



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Determinação da Concentração de Clorofila-a por Sensoriamento Remoto no Reservatório de Chapéu d'Úvas (Mg), Brasil

Larissa F. Serbeto<sup>1</sup>, George C. Mendes<sup>2</sup>, Celso B. M. Ribeiro<sup>3</sup>, Renata O. Pereira<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, Bolsista do Programa de Iniciação Científica da (BIC) Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil – serbeto.larissa@engenharia.ufjf.br. <sup>2</sup>Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, Bolsista do Programa de Iniciação Científica da (BIC) Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil george.mendes@engenharia.ufjf.br. <sup>3,4</sup>Professores no Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária e do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil - celso.bandeira@ufjf.edu.br, renata.pereira@ufjf.edu.br.

Artigo recebido em 27/11/2020 e aceito em 28/07/2021

### RESUMO

Na atualidade, um grande impacto nos reservatórios de água doce é a eutrofização, que afeta diretamente o tratamento e uso da água para abastecimento público, navegação, fauna e flora aquática e impacto visual. A clorofila-a é um dos indicadores de estado trófico da água e pode ser determinada utilizando sensoriamento remoto. Desta forma, este estudo objetivou determinar a concentração de clorofila-a na barragem de Chapéu d'Úvas em Juiz de Fora (Brasil), um dos principais mananciais de abastecimento público da cidade. Através de um modelo utilizando imagens do satélite Sentinel-2 foi avaliado o comportamento espaço-temporal da concentração do componente, foi correlacionado com dados de pluviosidade, temperatura, evaporação e uso e ocupação do solo em torno da barragem. Também foi aplicado um modelo para determinar o índice de estado trófico, que apresenta o grau de trofia que o corpo hídrico se encontra, classificando Chapéu d'Úvas como estado mesotrófico. Os resultados se mostraram satisfatórios para a espacialização e análise temporal da concentração de clorofila-a, a correlação com os dados de evaporação nos permitiu observar uma compatibilidade direta com a concentração do componente e verificou-se valores de clorofila-a acima da média do reservatório nas regiões de entradas de água pelos riachos e próximos as margens com menos cobertura de vegetação. Palavras chave: eutrofização, Sentinel-2, qualidade da água, águas interiores, estado trófico.

## Determination of Chlorophyll-a Concentration from Remote Sensing in Chapéu d'Úvas Reservoir (State of Minas Gerais, Brazil)

### ABSTRACT

Currently, one of the great impacts on the freshwater reservoirs is eutrophication, which directly affects the treatment and use of water for public water supply, navigation, aquatic fauna and flora and visual impact. Chlorophyll-a is one of the water trophic state indicators and it can be determined using remote sensing. Thus, this study aimed to determine chlorophyll-a concentration in Chapéu d'Úvas dam, in Juiz de Fora (Brazil), one of the main water sources of public water supply for the city. From a model that uses Sentinel-2 satellite images, the spatial-temporal behavior of that component concentration was evaluated and correlated with data regarding rainfall, temperature, evaporation, and soil use and occupation around the dam. A model was also applied to determine trophic state index, which presents the body of water trophic state, classifying Chapéu d'Úvas as mesotrophic state. The results were satisfactory regarding spatialization and temporal analysis of chlorophyll-a concentration. The correlation with evaporation data permitted us to observe a direct correspondence with the component concentration. Chlorophyll-a values higher than the reservoir average were found in creek inlets and near the shore with lower vegetal cover.

Keywords: eutrophication, Sentinel-2, quality of water, inland waters, trophic state.

### Introdução

Devido aos diversos tipos de uso para a água, é crescente o consumo da mesma, estima-se que nas últimas duas décadas a demanda no Brasil aumentou em 80% (ANA, 2020), portanto é

perceptível a necessidade extrema de proteger os reservatórios existentes no Brasil.

Um dos grandes problemas de represas é a eutrofização (Oliveira et al, 2020), que se resume em um aumento de concentração de nutrientes no meio, principalmente nitrogênio e fósforo (Thomann e Mueller, 1987). É estimado que na

América do Sul, cerca de 55% dos recursos hídricos enfrentarão problemas relativos a eutrofização (Wang et al, 2018).

Esse fenômeno apresenta várias consequências, como o crescimento excessivo das plantas aquáticas, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água (Thomann e Mueller, 1987). De acordo com Von Sperling (1996) tais interferências podem ser:

- Diminuição da concentração de oxigênio dissolvido;
- Aumento de turbidez;
- Diminuição de vida aquática;
- Possível contaminação por cianotoxinas.

Esses e outros diversos problemas afetam diretamente o tratamento e o posterior uso da água.

A exemplo disso, de Almeida et al. (2015) realizou uma revisão bibliográfica sobre um dos principais problemas listados acima e que afeta diretamente o consumo humano: a presença de cianobactérias e suas cianotoxinas no abastecimento de água. Nesse estudo ficou evidente a necessidade de adaptação na maioria das estações de tratamento de água (ETA) no Brasil.

Portanto, Almeida et al. (2015) conclui que a diminuição de lançamento de efluentes ricos em nitrogênio e fósforo é de extrema importância, pois reduz o crescimento das algas e viabiliza a utilização do sistema convencional de tratamento de água, o que também gera benefício econômico.

Nessa linha, estão sendo produzidos diversos estudos para aumentarem a eficiência da remoção desses nutrientes no tratamento terciário de efluentes, como os publicados por Kohatsu et al (2020), Vassoler (2019) e Dimas et al (2021).

Por esse motivo, é de extrema importância realizar ensaios periódicos para determinar a qualidade da água, podendo estes ser constituídos de análises físico-químicas de nutrientes (nitrogênio e fósforo), clorofila-a, ou até a determinação da predominância de alguma comunidade zooplancônica, que funcionam como indicadores biológicos (De-Carli et al, 2018)

A clorofila-a é um componente que permite indicar biomassa algal, e dessa forma determinar qualidade da água no sistema aquático e sua relação com crescimento excessivo de algas (estado trófico). A espacialização do estado trófico possibilita uma solução potencialmente efetiva para monitorar a qualidade de águas interiores e analisar espacialmente a sua distribuição (Lopes et al., 2015; Silva et al, 2018).

Problemas enfrentados para coletar amostras em campo dificultam muito a obtenção das concentrações de algumas substâncias, e as

vezes até mesmo a falta de equipamento adequado ou acesso ao ponto desejado da coleta, pode ser solucionado com o artifício do sensoriamento remoto (Barbosa et al, 2019).

O sensoriamento remoto consiste basicamente em obter informações de um determinado local de interesse, sem que seja necessário o deslocamento a essa área. Essas informações são captadas através de sensores que interagem com a superfície terrestre por meio de ondas eletromagnéticas (Barbosa et al, 2019). A obtenção indireta das condições físico-químicas das águas através do sensoriamento remoto, vem se consolidando com alto grau de eficácia (Lima et al, 2018).

Os Constituintes Opticamente Ativos (COAS) vem sendo amplamente estudados devido ao fato de seus efeitos espectrais alterarem a refletância da água. Esses constituintes geralmente são os sedimentos em suspensão, matéria orgânica e até mesmo pigmentos fotossintetizantes (Rudorff et al., 2007).

Através do monitoramento por detecção remota das propriedades opticamente ativas de constituintes como a clorofila-a é possível utilizar algoritmos para estimar sua concentração a partir de valores de refletância (Rodrigues et al., 2018; Barbosa et al., 2019).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos na aplicação de modelos para a determinação da concentração e espacialização da clorofila-a e outros parâmetros por meio de Sensoriamento Remoto, utilizando dados de satélites multiespectrais e tem demonstrado a capacidade desta aplicação (Cicerelli e Galo, 2015; Lopes et al., 2015; Chelotti, 2018; Lobo et al, 2018; Potes et al., 2018; Rodrigues et al., 2018; Silva et al, 2018; Dutra et al., 2019; Machado et al., 2019; Lopes et al, 2021).

Dentre tais estudos, destaca-se o de Potes et al. (2018) onde foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 para obter a concentração de clorofila-a no Reservatório de Alqueva em Portugal. Em paralelo a isso, foram realizadas análises laboratoriais no mesmo período das imagens, a fim de validar o método.

O mesmo ocorreu no estudo de Pereira et. al., 2020 que buscou mapear a concentração de clorofila-a a partir de imagens do Sentinel-2 de um rio urbano em períodos de seca e de cheia utilizando 3 equações diferentes e correlacionar com dados pontuais medidos em campo, onde observou que o algoritmo utilizado pode estimar a variação de clorofila-a de forma ampla mas não pontual, sendo recomendado a calibração do modelo.

Utilizando sensoriamento remoto, Araujo (2020) monitorou a ocorrência de grandes concentrações de clorofila-a no rio Tapajós no norte do país. Ainda no rio Tapajós, Lobo (2018) conseguiu obter uma satisfatória correlação entre o biovolume estimado por um sensor ótico e volume de cianobactérias analisado em microscópio.

Recentemente publicado, o trabalho realizado por Fraga (2020) consistiu em utilizar o sensor MSI do sentinel-2 para determinar a concentração de Sólidos em Suspensão (SS) na Lagoa Mirim no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Além de determinar a concentração de SS, a autora também correlaciona os resultados obtidos com o MSI com os encontrados a partir de medições realizadas *in situ*. A partir disso foi possível gerar uma equação que permite definir a concentração de SS, a partir das bandas do MSI de qualquer imagem adquirida na plataforma onde ficam disponíveis as imagens do satélite. Essa equação teve uma forte correlação com os resultados obtidos em campo, chegando a 0,76.

Caballero et al (2019) também utilizou o sensor MSI para determinação de concentrações de clorofila-a numa lagoa, obtendo bons resultados

quando correlacionados com dados obtidos em campo, chegando a correlações significativas e maiores que 0,8.

Portanto, mais uma vez fica explícito o poder do Sentinel-2 no auxílio ao monitoramento da qualidade das águas interiores.

De acordo com os fatos apresentados, o presente estudo teve como objetivo determinar a concentração de Clorofila-a, através de equações desenvolvidas por Dall’Olmo, Gitelson, Rundquist, (2003) adaptadas para um modelo com imagens do satélite Sentinel-2, e com esses resultados obter o Índice de Estado Trófico (IET) do reservatório de Chapéu D’Uvas, assim como também correlacionar com variáveis climatológicas e com o uso e a cobertura do solo ao entorno do reservatório.

Este trabalho teve como hipótese avaliar o potencial do uso de imagens Sentinel-2 MSI L1-C na estimativa de parâmetros de qualidade de água, nas escalas espaço-temporal em reservatório. Nesse sentido, os principais objetivos foram: (i) determinar a concentração de Clorofila-a; (ii) Índice de Estado Trófico (IET); (iii) correlacionar clorofila-a com variáveis climatológicas.

## Material e métodos

### Caracterização da Área

O reservatório de Chapéu D’Uvas está localizado à aproximadamente 36 quilômetros da cidade de Juiz de Fora e sua extensão transpassa territórios de 3 cidades: Antônio Carlos, Ewbank

da Câmara e Santos Dumont (Figura 1), o reservatório está inserido na unidade de planejamento da Bacia Hidrográfica dos rios Preto-Paraibuna, integrante da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (AGEVAP, 2014)

O reservatório foi criado com o término da construção da barragem no ano de 1994 com o

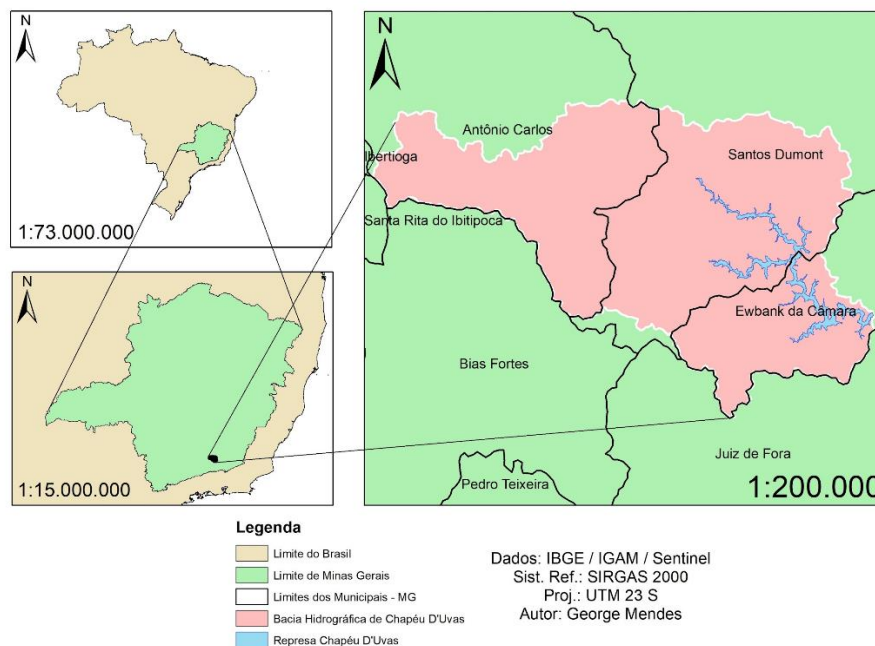


Figura 1: Mapa de localização da bacia de contribuição para o reservatório de Chápeu d’Úvas.

Serbeto., L., F., Mendes., G., C., Ribeiro., C., B., M., Pereira., R., O.

objetivo de amortizar as cheias que atingiam a cidade de Juiz de Fora no século passado, contudo ao longo do tempo devido ao aumento na demanda por água de qualidade, o reservatório de Chapéu d'Uvas passou a assumir o papel de maior manancial de abastecimento público e a garantia de abastecimento de água para a cidade de Juiz de Fora, contribuindo atualmente com cerca de 40% do volume de água distribuído na cidade (900 L/s) (Cesama, 2019).

A área de cobertura do reservatório é 11,5 km<sup>2</sup> e a represa tem extensão de até 23,37 km quando no seu nível máximo (cota 741 m), armazenando um volume de aproximadamente 140 milhões m<sup>3</sup> de água (Machado, 2012).

Pelo fato da represa estar locada entre a confluência do córrego São José e o ribeirão Estiva, trecho onde a Deliberação Normativa nº 16 (COPAM, 1996) definiu como classe 1, automaticamente isso também torna dessa classe a mesma para as águas retidas pelo barramento. A instrução para utilização das águas de classe 1 pela Resolução CONAMA nº 357 (2005), em sua Seção I, artigo 4º e subseção II-a “ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado” se faz muito pertinente à realidade em questão, já que a represa é utilizada para abastecimento público na cidade de Juiz de Fora.

A região tem como volume médio de chuvas anual de 1597 mm, temperatura média de 19,3°C e evaporação total em média de 869,3 mm (INMET, 2019).

Aquisição e Processamento de Dados Espaciais

Como verificado na introdução, pode-se concluir que o Sentinel-2 tem potencial para se tornar um instrumento de monitoramento da qualidade de águas interiores (Potes et al., 2018).

Para a obtenção das imagens que foram utilizadas neste estudo, utilizaram-se os dados disponibilizados pela *European Space Agency* (ESA). O programa denominado *Sentinel*, tem como objetivo desenvolver uma série de observações na superfície terrestre, para garantir o monitoramento do meio ambiente e sua segurança. Dentro do programa cada missão tem um objeto de observação diferente.

Os satélites utilizados para este trabalho foram os lançados na missão 2 (*Sentinel-2 MSI*), que passaram a orbitar a Terra a partir de junho de 2015.

As missões Sentinel-2A e 2B são realizadas por dois satélites que orbitam a Terra e tem como principal foco a observação da variabilidade nas condições da vegetação, solo e água, sendo satélite equipados com sensores imageadores multiespectrais.

Tabela 1: Detalhamento das bandas dos satélites da missão Sentinel-2. Fonte: ESA (2020).

Banda	Descrição	Resolução (m)	Comprimento de onda (nm)
B1	Aerossóis	60	442.7 (S2A) / 442.2 (S2B)
B2	Azul	10	492.4 (S2A) / 492.1 (S2B)
B3	Verde	10	559.8 (S2A) / 559.0 (S2B)
B4	Vermelho	10	664.6 (S2A) / 665.9 (S2B)
B5	Borda do vermelho 1	20	704.1 (S2A) / 703.8 (S2B)
B6	Borda do vermelho 2	20	740.5 (S2A) / 739.1 (S2B)
B7	Borda do vermelho 3	20	782.8 (S2A) / 779.7 (S2B)
B8	Infravermelho próximo	10	832.8 (S2A) / 832.9 (S2B)
B8A	Borda do vermelho 4	20	864.7 (S2A) / 864.0 (S2B)
B9	Vapor de água	60	945.1 (S2A) / 943.2 (S2B)
B10	Cirrus	60	1373.5 (S2A) / 1376.9 (S2B)
B11	Infravermelho de ondas curtas 1	20	1613.7 (S2A) / 1610.4 (S2B)
B12	Infravermelho de ondas curtas 2	20	2202.4 (S2A) / 2185.7 (S2B)

O sensor multiespectral coleta amostras de 13 bandas espectrais: visível e infravermelho próximo a 10 metros, borda do vermelho e infravermelho de ondas curtas a 20 metros e bandas atmosféricas a 60 metros de resolução espacial como descritos na tabela 1 (ESA, 2020).

As imagens do satélite Sentinel-2 MSI têm disponibilidade gratuita no portal *Copernicus Access Hub* da ESA e há disponíveis dois níveis de processamento das imagens, existindo o nível 1C referente a refletância do topo da atmosfera e o nível 2 relativo à refletância de superfície com correção atmosférica.

As imagens ofertadas no portal já são georreferenciadas no *datum World Geodetic*

*System 1984 (WGS84)* com projeção *Universal Transverse Mercator (UTM)* e são separadas em cenas com dimensões de 100 quilômetros por 100 quilômetros, tendo capacidade de revisita de 5 dias e resolução radiométrica de 12 bits.

As imagens do satélite Sentinel-2 MSI (Level 1C) (Figura 2) foram obtidas na plataforma *Copernicus Access Hub* para o período entre 2017 a 2019, sendo selecionadas imagens a cada mês para que se pudesse fazer uma análise espaço-temporal das concentrações de clorofila-a no reservatório. Porém devido a condições de tempo na região de Chapéu d'Uvas, somente foi possível selecionar 15 imagens com baixa cobertura de nuvens para os meses em negrito na Tabela 2.

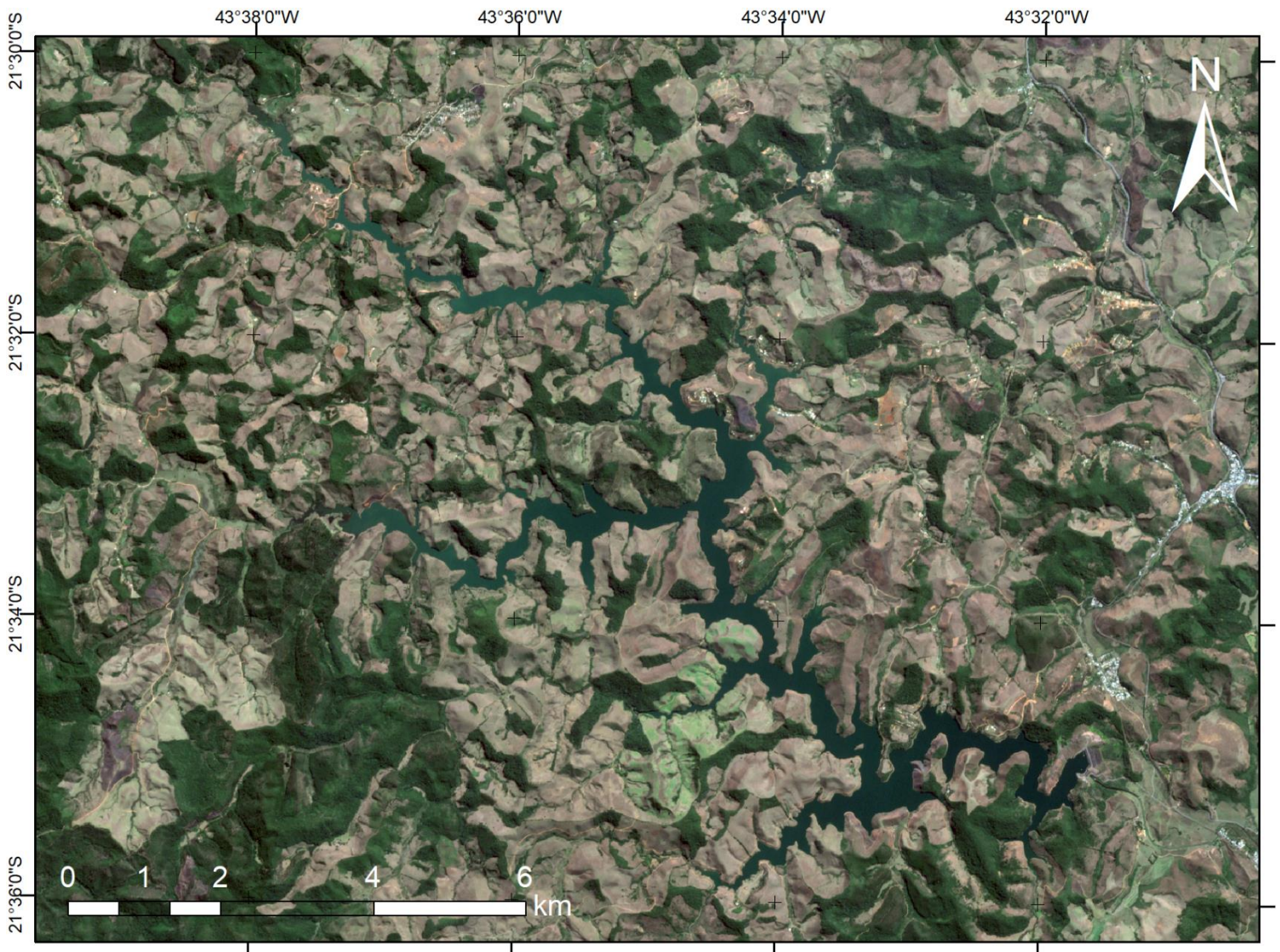


Figura 2: Imagem de cores reais (TCI) do satélite Sentinel-2 MSI nível 1C da região da represa de Chapéu d'Uvas. Fonte: Copernicus Access Hub – ESA.

Tabela 2: Data das imagens e porcentagem de cobertura por nuvens. Fonte: autoria própria.

Data	% cobertura de nuvens
9-Jun-17	0
11-Out-17	0
19-Jan-18	20.37
20-Mar-18	14.74
13-Jun-18	20.83
8-Jul-18	0
12-Ago-18	0
21-Out-18	0.28
15-Dez-18	0.41
24-Jan-19	0.98
15-Mar-19	62.25
29-Mai-19	0
13-Jul-19	2.18
17-Ago-19	1.67
11-Set-19	0.28

No software SNAP - *Sentinel Application Platform* (2019) foi aplicado o algoritmo de correção atmosférica C2RCC (C2X Nets - dark water) para águas interiores nas 15 imagens selecionadas.

Posteriormente foram utilizadas as bandas de refletância sobre superfícies de água *rho<sub>w</sub>\_B4* (Red - 665 λ), *rho<sub>w</sub>\_B5* (Red Edge 1 - 705 λ) e *rho<sub>w</sub>\_B6* (Red Edge 2 - 740 λ) redimensionadas para resolução espacial de 20 metros nas equações empíricas desenvolvidas por Dall'Olmo, Gitelson, Rundquist (2003):

$$TBDO = R740 * \left( \frac{1}{R665} - \frac{1}{R750} \right) \quad (1)$$

$$TBDO = rho_{w_{B6}} * \left( \left( \frac{1}{rho_{w_{B4}}} \right) - \left( \frac{1}{rho_{w_{B5}}} \right) \right) \quad (2)$$

$$Chl - a \left( \frac{mg}{m^3} \right) = (67.645 * TBDO) + 16.089 \quad (3)$$

Onde: TBDO: índice de razão entre bandas para detecção de clorofila;

*rho<sub>w</sub>\_B4*: banda 4 do satélite Sentinel-2;

*rho<sub>w</sub>\_B5*: banda 5 do satélite Sentinel-2;

*rho<sub>w</sub>\_B6*: banda 6 do satélite Sentinel-2;

Chl-a: concentração de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>).

Na figura 3 são resumidas todas as etapas do processamento da imagem para obtenção da concentração de clorofila-a.

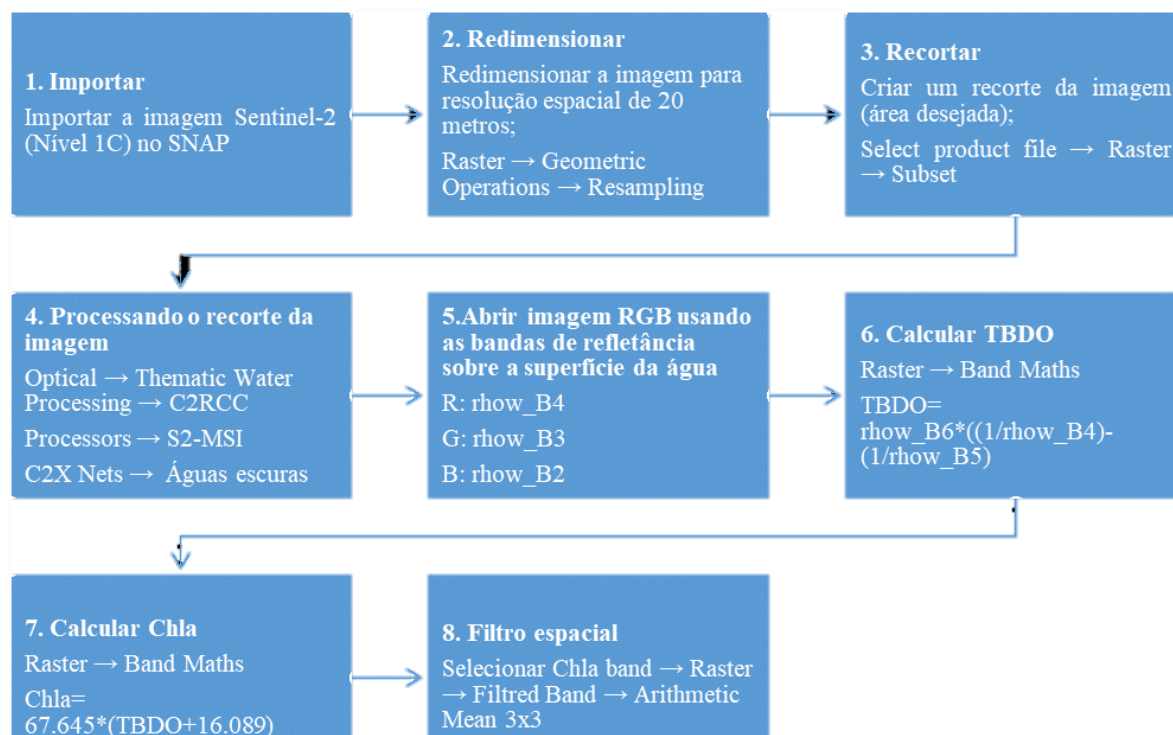


Figura 3: Fluxograma das etapas do processamento das imagens. Fonte: Autoria própria.

Serbeto., L., F., Mendes., G., C., Ribeiro., C., B., M., Pereira., R., O.

Índice de Estado Trófico

A metodologia que será utilizada neste estudo para o cálculo do Índice de Estado Trófico (IET) é a mesma utilizada pela CETESB (2018) para classificação de corpos hídricos no estado de São Paulo, que por sua vez segue o modelo modificado de Lamparelli (2004), que utiliza tanto as concentrações de fósforo no manancial, como também as concentrações da clorofila-a para determinar o grau de trofia que este se encontra.

As equações 4 e 5 foram utilizadas para o cálculo do IET em ambientes lênticos para os parâmetros de fósforo e clorofila-a:

$$IET (CL) = 10 * \left( 6 - \left( \frac{0,92 - 0,34 * (\ln \ln CL)}{\ln \ln 2} \right) \right) \quad (4)$$

$$IET (PT) = 10 * \left( 6 - \left( \frac{1,77 - 0,42 * (\ln \ln PT)}{\ln \ln 2} \right) \right) \quad (5)$$

Onde:

CL: concentração de clorofila-a na superfície da água ( $\mu\text{g/L}^{-1}$ );

PT: concentração de fósforo na superfície da água ( $\mu\text{g/L}^{-1}$ );

ln: logaritmo natural.

Dessa forma, o cálculo do IET final será a média aritmética entre os valores obtidos pelas fórmulas anteriores:

$$IET = \frac{IET (CL) + IET (PT)}{2} \quad (6)$$

Após da obtenção do valor de IET pela fórmula 6, o estado trófico da água foi classificado conforme apresentado na tabela 3, pelo Índice de Carlson Modificado (1977).

Tabela 3: Classificação conforme IET calculado.

Fonte: Índice de Carlson Modificado (1977).

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

A classificação apresentada acima parte do princípio de que ambientes considerados ultraoligotróficos são corpos d'água limpos, com

pouquíssimas concentrações de nutrientes, que não chegam a causar prejuízos no uso da água. A cada nível de trofia a qualidade do corpo d'água diminui, podendo chegar até o nível hipereutrófico, que é caracterizado pela alta concentração de matéria orgânica e nutrientes, podem apresentar floração de algas e mortandade de peixes, além disso o uso desse corpo hídrico fica comprometido e pode causar consequências indesejáveis (Lamparelli, 2004).

Como o presente estudo foi realizado por técnicas de sensoriamento remoto, não foi possível realizar campanhas para coleta de amostras a fim de determinar a concentração de fósforo no manancial de Chapéu d'Úvas, portanto o cálculo para determinação do estado trófico do mesmo foi feito considerando apenas as concentrações de clorofila-a obtidas.

Correlação por Coeficiente de Pearson

Conforme resultado obtido por Wiegand, Piedra, Araújo (2016), reservatórios localizados em climas úmidos tendem a ser menos vulneráveis a eutrofização, uma vez que sua evaporação é menor que em clima semiáridos, têm precipitação maior e por esse motivo a renovação das águas em seus interiores é mais rápida. A fim de qualificar a relação citada anteriormente com o estado trófico da represa, foi aplicado o coeficiente de Pearson para os valores das concentrações encontradas e os de temperatura média mensal, precipitação total mensal e evaporação mensal, para os meses de estudo em questão, esses dados foram fornecidos pela estação meteorológica convencional de Juiz de Fora, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O coeficiente de Pearson mede o grau de correlação entre duas variáveis, seu valor varia de -1 a 1, sendo que o valor negativo indica relação inversamente proporcional e o positivo relação direta, além disso, quanto mais próximo de 1 mais relacionadas estão as variáveis. Esse coeficiente pode ser obtido através da equação 7:

$$r = \frac{1}{n-1} \frac{\sum \left( \frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{Y}}{S_y} \right)}{\left( \frac{x_i - \bar{X}}{S_x} \right) \left( \frac{y_i - \bar{Y}}{S_y} \right)} \quad (7)$$

Onde:

$\bar{X}$  e  $\bar{Y}$ : média aritmética das variáveis;  
 $S_x$  e  $S_y$ : desvio padrão.

**Resultados e discussão**

Os resultados obtidos no tratamento das imagens selecionadas podem ser observados nas Figuras 4, 5, 6, 7 e 8.

De uma maneira geral é possível observar uma maior concentração de clorofila-a na entrada (afluência) do primeiro braço direito da represa, assim como bem próximo aos limites desse braço,

porém com uma distribuição mais pontual, diferente do que ocorre na região do braço esquerdo, onde a concentração se apresenta mais homogênea em toda a área inicial. Os menores valores são apresentados ao longo de toda a região central da represa e próximo ao barramento. Possivelmente devido ao elevado potencial de diluição dos nutrientes nessas regiões da represa (Narazeth, 2020).

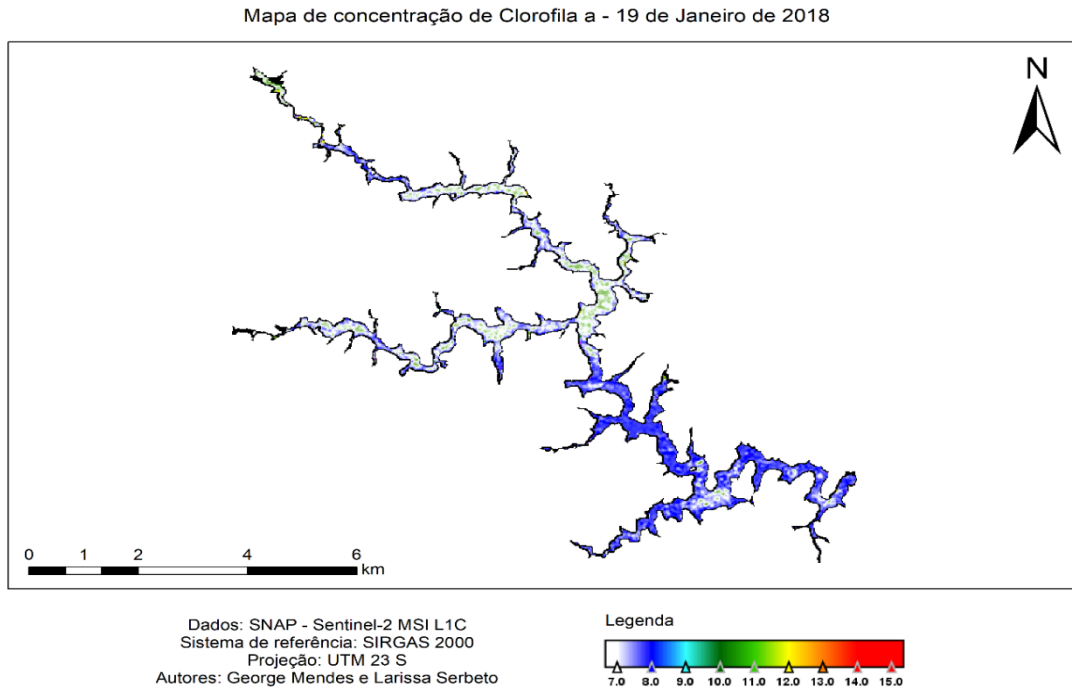


Figura 4: Concentrações de clorofila-a obtidas por sensoriamento remoto do dia 19/01/2018.

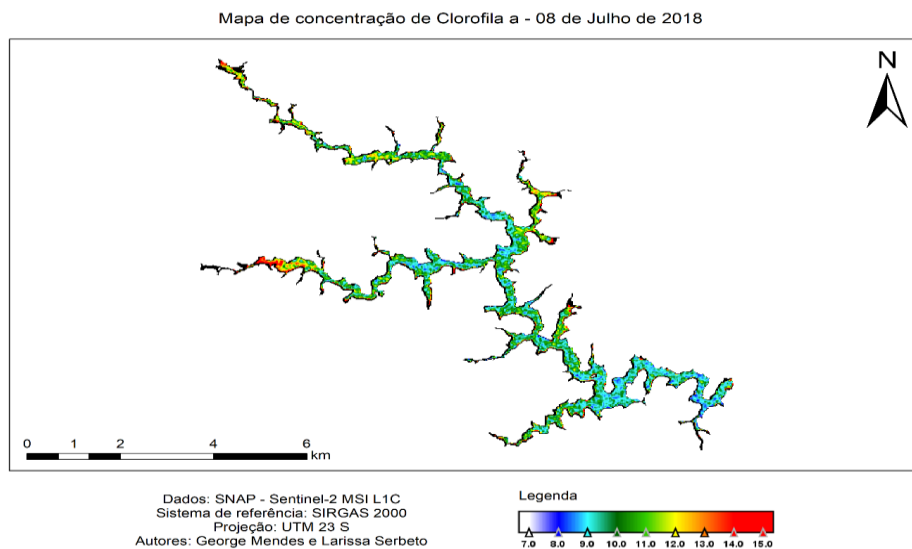


Figura 5: Concentrações de clorofila-a obtidas por sensoriamento remoto do dia 08/07/2018.

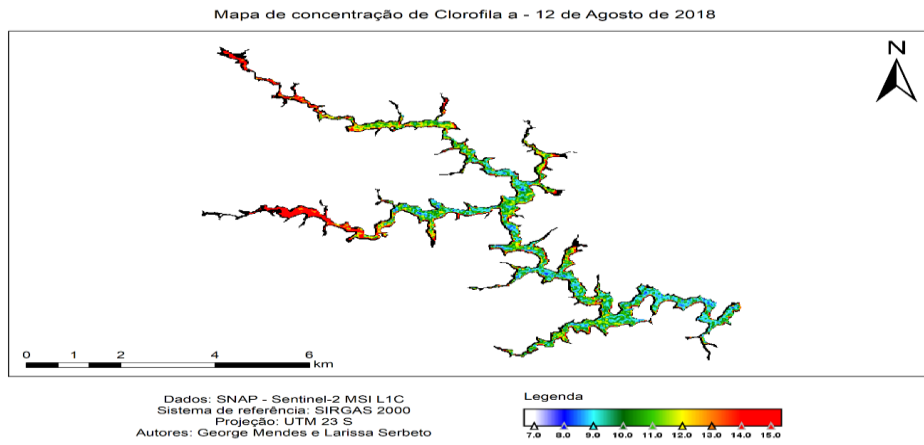


Figura 6: Concentrações de clorofila-a obtidas por sensoriamento remoto do dia 12/08/2018

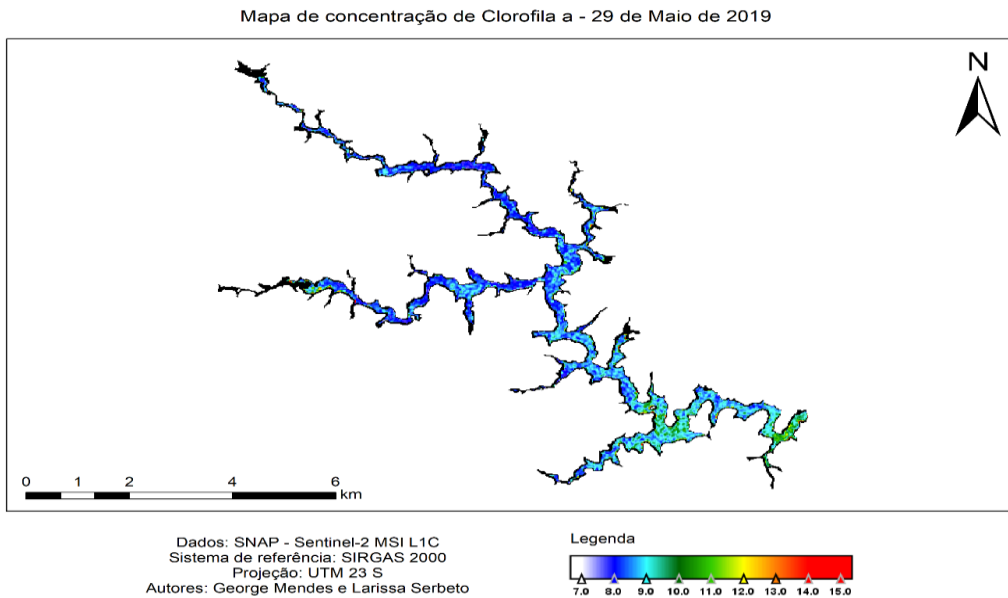


Figura 7: Concentrações de clorofila-a obtidas por sensoriamento remoto do dia 29/05/2019

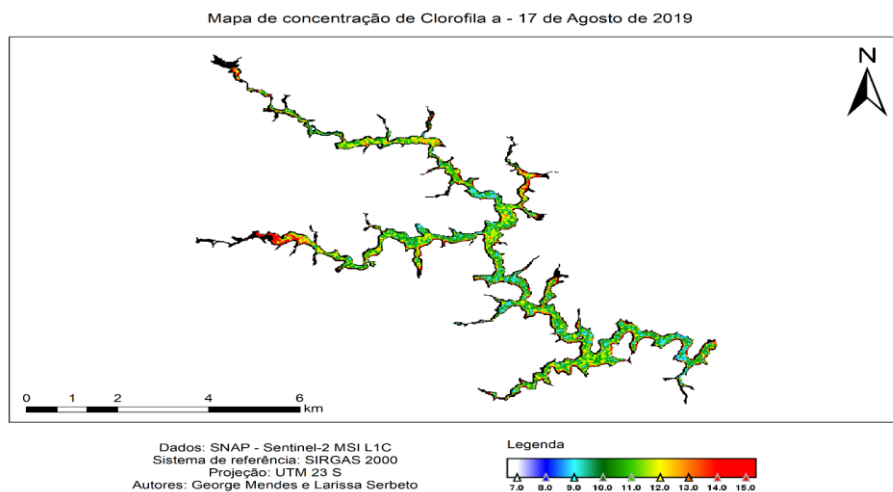


Figura 8: Concentrações de clorofila-a obtidas por sensoriamento remoto do dia 17/08/2019

Assim como na tese de Guimarães (2019) e na dissertação de Schmitz (2020), foi possível notar que as regiões próximas aos afluentes apresentam concentrações de clorofila-a maiores e homogeneização dos valores na direção da zona lacustre.

A partir do processamento de tais imagens foram obtidas concentrações de clorofila-a para cada imagem analisada, representando o mês de ocorrência do mesmo para a análise espacial, que estão apresentadas na tabela 4, juntamente com o valor já calculado para o índice de estado trófico (IET).

Tabela 4: Concentrações de clorofila-a e Índice de Estado Trófico. Fonte: Autoria própria

Data da Imagem	Concentrações (mg/m <sup>3</sup> )					IET
	Média	Máxima	Mínimo	Mediana	Desvio padrão	
06-set-17	9,71	35.44	5.35	9.30	1.70	58
11-Oct-17	10,14	59.72	5.41	9.67	2.07	58
19-jan-18	8,63	20.71	6.21	8.52	0.55	57
20-mar-18	8,81	25.55	6.14	8.89	0.96	57
13-jun-18	9,44	39.04	5.69	9.20	1.39	58
08-jul-18	10,15	33.44	5.21	9.73	1.87	58
12-Aug-18	11,29	42.34	6.09	10.34	2.90	59
21-Oct-18	10,80	66.06	7.13	10.00	2.96	58
15-Dec-18	10,65	55.74	7.51	10.11	2.31	58
24-jan-19	10,26	38.31	7.35	9.71	2.10	58
15-mar-19	9,82	51.44	6.56	9.26	2.13	58
29-May-19	8,72	45.48	5.83	8.49	0.95	57
13-jul-19	11,23	33.53	5.81	10.99	1.88	59
17-Aug-19	11,28	38.94	5.67	10.81	2.15	59
11-Sep-19	10,20	43.06	5.73	8.71	0.87	58

É válido destacar que em 9 das 15 imagens processadas (60%) foram encontradas concentrações acima de 10 (mg/m<sup>3</sup>), limite máximo permitido para águas de classe 1.

De modo geral, analisando a tabela 4 é possível observar um comportamento na variação das concentrações ao longo do período estudado. Em meses de estiagem (maio a setembro) é visível um ligeiro aumento de concentração de clorofila-a nos valores quando comparados em relação aos meses que possuem uma maior pluviosidade (outubro a abril), o que também foi observado em outros estudos (Araujo, 2020; Santos et al., 2020; Lins et al., 2018).

Porém, essa variação não chega a mudar a classificação de estado trófico do reservatório nos períodos analisados, que variaram de 57 a 59, permanecendo dentro de uma mesma faixa de classificação e conforme o Índice de Carlson Modificado é considerado em estado mesotrófico. (Tabela 3).

Os gráficos 1, 2 e 3 foram gerados para melhor analisar as correlações. Ao analisar o gráfico 1 é possível perceber que à medida em que a temperatura aumenta, a concentração de clorofila-a diminui, porém esse comportamento não segue tanto um padrão, e isso pôde ser verificado pelo coeficiente de Pearson, que teve como resultado de -0,45, o valor negativo reafirma

a conclusão das variáveis serem inversamente proporcionais, porém o valor indica uma fraca correlação entre as duas. Apesar disso, recomenda-se um estudo setorizado nas diferentes regiões da represa visto que a mesma cobre uma extensa área

e devido a isso a concentração de clorofila-a pode variar, conforme observado nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8. Inclusive sofrer interferências de substâncias devido ao poder de diluição em algumas regiões influenciando nessa baixa correlação.

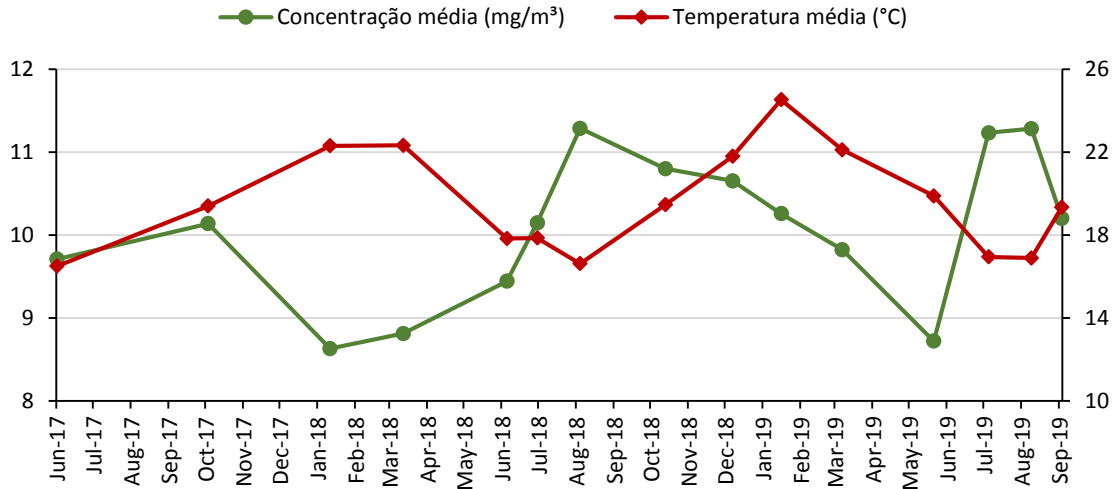


Gráfico 1: Concentração de clorofila-a média e temperatura média mensal. Fonte: Autoria própria.

A análise do gráfico 2 é similar ao anterior, o coeficiente de Pearson encontrado foi de -0,26 e também implica uma relação inversa entre a concentração da clorofila-a e a precipitação, porém

o valor menor que 0,3 indica uma baixa correlação, ou seja, pode-se dizer que a concentração e a pluviosidade não possuem nenhuma relação definida.

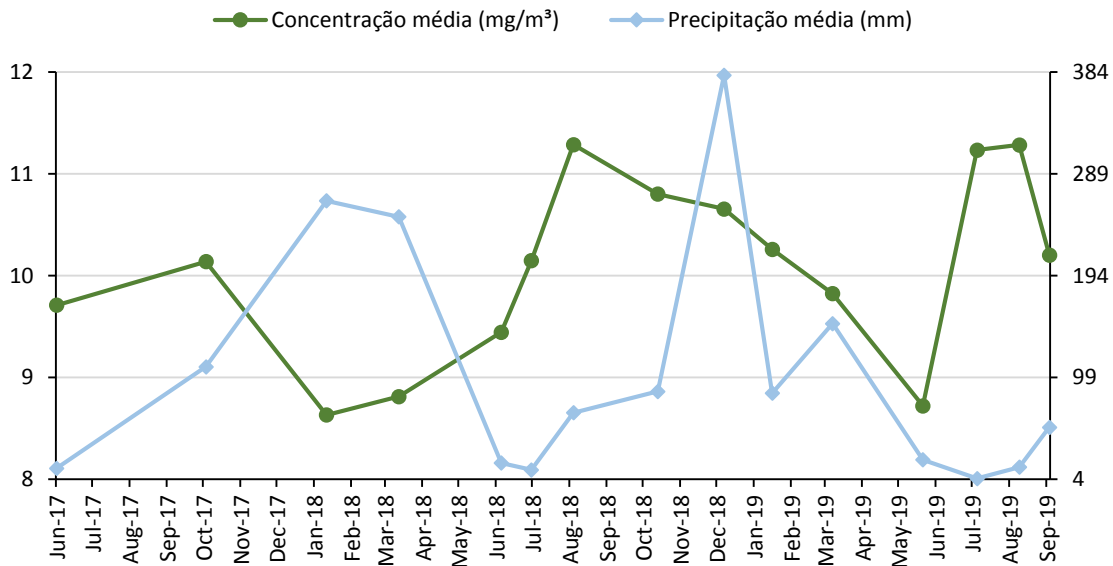


Gráfico 2: Concentração de clorofila-a média e precipitação média mensal. Fonte: Autoria própria.

Ao observar o gráfico 3 é possível chegar a conclusões similares as obtidas nos gráficos anteriores, apesar de agora a relação entre as variáveis ser direta, isso pode ser reforçado pelo valor do coeficiente de Pearson obtido, 0,42, que

por ser positivo reafirma a ideia apresentada anteriormente e seu valor em si, também significa uma correlação fraca entre a concentração de clorofila-a e a evaporação

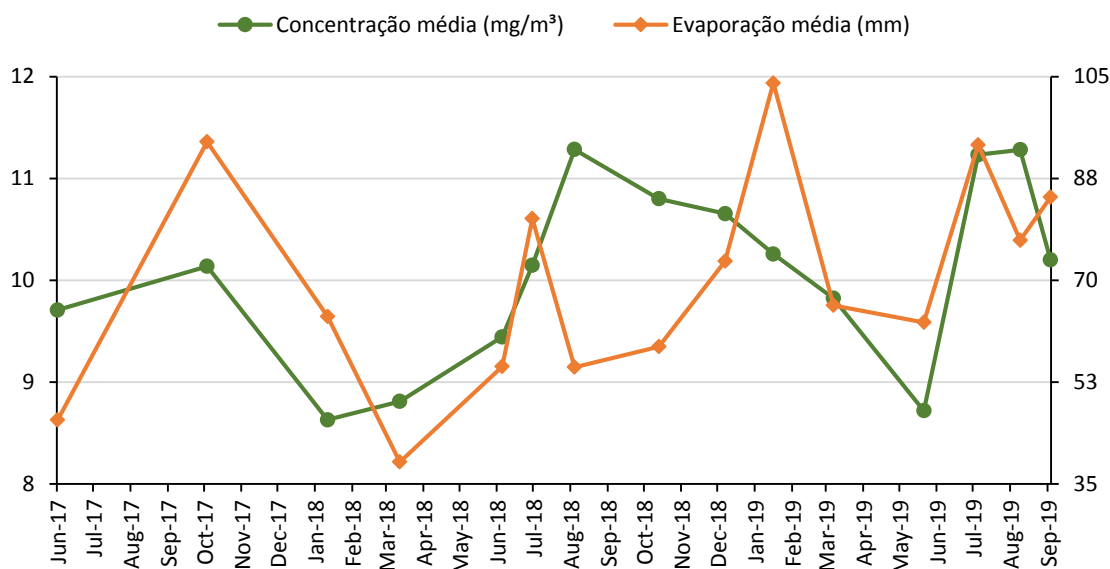


Gráfico 3: Concentração de clorofila-a média e evaporação média mensal. Fonte: Autoria própria.

Quanto à classificação do reservatório de Chapéu d'Uvas como mesotrófico, já era de se esperar, tendo em vista o uso e ocupação do solo em toda sua bacia de contribuição, como pode ser visualizado na figura 9, a região possui extensas áreas de pastagens (27%) e pouquíssimas áreas que ainda possuem vegetação nativa (28%). A falta da vegetação nativa preocupa, uma vez que essa protege a qualidade da água do reservatório, pois consegue reter certos tipos de poluentes, como sedimentos e fixam os nutrientes no solo, evitando que sejam lançados diretamente no corpo hídrico, principalmente N e P, que são essenciais para o crescimento acelerado de algas e consequente degradação do manancial (Martíni et al. 2019; Garcia et al., 2018).

As pesquisas de Mendonça (2018) e Santos et al. (2018), corroboram com essa relação apontada entre a alteração de uso e ocupação do solo nas margens e na bacia de contribuição do reservatório e a deterioração da qualidade da água do mesmo, visto que o aumento da ação antrópica no entorno contribui para o assoreamento e o aporte de nutrientes.

### Conclusões

A partir da aplicação do modelo de distribuição da concentração de clorofila-a utilizando as equações desenvolvidas por Dall'Olmo, Gitelson, Rundquist

(2003), o estudo obteve resultados satisfatórios no que tange ao monitoramento espacial e temporal do componente e isso pode facilitar na gestão do reservatório.

A concentração da clorofila-a foi observada mais elevada em relação aos valores médios nas regiões de contribuição de córregos e riachos no reservatório que pode estar associado à entrada de nutrientes advindos das microbacias de contribuição.

Também é possível observar nas imagens geradas pelo sensoriamento remoto que a concentração é ligeiramente superior à média do reservatório próximo às margens, principalmente aquelas com maior ocorrência de pastagens, o que pode estar relacionado ao aporte de sedimentos e nutrientes transportados pela chuva para o leito do reservatório devido ausência de uma faixa de vegetação em torno do corpo hídrico que funcionaria como uma barreira natural.

Por fim, é recomendado que sejam feitos novos estudos com as análises de concentração de clorofila-a e fósforo realizadas in loco, e em maiores quantidades, objetivando a setorização do manancial. Dessa forma, poderão ser definidas áreas que possuem maior potencial de eutrofização, o que ajudaria na realização de ações preventivas que evitem a ocorrência desse fenômeno nesse manancial tão importante para a cidade de Juiz de Fora.

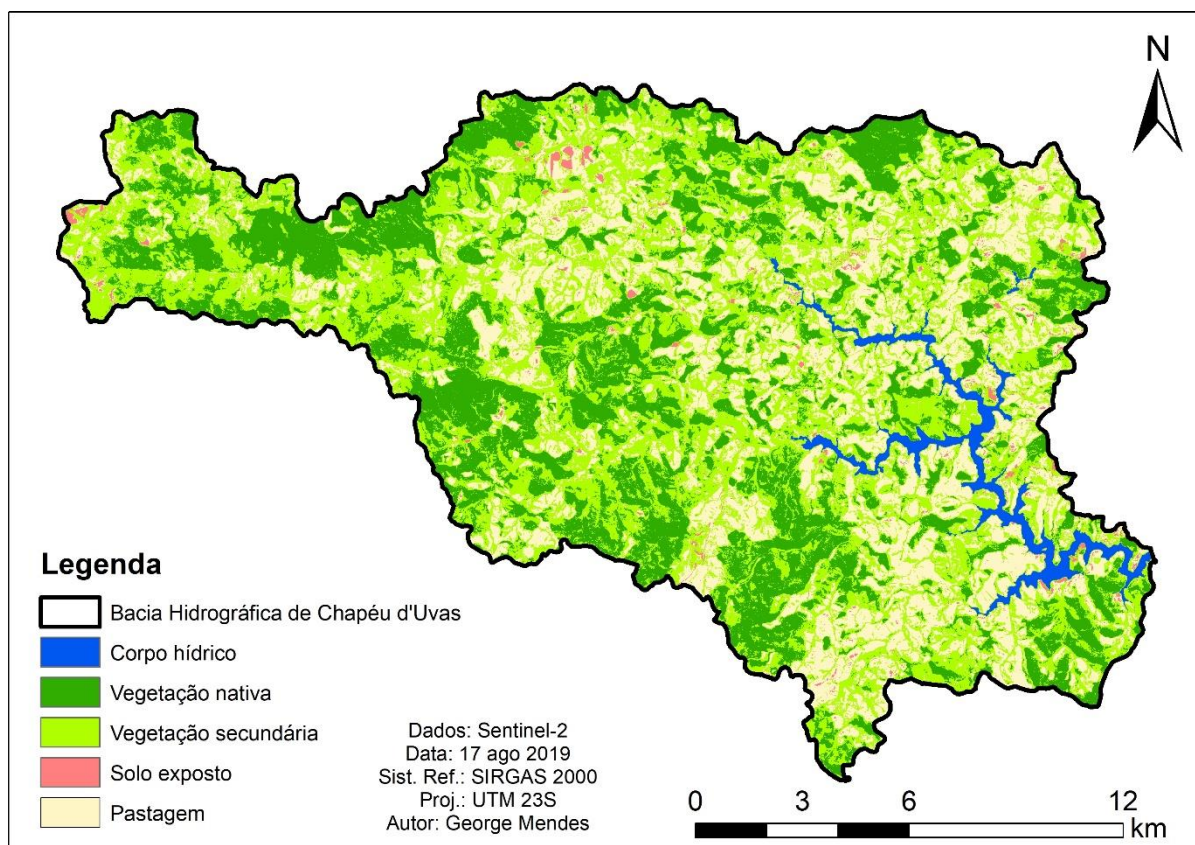


Figura 9: Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica da Represa de Chapéu d'Uvas. Fonte: autoria própria.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Pró-reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Juiz de Fora pelo apoio concedido através do projeto de iniciação científica.

### Referências

AGEVAP. Agência da Bacia do Rio Paraíba do Sul, 2014. Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes: Relatório de diagnóstico RP 6, Tomo 1. Resende.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2020, Brasília, 2020. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.23309814.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2021

Araújo, James Leão de. Monitoramento por sensoriamento remoto da concentração de clorofila-a e das florações de cianobactérias no Baixo Tapajós : audiovisual praias do Tapajós para gerações presentes e futuras. 2020. 98 f.

Dissertação (Mestrado em Rede Nacional Para o Ensino das Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br:8080/jspui/handle/2011/12424> . Acesso em: 06 de jul de 2021.

Barbosa, C. C. F., Novo, E. M. L. M., Martins, V. S., 2019. Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações. 1ª ed. Instituto de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 161.

Caballero, C. B., Guedes, H. A. S., da Silva Fraga, R., Mendes, K. G. P., Fassoni-Andrade, A. C., & Martins, V. S. (2019). XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo de águas interiores: Monitoramento de clorofila-a em uma lagoa subtropical.

CESAMA. Companhia de Saneamento Municipal, 2019. Barramento de Chapéu d'Uvas. Disponível: <http://www.cesama.com.br/mananciais/barragem-de-chapeu-d-uvras-2>. Acesso: 23 out. 2019.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2019. Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas. Disponível :

- <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-D-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas.pdf>. Acesso: 22 set. 2019.
- Chelotti, Giancarlo Brugnara. Análise espaço-temporal da concentração de sedimentos em suspensão no reservatório do Descoberto (DF), por meio de sensoriamento remoto. 2018. 98 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas)—Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- Cicerelli, R. E., Galo, M. L. B. T., 2015. Sensoriamento remoto multifonte aplicado na detecção do fitoplâncton em águas interiores. *Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental* v.19, n.3, 259-265.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005 Resolução CONAMA 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União* nº 053. Brasília. 58-63.
- Coral, Lucila Adriani. Remoção de cianobactérias e cianotoxinas em águas de abastecimento pela associação de flotação por ar dissolvido e nanofiltração. 2009. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93382>. Acesso em: 29 out. 2020.
- COPAM. Conselho de Política Ambiental, 1996. Deliberação Normativa COPAM nº 016. Dispõe sobre o enquadramento das águas estaduais da bacia do rio Paraibuna. *Diário do Executivo*. Minas Gerais.
- Dall'Olmo, G., Gitelson, A. A., & Rundquist, D. C., 2003. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophysical research letters*, 30(18).
- De-Carli, B. P., Albuquerque, F. P. D., Moschini-Carlos, V., & Pompêo, M. (2018). Comunidade zooplânctônica e sua relação com a qualidade da água em reservatórios do Estado de São Paulo. *Iheringia. Série Zoologia*, 108.
- De Almeida, Luana Candido et al., 2017. Cianobactérias e cianotoxinas fatores de risco para o abastecimento de água. *Anais SIMPAC*, 7.
- Dimas, C., Teixeira, M. R., Morais, E. G., Cerqueira, R., & Barreira, L. OTIMIZAÇÃO *Serbeto., L., F., Mendes., G., C., Ribeiro., C., B., M., Pereira., R., O.* Do Tratamento Terciário De Águas Residuais Através Da Utilização De Microalgas. 15 Congresso da Água. 2021, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) Disponível em: [https://www.aprh.pt/congressoagua2021/docs/15ca\\_64.pdf](https://www.aprh.pt/congressoagua2021/docs/15ca_64.pdf) Acesso em: 15 jul 2021.
- Dutra, V. A. B., Tavares, P. A., Trindade, A. R., Souto, J. I. O., Beltrão, N. E. S., Ribeiro, H. M. C., 2019. Avaliação do estado trófico de um lago para abastecimento público por meio de imagem sentinel-2. *An. do XIX Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto*.
- ESA. European Space Agency, 2020. Resoluções radiométricas dos satélites da missão Sentinel-2 MSI. Disponível: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric>. Acesso: 26 ago. 2020.
- F. Spoto et al., 2012. Overview Of Sentinel-2. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Munich. 1707-1710. Disponível: doi: 10.1109/IGARSS.2012.6351195. Acesso:
- Fraga, Rosiméri S. et al., 2020. Empirical modelling of suspended solids in a subtropical lagoon (Brazil) using linear spectral mixing algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 100380. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100380>.
- Garcia, J. M., Mantovani, P., Gomes, R. C., Longo, R. M., Demanboro, A. C., & do Carmo Bettine, S. (2018). Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. *Sociedade & Natureza*, 30(1), 228-254.
- Guimarães, T. T., 2019. Utilização de imagens de satélite para predição de clorofila-a e sólidos suspensos em corpos d'água: estudo de caso da Represa do Lobo/SP (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2019 Normais climatológicas do Brasil. Disponível :<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=lima/normaisClimatologicas>. Acesso: 23 out. 2019.
- Kohatsu, Márcio Yukihiro et al. Emprego da nanoargila na remoção de ortofosfato em ensaios de bancada: contribuição para a mitigação do processo de eutrofização. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 5, 46-56, 2020.
- Lamparelli, Marta Condé, 2004. Graus de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

- Disponível: 10.11606/T.41.2004.tde-20032006-075813. Acesso:
- Lima, D.L., Motta, J. S., Souza, C. A., Guirra, A P. M., Filhos, A. C. P. (2018). Revisão Bibliométrica sobre Turbidez e Sólidos Suspensos por Sensoriamento Remoto Bibliometric Review about Turbidity and Suspended Solids by Remote Sensing. Anuario do Instituto de Geociencias. 42. 107. 10.11137/2019\_1\_107\_116.
- Lins, R. C., Martinez, J. M., Marques, D. M. L. D. M., Cirilo, J. A., & Fragoso Júnior, C. R., 2018. Variabilidade espaço-temporal da clorofila-a no complexo estuarino-lagunar Mundaú-Manguaba (AL). Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (14.: 2018 nov.: Maceió, AL).[Anais do XIV SRHNE].[Porto Alegre: ABRHidro, 2018].
- LOBO, Felipe de L. et al. Estudo espaço-temporal de florações de cianobactérias no rio Tapajós: monitoramento por sensoriamento remoto e experimento em laboratório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2017. Anais eletrônicos. Campinas, GALOÁ, 2018. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2017/10.23.19.35.43/doc/59234.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2021.
- Lopes, H., Sobral, M. C., Gunkel, G., Candeias, A. L., Melo, G., 2015. Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. Eng sanit ambient 20, 475-484.
- Lopes, F. B., Barbosa, C. C. F., de Moraes Novo, E. M. L., de Carvalho, L. A. S., de Andrade, E. M., & dos Santos Teixeira, A. (2021). Modelling chlorophyll-a concentrations in a continental aquatic ecosystem of the Brazilian semi-arid region based on remote sensing. Revista Ciência Agronômica, 52(2), e20207210.
- Machado, M. T. S., Baptista, G. M. M., 2016. Sensoriamento remoto como ferramenta de monitoramento da qualidade da água do lago Paranoá (DF). Eng sanit ambient 21, 357-365.
- Machado, P. J. O., 2012. Diagnóstico ambiental e ordenamento territorial: instrumentos para a gestão da bacia de contribuição da represa de Chapéu D'Uvas, MG. Niterói. (s.n.), 243.
- Martíni, A. F., De Bona, F. D., Favaretto, N., & Durães, M. F., 2019. Concentração e perda de nutrientes em microbacias hidrográficas agrícolas do planalto médio gaúcho. In Embrapa Trigo-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: WORKSHOP DA REDE DE PESQUISA SOLOVIVO, 2018, Curitiba. Indicadores de qualidade da gestão de áreas Serbeto., L., F., Mendes., G., C., Ribeiro., C., B., M., Pereira., R., O. com sistema plantio direto: palestras e resumos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2019. E-book.(Embrapa Solos. Documentos, 212). p. 196-201.
- Mendonça, J. C. D., 2018. Dinâmica de atributos limnológicos e uso de sensoriamento remoto para estimar as concentrações de clorofila-a em reservatório no Semiárido.
- Narazeth, J. L., 2020. Correlacionando a qualidade da água com o uso e a boertura da terra: um estudo da Bacia de Contribuição da Represa Doutor João Penido, Juiz de Fora (MG) Dissertação (mestrado). 114 f. Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.
- Oliveira, C. S. P.; Fonseca, A. S.; Díaz, C. A.; Santos, W. P. Reflexões sobre o desafio ambiental: níveis de eutrofização e floração de cianobactérias na Bacia Apodi-Mossoró. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.11, n.5, p.519-530, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.005.0047>
- Oliveira, M., 2018. Limnologia da Paisagem com uso de Regressão Geograficamente Ponderada: estudo da qualidade da água na represa de Chapéu D'Uvas, MG. Tese (doutorado). Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Juiz de Fora, MG.
- Pereira, Alessandro Rhadamek Alves et al., 2020. Retrieval and mapping of chlorophyll-a concentration from Sentinel-2 images in an urban river in the semiarid region of Brazil. Revista Ambiente & Água, 15.
- Potes, M., Rodrigues, G., Penha, A. M., Novais, M. H., Costa, M. J., Salgado, R., and Moraes, M. M., 2018. Use of Sentinel 2 – MSI for water quality monitoring at Alqueva reservoir, Portugal, Proc. IAHS, 380, 73–79. Disponível: <https://doi.org/10.5194/piahs-380-73-2018>.
- Rodrigues, G., Potes, M., Costa, M. J., Salgado, R., Penha, A., Novais, M., 2018. Qualidade da água no reservatório de Alqueva através de medições in situ e de detecção remota de satélite. 14º Congresso da água.
- Rudorff, Conrado M. et al., 2007. Análise derivativa de dados hiperespectrais medidos em nível de campo e orbital para caracterizar a composição de águas opticamente complexas na Amazônia. Acta Amaz., Manaus , v. 37, n. 2, 269-280. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672007000200014>. Acesso: 10 set. 2020.
- Santos, P. R. B., Zarzar, C. A., & Sousa, K. N. S., 2018. Avaliação do estado trófico atual do reservatório da Usina Hidrelétrica de Curuá-Una, a mais antiga represa construída na

- Amazônia Central. Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota), 8(4), 45-48.
- Santos, P. R. B., de Sousa, J. S. C., Sousa, K. N. S., de Melo, S., & Pereira, A. C., 2020. Variabilidade espacial-temporal da comunidade fitoplanctônica no reservatório da usina hidrelétrica de Curuá-Una. *Brazilian Journal of Development*, 6(7), 42632-42649.
- Schmitz, M. H., 2020. Sensoriamento remoto orbital para o estudo das interações ambiente-ictiofauna em um reservatório Neotropical (Doctoral dissertation, Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Biologia. Programa de Pós-Graduação em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais.).
- Silva, Daniel Clemente Vieira Rêgo da et al., 2018. Avaliação da eficiência de um índice de estado trófico na determinação da qualidade da água de reservatórios para abastecimento público. *Eng. Sanit. Ambient.* [online]. vol.23, n.4 [cited 2020-08-26], 627-635. Disponível: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522018168445>. Acesso: 24 ago. 2020.
- SNAP. Sentinel Application Platform (SNAP) Software, , 2019 Version 7.0.
- Vassoler, Fábio. Fotobiorreatores tubulares com microalgas aplicados ao tratamento terciário de esgotos sanitários. 2019. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019
- Von Sperling, M., 1996. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. DESA-UFMG.
- Wang, S.; Li, J.; Zhang, B.; Spyrakos, E.; Shen, Q.; Lehmann, K. et al. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index. *Remote Sensing of Environment*, 217, p. 444-460, 2018.
- Wiegand M.C., Piedra J. I. G., Araújo J. C., 2016. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). *Eng Sanit Ambient* 21, 415-424.