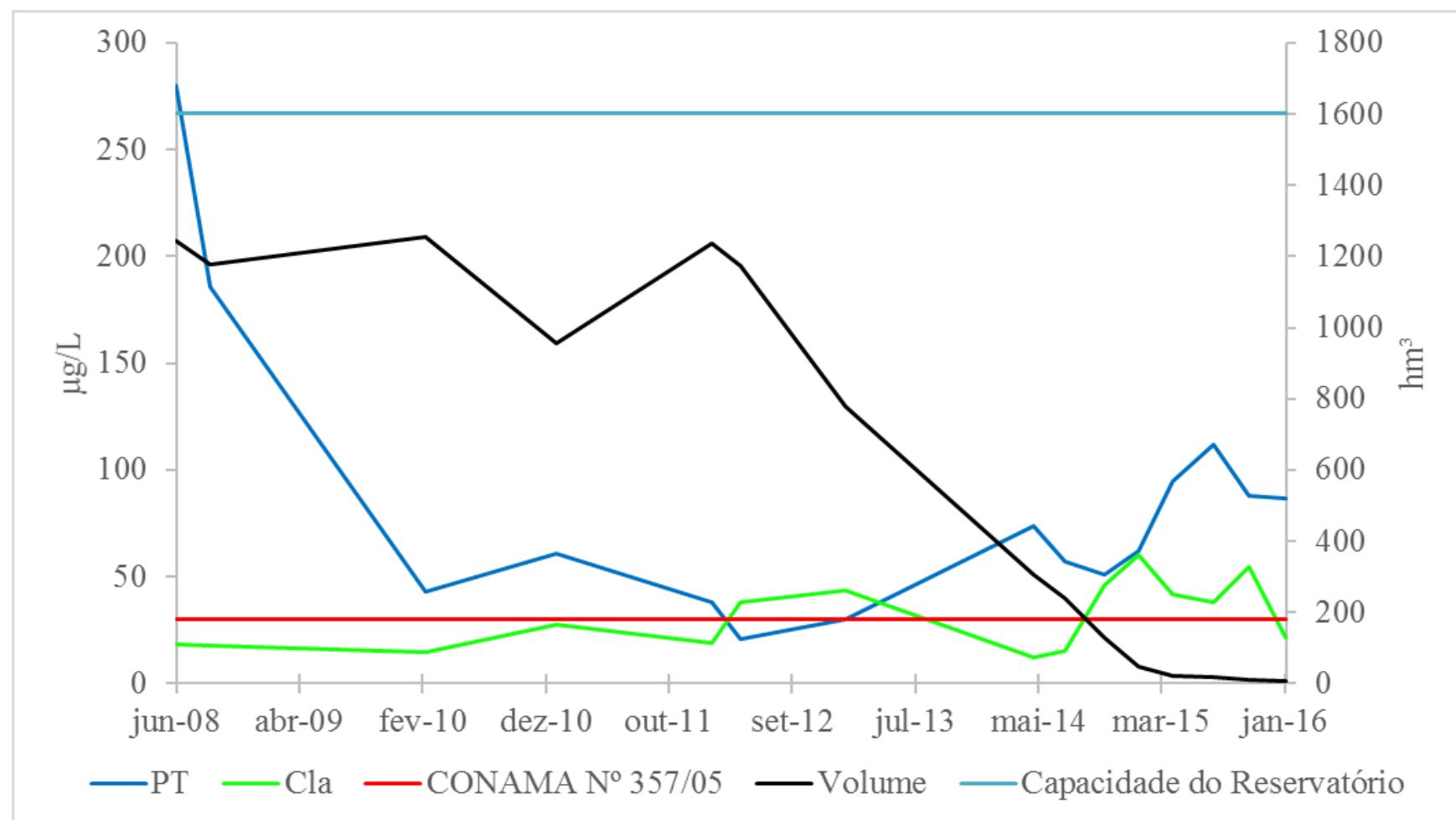
Fonte: Autor (2016).

Figura 48 – Variação temporal de clorofila *a* no reservatório Banabuiú comparado a valores de referência de diferentes autores



Fonte: Autor (2016).

Figura 49 - Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila *a* no reservatório Banabuiú

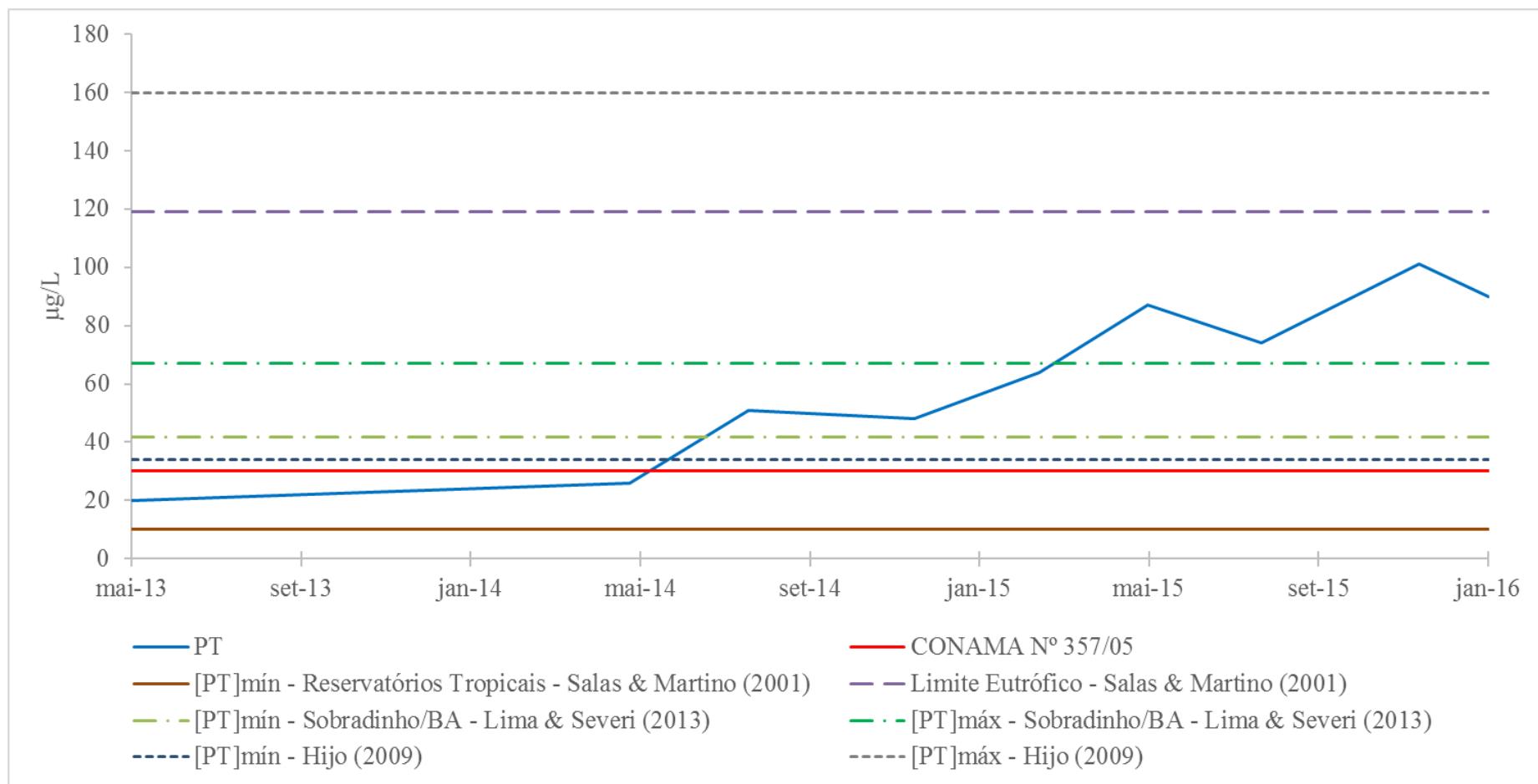


Fonte: Autor (2016).

As Figuras 50 e 51 evidenciam a variação de fósforo total e clorofila-a, respectivamente, para o reservatório Castanhão. O Castanhão, ainda mais que o Banabuiú, permanece com toda a variação de fósforo total entre os limites de concentração de fósforo total para lagos tropicais de Salas & Martino (2001). Comparado ao Gavião e ao Banabuiú, o Castanhão é o que possui concentração de fósforo total por maior número de meses abaixo do limite da CONAMA 357/05. Da mesma forma, toda a concentração de fósforo total permanece abaixo da concentração máxima medida por Hijo (2009), ainda que em alguns meses se encontre acima da concentração máxima de fósforo total no Sobradinho (LIMA & SEVERI, 2014). Para a clorofila-a, somente o Castanhão obedece integralmente ao limite estabelecido pelo CONAMA Nº 357/05. Mais ainda, a [Cla] permanece sempre bastante inferior que a concentração máxima de Cla para lagos tropicais exposta por Salas & Martino (2001). Além disso, majoritariamente a variação de clorofila-a obedece ao limite medido por Hijo (2009) e se encontra acima da concentração máxima medida no Sobradinho (LIMA & SEVERI, 2014).

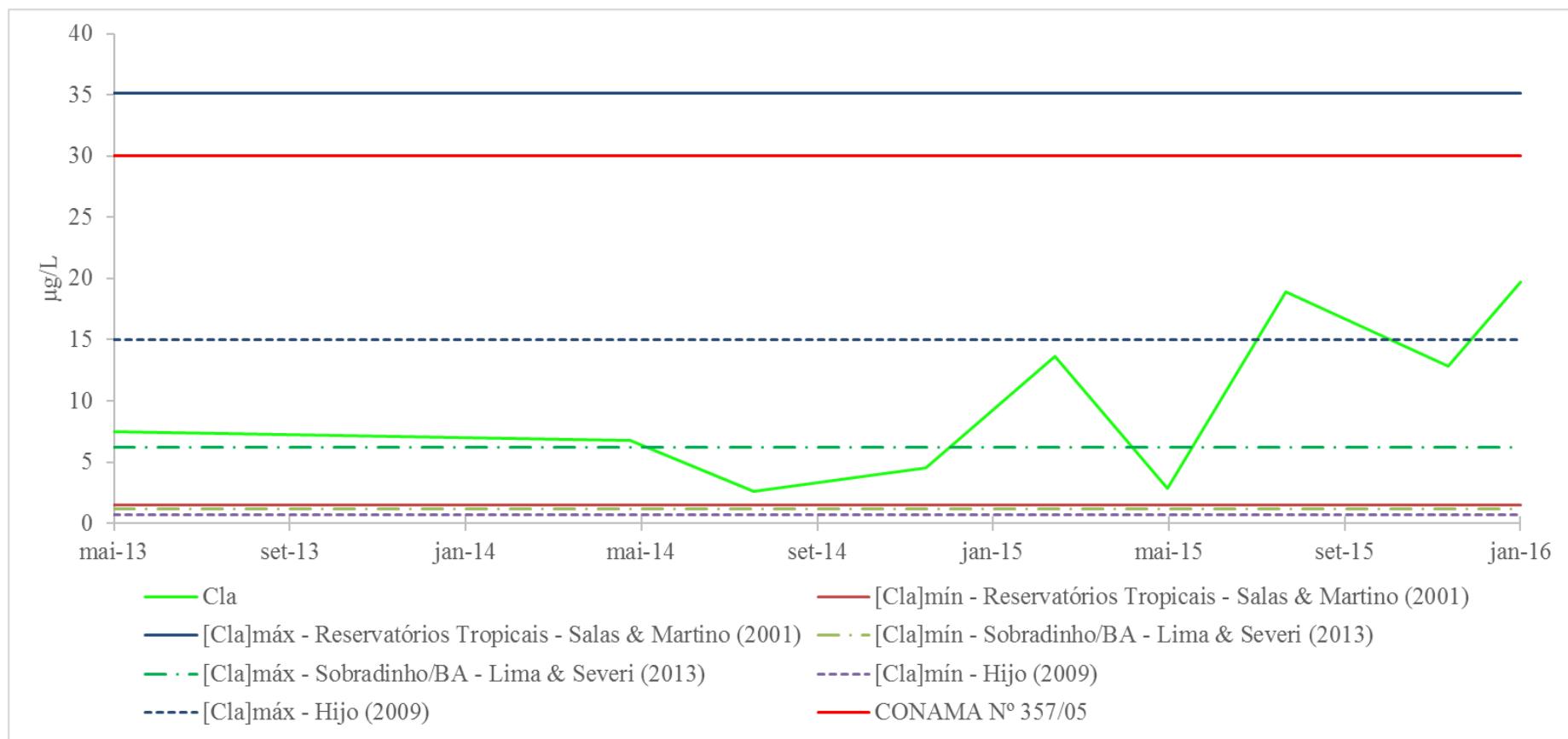
A Figura 52 fornece a variação da concentração de fósforo total juntamente com a variação de clorofila-a para o reservatório Castanhão. Semelhantemente ao Gavião, percebe-se que quando há um aumento da concentração de fósforo total no reservatório, há uma queda da concentração de clorofila-a. Percebe-se isto sobretudo no mês de maio de 2015. Dessa forma, verifica-se, ainda que qualitativamente, que a correlação entre os dois nutrientes, aos moldes de CHAPRA (1997), deve ser melhor analisada para os reservatórios do semiárido brasileiro em face dos outros fatores (sobretudo a temperatura) que influenciam em processos como liberação de fósforo por parte de sedimentos e a própria eutrofização (ANA, 2012).

Figura 50 – Variação temporal do fósforo total no reservatório Castanhão comparado a valores de referência de diferentes autores



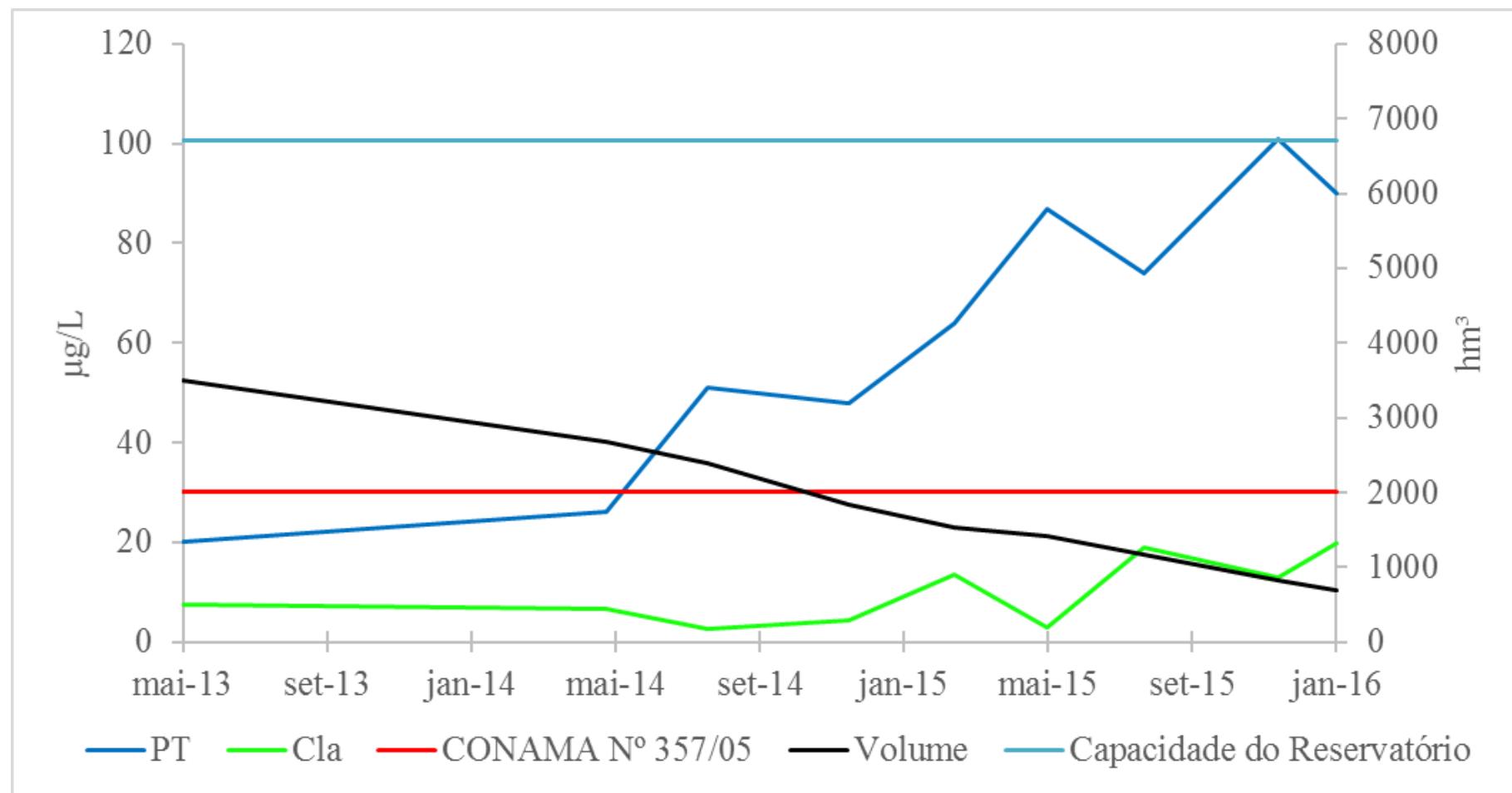
Fonte: Autor (2016).

Figura 51 – Variação temporal de clorofila *a* no reservatório Castanhão comparado a valores de referência de diferentes autores



Fonte: Autor (2016).

Figura 52 - Variação temporal conjunta do fósforo total e clorofila *a* no reservatório Castanhão



Fonte: Autor (2016).

### 5.1.2. Carga afluente de fósforo total

Conforme dito no Capítulo 4, as cargas afluentes de fósforo até os reservatórios cearenses foram obtidas pelos inventários ambientais da COGERH, com exceção dos reservatórios Santo Anastácio e Gavião. Os valores de TR e  $k$  para o Santo Anastácio fornecidos por Araújo (2016) levaram a obtenção somente da carga afluente ao Gavião a partir do trabalho de Vidal (2011). A Tabela 20 apresenta a carga de entrada de fósforo em tal reservatório entre janeiro e maio de 2011 cuja a média de tais valores foi considerada, para efeito de cálculo, como a carga média anual afluente de fósforo ao Gavião. As cargas de fósforo dos demais reservatórios do semiárido brasileiro foram obtidas através dos trabalhos de *Gunkel et al.* (2003), Mesquita (2009), Azevedo (2012), Oliveira (2012), Lima & Severi (2014), Silva Júnior (2013), Bezerra *et al.* (2014), além dos dados de Pernambuco (2010) e CHESF (2016), conforme explanado no referido capítulo.

Tabela 20 – Carga de fósforo de entrada, saída e balanço entre janeiro e maio de 2011 no reservatório Gavião.

	<b>Entradas (ton/mês)</b>	<b>Saída (ton/mês)</b>	<b>Balanço (ton/mês)</b>
JAN	9,259	7,436	1,823
FEV	8,817	8,204	0,613
MAR	14,905	6,209	8,696
ABR	15,877	7,436	8,441
MAI	14,355	5,868	8,487

Fonte: Adaptado de Vidal (2011).

A Tabela 21 resume os dados de carga de fósforo afluente nos trinta e três reservatórios. É interessante notar que os valores das cargas aos açudes nordestinos, ainda que algumas vezes sejam bem mais elevados que aqueles dos reservatórios em regiões de clima temperado e tropical, têm a mesma ordem de grandeza das cargas afluentes aos reservatórios das demais regiões do Brasil. Derisio & Perkins (1981) expõem, a partir de amostragens nos tributários e no próprio açude, a carga afluente de fósforo ao reservatório Guarapiranga, no estado de São Paulo, de valor igual a 18 ton/ano. Tal valor supera as cargas dos reservatórios Forquilha, Acarape do Meio, Quincoé, Sítios Novos, Curral

Velho, Colina, Rivaldo de Carvalho, Flor do Campo, Canafistula, Olho d'Água, Gargalheiras, Dourado, Boqueirão das Parelhas, Sabugi e Tapacurá.

Tabela 21 – Carga de fósforo aos reservatórios do semiárido brasileiro analisados

<b>RESERVATÓRIOS</b>	<b>W (ton/ano)</b>
<b>CEARA</b>	
Forquilha	4,175
Orós	624,188
Castanhão	656,972
Gavião	151,711
Banabuiú	94,421
Acarape do Meio	5,642
Arrebita	10,078
General Sampaio	287,328
Pacajus	31,720
Quincoé	0,802
Itaúna	41,108
Sítios Novos	17,331
Curral Velho	12,661
Colina	6,180
Rosário	20,701
Rivaldo de Carvalho	1,342
Flor do Campo	5,085
Edson Queiroz	99,222
Caxitoré	83,321
Canafistula	2,712
Olho d'Água	3,694
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>	
Gargalheiras	6,130
Cruzeta	10,180
Dourado	2,000
Passagem das Traíras	78,149 77,967
Boqueirão	6,185
Itans	19,647 17,515
Sabugi	7,361
<b>PARAÍBA</b>	
Camalaú	2,344
Epitácio Pessoa	39,375
<b>BAHIA</b>	
Sobradinho	2150,100
<b>PERNAMBUCO</b>	
Tapacurá	5,985

Fonte: Autor (2016) com dados de diversos autores.

Sendacz *et al.* (2005), da mesma forma que Derisio & Perkins (1981) para o reservatório Guarapiranga/SP, expõem os dados de carga de fósforo aos reservatórios Jundaí e Taiaçupeba, no mesmo estado. Para o período chuvoso de 2004, a carga afluente de fósforo ao reservatório Jundaí foi de 3,219 ton/ano, enquanto que ao reservatório

Taiaçupeba o valor foi de 10,235 ton/ano. Para o período seco de 2004, a carga afluente de fósforo ao reservatório Jundaí foi de 0,504 ton/ano, enquanto que ao reservatório Taiaçupeba o valor foi de 13,315 ton/ano. Espera-se que no período chuvoso os valores da carga de fósforo aos reservatórios sejam maiores visto aumentar-se a taxa de escoamento superficial em suas bacias hidrográficas. Tal fato, entretanto, parece não se verificar no Jundaí. Ainda assim, verifica-se que as cargas são da mesma ordem das dos reservatórios do semiárido brasileiro analisados. Tal fato era esperado visto as principais fontes de nutrientes em reservatórios serem atividades agrícolas e afluência de esgotos domésticos (STRASKRABA *et al.*, 1993), o que de fato verifica-se entre os reservatórios analisados e os de São Paulo citados (SENDACZ *et al.*, 2005; COGERH, 2011e).

### **5.1.3. Dados hidrológicos dos reservatórios**

As Tabelas 22 e 23 expõem os dados hidrológicos dos reservatórios analisados. Comparando os valores de TR expostos com os de lagos, verificam-se valores mais elevados destes, conforme exposto nas Tabelas 01 e 02. Neste caso, para o lago Owikeno (SHORTREED & MORTON, 2003), Canadá, o TR médio é de 1,60 anos. Ainda no Canadá, o TR médio no lago Winnipeg entre os anos de 1999 e 2007, segundo a Environment Canada Manitoba Water Stewardship (2011), é de 3,50 anos. Vollenweider (1965) expõe os tempos médios de retenção hidráulica em oito lagos temperados na Itália e Suiça, cujos valores são: Lago d'Orta – 8,90 anos; Lago Maggiore – 4,0 anos; Lago di Lugano – 8,30 anos; Lago di Como – 4,65 anos; Lago di Iseo – 4,10 anos; Lago d'Idro – 0,615 ano; Lago di Garda – 29 anos; Lago di Pusiano – 0,60 ano. Tais lagos elencados situam-se em regiões de clima temperado. No Brasil, em regiões consideradas de clima tropical no trabalho de Salas & Martino (2001), verifica-se que para a lagoa Araruama, permanentemente hipersalina, no Rio de Janeiro, o TR médio é elevadíssimo. Souza *et al.* (2003) indicam que a lagoa teve um volume médio, entre abril de 1991 e março de 1992, de  $0,69 \text{ km}^3$  que corresponde a  $6,90 \times 10^8 \text{ m}^3$  de água. No mesmo período, a vazão de entrada no lago foi de  $838 \text{ m}^3/\text{dia}$ . Neste caso, verifica-se (conforme Equação 2.1) que o TR em tal lago é aproximadamente 823389 dias, ou 2255,86 anos, que corresponde a 22 séculos e meio para renovação de suas águas. Por causa disto, a lagoa funciona como um efetivo ponto de retenção de cargas de fósforo oriundas de atividades antrópicas (SOUZA *et al.*, 2003). Nos lagos ditos tropicais analisados por Salas & Martino (2001), o TR varia entre 0,041 ano (lago de Sonso, Colômbia, em 1988) e 98,50 anos (lago Tequesquitengo, México, em 1986). Já Cerdá *et al.* (2013) expõem os valores do TR

médio nos lagos Piratininga e Itaipu, São Paulo, entre 2005 e 2006 e entre 2009 e 2010. Para o primeiro período, o TR de Piratininga foi de 83 dias, enquanto que para o segundo foi de 39 dias. Para Itaipu, o TR foi de 9 dias, no primeiro período, e 8 dias, no segundo. Tais valores, como se viu nos demais lagos, parecem ser exceções aos altos valores de TR próprio de lagos conforme Tabelas 01 e 02.

No caso dos reservatórios, Xavier (2005) indica que o TR é bastante variável (com valores de dias a anos). Thornton *et al.* (1981 *apud* Thornton, 1984), com base em 107 reservatórios, obtém um TR médio de 0,37 ano (Tabela 01). Lamparelli (2004) evidencia os TR de vinte reservatórios do estado de São Paulo cujos valores encontram-se entre 1 dia (Reservatório das Graças), ou aproximadamente 0,003 ano, e 620 dias, ou aproximadamente 1,70 ano. Dos reservatórios tropicais expostos por Salas & Martino (2001), os valores de TR variam entre 0,002 ano (reservatório Santana, no Rio de Janeiro, entre 1988 e 1999) e 15,94 anos (reservatório Pozo Honda, Equador, em 1981). A análise das Tabelas 22 e 23 confirma que os valores de TR nos reservatórios do semiárido brasileiro são mais baixos que os de lagos, conforme Tabelas 01 e 02. Além disso, os valores de TR do semiárido brasileiro são majoritariamente maiores que a média geral dos 107 lagos analisados por Thornton *et al.* (1981 *apud* Thornton, 1984). Os valores de TR no semiárido brasileiro, ainda que estejam dentro dos limites citados para os reservatórios de São Paulo e os tropicais analisados por Salas & Martino (2001), são, da mesma forma, majoritariamente superiores que estes, o que era de se esperar por causas das características próprias do semiárido brasileiro (altas temperaturas e altas taxas de evaporação). Por fim, os TR evidenciados nas Tabelas 22 e 23 tem valores semelhantes aos TR expostos por Amorim (2001), Costa (2004), Mesquita (2009), Lins (2011), Wiegand *et al.* (2016) nas mesmas regiões semiáridas estudadas.

Tabela 22 – Dados hidrológicos dos reservatórios cearenses analisados

RESERVATÓRIOS	Período	t (anos)	V (hm³)	Qe (hm³/ano)	Qs (hm³/ano)	TR (anos)	TRmed (anos)
CEARÁ							
Forquilha	09/jan/08 - 11/ago/15	7,853	25,380	2,603	3,469	9,750	9,750
Orós	24/mai/12 - 06/nov/13	1,500	1403,461	911,338			
	25/fev/13 - 22/mai/14	1,250	1144,137	742,946	15,768	1,540	1,540
Castanhão	06/mai/08 - 12/mai/10	2,000	5565,784	2715,016			
	04/ago/10 - 03/mai/12	1,750	4840,390	2361,166	110,376	2,050	2,050
	20/mai/13 - 04/dez/14	1,583	2710,497	1322,194			
Gavião	21/set/09 - 3/nov/09	0,167	30,918			0,122	
	16/nov/10 - 18/jan/11	0,167	30,619	253,360	301,169	0,121	0,122
	15/mar/11 - 18/abr/11	0,083	31,094			0,123	
Banabuiú	14/fev/10 - 14/fev/12	2,000	1200,762	674,585			
	16/jan/13 - 07/mai/14	1,333	524,636	294,739	0,631	1,780	1,780
	7/mai/14 - 4/ago/15	1,250	115,690	64,995			
Acarape do Meio	25/mai/10 - 15/mai/12	2,000	20,591	11,130			
	13/fev/14 - 05/ago/15	1,500	8,377	4,528	8,199	1,850	1,850
	07/ago/14 - 05/nov/15	1,250	8,586	4,641			
Arrebita	07/ago/13 - 29/out/13	0,167	6,434	33,549			
	29/out/13 - 06/fev/14	0,333	4,794	24,998	5,361	0,192	0,192
	06/fev/14 - 20/mai/14	0,250	4,692	24,468			
General Sampaio	21/mai/08 - 06/jan/09	0,667	147,257	78,328			
	06/jan/09 - 25/nov/10	1,833	247,535	131,667	2,050	1,880	1,880
	19/ago/09 - 16/mai/11	1,750	232,267	123,546			
Pacajus	09/jul/08 - 24/mar/10	1,667	196,974	140,696			
	23/mai/11 - 11/dez/12	1,583	168,147	120,105	7,884	1,400	1,400
	06/mar/13 - 21/mai/14	1,167	59,098	42,213			
Quincoé	06/mai/14 - 13/jan/15	0,667	0,587	0,548	5,992	1,070	1,070
Itaúna	16/fev/11 - 28/fev/12	1,000	62,696	250,785			
	28/fev/12 - 09/ago/12	0,500	53,660	214,642	1,671	0,250	0,250
	13/ago/13 - 05/nov/13	0,250	29,158	116,631			
Sítios Novos	23/set/09 - 21/jul/10	0,833	105,521	57,038	0,505	1,850	1,850
Currul Velho	12/mai/15 - 20/ago/15	0,250	7,802	21,412			
	20/ago/15 - 26/jan/16	0,417	7,782	21,356	107,538	0,364	0,364
Colina	07/mai/15 - 17/fev/16	0,750	0,960	0,897	17,200	1,070	1,070
Rosário	03/jun/11 - 18/set/12	1,250	42,748	49,135			
	18/set/12 - 29/nov/13	1,167	20,625	23,707	3,469	0,870	0,870
Rivaldo de Carvalho	27/jul/12 - 08/abr/13	0,750	9,730	8,177			
	08/abr/13 - 12/mai/14	1,083	4,670	3,925	11,200	1,190	1,190
Flor do Campo	15/mar/10 - 24/mai/12	2,167	58,585	28,166			
	16/jan/14 - 17/fev/16	2,083	1,447	0,696	11,984	2,080	2,080
Edson Queiroz	20/ago/08 - 30/nov/10	2,250	207,259	121,774			
	30/nov/10 - 28/nov/12	2,000	201,061	118,132	8,357	1,702	1,702
	23/mai/13 - 29/mai/14	1,000	101,486	59,628			
Caxitoré	28/nov/08 - 04/nov/10	2,000	152,592	110,574			
	16/mai/12 - 09/mai/13	1,000	67,765	49,105	4,730	1,380	1,380
Canafistula	01/jul/08 - 30/mar/10	1,667	11,539	12,680			
	17/mai/10 - 23/fev/11	0,750	7,594	8,345	0,851	0,910	0,910
	09/mai/13 - 20/mai/14	1,000	3,516	3,864			
Olho d'Água	08/dez/08 - 23/jun/10	1,500	14,978	8,559			
	23/jun/10 - 12/set/12	2,250	14,723	8,413	0,158	1,750	1,750
	12/set/12 - 03/set/14	2,000	10,925	6,243			

Fonte: Autor (2016).

Tabela 23 – Dados hidrológicos dos demais reservatórios nordestinos analisados

RESERVATÓRIOS	Período	t (anos)	V (hm <sup>3</sup> )	Qe (hm <sup>3</sup> /ano)	Qs (hm <sup>3</sup> /ano)	TR (anos)	TRmed (anos)
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>							
Gargalheiras	jun/10 - mar/11	0,750	24,200	39,415	22,800	0,614	0,614
Cruzeta	jun/10 - mar/11	0,750	11,800	67,202	46,800	0,176	0,176
Dourado	mai/11 - jan/12	0,667	8,510	18,821	9,000	0,452	0,452
Passagem das Traíras	jul/06 - out/06 ago/08 - out/08	0,250 0,167	45,621 44,301	189,798	3,500	0,240 0,233	0,237
Boqueirão de Parelhas	ago/06 - ago/08	2,000	41,118	13,671	2,300	3,008	3,008
Itans	jul/06 - set/07 dez/07 - dez/08	1,167 1,000	40,700 61,689	33,194	2,650	1,226 1,858	1,542
Sabugi	jul/06 - set/08	2,167	52,311	21,499	2,000	2,433	2,433
<b>PARAÍBA</b>							
Camalaú	mar/08 - mai/10	1,750	42,506	22,170	0,473	1,917	1,917
Epitácio Pessoa	jan/07 - set/07 mar/07 - ago/08	0,667 1,417	372 385	324,210	51,287	1,147 1,188	1,167
<b>BAHIA</b>							
Sobradinho	jan/07 - abr/07	0,250	30521,800	52018,632	48675,816	0,587	0,587
<b>PERNAMBUCO</b>							
Tapacurá	ago/99 - ago/00 mai/99 - jun/00	1,000 1,083	68,600	71,193	34,172	0,964	0,964

Fonte: Autor (2016).

## 5.2. Adequação e calibração do modelo de Chapra (1975) ao semiárido brasileiro

Conforme dito anteriormente, os dois critérios sugeridos por Canale & Seo (1996a) que tornam preferível o modelo de Chapra (1975), com apenas  $k$  necessário à calibração, ante aos mais complexos são: alta variabilidade dos dados (excedendo em 50% a média geral) e incerteza dos parâmetros com o aumento do tempo de modelagem. Com base nos elevados coeficientes de variação da concentração de fósforo total encontrados nos reservatórios do semiárido brasileiro (Tabelas 10, 12, 15, 17, 18) e pelo fato de se tratar de modelagens a longo prazo, é possível concluir que o modelo simples de Chapra (1975) (Equação 2.26) é mais adequado à região semiárida brasileira ante aos demais modelos mais complexos de previsão de concentração de fósforo total.

Neste caso, a partir dos dados das Tabelas 09 a 23, é possível calibrar o modelo de balanço de massa de Chapra (1975) para sistemas de mistura completa, considerando carga afluente de fósforo constante por período suficiente de tempo (CHAPRA, 1997), para os reservatórios do semiárido brasileiro. As Equações 2.24 e 2.26, utilizadas na calibração, são citadas novamente abaixo:

$$\lambda = \frac{Q_s}{V} + k \quad (2.24)$$

$$PT(t) = PT_o e^{(-\lambda t)} + \frac{W}{\lambda V} (1 - e^{(-\lambda t)}) \quad (2.26)$$

Conforme dito no Capítulo 2, a dificuldade da utilização de tais equações reside na ausência de métodos conhecidos para medir-se o  $k$  de forma experimental e direta. A metodologia mais comum para seu cálculo, dispondo dos dados de lagos e reservatórios, é a substituição dos demais parâmetros da equação de Vollenweider (1976) (Equação 2.28) desenvolvida predominantemente para lagos temperados (SALAS & MARTINO, 1991; VON SPERLING, 1996; SALAS & MARTINO, 2001). Pressupõem-se que as fórmulas empíricas que correlacionam  $k$  e TR até agora apresentadas, seja para lagos temperados (VOLLENWEIDER, 1976), Equação 2.28, seja para lagos tropicais (SALAS & MARTINO, 1991), Equação 2.29, não representem adequadamente os dados dos reservatórios do semiárido brasileiro, visto suas particularidades climáticas, hidrológicas, limnológicas e geográficas.

As Tabelas 24 e 25 expõem o processo de cálculo de  $k$  nos trinta e três reservatórios nordestinos analisados. Com exceção do Santo Anastácio, cujos dados de  $k$  e TR foram obtidos do trabalho de Araújo (2016), os coeficientes de decaimento do fósforo subtraindo a coluna de  $\lambda$  pela coluna de  $Q_s/V$ . Salas & Martino (1991) explicam, ao indicar que o seu coeficiente de decaimento de fósforo para lagos tropicais é o dobro daquele estimado para lagos temperados de Vollenweider (1976) com TR idênticos, que as maiores temperaturas e taxas de crescimento de fitoplâncton na região tropical são uma possível justificativa para os maiores valores de  $k$  em tal região (CASTAGNINO, 1982). Isto é confirmado por Lewis (2000) ao indicar que lagos em regiões tropicais são mais sensíveis à eutrofização que lagos em regiões temperadas devido a maiores temperaturas, incidência de radiação solar e disponibilidade de nutrientes nos corpos hídricos. Espera-se que tal conclusão possa ser alargada para os reservatórios do semiárido brasileiro, visto os fatores citados (temperatura, radiação solar e disponibilidade de nutrientes) serem, conforme visto anteriormente, maiores que os das regiões comparadas (tropical e temperada).

Tabela 24 – Cálculo de  $k$  para os reservatórios cearenses

RESERVATÓRIOS	Período	t (anos)	V (hm <sup>3</sup> )	Qe (hm <sup>3</sup> /ano)	Qs (hm <sup>3</sup> /ano)	TR (anos)	TRmed (anos)	W (ton/ano)	PTo (mg/L)	PT (mg/L)	mod (mg/L)	$\lambda$ (ano <sup>-1</sup> )	Qs/V (ano <sup>-1</sup> )	$k$ (ano <sup>-1</sup> )	$k$ med (ano <sup>-1</sup> )	
CEARA																
Forquilha	09/ian/08 - 11/ago/15	7,853	25,380	2,603	3,469	9,750	9,750	4,175	0,260	0,132	0,132	1,243	0,137	1,106	1,106	
Orós	24/mai/12 - 06/nov/13	1,500	1403,461	911,338		15,768	1,540	1,540	0,030	0,062	0,062	7,133	0,011	7,122		
	25/fev/13 - 22/mai/14	1,250	1144,137	742,946					0,035	0,096	0,096	5,676	0,014	5,662	6,392	
Castanhão	06/mai/08 - 12/mai/10	2,000	5565,784	2715,016		110,376	2,050	2,050	0,050	0,059	0,059	1,984	0,020	1,964		
	04/ago/10 - 03/mai/12	1,750	4840,390	2361,166					0,105	0,021	0,022	6,231	0,023	6,208	4,382	
	20/mar/13 - 04/dez/14	1,583	2710,497	1322,194					0,020	0,048	0,048	5,015	0,041	4,974		
Gavião	21/set/09 - 3/nov/09	0,167	30,918				0,122			0,044	0,215	0,215	22,376	9,741	12,635	
	16/nov/10 - 18/jan/11	0,167	30,619		253,360	301,169	0,121			0,121	0,209	0,209	23,485	9,836	13,649	12,350
	15/mar/11 - 18/abr/11	0,083	31,094				0,123			0,132	0,219	0,219	20,451	9,686	10,765	
Banabuiú	14/fev/10 - 14/fev/12	2,000	1200,762	674,585					0,040	0,040	0,040	1,957	0,001	1,957		
	16/jan/13 - 07/mai/14	1,333	524,636	294,739		0,631	1,780	1,780	0,030	0,074	0,074	2,366	0,001	2,365	3,855	
	7/mar/14 - 4/ago/15	1,250	115,690	64,995					0,074	0,112	0,113	7,250	0,005	7,245		
Acarape do Meio	25/mar/10 - 15/mai/12	2,000	20,591	11,130		8,199	1,850	1,850	0,146	0,093	0,093	2,946	0,398	2,548		
	13/fev/14 - 05/ago/15	1,500	8,377	4,528					0,198	0,141	0,142	4,754	0,979	3,776	3,309	
Santo Anastácio	07/ago/13 - mar/14		#				0,063				#			22,840		
Arrebita	07/ago/13 - 29/out/13	0,167	6,434	33,549		5,361	0,192	0,192	10,078	0,032	0,070	0,070	22,030	0,833	21,196	
	29/out/13 - 06/fev/14	0,333	4,794	24,998					0,070	0,127	0,127	16,515	1,118	15,396	17,885	
	06/fev/14 - 20/mai/14	0,250	4,692	24,468					0,127	0,118	0,118	18,204	1,143	17,061		
General Sampaio	21/mar/08 - 06/jan/09	0,667	147,257	78,328		2,050	1,880	1,880	287,328	0,015	0,406	0,406	4,588	0,014	4,574	
	06/jan/09 - 25/nov/10	1,833	247,535	131,667					0,406	0,093	0,093	12,467	0,008	12,458	9,523	
	19/ago/09 - 16/mai/11	1,750	232,267	123,546					2,145	0,107	0,107	11,546	0,009	11,538		
Pacajus	09/jul/08 - 24/mar/10	1,667	196,974	140,696		7,884	1,400	1,400	31,720	0,044	0,050	0,050	3,232	0,040	3,192	
	23/mar/11 - 11/dez/12	1,583	168,147	120,105					0,140	0,077	0,077	2,478	0,047	2,431	2,957	
	06/mar/13 - 21/mai/14	1,167	59,098	42,213					0,130	0,158	0,158	3,382	0,133	3,248		
Quincoé	06/mar/14 - 13/jan/15	0,667	0,587	0,548		5,992	1,070	1,070	0,802	0,747	0,094	0,094	14,520	10,212	4,308	
Itaúna	16/fev/11 - 28/fev/12	1,000	62,696	250,785		1,671	0,250	0,250	41,108	0,029	0,046	0,046	14,198	0,027	14,171	
	28/fev/12 - 09/ago/12	0,500	53,660	214,642					0,046	0,044	0,044	17,308	0,031	17,276	15,674	
	13/ago/13 - 05/nov/13	0,250	29,158	116,631					0,025	0,089	0,089	15,632	0,057	15,575		
Sítios Novos	23/set/09 - 21/jul/10	0,833	105,521	57,038		0,505	1,850	1,850	17,331	0,198	0,087	0,087	2,371	0,005	2,366	
Currul Velho	12/mar/15 - 20/ago/15	0,250	7,802	21,412		107,538	0,364	0,364	12,661	0,145	0,072	0,072	22,498	13,783	8,715	
	20/ago/15 - 26/jan/16	0,417	7,782	21,356					0,072	0,087	0,087	18,651	13,819	4,832	6,773	
Colina	07/mar/15 - 17/fev/16	0,750	0,960	0,897		17,200	1,070	1,070	6,180	0,273	0,313	0,313	20,569	17,912	2,657	
Rosário	03/jun/11 - 18/set/12	1,250	42,748	49,135		3,469	0,870	0,870	20,701	0,027	0,081	0,081	5,963	0,081	5,881	
	18/set/12 - 29/nov/13	1,167	20,625	23,707					0,081	0,475	0,475	1,924	0,168	1,756	3,819	
Rivaldo de Carvalho	27/jul/12 - 08/abr/13	0,750	9,730	8,177		11,200	1,190	1,190	1,342	0,027	0,021	0,021	6,531	1,151	5,380	
	08/abr/13 - 13/mar/14	1,083	4,670	3,925					0,021	0,111	0,111	2,433	2,398	0,035	2,707	
Flor do Campo	15/mar/10 - 24/mai/12	2,167	58,585	28,166		11,984	2,080	2,080	5,085	0,090	0,056	0,057	1,557	0,205	1,352	
	16/jan/14 - 17/fev/16	2,083	1,447	0,696					0,257	0,342	0,342	10,265	8,283	1,982	1,667	
Edson Queiroz	20/ago/08 - 30/nov/10	2,250	207,259	121,774					0,041	0,137	0,137	3,496	0,040	3,456		
	30/nov/10 - 28/nov/12	2,000	201,061	118,132		8,357	1,702	1,702	99,222	0,137	0,034	0,035	14,115	0,042	14,073	8,284
	23/mar/13 - 29/mar/14	1,000	101,486	59,628					0,025	0,132	0,132	7,406	0,082	7,324		
Caxitoré	28/nov/08 - 04/nov/10	2,000	152,592	110,574		4,730	1,380	1,380	83,321	0,251	0,098	0,098	5,567	0,031	5,536	
	16/mar/12 - 09/mar/13	1,000	67,765	49,105					0,175	0,200	0,200	6,155	0,070	6,085	5,811	
Canafistula	01/jul/08 - 30/mar/10	1,667	11,539	12,680		0,851	0,910	0,910	2,712	0,270	0,034	0,034	6,823	0,074	6,750	
	17/mar/10 - 23/fev/11	0,750	7,594	8,345					0,049	0,056	0,056	6,341	0,112	6,229	5,831	
	09/mar/13 - 20/mar/14	1,000	3,516	3,864					0,090	0,161	0,162	4,757	0,242	4,515		
Olho d'Água	08/dez/08 - 23/jun/10	1,500	14,978	8,559		0,158	1,750	1,750	3,694	0,032	0,026	0,026	9,375	0,011	9,365	
	23/jun/10 - 12/set/12	2,250	14,723	8,413					0,026	0,049	0,049	5,133	0,011	5,122		
	12/set/12 - 03/set/14	2,000	10,925	6,243					0,049	0,023	0,024	14,267	0,014	14,252	9,580	

Fonte: Autor (2016).

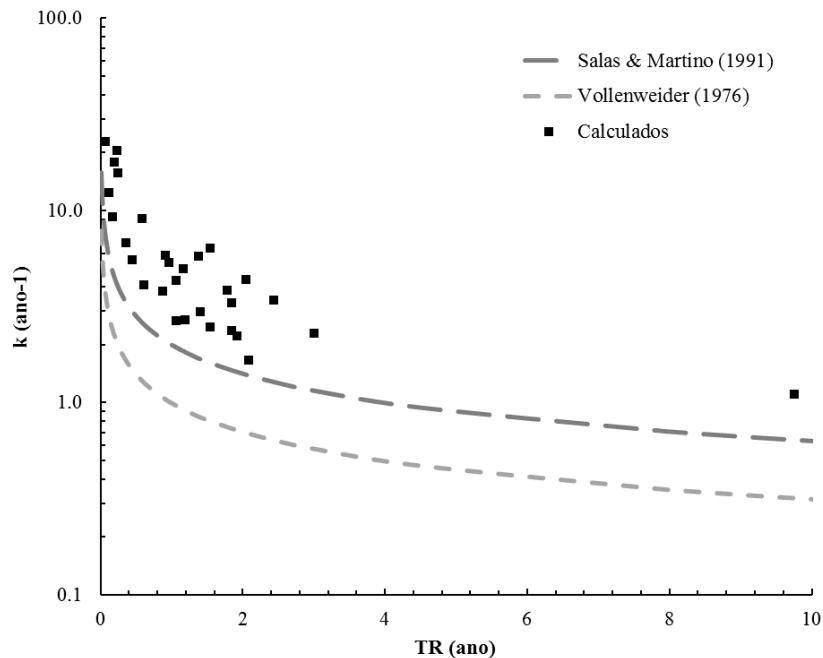
Tabela 25 – Cálculo de  $k$  para os demais reservatórios do semiárido brasileiro analisados

RESERVATÓRIOS	Período	t (anos)	V (hm³)	Qe (hm³/ano)	Qs (hm³/ano)	TR (anos)	TRmed (anos)	W (ton/ano)	PTo (mg/L)	PT (mg/L)	mod (mg/L)	$\lambda$ (ano <sup>-1</sup> )	Qs/V (ano <sup>-1</sup> )	$k$ (ano <sup>-1</sup> )	$k$ med (ano <sup>-1</sup> )
<b>RIO GRANDE DO NORTE</b>															
Gargalheiras	jun/10 - mar/11	0,750	24,200	39,415	22,800	0,614	0,614	6,130	0,125	0,052	0,052	5,033	0,942	4,091	4,091
Cruzeta	jun/10 - mar/11	0,750	11,800	67,202	46,800	0,176	0,176	10,180	0,140	0,065	0,065	13,199	3,966	9,233	9,233
Dourado	mai/11 - jan/12	0,667	8,510	18,821	9,000	0,452	0,452	2,000	0,104	0,036	0,036	6,601	1,058	5,544	5,544
Passagem das Traíras	jul/06 - out/06	0,250	45,621	189,798	3,500	0,240	0,237	78,149	0,138	0,083	0,083	20,686	0,077	20,610	20,452
	ago/08 - out/08	0,167	44,301			0,233		77,967	0,077	0,086	0,086	20,373	0,079	20,294	
Boqueirão de Parelhas	ago/06 - ago/08	2,000	41,118	13,671	2,300	3,008	3,008	6,185	0,016	0,063	0,063	2,353	0,056	2,297	2,297
Itans	jul/06 - set/07	1,167	40,700	33,194	2,650	1,226	1,542	19,647	0,104	0,087	0,088	3,228	0,065	3,163	2,479
	dez/07 - dez/08	1,000	61,689			1,858		17,515	0,145	0,153	0,153	1,837	0,043	1,794	
Sabugi	jul/06 - set/08	2,167	52,311	21,499	2,000	2,433	2,433	7,361	0,064	0,041	0,041	3,449	0,038	3,411	3,411
<b>PARAÍBA</b>															
Camalaú	mar/08 - mai/10	1,750	42,506	22,170	0,473	1,917	1,917	2,344	0,850	0,040	0,041	2,245	0,011	2,234	2,234
Epitácio Pessoa	jan/07 - set/07	0,667	372	324,210	51,287	1,147	1,167	39,375	0,006	0,011	0,011	9,248	0,138	9,110	4,975
	mar/07 - ago/08	1,417	385			1,188			0,050	0,095	0,094	0,972	0,133	0,839	
<b>BAHIA</b>															
Sobradinho	jan/07 - abr/07	0,250	30521,800	52018,632	48675,816	0,587	0,587	2150,100	0,088	0,012	0,013	10,643	1,595	9,048	9,048
<b>PERNAMBUCO</b>															
Tapacurá	ago/99 - ago/00	1,000	68,600	71,193	34,172	0,964	0,964	5,985	0,053	0,025	0,015	5,954	0,498	5,456	5,353
	mai/99 - jun/00	1,083							0,114	0,026	0,015	5,749		5,2509	

Fonte: Autor (2016)

Verificam-se, de imediato, valores altos de  $k$  nos trinta e três reservatórios estudados, conforme Salas & Martino (1991) já esperavam que acontecesse em reservatórios. Os valores de  $k$  para os reservatórios General Sampaio, Edson Queiroz e Olho d'Água, contudo, são bastante elevados para tempos de residência hidráulica superiores a um ano e meio, diversamente dos demais reservatórios analisados (Tabelas 24 e 25), ainda que possuam características semelhantes (COGERH, 2008c; COGERH, 2011e; COGERH, 2011l). Desta forma, foram classificados como *outliers* e não considerados na calibração do modelo de Chapra (1975). Constata-se que os valores de  $k$  calculados superam aqueles que seriam obtidos utilizando as equações para clima tropical (SALAS & MARTINO, 1991), Equação 2.29, e temperado (VOLLENWEIDER, 1976), Equação 2.28., conforme evidenciado na Figura 53 abaixo.

Figura 53 – Valores de  $k$  do semiárido calculados em comparação os que seriam obtidos pelas equações de lagos em climas tropical (SALAS & MARTINO, 1991) e temperado (VOLLENWEIDER, 1976).

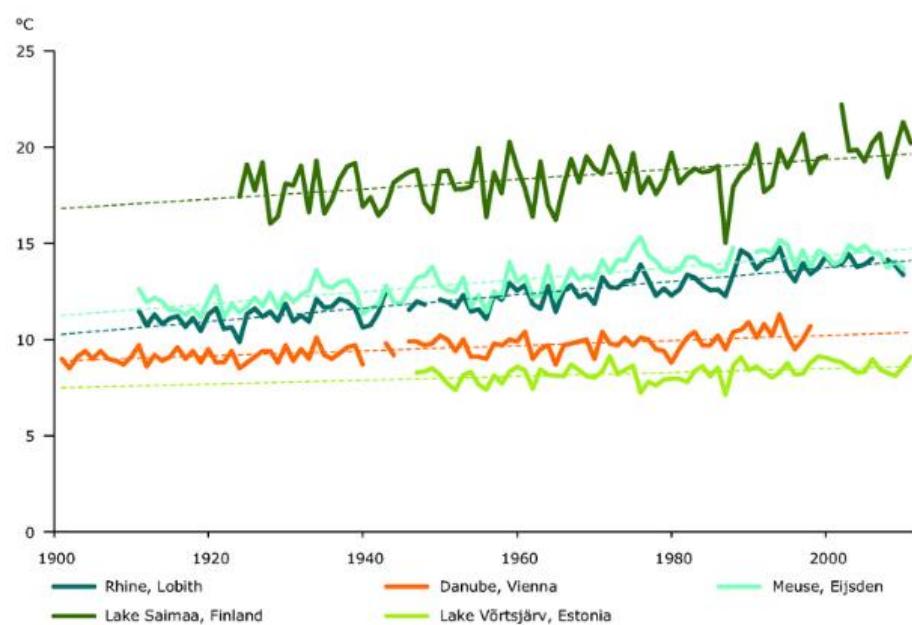


Fonte: Autor (2016).

Conforme esperava-se para os reservatórios do semiárido brasileiro, os valores de  $k$  foram maiores que os que seriam obtidos, para mesmo TR, em regiões tropicais e temperadas. Castagnino (1982), fazendo uso da Lei de Stokes, compara as velocidades de sedimentação para lagos em regiões tropicais e em regiões temperadas, atribuindo as

temperaturas de 20 °C e 10° C para ambas, respectivamente. Obtém então a relação entre velocidades de sedimentação ( $v_s$ ) como função da relação entre viscosidades cinemáticas da água ( $\mu$ ) em tais temperaturas. Salas & Martino (2001), entretanto, consideraram que para lagos tropicais a temperatura média anual mínima é 15 °C, temperatura esta que será utilizada na relação das velocidades de sedimentação. Além disso, Vollenweider (1965) indicam valores médios de temperatura em alguns lagos da Itália entre 2 e 4°C. Temperaturas maiores, entretanto, são encontradas nos lagos canadenses e neozelandeses (SHORTREED & MORTON, 2003; ECMWS, 2011; WRC, 2016b). Particularmente os corpos hídricos neozelandeses tem temperaturas oscilando ao redor aproximadamente de 11,5 °C (WRC, 2016b). Segundo a European Environmental Agency (2016), quatro de cinco grandes lagos e rios de clima temperado possuem temperatura média próxima a 10 °C (Figura 54). Desta forma, o valor de 10°C utilizado por Castagnino (1982) será mantido para a obtenção da relação entre as velocidades de sedimentação entre o semiárido brasileiro, a região tropical e a temperada. Os trabalhos de Amorim (2001), Gunkel *et al.* (2003), Mesquita (2009), Vidal (2011), Oliveira (2012), Araújo (2016) nos reservatórios analisados permite concluir que a temperatura mais representativa dos reservatórios do semiárido brasileiro é aproximadamente 28 °C e será a temperatura considerada na obtenção da relação referida. Neste caso, a relação entre as regiões tropical e temperada será:

Figura 54 – Temperatura em cinco grandes lagos e rios europeus



Fonte: EEA (2016).

$$\frac{v_s(15^\circ C)}{v_s(10^\circ C)} = \frac{\mu(10^\circ C)}{\mu(15^\circ C)} \quad (5.1)$$

$$\frac{v_s(15^\circ C)}{v_s(10^\circ C)} = \frac{1,308}{1,140} \quad (5.2)$$

$$\frac{v_s(15^\circ C)}{v_s(10^\circ C)} = 1,147 \quad (5.3)$$

$$v_s(15^\circ C) = 1,147 v_s(10^\circ C) \quad (5.4)$$

A comparação entre a região semiárida e tropical e temperada, da mesma forma, será:

$$\frac{v_s(28^\circ C)}{v_s(15^\circ C)} = \frac{\mu(15^\circ C)}{\mu(28^\circ C)} \quad (5.5)$$

$$\frac{v_s(28^\circ C)}{v_s(15^\circ C)} = \frac{1,140}{0,838} \quad (5.6)$$

$$\frac{v_s(28^\circ C)}{v_s(15^\circ C)} = 1,361 \quad (5.7)$$

$$v_s(28^\circ C) = 1,361 v_s(15^\circ C) \quad (5.8)$$

$$v_s(28^\circ C) = 1,561 v_s(10^\circ C) \quad (5.9)$$

A influência da taxa mais elevada de crescimento de fitoplâncton devido às maiores temperaturas em regiões tropicais, analisada por Castagnino (1982), indicada por Salas & Martino (1991), sendo confirmada por Lewis (2000), pode ser estimada segundo o modelo theta (CHAPRA, 1997; GOBBI, 2016) frequentemente utilizado na representação da relação entre temperatura e taxa de crescimento de fitoplâncton:

$$K_{f,T} = K_{f,20} \theta^{T-20} \quad (5.10)$$

Sendo:

- $K_{f,T}$  : taxa de crescimento do fitoplâncton em função da temperatura ( $d^{-1}$ );

- $K_{f,20}$ : taxa de crescimento de fitoplâncton na temperatura de 20 °C ( $d^{-1}$ );
- T: temperatura (°C);
- $\theta$ : constante de valor igual 1,066 provinda de estudos com diferentes espécies de fitoplâncton.

A diferença de Castagnino (1982), contudo, consiste em considerar a influência da temperatura como dependente da máxima taxa de crescimento de fitoplâncton ( $K_{f,\text{máx}}$ ) de valor igual a 0,60  $d^{-1}$ . Seguindo então o mesmo procedimento para as velocidades de sedimentação, teremos:

$$K_{f,T} = K_{f,\text{máx}} \theta^T \quad (5.11)$$

$$\frac{K_{f,15}}{K_{f,10}} = \frac{\theta^{15}}{\theta^{10}} \quad (5.12)$$

$$\frac{K_{f,15}}{K_{f,10}} = \frac{1,066^{15}}{1,066^{10}} = \frac{2,6083}{1,8948} = 1,377 \quad (5.13)$$

$$K_{f,15} = 1,377 K_{f,10} \quad (5.14)$$

$$\frac{K_{f,28}}{K_{f,15}} = \frac{\theta^{28}}{\theta^{15}} \quad (5.15)$$

$$\frac{K_{f,28}}{K_{f,15}} = \frac{1,066^{28}}{1,066^{15}} = \frac{5,9869}{2,6083} = 2,295 \quad (5.16)$$

$$K_{f,28} = 2,295 K_{f,15} \quad (5.17)$$

$$K_{f,28} = 3,160 K_{f,10} \quad (5.18)$$

Ao combinar os dois fatores calculados, sendo considerados proporcionais, da mesma forma que Castagnino (1982), obtém-se uma estimativa para o coeficiente de decaimento do fósforo em corpos hídricos. Dessa forma, teremos:

$$k_{28^\circ C} = 1,561 \times 3,160 \times k_{10^\circ C} \quad (5.19)$$

$$k_{28^\circ C} = 4,933 k_{10^\circ C} \quad (5.20)$$

$$k_{28^\circ C} = 1,361 \times 2,295 \times k_{15^\circ C} \quad (5.21)$$

$$K_{f,28} = 3,123 K_{f,10} \quad (5.22)$$

A estimativa pelo método de Castagnino (1982) permite analisar três equações (Equações 5.23 a 5.25) de  $k = f(TR)$  para os dados das Tabelas 24, 25 e da Figura 53. Para cada uma das três equações, plotaram-se a curva proposta para os reservatórios do semiárido brasileiro, juntamente com o cálculo de seu  $r^2$  e desvio. Tais resultados são expostos abaixo:

$$k = \frac{4}{\sqrt{TR}} \quad (5.23)$$

$$r^2 = 0,880; \text{ desvio} = 27\%$$

$$k = \frac{5}{\sqrt{TR}} \quad (5.24)$$

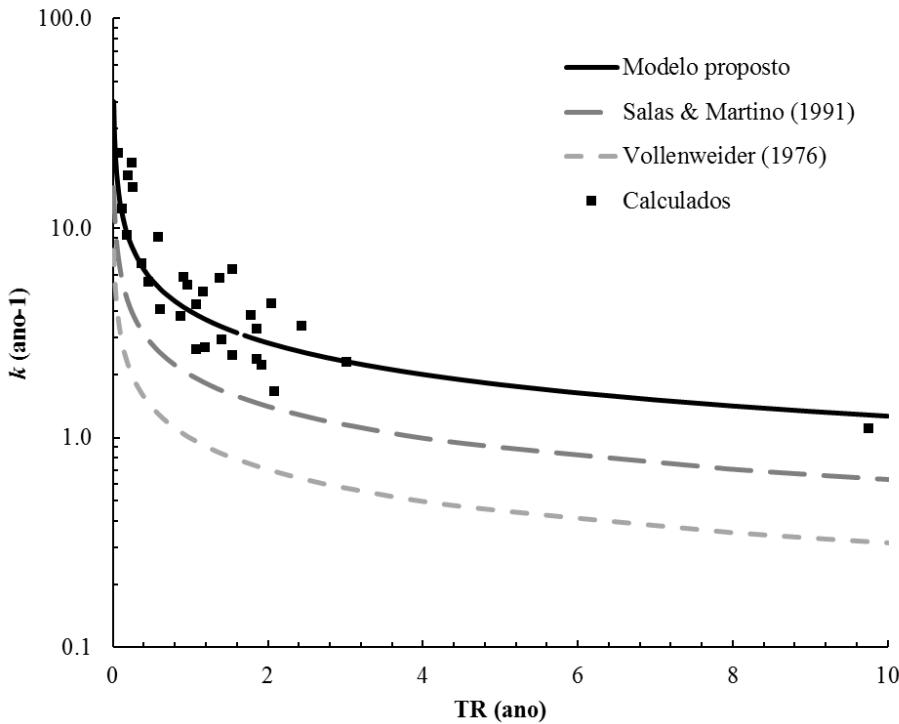
$$r^2 = 0,880; \text{ desvio} = 35\%$$

$$k = \frac{6}{\sqrt{TR}} \quad (5.25)$$

$$r^2 = 0,880; \text{ desvio} = 49\%$$

Diante das Equações 5.23 a 5.25, visto possuírem idênticos e elevados coeficientes de relação, escolheu-se a equação de menor desvio (27%) das três ( $k = 4/\sqrt{TR}$ ). O modelo proposto e calibrado, então, para os reservatórios do semiárido brasileiro é (com o gráfico de  $k = 4/\sqrt{TR}$ , com o cálculo ainda do SE):

Figura 55 – Curva da equação proposta para  $k = f(TR)$



Fonte: Autor (2016).

$$r^2 = 0,880; SE = 1,040; \text{desvio} = 27\%; N = 30.$$

$$PT(t) = PT_0 e^{\left(-\left(\frac{Q}{V} + \frac{4}{\sqrt{TR}}\right)t\right)} + \frac{W}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{4}{\sqrt{TR}}\right)V} \left(1 - e^{\left(-\left(\frac{Q}{V} + \frac{4}{\sqrt{TR}}\right)t\right)}\right) \quad (5.26)$$

Cuja solução permanente é:

$$PT = \frac{W}{Q_s + \frac{4V}{\sqrt{TR}}} \quad (5.27)$$

Sendo:

$$k = \frac{4}{\sqrt{TR}} \quad (5.23)$$

É interessante notar que as equações de  $k$  em Salas & Martino (1991) e Vollenweider (1976) foram obtidas a partir da equação deste (Equação 2.16, repetida abaixo), desenvolvida particularmente para lagos temperados (VON SPERLING, 1996).

Neste caso, a fim de analisar os valores que seriam obtidos de  $k$  a partir da Equação 2.16 (VOLLENWEIDER, 1976), conhecidos seus demais dados, com aqueles obtidos através da Equação 2.26 (CHAPRA, 1975), conforme Figura 55, gerou-se a Figura 56 comparando os valores de  $k$  obtidos por ambas equações. Os dados da Equação 2.16 (VOLLENWEIDER, 1976) foram obtidos das Tabelas 10, 12, 15, 17, 18, 21, 22 e 23. Para o caso dos reservatórios com mais de uma carga afluente de fósforo ou volume, por se ter considerado diferentes períodos, utilizou-se apenas um período de modelagem, com seus respectivos dados, a fim de evitar erros maiores visto tais dados fazerem referência ao período analisado (PT, W, V e TR) e para não pôr, na mesma área de plotagem, dois ou três pontos referentes ao mesmo reservatório. Os dados retirados das tabelas citadas são expostos na Tabela 26.

$$PT = \frac{W}{V\left(\frac{1}{TR} + k\right)} \quad (2.16)$$

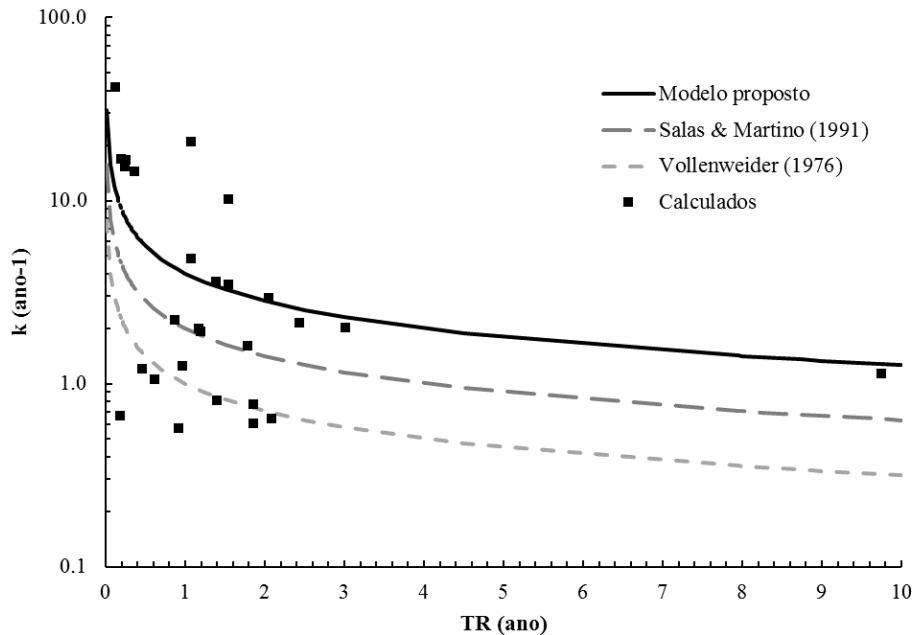
Tabela 26 – Dados utilizados na Equação 2.16 de Vollenweider (1976)

Reservatórios	Símbolo	Período	PTobs (mg/L)	V (m³)	W (mg/ano)	TR (ano)	$k$ (ano⁻¹)
<b>Ceará</b>							
Forquilha	F	09/jan/08 - 11/ago/15	0.133	2.54E+07	4.18E+09	9.750	1.134
Orós	O	24/mai/12 - 22/mai/14	0.053	1.09E+09	6.24E+11	1.540	10.237
Castanhão	C	06/mai/08 - 04/dez/14	0.043	4.41E+09	6.57E+11	2.050	2.940
Gavião	G	21/set/09 - 18/jan/11	0.099	3.07E+07	1.52E+11	0.122	41.926
Banabuú	B	22/fev/10 - 04/ago/15	0.057	7.67E+08	9.44E+10	1.780	1.613
Acarape do Meio	AM	25/mai/10 - 05/nov/15	0.321	1.34E+07	5.64E+09	1.850	0.773
Arrebita	A	07/ago/13 - 20/mai/14	0.087	5.24E+06	1.01E+10	0.192	16.970
Pacajus	PJ	09/jul/08 - 21/mai/14	0.139	1.50E+08	3.17E+10	1.400	0.812
Quincoé	QC	06/mai/14 - 13/jan/15	0.239	5.87E+05	8.02E+08	1.070	4.796
Itaúna	I	16/fev/11 - 05/nov/13	0.041	4.90E+07	4.11E+10	0.250	16.694
Sítios Novos	SN	23/set/09 - 21/jul/10	0.143	1.06E+08	1.73E+10	1.850	0.605
Curral Velho	CV	12/mai/15 - 26/jan/16	0.094	7.79E+06	1.27E+10	0.364	14.503
Colina	CL	07/mai/15 - 17/fev/16	0.293	9.60E+05	6.18E+09	1.070	21.031
Rosário	RO	03/jun/11 - 29/nov/13	0.194	3.15E+07	2.07E+10	0.870	2.236
Rivaldo de Carvalho	RC	27/jul/12 - 12/mai/14	0.073	6.64E+06	1.34E+09	1.190	1.934
Flor do Campo	FC	15/mar/10 - 17/fev/16	0.165	2.74E+07	5.09E+09	2.080	0.643
Caxitoré	CX	28/nov/08 - 09/mai/13	0.157	1.23E+08	8.33E+10	1.380	3.597
Canafistula	CF	01/jul/08 - 20/mai/14	0.139	1.17E+07	2.71E+09	0.910	0.569
<b>Rio Grande do Norte</b>							
Gargalheiras	GG	jun/10 - mar/11	0.095	2.42E+07	6.13E+09	0.614	1.052
Cruzeta	CZ	jun/10 - mar/11	0.136	1.18E+07	1.02E+10	0.176	0.669
Dourado	DR	mai/11 - jan/12	0.069	8.51E+06	2.00E+09	0.452	1.211
Passagem das Traíras	PT	jul/06 - out/08	0.087	4.56E+07	7.81E+10	0.237	15.377
Boqueirão das Parelhas	BP	ago/06 - ago/08	0.081	3.27E+07	6.19E+09	3.008	2.017
Itans	IT	jul/06 - dez/08	0.098	4.59E+07	1.86E+10	1.542	3.465
Sabugi	SB	jul/06 - set/08	0.055	5.23E+07	7.36E+09	2.433	2.152
<b>Paraíba</b>							
Epitácio Pessoa	EP	jan/06 - ago/08	0.036	3.87E+08	3.94E+10	1.167	2.001
<b>Pernambuco</b>							
Tapacurá	TP	ago/99 - ago/00	0.038	6.86E+07	5.99E+09	0.964	1.250

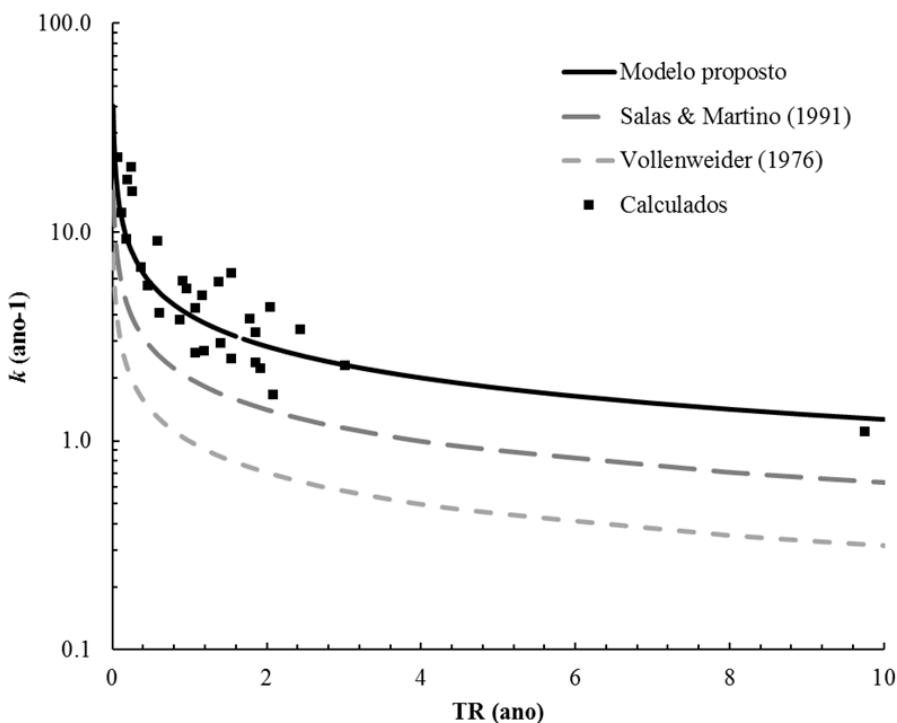
Fonte: Autor (2016).

Figura 56 – Comparação entre os  $k$  obtidos segundo: a) Equação de Vollenweider (1976); b) Equação transiente de Chapra (1975) calibrada.

a)



b)



Fonte: Autor (2016).

A comparação entre os gráficos confirma que os elevados valores de  $k$ , decorrentes das características próprias do semiárido, conforme evidenciado nas seções anteriores, não são bem representados por modelos calibrados para regiões temperadas ou tropicais. Vale ressaltar que a aplicação da Equação 2.16 para gerar o gráfico da Figura 56 gerou como outliers os reservatórios Camalaú e Sobradinho que apresentaram, aplicando os demais dados na equação de Vollenweider (1976),  $k$  iguais a -0,277 e -0,944 ano<sup>-1</sup>, respectivamente. Além disto, por ter sido obtido apenas os valores de TR e  $k$  para o reservatório Santo Anastácio, ele também não foi aplicado à Equação 2.16.

É possível ainda utilizar os mesmos reservatórios da Tabela 26 a fim de verificar quais seriam os valores  $k$  obtidos pela solução permanente proposta (Equação 5.26) e compará-los com aqueles obtidos pela solução transiente (Equação 5.27). Tal comparação é exposta conforme Figura 57.

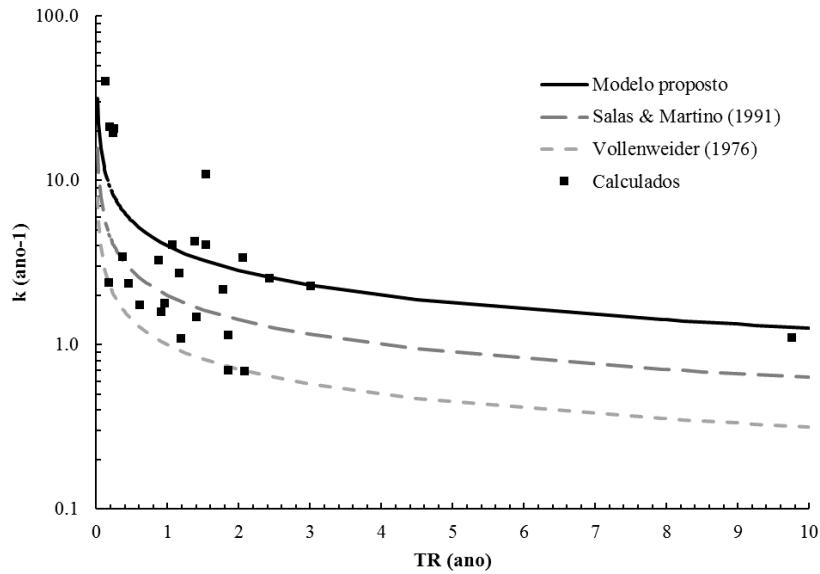
Tabela 27 – Dados para utilização na solução permanente (Equação 5.27) do modelo calibrado

Reservatórios	Símbolo	Período	PTobs (mg/L)	Qs (m <sup>3</sup> /ano)	V (m <sup>3</sup> )	W (mg/ano)	TR (ano)	$k$ (ano <sup>-1</sup> )
<b>Ceará</b>								
Forquilha	F	09/jan/08 - 11/ago/15	0.133	3.47E+06	2.54E+07	4.18E+09	9.750	1.100
Orós	O	24/mai/12 - 22/mai/14	0.053	1.58E+07	1.09E+09	6.24E+11	1.540	10.872
Castanhão	C	06/mai/08 - 04/dez/14	0.043	1.10E+08	4.41E+09	6.57E+11	2.050	3.403
Gavião	G	21/set/09 - 18/jan/11	0.099	3.01E+08	3.07E+07	1.52E+11	0.122	40.329
Banabuiú	B	22/fev/10 - 04/ago/15	0.057	6.31E+05	7.67E+08	9.44E+10	1.780	2.174
Acarape do Meio	AM	25/mai/10 - 05/nov/15	0.321	8.20E+06	1.34E+07	5.64E+09	1.850	0.701
Arrebita	A	07/ago/13 - 20/maio/14	0.087	5.36E+06	5.24E+06	1.01E+10	0.192	21.161
Pacajus	PJ	09/jul/08 - 21/maio/14	0.139	7.88E+06	1.50E+08	3.17E+10	1.400	1.474
Itaúna	I	16/fev/11 - 05/nov/13	0.041	1.67E+06	4.90E+07	4.11E+10	0.250	20.660
Sítios Novos	SN	23/set/09 - 21/jul/10	0.143	5.05E+05	1.06E+08	1.73E+10	1.850	1.141
Curral Velho	CV	12/mai/15 - 26/jan/16	0.094	1.08E+08	7.79E+06	1.27E+10	0.364	3.440
Colina	CL	07/mai/15 - 17/fev/16	0.293	1.72E+07	9.60E+05	6.18E+09	1.070	4.053
Rosário	RO	03/jun/11 - 29/nov/13	0.194	3.47E+06	3.15E+07	2.07E+10	0.870	3.275
Rivaldo de Carvalho	RC	27/jul/12 - 12/maio/14	0.073	1.12E+07	6.64E+06	1.34E+09	1.190	1.089
Flor do Campo	FC	15/mar/10 - 17/fev/16	0.165	1.20E+07	2.74E+07	5.09E+09	2.080	0.687
Caxitoré	CX	28/nov/08 - 09/maio/13	0.157	4.73E+06	1.23E+08	8.33E+10	1.380	4.283
Canafistula	CF	01/jul/08 - 20/maio/14	0.139	8.51E+05	1.17E+07	2.71E+09	0.910	1.595
<b>Rio Grande do Norte</b>								
Gargalheiras	GG	jun/10 - mar/11	0.095	2.28E+07	2.42E+07	6.13E+09	0.614	1.738
Cruzeta	CZ	jun/10 - mar/11	0.136	4.68E+07	1.18E+07	1.02E+10	0.176	2.398
Dourado	DR	mai/11 - jan/12	0.069	9.00E+06	8.51E+06	2.00E+09	0.452	2.365
Passagem das Traíras	PT	jul/06 - out/08	0.087	3.50E+06	4.56E+07	7.81E+10	0.237	19.521
Boqueirão das Parelhas	BP	ago/06 - ago/08	0.081	2.30E+06	3.27E+07	6.19E+09	3.008	2.279
Itans	IT	jul/06 - dez/08	0.098	2.65E+06	4.59E+07	1.86E+10	1.542	4.055
Sabugi	SB	jul/06 - set/08	0.055	2.00E+06	5.23E+07	7.36E+09	2.433	2.525
<b>Paraíba</b>								
Epitácio Pessoa	EP	jan/06 - ago/08	0.036	5.13E+07	3.87E+08	3.94E+10	1.167	2.725
<b>Pernambuco</b>								
Tapacurá	TP	ago/99 - ago/00	0.038	3.42E+07	6.86E+07	5.99E+09	0.964	1.789

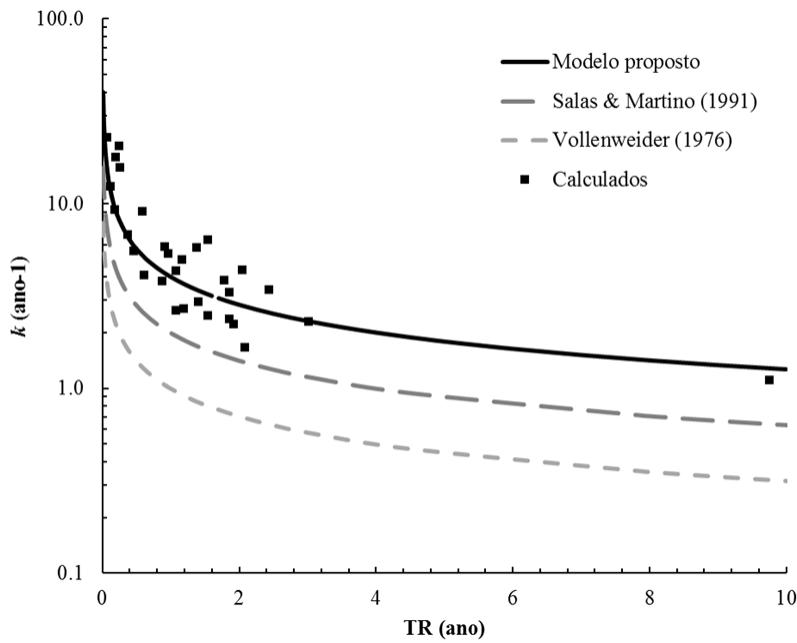
Fonte: Autor (2016).

Figura 57 – Valores de  $k$  calculados para os reservatórios do semiárido brasileiro para a) Solução permanente; b) Solução transiente.

a)



b)



Fonte: Autor (2016).

Diferentemente da Tabela 26, o reservatório Quincoé não foi considerado na Figura 57 (a) visto ter apresentado um valor de  $k$ , calculado pela Equação 5.27, igual a -

4,481 ano<sup>-1</sup>. Desta forma, verifica-se que os valores do coeficiente de decaimento de fósforo nos reservatórios do semiárido brasileiro se ajustam melhor à solução transiente (Equação 5.26) que a permanente. Corrobora para isto os elevados coeficientes de variação das concentrações de fósforo total nos reservatórios analisados, conforme exposto nas Tabelas 10, 12, 15, 17, 18.

### **5.3. Validação do modelo de Chapra (1975) ao semiárido brasileiro**

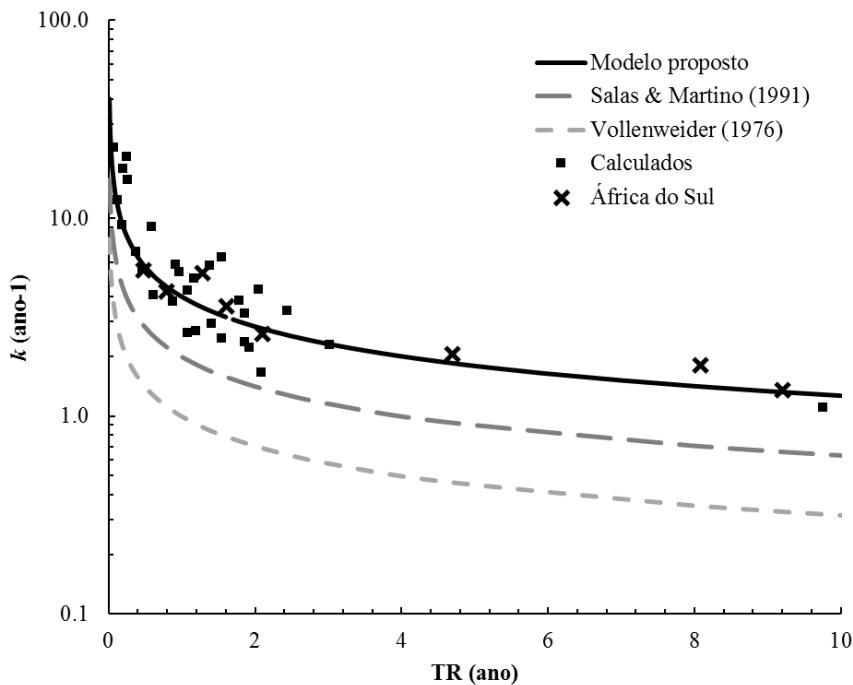
A validação do modelo de Chapra (1975) calibrado para os reservatórios do semiárido brasileiro se deu através dos dados de reservatórios africanos, à semelhança de Salas & Martino (1991). Neste caso, os dados foram retirados do Report to the Water Research Commission (Harding, 2008) com os coeficientes de decaimento sendo obtidos seguindo a mesma metodologia daqueles dos reservatórios do semiárido brasileiro, conforme exposto no Capítulo 4, e são expostos na Tabela 28. A Figura 58 evidencia os dados de  $k$  dos oito reservatórios africanos em conjunto com os  $k$  dos reservatórios nordestinos e da curva proposta da Equação (5.23).

Tabela 28 – Dados dos reservatórios africanos para validação

RESERVATÓRIOS	Período	t (anos)	V (hm <sup>3</sup> )	Qe (hm <sup>3</sup> /ano)	Qs (hm <sup>3</sup> /ano)	TR (anos)	W (ton/ano)	PTo (mg/L)	PT (mg/L)	mod (mg/L)	$\lambda$ (ano <sup>-1</sup> )	Qs/V (ano <sup>-1</sup> )	k (ano <sup>-1</sup> )	k med (ano <sup>-1</sup> )
ÁFRICA DO SUL														
Allemanskraal	jan/90 - jan/98	8.000	179.000	22.153	50.507	8.080	36.2	0.100	0.120	0.120	1.683	0.282	1.401	1.813
	jan/98 - jun/03	5.500						0.150	0.080	0.081	2.508		2.226	
Bronhorstspruit	jan/90 - jun/94	4.500	58.000	12.367	59.190	4.690	13.8	0.020	0.060	0.060	3.960	1.021	2.939	2.060
	jan/06 - jun/99	3.500						0.100	0.060	0.060	3.960		2.939	
	jan/01 - jan/06	5.000						0.100	0.180	0.180	1.321		0.300	
Erfenis	jan/90 - jan/00	10.000	212.000	23.043	63.663	9.200	46.8	0.180	0.150	0.150	1.467	0.300	1.167	1.350
	jan/00 - jan/06	6.000						0.150	0.120	0.120	1.833		1.532	
Grootdraai	jan/90 - jan/92	2.000	356.000	221.118	501.009	1.610	90.9	0.080	0.050	0.050	5.060	1.407	3.652	3.602
	jan/96 - jan/99	3.000						0.180	0.070	0.071	3.608		2.200	
	jan/03 - jan/05	2.000						0.060	0.040	0.040	6.362		4.954	
Klipvoor	jan/90 - jan/91	1.000	42.000	53.165	99.217	0.790	166	0.800	0.400	0.400	9.881	2.362	7.519	4.274
	dez/92 - dez/93	1.000						1.000	0.900	0.900	4.398		2.035	
	dez/94 - dez/95	1.000						0.200	0.700	0.700	5.630		3.268	
Laing	jun/92 - jun/93	1.000	20.000	42.553	88.401	0.470	24.900	0.200	0.080	0.080	15.506	4.420	11.086	5.433
	jun/93 - jan/94	0.500						0.080	0.180	0.180	6.783		2.363	
	jun/97 - jan/98	0.583						0.100	0.170	0.170	7.271		2.851	
Roodeplaat	jan/94 - jan/95	1.000	43.000	33.594	51.240	1.280	94.200	0.500	0.650	0.651	3.337	1.192	2.145	5.273
	jan/01 - jun/02	1.500						0.400	0.300	0.300	7.300		6.108	
	jan/05 - jan/06	1.000						0.500	0.250	0.250	8.756		7.564	
Vaal	jan/90 - jan/92	2.000	2610.000	1242.857	2386.193	2.100	445.000	0.090	0.030	0.031	5.579	0.914	4.665	2.612
	jan/95 - jan/97	2.000						0.010	0.110	0.110	1.474		0.559	

Fonte: Autor (2016).

Figura 58 – Validação da Equação  $k = 4/\sqrt{TR}$  para o semiárido em geral



Fonte: Autor (2016).

A análise da tabela e figura anteriores permite notar que os dados do coeficiente de decaimento do fósforo nos reservatórios africanos permanecem majoritariamente sobre a curva proposta (Equação 5.23). Verifica-se, portanto, que o modelo de Chapra (1975) para reservatórios em regiões semiáridas está validado. É possível, desta forma, proceder a análise dos cenários futuros correlacionados com a gestão dos recursos hídricos.

#### 5.4. Análise de cenários

A utilização de um modelo simples com dados calibrados e validados para a região do semiárido brasileiro é de fundamental importância na gestão dos recursos hídricos no Nordeste. Como forma de demonstração, serão expostos futuros cenários em três reservatórios cearenses (já anteriormente analisados quanto ao fósforo total e à clorofila-a): Gavião, Banabuiú e Castanhão.

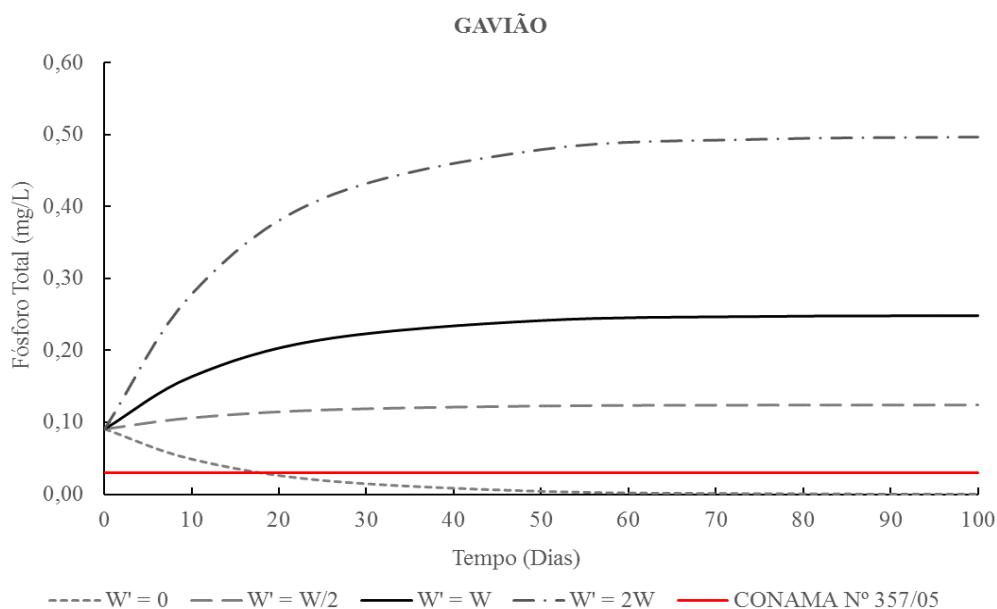
Conforme dito e explicado seu procedimento no Capítulo 4, os cenários avaliados são: efeitos nas concentrações de fósforo total nos reservatórios para diferentes valores

de carga afluente de fósforo (desde nula até o dobro); a menor porcentagem de remoção de carga afluente de fósforo aos três reservatórios para que, no menor tempo possível, obedecam ao limite CONAMA N° 357/05 de 0,030 mg/L; efeitos na concentração de fósforo total oriundos da perda de volume armazenado por assoreamento nos reservatórios e, conjuntamente ao assoreamento, da redução em 50% de suas vazões de entrada.

Convém dizer que as concentrações de fósforo total iniciais no Gavião, Banabuiú e Castanhão foram as últimas concentrações que constam no Portal Hidrológico do Ceará (CEARÁ, 2016a): 0,091, 0,074 e 0,084 mg/L, respectivamente. As duas primeiras concentrações nas datas 03/05/2016 e a última em 02/06/2016. Da mesma forma, os volumes utilizados na análise dos cenários foram os últimos que constam em tal portal (CEARÁ, 2016b), correspondentes aos volumes medidos em 29 de setembro de 2016, cujos valores são: Gavião – 26,89 hm<sup>3</sup> (80,75% da capacidade); Banabuiú – 8,96 hm<sup>3</sup> (0,56% da capacidade total); Castanhão – 422,89 hm<sup>3</sup> (6,31% da capacidade). Os gráficos a seguir reforçam a utilidade do modelo calibrado no monitoramento de qualidade de água nos estados nordestinos.

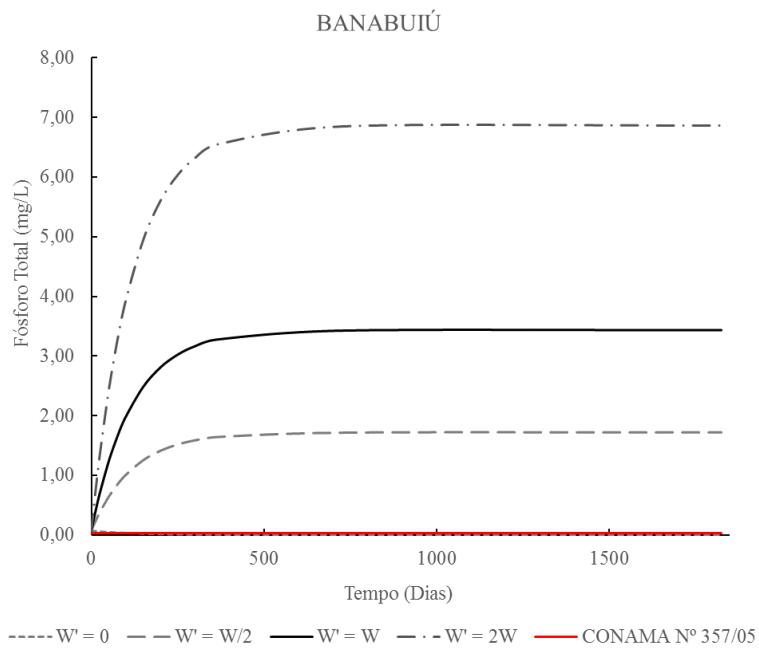
- Variação na carga afluente de fósforo:

Figura 59 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Gavião



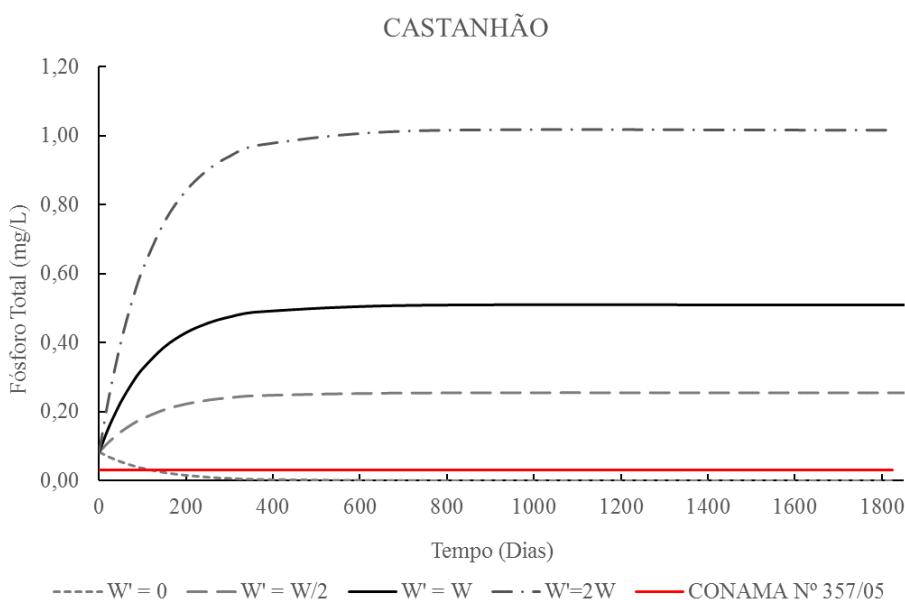
Fonte: Autor (2016).

Figura 60 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Banabuiú



Fonte: Autor (2016).

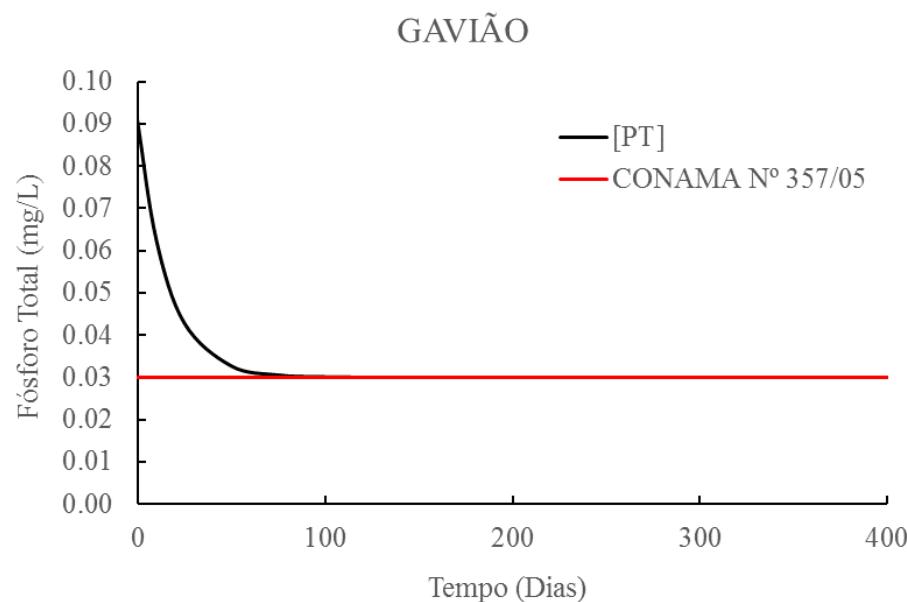
Figura 61 – Variação da [PT] para diferentes cargas de fósforo (0; 0,5W; W; 2W) ao Castanhão



Fonte: Autor (2016).

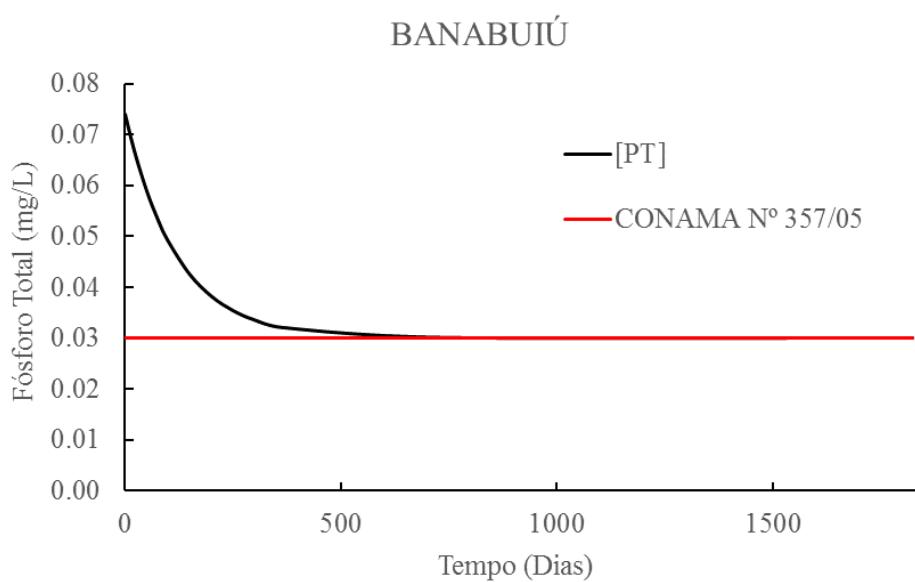
- % Remoção e Limite CONAMA Nº 357/05:

Figura 62 – Variação da [PT] para 88% de remoção da carga de fósforo ao Gavião



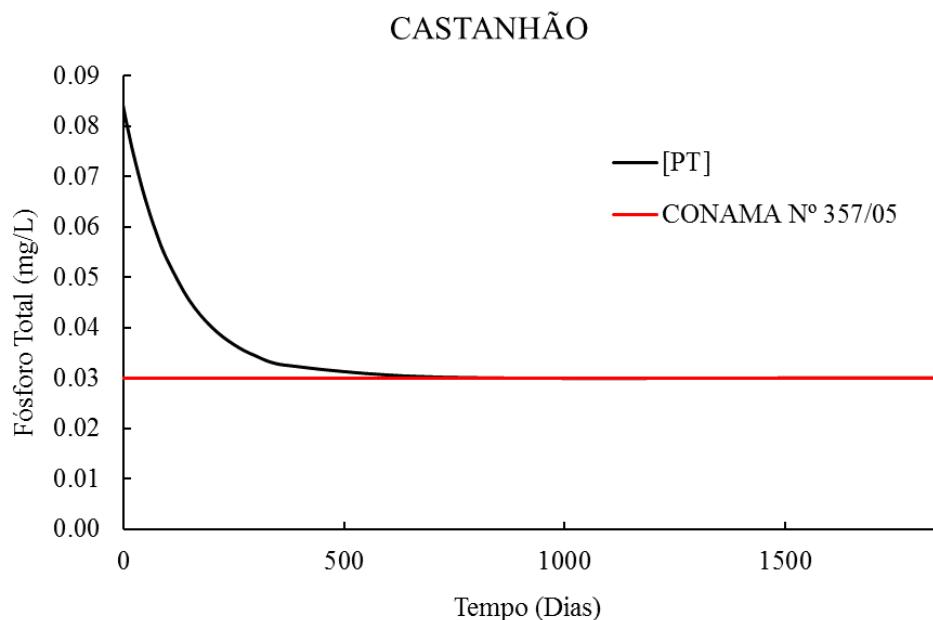
Fonte: Autor (2016).

Figura 63 – Variação da [PT] para 99,13% de remoção da carga de fósforo ao Banabuiú



Fonte: Autor (2016).

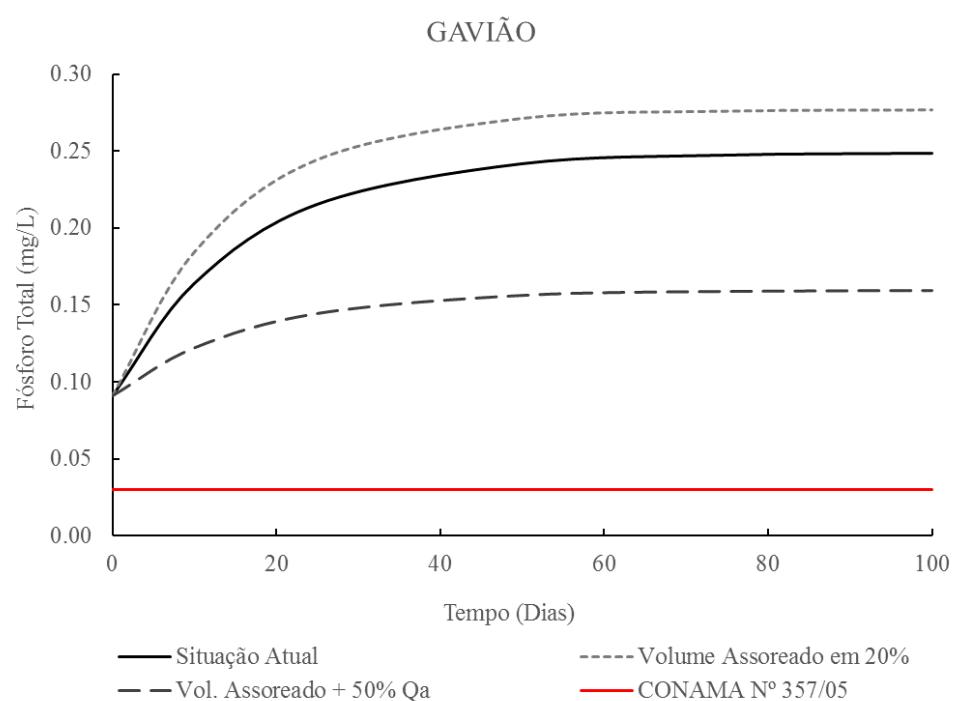
Figura 64 – Variação da [PT] para 94,10% de remoção da carga de fósforo ao Castanhão



Fonte: Autor (2016).

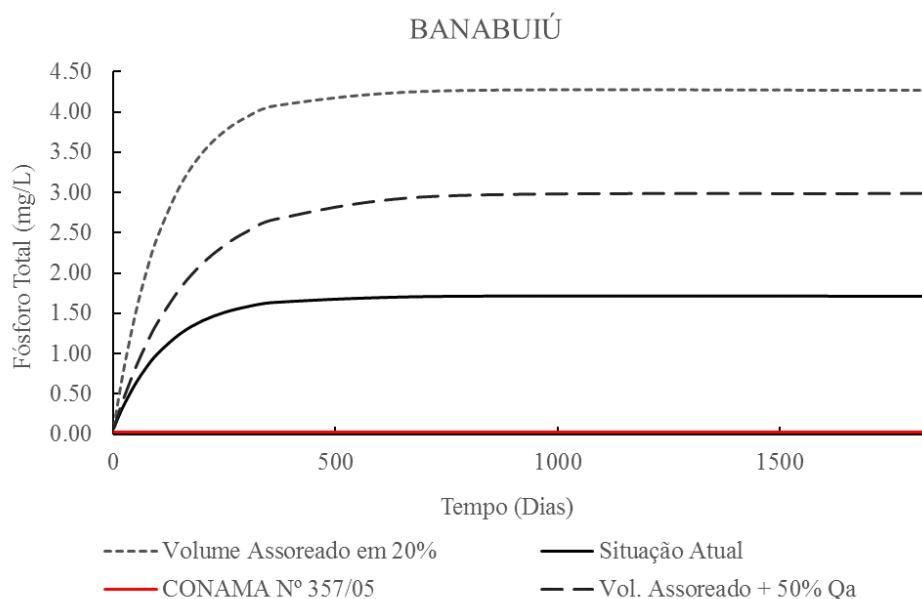
- Variações por volume assoreado e redução da vazão de entrada:

Figura 65 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Gavião



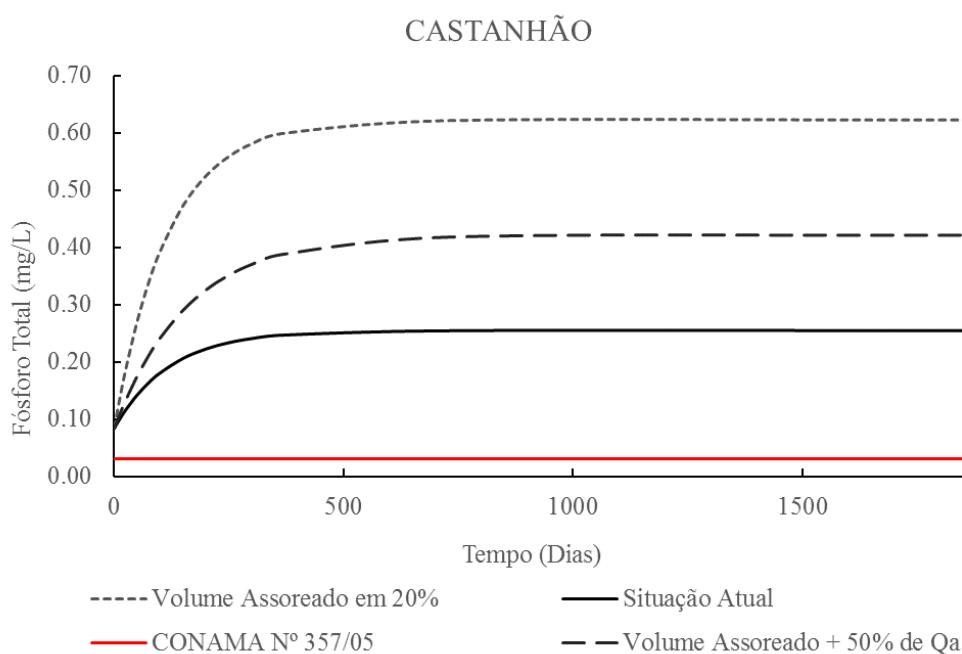
Fonte: Autor (2016).

Figura 66 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Banabuiú



Fonte: Autor (2016).

Figura 67 – Influência do assoreamento e da redução de vazão de entrada na variação da [PT] no Castanhão



Fonte: Autor (2016).

## 6. CONCLUSÃO

Tendo sido o modelo de Chapra (1975) calibrado e validado para o semiárido brasileiro e geral, e em posse da nova relação para  $k = f(TR)$ , é possível concluir os seguintes itens:

- As concentrações médias de fósforo total nos reservatórios do semiárido brasileiro superam a mediana das concentrações de fósforo total dos lagos do mundo (0,0146 mg/L) e as concentrações de fósforo total em lagos e reservatórios tropicais e temperados, dentre os quais os escoceses, neozelandeses, norte-americanos, canadenses e brasileiros de outras regiões do país, chegando a valores de concentração de fósforo total (5,062 mg/L; 2,145 mg/L; 1,460 mg/L) superiores ao limite máximo (0,900 mg/L) para 241 lagos do mundo, caracterizando-se como concentrações próprias de lagoas de estabilização ou tanques de cultivo de peixes.
- As cargas afluentes de fósforo aos reservatórios do semiárido brasileiro são da mesma ordem de grandeza daquelas a reservatórios de demais regiões do país. Isto sublinha o fato de que as principais fontes de nutrientes em reservatórios serem oriundas de atividades agrícolas e afluência de esgotos domésticos. Os tempos de retenção hidráulica dos reservatórios no semiárido são majoritariamente maiores que aqueles em regiões de clima temperado e tropical, inclusive de outras regiões do Brasil, e são majoritariamente menores que os tempos de retenção hidráulica em lagos tropicais e temperados, como era esperado.
- A grande variabilidade dos dados de concentração de fósforo total nos reservatórios do semiárido, além de se visar o entendimento dos processos neles existentes a longo prazo, indicaram, pelo critério de Canale & Seo (1996a), ser preferível a utilização do modelo mais simples de previsão de concentração de fósforo total de Chapra (1975), com apenas o parâmetro  $k$  a ser calibrado, na modelagem dos reservatórios da região analisada.
- As particularidades climáticas, hidrológicas, limnológicas e geográficas do semiárido brasileiro tiveram bastante influencia na magnitude dos coeficientes de decaimento de fósforo nos reservatórios estudados, visto potencializarem os fatores que o influenciam. Desta forma, os valores encontrados superaram, como esperado, os valores que seriam obtidos pela utilização das relações  $k = f(TR)$  para reservatórios tropicais

(SALAS & MARTINO, 1991) e temperados (VOLLENWEIDER, 1976). Ainda que o coeficiente de decaimento de fósforo seja mais elevado em tal região, sua elevada concentração na coluna d'água reforça o impacto das cargas externas, particularmente aquelas de fontes de poluição pontuais, nos reservatórios analisados.

- A relação proposta do coeficiente de decaimento de fósforo para o semiárido brasileiro (Equação 5.23) se ajustou satisfatoriamente aos valores dos dados de trinta dos trinta e três reservatórios nordestinos analisados. Por ter se ajustado aos dados dos açudes sul-africanos, o modelo calibrado proposto pode ser satisfatoriamente utilizado na modelagem de reservatórios em regiões semiáridas.

- A avaliação de cenários futuros demonstrou a utilidade do modelo proposto na simulação de diferentes impactos nos reservatórios por ocasião de variações em seus volumes, vazões de entrada, cargas afluentes de fósforo e porcentagens de remoção da carga afluente. Consequentemente, tal modelo vem a servir como ferramenta para uma mais eficiente gestão dos recursos hídricos no nordeste brasileiro.

## REFERÊNCIAS

ADAPAR - Agência de Defesa Agropecuária do Paraná. **Folisuper 600 BR.** Disponível em:

<[http://www.adapar.pr.gov.br/arquivos/File/defis/DFI/Bulas/Inseticidas/FOLISUPER\\_600\\_BR.pdf](http://www.adapar.pr.gov.br/arquivos/File/defis/DFI/Bulas/Inseticidas/FOLISUPER_600_BR.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas de Estado da Paraíba. **Pluviometria media do Estado da Paraíba.** Paraíba, 2006. 1 mapa, color. Escala 1:1. 200.000.

Disponível em:

<[http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas\\_perh/Pluviometria\\_Media do Estado da Paraiba.zip](http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas_perh/Pluviometria_Media do Estado da Paraiba.zip)>. Acesso em: 03 out. 2016.

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas de Estado da Paraíba. **Açudes e rios monitorados para qualidade de água.** Paraíba, 2009. 1 mapa, color. Escala 1:1.700.000. Disponível em:

<[http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas\\_perh/Acudes\\_e\\_Rios\\_Monitorados\\_para\\_Qualidade\\_da\\_agua.zip](http://www.aesa.pb.gov.br/geoprocessamento/geoportal/mapas_perh/Acudes_e_Rios_Monitorados_para_Qualidade_da_agua.zip)>. Acesso em: 03 out. 2016.

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas de Estado da Paraíba. **Base de dados em Volumes dos açudes.** Disponível em:

<[http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/jsp/monitoramento/volumes\\_acudes/indexVolumesAcudes.jsp](http://site2.aesa.pb.gov.br/aesa/jsp/monitoramento/volumes_acudes/indexVolumesAcudes.jsp)>. Acesso em: 04 out. 2016.

AGUIRRE, M. S. The value of water and theories of economic growth. In: ROGERS, P. P.; LLAMAS, M. R.; CORTINA, L. M. **Water crisis: Myth or Reality?**. Marcelino Botin Water Forum 2004. London: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 5. p. 93-104.

ALTAFIN, I. G. et al. Paranoá Lake – Limnology and Recovery Program. In: TUNDISI, J. G.; BICUDO, C. E. M.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnology in Brazil.** Rio de Janeiro: ABC/SBL, 1995. p. 325-349.

AMORIM, B. **Análise comparativa de processos de eutrofização da água em reservatórios do estado do Ceará e sua relação com as características morfológicas, hidrológicas e climáticas.** 2001. 174 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

AMORIM, B. **Estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia metropolitana.** Fortaleza: FUNCEME, 2002. 580 p.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Alternativas de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do Norte de Minas Gerais.** Brasília, 2006. 80 p.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Abastecimento Urbano de Água.** Resultados por Estado. Brasília: SPRH, 2010. 1 Atlas. Escalas variam.

ANA – Agência Nacional de Águas. **A questão da água no Nordeste.** Brasília, 2012. 436 p.

ANTONELLO, A. **Influência das variações sazonais e espaciais nas variáveis limnológicas do reservatório de Boa Esperança, Rio Parnaíba, PI-MA.** 2006. 63 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Pesqueiros e Aquicultura), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2006.

ANTONELLO, A.; SEVERI, W. Influência do ciclo hidrológico do reservatório de Sobradinho sobre a carga de fósforo total. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 3, n. 3, p. 31-34, 2008. Disponível em: <<http://ppg.revistas.uema.br/index.php/REPESCA/article/view/85>>. Acesso em: 02 out. 2016.

ARAÚJO, G. M. **Análise e modelagem integrada da qualidade da água em um sistema urbano canal-reservatório eutrofizado, localizado em Fortaleza/CE.** 2016. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

ARAÚJO JÚNIOR, R. J. de. **Evolução temporal dos níveis tróficos do açude Epitácio Pessoa, semiárido paraibano.** 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.

ARRUDA, P. C. de. **Comunidade fitoplancônica e condicionantes limnológicos no diagnóstico da eutrofização e capacidade suporte do reservatório de Acauã, Paraíba-Brasil.** 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal da Paraíba - Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.

AZEVEDO, S. B. de. **Impactos da piscicultura intensiva sobre a qualidade da água de um reservatório no semiárido.** 2012. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012. 90p.

BARBOSA, J. E. de L. **Dinâmica do fitoplâncton e condicionantes limnológicos nas escalas de tempo (nictemeral/sazonal) e de espaço (horizontal/vertical) no açude Taperoá II: trópico semiárido nordestino.** 2002. 208 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

BARROS, L. R. **O índice do estado trófico e sua adaptação para os sistemas lênticos do semiárido cearense.** 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

BERNHARDT, H. Reservoir and drinking-water supply – a global perspective. **Journal Water Supply Research and Technology-Acqua**, v. 44, n. 1, p.2-17, 1995.

BEZERRA, A. F. de M.; BECKER, V.; MATTOS, A. Balanço de massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p.67-76, 2014.

BRAGA, E. de A. S. **Determinação dos compostos inorgânicos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato) e fósforo total, na água do açude Gavião, e sua contribuição para a eutrofização.** 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Civil: Saneamento Ambiental), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

BRASIL. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste; Departamento Nacional de Produção Mineral. **Inventário hidrogeológico básico do nordeste**. Belo Horizonte, 1987.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. N° 357: Resolução de 17 de março de 2005. Brasília, 2005.

BRETT, M. T.; BENJAMIN, M. M. A review and reassessment of lake phosphorus retention and the nutrient loading concept. **Freshwater Biology**, v. 53, n. 1, p.194-211, 2008.

BREZONIK, P. L.; ARNOLD, W. A. **Water Chemistry**: an introduction to the chemistry of natural and engineered aquatic systems. Oxford: Oxford University Press, 2011. 809 p.

CANALE, R. P.; SEO, D. Performance, reliability and uncertainty of total phosphorus models for lakes – II. Stochastic Analyses. **Water Research**, v. 30, n. 1, p. 95-102, 1996a.

CANALE, R. P.; SEO, D. Performance, reliability and uncertainty of total phosphorus models for lakes – I. Deterministic Analyses. **Water Research**, v. 30, n. 1, p.83-94, 1996b.

CANFIELD JUNIOR, D. E.; BACHMANN, R. W. Prediction of Total Phosphorus Concentrations, Chlorophyll a, and Secchi Depths in Natural and Artificial Lakes. **Canadian Journal Of Fisheries And Aquatic Sciences**, v. 38, n. 4, p.414-423, 1981.

CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes1. **Limnology And Oceanography**, v. 22, n. 2, p.361-369, 1977.

CARPENTER, S. R.; KITCHELL, J. F.; HODGSON, J. R. Cascading Trophic Interactions and Lake Productivity. **BioScience**, v. 35, n. 10, p.634-639, 1985.

CARVALHO, A. de P. **Diagnóstico da degradação ambiental do açude Bodocongó em Campina Grande – PB**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

CASTAGNINO, W. A. **Investigación de modelos simplificados de eutroficación en lagos tropicales**. Organizacion Panamericana de La Salud: Centro Panamericano de Ingenieria Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1982. 30 p.

CAVALCANTE FILHO, E. C.; STUDART, T. M. de C.; CAMPOS, J. N. B. Método para estimativa regional de duração da estação seca dos rios do Ceará utilizada no fator adimensional de evaporação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** . Maceió: ABRH, 2011. p. 1 - 18.

CCME - Canadian Council of Ministers of the Environment. **Phosphorus:** Canadian guidance framework for the management of freshwater systems. Winnipeg, 2004.

CEARÁ. **Pacto das águas:** Compromisso sócio-ambiental compartilhado – continuando o diálogo. Fortaleza, 2009. 30 p.

CEARÁ. **Base de dados em Sistema de qualidades das águas:** Estado Trófico. 2016a. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/acude/eutrofizacao>>. Acesso em: 02 out. 2016.

CEARÁ. **Base de dados em Volume armazenado - Reservatórios.** 2016b. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br>>. Acesso em: 02 out. 2016. 2016b.

CERDA, M. et al. Nutrient budgets in the Piratininga-Itaipu lagoon system (southeastern Brazil): effects of sea-exchange management. **Latin American Journal Of Aquatic Research**, v. 41, n. 2, p.226-238, 2013.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem:** Qualidade das águas interiores. São Paulo, 2009.

CHAPRA, S. C. Comment on ‘An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes’ by W. B. Kirchner and P. J. Dillon. **Water Resources Research**, v. 11, n. 6, p. 1033-1034, 1975.

CHAPRA, S. C. Total phosphorus model for the Great Lakes. **Journal Of The Environmental Engineering Division**, v. 103, n. 2, p.147-161, 1977.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Long-term phenomenological model of phosphorus and oxygen for stratified lakes. **Water Research**, v. 25, n. 6, p.707-715, 1991.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling.** Waveland Press, 1997. 844 p.

CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. **Programa de monitoramento do rio São Francisco durante o período de vazão reduzida e operação com descarregador de fundo: 1º Relatório mensal.** Florianópolis, 2016.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 61-82, 2008.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Forquilha:** fatores condicionantes da qualidade das águas. Fortaleza, 2007.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Acarape do Meio:** fatores condicionantes da qualidade das águas. Fortaleza, 2008a.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Sítios Novos:** fatores condicionantes da qualidade das águas. Fortaleza, 2008b.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Olho d'Água:** fatores condicionantes da qualidade das águas. Fortaleza, 2008c.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Colina:** fatores condicionantes da qualidade das águas. Fortaleza, 2010.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Orós.** Fortaleza, 2011a.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Castanhão.** Fortaleza, 2011b.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Banabuiú.** Fortaleza, 2011c.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Arrebita.** Fortaleza, 2011d.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude General Sampaio.** Fortaleza, 2011e.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Pacajus.** Fortaleza, 2011f.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Quincoé.** Fortaleza, 2011g.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Itaúna.** Fortaleza, 2011h.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Rosário.** Fortaleza, 2011i.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Rivaldo de Carvalho.** Fortaleza, 2011j.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Flor do Campo.** Fortaleza, 2011k.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Edson Queiroz.** Fortaleza, 2011l.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Caxitoré.** Fortaleza, 2011m.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental açude Canafistula.** Fortaleza, 2011n.

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Inventário ambiental do açude Curral Velho.** Fortaleza, 2012.

CORRELL, D. L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: a review. **Journal Environmental Quality**, v. 27, n. 2, p.261-266, 1998.

COSGROVE, W. J. Water for growth and security. In: ROGERS, P. P.; LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. **Water crisis: Myth or Reality?**. Marcelino Botin Water Forum 2004. London: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 2. p. 37-42.

COSTA, B. D. F. da. **Caracterização ambiental e dimensionamento da capacidade de aproveitamento do reservatório de Sobradinho para a instalação de tanques-rede**. 2004. 74 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Pesqueiros e Aquicultura), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

COSTA, B. D. F. da et al. Influência do ciclo hidrológico do reservatório de Sobradinho sobre a carga de fósforo total. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca**, v. 3, n. 3, p.32-35, 2009.

DERISIO, J. C; A PERKINS, M.. Os nutrientes (N e P) e a qualidade das águas do reservatório do Guarapiranga. **Revista DAE**, v. 125, n. 1247, p.39-44, 1981.

DIAS, S. N. **Ecologia do fitoplâncton no reservatório Arcosverde: estudo nictemeral e sazonal**. 2009. 50 f. Dissertação (Mestrado em Botânica), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.

DIAS, F. O. **Efeitos do estado trófico sobre as comunidades planctônicas de reservatórios da bacia do rio Paraíba – Semiárido – Brasil**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

DILLON, P. J.; RIGLER, F. H. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes1,2. **Limnology And Oceanography**, v. 19, n. 5, p.767-773, 1974a.

DILLON, P. J.; RIGLER, F. H. A Test of a Simple Nutrient Budget Model Predicting the Phosphorus Concentration in Lake Water. **Journal Of The Fisheries Research Board Of Canada**, v. 31, n. 11, p.1771-1778, 1974b.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, p.488-506, 2015.

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Base de dados em Monitoramento de Reservatórios**. 2016a. Disponível em: <[http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/php/comunicacao/monitoramento\\_de\\_reservatorios.php](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/php/comunicacao/monitoramento_de_reservatorios.php)>. Acesso em: 03 out. 2016.

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Açude Boqueirão de Cabaceiras**. 2016b. Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/barragens/boqueirao/boqueirao.htm>>. Acesso em: 03 out. 2016.

DOURADO, C. da S.; OLIVEIRA, S. R. de M.; AVILA, A. M. H. de. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no Estado da Bahia. **Bragantia**, v. 72, n. 2, p.192-198, 2013.

DUARTE, M. A. C. et al. O índice de estado trófico de Carlson (IET) aplicado em corpos aquáticos lênticos do nordeste do Brasil. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26., 1998, Lima. **Resumes**. Lima: Asociación Peruana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1998. p. 1 – 5.

EA - Environment Agency. **The River Basin Districts Typology, Standards and Groundwater threshold values (Water Framework Directive) (England and Wales) Directions 2010**. Disponível em: <<http://gov.wales/docs/legislation/inforcenonsi/environmental/100804direct38.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2016.

ECMWS - Environment Canada And Manitoba Water Stewardship. **State of lake winnipeg**: 1999 to 2007. Winnipeg, 2011.

EEA – European Environment Agency. **Water temperature of large European rivers and lakes**. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/water-temperature-1/assessment>>. Acesso em: 04 out. 2016.

EPA - Environmental Protection Agency. **Technical Guidance Manual for Performing Waste Load Allocations**. Book IV Lakes, Reservoirs and Impoundments: Chapter 2 Eutrophication. Office Of Water Regulations And Standards Monitoring And Data Support Division, 1983.

ESKINAZI-SANT'ANNA, E. M. et al. Composição da assembléia zooplânctônica em reservatórios eutróficos do semi-árido do Rio Grande do Norte. **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 4, p.410-421, nov. 2007.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro: Interciência/FINEP, 1998.

FARIAS, E. E. V. de. **Distribuição da água do projeto de integração do rio São Francisco no estado da Paraíba – Eixo Leste**: análise de perdas. 2009. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil de Recursos Hídricos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

FRANZEN, M. **Dinâmica do fósforo na interface água-sedimento em reservatórios**. 2009. 244 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FREIRE, R. H. F. **Contribuição ao conhecimento limnológico de reservatórios do semiárido brasileiro que abastecem a região metropolitana de Fortaleza: açudes Pacajus e Gavião (Ceará, Brasil)**. 2007. 246 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FUNCENE – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Ceará passa pela pior seca prolongada desde 1910**. 2016a. Disponível em:

<<http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/740-ceará-passa-pela-pior-seca-prolongada-desde-1910>>. Acesso em: 03 out. 2016.

FUNCENE – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Quadro de estiagem se agrava em todos os estados do Nordeste.** 2016b. Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/742-quadro-de-estiagem-se-agrava-em-todos-os-estados-do-nordeste>>. Acesso em: 03 out. 2016.

GARCIA, H. L et al. Nível trófico do reservatório de Jacarecica I – Sergipe – Brasil. **Scientia Plena**, v. 8, n. 7, p.1-9, jul. 2012.

GCIS - Government Communication and Information System. **South Africa Yearbook 2014/2015.** 22. ed. Elias Tibane & Malphia Honwane, 2015.

**GOBBI, M. F. Modelagem matemática.** Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/forum.nsf/205dceedb88c9ab703256c2c005e0402/0e8f4dce244e78d003256eba00522b3f/\\$FILE/cap 6 hidroin.doc](http://www.sanepar.com.br/sanepar/gecip/forum.nsf/205dceedb88c9ab703256c2c005e0402/0e8f4dce244e78d003256eba00522b3f/$FILE/cap 6 hidroin.doc)>. Acesso em: 02 out. 2016.

GUNKEL, G. et al. Estudos da limnologia do reservatório de Tapacurá em Pernambuco: problemas da gestão de reservatórios no semiárido brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba. **Anais.... .** Curitiba: ABRH, 2003.

HANEMANN, W. R. The economic conception of water. In: ROGERS, P. P.; LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. **Water crisis: Myth or Reality?** Marcelino Botin Water Forum 2004. London: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 4. p. 59-90.

HARDING, W. R. **The determination of annual phosphorus loading limits for South African Dams.** Pretoria: Water Research Commission, 2008.

HIJO, C. A. G. **Quantificação do efeito do açude Castanhão sobre o fluxo fluvial de material particulado em suspensão e nutrientes para o estuário do rio Jaguaribe, Ceará - Brasil.** 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhais Tropicais), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

HUTCHINSON, G. E. **A treatise on limnology.** New York: John Willey & Sons, 1957.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Densidade demográfica em 2010.** 2016a. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=10&uf=00>>. Acesso em: 03 out. 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Renda domiciliar per capita 2015.** 2016b. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Trabalho\\_e\\_Rendimento/Pesquisa\\_Nacional\\_por\\_Amostra\\_de\\_Domicilios\\_continua/Renda\\_domiciliar\\_per\\_capita/Renda\\_domiciliar\\_per\\_capita\\_2015\\_20160420.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Trabalho_e_Rendimento/Pesquisa_Nacional_por_Amostra_de_Domicilios_continua/Renda_domiciliar_per_capita/Renda_domiciliar_per_capita_2015_20160420.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.

- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Região Nordeste.** 2016c. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/produtos\\_educacionais/mapas\\_tematicos/mapas\\_do\\_brasil/mapas\\_regionais/politico/regiao\\_nordeste.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/produtos_educacionais/mapas_tematicos/mapas_do_brasil/mapas_regionais/politico/regiao_nordeste.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Semiárido Brasileiro.** 2016d. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas\\_e\\_mapas/mapas\\_regionais/sociedade\\_e\\_economia/semi\\_arido/semiarido\\_brasileiro.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_regionais/sociedade_e_economia/semi_arido/semiarido_brasileiro.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.
- IETC – International Environmental Technology Center. **Lagos e Reservatórios.** Qualidade da Água: O impacto da eutrofização. São Carlos, 2002. 34 p.
- IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Precipitação Pluviométrica – 2015.** 2016a. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/143.htm>>. Acesso em: 03 out. 2016.
- IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Bacias Hidrográficas.** 2016b. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/129x.htm>>. Acesso em: 03 out. 2016.
- IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Região semiárida cearense.** 2016c. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/133.htm>>. Acesso em: 03 out. 2016.
- JENSEN, H. S.; ANDERSEN, F. O. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. **Limnology And Oceanography**, v. 37, n. 3, p.577-589, 1992.
- JEPPESEN, E. et al. Lake restoration and biomanipulation in temperate lakes: relevance for subtropical and tropical lakes. In: REDDY, M. V. **Restoration and Management of Tropical Eutrophic Lakes.** Taylor & Francis Group, 2005. p. 331-349.
- JONES, J. R.; BACHMANN, R. W. Prediction of phosphorus and chlorophyll levels in lakes. **Journal Water Pollution Control Federation**, v. 48, n. 9, p.2176-2182, 1976.
- KEMERICH, P. D. da C. et al. Qualidade da água oriunda do escoamento superficial simulado em bacia Hidrográfica. **Ciência e Natura**, v. 35, n. 2, p.136-151, 2014.
- LAMPARELLI, M. C. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo:** Avaliação dos métodos de monitoramento. 2004. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- LASERAS, P. L. Sedimentary phosphorus dynamics in epicontinental systems: a literature review. **Oecologia Aquática**, v. 10, n. 10, p.113-125, 1991.
- LEIDY, G. R.; JENKINS, R. M. **The development of fishery compartments and population rate coefficients for use in reservoir ecosystem modeling.** Vicksburg: U.S. Army Corps Of Engineers Waterways Experiment Station, 1977.

LEWIS, W. M. Basis for the protection and management of tropical lakes. **Lakes And Reservoirs Research and Management**, v. 5, n. 1, p.35-48, 2000.

LIMA, A. E.; SEVERI, W. Estado trófico na cascata de reservatórios de um rio no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 9, n. 1, p.124-133, 2014.

LIMA, B. P. **Enquadramento de corpos d'água no semiárido brasileiro como instrumento de gestão e sustentabilidade ambiental:** o caso da bacia hidrográfica Acarape do Meio – CE. 2016. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LIMA, R. S. et al. Variações na qualidade da água superficial dos reservatórios das bacias dos rios Piauí – Real/Sergipe. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 12., 2014, Natal. **Anais...** . Natal: ABRH, 2014. p. 1 – 8.

LINS, R. P. M. **Estrutura e dinâmica da comunidade fitoplanctônica em um reservatório eutrófico do trópico semiárido brasileiro.** 2011. 118 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

LUNA, B. J. C. **Características espaço-temporais do sistema do açude Acauã-PB, e seu atual Índice de Estado Trófico.** 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal da Paraíba/universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2008.

MALLASEN, M. et al. Qualidade da água em sistema de piscicultura em tanques-rede no reservatório de Ilha Solteira, SP. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 38, n. 1, p.15-30, 2012.

MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S. et al. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas.** Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 384-422.

MDA - Minnesota Department of Agriculture. **Phosphorus in lawns, landscapes and lakes.** Saint Paul, 2004. 22p.

MEEUWIG, J. J.; PETERS, R. H. Circumventing phosphorus in lake management: a comparison of chlorophyll a predictions from land-use and phosphorus-loading models. **Canadian Journal Of Fisheries And Aquatic Sciences**, v. 53, n. 8, p.1795-1806, 1996.

MEEUWIG, J. J. **All water is Wet:** predicting eutrophication in lakes and estuaries. 1998. 321 f. Tese (Doutorado em Filosofia), Department Of Biology, McGill University, Montréal, 1998.

MEDEIROS, P. R. et al. Vertical and nocturnal dynamics of limnological variables in a tropical Brazilian Dam. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. supl., n. 1, p.73-80, 2006.

- MEDIONDO, E. M. Global review of Lake and Reservoir Eutrophication and Associated Management Challenges.** Disponível em:  
[<http://wldb.ilec.or.jp/ILBMTrainingMaterials/resources/eutrophication\\_challenges.pdf>](http://wldb.ilec.or.jp/ILBMTrainingMaterials/resources/eutrophication_challenges.pdf). Acesso em: 02 out. 2016.
- MELO, G. D. de. Planejamento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Seridó, no Rio Grande do Norte.** 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental, Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Hidráulica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- MENDES, D. L. et al.** Avaliação do índice de estado trófico do açude Banabuiú. In: Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 7., 2012, Palmas. **Anais... .** Palmas: Instituto Federal do Tocantins, 2012.
- MENESES FILHO, A. S.; TUCCI, C. E. M.** Impacto da ocupação urbana na qualidade da água do escoamento superficial. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. **Anais... .** Curitiba: ABRH, 2003.
- MESNER, N.; GEIGER, J.** **Understanding your watershed:** phosphorus. Logan, 2010.
- MESQUITA, T. de P. N. Eutrofização e capacidade de carga de fósforo de seis reservatórios da bacia do rio Seridó, região semiárida do estado do RN.** 2009. 62 f. Dissertação (Mestrado em Bioecologia Aquática), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- MEYBECK, M.; HELMER, R.** An introduction to water quality. In: CHAPMAN, D. **Water Quality Assessments – A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring.** 2. ed. Cambridge: E&FN, 1996. Cap. 1. p. 19-39.
- MEYBECK, M. et al.** Water Quality. In: BARTRAM, J.; BALLANCE, R. **Water Quality Monitoring – A practical guide to the design and implementation of freshwater quality studies and monitoring programmes.** CRC Press, 1996. Cap. 2. p. 15-36.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca PAN – Brasil.** Brasília: Edições MMA, 2005.
- MOLLE, F.** **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes.** Recife: SUDENE, 1989.
- MONTEIRO, J. J. F.; NASCIMENTO, E. C.; MOURA, A. N.** Diversidade fitoplanctônica e características limnológicas do reservatório Saco I – sertão de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, supl. 2, p.324-326, 2007.
- MOORE, P. A.; RUDDY, K. R.; GRAETZ, D. A.** Phosphorus Geochemistry in the Sediment-Water Column of a Hypereutrophic Lake. **Journal Of Environment Quality**, v. 20, n. 4, p.869-875, 1991.
- MOSS, B.** **Ecology of fresh waters: man and medium.** 2. ed. Liverpool: Blackwell Scientific Publications, 1988.

MOSS, B. **Ecology of fresh waters:** a view for the twenty-first century. 4. ed. Liverpool: John Wiley & Sons, 2010.

MPCA – Minnesota Pollution Control Agency. **Nutrients:** phosphorus, nitrogen, sources, impact on water quality – a general overview. Detroit Lakes, 2008.

NDUNGU, J. N. **Assessing water quality in lake naivasha.** 2014. 173 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engineering Technology, University Of Twente, Enschede, 2014.

NOVO, A. de A. **Caracterização do impacto da aquicultura de tilápias pelo aporte de carbono, nitrogênio e fósforo em uma enseada do reservatório da UHE Xingó – Rio São Francisco (SE/AL).** 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

NUNES, D. G. **Modelagem da autodepuração e qualidade da água do rio turvo sujo.** 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

NÜRNBERG, G. K. Trophic State of Clear and Colored, Soft- and Hardwater Lakes with Special Consideration of Nutrients, Anoxia, Phytoplankton and Fish. **Lake And Reservoir Management**, v. 12, n. 4, p.432-447, 1996.

OLIVEIRA, J. N. P. de. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical.** 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Volume útil dos principais reservatórios.** Disponível em:  
[http://www.ons.org.br/historico/percentual\\_volume\\_util.aspx](http://www.ons.org.br/historico/percentual_volume_util.aspx). Acesso em: 03 out. 2016.

PAULINO, W. D.; OLIVEIRA, R. R. A.; AVELINO, F. F.. Classificação do estado trófico para o gerenciamento de reservatórios no semiárido: a experiência da COGERH no estado do Ceará. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais... .** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

PENNOCK, J. R.; SHARP, J. H. Phytoplankton production in the Delaware Estuary: temporal and spatial variability. **Marine Ecology Progress Series**, v. 34, p.143-155, 1986.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.** Recife, 2010.

PERNAMBUCO. Secretaria de Infraestrutura. **Precipitação pluviométrica média anual – Pernambuco.** 2016a. 1 mapa, color. Escala 1:1.800.000. Disponível em:  
[http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF\\_Mapas/tematicos/Precipitacao\\_Media\\_Anual.pdf](http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF_Mapas/tematicos/Precipitacao_Media_Anual.pdf). Acesso em: 03 out. 2016.

PERNAMBUCO. Secretaria de Infraestrutura. **Rede de monitoramento da qualidade da água.** 2016b. 1 mapa, color. Escala: 1:1.800.000. Disponível em: <[http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF\\_Mapas/RH/Monitoramento\\_Qualidade\\_Agua.pdf](http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF_Mapas/RH/Monitoramento_Qualidade_Agua.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.

PERNAMBUCO. Secretaria de Infraestrutura. **Clima – Pernambuco.** 2016c. 1 mapa, color. Escala: 1:1.800.000. Disponível em: <[http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF\\_Mapas/tematicos/Clima.pdf](http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF_Mapas/tematicos/Clima.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.

PERNAMBUCO. Agência Estadual de Meio Ambiente. **Seleção de índices e indicadores de qualidade da água** – aplicação dos índices selecionados. 2016d. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/pnma2/qualidade-agua/selecaoIndiceIndicadores.pdf>>. Acesso em: 02 out. 2016.

PIRES, D. A. et al. Water quality in four reservoirs of the metropolitan region of São Paulo, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensis**, v. 27, n. 4, p.370-380, 2015.

RAST, W.; LEE, G. F. **Summary analysis of the North American (U.S. portion) OECD eutrophication project:** nutrient loading-lake response relationships and trophic state índices. Washington, 1978.

REBELO, M. A. P.; ARAUJO, N. C. Águas minerais de algumas fontes naturais brasileiras. **Revista da Associação Médica Brasileira**, v. 45, n. 3, p.255-260, 1999.

RECKHOW, K. H.; BEAULAC, M. N.; SIMPSON, J. T. **Modeling Phosphorus Loading and Lake response under uncertainty:** A manual and compilation of export coeficients. Washington, 1980.

ROGERS, P. Water governance, water security and water sustainability. In: ROGERS, P. P.; LLAMAS, M. R.; MARTINEZ-CORTINA, L. **Water crisis: Myth or Reality?**. Marcelino Botin Water Forum 2004. London: Taylor & Francis Group, 2006. Cap. 1. p. 1-34.

ROLIM, H. de O. **Proposta de índice de estado trófico em reservatórios do semiárido a partir de dados da bacia do Banabuiú, estado do Ceará.** 2016. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

RYDIN, E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. **Water Research**, v. 34, n. 7, p.2037-2042, 2000.

SALAS, H; MARTINO, P. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. **Water Research**, v. 25, n. 3, p.341-350, 1991.

SALAS, H. J.; MARTINO, P. **Metodologias simplificadas para la evaluación de eutrofificación en lagos cálidos tropicales.** Lima, 2001. 60 p.

SANTOS, K. P.; FLORENCIO, L. Aplicação de modelo simplificado para avaliação do estado trófico no reservatório de Duas Unas, Pernambuco-Brasil. In: Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: ABES, 2001. p. 1-9.

SCIENTEC - Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano diretor de recursos hídricos do estado do Rio Grande do Norte – Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu no território paraibano**. João Pessoa, 1998.

SEI – Superintendência de estudos econômicos e sociais da Bahia. **Tipologia climática segundo koppen 2014**. Bahia, 1997. 2 mapas, color. Escalas variam. Disponível em: <[http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/tipologia\\_climatica\\_segundo\\_koppen\\_2014.pdf](http://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/tipologia_climatica_segundo_koppen_2014.pdf)>. Acesso em: 03 out. 2016.

SENDACZ, S. et al. Carga de nutrientes (nitrogênio e fósforo) na bacia do alto tietê (cabeceiras e Guarapiranga). **Hydrological Dynamics**, v. 3, p.1-13, 2005.

SEPA – Scottish Environment Protection Agency. **Classification of standing waters**. 2016a. Disponível em: <<https://www.sepa.org.uk/media/38358/loch-water-quality-classification-scheme.pdf>>. Acesso em: 04 out. 2016.

SEPA – Scottish Environment Protection Agency. **Water body classification**. 2016b. Disponível em: <<http://www.environment.scotland.gov.uk/get-interactive/data/water-body-classification/>>. Acesso em: 03 out. 2016.

SHEN, H. et al. **Environmental fluid mechanics: theories and applications**. ASCE Publications, 2002. 480 p.

SHIKLOMANOV, I. A. **A summary of the monograph World Water Resources**. St Petersburg: UNESCO, 1998.

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World water resources at the beginning of the twenty-first century**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

SHORTREED, K. S.; MORTON, K. F. **Current limnological status of Owikeno Lake**. Ottawa: Cultus Lake Salmon Research Laboratory, 2003.

SILVA, V. P. R. da et al. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p.131-138, 2011.

SILVA JÚNIOR, W. R. da. **Estudo do estado trófico em reservatório público de usos múltiplos em região do semiárido nordestino utilizando a técnica de modelagem computacional como ferramenta de gerenciamento da qualidade da água**. 2013. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M.. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1993. p. 35-51.

- SMITH, V. H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis1. **Limnology And Oceanography**, v. 27, n. 6, p.1101-1111, 1982.
- SØNDERGAARD, M.; JENSEN, J. P.; JEPPESEN, E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. **Hydrobiologia**, v. 506-509, n. 1-3, p.135-145, 2003.
- SOUZA, M. F. L. et al. Nutrient budgets and trophic state in a hypersaline coastal lagoon: Lagoa de Araruama, Brazil. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, v. 57, n. 5, p.843-858, 2003.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G.; DUNCAN, A. State-of-the-art of reservoir limnology and water quality management. **Comparative Reservoir Limnology And Water Quality Management**, p.213-288, 1993.
- STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. Reservoir Ecosystem Functioning: Theory and Applications. In: STRASKRABA, M.; TUNDISI, J. G. **Theoretical Reservoir Ecology and its Applications**. Leiden: Backhuys, 1999. p. 565-597.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. New York: Harper Collins, 1987. 644 p.
- THORNTON, K. W. et al. Reservoir sedimentation and water quality – and heuristic model. In: STEFAN, H. G. **Surface Water Impoundments**. New York: ASCE, 1981. p. 654-661.
- THORNTON, K. W. Regional comparisons of lakes and reservoirs: geology, climatology, and morphology. **Lake And Reservoir Management**, v. 1, n. 1, p.261-265, 1984.
- THORNTON, K. W. Perspectives on Reservoir Limnology. In: THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir Limnology: Ecological Perspectives**. Wiley-interscience, 1990. p. 1-13.
- TOLEDO JÚNIOR, A. P. et al. A aplicação de modelos simplificados para a avaliação de processo da eutrofização em lagos e reservatórios tropicais. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 12., 1983, Camboriú. **Anais... .** Camboriú: ABES, 1983. v. 12, p. 1 - 34.
- TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos: Rima, 2003a. 247 p.
- TUNDISI, J. G. Recursos Hídricos: o futuro dos recursos hídricos. **Multiciência**, n. 1, p.1-15, 2003b.
- TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p.7-16, 2008.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.

UNITED NATIONS. **Glossary of Environment Statistics**. New York, 1997.

VIDAL, T. F. **Balanço de macronutrientes no açude Gavião/CE – Uma nova abordagem**. 2011. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, área de Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

VIDAL, T. F.; C. NETO, J. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p.402-407, 2014.

VILAR, M. S. de A. **Condições ambientais e da qualidade da água no processo de eutrofização de açudes em cascata no semiárido paraibano**. 2009. 104 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal da Paraíba/universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2009.

VILLELA, S. M.; MATOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw-hill do Brasil, 1975.

VITAL, H. **Erosão e progradação do litoral brasileiro - Rio Grande do Norte**. Disponível em:  
[<http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/rn\\_erosao.pdf>](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/rn_erosao.pdf). Acesso em: 03 out. 2016.

VIVACQUA, M. C. R. **Qualidade da água do escoamento superficial urbano – revisão visando o uso local**. 2005. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área Engenharia Hidráulica e Ambiental), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

VOLLENWEIDER, R. A. Materiali ed idee per una idrochimica delle acque insubriche. **Memorie Dell'istituto Italiano di Idrobiologia**, v. 19, p.213-286, 1965.

VOLLENWEIDER, R. A. **Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication**. Paris: OECD, 1968. 250 p.

VOLLENWEIDER, R. A. Possibilities and limits of elementary models concerning the budget of substances in lakes. **Archiv Fur Hydrobiologie**, v. 66, n. 1, p.1-36, 1969.

VOLLENWEIDER, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. **Memorie Dell'istituto Italiano di Idrobiologia**, v. 33, p.53-83, 1976.

VOLLENWEIDER, R. A. **Eutrophication**. 1983. Notes distributed during the II Meeting of the Regional Project on the Eutrophication of Tropical Lakes.

VON SPERLING, E. Avaliação do estado trófico de lagos e reservatórios tropicais. **Bio Engenharia Sanitária e Ambiental**, p.68-76, 1994. Encarte Técnico, ano III.

VON SPERLING, E. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos:** Princípios do tratamento ecológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996. Volume 1.

WETZEL, R. G. **Limnology.** Saunders College Publishing, 1975. 743 p.

WETZEL, R. G. Reservoir ecosystems: conditions and speculations. In: THORNTON, K. W.; KIMMEL, B. L.; PAYNE, F. E. **Reservoir Limnology:** Ecological Perspectives. Wiley-interscience, 1990. p. 227-238.

WIEGAND, M. C.; PIEDRA, J. I. G.; ARAÚJO, J. C. de. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p.415-424, 2016.

WILHELMUS, B.; BERNHARDT, H.; NEUMANN, D. Vergleichende Untersuchungen über die Phosphore-liminierung von Vorsperren – Verminderung der Algenentwicklung in Speicherbecken und Talsperren. **Dvgw-schriftenreihe Wasser**, v. 16, p.140-176, 1978.

WRC - Waikato Region Council. **Water quality glossary.** 2016a. Disponível em: <<http://www.waikatoregion.govt.nz/Environment/Natural-resources/Water/Lakes/Water-quality-glossary/>>. Acesso em: 04 out. 2016.

WRC - Waikato Region Council. **Water temperature at Acacia Bay, Taupo.** 2016b. Disponível em: <<http://www.waikatoregion.govt.nz/Environment/Natural-resources/Water/Rivers/Water-temperature-levels-in-the-Waikato-region/Lake-Taupo/>>. Acesso em: 04 out. 2016.

XAVIER, F. C. **Avaliação da influência do uso e ocupação do solo e de características geomorfológicas sobre a qualidade das águas de dois Reservatórios da região metropolitana de Curitiba – Paraná.** 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Solos), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ZHANG, X. **Restoration of a small, shallow, eutrophic lake by submerged aeration and comparison with a similar lake.** 2013. 136 f. Tese (Doutorado em Filosofia), Colorado State University, Fort Collins, 2013.