

Modelagem do coeficiente de decaimento de fósforo para determinar o Índice de Estado Trófico (IET) do reservatório Banabuiú-CE

Modeling the phosphorus decay coefficient to determine the Trophic State Index (TSI) of the Banabuiú-CE reservoir

• **Data de entrada:**
13/09/2020

• **Data de aprovação:**
27/10/2020

Rafael Brito Aguiar de Araujo^{1*} | David Lopes de Sousa¹ | Iran Eduardo Lima Neto¹ | Marco Aurélio Holanda de Castro¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.026>

ORCID ID

Araujo RBA  <https://orcid.org/0000-0002-6193-7564>
Sousa DL  <https://orcid.org/0000-0001-8041-9511>

Lima Neto IE  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>
Castro MAH  <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

Resumo

A manutenção da qualidade da água em reservatórios é imprescindível para garantir o atendimento às demandas para o abastecimento da população. A modelagem da concentração de fósforo é necessária como auxílio à execução de medidas para prevenção de efeitos maléficos a qualidade da água, como a eutrofização. Neste trabalho foi realizada a calibração do coeficiente de decaimento de fósforo do reservatório Banabuiú-CE, que foi utilizado para modelar o Índice de Estado Trófico (IET) deste a partir da concentração de fósforo total e clorofila *a*. Os valores encontrados utilizando o coeficiente de decaimento do fósforo *k* calibrado por meio da metodologia exposta neste trabalho foram mais representativos do que as equações presentes na literatura para estimar o *k* por meio do tempo de residência da água em reservatórios. O IET encontrado para o reservatório Banabuiú-CE durante o período analisado foi predominantemente o hipereutrófico.

Palavras-chave: Reservatório. Concentração de fósforo. Clorofila *a*. Modelagem da qualidade.

Abstract

Maintaining water quality in reservoirs is essential to ensure that demands are met to supply the population. Modeling the concentration of phosphorus is necessary to assist in the implementation of measures to prevent harmful effects on water quality, such as eutrophication. In this work, the phosphorus decay coefficient of the Banabuiú-CE reservoir was calibrated, which was used to model the Trophic State Index (TSI) from the concentration of total phosphorus and chlorophyll *a*. The values found using the decay coefficient of phosphorus *k* calibrated through the methodology exposed in this work were more representative than the equations present in the literature to estimate *k* through the residence time of water in reservoirs. The TSI found for the Banabuiú-CE reservoir during the analyzed period was predominantly hypereutrophic.

Keywords: Reservoir. Phosphorus concentration. Chlorophyll *a*. Quality modeling.

¹ Universidade Federal do Ceará- Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Author correspondent:** rafaelbritodm@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água pode ser definida como a medida do estado dos recursos hídricos necessária para subsistência das espécies bióticas e satisfação das necessidades humanas (NDUNGU, 2014). Além do aspecto quantitativo, requisitos qualitativos estão atrelados aos vários usos da água que, quando não observados, limitam seu aproveitamento (ANA, 2012).

A eutrofização é o processo em que os corpos hídricos recebem excesso de nutrientes, resultando na subsequente deterioração de suas águas devido ao crescimento excessivo de organismos fototróficos (VOLLENWEIDER, 1968; THOMANN & MUELLER, 1987; ESTEVES, 1998; MEDIONDO, 2016; ZHANG, 2013). Em ecossistemas aquáticos, o aumento no grau de trofia é um processo que pode ocorrer naturalmente. Porém, nos últimos anos, as atividades humanas têm contribuído para o aumento das concentrações de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, resultando no processo de eutrofização (ARAÚJO, 2018).

O fósforo (P) é um dos nutrientes vitais para o crescimento de algas e é um componente essencial na conversão da luz solar em formas de energia utilizáveis. No entanto, quantidades elevadas de fósforo em um corpo de água podem causar crescimento excessivo de algas e levar a problemas de eutrofização. O fósforo é o nutriente limitante em muitos sistemas de água doce, ou seja, o nutriente com menor concentração em relação à razão estequiométrica necessária para o crescimento de plantas aquáticas. Portanto, a concentração de fósforo pode ser muito influente no crescimento destas (JI, 2017).

Volleweider (1968) propôs o primeiro modelo de modelagem matemática da qualidade da água para previsão da concentração de fósforo em lagos e reservatórios, o de mistura completa ou zero dimensional, responsável pela previsão da

concentração de fósforo nesses corpos hídricos. Chapra (1997) desenvolveu vários estudos de simulação matemática em lagos de regiões temperadas. Outros trabalhos foram realizados visando à adaptação a corpos hídricos em regiões tropicais (CASTAGNINO, 1982; SALAS E MARTINO, 1991). No Brasil, o modelo de Salas e Martino (1991) tem sido amplamente utilizado para avaliação da dinâmica do fósforo em lagos e reservatórios (VON SPERLING, 1996), inclusive em regiões semiáridas (COGERH, 2011).

O Índice de estado trófico (IET) classifica corpos d'água em diferentes graus de trofia, ou seja, avalia a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas (CETESB, 2009). O IET de Carlson (1977) abrange apenas três parâmetros: a transparência da água, a clorofila *a* e a concentração do fósforo total.

Moss (2010) explica 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.

Grande parte dos açudes localizados no semi-árido sofre com a eutrofização, que pode ser agravada com a incapacidade do açude de renovar a sua massa de água. A eutrofização está diretamente associada à ocupação da área de drenagem da bacia do açude, seja por desmatamento, urbanização, agropecuária ou indústria (COGERH, 2011).

O coeficiente de decaimento de fósforo *k* pode ser utilizado para determinar a concentração de fósforo total (VOLLEWEIDER, 1968). Por meio de equações de correlação presentes da literatura, é possível determinar a concentração de clorofila *a* a partir da concentração de fósforo total (DILLON & RIGLER, 1974A; RAST & LEE, 1978; SALAS & MARTINO, 2001). Logo, o objetivo deste estudo consiste em calibrar o coeficiente *k* de decai-

mento de fósforo para calcular a concentração de fósforo total, clorofila a e o Índice de Estado Trófico (IET) do reservatório Banabuiú-CE, a fim de controlar os parâmetros de eutrofização.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área avaliada neste estudo compreendeu o reservatório Banabuiú (S 5°19'59.99", W 39°0'0.00"), construído no leito do rio Banabuiú. A barragem Arrojado Lisboa, do Açude Banabuiú, está localizada no município de Banabuiú, estado do Ceará, a cerca de 230 km de Fortaleza. Barra o rio Banabuiú, pertencente ao sistema do rio Jaguaribe. A sua bacia hidrográfica cobre uma área de 13.500 km² (DNOCS, 2020). As maiores contribuições de nutrientes ao açude Banabuiú são oriundas dos solos e da agricultura. Entre os usos, tem-se o consumo humano, para o qual o nível trófico tolerável é o mesotrófico, podendo então considerar como permitida a concentração de fósforo total igual a 0,05 mg.L⁻¹, segundo a classificação de CALRSON Modificado (COGERH, 2011).

2.2 Coleta de dados

Os dados de concentração de fósforo total (PT) e clorofila a (Cla), assim como o volume diário do açude Banabuiú, foram obtidos no Portal Hidrológico do Ceará, que pode ser acessado no endereço eletrônico da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Os dados foram obtidos para os anos de 2015, 2016, 2017, 2018 e 2019, pois foram os únicos anos que apresentaram regularidade na quantidade de dados observados de concentração (PT) de fósforo e clorofila a (Cla).

A carga afluente média de fósforo (W) no açude Banabuiú foi determinada a partir do inventário

ambiental de 2011 elaborado pela COGERH para este açude. Este contém as tabelas com a estimativa das cargas do fósforo e nitrogênio provenientes dos solos, esgotos, pecuária e agricultura, sendo a carga total a soma de todas elas.

2.3 Determinação do nutriente limitante

Toné (2016) define nutriente limitante como aquele 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 decrescimento referida também sofrerá aumento.

O fósforo é frequentemente o nutriente limitante do total de biomassa em lagos e reservatórios (RECKHOW, 1980; TUNDISI & MATSUMURATUNDISI, 2008). Thomann & Mueller (1987) e Volenweider (1983 apud SALAS & MARTINO, 2001) propuseram em seus trabalhos que o fósforo será o nutriente limitante caso a relação entre a concentração de nitrogênio e ele seja superior a 10 e 9; caso contrário, o nitrogênio será o nutriente limitante.

2.4 Coeficiente de decaimento do fósforo *k*

Para a aplicação do coeficiente de decaimento do fósforo *k* em um modelo de primeira ordem, a Eq. 1 deve ser integrada. Se $c=c_0$ em $t=0$, a Eq. 1 pode ser integrada por separação de variáveis, resultando na Eq. 2, que pode ser representada pela Equação 3 (CHAPRA, 1997).

$$\frac{dc}{dt} = -kc \quad (1)$$

$$\ln c - \ln c_0 = -kt \quad (2)$$

$$c = c_0 e^{-kt} \quad (3)$$

Em que:

c: concentração do reagente [M.L⁻³]

t: tempo [T]

k: constante de decaimento [T⁻¹]

2.5 Modelagem do fósforo no reservatório

Para prosseguir com a modelagem de fósforo, foram levantados os seguintes dados referentes ao reservatório estudado:

i. V: volume do reservatório [L³];

ii. Q_s: vazão de saída [L³.T⁻¹];

iii. W: carga de fósforo afluente [M.T⁻¹];

iv. PT: concentração de fósforo na água [M.L⁻³];

De posse dos dados de V, Q_s, W e PT, pôde-se utilizar o modelo proposto por Vollenweider (1968), que descreve um balanço de massa em regime de mistura completa, em que a concentração de fósforo ao longo do tempo é dada pela Eq. 4 e a sua respectiva solução analítica (Eq. 5).

$$V \frac{dPT}{dt} = W - QPT - kVPT \quad (4)$$

$$PT = PT_0 e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t} + \frac{W}{\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)V} \left(1 - e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + k\right)t}\right) \quad (5)$$

Em que:

k: coeficiente de decaimento do fósforo [T⁻¹]

PT: concentração de fósforo total ao longo do tempo [M.L⁻³]

PT₀: concentração de fósforo total no instante inicial [M.L⁻³]

t: tempo [T]

V: volume do reservatório [L³]

W: carga de fósforo afluente [M.T⁻¹]

Q_s: vazão de saída do reservatório [L³.T⁻¹]

2.6 Calibração do coeficiente de decaimento do fósforo k

Para calibrar o coeficiente de decaimento do fósforo serão utilizadas as equações propostas por Vollenweider (1968) para calcular a concentração de fósforo total em conjunto com a função objetivo representada pela Eq. 6. Essa função consiste na minimização das diferenças entre as concentrações totais de fósforo calculadas e concentrações de fósforo observadas.

$$f_{obj} = (PT_{Calc} - PT_{Obs})^2 \quad (6)$$

Em que:

PT_{Calc}: concentração de fósforo total calculada [M.L⁻³]

PT_{Obs}: concentração de fósforo total observada [M.L⁻³]

O processo de calibração de k consistiu em calcular a concentração de fósforo total (PT) pela Eq. 5, utilizando, inicialmente, um k arbitrário. O cálculo foi realizado para todos os dias, de 27 de Janeiro de 2015 até 10 de Junho de 2020. Utilizou-se o aplicativo de otimização não linear "Solver.xla" do Microsoft Excel 2010, empregando a função objetivo representada pela Eq. 6. O processo foi configurado para retornar como resultado final a iteração em que a função objetivo atingiu o menor valor, encontrando como produto final do processo iterativo o k otimizado. A calibração foi realizada para toda a série histórica de dados, assim como para cada ano individualmente.

2.7 Estimação do k para regiões semiáridas

Vollenweider (1976) estima, por meio de uma relação empírica, que k correlaciona-se com tempo de residência hidráulica (TR) para lagos temperados por meio da Eq. 7. Salas & Martino (1991), após análises em 27 reservatórios tropicais, es-

timam que a relação entre k e o TR no reservatório é o dobro daquela para lagos temperados de Vollenweider (1976) (Eq. 8), visto que as maiores temperaturas na região tropical estimulam a taxa de produção de biomassa.

Toné (2018) afirma em seu trabalho que os valores de k obtidos para a região Nordeste são consistentemente superiores aos estimados pela Eq. 8 de Salas e Martino (1991), sendo estes mais bem descritos por meio da Eq. 9.

$$k = 1/\sqrt{TR} \quad (7)$$

$$k = 2/\sqrt{TR} \quad (8)$$

$$k = 4/\sqrt{TR} \quad (9)$$

Considerando que o reservatório Banabuiú localiza-se na região Nordeste do país, utilizou-se a Eq. 9 para estimar o valor de k .

2.8 Determinação da concentração de clorofila a (Cla)

A partir da concentração de fósforo total, é possível indicar o estado trófico do corpo hídrico (VOLLENWEIDER, 1968), obtendo correlações com a concentração de clorofila- a (DILLON & RIGLER, 1974A; RAST & LEE, 1978; SALAS & MARTINO, 2001).

Chapra (1997) mostrou algumas das tentativas de modelagem do nível de clorofila a como função da concentração de fósforo total, entre elas as de Dillon & Rigler (1974a) e Rast & Lee (1978), representadas pelas Eq. 10 e 11. Salas & Martino (2001), por sua vez, também expõem uma correlação entre tais nutrientes analisando vinte reservatórios tropicais (Eq. 12).

Para determinar a concentração de clorofila a (Cla) utilizando a concentração de fósforo total (PT) no reservatório estudado, aplicaram-se as equações citadas acima.

$$\log(\text{Cla}) = 1,583 \log(\text{PT}) - 1,134 \quad (10)$$

$$\log(\text{Cla}) = 0,76 \log(\text{PT}) - 0,259 \quad (11)$$

$$\text{Cla} = 332\text{PT}^{1,21} \quad (12)$$

2.9 Cálculo do índice do estado trófico (IET)

Toledo et al. (1983) e Lamparelli (2004) propuseram modificações no cálculo do IET de Carlson (1977). No trabalho de Lamparelli (2004), das três variáveis citadas para o cálculo do IET de Carlson (1977), foram aplicadas a clorofila a e fósforo total, uma vez que os valores de transparência muitas vezes não são representativos do estado de trofia.

$$\text{IET}(\text{Cla}) = 10 \left\{ 6 - \left[0,92 - 0,34 \left(\frac{\ln \text{Cla}}{\ln 2} \right) \right] \right\} \quad (13)$$

$$\text{IET}(\text{PT}) = 10 \left\{ 6 - \left[1,77 - 0,42 \left(\frac{\ln \text{PT}}{\ln 2} \right) \right] \right\} \quad (14)$$

$$\text{IET} = \left[\frac{\text{IET}(\text{Cla}) + \text{IET}(\text{PT})}{2} \right] \quad (15)$$

Em que:

Cla: concentração de clorofila a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)

PT: concentração de fósforo total ($\mu\text{g.L}^{-1}$)

O cálculo do IET para o reservatório foi realizado utilizando as equações de Lamparelli (2004) e Cunha (2012). Na Tabela 1 encontra-se a Classificação segundo Índice de Estado Trófico proposto por Lamparelli (2004).

Tabela 1 - Classificação segundo Índice de Estado Trófico proposto Lamparelli (2004).

Estado trófico	IET
Ultraoligotrófico	$IET \leq 47$
Oligotrófico	$47 < IET < 52$
Mesotrófico	$52 < IET \leq 59$
Eutrófico	$59 < IET < 63$
Supereutrófico	$63 < IET < 67$
Hipereutrófico	$IET \geq 67$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração do k de decaimento do fósforo utilizando toda a série histórica

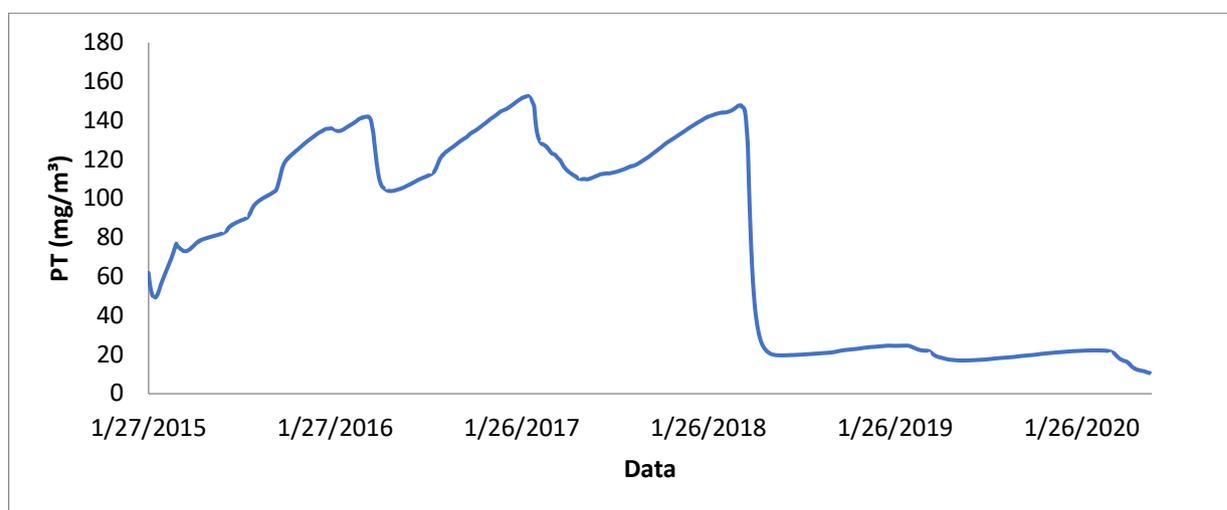
As cargas de nutrientes pontuais e difusas foram retiradas do inventário ambiental do açude Banabuiú elaborado pela COGERH. Apesar das incertezas associadas à quantificação das cargas difusas, as estimativas das contribuições dos usos verificados na bacia são apresentadas na Tabela 2. A vazão de saída (Q_s), obtida na página eletrônica do portal hidrológico da COGERH, foi a vazão de regularização do açude, ou seja, $11,61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

O k de caimento do fósforo para o açude Banabuiú foi calibrado por meio da metodologia

descrita neste trabalho. A calibração realizada para toda a série histórica de dados analisados considerou a concentração inicial de fósforo (PT_0), igual ao valor do primeiro dado de concentração total de fósforo (PT_{Obs}) de toda a série histórica, ou seja $0,062 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Os outros valores de PT foram calculados por meio do modelo proposto por Vollenweider (1968), utilizando a Eq. 5 e arbitrando-se, inicialmente, um valor para o k . O valor calibrado de k no final do processo foi de $39,93 \text{ ano}^{-1}$. As curvas com os valores de concentração de fósforo total e o volume diário observado estão representados nas Fig. 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2 - Estimativa das emissões de nutrientes da bacia do açude Banabuiú

Fontes antrópicas contribuintes		Carga P (ton.ano ⁻¹)
Difusa	Pecuária	6,20
	Agricultura	28,54
	Solos	42,48
Pontual	Esgotos	8,61
	Outros	8,59
Total		94,42

**Figura 1** - Curva da concentração média de fósforo calculada a partir do k calibrado para toda a série histórica de dados observados.

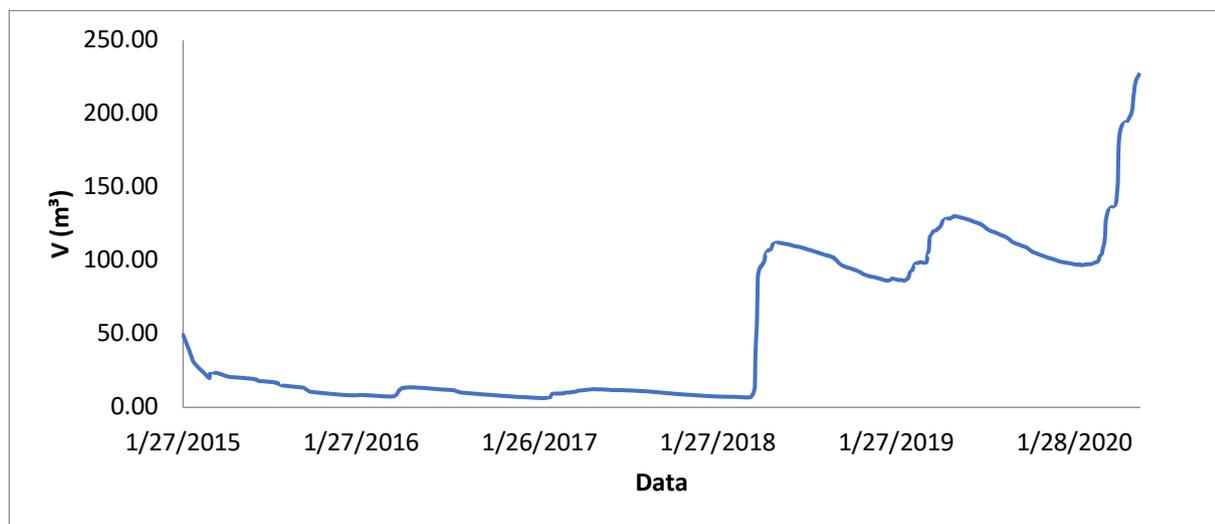


Figura 2 - Curva do volume diário observado para toda a série histórica.

3.2 Calibração do k de decaimento do fósforo para cada ano da série histórica

Toné (2016) listou em seu trabalho os valores com as vazões de entrada médias (Q_e) e o volume diário médio (V) para o açude Banabuiú entre os anos de 2010 e 2015 (Tabela 3). Ele ainda calculou o k médio para esses anos em 3,855 ano⁻¹, sendo um valor bastante destoante do encontrado na calibração realizada utilizando toda a série histórica com dados de PT de 2015 a 2019. A fim de entender melhor quais fatores podem ter ocasionado essa diferença, realizou-se a calibração do k para cada ano da série histórica estudada (Tabela 4). O valor de PT_0 adotado para cada ano foi o primeiro valor de PT_{Obs} do respectivo ano.

Tabela 3 - Vazão de entrada e volume médio entre 2010 e 2015

Período	t (anos)	V (hm³)	Qe (hm³.ano ⁻¹)
14/fev/10 - 14/fev/12	2	1200,76	647,58
16/jan/13 - 07/mai/14	1,33	52,64	294,74
7/mai/14 - 04/ago/15	1,25	115,69	64,99

Qe: vazão de entrada média.

Tabela 4 - k calibrado por ano

Ano(s)	Vm (hm³)	Vm (%)	kc (ano ⁻¹)
2015	18,16	1,13%	39,49
2016	9,72	0,61%	68,37
2017	9,97	0,62%	46,40
2018	74,14	4,63%	7,44
2019/2020	117,55	7,34%	4,34

Os resultados apresentados após a calibração do k para cada ano foram bem mais promissores. Observou-se que o k apresenta valores consideravelmente maiores quando o percentual do volume no reservatório encontra-se em níveis extremamente baixos. Logo, o valor do k na calibração que utilizou toda a série histórica de dados foi influenciado pelos anos em que o nível de água do reservatório esteve muito abaixo dos outros anos.

O impacto da profundidade nas condições limnológicas dos reservatórios é visto no fato de que, em lagos rasos, pelo fato da região hipolimnética ser menor que a de lagos profundos, com conseqüente 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 epilímnio 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, ascende-os às camadas superiores aumentando a produção de biomassa no corpo hídrico (BERNHARDT, 1995 apud AMORIM, 2001).

Observou-se que os valores de Q_e e V mostrados na Tabela 3 apresentaram um índice de correlação de 0.998; logo, admitiu-se que os valores de Q_e podem ser estimados pela proporção linear para os anos de 2015 a 2020, resultando em um

TR médio de 1.78 anos. Um novo k de 3 ano^{-1} foi estimado (k_e) utilizando a Eq. 9, a fim de comparar os valores de PT em uma nova simulação com o a simulação que utilizou o k calibrado (k_c) para cada ano. Os erros obtidos encontram-se representados na Tabela 5. Os valores calculados encontram-se na Fig. 3.

Tabela 5 - Erro relativo (%) de PT utilizando os k calibrado e k estimado

Ano	PTCalc (k_c)	PTCalc (k_e)
2015	19,94%	99,22%
2016	4,44%	186,68%
2017	12,63%	93,61%
2018	23,51%	90,17%
2019	28,86%	109,30%

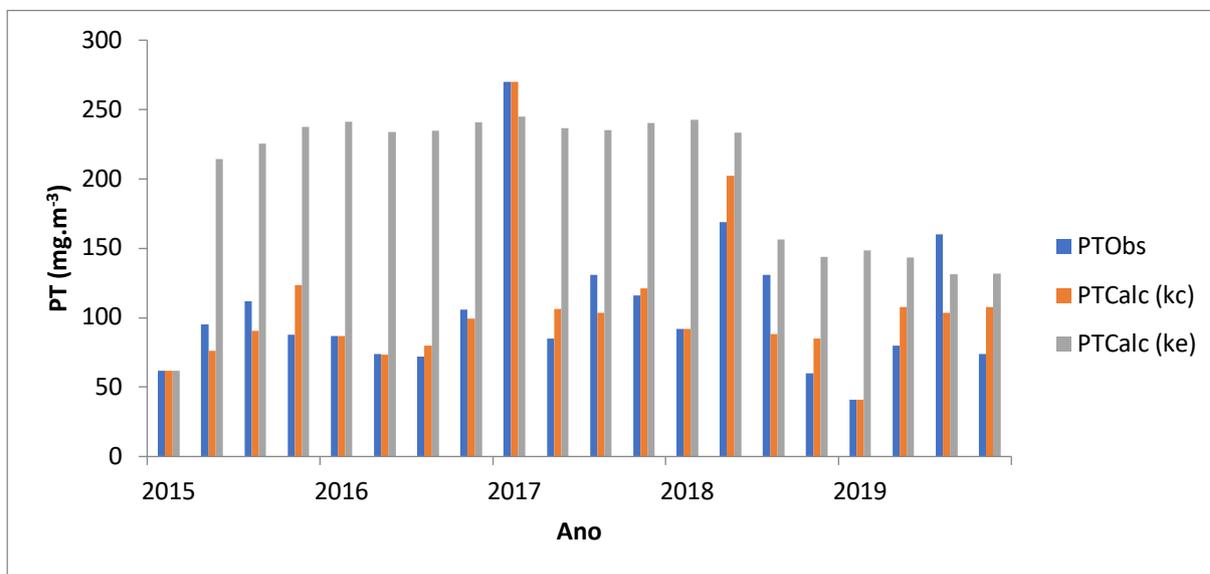


Figura 3 - Valores de PT observados e calculados.

3.3 Cálculo da concentração de clorofila a

Os valores de Cla foram determinados a partir dos valores de PT calibrados para todos os dias dos anos analisados utilizando as Eq. 10, 11 e 12. Os erros relativos foram calculados e estão contidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Erro relativo (%) de Cla para as equações de correlação com PT

Ano	Equação de correlação com PT		
	DR	RL	SM
2015	100,41%	64,93%	62,39%
2016	94,77%	56,29%	54,54%
2017	81,73%	121,48%	186,42%
2018	48,52%	376,37%	393,32%
2019	63,09%	345,34%	354,06%

3.4 Determinação do estado trófico do reservatório

Para determinar o estado trófico do reservatório, utilizaram-se os dados de PT e Cla calculados para todo os dias. Para os anos de 2015 e 2016, os valores de Cla foram calculados por meio da equação de Salas & Martino (2001), pois nesses o erro relativo foi menor. Para os outros anos utilizou-se a equação de Dillon & Rigler (1974a).

Na Tabela 7 encontra-se a classificação trófica do reservatório estudado em relação aos graus de trofia para diversos autores em função de PT. Os valores médios de PT para cada ano estão representados na Tabela 8.

O cálculo do IET(Cla), IET(PT) e IET de Lamparelli (2004) estão contidos na Tabela 9.

Tabela 7 - Classificação trófica do reservatório Banabuiú em função de PT para diversos autores

Autor	2015	2016	2017	2018	2019/2020
Vollenweider (1968)	M	M	H	H	H
Thomann & Muller (1987)	E	E	E	E	E
Von Sperling (1994)	E	E	H	H	H
Numberg (1996)	E	E	H	H	H
Salas & Martino (2001)	E	E	H	H	H

M: mesoeutrófico; E: eutrófico; H: hipereutrófico

Tabela 8 - PT médio por ano para o reservatório Banabuiú

Ano	PTmed (mg.L ⁻¹)
2015	0,0923
2016	0,0964
2017	0,1152
2018	0,1294
2019/2020	0,1050

Tabela 9 - Parâmetros do IET de Lamparelli (2004) calculados para o reservatório Banabuiú

Ano	IET(PT)	IET(Cla)	IET	Estado trófico
2015	69,54	64,96	67,25	Hipereutrófico
2016	69,89	65,30	67,59	Hipereutrófico
2017	71,01	74,78	72,89	Hipereutrófico
2018	71,27	75,12	73,19	Hipereutrófico
2019/2020	70,44	74,06	72,25	Hipereutrófico

4 CONCLUSÕES

A calibração utilizando toda a série histórica de dados retornou um valor de k muito destoante da média dos reservatórios do Nordeste brasileiro. Depois de realizada a calibração do k para cada ano da série histórica, pôde-se notar que os anos

em que os níveis de água do reservatório estavam abaixo de 1.13 % apresentaram valores de k muito maiores. Logo, conclui-se que os anos com volumes menores impactaram diretamente na magnitude do k calibrado, sendo, neste caso, mais indicada a calibração do k para cada ano da série histórica individualmente, para que os anos com níveis muito baixos de água não interfiram na calibração do k .

A simulação utilizando o k calibrado para cada ano analisado, por meio do método descrito neste trabalho, retornou resultados de PT mais próximos dos dados de PT_{Obs} disponibilizados pela COGERH para o reservatório Banabuiú. Já a simulação realizada estimando o k partir da Eq. 9 retornou valores de PT com erros muito maiores. Logo, a metodologia de calibração do k apresentada neste trabalho retornou resultados consideravelmente melhores do que a Eq. 9.

O cálculo de Cla utilizando a equação proposta por Salas & Martino (2001) resultou em erros relativos menores para os anos de 2015 e 2016. Já

para os anos de 2017, 2018 e 2019 a equação de Dillon & Rigler (1974a) foi a que apresentou os menores erros relativos.

O IET calculado por meio das equações propostas por Lamparelli (2004) retornou como estado trófico do reservatório Banabuiú o hipereutrófico para todos os anos. A classificação trófica em função de PT mostrou que o estado trófico pode variar entre o eutrófico e hipereutrófico. Salas & Martino (2001) Dillon & Rigler (1974a).

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

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

ARAÚJO, D. R.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS, J. A. T. Análise de variação e comparação de índices de estado trófico: reservatórios dos aproveitamentos hidrelétricos de rio bonito e suíça. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s.l.], v. 23, n. 1, p. 55-62, fev. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522018162462>.

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

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.

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

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

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

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Base de dados de Barragens**. 2020a. Disponível em: https://www.dnocs.gov.br/barragens/bana_buiu/banabuiu.htm . Acesso em: 25 jun. 2020.

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

MEDIONDO, E. M. **Global review of Lake and Reservoir Eutrophication and Associated Management Challenges**. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ea08/890880ff40186f28dbbc463c72dd1f48f1bf.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2020.

Jl, Z. **Hydrodynamics and Water Quality**: modeling rivers, lakes and estuaries. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2017.

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.

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

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

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.

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

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

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

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. New York: Harper Collins, 1987. 644 p.

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.

TONÉ, A. J. A. **Análise e Modelagem de Fósforo em Reservatórios Localizados em Regiões Semiáridas**. 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

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

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. **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.

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.

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.