OPEN JOURNAL SYSTEMS
ISSN:2237-2202

Available on line at Directory of Open Access Journals
Journal of Hyperspectral Remote Sensing v.10, n.3 (2020) 168-178

www.periodicos.ufpe.br/revistas/jhrs

Journal of Hyperspectral Remote Sensing
www.ufpe.br/jhrs

Analysis of water parameters by remote sensing for aquaculture in reservoirs

Rodolfo K. H. Sonnenberg[*], Eduardo O. Santinelli[*], Erik de L. Andrade[**], Vanessa C. Simonetti[**], Darllan C. da C. e Silva[***]

[*]Engenheiros de Pesca pela Universidade Estadual Paulista (Unesp). Registro, SP, Brazil. Email: rosonnenberg@gmail.com; du.omena@gmail.com
**Doutorando pela Unesp. Sorocaba, SP, Brazil. Email: eng.erik@hotmail.com; va_simonetti@hotmail.com
***Professor da Unesp. Registro, SP, Brazil. Email: darllan.collins@unesp.br (Corresponding author)

Received 29 September 2020; accepted 17 December 2020

Abstract

The use of remote sensing tools in the aquaculture sector assists in the monitoring and implementation of new production areas providing better growth and comfort of aquatic organisms produced. Therefore, the present study aims to analyse surface water temperature data, Total Nitrogen (TN), Trophic State Index (TSI), and Biochemical Oxygen Demand (BOD) from Landsat 8 Satellite image to identify the regions of the Promissão reservoir (São Paulo State, Brazil), appropriate for the installation of enterprises of the tilapiculture in-network tanks. For this, the images corresponding to the dry and rainy season of the years 2014 to 2019 were analysed supported by a Geographic Information System (GIS). Results indicated favorable temperatures for production in the arms near the dam with low TN and BOD values. However, the TSI showed a hypereutrophic potential in both seasons. It is concluded that the greatest potential for implementing aquaculture areas in the reservoir is in the arms next to the dam where the thermal amplitude is more stable, and the eutrophication and water quality indicators have more adequate levels.
Keywords: geographic information system, tilapiculture, water quality, digital image processing.

Análise de parâmetros da água por sensoriamento remoto para fins de aquicultura em reservatórios

Resumo

A utilização de ferramentas de sensoriamento remoto no setor aquícola auxilia no monitoramento e implementação de novas áreas de produção, propiciando um melhor crescimento e conforto dos organismos aquáticos produzidos. Por essa razão, o presente estudo tem como objetivo analisar dados de temperatura superficial da água, Nitrogênio Total (NT), Índice de Estado Trófico (IET) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) a partir do processamento de imagens do Satélite Landsat 8 para identificar as regiões do reservatório de Promissão (São Paulo, Brasil), propícias à instalação de empreendimentos de tilapicultura em tanques-rede. Para isso, foram analisadas as imagens correspondentes a estação seca e chuvosa dos anos de 2014 a 2019 com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados indicaram temperaturas propícias para produção nos braços próximos da barragem, com baixos valores NT e DBO; entretanto, o IET apresentou um potencial hipereutrófico em ambas as estações. Conclui-se que o maior potencial de implementação de áreas aquícolas no reservatório se encontra nos braços próximos à barragem, onde a amplitude térmica é mais estável e os indicadores de eutrofização e qualidade da água possuem níveis mais adequados.
Palavras-chave: sistema de informação geográfica, tilapicultura, qualidade da água, processamento digital de imagens.

1. Introdução

O polo produtivo paulista da Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticos*) concentra-se no reservatório de Ilha Solteira, situado no Oeste do Estado de São Paulo, sendo realizado principalmente em estruturas de tanques rede, na camada superficial da água, trazendo consigo desafios econômicos e ambientais (Orlandi Neto et al., 2019). Neste modelo produtivo, o arraçoamento e as altas densidades de estocagem interferem no ambiente gerando aumento de nitrogênio e fósforo, tanto pela decomposição dos excedentes de ração quanto pelas excretas dos peixes (El-Zeiny; El-Kafrawy, 2017; Ren et al., 2018).

Nesse sentido, a alta concentração de compostos eutrofizantes podem trazer condições letais ou subletais aos organismos produzidos, principalmente quando estes são peixes nativos, inibindo o crescimento e debilitando a imunidade dos organismos em cativeiro (Zhou et al., 2019). Isto

corrobora com a importância da avaliação do local de cultivo, a fim de minimizar os riscos e evitar perdas financeiras ao negócio.

O conhecimento prévio dos parâmetros ambientais ajuda na avaliação da capacidade de suporte ambiental antes da implantação de um empreendimento aquícola. Ambientes eutróficos propiciam a floração desenfreada de cianobactérias e, consequentemente, a morte em massa de peixes (Cardoso, 2014). Nesse sentido, a toxina produzida por estas bactérias pode se acumular a níveis considerados impróprios para o consumo humano (Beghelli et al., 2016).

Ressalta-se que os organismos apresentam diferentes níveis de tolerância a estes parâmetros. A Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), por exemplo, é bem mais resistente a amônia, significativo parâmetro químico de poluição, que outras espécies neotropicais; no entanto, a exposição a baixas temperaturas pode causar disfunção renal e regular negativamente a via imunológica no rim da tilápia (Zhou et al., 2019). Deste modo, se faz necessário conhecer o ambiente antes do início do cultivo.

Com base em Oostlander et al. (2020), a temperatura da água é considerada uma das variáveis ambientais mais importantes por afetar diretamente o metabolismo e, consequentemente, o consumo de oxigênio, o crescimento e a sobrevivência dos organismos aquáticos. Portanto, sem o conhecimento da qualidade da água e o controle da alimentação, o desenvolvimento do setor aquícola não seria possível.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) apresenta as práticas de maior fidedignidade em amostragens de corpos hídricos, porém, muitas vezes o processo é lento e oneroso (Cetesb, 2011). Apesar disso, a realização de amostragens dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água são de extrema importância à pesquisa científica e à avaliação de riscos e impactos ambientais (Souza et al., 2014; Nery et al., 2020).

Paralelo a isso, tem-se os avanços das tecnologias na área do Sensoriamento Remoto (SR), onde as melhorias na resolução de imagens de satélite possibilitaram a observação de informações sobre as interações entre as ondas de radiação eletromagnéticas (REM) e a superfície (Coliado et al., 2020; Lourenço et al., 2015). Segundo Silva et al. (2020), inferências sobre a temperatura aparente da superfície terrestre podem ser feitas observando a REM refletida pelo ambiente e capturada por imagens de satélite.

Além da facilidade e disponibilização gratuita de imagens de alguns satélites, a utilização desses dados tem se tornado cada vez mais frequente, pois é crescente a quantidade de registros históricos disponíveis para que sejam realizadas análises temporais. Este fato é imprescindível para que possam ser realizadas análises temporais sem a necessidade de coletas de dados *in situ* (Meira et al., 2016; Sales et al., 2017; Silva et al., 2017).

Coelho e Corrêa (2013) desenvolveram em seu estudo metodologias de avaliação da temperatura superficial utilizando o sensor TIRS do Landsat para a elaboração de perfis térmicos da superfície de corpos hídricos obtendo alta precisão. Além da temperatura superficial da água, as imagens de satélite podem trazer informações importantes de parâmetros de qualidade da água, como mostrado por El-Zeiny e El-Kafrawy (2017) que estimaram os níveis de Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (FT) e Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) em corpos hídricos.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a Temperatura Superficial da Água (TSA), Nitrogênio Total (NT), Índice de Estado Trófico (IET) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) por meio de sensoriamento remoto, a fim de observar o potencial aquícola do reservatório de Promissão, no interior do Estado de São Paulo, para a produção de Tilápias do Nilo em tanque rede.

2. Material e métodos

Área de estudo

O reservatório de Promissão, está inserido na bacia hidrográfica Tietê-Batalha, no centro oeste do Estado de São Paulo (Figura 1). Faz parte do sistema de cascata constituído pelo represamento do rio Tietê ao longo do Estado, possuindo uma extensão de 110 km e profundidade média de 20 m (AES Tietê, 2020). O reservatório foi formado com a construção da usina hidrelétrica Mario Lopes Leão e entrou em funcionamento em 1975, com potência de 264 MW e volume útil de 2,13 km³ (Maia e Villela, 2010).

Segundo Cardoso (2014), essa região tem um regime pluviométrico tropical, caracterizado por um inverno seco e um verão quente e chuvoso do tipo Cwa pela classificação de Köppen.

Apesar da carga de poluentes e população fitoplanctônica predominantemente de cianobactérias, este trecho do rio Tietê apresenta classificação ótima para a qualidade e proteção a vida aquática, estando enquadrado na classe 2 de uso para águas doces, conforme a resolução Conama 357/2005 (Brasil, 2005; Cetesb, 2018).

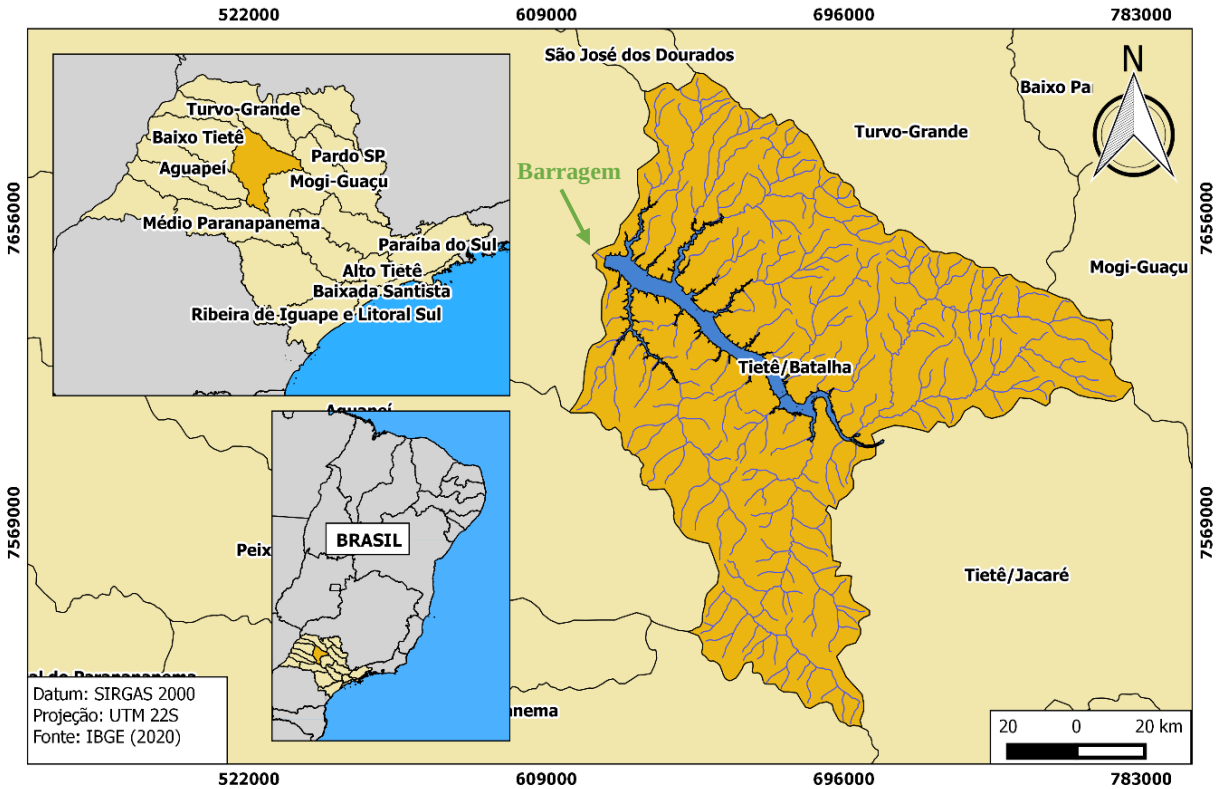

Figura 1 - Localização do reservatório de Promissão no Estado de São Paulo. Fonte: Elaborado pelos autores.

Procedimento metodológico

Os conjuntos de imagens analisadas correspondem a estação seca e chuvosa dos anos de 2014 a 2019, sendo obtidas através da agência *United States Geological Survey* (USGS). Foram selecionadas as imagens orbitais do satélite Landsat 8 na órbita 221 e ponto 75. O pacote de imagens baixado contava com 10 bandas espectrais. Destas, foram selecionadas as seguintes: B2, B3, B4, B5 com resolução espacial de 30 metros e B10 com resolução espacial de 100 metros, correspondendo, respectivamente, as faixas de REM do visível azul (0,45 – 0,51 µm), visível verde (0,53 – 0,59 µm), visível vermelho (0,64 – 0,67 µm), infravermelho próximo (0,85 – 0,88 µm) e infravermelho termal (10,6 – 11,19 µm).

Todas as imagens passaram por processamento, sendo georreferenciadas para o sistema de projeção UTM (*Universal Transverse of Mercator*) e Datum SIRGAS 2000.

A fim de obter os limites do reservatório, foi gerada uma composição falsa cor, com as bandas (B5), (B4) e (B3). A composição então, passou por uma classificação supervisionada pelo método da mínima distância no *software* QGIS versão 2.4.0, utilizando o *Semi Automatic Classification Plugin* (SACP). Em seguida, foi possível extrair uma camada máscara com o limite do reservatório através da conversão do arquivo *raster* gerado para um arquivo vetorial.

Análise da temperatura superficial do reservatório

Para obter a temperatura da superfície do reservatório em graus Celsius (ºC) foi utilizada a imagem do infravermelho termal (B10) e o complemento SACP. A organização e tratamento do arquivo *raster* iniciou-se com o recorte da imagem seguido do uso dos parâmetros fixos de conversão de níveis de cinza da imagem (NC) para radiância fundamentada pela equação (1) (Coelho e Corrêa, 2013).

$$L\lambda = ML * Qcal + AL \qquad (1)$$

Sendo, Lλ a radiância espectral do sensor de abertura em Watts.m^{-2}.sr^{-1}.µm^{-1}; ML o fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10, igual a 3,3420.10^{-04}; AL o fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10, igual a 0,10000; Qcal o fator quantizado calibrado pelo pixel em níveis digitais, igual a imagem B10.

A transformação dos valores de radiância para temperatura em Kelvin foram fundamentadas na Equação (2) (Coelho e Correa, 2013).

$$T = \frac{K2}{ln(\frac{K1}{L\lambda}+1)} \qquad (2)$$

Sendo, T a temperatura efetiva no satélite em Kelvin (K); K1 a constante de calibração 2, igual a 1.321,08 (K); K2 a constante de calibração 1, igual a

774,89 (K); Lλ a radiância espectral em Watts.m^{-2}.sr^{-1}.μm^{-1}.

Os valores de temperatura Kelvin foram subtraídos pelo seu valor absoluto (273,15), gerando, assim, o *raster* de temperatura de superfície do reservatório em graus Celsius (°C). Com isto, foi possível elaborar os mapas térmicos e compilar os dados, ano a ano, das temperaturas máximas, mínimas e médias em gráficos por sazonalidade em período seco e chuvoso entre os anos de 2014 a 2018.

Para os períodos chuvoso e seco foram realizados o cálculo médio da temperatura superficial do reservatório entre os anos de 2014 a 2018 por meio de uma operação algébrica de mapas do tipo média zonal, onde o valor produzido em todas as localizações que compõem uma região, é igual à média aritmética dos valores da variável geográfica nas mesmas localizações do mapa de origem (Silva et al., 2020).

Com base nos estudos de Kubitza (2000) foram obtidas as faixas de temperatura para o processo de classificação das áreas do reservatório propícias à criação de Tilápia do Nilo. Para isso, utilizou-se os mapas com a temperatura média para o período seco e chuvoso os quais foram reclassificados conforme a Tabela 1, com o auxílio da ferramenta *r.reclass* do *software* QGIS 2.4.0.

Tabela 1 - Classificação do conforto térmico por faixa de temperatura.

Faixa de temperatura (°C)	Descrição do crescimento
08 até 14	Não sobrevive
20 até 14	Condição inadequada para o crescimento
20 até 25	Condição adequada para o crescimento
26 até 30	Condição ótima para o crescimento
30 até 32	Condição adequada para o crescimento

Fonte: Adaptado de Kubitza, 2000.

Avaliação de IET, DBO e NT

Para avaliar a distribuição espacial de IET, NT e DBO ao longo do reservatório foram utilizadas as imagens B2 e B3 relativas ao período seco e chuvoso de 2019. O processamento das imagens foi embasado em fórmulas descritas por Wang e Ma (2001) para os dados do sensor TM do Landsat 5 e comprovadas, posteriormente, por El-Zeiny e El-Kafrawy (2017) como eficazes para os dados do sensor OLI do Landsat 8.

Para o cálculo do IET foi utilizada a Equação (3) para obter o valor PT, expresso em mg.L^{-1} (El-Zeiny e El-Kafrawy, 2017).

$$PT = e^{(-0{,}4081-8{,}659*\ln(B3/B2))} \quad (3)$$

Os planos de informações contendo a distribuição espacial de PT foram então convertidos de mg.L^{-1} para μg.L^{-1}, e enfim processados por álgebra de mapas através da Equação (4), utilizada pela Cetesb (2018), para estimar o potencial de eutrofização de reservatórios pelo IET, em decorrência dos valores de PT.

$$IET\ (PT) = 10 * (6 - (1{,}77 - 0{,}42 * (\frac{ln\ PT}{ln\ 2}))) \quad (4)$$

A ferramenta *r.reclass* foi utilizada nos planos de informações processados do período seco e chuvoso para avaliar o potencial eutrofizador das áreas ao longo do reservatório pela classificação exibida na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do estado trófico pelo índice IET.

Faixa de IET	Classe de estado trófico
até 47	Ultraoligotrófico
47 a 52	Oligotrófico
52 a 59	Mesotrófico
59 a 63	Eutrófico
63 a 67	Supereutrófico
mais de 67	Hipertrófico

Fonte: Adaptado de Cetesb, 2018.

Os planos de informações apresentando o perfil de DBO foram calculados através da Equação (5), tendo seus valores finais apresentados em mg.L^{-1} (El-Zeiny e El-Kafrawy, 2017).

$$DBO = e^{(4,2380+2,2546*\ln(\frac{B2-B3}{B2}))} \qquad (5)$$

Em seguida, foram classificados de acordo com a resolução nº 357/2005 (Brasil, 2005) conforme apresentado na Tabela 3, buscando identificar as partes do reservatório que se enquadram para atividade de aquicultura.

Tabela 3 - Classificação dos corpos de água doce em relação ao DBO com base na resolução CONAMA n° 357/2005.

Concentração de DBO em mg.L^{-1}	**Classificação do corpo hídrico**
até 5	classe 2
até 10	classe 3

Fonte: Adaptado de CONAMA n° 357/2005 (Brasil, 2005).

Os planos de informação relativos ao NT foram calculados através da Equação (6) para ambos os períodos, tendo seus valores finais apresentados em mg.L^{-1}.

$$NT = e^{(8,228-2,713*\ln(B2+B3))} \qquad (6)$$

Em seguida, os planos gerados foram submetidos a ferramenta *r.reclass* e classificados de acordo com as disposições da resolução nº 357/2005 (Brasil, 2005) onde águas doces de classe 1 e 2 não podem ter valores de nitrogênio superiores a 1,27 mg.L^{-1}.

3. Resultados e discussão

Não foi possível localizar imagens referentes a estação chuvosa de 2014 através do sistema Landsat 8. A resolução temporal de 16 dias, somada a pluviosidade característica da região durante o período, impossibilitou encontrar uma imagem com ausência de nuvem sobre o reservatório. Apesar disso, a diminuição do número de amostras não interferiu na amplitude dos dados, visto que os outros anos analisados apresentaram temperaturas próximas.

A partir dos dados de temperatura foi gerada a Figura 2 contendo os valores de temperatura máxima, mínima e média para os períodos seco e chuvoso.

De acordo com a Figura 2-A (período chuvoso) foi possível verificar que os valores de T Max se mantiveram próximos dos 30ºC ao longo dos anos avaliados, atingindo 30,2ºC no ano de 2017. Os valores de T Med e T Min foram muito próximos nos anos de 2016 e 2017, entretanto, a T Min apresentou uma alta variabilidade de aproximadamente 9°C de 2016 para 2018.

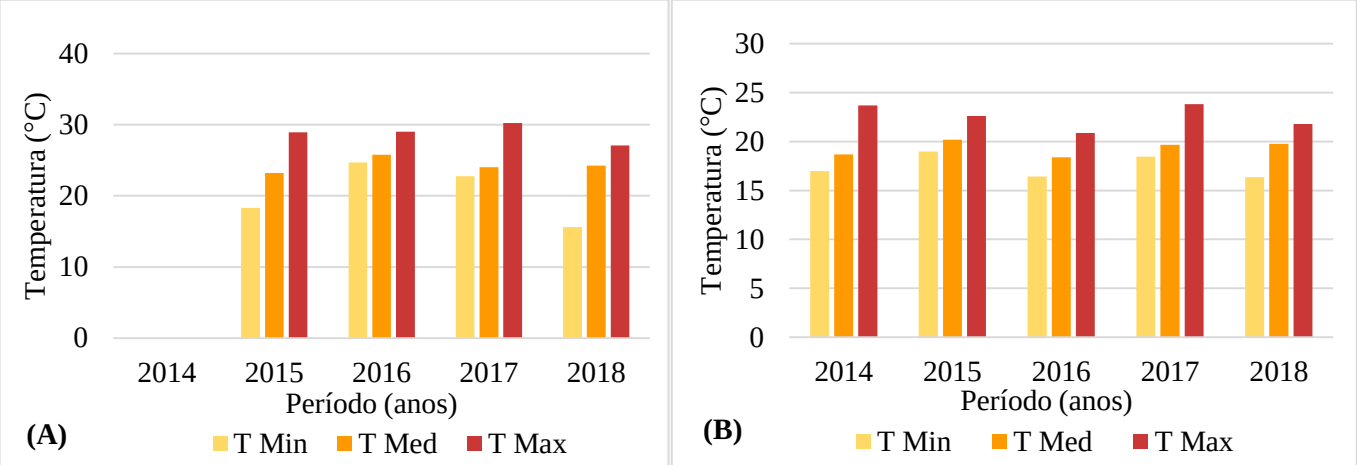

Figura 2 - Temperaturas mínimas (T Min), Temperaturas médias (T Med) e Temperaturas máximas (T Max) da estação Chuvosa (A) e Seca (B).

Durante a estação seca (Figura 2-B), pode-se observar uma queda geral da T Max, ficando abaixo dos 25°C quando comparado ao período chuvoso. Importante ressaltar que as temperaturas, máxima,

mínima e média não apresentaram alta amplitude neste período, com valores de (22,6 ºC), (19,3 ºC) e (17,4 ºC), respectivamente.

A Figura 3 apresenta as variações médias e os respectivos desvios padrões do período de 2014 a 2018 referentes aos períodos seco e chuvoso.

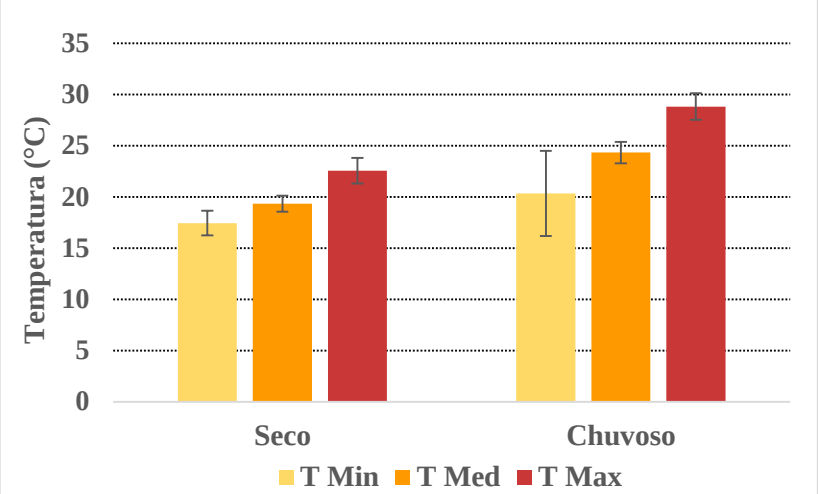

Figura 3 - Médias de T Min, T Med e T Max, para os períodos seco e chuvoso durante o período avaliado.

Através da Figura 3, constatou-se que o período chuvoso mostrou resultados semelhantes nos desvios padrões da média de T Max, com valores de 1,3°C, e T Med (1,06°C), indicando temperaturas mais estáveis durante o período analisado. A média de T Min apresentou valor de 20,3 ºC, entretanto, demonstrou um desvio padrão muito alto, com 4,1°C indicando uma grande variação da temperatura no período analisado.

A estação chuvosa, apesar de ter certa estabilidade térmica, pode sofrer grandes variações em suas regiões mais frias, pelo seu desvio em T Min, o que indica riscos para a atividade aquícola. Organismos aquáticos colocados abaixo da zona de conforto térmico sofrem de estresse pelo frio, associado à sua própria genética, reguladora da aclimatação a temperaturas baixas diárias e sazonais (Nie et al., 2016). Em tilápias, por exemplo, isso pode levar a danos no fígado e a deficiências imunológicas (Zhou et al., 2019).

No período seco não ocorreu uma variação significativa, portanto, pode-se inferir que existe uma estabilidade ao longo dos anos nos períodos mais frios.

A Figura 4 apresenta a distribuição espacial da temperatura média superficial do reservatório para os períodos seco e chuvoso entre os anos de 2014 e 2019.

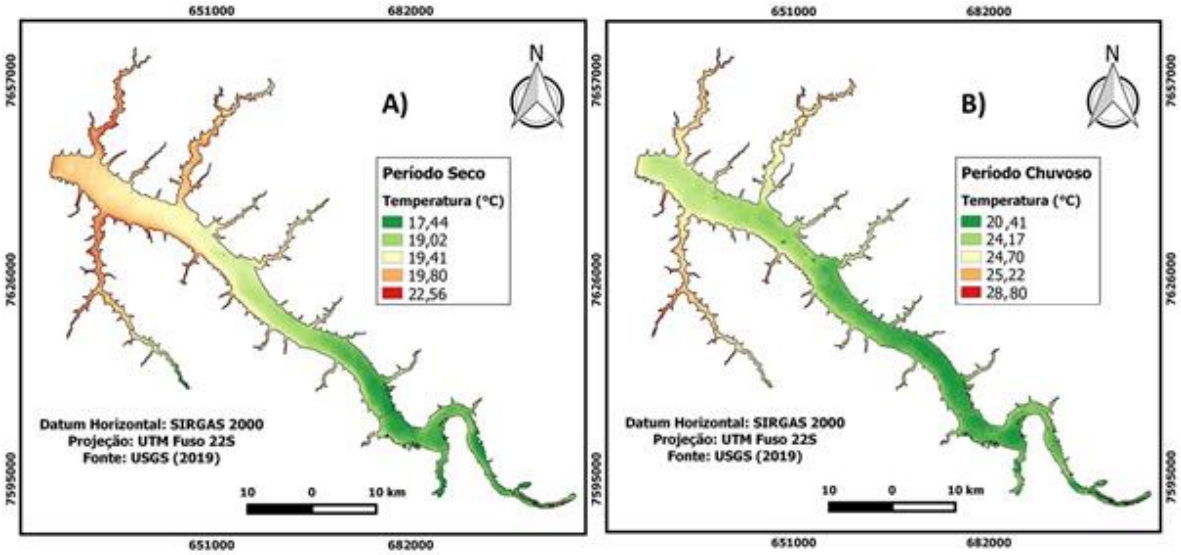

Figura 4 – Distribuição espacial da temperatura média: período seco (A) e período chuvoso (B).

Durante o período seco, representado pela Figura 4-A, é possível observar que as áreas próximas a barragem, bem como os braços da represa próximo desta são mais quentes, com valores próximos a 22,5°C, enquanto as partes mais a montante do reservatório apresentaram as temperaturas mais baixas, com valores próximos a 17,5 °C.

Na Figura 4-B, referente ao período chuvoso, foi possível observar que a temperatura mais elevada se encontra nas áreas próximas a barragem e braços da represa, com aproximadamente 28,8°C, enquanto as mais baixas localizam-se a montante do reservatório, com temperaturas próximas a 20,4°C.

Segundo Simonetti et al. (2019), as taxas de incidência solar nos dois períodos (seco e chuvoso) e a as trocas de calor entre a água e o ar ajudam a explicar os perfis térmicos visualizados. Além disso, foi constatada uma diferença no gradiente espacial da temperatura superficial da água, refletindo o aquecimento das águas rasas e a dificuldade de transferir calor nas partes mais profundas do reservatório, assim como observado no reservatório de Itupararanga, em São Paulo, analisado pelos autores.

Este gradiente de distribuição térmica do corpo d'água provavelmente se dá pela dinâmica de reservatórios. As áreas mais próximas a barragem constituem o ponto mais fundo do sistema e o fluxo de saída de água favorece as camadas médias, e não as camadas superficiais, ao contrário do que se observa em lagos (Melo et al., 2019). Esta camada superficial tende então ao isolamento e acúmulo de calor, principalmente nas épocas mais quentes, se estratificando termicamente do resto do reservatório.

Segundo Frascareli et al. (2015), a estrutura térmica de um reservatório sofre alterações a jusante de represas, causando a diminuição da temperatura e estratificação térmica. Visto que o rio Tietê possui uma série de represas, isto ajuda a explicar as águas mais frias a montante do reservatório. Percebe-se que no inverno, com a menor incidência de radiação solar, a superfície tende a ter uma homogeneidade maior, pois o menor acúmulo de energia permite maior mistura das camadas estratificadas horizontalmente (Yang et al., 2015).

A Figura 5 apresenta a classificação dos mapas de temperatura do período seco e chuvoso em função do conforto térmico para a criação da Tilápia do Nilo durante as duas sazonalidades.

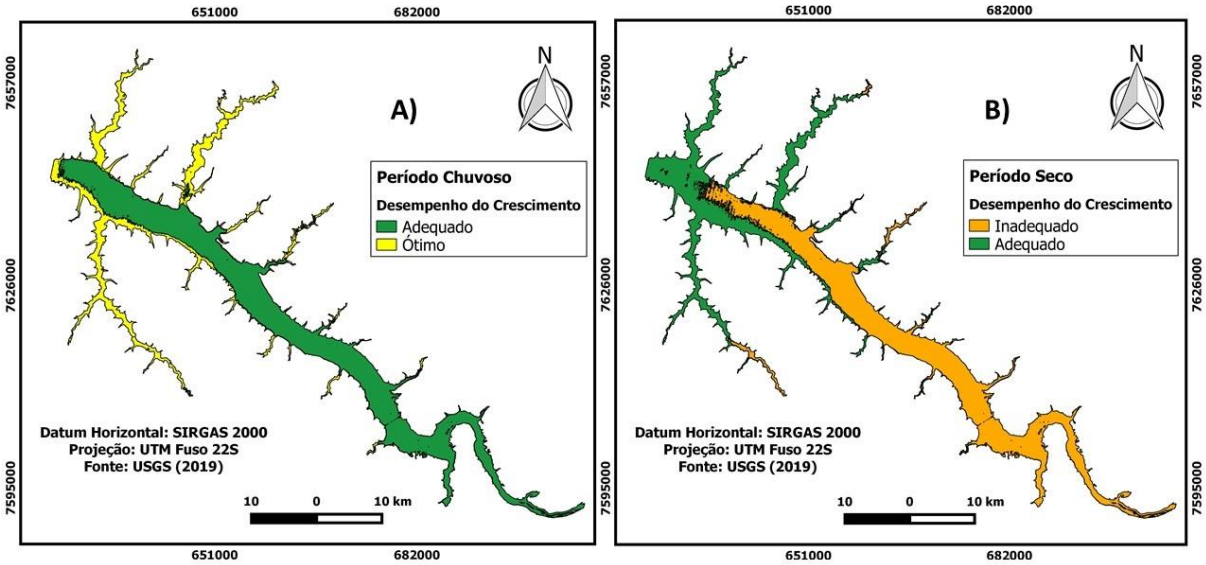

Figura 5 - Distribuição espacial da temperatura no período chuvoso (A) e no período seco (B).

Na Figura 5-A, observou-se uma área de 70,5% com condições adequadas para o crescimento, enquanto 29,5 % apresentaram ótimas condições para o crescimento, mostrando o potencial para a produção aquícola no período. Percebe-se, a partir desta visualização, que toda a área do reservatório possui condições apropriadas para implementação de áreas aquícolas.

A análise das informações contidas na Figura 5-B mostrou que no período seco 38,8% da área apresentava condições adequadas para o crescimento dos animais, sobrepondo a área classificada como ótima na estação chuvosa. No entanto, 61,2% apresentou crescimento inadequado, sobrepondo grande parte da área classificada como adequada na estação chuvosa. Isto demonstra a importância da análise para o planejamento de produção no setor aquícola. Segundo Kubitza (2000), ciclos produtivos de Tilápia do Nilo podem durar de 6 a 8 meses, abrangendo o período seco e chuvoso.

Observa-se que a margem esquerda do reservatório e os braços próximos a barragem

configuram os locais mais seguros, do ponto de vista do conforto térmico, para a implantação da atividade. A amplitude térmica nessas áreas varia, em média, 5°C entre os períodos, causando uma heterogeneidade da classe de temperatura ao longo do ano, entretanto, não atinge a faixa inadequada de temperatura, o que propicia na região um desenvolvimento melhor da atividade ao longo de todo o ano, sendo ótima no verão e adequada no inverno. Além disso, possuem as temperaturas mais estáveis ao longo dos anos avaliados.

Através das análises destes dados foi possível determinar as regiões do reservatório mais propícias à instalação de empreendimentos aquícolas que utilizam tanques-rede, garantindo, assim, maior eficiência produtiva diante de um melhor desempenho zootécnico obtido pelos animais acondicionados nestas regiões do reservatório.

O potencial de eutrofização indicado pelos níveis do IET calculado está apresentado na Figura 6, sendo possível visualizar o padrão espacial de distribuição do IET ao longo do reservatório.

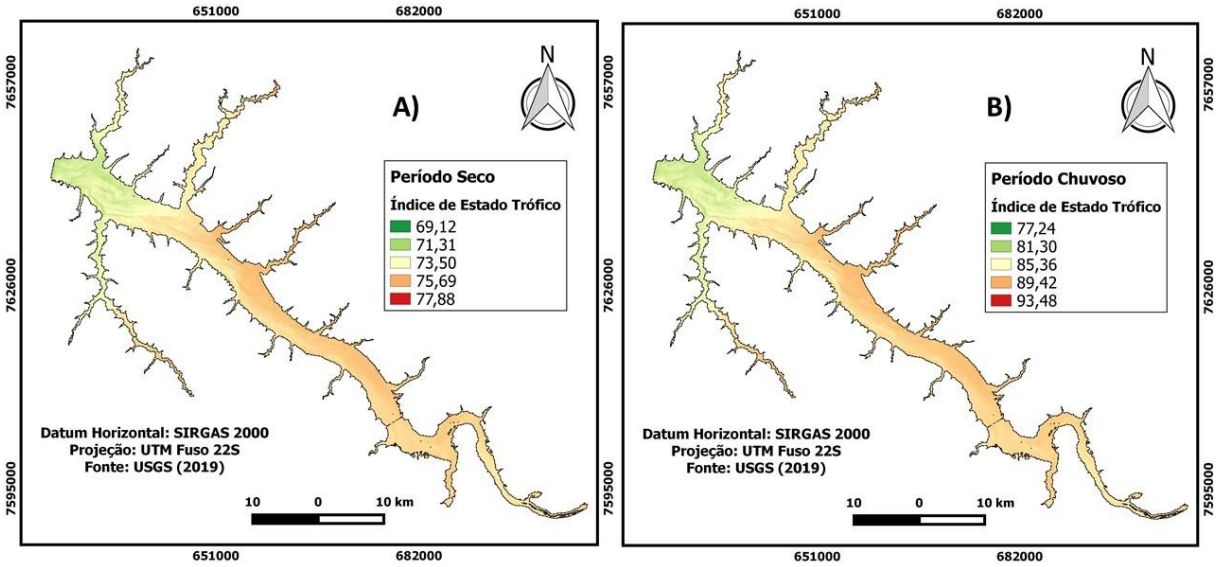

Figura 6 - Distribuição espacial do potencial de eutrofização do reservatório no período seco (A) e no período chuvoso (B).

Durante o período seco o valor mínimo registrado do IET foi de 69,12 e o máximo de 77,88. No o período chuvoso, o valor mínimo registrado foi de 77,24 e o máximo de 93,48. Além do aumento do valor mínimo, o período chuvoso quase dobra em amplitude a variação do IET em relação ao período seco, passando de 8,7 no período seco para 16,24 no período chuvoso, o que mostra um potencial de eutrofização muito maior no verão.

Pode-se inferir que o IET mantém certa consistência ao longo do corpo d'água e, próximo a barragem, sofre uma queda em ambos os períodos. Haja vista que o processo de produção aquícola aumenta a eutrofização do ambiente, o ideal seria selecionar áreas com os menores valores possíveis com o intuito de minimizar as possibilidades de crescimento desenfreado de microalgas.

Os braços do reservatório com maiores dimensões, e consequentemente maior volume de água, apresentaram valores tróficos mais elevados nas extremidades, diminuindo conforme a proximidade ao corpo principal. Segundo Simonetti et al. (2019), o fluxo hídrico atua com menor intensidade nos braços de reservatórios à medida que se distanciam do corpo principal, o que dificulta a troca de água e favorece o acúmulo de nutrientes nestas regiões.

As áreas próximas a barragem e o início dos braços de maior dimensão apresentaram os menores valores em ambos os períodos, configurando as melhores áreas para a implementação de empreendimentos aquícolas. Esta região coincide com os locais mais seguros do ponto de vista do conforto térmico, o que reforça a importância deste tipo de avaliação.

Devido aos valores registrados nos dois períodos, o reservatório foi classificado com potencial de ser hipereutrófico em toda a sua extensão e, por essa razão, não foi necessário realizar uma reclassificação dos mapas para avaliar as diferenças entre as classes de estado trófico do reservatório.

A Figura 7 apresenta a distribuição do NT para o reservatório. É possível observar que durante o verão, houve uma variação de 10^{-9} até 10^{-8} $mg.L^{-1}$, enquanto no inverno as concentrações se mantiveram em 10^{-7} $mg.L^{-1}$. Pode-se inferir que a porção central do reservatório próxima à barragem apresentou as menores concentrações em ambos os períodos. Baixos índices de NT indicam que as formas tóxicas

aos organismos aquáticos também se apresentam em menor quantidade e, segundo Beghelli et al. (2016) e Melo et al. (2019), apesar de ambientes lênticos apresentarem taxas de depuração menores, os altos valores de IET junto aos baixos valores de NT podem indicar o nitrogênio como fator limitante a eutrofização.

As baixas concentrações obtidas para o NT tanto na estação seca quanto na estação chuvosa indicam que o reservatório como um todo se encontra na classe 2.

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) calculada pode ser entendida como o oxigênio necessário aos organismos aquáticos para seus processos fisiológicos, sendo apresentada sua distribuição espacial na Figura 8.

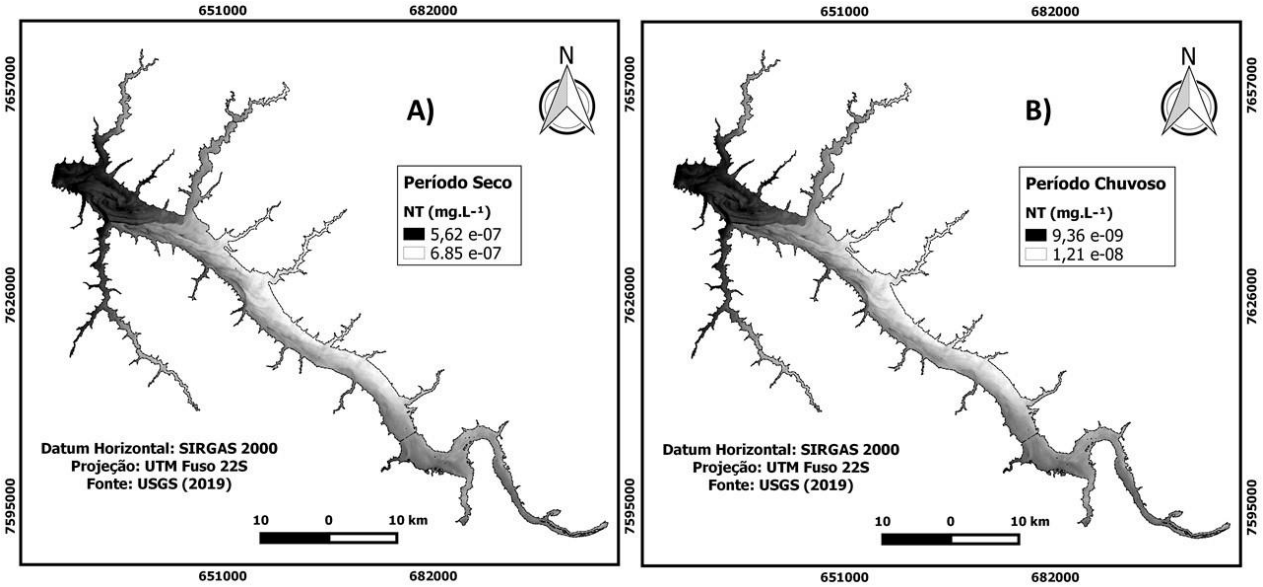

Figura 7 - Distribuição espacial do nitrogênio total no período seco (A) e no período chuvoso (B).

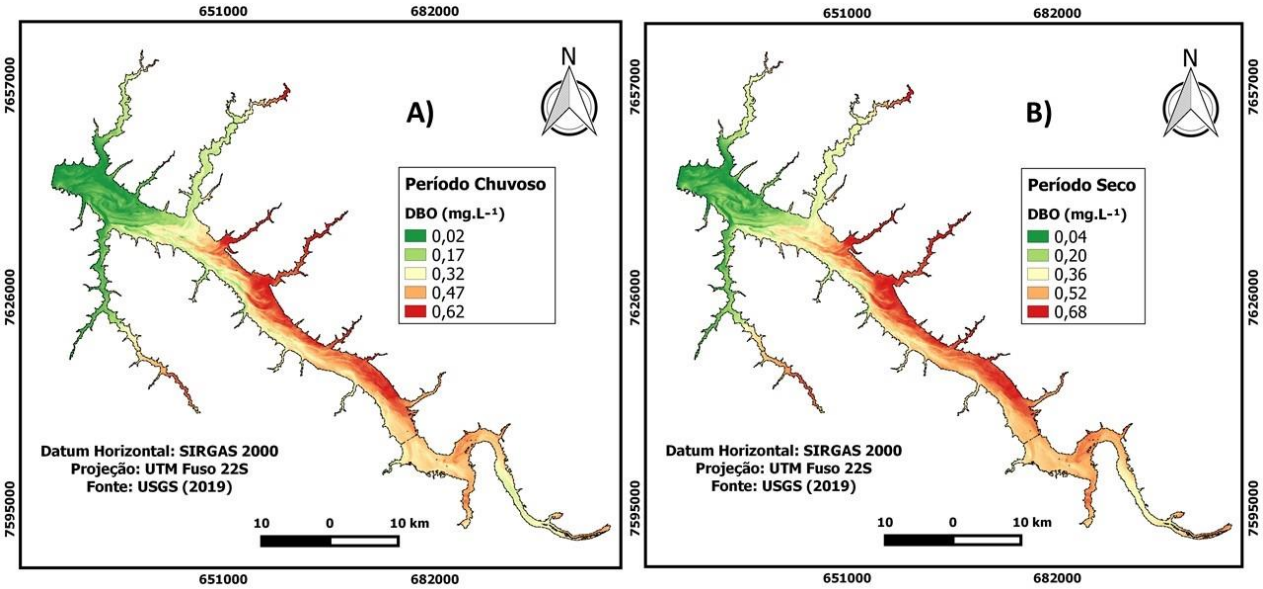

Figura 8 - Distribuição espacial da DBO no período chuvoso (A) e no período seco (B).

Os valores obtidos e o padrão de distribuição observados foram semelhantes durante ambos os períodos. As concentrações mais elevadas foram próximas de 0,6 mg.L^{-1} e aparecem na porção central do reservatório, principalmente na margem a leste; também podem ser observados esses valores nas extremidades dos braços a jusante.

Devido aos baixos valores de concentração, a classificação em função da DBO para todo o corpo hídrico foi classe 2. Ressalta-se que a DBO pode servir como um indicativo da extensão da poluição de um lago ou reservatório pois as descargas orgânicas elevam a atividade da microbiota e, por

consequência, elevam a DBO do local (El-Zeini e El-Kafrawy, 2017).

Apesar da grande disponibilidade de fósforo no ambiente, os valores de DBO se distribuem identicamente aos valores de NT. Com isto, evidencia-se novamente a possibilidade do NT atuar como fator limitante para a eutrofização do reservatório. Neste contexto, o fenômeno de autodepuração do reservatório fica evidenciado, visto que o processo converte os compostos orgânicos em compostos inertes através de mecanismos naturais (Frascareli et al., 2015; Simonetti et al., 2019).

Deve-se, portanto, redobrar a atenção com a descarga de compostos nitrogenados provenientes de atividade aquícola e, caso esta seja realizada, deve-se priorizar os locais com propensão a ter menor concentração de NT, o que ressalta a importância deste estudo.

A discrepância nos valores próximos ao reservatório, tanto de IET, NT e DBO, podem estar diretamente ligados a densidade das massas de água. Como Huang et al. (2014) descrevem, a temperatura e as substâncias dissolvidas na água causam diferenças de densidade, fazendo com que estes materiais se acumulem nas águas profundas do reservatório.

Apesar da maior parte dos municípios coletarem 90% do seu esgoto, dentro da bacia hidrográfica do Tietê-Batalha, algumas atividades industriais e agropecuárias desenvolvem-se próximas aos corpos d'água e, segundo resultados de Cardoso (2014), algumas áreas do reservatório próximo aos municípios de Lins e Catanduva são mais vulneráveis a contaminação. A autora ainda aponta que, apesar da presença de metais pesados não representar riscos devido ao seu estado inerte no sedimento, os defensivos agrícolas contribuíram para esta acumulação. Com isto, pode-se inferir que o uso do solo na bacia hidrográfica pode estar influenciando também nos níveis de PT, NT e DBO do reservatório.

4. Conclusão

O estudo revelou que dentro do reservatório deve ocorrer, além do fenômeno de depuração, uma estratificação térmica acentuada próxima a área da barragem e, com isto, as águas mais frias descem para as camadas mais profundas carregando consigo os nutrientes eutrofizantes vistos em maior abundância na parte central do reservatório.

Pelas análises de NT, IET e DBO percebe-se o nitrogênio total como um fator limitante para a proliferação de microrganismos eutrofizantes. Sendo assim, é necessária a adoção de medidas protecionistas para que as cargas de compostos nitrogenados sejam controladas, evitando a proliferação de microalgas e, consequentemente, a contaminação dos organismos aquáticos cultivados.

A variação térmica do corpo hídrico não é suficiente para prejudicar a produção de Tilápia do Nilo em regiões próximas a barragem e seus respectivos braços. Coincidentemente, estes locais também se mostraram os mais indicados para a produção segundo os parâmetros de DBO, IET e NT avaliados remotamente. Dito isto, estas áreas podem ser avaliadas como as áreas mais propícias à produção dentro do reservatório.

O método utilizado neste estudo serve como subsídio a amostragem de dados em reservatórios, pois é possível localizar os pontos desejados de forma remota e digital, minimizando os recursos financeiros e materiais dispendidos com as análises *in situ* e tornando essas operações de campo mais pontuais.

Referências

AES Tietê, 2020. Nossos reservatórios. Disponível: https://www.aestiete.com.br/quem-somos/nossas-plantas/. Acesso: 28 mar. 2020.

Brasil, 2005. Resolução CONAMA n^0 357, de 17 de março.

Beghelli, F.G.S., Frascareli, D., Pompêo, M.L.M., Moschini-Carlos, V., 2016. Trophic state evolution over 15 years in a tropical reservoir with low nitrogen concentrations and cyanobacteria predominance. Water, Air & Soil Pollution 227, 95.

Cardoso, A.M.T., 2014. Verificação da qualidade da água e dos sedimentos no rio Tietê entre as barragens de Promissão e Ibitinga. Dissertação (Mestrado). Bauru, Unesp.

Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2011. Guia nacional de coleta e preservação de amostras–água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. CETESB, São Paulo.

Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2018. Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo. CETESB, São Paulo.

Coelho, A.L.N., Correa, W.S.C., 2013. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. Revista Geográfica Acadêmica 7, 31-45.

Coliado, P.H.S., Simonetti, V.C., da Cunha, D.C., 2020. Avaliação das características físicas da bacia hidrográfica do rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira de Iguape (SP). Holos Environment 20, 320-334.

El-Zeiny, A., El-Kafrawy, S., 2017. Assessment of water pollution induced by human activities in

Burullus Lake using Landsat 8 operational land imager and GIS. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 20, S49-S56.

Frascareli, D., Beghelli, F.G.D.S., Silva, S.C.D., Carlos, V.M., 2015. Heterogeneidade espacial e temporal de variáveis limnológicas no reservatório de Itupararanga associadas com o uso do solo na bacia do Alto Sorocaba-SP. Revista Ambiente & Água 10, 770-781.

Huang, T., Li, X., Rijnaarts, H., Grotenhuis, T., Ma, W., Sun, X., Xu, J., 2014. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in Northwest China. Science of the Total Environment 485, 820-827.

Kubitza, F., 2000. Tilápia: tecnologia e planejamento na produção comercial. Editora Kubitza.

Lourenço, R.W., Silva, D.C.C., Martins, A.C.G., Sales, J.C.A., Roveda, S.R.M.M., Roveda, J.A.F., 2015. Use of fuzzy systems in the elaboration of an anthropic pressure indicator to evaluate the remaining forest fragments. Environmental Earth Sciences 73, 1-8.

Maia, A.G., Villela, S.M., 2010. Análise qualitativa do assoreamento do reservatório de Promissão (SP). Revista Brasileira de Recursos Hídricos 15, 39-46.

Meira, R.T., Sabonaro, D.Z., Silva, D.C.C., 2016. Elaboração de Carta de Adequabilidade Ambiental de uma pequena propriedade rural no município de São Miguel Arcanjo, São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento. Engenharia Sanitária e Ambiental 21, 77-84.

Melo, D.S., Gontijo, E.S., Frascareli, D., Simonetti, V.C., Machado, L.S., Barth, J.A., Friese, K., 2019. Self-organizing maps for evaluation of biogeochemical processes and temporal variations in water quality of subtropical reservoirs. Water Resources Research 55, 10268-10281.

Nery, L.M., Simonetti, V.C., Machado, L.P., Silva, D.C.C., 2020. Geotecnologias aplicadas na análise do risco de contaminação de poços de água no município de Sorocaba, SP. Holos Environment 20, 214-230.

Nie, H., Jiang, L., Huo, Z., Liu, L., Yang, F., Yan, X., 2016. Transcriptomic responses to low temperature stress in the Manila clam, *Ruditapes philippinarum*. Fish & Shellfish Immunology 55, 358-366.

Oostlander, P.C., Van Houcke, J., Wijffels, R.H., Barbosa, M.J., 2020. Optimization of Rhodomonas sp. under continuous cultivation for industrial applications in aquaculture. Algal Research 47, 101889.

Orlandi Neto, A., Franceschini, L., Manoel, L.D.O., Veríssimo-Silveira, R., Delariva, R.L., Ramos, I.P., 2019. Biology of non-native species (*Rhaphiodon vulpinus* Agassiz, 1829) (Characiformes, Cynodontidae) in a cage fish farm area, Upper Paraná River Basin, Brazil. Acta Limnologica Brasiliensia 31, e9.

Ren, C., Wang, Z., Zhang, B., Li, L., Chen, L., Song, K., Jia, M., 2018. Remote monitoring of expansion of aquaculture ponds along coastal region of the Yellow River Delta from 1983 to 2015. Chinese Geographical Science 28, 3, 430-442.

Sales, J.C.A., Silva, D.C.C., Lourenço, R.W., 2017. Identificação de áreas prioritárias para conservação da avifauna na bacia hidrográfica do rio una, Ibiuna/SP. Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais 8, 128-142.

Silva, D.C.C., Albuquerque Filho, J.L., Sales, J.C.A., Lourenço, R.W., 2017. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise 42, 72-85.

Silva, D.C.C., Oliveira, R.A., Andrade, E.L., Teramoto, E.T., Simonetti, V.C., 2020. Análise temporal da temperatura de superfície obtida por sensoriamento remoto. Holos Environment 20, 186-197.

Simonetti, V.C., Frascareli, D., Gontijo, E.S.J., Melo, D.S., Friese, K., Silva, D.C.C., Rosa, A.H., 2019. Water quality indices as a tool for evaluating water quality and effects of land use in a tropical catchment. International Journal of River Basin Management 17, 1-34.

Simonetti, V.C., Silva, D.C.C, Rosa, A.H., 2019. Análise da influência das atividades antrópicas sobre a qualidade da água da APA Itupararanga (SP), Brasil. Geosul 34, 01-27.

Souza, J.R.D., Moraes, M.E.B.D., Sonoda, S.L., Santos, H.C.R.G., 2014. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, sul da Bahia, Brasil. REDE, Revista Eletrônica do PRODEMA 8, 1.

Wang, X.J., Ma, T., 2001. Application of remote sensing techniques in monitoring and assessing the water quality of Taihu Lake. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 67, 863-870.

Yang, X., Huang, T., Zhang, H. 2015. Effects of seasonal thermal stratification on the functional diversity and composition of the microbial community in a drinking water reservoir. Water 7, 5525-5546.

Zhou, T., Gui, L., Liu, M., Li, W., Hu, P., Duarte, D. F., Chen, L., 2019. Transcriptomic responses to low temperature stress in the Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. Fish & Shellfish Immunology 84, 1145-1156.