

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALESSANDRO ENOS TULIO

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DECAIMENTO DE FÓSFORO NO
RESERVATÓRIO COLÍDER, MT

CURITIBA

2024

ALESSANDRO ENOS TULIO

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DECAIMENTO DE FÓSFORO NO
RESERVATÓRIO COLÍDER, MT

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

Orientador: Professor Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2024



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

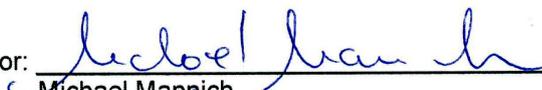
TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

ALESSANDRO ENOS TULIO

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE DECAIMENTO DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO COLÍDER, MT

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 90, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental - UFPR

Membro 1:


Emílio Graciliano Ferreira Mercuri
Departamento de Engenharia Ambiental - UFPR

Membro 2:


Maurício Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental - UFPR

Curitiba, 17 dezembro de 2024

RESUMO

O reservatório da Usina Hidrelétrica Colíder, situado no Rio Teles Pires, foi analisado com foco na estimativa do coeficiente de decaimento do fósforo (k) por meio de um modelo simplificado baseado em um reator de mistura completa. Esse tipo de modelo utiliza equações matemáticas para prever a concentração de fósforo ao longo do tempo, sendo particularmente útil em situações com disponibilidade limitada de dados.

Os resultados indicaram que os valores de k apresentaram variações ao longo do tempo, com uma tendência de redução em períodos específicos. Esse comportamento pode ser atribuído a fatores como a diminuição da carga de fósforo afluyente, influenciada por processos naturais ou pela retenção de nutrientes em reservatórios a montante.

Apesar dessas limitações, o modelo mostra-se uma ferramenta útil para análises preliminares, subsidiando a gestão de nutrientes e o planejamento de ações de manejo em corpos d'água.

Palavras-chaves: Modelo Simplificado. Qualidade de Água. Fósforo.

ABSTRACT

The Colíder Hydropower Plant reservoir, located on the Teles Pires River, was analyzed with a focus on estimating the phosphorus decay coefficient (k) through a simplified model based on a completely mixed reactor. This type of model employs mathematical equations to predict phosphorus concentration over time, making it particularly useful in situations with limited data availability.

The results indicated that k values varied over time, showing a decreasing trend during specific periods. This behavior can be attributed to factors such as reduced influent phosphorus load, influenced by natural processes or nutrient retention in upstream reservoirs.

Despite these limitations, the model proves to be a good tool for preliminary analyses, supporting nutrient management and planning management actions in tropical water bodies.

Key-words: Simplified Model. Water Quality. Phosphorus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Ciclo do Fósforo (SASABUCHI et al., 2023)	13
FIGURA 2 – Plantas aquáticas limitadas por barreira física (ZHENG et al., 2019)	14
FIGURA 3 – Esquema Modelo Reator de Mistura Completa	17
FIGURA 4 – Mapa da Bacia Hidrográfica - Agência Nacional de Águas ANA (2016)	20
FIGURA 5 – Reservatório e localização dos pontos monitorados	21
FIGURA 6 – Vazão afluente e concentração de Fósforo durante o período de análise	22
FIGURA 7 – Vazão afluente e defluente diárias de 2018 a 2021	22
FIGURA 8 – Permanência das vazões entre 2017 e 2021	23
FIGURA 9 – Contribuições de fósforo no reservatório	23
FIGURA 10 – Cargas de entrada e saída do reservatório	26
FIGURA 11 – Valor de k utilizado nos intervalos de análise	27
FIGURA 12 – Resultado do Modelo	28
FIGURA 13 – Índice de Estado Trófico ao longo do tempo - Classificação de Lamparelli (2004)	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Níveis tróficos (LAMPARELLI, 2004)	15
TABELA 2 – Formas de cálculo de k	18
TABELA 3 – Tempo de residência médio por período	29
TABELA 4 – Comparação do coeficiente de decaimento de fósforo com a literatura	29

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

IET Índice de Estado Tráfico

SI Sistema Internacional de Unidades

UHE Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

q	Carga Específica
P	Fósforo
N	Nitrogênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
k	Coeficiente de decaimento de primeira ordem do Fósforo
τ	Tempo de Residência Hidráulica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	EUTROFIZAÇÃO	12
2.2	FÓSFORO	12
2.3	MEDIDAS DE CONTROLE	14
2.4	ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO	14
2.5	MODELOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA	15
2.5.1	Modelo simplificado	17
2.5.2	Estimativas para o coeficiente de decaimento	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1	ÁREA DE ESTUDO	19
3.1.1	Variáveis de entrada	21
3.1.1.1	Concentrações de Fósforo	21
3.1.1.2	Vazões de Entrada e Saída	22
3.1.1.3	Correção da carga de fósforo de entrada	23
3.1.2	Aplicação do modelo simplificado	24
3.1.2.1	Algoritmo para determinação de k para cada intervalo de tempo	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	CARGAS DE ENTRADA E SAÍDA	26
4.2	RESULTADOS DE k ENCONTRADOS	26
4.2.1	Comparação com a solução analítica	28
4.2.2	Tempo de residência (τ)	29
4.2.3	Comparação com valores da literatura	29
4.2.4	Índice de estado trófico	30
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, no ano de 2022, 62% da matriz elétrica foi de origem hidrelétrica (EPE, 2023). Para a construção de usinas hidrelétricas é necessário o represamento de rios e a transformação de ambientes lóticos em ambientes lênticos, mais suscetíveis a processos de eutrofização (SPERLING, 1996).

O processo de eutrofização é caracterizado pelo aumento de nutrientes como o nitrogênio e fósforo. Para reservatórios de água em regiões tropicais o nutriente limitante é o fósforo, por isso a importância de se monitorá-lo (SALAS et al., 1991). A eutrofização é um problema global crescente e traz uma série de efeitos negativos como o aumento do custo de operação de reservatórios, problemas de saúde pública e impactos na geração de energia elétrica (VANTARAKIS, 2021), (KAPSALIS; KALAVROUZOTIS, 2021), (BRASSAC et al., 2009), (TRINDADE; MENDONÇA, 2014).

A aplicação de modelos de qualidade da água é ferramenta muito relevante para a gestão de recursos hídricos. Existem diversos modelos para estimar a concentração de nutrientes em reservatórios de água (DAS et al., 2024) (VARSA et al., 2023) (SALVADORI et al., 2022) (KNAPIK et al., 2007). Cada modelo necessita de uma série de dados de entrada específica para realizar a simulação da presença de parâmetros de qualidade de água.

Toné e Neto (2019) aplicam um modelo 0-Dimensional, em que o reservatório é simplificado e tratado como um reator de mistura completa e possui uma equação diferencial com solução analítica, conforme apresentado por Vollenweider (1976). Tais modelos são alternativas de modelagem em situações em que o conjunto de dados sobre determinado reservatório é limitado. A aplicação deste modelo mostra-se eficiente e viável em estudos preliminares ou para simulações simplificadas (BECKER et al., 2023).

O reservatório da Usina Hidrelétrica de Colíder, localizada no Mato Grosso, possui altas concentrações de fósforo e há relatos de problemas com o processo de eutrofização relevantes. O presente trabalho pretende realizar uma estimativa dos valores do coeficiente de decaimento do fósforo entre as campanhas de monitoramento deste reservatório. A determinação do parâmetro é importante para a calibração e validação dos resultados do modelo zero dimensional.

1.1 OBJETIVOS

Nesta seção serão apresentados os objetivos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Calcular o coeficiente de decaimento de fósforo para aplicação de um modelo simplificado de fósforo total em um reservatório de água.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Revisão de literatura sobre o tema
2. Aquisição de dados necessários para determinação do coeficiente de decaimento de fósforo
3. Cálculo do coeficiente de decaimento para o reservatório em estudo
4. Análise dos resultados obtidos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EUTROFIZAÇÃO

A eutrofização, conforme definida por Thomann e Mueller (1987), é o aumento descontrolado da biomassa de plantas aquáticas, resultando em interferências prejudiciais nos usos desejados do corpo d'água. Esse fenômeno ocorre principalmente pelo aumento de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, sendo o último o nutriente limitante em reservatórios e lagos tropicais (SALAS et al., 1991).

Reservatórios e lagos, devido às suas características de velocidade e turbidez, são propensos a esse processo. O aumento de nutrientes, por sua vez, é principalmente resultado do uso de fertilizantes na bacia, do lançamento de esgotos sem tratamento e da drenagem pluvial (SPERLING, 1996).

Classificado como um problema global crescente (RIVAS et al., 2020)(KAPSALIS; KALAVROUZOTIS, 2021), presente em diversos reservatórios, afeta a navegação, o ecossistema aquático, a geração de energia elétrica e o abastecimento de água para consumo humano (AYELE; ATLABACHEW, 2021) (ASTUTI et al., 2022).

É a principal causa de proliferação de cianobactérias (BING et al., 2020), que, em excesso, pode levar à liberação de toxinas durante os surtos, representando um risco para a saúde pública (VANTARAKIS, 2021), sendo agravado em períodos de seca, conforme evidenciado por Santos, Silva e Becker (2021). O problema gera, também, impactos socioeconômicos significativos (KAPSALIS; KALAVROUZOTIS, 2021).

No Brasil, diversas usinas hidrelétricas enfrentam problemas operacionais devido ao processo de eutrofização. No caso de da UHE Foz do Areia as florações são um problemas de saúde pública e ocasionam até mesmo a paralisação de equipamentos e, conseqüentemente, o aumento de custo de operação. Segundo o estudo de Brassac et al. (2009), os eventos de floração de algas estão fortemente relacionados com ao ciclo hidrológico do sistema. O estudo de Trindade e Mendonça (2014) também relaciona os eventos de eutrofização do reservatório da PCH Rio Bonito, localizado no Espírito Santo, com o ano hidrológico e recomenda a a coleta e tratamento dos efluentes gerados na bacia hidrográfica do reservatório como estratégia de mitigação.

2.2 FÓSFORO

O ciclo biogeoquímico natural do fósforo (Figura 1) é marcado pela recirculação e balanço do elemento e sua mobilidade ocorre entre rochas, sedimentos, água e organismos vivos.

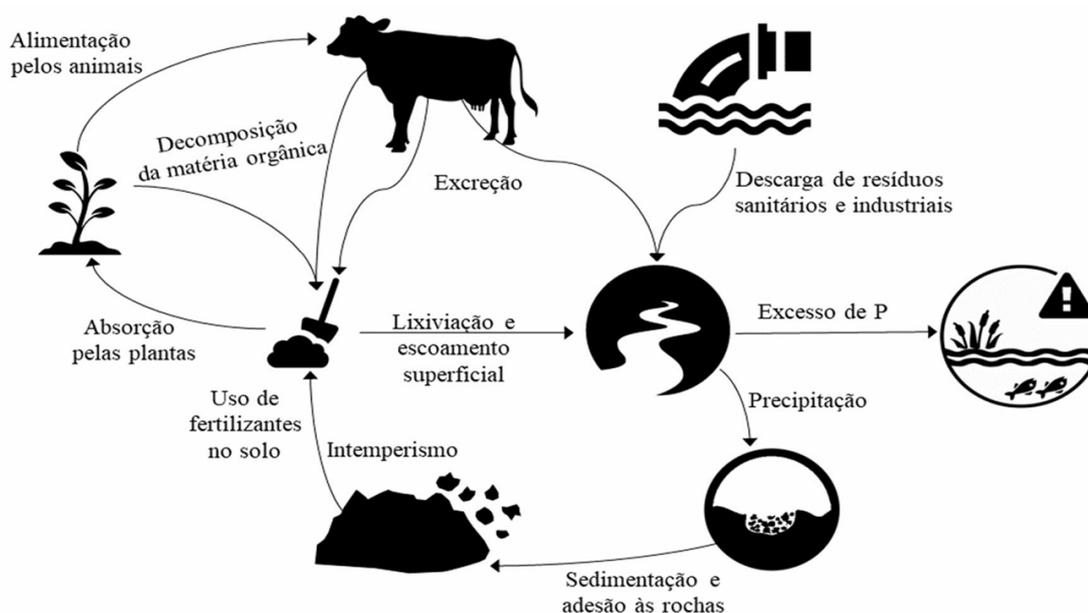


FIGURA 1 – Ciclo do Fósforo (SASABUCHI et al., 2023)

Processos de intemperismo são responsáveis pelo lançamento de íons de fosfato e outros minerais, a partir de rochas fosfáticas, para o solo e para a água. Pode ainda ser absorvido pelas raízes das plantas, e posteriormente pelos animais durante a alimentação. Nesse caso, o nutriente tende a voltar para os solos por meio dos excrementos desses animais (SASABUCHI et al., 2023).

As atividades humanas têm alterado significativamente o ciclo do fósforo, principalmente por meio da mineração de rochas fosfáticas para a produção de fertilizantes. O uso desses produtos resulta no aumento do fósforo nos ecossistemas aquáticos, fenômeno que contribui para a eutrofização (CARPENTER, 2008) (BOUWMAN; BEUSEN; BILLEN, 2009).

As principais fontes externas de entrada de nutrientes nos corpos d'água são os esgotos domésticos e industriais, conforme apresentado na figura 1 e o escoamento superficial de áreas agricultáveis. (RAMEH et al., 2013)

Diversos reservatórios de água apresentam esse elemento em teores elevados a exemplo de Jucazinho e Tapacurá, no estado de Pernambuco (FARIAS; BARBOSA; CARVALHO, 2013) (RAMEH et al., 2013)

Pode-se, também, citar o caso do Lago Barigui, onde segundo estudo de Bem e Braga (2009) a concentração de fósforo total apresentou valores acima do valor estipulado pela Resolução CONAMA 357/05. Também no Paraná o reservatório da Usina Hidrelétrica Foz do Areia, segundo estudo de PEREIRA, VEIGA e DZIEDZIC (2013), possui um estado eutrofizado, sendo a carga de entrada de fósforo a principal causa do processo de eutrofização.

2.3 MEDIDAS DE CONTROLE

Para mitigar a eutrofização, medidas como aeração, remoção de macrófitas, aplicação de herbicidas e introdução de peixes são adotadas. Além disso, planos de uso da bacia e outorgas de lançamento de efluentes são importantes como medidas preventivas (SPERLING, 1996).

Uma estratégia avaliada em um reservatório na China, com níveis de turbidez e concentrações de nitrogênio (N), fósforo (P) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que comprometem a qualidade da água local, consistiu na utilização de plantas aquáticas. Essas plantas foram cultivadas de forma controlada, limitando seu crescimento por meio de uma barreira (Figura 2), com o propósito de absorver os nutrientes presentes no ambiente.



FIGURA 2 – Plantas aquáticas limitadas por barreira física (ZHENG et al., 2019)

O estudo conduzido por Zheng et al. (2019) verificou a eficácia da técnica, medindo as concentrações de N , P e DBO antes e depois da implementação. Os resultados revelaram uma redução de torno de 30% nas concentrações todos os parâmetros analisados no reservatório.

Tomczyk et al. (2024) propõem a biorremediação com o uso de microrganismos efetivos para combater as florações de fitoplâncton resultantes da eutrofização no reservatório de Turawa, na Polônia. Este estudo avalia o potencial desses microrganismos na biorremediação da água, mostrando que sua aplicação pode melhorar o estado trófico do reservatório, reduzindo, em média, 7,92% da concentração de fósforo total na água.

2.4 ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

O Índice do Estado Trófico (IET) classifica corpos d'água com base na trofia, avaliando o enriquecimento por nutrientes e seus efeitos no crescimento de algas ou infestação de macrófitas aquáticas.

Proposto inicialmente por Carlson (1977) e ajustado por Lamparelli (2004), para aplicação em reservatórios, o IET pode ser expresso em função da concentração de Fósforo Total, segundo a fórmula:

$$IET = 10 \left(6 - \frac{1,77 - 0,42 \ln(PT)}{\ln(2)} \right), \quad (2.1)$$

onde PT representa o fósforo total em $\mu\text{g/L}$.

A partir da concentração de Fósforo Total de um reservatório pode-se determinar seu nível trófico (Tabela 1):

Nível trófico	Fósforo Total (mg.L^{-1})	IET
Ultraoligotrófico	$\leq 0,008$	≤ 47
Oligotrófico	$0,008 < PT \leq 0,019$	$47 < IET \leq 52$
Mesotrófico	$0,019 < PT \leq 0,052$	$52 < IET \leq 59$
Eutrófico	$0,052 < PT \leq 0,120$	$59 < IET \leq 63$
Supereutrófico	$0,120 < PT \leq 0,233$	$63 < IET \leq 67$
Hipereutrófico	$PT > 0,233$	$IET > 67$

TABELA 1 – Níveis tróficos (LAMPARELLI, 2004)

2.5 MODELOS PARA QUALIDADE DA ÁGUA

Modelos de qualidade da água são essenciais para a gestão, planejamento e manutenção da qualidade em rios, reservatórios e estuários (GHADAI, 2020) (SALVADORI et al., 2022) (DAS et al., 2024) (VARSA et al., 2023). Esses modelos podem ser classificados como físicos ou matemáticos. Os modelos matemáticos se dividem em analíticos, que utilizam soluções exatas de equações matemáticas, e numéricos, que se baseiam em soluções aproximadas. Conforme a complexidade da simulação computacional, os modelos de qualidade da água podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais.

Um dos primeiros modelos desenvolvidos para quantificar a qualidade da água é o modelo Streeter-Phelps, criado em 1925. Este modelo é capaz de prever a concentração de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD) ao longo de um rio. Utilizando uma solução analítica, o modelo permite analisar a qualidade da água em uma dimensão do rio, sendo particularmente útil para identificar pontos críticos de OD. Além disso, o modelo pode ser aplicado para analisar tanto fontes de poluição pontuais quanto contínuas (CHAPRA, 1997).

Os aplicativos QUAL2E, QUAL2E-UNCAS, QUAL2K e QUAL2KW são modelos unidimensionais adequados para rios com carga constante de poluição. QUAL2K é uma versão atualizada de QUAL2E, enquanto QUAL2KW é uma versão atualizada

de QUAL2K. Tendo como base equações de transporte, esses modelos permitem a modelagem de até 15 parâmetros, incluindo OD, DBO, Clorofila-a, Amônia, Nitrato, Nitrito e Fósforo. Eles são capazes de simular tanto estados estacionários quanto dinâmicos, requerendo informações sobre a geometria do rio (GHADAI, 2020).

O estudo de Knapik et al. (2007) relata que aplicação do modelo QUAL2E mostrou-se útil para a gestão dos recursos hídricos, porém ressaltou-se que uma calibração baseada em uma base de dados confiável e uma rede de monitoramento adequada são essenciais para a produção de bons resultados.

O AQUATOX é um modelo de ecossistema computacional que prevê o destino de nutrientes, sedimentos e produtos químicos em corpos d'água, simulando seus efeitos diretos e indiretos nos organismos. Ele simula a transferência de biomassa e produtos químicos entre os compartimentos do ecossistema, considerando processos químicos e biológicos ao longo do tempo. É capaz de representar uma variedade de ecossistemas aquáticos, como lagos estratificados verticalmente, reservatórios e lagoas, rios e córregos, e estuários (EPA, 2024a).

Salvadori et al. (2022) aplicaram o modelo em um rio e indicam o modelo para a gestão hídrica, porém em condições de escassez de dados os resultados podem não retratar a realidade.

O modelo EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code), desenvolvido pelo Virginia Institute of Marine Science, é um sistema para modelagem de águas superficiais. Inclui componentes de hidrodinâmica, transporte de sedimentos e 21 parâmetros de qualidade da água. É aplicável em simulações unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais de rios, lagos, estuários e regiões costeiras (EPA, 2007).

O SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um modelo de simulação operado em intervalos diários, desenvolvido para prever o impacto do uso do solo e das práticas de manejo sobre os rendimentos de água, sedimentos e produtos químicos agrícolas em bacias hidrográficas. Este modelo utiliza uma abordagem baseada em processos, é eficiente do ponto de vista computacional e permite simulações contínuas ao longo de períodos extensos. Seus principais componentes abrangem clima, hidrologia, propriedades e temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas, bactérias, patógenos e práticas de manejo da terra (ARNOLD et al., 2012).

Das et al. (2024) realizaram a aplicação do modelo SWAT em um bacia hidrográfica da Austrália. Para a calibração e validação, os dados de entrada utilizados foram: a topografia da bacia, características e uso do solo, dados climáticos e de vazão e qualidade de água. Após a calibração foram obtidos os dados modelados de vazão e qualidade da água em escala mensal e anual. Os autores ressaltam que o desenvolvimento de um modelo de qualidade da água e sua validação com base em

dados reais é um grande desafio, porém os resultados do modelo representaram bem a realidade da bacia em estudo.

O modelo Water Quality Analysis Simulation Program (WASP), desenvolvido em 1983, é capaz de simular processos de qualidade da água, tanto estacionários quanto não estacionários, em rios, reservatórios e estuários. O WASP suporta modelagem em uma, duas e três dimensões, permitindo a simulação de uma variedade de compostos, incluindo nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Ele baseia-se nas equações de conservação de massa e movimento, determinando profundidade, velocidade, largura e taxa de fluxo (EPA, 2024b)

Varsa et al. (2023) aplicaram o modelo WASP para um reservatório na Índia com o propósito de gerenciamento, com simulação de quatro cenários com medidas de controle de eutrofização diferentes. Para a calibração e validação foram necessários como dados de entrada: uma base de dados meteorológicos, vazões de entrada, condições iniciais e de contorno de parâmetros de qualidade da água e informações sobre a geometria do reservatório. Foram modeladas os parâmetro: Fosfato, OD, Nitrato, Clorofila-a em escala mensal. Os autores destacam que o modelo é uma ferramenta de sucesso para simulação de cenários, gerenciamento e monitoramento de processos de eutrofização.

2.5.1 Modelo simplificado

O modelo de mistura completa, representado esquematicamente pela figura 3, também denominado de zero dimensional, proposto por Vollenweider (1968), para estimativa de fósforo em reservatórios, considerando que o reservatório se comporta como um reator de mistura completa possui a forma:

$$V \frac{dP}{dt} = W - QP - kVP. \quad (2.2)$$

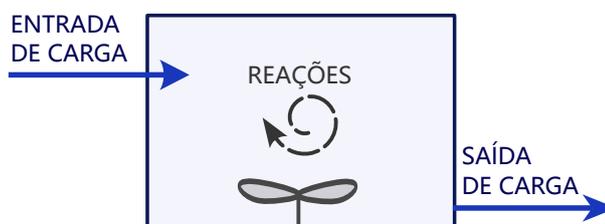


FIGURA 3 – Esquema Modelo Reator de Mistura Completa

A solução analítica para a equação 2.2 para o caso de regime permanente é

dada por (CHAPRA, 1997):

$$P = P_o e^{-\lambda t} + \frac{W}{\lambda V}(1 - e^{-\lambda t}), \quad (2.3)$$

na qual,

$$\lambda = k + Q/V, \quad (2.4)$$

em que P é a concentração de fósforo [$M L^{-3}$], P_o é a concentração inicial de fósforo [$M L^{-3}$], t é o tempo [T], V é o volume do reservatório [L^3], W é a carga afluente [$M T^{-1}$], Q é a vazão de saída do reservatório [$L^3 T^{-1}$] e k é o coeficiente de decaimento de primeira ordem [T^{-1}].

A aplicação de modelos simplificados, como demonstrado nos estudos de Rocha e Neto (2021) e Toné e Neto (2019), revelou-se vantajosa em diversas situações, especialmente por requererem uma quantidade menor de dados em comparação com modelos mais complexos. Essa característica torna-os úteis na gestão de recursos hídricos, conforme apontado por Becker et al. (2023), facilitando o processo de tomada de decisão em ambientes onde os dados podem ser escassos ou de difícil obtenção.

2.5.2 Estimativas para o coeficiente de decaimento

A taxa de decaimento de primeira ordem para o fósforo é um parâmetro necessário para a aplicação do modelo simplificado e engloba os os fatores físicos, químicos e biológicos de decaimento do fósforo. A literatura oferece diversas abordagens de cálculo, vinculadas ao tempo de residência hidráulica do reservatório (τ), calculado por $\tau = Q/V$, onde Q é a vazão de saída de água no reservatório e V é o volume do mesmo. A tabela 2 apresenta suas diferentes formas de cálculo.

Fórmula	Aplicação	Autor
$k = 1/\sqrt{\tau}$	Lagos Temperados	Vollenweider (1976)
$k = 2/\sqrt{\tau}$	Lagos Tropicais	Salas et al. (1991)
$k = 4/\sqrt{\tau}$	Lagos do Nordeste do Brasil	Toné e Neto (2019)

TABELA 2 – Formas de cálculo de k

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A UHE Colíder está localizada sobre o Rio Teles Pires, em Mato Grosso, entre os municípios de Itaúba e Nova Canaã do Norte, sobre a bacia hidrográfica Médio Teles Pires. Situada a jusante da UHE Sinop, possui uma potência instalada de 300 MW, um reservatório à fio d'água com área de 168,2 km², volume de 1.582 hm³ e uma cota máxima de 272 metros (COPEL, 2009).

Na região em que está localizado o reservatório da UHE Colíder o clima, de acordo com o modelo de classificação climática de Köppen, é o Aw, tropical chuvoso de savana, um clima quente com temperatura média superior a 18°C no mês mais frio. Caracteriza-se, ainda, pela forte sazonalidade quanto ao regime pluviométrico, com inverno seco e verão chuvoso. (COPEL, 2014).

O enchimento do reservatório da UHE Colíder foi iniciado no dia 15 de agosto de 2017 e concluído em 05 de janeiro de 2018. A profundidade média do reservatório varia entre 19 e 22 metros durante o período de estiagem e entre 20 e 23 metros durante períodos de cheia (NALIS et al., 2021).

Cerca de 50 Km à jusante do reservatório de estudo está localizada a barragem da UHE Sinop conforme apresentado no mapa da figura 4. Nesse caso, o efeito cascata em reservatórios pode afetar diretamente o regime hidrológico da área de estudo (SANTOS; SOUZA, 2015).

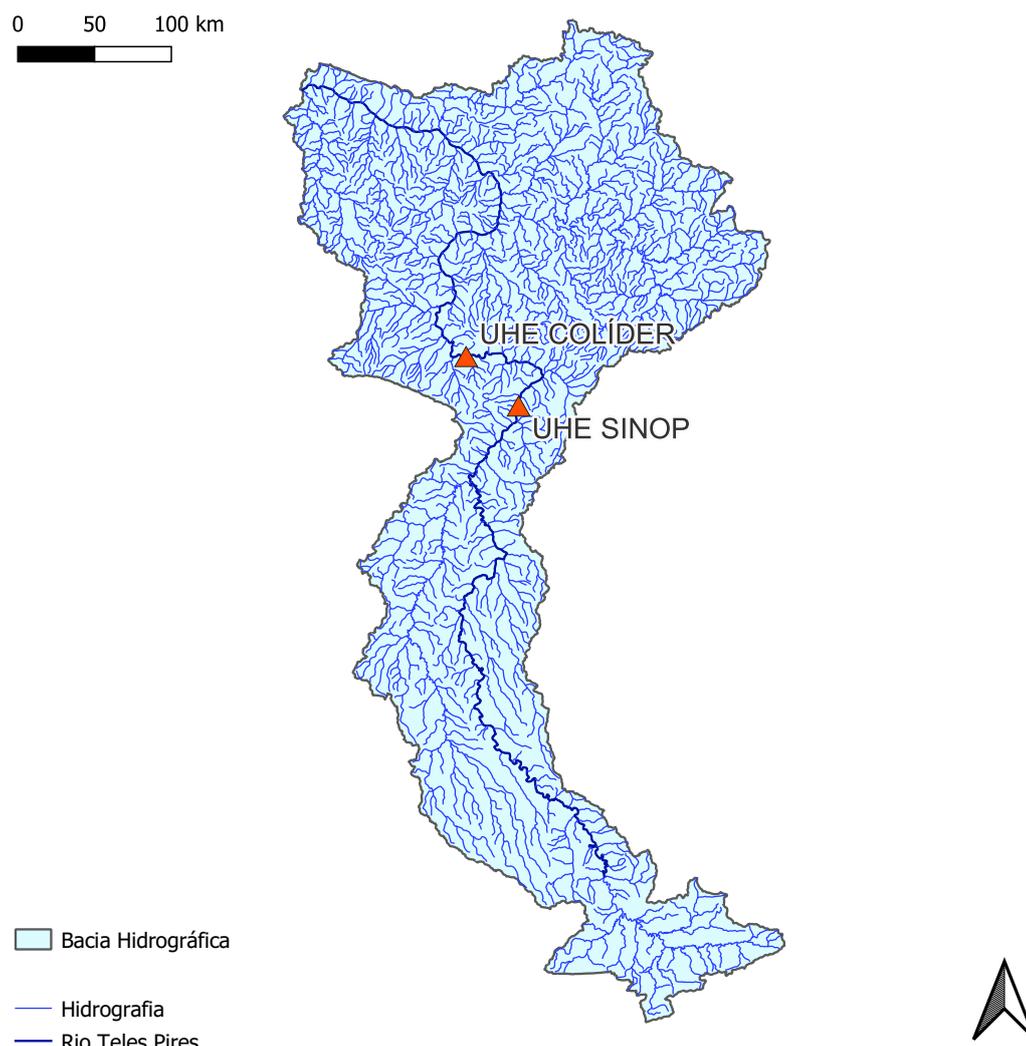


FIGURA 4 – Mapa da Bacia Hidrográfica - Agência Nacional de Águas ANA (2016)

Segundo COPEL (2014) a área do entorno do reservatório apresenta vegetação natural, áreas de pastagem, agricultura e áreas urbanas. A figura 5 apresenta imagens recentes de satélite do entorno do reservatório e os pontos em que foram realizadas análises da concentração de fósforo total.

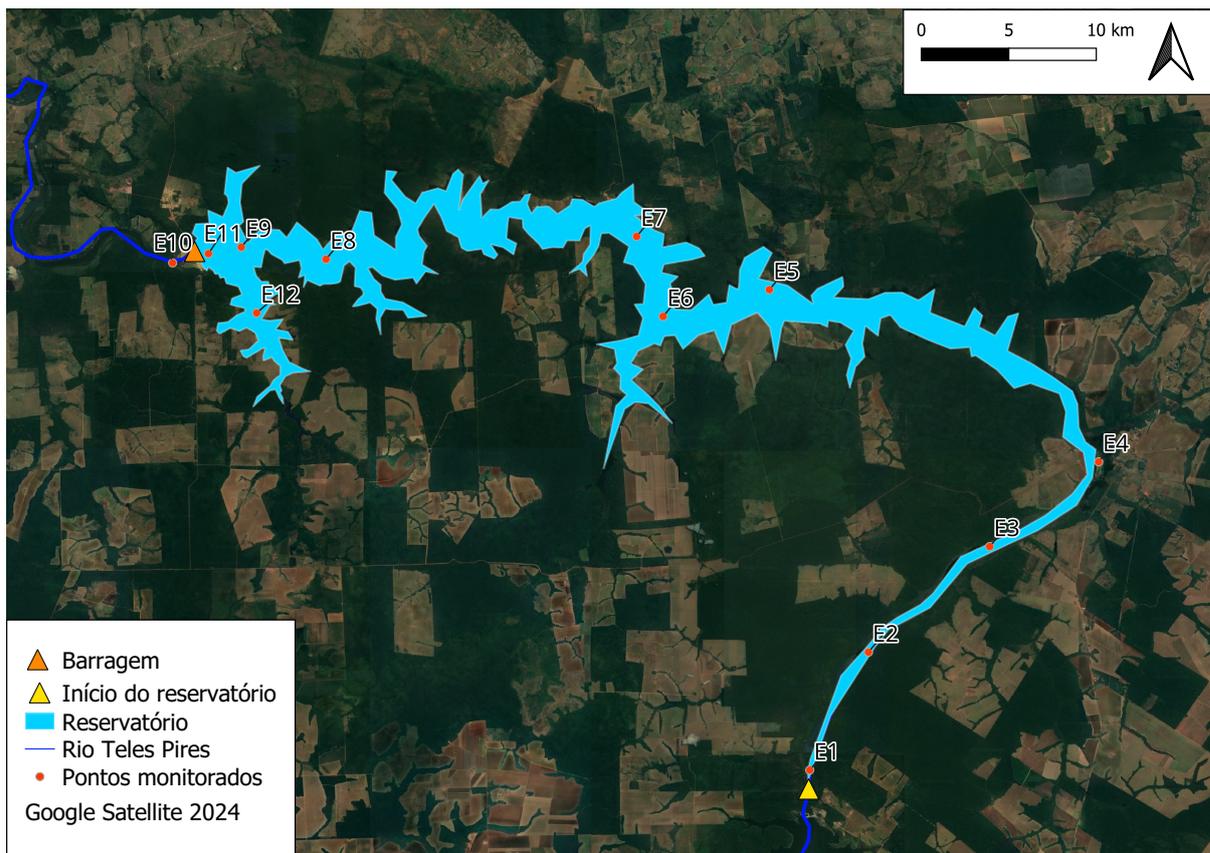


FIGURA 5 – Reservatório e localização dos pontos monitorados

3.1.1 Variáveis de entrada

3.1.1.1 Concentrações de Fósforo

Entre os anos de 2018 e 2021 foram realizadas 10 campanhas para o monitoramento da qualidade da água do reservatório. Após a análise preliminar dos dados, verificou-se que os apenas os pontos E1, E2, E3, E7, E10, E11 e E12 (Figura 5) possuíam dados em todo o período proposto para análise. Sendo que o ponto E10 está a justante da barragem.

A área de drenagem no ponto de entrada do reservatório da UHE de Colíder é de 37.938 km², já na barragem da UHE a área de drenagem é de 41.500 km², segundo dados obtidos pelo HidroWeb (ANA, 2024).

Na figura 6 estão mostradas a vazão afluyente e as concentrações de fósforo nos pontos E7, E11 e E12 nas campanhas de monitoramento realizadas. Esses pontos estão localizados no meio do reservatório e serão utilizados como referência para se determinar a concentração média de fósforo no interior do corpo hídrico.

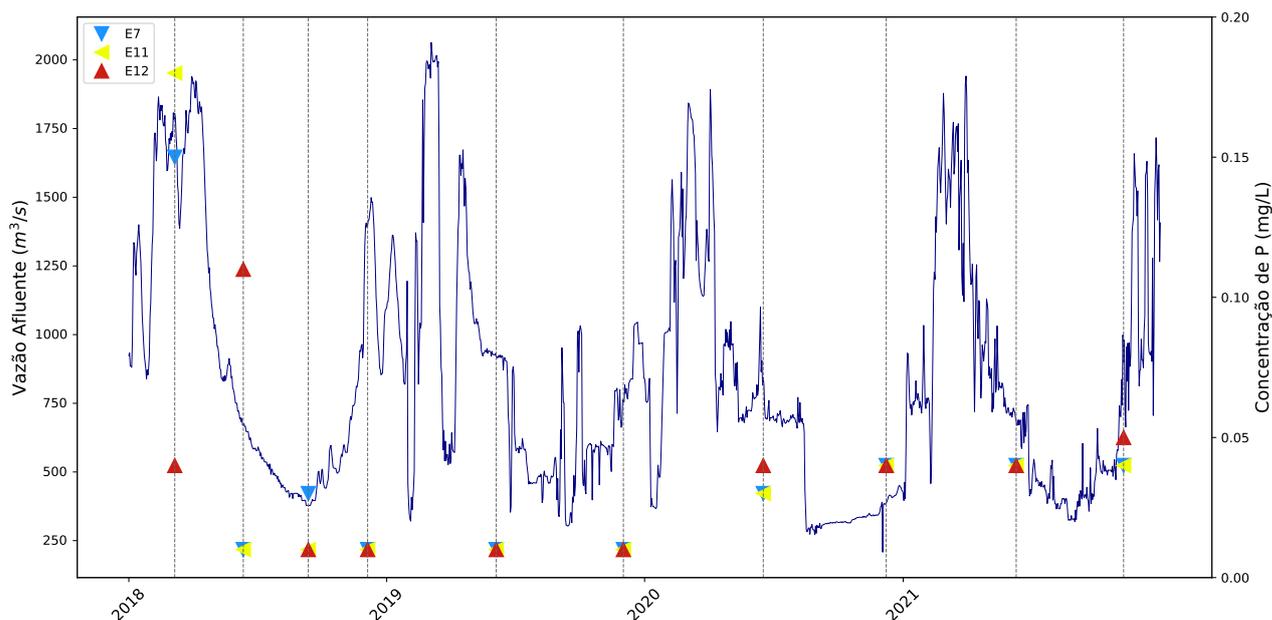


FIGURA 6 – Vazão afluente e concentração de Fósforo durante o período de análise

3.1.1.2 Vazões de Entrada e Saída

Os dados de vazão, presentes na figura 7, foram obtidos por meio da base de dados técnicos do Operador Nacional do Sistema (ONS, 2024), onde estão disponíveis os dados, já consistidos, em escala diária, afluentes e defluentes no reservatório em estudo entre o início do ano de 2018 e o final de 2021.

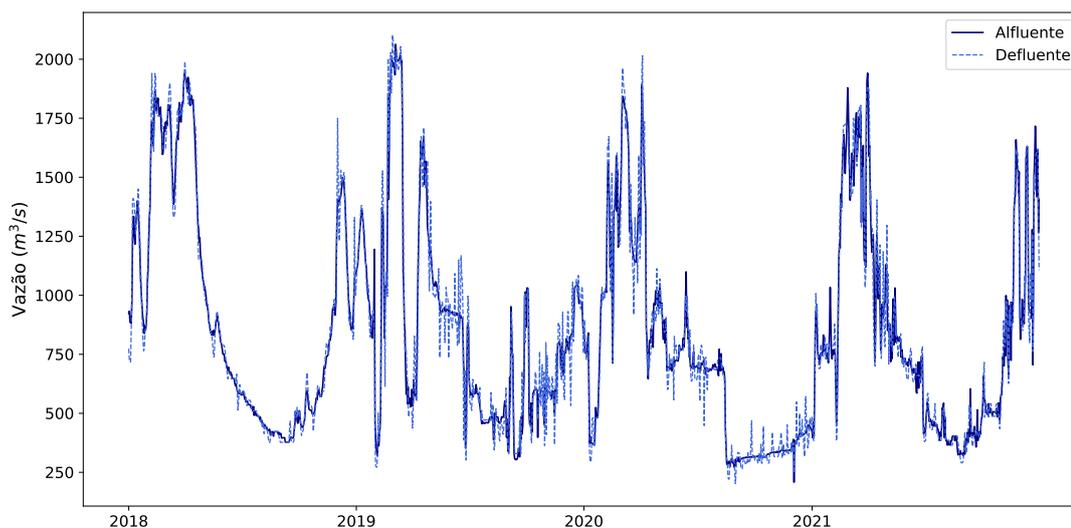


FIGURA 7 – Vazão afluente e defluente diárias de 2018 a 2021

Com base nos dados de vazões afluentes do período foi construída a curva de permanência disponível na figura 8.

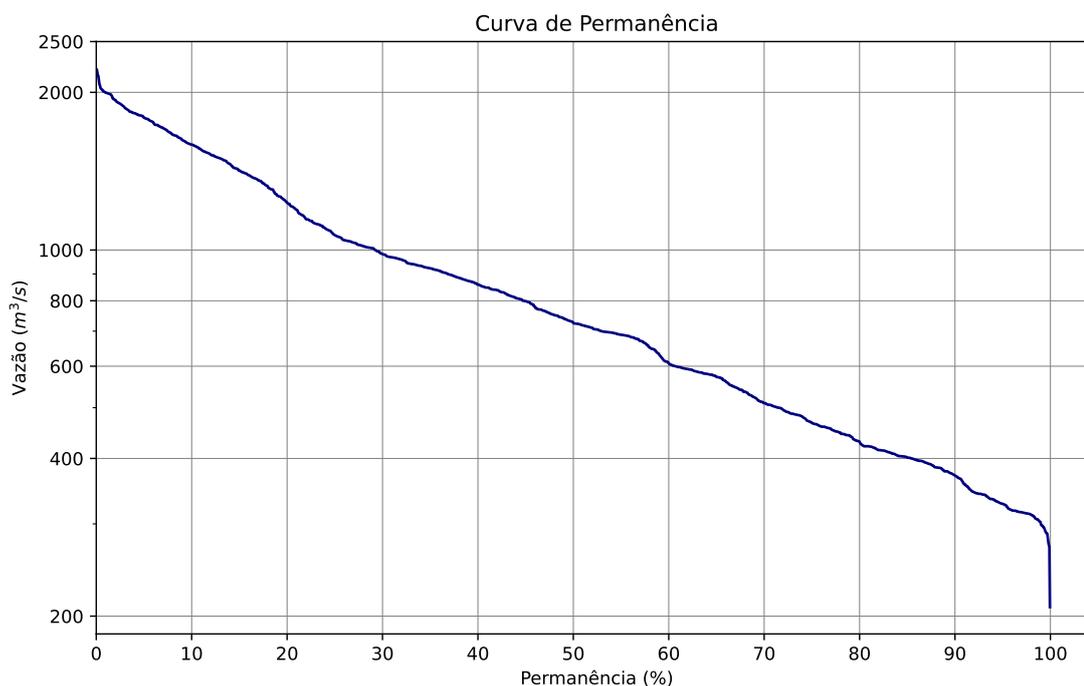


FIGURA 8 – Permanência das vazões entre 2017 e 2021

3.1.1.3 Correção da carga de fósforo de entrada

O fósforo no reservatório tem sua entrada definida pelo Ponto E1, onde há monitoramento nas campanhas realizadas das concentrações e suas vazões são conhecidas. Porém também deve-se considerar e levar em conta as cargas difusas que contribuem com a entrada de fósforo no reservatório. A figura 9 representa esquematicamente as entradas de fósforo no reservatório em estudo.

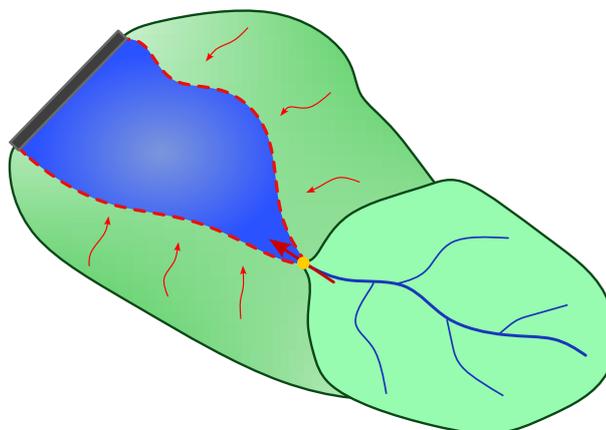


FIGURA 9 – Contribuições de fósforo no reservatório

A consideração que se faz nesse trabalho é que o trecho definido entre a barragem da UHE de Colíder e o ponto E1 (Figura 5) possuem características de

contribuição uniformes. Desprezando-se o possível efeito do reservatório da UHE Sinop.

A carga específica (q) de entrada de fósforo do reservatório é definida por:

$$q = QC/A, \quad (3.1)$$

Onde Q é vazão, C é concentração e A é área da bacia, onde q tem unidade de carga (Kg/s) por área.

Por meio dessa consideração, é contabilizada a entrada de carga difusa no reservatório.

3.1.2 Aplicação do modelo simplificado

A equação diferencial apresentada na equação 2.2 será, neste estudo, aproximada, via Método de Euler Explícito:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)$$

Onde a solução numérica da equação 2.3 fica da forma:

$$P_{i+1} = P_i + \Delta t \left(\frac{Q_{in}C_{in} - Q_{out}P_i}{V} - kP_i \right), \quad (3.2)$$

onde: P_i é a concentração de fósforo no tempo i , P_{i+1} é a concentração de fósforo no tempo $i + 1$, Δt é o intervalo de tempo definido em 1 dia, C_{in} é concentração de entrada de fósforo, Q_{in} e Q_{out} são, respectivamente: vazão de entrada e saída do reservatório e V é o volume do reservatório.

As concentrações de entrada (Ponto E1) foram interpoladas linearmente e definidas em escala diária. Já o volume será constante ao longo do tempo e igual ao valor de $1.582 \times 10^6 \text{ m}^3$.

3.1.2.1 Algoritmo para determinação de k para cada intervalo de tempo

Para se determinar o coeficiente k para cada intervalo de tempo onde existem dados de concentração de fósforo foi aplicado o seguinte algoritmo:

1. Define-se a concentração inicial de fósforo do período, a partir de dado observado
2. Define-se o coeficiente k sendo zero
3. Calcula-se a concentração de fósforo, em escala diária, até o fim do período de interesse com base na equação 3.2 e no k arbitrado no item 3
4. Calcula-se o erro absoluto do valor final calculado pelo modelo e valor real
5. Soma-se um Δk ao antigo k e retorna-se ao item 3 até atingir o valor máximo definido
6. Define-se o valor de k do período com base no menor erro obtido no item 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARGAS DE ENTRADA E SAÍDA

As cargas de entrada e de saída do reservatório são apresentadas na figura 10. É possível notar que a partir do final do ano de 2018 as cargas de entrada e saída têm valores bastante semelhantes.

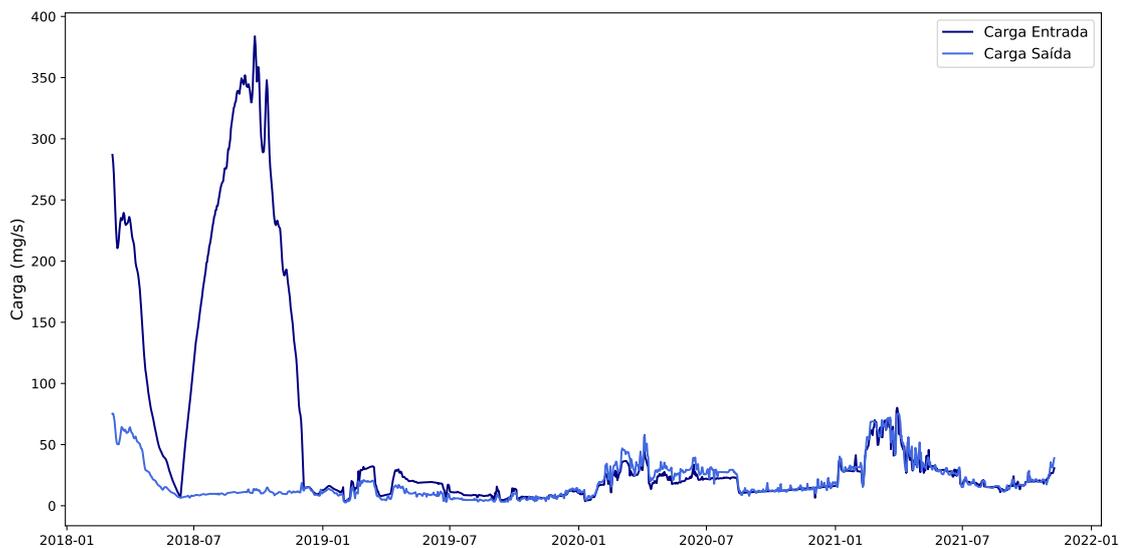


FIGURA 10 – Cargas de entrada e saída do reservatório

A carga de saída da figura obtida a partir do produto da concentração de fósforo obtida experimentalmente do ponto E10 (figura 5), interpolado linearmente, pela vazão de saída do reservatório.

4.2 RESULTADOS DE k ENCONTRADOS

O gráfico abaixo apresenta os valores de k encontrados para cada intervalo de análise utilizando o modelo em escala diária via Método de Euler.

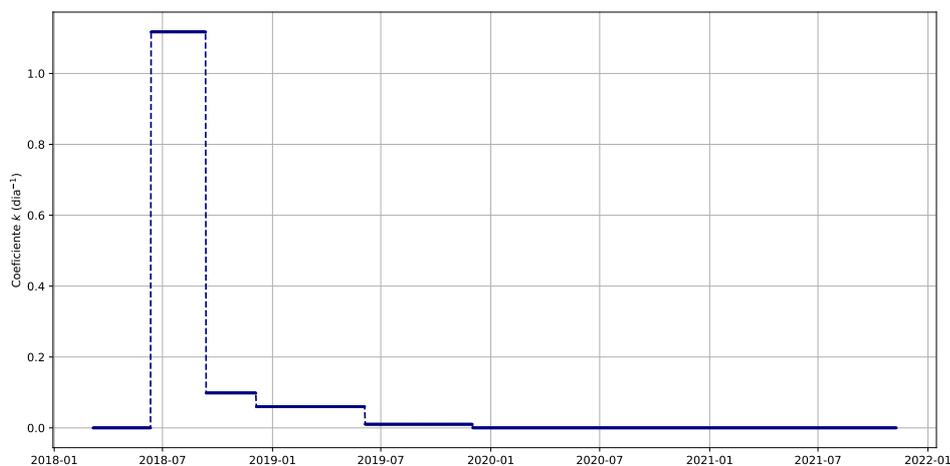


FIGURA 11 – Valor de k utilizado nos intervalos de análise

É possível notar a diminuição do valor do coeficiente com o passar do tempo, chegando ao zero a partir do final do ano de 2019. Essa diminuição ao longo do tempo pode ser explicada principalmente pela diminuição de entrada de carga de fósforo no reservatório sendo a entrada e saída de carga bastante semelhantes em termos numéricos, conforme apresentado na figura 10.

Um fator que pode explicar os baixos valores no período de 2019 até 2021 é que a carga de entrada de fósforo utilizada neste estudo está subestimada. Principalmente pelo fato da carga difusa ser aproximada por uma carga específica igual a bacia anterior. Pode ser uma consequência do reservatório da UHE Sinop localizado à montante do reservatório em análise, onde existe uma provável atenuação da carga conforme indica estudo de Melo, Carmo Calijuri e Graças Silva (2021).

A concentração modelada ao longo do tempo encontrada utilizando-se o coeficiente que melhor se ajusta aos períodos está apresentada na figura 12.

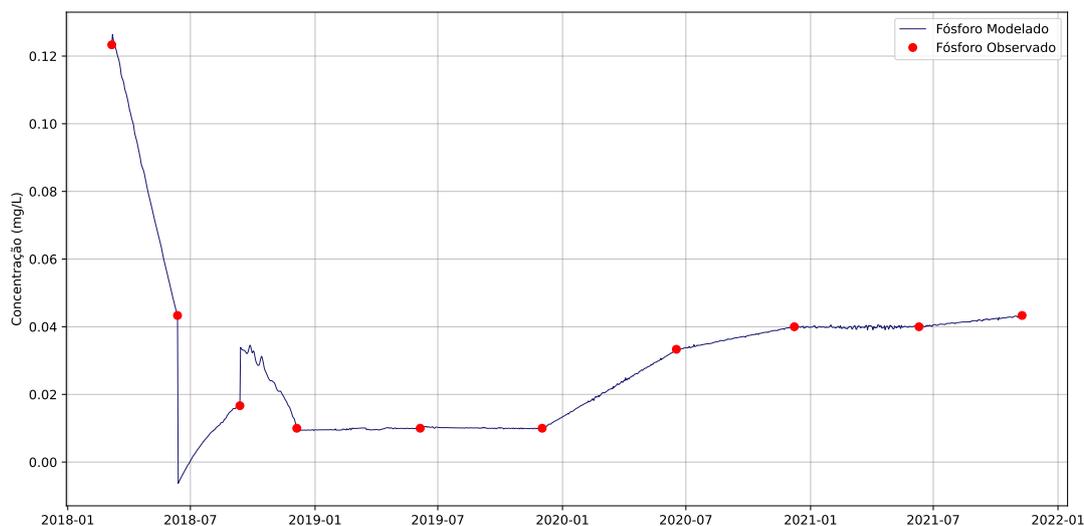


FIGURA 12 – Resultado do Modelo

4.2.1 Comparação com a solução analítica

Para fins de comparação e validação dos valores obtidos pelo método anterior foram calculadas os coeficientes pela solução analítica (equação 2.3) utilizando-se a média da carga de entrada e resolvendo a equação por meio de planilha eletrônica, foram testados coeficientes a partir de zero até dois dias⁻¹ e foi minimizado o valor absoluto erro da concentração de fósforo modelada e do valor obtido em campanha de monitoramento.

Período de Análise	k - Solução Analítica (dia ⁻¹)	k - Método Euler (dia ⁻¹)
07/03/2018 - 12/06/2018	0,090	0,000
12/06/2018 - 12/09/2018	0,660	1,117
12/09/2018 - 05/12/2018	1,200	0,098
05/12/2018 - 05/06/2019	0,025	0,060
05/06/2019 - 02/12/2019	0,018	0,010
02/12/2019 - 17/06/2020	0,000	0,000
17/06/2020 - 08/12/2020	0,000	0,000
08/12/2020 - 10/06/2021	0,000	0,000
10/06/2021 - 09/11/2021	0,000	0,000

A solução analítica apresenta valores na mesma ordem de grandeza porém diferentes devido ao fato de considerar apenas a carga média do período de análise. Ou seja, as variações temporais de vazão e carga implicam na diferença dos coeficientes de decaimento encontrados pelas duas formas de cálculo.

4.2.2 Tempo de residência (τ)

O tempo de residência do reservatório pode ser calculado utilizando a razão de volume/vazão. A vazão afluyente média do período de análise é de 729 m³/s e o volume 1.582 hm³. Portanto o tempo de residência médio entre 2018 e 2021 é de 25 dias.

Os valores de τ médio para cada período de análise está apresentado na tabela abaixo.

Intervalo de Tempo	τ médio (dia)
07/03/2018 - 12/06/2018	11,97
12/06/2018 - 12/09/2018	30,94
12/09/2018 - 05/12/2018	24,80
05/12/2018 - 05/06/2019	13,32
05/06/2019 - 02/12/2019	25,23
02/12/2019 - 17/06/2020	15,53
17/06/2020 - 08/12/2020	33,25
08/12/2020 - 10/06/2021	16,35
10/06/2021 - 09/11/2021	32,05

TABELA 3 – Tempo de residência médio por período

O coeficiente de decaimento pode ser relacionado com tempo de residência médio conforme fórmula de Salas et al. (1991). Os valores serão apresentados no próximo tópico.

4.2.3 Comparação com valores da literatura

Na tabela abaixo são estão calculados os valores de k com base na equação de Salas et al. (1991) apresentado na tabela 2, onde a formulação, segundo o autor, é apropriada para lagos tropicais.

Período de análise	k (dia ⁻¹)	k (dia ⁻¹)
	(SALAS et al., 1991)	Método Euler
07/03/2018 - 12/06/2018	0,578	0,000
12/06/2018 - 12/09/2018	0,360	1,117
12/09/2018 - 05/12/2018	0,402	0,098
05/12/2018 - 05/06/2019	0,548	0,060
05/06/2019 - 02/12/2019	0,398	0,010
02/12/2019 - 17/06/2020	0,508	0,000
17/06/2020 - 08/12/2020	0,347	0,000
08/12/2020 - 10/06/2021	0,495	0,000
10/06/2021 - 09/11/2021	0,353	0,000

TABELA 4 – Comparação do coeficiente de decaimento de fósforo com a literatura

Com a exceção do intervalo entre 06/2018 e 09/2018, os valores da calibração deste estudo foram menores que a literatura.

4.2.4 Índice de estado trófico

O reservatório analisado apresentou, conforme o gráfico abaixo, em março de 2018, um Índice de Estado Trófico (IET) classificado como Supereutrófico, conforme os critérios definidos por Lamparelli (2004) e apresentados na Tabela 1. Posteriormente, verificou-se uma transição do estado trófico do reservatório, com o IET sendo classificado como Mesotrófico em junho de 2018. A partir dessa data, o reservatório permaneceu em estado Oligotrófico até dezembro de 2019. Após esse período, observou-se um retorno ao estado Mesotrófico, classificação que prevaleceu até novembro de 2021.

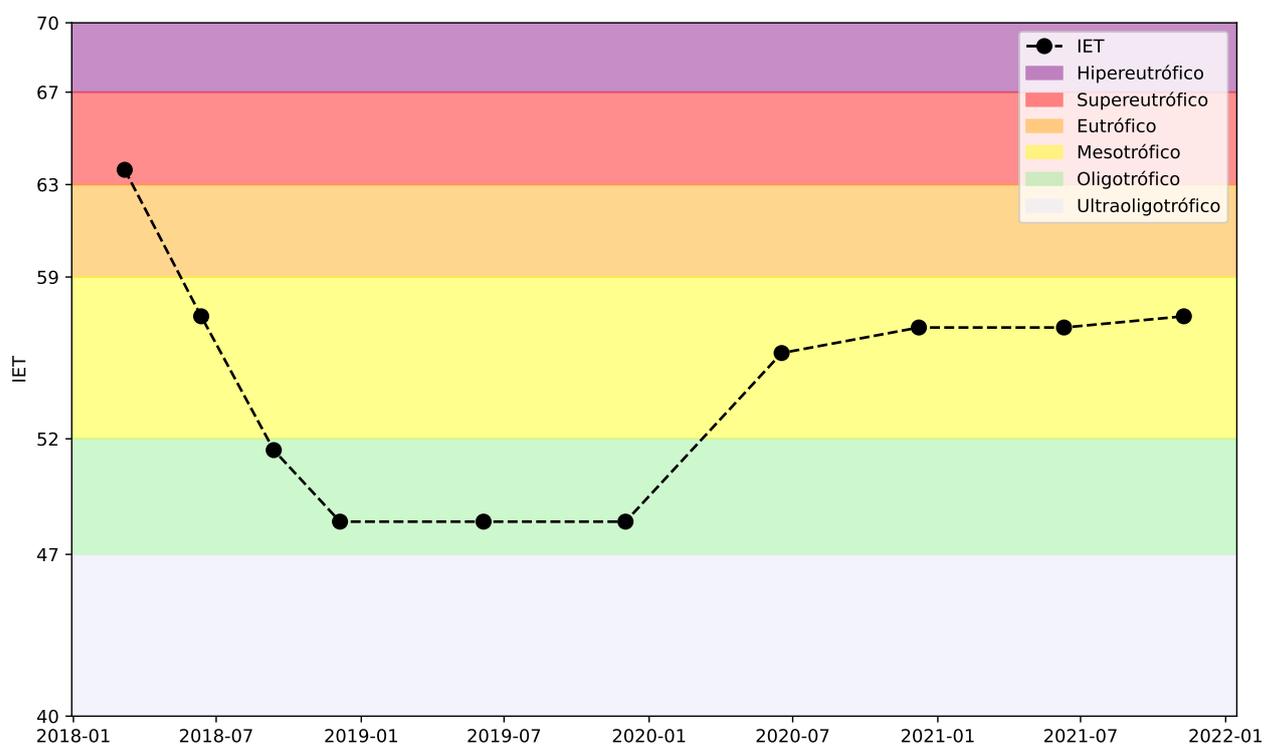


FIGURA 13 – Índice de Estado Trófico ao longo do tempo - Classificação de Lamparelli (2004)

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estimar o coeficiente de decaimento do fósforo em um reservatório de água, utilizando um modelo simplificado de qualidade da água. A metodologia apresenta fundamentação teórica consistente e pode ser replicada em outros reservatórios, desde que dados mínimos para calibração e validação estejam disponíveis.

Os valores de k obtidos ficaram com valores significativamente menores, comparados com a literatura, por conta das cargas de entrada e saída do reservatório apresentarem valores bastante próximos. Também o fato do IET estar entre oligotrófico e mesotrófico a maior parte do tempo pode ter influência direta sobre o desempenho do modelo nessas condições ambientais.

Apesar das limitações, o modelo mostra-se uma ferramenta relevante para análises preliminares e gestão de recursos hídricos, especialmente em locais com restrições de dados.

O modelo possui potencial para ser aplicado de forma massificada em reservatórios onde existam os dados para a calibração do coeficiente de decaimento para fins de verificação do comportamento e tendência dos dados em diversas regiões.

Podendo, também, subsidiar decisões relacionadas ao manejo de nutrientes, controle da eutrofização e monitoramento da qualidade da água em reservatórios e como uma alternativa bastante simples para modelagem matemática do fósforo.

REFERÊNCIAS

ANA. **HIDROWEB v3.3.8361.0 - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em:

<<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>>.

ANA, Agência Nacional de Águas. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em:

<<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/fe192ba0-45a9-4215-90a5-3fba6abea174>>.

ARNOLD, J G et al. SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION.

Transactions of the ASABE, v. 55, p. 1491–1508, 4 2012. ISSN 2151-0032.

Disponível em: <<http://swatmodel.tamu.edu>>.

ASTUTI, Lismining Pujiyani et al. Water Quality and Eutrophication in Jatiluhur

Reservoir, West Java, Indonesia. **Polish Journal of Environmental Studies**, HARD

Publishing Company, v. 31, p. 1493–1503, 2 2022. ISSN 12301485. DOI:

10.15244/pjoes/142475.

AYELE, Hailu Sheferaw; ATLABACHEW, Minaleshewa. Review of characterization, factors, impacts, and solutions of Lake eutrophication: lesson for lake Tana, Ethiopia.

Environmental Science and Pollution Research, v. 28, p. 14233–14252, 2021. DOI:

10.1007/s11356-020-12081-4/Published. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1007/s11356-020-12081-4>>.

BECKER, Ana Carolina Canossa et al. Zero-dimensional modelling as tool for reservoir water quality planning and management. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**,

Brazilian Journal of Water Resources, v. 28, 2023. ISSN 23180331. DOI:

10.1590/2318-0331.282320220115.

BEM, Carla Cristina; BRAGA, Maria. **Determinação do Estado de Eutrofização de um lago raso - Estudo de Caso do Lago Barigui - Curitiba**. [S.l.: s.n.], 2009.

BING, Zhou et al. Analysis of the Causes of Cyanobacteria Bloom: A Review. **Journal of Resources and Ecology**, Institute of Geographic Science e Natural Resources

Research, Chinese Academy of Sciences, v. 11, p. 405, 4 jul. 2020. DOI:

10.5814/j.issn.1674-764x.2020.04.009.

BOUWMAN, A. F.; BEUSEN, A. H.W.; BILLEN, G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970-2050. **Global Biogeochemical Cycles**,

v. 23, 4 out. 2009. ISSN 08866236. DOI:

10.1029/2009GB003576.

- BRASSAC, Nicole Machuca et al. OCORRÊNCIA DE FLORAÇÕES EM RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS: O caso da UHE Foz do Areia, 2009.
- CARLSON, Robert E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, v. 22, p. 361–369, 2 1977. ISSN 19395590. DOI: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
- CARPENTER, Stephen R. **Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication**. [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <<http://lter.limnology.wisc.edu>>.
- CHAPRA, Steven C. **Surface Water-Quality Modeling**. [S.l.]: Long Grove: Waveland Press, 1997.
- COPEL. **Aproveitamento Hidrelétrico Colíder - Rio Teles Pires - Relatório de Impacto Ambiental**. [S.l.: s.n.], jan. 2009. Disponível em: <[https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/arquivos/rima/\\$FILE/RIMA.pdf](https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/arquivos/rima/$FILE/RIMA.pdf)>.
- _____. **Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial – PACUERA – Usina Hidrelétrica Colíder**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <[https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/verdocatual/13F0E5F793A3D754032586E00051097F/\\$FILE/Pacuera-Volume-I.pdf](https://www.copel.com/uhecolider/sitearquivos2.nsf/verdocatual/13F0E5F793A3D754032586E00051097F/$FILE/Pacuera-Volume-I.pdf)>.
- DAS, Sushil K. et al. Calibration, validation and uncertainty analysis of a SWAT water quality model. **Applied Water Science**, Springer Science e Business Media Deutschland GmbH, v. 14, 4 abr. 2024. ISSN 21905495. DOI: 10.1007/s13201-024-02138-x.
- EPA. **AQUATOX**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/hydrowq/aquatox>>.
- _____. **EFDC Water Quality Model Theory and Computation**. [S.l.: s.n.], 2007. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-01/documents/efdc_water_quality_manual.pdf>.
- _____. **Water Quality Analysis Simulation Program (WASP)**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <<https://www.epa.gov/hydrowq/water-quality-analysis-simulation-program-wasp>>.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional, ano base 2022**. [S.l.: s.n.], 2023.
- FARIAS, Maria M Mariah W E Costa de; BARBOSA, Ioná Maria Beltrão Rameh; CARVALHO, Vânia Soares de. **Determinação da vulnerabilidade à eutrofização de reservatórios de água: Estudo de caso na bacia hidrográfica do Capibaribe, Pernambuco**. [S.l.: s.n.], 2013.
- GHADAI, Madhusmita. A BRIEF OVERVIEW ON WATER QUALITY MODELS. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)**, v. 11, p. 535–544, 10 2020. DOI: 10.34218/IJARET.11.10.2020.058.

KAPSALIS, Vasileios C.; KALAVROUZOTIS, Ioannis K. Eutrophication-a worldwide water quality issue. **Chemical Lake Restoration: Technologies, Innovations and Economic Perspectives**, Springer International Publishing, p. 1–21, jul. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-76380-0_1.

KNAPIK, Heloise Garcia et al. Análise crítica da calibração do modelo de qualidade de água QUAL2E – Estudo de Caso da bacia do Alto Iguaçu, 2007. Disponível em: <https://abrh.s3-sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/72/c18f22e0de4a0b031e611779db94a919_8ebdd81b03c521c4d77168571dc90a0c.pdf>.

LAMPARELLI, Marta Condé. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento., set. 2004. DOI: 10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813.

MELO, Laura Vieira Soares; CARMO CALIJURI, Maria do; GRAÇAS SILVA, Talita Fernanda das. INTERAÇÃO SINÉRGICA ENTRE RESERVATÓRIOS AO LONGO DE UM SISTEMA EM CASCATA: uma abordagem sequencial para modelagem de ecossistemas aquáticos interconectados. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2021.

NALIS, Leila et al. **IMPLICAÇÕES NAS VARIÁVEIS HIDRODINÂMICAS COM A CONSTRUÇÃO DA USINA HIDRELÉTRICA COLIDER**. [S.l.: s.n.], 2021.

ONS. **Dados Hidrológicos - Dados Abertos ONS**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://dados.ons.org.br/dataset/dados-hidrologicos-res/resource/624fadff-35e4-4895-b49c-185778e0d1ca?inner_span=True>.

PEREIRA, PAULO; VEIGA, BRUNO; DZIEDZIC, MAURICIO. Avaliação da Influência do Fósforo e do Nitrogênio no Processo de Eutrofização de Grandes Reservatórios Estudo de Caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, FapUNIFESP (SciELO), v. 18, p. 43–52, 1 2013. DOI: 10.21168/rbrh.v18n1.p43-52.

RAMEH, Ioná et al. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Variação de Fósforo em Reservatório**. [S.l.: s.n.], 2013.

RIVAS, E. J. González et al. Eutrophication: A growing problem in the americas and the caribbean. **Brazilian Journal of Biology**, Instituto Internacional de Ecologia, v. 80, p. 688–689, 3 jul. 2020. ISSN 16784375. DOI: 10.1590/1519-6984.200001.

ROCHA, Maria; NETO, Iran Lima. Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs. **Journal of Environmental Management**, Elsevier BV, v. 295, p. 113123, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113123.

SALAS, Henry J. et al. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. **WatRe**, v. 25, p. 341–350, 3 1991. ISSN 00431354. DOI: 10.1016/0043-1354(91)90015-I. Disponível em: <<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991WatRe..25..341S/abstract>>.

SALVADORI, Luca et al. Validation of a simplified AQUATOX model to assess quality status of a model river in Sardinia. **EPJ Web of Conferences**, EDP Sciences, v. 269, p. 01050, 2022. DOI: 10.1051/epjconf/202226901050.

SANTOS, Cledeilson Pereira; SOUZA, Christopher Freire. Efeitos da cascata de reservatórios sobre a variabilidade natural de vazões: o caso do rio Paraná em. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2015.

SANTOS, Diógenes Fernandes Dos; SILVA, Jonathan Mota da; BECKER, Vanessa. Increasey eutrophication symptoms during a prolonged drought event in tropical semi-arid reservoirs, Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hidricos**, Brazilian Journal of Water Resources, v. 26, 2021. ISSN 23180331. DOI: 10.1590/2318-0331.262120210097.

SASABUCHI, Isabela T.M. et al. **Sustentabilidade no uso de fósforo: uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil**. v. 46. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Quimica, 2023. P. 185–198. DOI: 10.21577/0100-4042.20170967.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. [S.l.]: Editora UFMG, 1996.

THOMANN, Robert V.; MUELLER, John A. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**. [S.l.: s.n.], 1987.

TOMCZYK, Paweł et al. Effective microorganism water treatment method for rapid eutrophic reservoir restoration. **Environmental science and pollution research international**, v. 31, p. 2377–2393, 2 jan. 2024. ISSN 16147499. DOI: 10.1007/s11356-023-31354-2.

TONÉ, Arthur; NETO, Iran Lima. Modelagem simplificada do fósforo total em lagos e reservatórios brasileiros. **Revista DAE**, Revista DAE, v. 221, p. 142–156, 68 mar. 2019. DOI: 10.36659/dae.2020.012.

TRINDADE, Priscilla Basilio Cardoso Barros; MENDONÇA, Antônio Sérgio Ferreira. Eutrophication in reservoirs – Case study: Reservoir of Rio Bonito (ES). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 19, p. 275–282, 3 jul. 2014. ISSN 14134152. DOI: 10.1590/S1413-41522014019000000537.

VANTARAKIS, Apostolos. Eutrophication and public health. **Chemical Lake Restoration: Technologies, Innovations and Economic Perspectives**, Springer International Publishing, p. 23–47, jul. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-76380-0_2.

VARSA, K. C. Deepa et al. Water quality simulation using the WASP model for eutrophication control in a South Indian Reservoir. **Water Practice and Technology**, IWA Publishing, v. 18, p. 2740–2758, 11 nov. 2023. ISSN 1751231X. DOI: 10.2166/wpt.2023.173.

VOLLENWEIDER, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. **Mem. 1st. Ital. Idrobiol. Dott. Marco de March**, 1976.

ZHENG, Zheng et al. Design and Application of Plant Ecological Space Technology in Water Eutrophication Control. **Journal of Environmental Engineering**, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 145, 3 2019. ISSN 0733-9372. DOI: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001485.