

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

MODELAGEM HIDRODINÂMICA E AVALIAÇÃO DO DECAIMENTO DO FÓSFORO EM UM LAGO URBANO HIPEREUTRÓFICO

Sofia Midauar Gondim Rocha¹
Janine Brandão de Farias Mesquita²
* Iran Eduardo Lima Neto¹

HYDRODYNAMIC MODELING AND PHOSPHORUS DECAY EVALUATION OF A HYPEREUTROPHIC URBAN LAKE

Recibido el 8 de noviembre de 2018; Aceptado el 28 de junio de 2019

Abstract

This study aimed to analyze the hydrodynamics of a hypereutrophic urban lake located in Fortaleza-CE, Brazil, applying the 2D modeling software CE-QUAL-W2, as there is a lack of these studies on the Northeast region of Brazil. Field data along with literature available information were used to insert lake information on the model, so the scenarios for rainy and drought periods were performed for velocity, temperature and residence time (RT). Time series for RT and phosphorus decay rate (K) were performed and compared to the results found using the complete mixing approach. The modeling outcomes showed RT values on the range from 8 to 80 days, with higher values obtained for the dry season, as expected. It was also observed a slight thermal stratification for the dry season, which reduces for the rainy season. This scenario was corroborated by the results regarding the RT. Finally, when the RT and K values obtained with the 2D model were compared to the ones obtained with the complete mixing approach, it was found that this is a good approximation for this reservoir.

Keywords: CE-QUAL-W2, hydrodynamic modeling, urban lake, phosphorus.

¹ Centro de Tecnologia, Campus do Pici, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

² Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, Brasil.

* *Autor correspondente:* Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Centro de Tecnologia, Campus do Pici, Av. Mister Hull s/n, Bloco 713, 1º andar, 60451-970 Fortaleza, CE, Brazil. Email: iran@deha.ufc.br

Resumo

O presente estudo teve como objetivo analisar a hidrodinâmica de um lago urbano hipereutrófico localizado em Fortaleza-CE, Brasil, utilizando o software de modelagem 2D CE-QUAL-W2; tendo em vista a carência dessas análises para o nordeste brasileiro. Foram utilizados dados obtidos em campo e disponíveis na literatura para inserir as informações referentes ao lago estudado, e então simulados os cenários de alta e baixa vazão para os parâmetros velocidade, temperatura e tempo de residência (TR) do reservatório. Com isso, modelaram-se as séries temporais relativas ao TR e calcularam-se os seus respectivos coeficientes de decaimento do fósforo (K), comparando os resultados aos encontrados utilizando a hipótese de mistura completa. O modelo mostrou valores de TR variando entre 8 e 80 dias, com maiores valores no período seco, conforme esperado. Também foi observada uma leve estratificação térmica no período mais seco, a qual se atenua para a temporada de chuvas, situação corroborada pelos resultados relativos ao TR. Finalmente, quando comparados os valores de TR e K simulados com o modelo 2D aos obtidos com o modelo de mistura completa, concluiu-se que este é uma boa aproximação para o lago em questão.

Palavras chave: CE-QUAL-W2, modelagem hidrodinâmica, lago urbano, fósforo.

Introdução

A água tem preocupado a sociedade em termos qualitativos dada sua escassez, principalmente quando são analisadas as regiões áridas e semiáridas, onde está inserido maior parte do estado do Ceará. A água é um recurso indispensável ao desenvolvimento socioeconômico e, de acordo com a Lei Federal nº 9.433/1997 – a “Lei das Águas”, este é um recurso que deve ser assegurado à atual e às futuras gerações, em padrões de qualidade adequados.

O conhecimento da dinâmica da qualidade das águas de um açude é de grande importância para a sua correta gestão. Muitos estudos são realizados tendo como escopo o entendimento desta realidade (Pacheco *et al.*, 2016; Calmon *et al.*, 2016, Moura *et al.*, 2020; Fraga *et al.*, 2020). Souza Filho (2013) afirma que, por qualidade, entende-se todas as características físicas, químicas e biológicas apresentadas pelas águas, e complementa ao evidenciar que o comportamento hidrodinâmico do lago condiciona sua capacidade de suporte e, conseqüentemente, uso e manejo sustentável deste recurso. É discutido ainda a alta variabilidade sazonal dos parâmetros de um reservatório. Song *et al.* (2018) ressalta a influência da hidrodinâmica na qualidade da água em reservatórios. Com isso, modelos dinâmicos são essenciais para incorporar este cenário (Sperling, 2007; Huang, Liu, 2008; Laspidou *et al.*, 2017, Araújo *et al.*, 2019; Lira *et al.*, 2020).

Entre as variáveis de maior importância no que tange aos componentes de qualidade da água em reservatórios, pode ser citado o tempo de residência (TR), visto que ele está relacionado à retenção de fósforo no corpo hídrico, o que indica maior vulnerabilidade do lago à eutrofização (Jones, 2007; Koiv *et al.*, 2011; Wiegand *et al.*, 2016). O cálculo do coeficiente de decaimento do fósforo é realizado em função do TR, considerando a hipótese de mistura completa, sendo a função ajustada à região estudada (Vollenweider, 1968; Salas, Martino, 1991; Toné, 2016).

Em períodos de seca, quando o TR aumenta, é notória a mudança nos parâmetros de transparência e profundidade de zona eufótica, assim como na eutrofização (Bouvy *et al.*, 1999). De forma geral, as condições físicas de um lago, assim como suas características hidrometeorológicas (e.g. temperatura, velocidade dos ventos) influenciam diretamente a qualidade de suas águas. Esta realidade está presente principalmente em lagos rasos, podendo causar processos de *bloom* de cianobactérias (Coveney *et al.*, 2005; Jones, Elliott, 2007; Dantas *et al.*, 2011; Koiv *et al.*, 2011; Londe *et al.*, 2016).

Muitos estudos de reservatórios são realizados utilizando aproximações de regime permanente. Ferreira *et al.* (2016) discute a importância do estudo hidrodinâmico em corpos hídricos, principalmente aqueles inseridos em meios urbanos, tendo em vista suas dinâmicas de alta variabilidade sazonal. Feng *et al.* (2018) também relata os diferenciados processos que ocorrem em lagos rasos ao discutir a influência de diferentes variáveis climáticas, tais como luz, temperatura e radiação, na formação de florações de cianobactérias, além de reforçar o fósforo como nutriente limitante em estágios mais avançados desses eventos.

Birch & McCaskie (1999) evidenciam a significância do entendimento da dinâmica e da correta gestão de reservatórios urbanos ao propor uma metodologia de análise desses lagos, que fornece informações a respeito de importantes processos ecológicos no reservatório, a forma como os problemas de gerenciamento surge e as opções disponíveis para a sua prevenção e solução. Nesse contexto, Dunalska *et al.* (2015) sugere alternativas para a melhoria da qualidade das águas desses corpos hídricos, dentre as quais está a eliminação de cargas pontuais, não pontuais ou difusas de poluição diretas ao canal que conduz ao reservatório, remoção ou inativação de sedimento, além de inativação do fósforo junto a ações de suporte na forma de biomanipulação.

Com isso, tendo em vista a alta complexidade dos processos que ocorrem nos reservatórios, modelos hidrodinâmicos são alternativas pouco onerosas que representam bem os diferentes processos correntes em um corpo hídrico. Eles surgem em contrapartida aos modelos “Caixa-preta”, que não possibilitam conhecimento detalhado das variações dentro do lago. (Teixeira *et al.*, 2007)

Nesse cenário, o modelo 2D CE-QUAL-W2 é amplamente aceito e indicado para a modelagem de reservatórios. Este *software* exige uma série de parâmetros, sendo estes meteorológicos, de qualidade de água, quantidade de água, fluxos afluente e vertente; além da batimetria do lago, para então ser realizado um estudo 2D conjunto de todos esses dados (Deliman & Gerald, 2002; Debele *et al.*, 2006; Huang, Liu, 2008). Entretanto, os reservatórios do nordeste brasileiro ainda carecem de estudos dessa natureza.

O objetivo do presente estudo é analisar a hidrodinâmica de um lago artificial urbano hipereutrófico, localizado em Fortaleza-CE, utilizando o *software* de modelagem 2D CE-QUAL-

W2. Nesse caso, tem-se o intuito de investigar o impacto das condições meteorológicas e hidrológicas na velocidade, temperatura e tempo de residência do referido lago, observando-se também o efeito da sazonalidade. Busca-se ainda comparar o tempo de residência obtido utilizando o modelo bidimensional com o modelo simplificado de mistura completa, fazendo o mesmo para o coeficiente de decaimento de fósforo, este calculado segundo metodologia proposta na literatura. Ressalta-se que estudos anteriores realizados no referido lago se limitaram ao uso de modelos hidrológicos ou simplificados como o de mistura completa e o de fluxo em pistão para descrever o comportamento hidrodinâmico do mesmo (ver Araújo & Lima Neto, 2019; Campos *et al.*, 2020). Portanto, a aplicação inédita de um modelo 2D (CE-QUAL-W2) ao lago em estudo tem relevância do ponto de vista científico não apenas com relação à descrição mais completa da hidrodinâmica do lago, como também quanto ao acoplamento do modelo às condições meteorológicas e hidrológicas.

Metodologia

Reservatório analisado

Foi escolhido para ser objeto do presente estudo o Açude Santo Anastácio – ASA, localizado em Fortaleza/CE, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1. Este é um lago urbano hipereutrófico, conforme relatado por Pacheco & Lima Neto (2017). O reservatório se caracteriza por um volume de cerca de 0.3 hm³, possuindo sua maior dimensão (longitudinal), de aproximadamente 900 metros, cerca de cinco vezes o tamanho da sua menor dimensão (lateral), esta com uma média de 185 metros. Por isto, o corpo hídrico enquadra-se bem ao modelo 2D CE-QUAL-W2, o qual assume que as variações laterais (e.g. variações no sentido transversal) no açude são insignificantes.

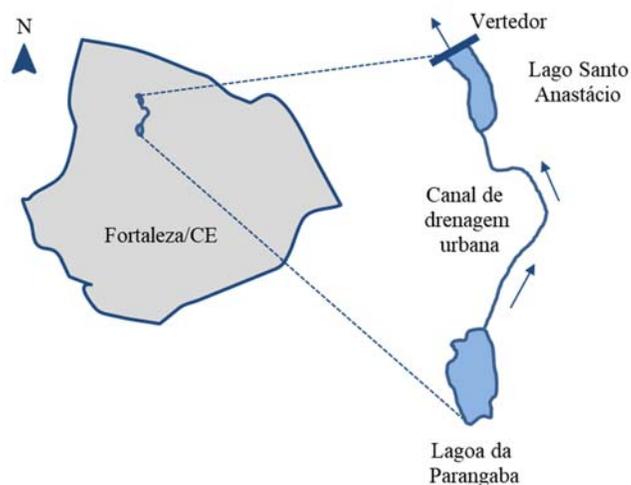


Figura 1. Localização do Açude Santo Anastácio – ASA em Fortaleza/CE, Brasil (Latitude: 03°43'02" S e Longitude: 38°32'35" W).

A vazão afluyente ao lago advém de um canal de drenagem urbana com seção retangular de 5m de largura e extensão de 2.5 km. É importante ressaltar que, ao longo deste canal, existem muitas ligações clandestinas de esgoto, além de aportes difusos, que mantém o nível d'água variando entre 0.2 e 0.3 metros, mesmo durante períodos secos, normalmente nos últimos meses do ano.

Inserção de batimetria

Foi utilizado um estudo realizado por Araújo (2016) para validar os dados batimétricos do ASA inseridos no modelo. Inicialmente, foi realizada a segmentação do lago, tanto vertical quanto longitudinalmente, de forma a compatibilizar o açude com a metodologia de análise utilizada pelo software. Foram efetuados 32 segmentos horizontais, distando 29 metros entre si. Já verticalmente, determinaram-se camadas a cada 0.2 metros, com sua profundidade máxima variando com o fundo do açude, com uma altura máxima de aproximadamente 6 metros no modelo, além de elevação variando entre, aproximadamente, 20 e 27 metros em relação ao nível do mar.

Em seguida, para ser realizado o cálculo do volume modelado do açude, foi utilizada a planilha disponibilizada pelo *software*, que o faz a partir da discretização do lago inserida pelo usuário. Com isso, foi comparado o volume obtido pela aproximação do modelo com o volume medido esperado, calculado por Araújo (2016). Assim, prosseguiu-se para a inserção dos dados de meteorologia.

Dados meteorológicos

São necessários para o modelo os dados de temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, direção e velocidade dos ventos e nebulosidade. Foram medidos na Estação Meteorológica do Campus do Pici os dados meteorológicos, referentes ao ano de 2013. As seguintes informações foram coletadas, todas diárias e para os horários de 9h, 15h e 21h: (a) temperatura do ar, em ° C; (b) direção do vento, em graus; (c) velocidade dos ventos, em m/s, e (d) nebulosidade, medida de 0 a 10. Para o cálculo da temperatura de ponto de orvalho, foi utilizada a metodologia proposta por Collischonn & Dornelles (2013). Com isso, foram adequados os dados para dias corridos (julianos), e então inseridos no formato com a extensão “.npt” (visualizado pelo aplicativo bloco de notas), requerido pelo modelo.

Dados de vazão de entrada e saída

Foram inseridas as séries temporais referentes às vazões de entrada e saída do ASA (dados diários). Estas foram obtidas a partir do desenvolvimento de equações Chuva-Vazão para o ano em estudo (2013). Foram ajustadas as curvas para as vazões de entrada e de saída, respectivamente Equações (1) e (2), por meio do software MS Excel, a partir de dados medidos de precipitação diária (estação meteorológica do campus do Pici) e vazão para a região em estudo (Araújo, 2016). Os coeficientes de correlação encontrados foram iguais à 0.93 para ambos os casos.

$$Q_e = 0.0362P + 0.1144$$

Equação (1)

$$Q_s = 0.0334P + 0.1065$$

Equação (2)

sendo Q_e e Q_s as vazões de entrada e saída do ASA em m^3/s , respectivamente, e P a precipitação diária em milímetros.

Arquivo controle

No arquivo controle, foram inseridas latitude, longitude e elevação do fundo do reservatório, além do ano da simulação, 2013. A evaporação não foi considerada na simulação, uma vez que as perdas líquidas já são contabilizadas nas Equações (1) e (2). Em relação aos parâmetros hidráulicos, para a viscosidade e a rugosidade do vento foram utilizados os valores padrão, enquanto para a fricção foi utilizado o cálculo segundo Chézy. Estudos realizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2017) têm demonstrado que tais considerações forneceram resultados satisfatórios quanto à modelagem hidrodinâmica de reservatórios usando o CE-QUAL-W2.

No que tange às condições iniciais da modelagem, foi considerada uma temperatura média inicial de 28°C para todos os segmentos e camadas do reservatório, ou seja, assumindo o lago como isotérmico e com água doce, tendo em vista que as variações da temperatura média ao longo do ano são inferiores a 2°C (Araújo, 2016).

Principais equações do modelo

De acordo com Wells *et al.* (2017), o CE-QUAL-W2 utiliza as equações do movimento lateralmente constantes derivadas das equações tridimensionais de continuidade e de Reynolds. As seguintes considerações são realizadas: o fluido é incompressível, a aceleração centrípeta é uma pequena correção da gravidade (aproximação de Boussinesq) e todas as velocidades e pressões são consideradas a soma das médias de tempo turbulento e desvios da média. As Equações 3, 4 e 5 são as governantes do modelo após as devidas simplificações, sendo, respectivamente, as equações de continuidade e de quantidade de movimento em x e z :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Equação (3)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial z} \right)$$

Equação (4)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial t_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} \right)$$

Equação (5)

em que:

u: Velocidade média na direção longitudinal (x)

w: Velocidade média na direção vertical (z)

p: Pressão média

g: Constante gravitacional

ρ : Massa específica da água

μ : Viscosidade dinâmica

τ_{xx} : Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face x do volume controle

τ_{xz} : Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face z do volume controle

τ_{zx} : Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face x do volume controle

τ_{zz} : Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face z do volume controle

As trocas de calor na superfície são realizadas pela equação abaixo, a partir da qual simula-se a transferência de calor ao longo das coordenadas x e z através da equação bidimensional de convecção e difusão turbulenta:

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br}) \quad \text{Equação (6)}$$

sendo:

H_n : Taxa líquida de troca de calor na superfície da água, em Wm^{-2}

H_s : Radiação incidente de ondas longas, em Wm^{-2}

H_a : Radiação incidente de ondas curtas, em Wm^{-2}

H_{sr} : Radiação de ondas curtas refletida, em Wm^{-2}

H_{ar} : Radiação de ondas longas refletida, em Wm^{-2}

H_{br} : Radiação de volta da superfície da água, em Wm^{-2}

H_e : Calor perdido na evaporação, em Wm^{-2}

H_c : Condução de calor, em Wm^{-2}

Por fim, as equações do movimento e transferência de calor supracitadas são resolvidas utilizando o modelo de turbulência k- ϵ e os esquemas numéricos do tipo *Ultimate/Quickest*, conforme detalhado por Wells *et al.* (2017).

Simulação

Sendo todos os parâmetros necessários corretamente inseridos, foi possível realizar a modelagem hidrodinâmica do ASA, gerando dados referentes à velocidade horizontal, à temperatura e ao TR.

Para os dados de TR, inicialmente foi calculada a média das séries temporais obtidas para cada elemento de discretização do modelo. Adiante, foram calculadas as médias das séries temporais para a superfície e o fundo do reservatório, a fim de serem contrapostos estes valores com os resultados calculados utilizando a hipótese de mistura completa, realizados por Araújo (2016). A partir dos dados de TR, utilizou-se metodologia proposta por Toné (2016) para o cálculo do coeficiente de decaimento do fósforo para as situações analisadas, de forma a serem estudadas as variações temporais.

Resultados e discussão

As Figuras 2 e 3 apresentam uma visão em planta e o corte longitudinal do Açude Santo Anastácio – ASA, explicitando os elementos de análise do modelo CE-QUAL-W2 obtidos pelo processo de discretização descrito anteriormente. A Figura 2 apresenta a segmentação longitudinal do reservatório, enquanto a Figura 3 exibe a segmentação vertical junto à horizontal, resultando nos elementos de análise explicitados na imagem.

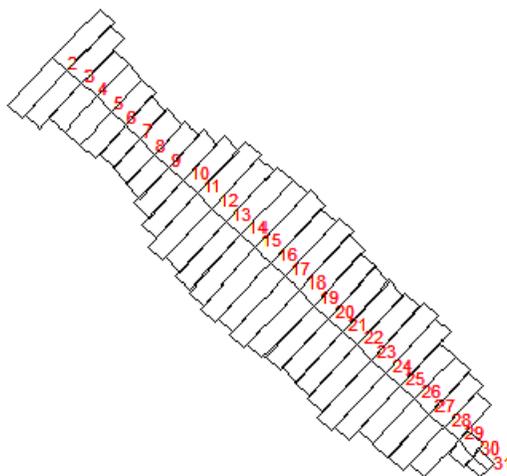


Figura 2. Visão em planta do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2.

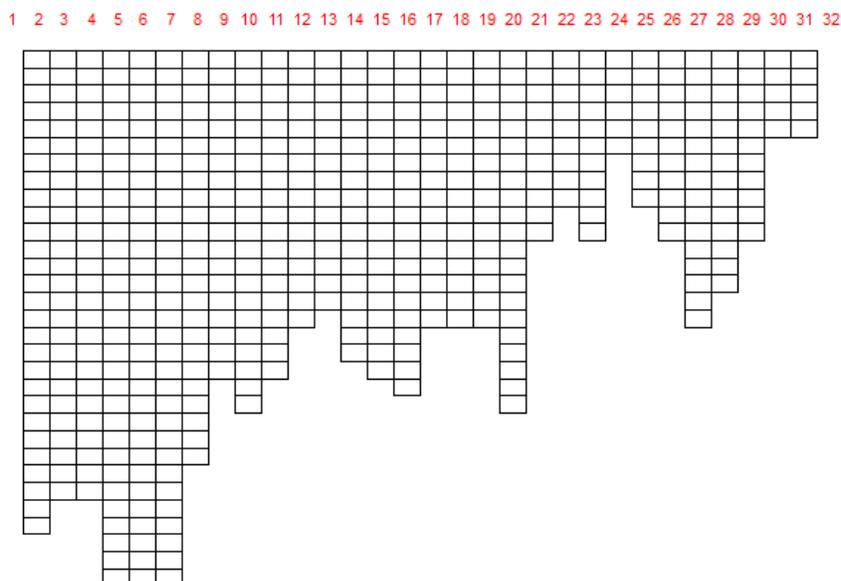


Figura 3. Corte longitudinal do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2.

Por conseguinte, foi calculado o volume modelado para o reservatório, sendo este igual à 0.36 hm³. O volume medido por Araújo (2016) foi de 0.31 hm³ e, com isso, comparando-se os valores, tem-se uma diferença percentual de aproximadamente 16%. Assim, o volume modelado pode ser considerado satisfatório para o presente estudo.

Já na Figura 4 (a), (b) e (c) podem ser observados, por meio das simulações realizadas com o CE-QUAL-W2 em um dia típico de alta vazão e um dia típico de baixa vazão, o comportamento dos parâmetros de velocidade horizontal, temperatura e TR do ASA, respectivamente.

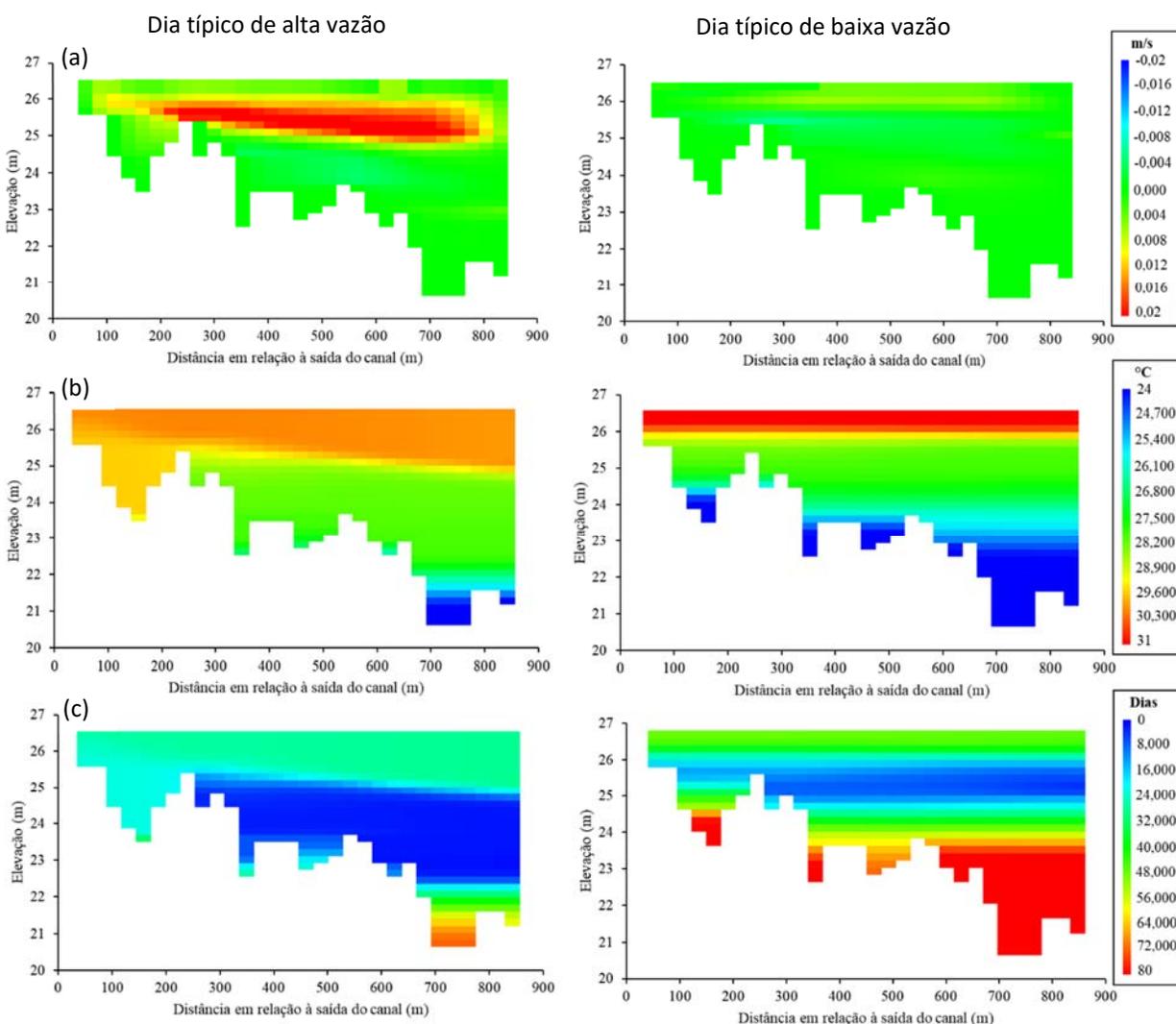


Figura 4. Simulações do CE-QUAL-W2 para alta e baixa vazão afluente ao ASA: (a) velocidade horizontal, (b) temperatura e (c) tempo de residência.

Ao ser analisada a velocidade horizontal no reservatório, é notório que esta possui uma leve perturbação para o dia típico de alta vazão, sendo mais homogênea para uma baixa vazão. A mínima velocidade registrada para o período de alta vazão foi de 0.008 m/s, enquanto a máxima foi de 0.02 m/s. Já para a baixa vazão, tem-se um mínimo de 0.004 m/s e um máximo de 0,008 m/s. Tal situação é condizente com o esperado, ou seja, valores de velocidade maiores quando há maior afluência, tendo em vista uma maior agitação das águas, com uma diferença aproximada de 150%, e mudança de comportamento quando há menor afluência ao lago. Mahanty *et al.* (2016) também observaram mudanças de velocidade em uma lagoa dependendo do período do ano.

É importante destacar que, mesmo existindo uma alta variação na velocidade para os casos analisados, os valores absolutos são baixos em ambas as situações ao serem comparados os resultados com estudos prévios. Mahanty *et al.* (2016), ao analisar uma laguna localizada na Índia, obtiveram velocidades máximas de aproximadamente 0.2 m/s. Song *et al.* (2018), ao estudar o efeito da velocidade do escoamento no crescimento das algas, encontraram faixas variando a cada 0.1 m/s, com um máximo de 0.5 m/s, valores consideravelmente superiores aos obtidos no presente estudo. Yang *et al.* (2018) obtiveram velocidades em torno de 0.5 m/s ao avaliar a influência de processos hidrodinâmicos na ocorrência de florações periódicas de algas em um reservatório localizado em região subtropical na China.

Nesse contexto, ao serem observados os resultados obtidos para a temperatura, tem-se um reservatório mais uniforme no início do ano, corroborando para um cenário de mistura completa; enquanto no período mais seco, ao final do ano, é tida uma leve estratificação térmica, com uma diferença máxima de cerca de 6°C. Ao ser analisada a Figura 4b, pode-se observar um gradiente de temperatura expressivo a cerca de 2 metros de profundidade, o que indica a presença de uma termocline no reservatório. Em períodos secos, nos quais se têm baixos índices pluviométricos, altas temperaturas e baixas vazões, estratificações são comuns. Jones *et al.* (2005) discute a importância do aumento das temperaturas e da presença de estratificações térmicas na composição de populações de fitoplâncton.

Com relação ao tempo de residência (TR), nos dias de alta vazão, tem-se um reservatório mais homogêneo. Situações como essa também são reportadas por Dantas *et al.* (2011), que também obtiveram condição de desestratificação da coluna de água no período chuvoso. Contudo, ao se estudar os dias de baixa vazão, observam-se valores bem heterogêneos no lago, com máximos de até 80 dias nas zonas mortas e mínimos de até 8 dias na região próxima à superfície do reservatório. Como apresentado por Bouvy *et al.* (1999) e Laspidou *et al.* (2017), esta situação é favorável para a formação de florações de cianobactérias, sabendo-se que estas se desenvolvem preferencialmente em ambientes estáveis, sendo então um potencial transtorno na qualidade das águas do ASA. Li-Kun *et al.* (2017), em estudo realizado em lago urbano chinês, também relatam aumento na concentração de parâmetros associados à eutrofização no verão do ano

modelado, podendo estar relacionados ao aumento no TR do reservatório. Ainda nesse contexto, Jones *et al.* (2005) relatam mudanças nas florações de cianobactérias apenas com alterações no tempo de residência de um pequeno lago.

A Figura 5 apresenta o comparativo entre os tempos de residência modelados para superfície, fundo e média geral para o ASA e o TR medido, este calculado com os dados de Araújo (2016) utilizando-se a aproximação de mistura completa para o referido lago. Ao serem analisadas as séries temporais, é observado que os valores de TR para o fundo do reservatório são maiores que os dados para a superfície nos períodos secos, notadamente ao final do ano. É esperada uma diferença entre o TR da superfície e do fundo do corpo hídrico, como evidenciado por Du, Shen (2016), conforme mostrado na Figura 6. Tal cenário confirma que a hipótese de mistura completa representa relativamente bem as tendências observadas para o ASA.

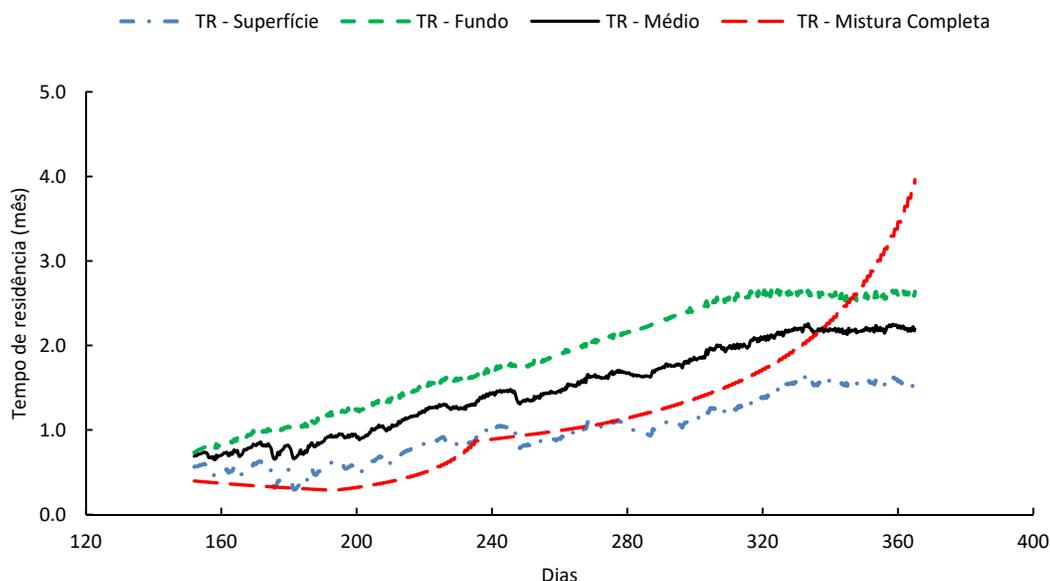


Figura 5. Comparativo de séries temporais dos tempos de residência modelados com o CE-QUAL-W2 e calculados considerando a hipótese de mistura completa para o ASA.

Ainda observando a Figura 5, verifica-se que o resultado do modelo representa bem a tendência calculada a partir de dados medidos por Araújo (2016), sendo os valores simulados com o CE-QUAL-W2 para a superfície do reservatório menores que os medidos considerando o modelo de mistura completa, para períodos secos. Esta situação é esperada, visto que, no referido período, existe uma leve estratificação do reservatório, como previamente discutido.

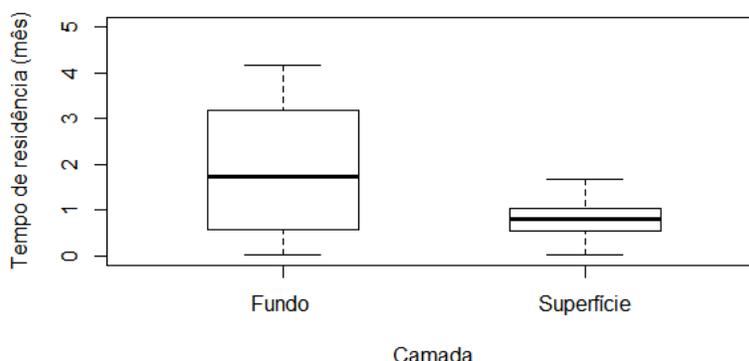


Figura 6. Comparação do TR modelado para o fundo e a superfície do ASA.

Laspidou *et al.* (2017) evidenciam a importância das ações antrópicas na dinâmica de um corpo hídrico, ao analisar um lago raso no Mediterrâneo. Neste estudo de caso, por não existir fluxo de saída do lago e, em épocas de secas, também ser pequeno o fluxo afluente, o TR do reservatório estudado tende ao infinito, sabendo-se que este é inversamente proporcional à vazão. Este cenário confirma a coerência dos resultados obtidos para o ASA, o qual, embora tenha uma vazão de saída controlada, em períodos de seca possui uma queda notória na sua afluência, causando um aumento considerável em seu TR. Birch & McCaskie (1999) relatam a diferente dinâmica dos lagos urbanos, como o ASA, e as dificuldades para estes serem geridos, tendo em vista o maior contato humano com essa categoria de corpos hídricos. Tal cenário pode ser observado para o ASA, sabendo-se da constante afluência de esgotos advindos de ligações clandestinas nas galerias de drenagem que levam ao açude (Araújo, 2016).

Finalmente, apresenta-se a Figura 7, a qual retrata os valores do coeficiente de decaimento de fósforo (K) para as diferentes situações em estudo. Como K é calculado em função do TR [$K \text{ (ano}^{-1}) = 4 \cdot \text{TR(ano)}^{-0.5}$], como proposto por Toné (2016) e validado por Araújo (2016), é observado que as tendências são proporcionais às discutidas para esse. É interessante destacar que, para o início do período analisado, os valores medidos de K são notadamente mais distantes dos modelados do que para os meses finais, situação inversa ao cenário observado para o TR. É notório que os valores de K para o período chuvoso são consideravelmente maiores que para o período seco. Tal situação foi também relatada por Bao *et al.* (2018), embora este estudo tenha sido realizado em um rio urbano.

Dessa forma, ressalta-se que, como elencado por Dunalska *et al.* (2015) em estudo avaliando a recuperação da qualidade das águas de lagos urbanos, para que uma medida de intervenção seja de fato eficiente, é necessário, também, diminuir consideravelmente o aporte de nutrientes ao reservatório. No caso do ASA, é imprescindível que sejam tomadas medidas para ampliar o acesso

da população ao sistema de esgotamento sanitário adequado, objetivando uma notória diminuição de carga afluyente, para então serem reavaliados os parâmetros hidrodinâmicos em conjunto com indicadores de qualidade das águas.

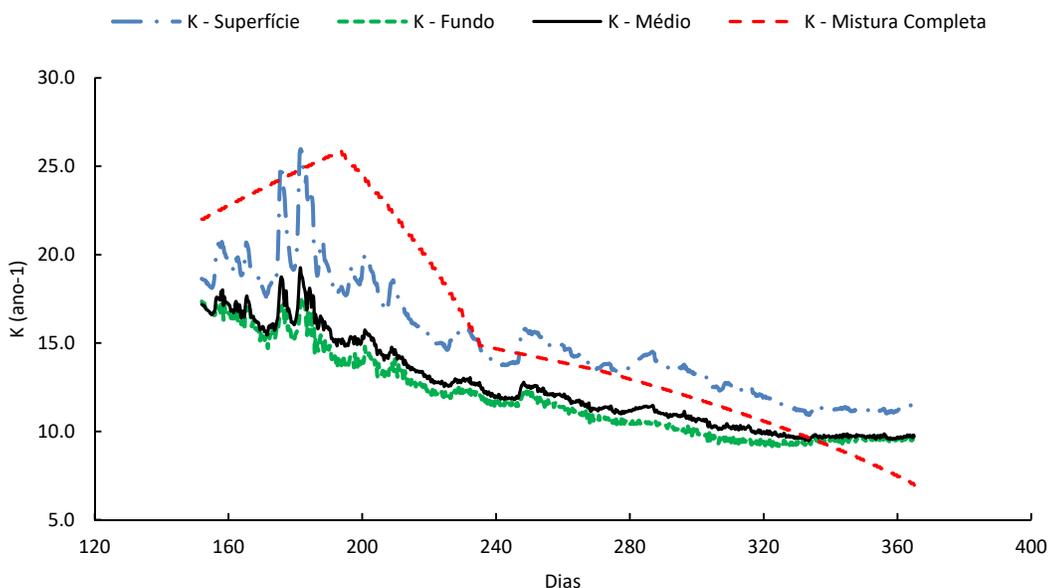


Figura 7. Comparativo de séries temporais dos coeficientes de decaimento do fósforo calculados considerando os resultados simulados e estimados a partir da hipótese de mistura completa para o ASA.

Conclusões

Este estudo analisou a hidrodinâmica do açude Santo Anastácio, lago urbano hipereutrófico, localizado em Fortaleza/CE; utilizando o modelo 2D CE-QUAL-W2. Através da análise dos resultados, pode-se concluir que a sazonalidade influencia o comportamento do lago, visto que foi observada uma leve estratificação térmica no período seco do ano estudado e uma maior homogeneidade no ciclo chuvoso, justificada pelas altas temperaturas, baixos índices pluviométricos e baixa vazão afluyente advinda do canal de drenagem, enquanto para o período úmido relatou-se um reservatório bem homogêneo. Além disso, observou-se que, devido à maior afluência ao reservatório, no período de alta vazão a velocidade horizontal analisada teve valores superiores aos obtidos no período de baixa vazão, com uma diferença de 150%. Esse cenário de leve estratificação ao final do ano foi observado também para o tempo de residência, visto que ao final do ano foram notados máximos de até 80 dias nas zonas mortas e até oito dias na região central do ASA, enquanto no início do ano, caracterizado historicamente por ter maiores precipitações, o modelo apresentou o reservatório homogêneo. Nesse contexto, ao serem

comparadas as séries temporais do TR para a superfície e o fundo do reservatório, foi observado que o último obteve valores maiores que o primeiro, principalmente no período chuvoso, situação que confirma a hipótese de mistura completa como uma boa aproximação para o ASA. Também foram comparados o TR médio modelado com o TR mistura completa, sendo mostrado que, no período seco, os valores calculados utilizando a hipótese de mistura completa foram maiores que os modelados. Finalmente, o corpo hídrico em estudo apontou valores para o coeficiente de decaimento do fósforo notadamente superiores no período chuvoso. Dessa forma, apesar da influência da sazonalidade sobre as forçantes hidrodinâmicas e, conseqüentemente, sobre o tempo de residência, o modelo simplificado aplicado (Toné, 2016) se apresentou como uma boa alternativa para o ASA, tendo em vista a representatividade das tendências modeladas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro para realização da presente pesquisa (PROEX 20/2016) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo financiamento de bolsa concedida à primeira autora.

Referências bibliográficas

- Araújo, G. M. (2016) *Análise e modelagem integrada da qualidade da água em um sistema urbano canal-reservatório eutrofizado, localizado em Fortaleza/CE*, Tese de Doutorado, Programa de pós graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 216 pp.
- Araújo, G.M., Lima Neto, I.E., Becker, H. (2016) Estado trófico em reservatório urbano raso - estudo de caso: açude Santo Anastácio, Fortaleza (CE) *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, **2**(9), 212-228.
- Araújo, G. M., Lima Neto, I. E. (2019) Removal of organic matter in stormwater ponds: a plug-flow model generalisation from waste stabilisation ponds to shallow rivers. *Urban Water Journal*, **15**(9), 918-924. doi: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1581231>
- Araújo, G. M., Lima Neto, I. E., Becker, H. (2019) Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **91**, 1-8, 2019.
- Bao, L., Li, X., Cheng, P. (2018) Phosphorus retention along a typical urban landscape river with a series of rubber dams. *Journal of Environmental Management*, **228**, 55-64.
- Birch, S., McCASKIE, J. (1999) Shallow urban lakes: a challenge for lake management. *Hydrobiologia*, **395**(2), 365-377.
- Bouvy, M., Molica, R., De Oliveira, S., Marinho, M., Beker, B. (1999) Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a large shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. *Aquatic Microbial Ecology*, **20**, 285-297.
- Brasil, Presidência da República Casa Civil (1997) *Lei Federal nº 9.433 - Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos*, Publicação Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília – DF, 09 de janeiro de 1997. Acesso em 27 de outubro de 2018, disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm

- Calmon, A. P. S., Souza, J. C., Dos Reis, J. A. T., Mendonça, A. S. F. (2016) Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **1**(1), 118-133.
- Campos, J. N. B., Rabelo, U. P., Lima Neto, I. E. (2020) The Bell-Shaped Unit Hydrograph for Overland Planes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **146**, 06020001.
- Collischonn, W., Dornelles, F. (2013) Hidrologia para Engenharias e Ciências Ambientais. Associação Brasileira de Recursos Hídricos Porto Alegre, 350 pp.
- Coveney, M. F., Lowe, E. F., Battoe, L. E., Marzolf, E. R., Conrow, R. (2005) Response of a eutrophic, shallow subtropical lake to reduced nutrient loading. *Freshwater Biology*, **50**, 1718-1730.
- Dantas, E. W., Moura, A. N., Bittencourt-Oliveira, M. C. (2011) Cyanobacterial blooms in stratified and destratified eutrophic reservoirs in semi-arid regions of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **83**(4), 1327-1338.
- De Souza Filho, F. de A., Campos, J. N. B., de Aquino, S. H. S. (2013) Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido. Universidade Federal do Ceará, 646 pp.
- Debele, B., Srinivasan, R., Parlange, J.-Y. (2008) Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. *Environ Model Assess*, **13**, 135-153.
- Deliman, P. N., Gerald, J. A. (2002) Application of the Two-Dimensional Hydrothermal and Water Quality Model, CE-QUAL-W2, to the Chesapeake Bay – Conowingo Reservoir. *Lake and Reservoir Management*, **18**(1), 10-19.
- Du, J., Shen, J. (2016) Water residence time in Chesapeake Bay for 1980-2012. *Journal of Marine Systems*, **164**, 101-111.
- Dunalska, J. A., Grochowska, J., Wisniewski, G., Napiórkowska-Krzebietke, A. (2015) Can we restore badly degraded urban lakes? *Ecological Engineering*, **82**, 432-441.
- Feng, T., Wang, C., Wang, P., Qian, P., Wang, X. (2018) How physiological and physical processes contribute to the phenology of cyanobacterial blooms in large shallow lakes: A new Euler-Lagrangian coupled model. *Water Research*, **149**, 34-43.
- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E. (2016) Curvas de permanência de qualidade de água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **21**(3), 479-492.
- Fraga, R. F., Rocha, S. M. G., Lima Neto, I. E. (2020) Impact of flow conditions on coliform dynamics in an urban lake in the Brazilian semiarid. *Urban Water Journal*, **17**, 43-53.
- FUNCEME, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2017) Desenvolvimento de uma Metodologia de Modelagem de Qualidade de Água para os Reservatórios do Estado do Ceará. Relatório 4 – Avaliação da Metodologia/Estratégia Proposta, 110 pp.
- Huang, Y. T., Liu, L. (2008) A hybrid perturbation and morris approach for identifying sensitive parameters in surface water quality models. *Journal Of Environmental Informatics*, 150-159.
- Jones, I. D., Elliott, J. A. (2007) Modelling the effects of changing retention time on abundance and composition of phytoplankton species in a small lake. *Freshwater Biology*, **52**, 988-997.
- Köiv, T., Nõges, T., Laas, A. (2011) Phosphorus retention as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative Depth in 54 lakes and reservoirs. *Hydrobiologia*, **660**, 105-115.
- Laspidou, C., Kofinas, D., Mellios, N., Latinopoulos, D., Papadimitriou, T. (2017) Investigation of factors affecting the trophic state of a shallow Mediterranean reconstructed lake. *Ecological Engineering*, **103**, 154-163.
- Li-Kun, Y., Sen, P., Xin-Hua, Z., Xia, L. (2017) Development of a two dimensional eutrophication model in an urban lake (China) and the application of uncertainty analysis. *Ecological Modeling*, **345**, 63-74.
- Lima, F. P. (2011) Avaliação do Processo de Assoreamento do Açude Santo Anastácio – Fortaleza/CE e sua Influência no Ecossistema Local. Monografia (graduação), Universidade Federal do Ceará, curso de Engenharia de Pesca.

- Lira, C. C. S., Medeiros, P. H. A., Lima Neto, I. E. (2020) Modelling the impact of sediment management on the trophic state of a tropical reservoir with high water storage variations. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **92**, p. e20181169.
- Londe, L. R., Novo, E. M. L. M., Barbosa, C., Araujo, C. A. S. (2016) Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoir (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images. *Brazilian Journal of Biology*, **76**(3), 664-672.
- Mahanty, M. M., Mohanty, P. K., Pattnaik, A. K., Panda, U. S., Pradhan, S., Samal, R. N. (2016) Hydrodynamics, temperature/salinity variability and residence time in the Chilika lagoon during dry and wet period: Measurement and modeling. *Continental Shelf Research*, **125**, 28-43.
- Mesquita, J. B. F., Pereira, S. P., Lima Neto, I. E. (2020) Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na vertente marítima de Fortaleza, Ceará. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, **25**, 205-216.
- Moura, D. S., Lima Neto, I. E., Clemente, A., Oliveira, S., Pestana, C. J., Melo, M. A., Capelo-Neto, J. (2019) Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. *Chemosphere*, **246**, p. 125686.
- Pacheco, C. H. A., Ceballos, B. S. O., Lima Neto, I. E. (2016) Uma análise de regressão para determinação do nível de eutrofização de um reservatório do semiárido brasileiro. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, Desarrollo y Práctica*, **9**(2), 274-289.
- Pacheco, C. H. A., Lima Neto, I. E. (2017) Effect of Artificial Circulation on the Removal Kinetics of Cyanobacteria in a Hypereutrophic Shallow Lake. *Journal of Environmental Engineering*. **143**(12) [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0001289](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001289)
- Salas, H., Martino, P. (1991) A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. *Water Research*, **25**(3), 341-350.
- Song, Y., Zhang, L., Li, J., Chen, M., Zhang, Y. (2018) Mechanism of the influence of hydrodynamics on *Microcystis aeruginosa*, a dominant Bloom species in reservoirs. *Science of the Total Environment*, **636**, 230-239.
- Teixeira, E. C., Chacaltana, J. T. A., Siqueira, R. N., Pacheco, C. G. (2007) Proposta de calibração de modelos hidrodinâmicos aplicados a unidades de contato utilizando uma função de distribuição de tempos de residência. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **12**(1), 79-89.
- Toné, A. J. A. (2016) *Análise e modelagem de fósforo em reservatórios localizados em regiões semiáridas*. Dissertação de mestrado, Programa de pós graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 168 pp.
- 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, M. (2007) *Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios*, v.7, Editora UFMG, Belo Horizonte, 588 pp.
- Wells, S. A., Cole, T. M., Berger, C., Annear, R., Gould, S., Buchak, E., Goodwin, A. (2017) Appendix A Hydrodynamics and Transport. In Cole, T. M., Wells, S. A. (Eds.), *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 4.1*, Portland State University, Portland, A-1-A-5.
- Wiegand, M. C., Piedra, J. I. G., de Araújo, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil) *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **21**(2), 415-424.
- Yang, Z., Xu, P., Liu, D., Ma, J., Ji, D., Cui, Y. (2018) Hydrodynamic mechanisms underlying algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir. *Ecological Engineering*, **120**, 6-13.