



Estimating concentrations of chlorophyll-a and suspended sediments in a continental aquatic ecosystem using remote sensing

Estimativa das concentrações de clorofila-a e sedimentos suspensos em um ecossistema aquático continental utilizando sensoriamento remoto

Nicole Sarah Carvalho Ponte¹, Valéria Severo de Noronha¹, Fernanda Helena Oliveira da Silva², Julyanne Braga Cruz Amaral³, Fernando Bezerra Lopes⁴

Abstract: Water is an important resource for life and as such, its monitoring is essential. The aim of this study therefore was to estimate concentrations of chlorophyll-a and total suspended solids (TSS) using orbital remote sensing data. The study area was the General Sampaio reservoir, located in the Curu River Basin, in the state of Ceará. The concentration of chlorophyll-a and sediments were mapped based on orbital images captured by the Operational Land Imager (OLI) sensor. The images were acquired on 14 September 2017 and 13 June 2018. The chlorophyll-a concentration was estimated using a model employing a ratio of the blue (450-510 nm) and green (530-590 nm) bands, and the TSS concentration was estimated from the red band (640-690 nm) of the OLI sensor. The chlorophyll-a concentration in September 2017 varied from 37.03 to 43.0 mg L⁻¹, and in June 2018 it ranged from 42.9 to 62.2 mg L⁻¹. The TSS concentration in September 2017 varied from 1.8 to 4.2 mg L⁻¹, while in June 2018, a period that corresponded to the highest local rainfall, the variation was greater, between 2.1 and 17.73 mg L⁻¹. The highest concentrations of suspended sediments were seen in the tributaries of the Curu River and the Salvação Stream. It was possible to estimate the concentrations of chlorophyll-a and TSS using orbital images. The reservoir water was classified as eutrophic throughout the study period.

Key words: Eutrophication. Limnology. Pluviometry.

Resumo: A água é um recurso importante para a vida, logo seu monitoramento é essencial. Portanto, objetivou-se estimar as concentrações de clorofila-a e sólidos suspensos totais (SST) utilizando dados de sensoriamento remoto orbital. A área de estudo foi o reservatório General Sampaio, localizado na Bacia do rio Curu, no estado do Ceará. O mapeamento das concentrações de clorofila-a e sedimentos foram realizados com base em imagens orbitais captadas pelo sensor Operational Terra Imager - OLI. As imagens adquiridas referem-se às datas de 14 de setembro/2017 e 13 de junho/2018. A concentração de clorofila-a foi estimada utilizando um modelo que usa uma razão das bandas do azul (450-510 nm) e do verde (530-590 nm) e a estimativa da concentração de SST a partir da banda do vermelho (640-690 nm) do sensor OLI. A concentração de clorofila-a no mês de setembro/2017 variou de 37,03 a 43,0 mg L⁻¹; e para o mês de junho/2018, variou de 42,9 a 62,2 mg L⁻¹. Verificou-se que a concentração de SST, em setembro/2017, variou de 1,8 a 4,2 mg L⁻¹, enquanto em junho/2018, essa variação foi mais elevada, entre 2,1 e 17,73 mg L⁻¹, período que correspondeu à maior pluviometria local. As maiores concentrações de sedimentos suspensos foram observadas nas aflúncias do rio Curu e riacho Salvação. Foi possível estimar as concentrações de clorofila-a e SST utilizando imagens orbitais. A água do reservatório apresentou-se durante todo o período de estudo classificada como eutrófica.

Palavras-chave: Eutrofização. Limnologia. Pluviometria.

*Corresponding author

Submitted for publication on 15/04/2020, approved on 28/05/2020 and published on 31/07/2020

¹Estudante de graduação em Agronomia, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, Brasil. CEP: 60455-970. E-mails: nicolle.ncsp@hotmail.com; valeriasevero29@gmail.com

²Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: fernandahelena@alu.ufc.br

³Mestranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: julyanne_braga@hotmail.com

⁴Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: lopesfb@ufc.br

INTRODUCTION

Water is an essential resource for the survival of the planet, as it meets all the needs of man (SOUZA *et al.*, 2014). However, this resource is threatened by human activities that affect its quality and availability. In the semi-arid region of Brazil, the quantity and quality of the water are negatively affected by climate characteristics and anthropogenic action, such as the removal of riparian forest and soil degradation, which accelerates the process of siltation, influencing trophic levels and consequently making the resource unfit for consumption.

Environmental and economic damage from the accumulation of sediment in rivers and reservoirs can be great and extremely difficult to remedy, especially in arid and semi-arid regions (ICOLD, 1989).

The total amount of suspended sediments (TSS) is an important limnological variable in assessing water quality, and is related to anthropogenic activities harmful to the environment (SANTOS *et al.*, 2011), since the entrainment and deposition of these particles is linked to the presence of sediment loads in the reservoir. In addition to affecting trophic levels and the presence of chlorophyll-a, high concentrations of TSS cause the silting up of rivers and reservoirs, which results in a reduction in the volume of water available to the population (ARAÚJO, 2003). Sediment deposition in reservoirs reduces the transparency of the water, preventing the entry of light and inhibiting photosynthetic activities, besides contributing to the entry of nutrients that promote eutrophication (ALMEIDA *et al.*, 2016).

The process of eutrophication is a phenomenon which is mainly caused by the enrichment of phosphorus and nitrogen that are carried via soil colloids, favouring the growth of cyanobacteria, phytoplankton biomass and macrophytes. This process also causes the death of fish due to reduced oxygen in the water, directly affecting the diet of the population. According to Lopes *et al.* (2014a), chlorophyll-a is the principal pigment that functions as an indicator of the trophic state index of a water body. This pigment is used for evaluating the impact of contaminants dumped in aquatic environments (BATISTA *et al.*, 2014). Another source of nutrients that favours this process is the presence of fish farms in the reservoir, which cause an increase in the chlorophyll concentration (ANDRADE *et al.*, 2020).

INTRODUÇÃO

A água é um recurso imprescindível para a sobrevivência do planeta, visto que atende a todas as necessidades humanas (SOUZA *et al.*, 2014). Contudo, este recurso é ameaçado por atividades antrópicas que afetam sua qualidade e disponibilidade. No semiárido brasileiro, a quantidade e a qualidade das águas são afetadas negativamente por características climáticas e ações antrópicas, como a retirada da mata ciliar e a degradação do solo, que aceleram o processo de assoreamento, influenciando no seu grau de trofia e, conseqüentemente, tornam o recurso impróprio para o consumo.

Os danos ambientais e econômicos devido à acumulação de sedimentos nos rios e reservatórios podem ser grandes e de extrema dificuldade de remediar, principalmente em regiões áridas e semiáridas (ICOLD, 1989).

Os sedimentos suspensos totais (SST) são uma variável limnológica importante na avaliação da qualidade da água e relacionam-se com as atividades antrópicas prejudiciais ao ambiente (SANTOS *et al.*, 2011), pois o carreamento e a deposição dessas partículas são ligados à presença de cargas no reservatório. Além de afetar o grau de trofia, assim como a presença de clorofila-a, altas concentrações de SST provocam o assoreamento dos rios e reservatórios, o que ocasiona uma redução no volume de água disponível para a população (ARAÚJO, 2003). A deposição de sedimentos nos reservatórios diminui a transparência da água, o que impede a entrada de luz e inibe as atividades fotossintéticas, além de contribuir para a entrada de nutrientes que promovem a eutrofização (ALMEIDA *et al.*, 2016).

O processo de eutrofização é um fenômeno ocasionado pelo enriquecimento, principalmente, de fósforo e nitrogênio que são carreados através dos coloides do solo, favorecendo o crescimento de cianobactérias, da biomassa fitoplanctônica e macrófitas. Esse processo também ocasiona a morte dos peixes devido a redução do oxigênio na água, o que afeta diretamente a alimentação da população. De acordo com Lopes *et al.* (2014a), a clorofila-a é o principal pigmento que funciona como indicador do índice de estado trófico de um corpo d'água. Esse pigmento é utilizado na avaliação dos impactos de contaminantes despejados nos ambientes aquáticos (BATISTA *et al.*, 2014). Outra fonte de nutrientes que favorece esse processo é a presença de pisciculturas no reservatório, que causa o aumento da concentração de clorofila (ANDRADE *et al.*, 2020).

In view of the above, monitoring water quality is important and necessary, as it aids in managing the resource by allowing essential and strategic information to be obtained. Remote sensing offers techniques through which water resources can be monitored in various areas of difficult access, and on different temporal and spatial scales, where the data can make this process more profitable, efficient and fast, in addition to being more easily available for monitoring in countries with limited financial resources, where the collection and quality analysis of water for human consumption and supply is not regularly carried out (LOPES *et al.*, 2014b).

The use of remote sensing data in aquatic ecosystems has been discussed and applied in the development of models for the remote estimation of optically active constituents (LE *et al.*, 2013; NOVO *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014b; WU *et al.*, 2015; LOPES *et al.*, 2016; HA *et al.*, 2017).

Remote sensing data is therefore essential for assessing the dynamics of aquatic systems, such as eutrophication and increased sediment concentration (LOPES *et al.*, 2016). As such, the aim of this study was to estimate the concentrations of chlorophyll-a and Total Suspended Solids (TSS) using orbital remote sensing data, and evaluate the classification of the trophic state index relative to chlorophyll-a.

MATERIAL AND METHODS

The study was carried out in the General Sampaio reservoir (Figure 1), which has a capacity of 322.2 hm³ and is located in the hydrographic basin of the Curu River in Ceará. According to the Environmental Inventory of COGERH (2011), the climate in the district of General Sampaio under the Köppen classification is type BSh'w': hot semi-arid, with rainfall predominantly in the autumn and mean temperatures greater than 18 °C. Rainfall distribution is very irregular, and there is little cloud. In addition, insolation and evaporation are high. Based on the regional handbook for the Curu basin, the historical mean annual rainfall is 817 mm, while annual evaporation is 1,899 mm.

The predominant classes of soil around the reservoir are Chromic Luvisols and Litholic Neosols, presenting typical shrub-like vegetation in patches that are either more or less dense. Plant cover in the area around the reservoir is poorly preserved, with about 16.17% of the area of the hydrographic basin having no plant cover (COGERH, 2011). In addition, due to anthropogenic action, the forest has undergone deforestation for firewood, subsistence farming, grazing, or even urbanisation, activities that are common near the city of General Sampaio (COGERH, 2011).

Nesse sentido, o monitoramento da qualidade da água é importante e necessário, pois auxilia na gestão do recurso, já que permite obter informações essenciais e estratégicas. O sensoriamento remoto oferece técnicas capazes de monitorar os recursos hídricos em distintas áreas de difícil acesso e diferentes escalas de tempo e espaço, seus dados podem tornar este processo mais rentável, eficiente e rápido, além de ser mais acessível para o monitoramento em países com baixo recurso financeiro, em que a realização de coletas e análises da qualidade da água para o consumo e abastecimento humano não é realizada periodicamente (LOPES *et al.*, 2014b).

Os dados de sensoriamento remoto em ecossistemas aquáticos têm sido discutidos e aplicados no desenvolvimento de modelos para estimativa remota dos constituintes opticamente ativos (LE *et al.*, 2013; NOVO *et al.*, 2013; LOPES *et al.*, 2014b; WU *et al.*, 2015; LOPES *et al.*, 2016; HA *et al.*, 2017).

Portanto, os dados de sensoriamento remoto são essenciais para avaliar a dinâmica em sistemas aquáticos, tais como a eutrofização e o aumento da concentração de sedimentos (LOPES *et al.*, 2016). Dessa forma, objetivou-se estimar as concentrações de clorofila-a e Sólidos Suspensos Totais (SST) utilizando dados de sensoriamento remoto orbital e avaliar a classificação do Índice de Estado Trófico referente à clorofila-a.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no reservatório General Sampaio (Figura 1), com capacidade de 322,2 hm³, que está localizado na bacia hidrográfica do Rio Curu, Ceará. Segundo o Inventário Ambiental da COGERH (2011), o clima do município de General Sampaio caracteriza-se como BSh'w', na classificação de Köppen, semiárido quente, com chuvas predominantes em outono e temperaturas médias acima de 18 °C, e segundo esta classificação, existe grande irregularidade na distribuição das chuvas e baixa nebulosidade. Além disso, os índices de insolação e evaporação são elevados. De acordo com o caderno regional da bacia do Curu, a média histórica da precipitação pluviométrica anual é de 817 mm, enquanto a evaporação anual é de 1.899 mm.

As classes de solos predominantes no entorno do reservatório são Luvissolos Crômicos e Neossolos Litólicos, onde apresenta típica vegetação de caatinga arbustiva, em manchas mais ou menos densas. A área de entorno do açude encontra-se com sua cobertura vegetal pouco preservada, e cerca de 16,17% da área da bacia hidrográfica sem cobertura vegetal (COGERH, 2011). Além disso, devido às ações antrópicas, a mata tem sofrido com o desmatamento para obtenção de lenha, cultivo de subsistência, pastoreio, ou ainda, para urbanização, atividades estas notoriamente vistas nas adjacências da cidade de General Sampaio (COGERH, 2011).

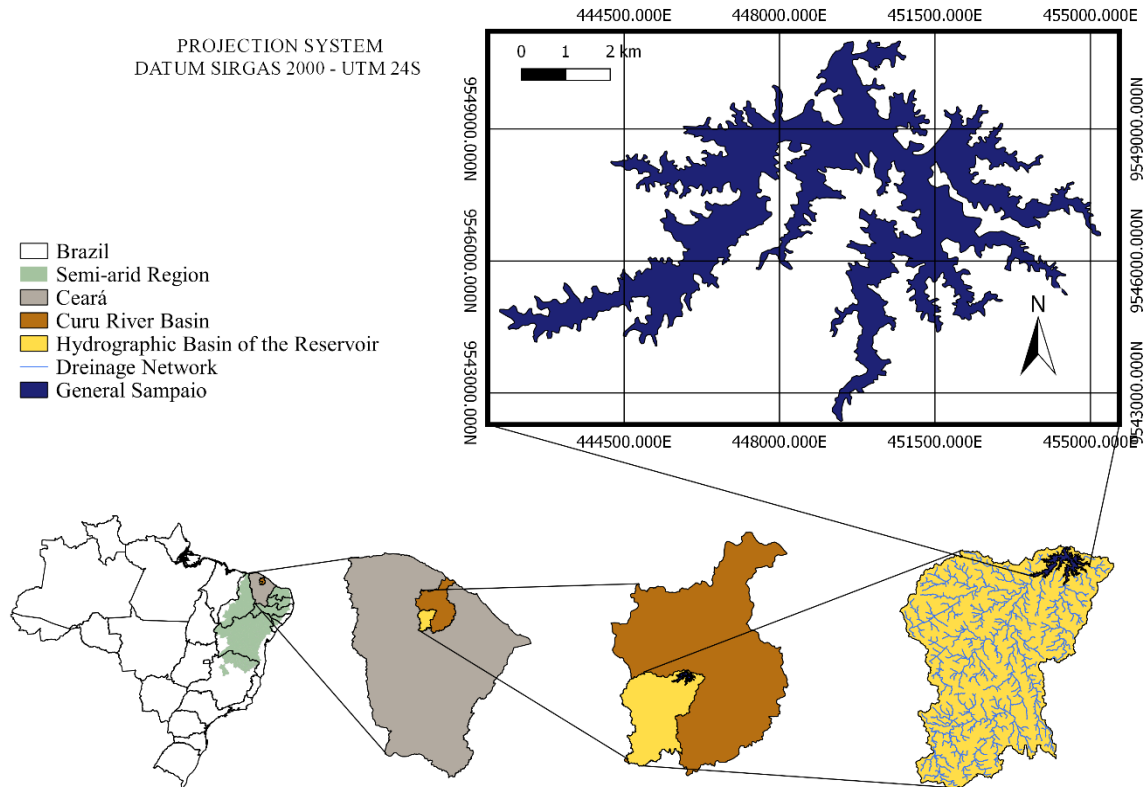


Figure 1 - Location of the General Sampaio reservoir, Ceará.

Figura 1 - Localização do reservatório General Sampaio, Ceará.

Estimating and spatialising concentrations of chlorophyll-a and total suspended sediments was based on orbital images captured by the OLI sensor installed on board the Landsat-8 satellite and available from the website of the United States Geological Survey (USGS). The images were captured on 14 September 2017 (September 2017) and 13 June 2018 (June 2018), and represent two periods of different temporal behaviour, the dry and rainy season respectively.

A radiometric calibration of the images (Equation 1) was carried out, followed by atmospheric correction using the Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) algorithm of the Environment for Visualising Images (ENVI) software, employing the Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance model (MODTRAN). Radiance data was considered as the input. A single scale factor of 10, aerosol scale height of 0.28 km, and CO₂ rate of 400 ppm were used, employing the tropical atmospheric model. Visibility is a factor that can be estimated from the image itself, by analysing any dark pixels found. Before running FLAASH, it is important to define these parameters.

A estimativa e espacialização das concentrações de clorofila-a e sedimentos suspensos totais foram realizadas com base em imagens orbitais captadas pelo sensor OLI, instalado a bordo do satélite Landsat-8 e disponibilizadas na página da United States Geological Survey (USGS). O imageamento ocorreu nas seguintes datas: 14 de setembro do ano de 2017 (setembro/2017) e 13 de junho do ano de 2018 (junho/2018), sendo estas representativas de dois períodos com comportamentos temporais diferentes, o período seco e o chuvoso, respectivamente.

Foi realizada a calibração radiométrica (Equação 1) das imagens e depois a correção atmosférica pelo algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH), presente no programa Environment for Visualizing Images (ENVI), usando o modelo Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance (MODTRAN). Considerou-se o dado de radiância como entrada. Empregou-se o fator de escala (*single scale factor*) 10, altura de escala do aerossol (*aerosol scale height*) de 0,28 km e taxa de CO₂ de 400 ppm. Para o modelo atmosférico, utilizou-se o tropical. A visibilidade é um fator que pode ser estimado pela imagem em si, analisando os pixels escuros encontrados. Antes de executar o FLAASH, é importante definir estes parâmetros.

$$L\lambda = ML * Q_{cat} + Al \quad (1)$$

where: L : spectral radiance at the sensor aperture in Watts/(m² * sr * μm); ML : multiplicative band rescaling factor; Q_{cat} : band-specific additive rescaling factor; Al : DN value quantised by a level 1 pixel.

To obtain the values for water reflectance, the following equation was used:

$$Rrs(\lambda) = \rho_p \left(\frac{L_w(\lambda) - rL_{sky}(\lambda)}{\pi L_p} \right) \quad (2)$$

where: ρ_p : reflectance of the reference panel; $L_w(\lambda)$: brightness of the water visualisation; $rL_{sky}(\lambda)$: brightness of the sky measured sequentially at 40-45° nadir and zenith respectively, and the sun at azimuth 135° [32]; π : reflectance of the air-water interface, with a value of 0.022; and L_p - irradiation of the reference panel.

The chlorophyll-a concentration was estimated using the model referenced by Ha *et al.* (2017), equation 3. To apply the model, the Map Algebra function of the ArcGis 10.1 software was used.

$$Chla (\mu\text{g/L}) = 28.1 \cdot e^{0.72 \cdot GrB2} \quad (3)$$

where: Chla - chlorophyll concentration, and GrB2 - ratio of the spectral reflectance of the blue (450-510 nm) and green (530-590 nm) bands of the OLI sensor.

The model proposed by Wu *et al.* (2015) for suspended sediments was used, applying the following Equation (4).

$$CSS = 1.1034 * EXP^{(23.61 * R)} \quad (4)$$

where: CSS: concentration of suspended sediments (mg/L); R: spectral reflectance of the red band (640-690 nm) of the OLI Landsat 8 sensor; Exp: exponential function.

Rainfall data were also used, such as daily rainfall (mm day⁻¹), annual accumulated rainfall (mm yr⁻¹) and the volume of water stored in the reservoir (%) from September 2017 to June 2018. The values for rainfall and volume were obtained from the Hydrological website of the Water Resources Management Company (CEARÁ, 2018).

To determine the Trophic State Index (TSI), Equation 5, as modified by Toledo (1990), was applied to quantify the trophic state of the reservoir water relative to the chlorophyll-a concentration:

$$TSI (CLa) = 10 * \left(6 - \frac{2.04 - 0.69 * \ln CLa}{\ln 2} \right) \quad (5)$$

where: CLa: concentration of chlorophyll a (μg L⁻¹) and ln: natural logarithm.

Classification of the Trophic State Index with the limits established for each trophic state relative to chlorophyll-a are shown in Table 1.

em que, L : Radiação espectral de sensor em abertura em Watts/(m² * sr * μm); ML : fator multiplicativo de redimensionamento da banda; Q_{cat} : Fator de redimensionamento aditivo específico da banda; Al : Valor quantizado pelo pixel de nível 1 em ND.

Para a obtenção dos valores de reflectância da água utilizou-se a seguinte equação:

em que, ρ_p : Reflectância do painel de referência; $L_w(\lambda)$: Brilho da visualização da água, $rL_{sky}(\lambda)$: é o brilho do céu medido sequencialmente a 40-45° de nadir e zênite, respectivamente, e 135° do sol em azimute [32], π : é a interface ar-água reflectância com um valor de 0,022 e L_p : Irradiação do painel de referência.

A concentração de clorofila-a foi estimada pelo modelo referenciado por Ha *et al.* (2017), equação 3. Para a aplicação do modelo foi utilizada a função Map Algebra dentro do software ArcGis 10.1.

em que: Chla - Concentração de clorofila e GrB2 - razão da refletância espectral das bandas do azul (450-510 nm) e do verde (530-590 nm) do sensor OLI.

Para sedimentos suspensos, utilizou-se o modelo proposto por Wu *et al.* (2015), a partir da aplicação da seguinte Equação (4).

em que: CSS: concentração de sedimentos suspensos (mg/L); R: refletância espectral da banda vermelha (640-690 nm) do sensor OLI Landsat 8; Exp: função exponencial.

Foram também utilizados os dados pluviométricos, tais como a precipitação diária (mm dia⁻¹), a precipitação acumulada anual (mm ano⁻¹) e o volume de água armazenado no reservatório (%) para o período de setembro/2017 a junho/2018. Os valores de pluviometria e volume foram obtidos por meio do portal Hidrológico da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (CEARÁ, 2018).

Para a determinação do Índice de Estado Trófico-IET, foi aplicada a Equação 5, modificada por Toledo (1990), para quantificar quanto ao estado trófico das águas do reservatório em relação as concentrações de clorofila-a:

em que: CLa: é a concentração de clorofila a (μg L⁻¹) e ln: logaritmo natural.

A classificação do Índice de Estado Trófico e os limites estabelecidos para cada estado trófico quanto a clorofila-a estão presentes na Tabela 1.

Table 1 - Limits and classification for different levels of the trophic state index**Tabela 1** - Limites e classificação para diferentes níveis de estado trófico

Criterion	Trophic State	Chlorophyll ($\mu\text{g/L}$)
$\text{TSI} \leq 44$	Oligotrophic	≤ 3.81
$44 < \text{IET} \leq 54$	Mesotrophic	3.82 - 10.34
$54 < \text{IET} \leq 74$	Eutrophic	10.35 - 76.06
$\text{TSI} > 74$	Hypereutrophic	> 76.06

Source: Adapted from Toledo (1990).

Fonte: Adaptado de Toledo (1990).

RESULTS AND DISCUSSION

In 2017, the greatest rainfall indices occurred between February and May; the maximum daily rainfall for that period was 74 mm day^{-1} and the annual accumulated rainfall was $701.20 \text{ mm yr}^{-1}$ (Figure 2). The recharge rate of the reservoir was 24.37% of the volume of stored water, and ranged from 1.40% at the start of the rainy season, to 25.77% at the end, these being the minimum and maximum values respectively. Studying water quality in a reservoir in the semi-arid region of Brazil, Ferreira *et al.* (2015) considered the rainy season as having a monthly rainfall greater than or equal to 50 mm.

For 2018, the largest volume of stored water was 22.16% in May, with a minimum of 14.96% in December. The daily rainfall and, consequently the accumulated rainfall, were lower than in 2017, with a total of 532 mm for the year. The recharge rate of the reservoir was only 4.36% of the volume stored in 2018.

The same accumulated rainfall depth of 500 mm in 2017 and 2018 generated a different accumulated volume, of 22.38% for 2017 and only 4.32% for 2018 (Figure 2). These results show that recharging the volume of water stored in the reservoir does not depend only on total rainfall, but also on the intensity and distribution of the rainfall events over time and space.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o ano de 2017, os maiores índices pluviométricos ocorreram entre os meses de fevereiro e maio, a pluviometria diária máxima para esse período foi de 74 mm dia^{-1} e a acumulada anual foi de $701,20 \text{ mm ano}^{-1}$ (Figura 2). O reservatório teve recarga de 24,37% em seu volume de água armazenado, variando de 1,40%, no início do período chuvoso, para 25,77%, ao final do período chuvoso, sendo esses os valores de mínimo e máximo, respectivamente. Em um estudo da qualidade da água em um reservatório do semiárido brasileiro, Ferreira *et al.* (2015) consideraram como período chuvoso aquele que possui precipitação pluviométrica mensal maior ou igual a 50 mm.

Para o ano de 2018, o maior volume de água armazenado foi de 22,16% em maio e o mínimo foi de 14,96% para dezembro. A pluviometria diária e, conseqüentemente, a acumulada foram menores do que para o ano de 2017, totalizando em 532 mm ano^{-1} . O reservatório teve recarga de apenas 4,36% em seu volume de água armazenado para o ano de 2018.

Para uma mesma lâmina precipitada acumulada de 500 mm, nos anos de 2017 e 2018, gerou um volume acumulado diferente de 22,38% para 2017 e de apenas 4,32% para 2018 (Figura 2). Tais resultados mostram que recarga do volume de água armazenada no reservatório não depende apenas do total precipitado, mas da intensidade e da distribuição dos eventos pluviométricos no tempo e no espaço.

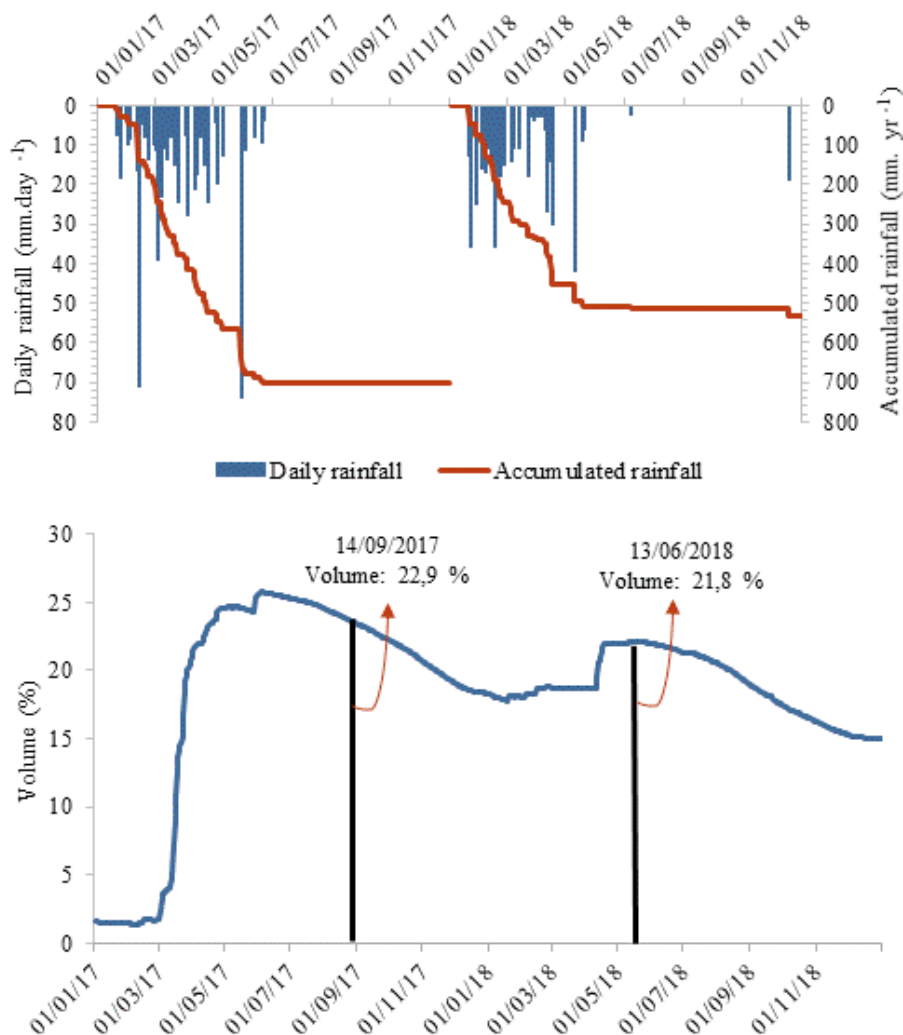


Figure 2 - Daily and accumulated rainfall, stored volume and quota of the General Sampaio reservoir for 2017 and 2018.

Figura 2 - Precipitação pluviométrica diária e acumulada, volume armazenado e cota do reservatório General Sampaio para os anos de 2017 e 2018.

The value of the chlorophyll-a concentration varied from 37.03 to 43.00 $\mu\text{g L}^{-1}$ in September 2017 (Figure 3A). In June 2018, the reservoir showed a greater change in concentration, which reached higher values, ranging from 42.90 to 62.20 $\mu\text{g L}^{-1}$, (Figure 3B). During this period, the volume was 21.80%; this reduction in volume compared to that of the first image, may have contributed to the higher chlorophyll-a concentration. Furthermore, recent rainfall causes nutrients to be carried to the reservoir, increasing the concentration of nutrients responsible for the process of eutrophication.

Os valores das concentrações de clorofila-a variaram de 37,03 a 43,00 $\mu\text{g L}^{-1}$ para setembro/2017 (Figura 3A). Em junho/2018, o reservatório apresentou maior modificação na sua concentração, variando de 42,90 a 62,20 $\mu\text{g L}^{-1}$, atingindo valores mais elevados (Figura 3B). Para esse período, o volume foi de 21,80%, essa diminuição no volume em comparação ao da primeira imagem é um fator que pode contribuir para a maior concentração de clorofila-a. Ademais, a ocorrência da recém passagem das chuvas ocasiona o carreamento de nutrientes para o reservatório, elevando a concentração de nutrientes responsáveis pelo processo de eutrofização.

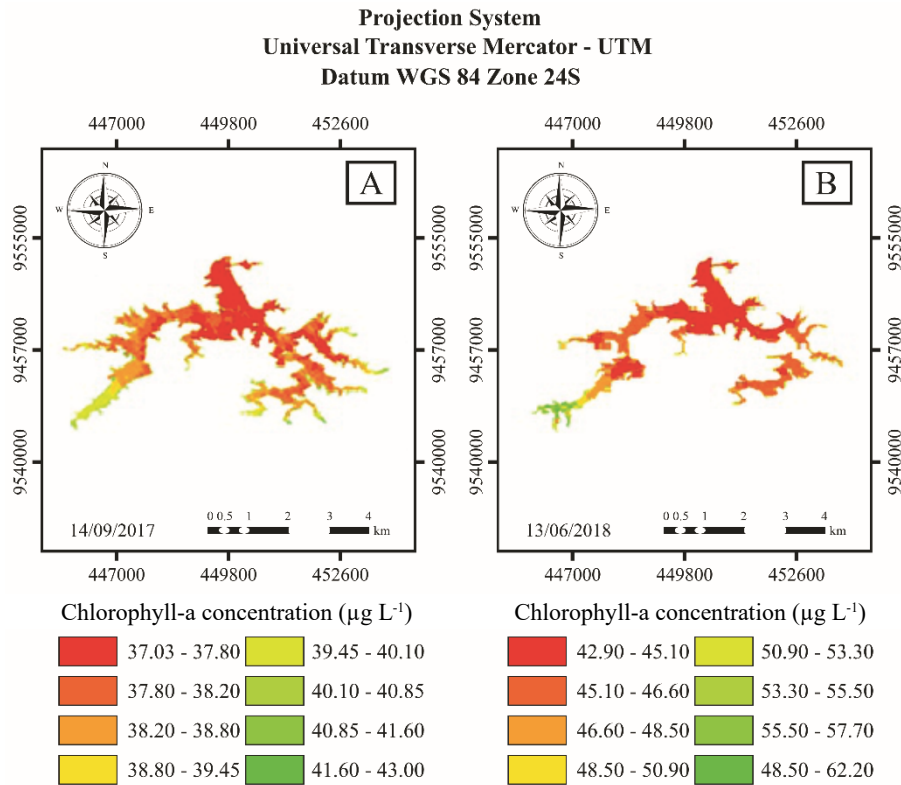


Figure 3 - Estimated chlorophyll-a concentration using the model by Ha *et al.* (2017) on images of the OLI orbital sensor for the second half of 2017 (A) and the first half of 2018 (B).

Figura 3 - Concentração de clorofila-a estimada aplicando o modelo de Ha *et al.* (2017) em imagens do sensor orbital OLI para o segundo semestre de 2017 (A) e o primeiro de 2018 (B).

For Chaves *et al.* (2019), the high values of chlorophyll-a in the reservoirs of Ceará, can be explained by inconsistencies in the water level, which can be caused by periods of drought or flooding. The results obtained by the authors show that during the dry season there was a greater variation in nutrient concentration, however, the greatest value was seen during the rainy season.

The mean chlorophyll-a concentration was $40.01 \mu\text{g L}^{-1}$ in September 2017, and $52.55 \mu\text{g L}^{-1}$ in June 2018; the TSI for the chlorophyll-a concentration on these two dates was 67.29 and 70.00 respectively, and as a result, was classified as eutrophic (Table 1). For the two periods under analysis, based on the classification made available on the COGERH website, the trophic state of the reservoir waters was eutrophic, thereby confirming the results obtained with the orbital remote sensing data. Eutrophication of the water in surface reservoirs in Brazil has been seen in several studies (TOLEDO, 1990; NOVO *et al.*, 2013; BASTISTA *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2014a). The problem of eutrophication is not restricted to Brazil, but is a global problem in water resource management (NYENJE *et al.*, 2010; SCHINDLER, 2012).

Para Chaves *et al.* (2019), elevados valores de clorofila-a em reservatórios do Ceará, são justificados em decorrência das inconstâncias no nível da água, podendo ser ocasionado por períodos de seca e inundações. Os resultados obtidos pelos autores demonstram que no período seco houve maior variação da concentração do nutriente, entretanto, o maior valor foi observado no período chuvoso.

A média de concentração de Clorofila-a foi de $40,01 \mu\text{g L}^{-1}$ para setembro/2017 e de $52,55 \mu\text{g L}^{-1}$ para junho/2018; e o IET para concentração de clorofila-a nessas duas datas foi de 67,29 e 70,00, respectivamente, portanto, classificado como eutrófico (Tabela 1). Nos dois períodos analisados, segundo a classificação disponibilizada no portal da COGERH, o estado trófico das águas do reservatório era eutrófico, confirmando, assim, os resultados obtidos utilizando os dados de sensoriamento remoto orbital. A eutrofização da água em reservatórios superficiais na região brasileira tem sido observada em diversas pesquisas (TOLEDO, 1990; NOVO *et al.*, 2013; BASTISTA *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2014a). A problemática da eutrofização não se restringe apenas à região brasileira, é um problema global para gestão dos recursos hídricos (NYENJE *et al.*, 2010; SCHINDLER, 2012).

The chlorophyll-a concentration varies according to the time of year being analysed, and may be influenced by such factors as agricultural activity, the terrain, human action and rainfall, among others (KAISER *et al.*, 2015).

According to Resolution 357/2005 of the National Environmental Council - CONAMA, the water in the reservoir was not suitable for human consumption, as it had greater values than those allowed. Based on the above resolution, for the reservoir to be classified as class II, which deals with fresh water intended for human consumption, it would need to show values for chlorophyll-a of up to 30.00 $\mu\text{g L}^{-1}$ after conventional treatment.

A more intense presence of chlorophyll-a can be seen in the regions surrounding the reservoir, classified from the green and yellow colours in the image (Figure 3), and related to the presence of macrophytes and other aquatic species. With the rainfall and entrainment of sediments, these aquatic plants tend to proliferate more, forming floating clusters along the banks of the reservoir (MONTEIRO, 2016).

The concentration of total suspended sediments (TSS) in September 2017 varied from 1.8 to 4.2 mg L^{-1} , with a mean value of 3 mg L^{-1} (Figure 4A). In June 2018, the range was greater, from 2.1 to 17.7 mg L^{-1} , with a mean value of 9.90 mg L^{-1} (Figure 4B). The highest concentrations of TSS were seen in the tributaries of the Curu River and Salvação Stream; this is related to the presence of degraded areas in the region, where there is no riparian forest and which are used for setting up pastureland. After the rainy season of 2017, the volume of water stored in the General Sampaio reservoir was reduced by 7.46% in 2017, the result of high temperatures which caused the water to evaporate, as well as the volume released to supply the local population.

There was an increase in the concentration of suspended sediments in the reservoir between the periods under evaluation (Figure 4). Due to the processes of soil erosion, entrainment and deposition, the concentration was higher in June 2018 (Figure 4B), aggravated by the degrading action of man on the environment (LOPES *et al.*, 2011; CHAVES *et al.*, 2019); as a consequence, water sources are being altered (ALMEIDA *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2016; ROCHA *et al.*, 2016; ANDRADE *et al.*, 2020).

Analysing the image from the second semester of 2017 (Figure 4A), it can be seen that values are reduced due to the lack of rainfall in the period immediately prior to the date of the image, a period that favoured sedimentation (Figure 2).

A concentração de clorofila-a varia em função do período do ano analisado, podendo sofrer influência de alguns aspectos como: atividade agrícola, condições de relevo, concentração humana, chuvas, dentre outros fatores (KAISER *et al.*, 2015).

A partir da resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, constatou-se que a água do reservatório se apresentou inadequada para o consumo humano, por possuir valores acima do permitido. De acordo com a referida resolução, para que o reservatório se encaixe na classe II, que trata de águas doces destinadas para o consumo humano, após tratamento convencional, este necessitaria apresentar valores de até 30,00 $\mu\text{g L}^{-1}$ para clorofila-a.

Nota-se maior intensidade na presença de clorofila-a nas regiões de entorno do reservatório, classificadas com os tons verdes e amarelados da imagem (Figura 3), relacionando-se a presença de macrófitas e outras espécies aquáticas. Logo, com as chuvas e o carreamento de sedimentos, essas plantas aquáticas tendem a se proliferar mais, formando aglomerados de massas flutuantes nas margens (MONTEIRO, 2016).

As concentrações de sedimentos suspensos totais (SST) em setembro/2017, sofreram uma variação de 1,8 a 4,2 mg L^{-1} , e média de 3 mg L^{-1} (Figura 4A). Já para junho/2018, a variação ocorrida foi maior, de 2,1 a 17,7 mg L^{-1} e média de 9,90 mg L^{-1} (Figura 4B). As maiores concentrações de SST foram observadas nas aflúncias do rio Curu e riacho Salvação, fato este relacionado à presença de áreas degradadas nessa região, sem mata ciliar, para a implementação de pastagens. Após o período chuvoso de 2017, o volume de água armazenado no General Sampaio reduziu 7,46% no ano de 2017, ocasionado pelas elevadas temperaturas que propiciam a evaporação da água, além da vazão liberada para abastecimento da população local.

Houve incrementos nas concentrações de sedimentos suspensos no reservatório, houve incremento entre os períodos avaliados (Figura 4). Devido ao processo erosivo do solo, ao transporte e sua deposição, as concentrações foram mais elevadas em junho/2018 (Figura 4B), sendo agravada pela ação degradadora do homem sobre o meio ambiente (LOPES *et al.*, 2011; CHAVES *et al.*, 2019) e, conseqüentemente, os mananciais estão sendo alterados (ALMEIDA *et al.*, 2016; LOPES *et al.*, 2016; ROCHA *et al.*, 2016; ANDRADE *et al.*, 2020).

Analisando a imagem do segundo semestre de 2017 (Figura 4A), nota-se que os valores se encontram reduzidos devido à ausência de pluviometria antes da data da imagem, período este que favoreceu a precipitação dos sedimentos (Figura 2).

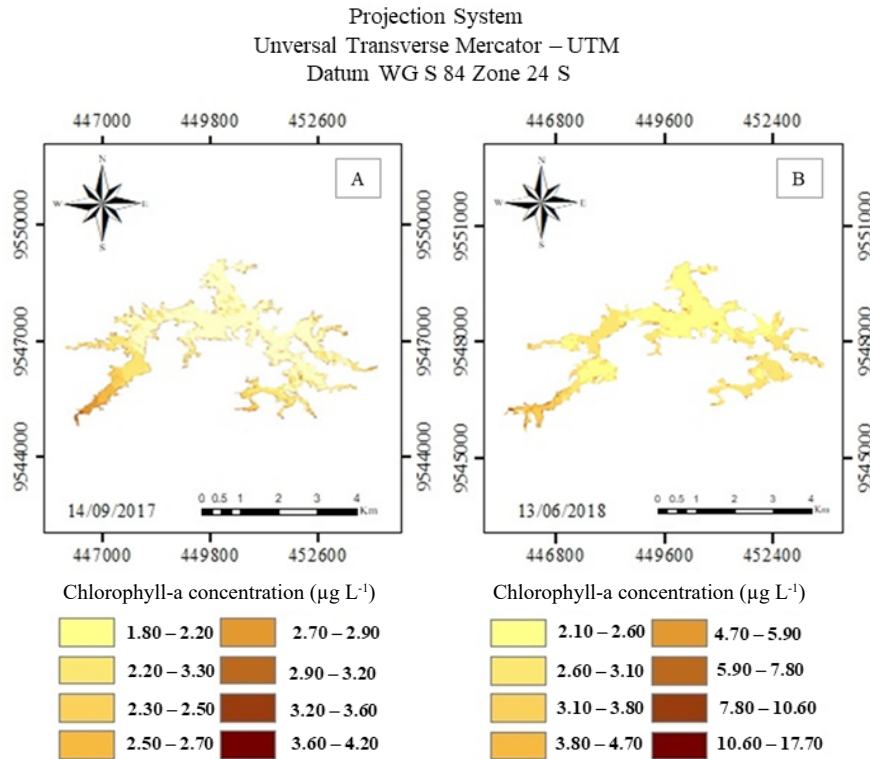


Figure 4 - Estimated suspended sediment concentration using the model by Wu *et al.* (2015) and orbital images from the OLI sensor, for the second half of 2017 (A) and the first half of 2018 (B).

Figura 4 - Concentração de sedimentos suspensos estimada aplicando o modelo de Wu et al. (2015) e imagens orbital do sensor OLI para o segundo semestre de 2017 (A) e o primeiro de 2018 (B).

According to COGERH (2011), the predominant soils in the region of the reservoir are Chromic Luvisols and Litholic Neosols. According to EMBRAPA (2018), Chromic Luvisols are characterised by shallow depth and high-activity clay, which is the principal colloid responsible for the retention of loads such as phosphorus. Litholic Neosols are shallow soils that limit the development of vegetation, especially trees, that have a deeper root system. Both are susceptible to erosion. The lack of barriers around the reservoir can favour the transport of nitrogen via organic matter or agricultural residue. According to Silva *et al.* (2015), the processes of soil erosion are among the main causes of the water courses silting up.

Os solos predominantes na região do reservatório, de acordo com a COGERH (2011), são os Luvisolos Crômicos e os Neossolos Litólicos. Segundo EMBRAPA (2018), os Luvisolos Crômicos são caracterizados pela pequena profundidade e argila de alta atividade, sendo esse o principal colóide responsável pela retenção de cargas, como o fósforo. Já os Neossolos Litólicos são solos rasos que limitam o desenvolvimento da vegetação, principalmente árvores que possuem sistema radicular mais profundo. Ambos são susceptíveis à erosão. A falta de barreiras no entorno do reservatório pode favorecer o transporte de nitrogênio através da matéria orgânica ou de resíduos da agricultura. Segundo Silva *et al.* (2015), os processos erosivos do solo são altamente responsáveis pelo assoreamento dos cursos d'água.

The lack of plant cover results in greater soil-particle detachment caused by the kinetic energy of the rain, which in turn causes entrainment and the deposition of sediments rich in nutrients in the water, and contributes to the process of eutrophication. Greater rainfall intensity implies the greater detachment and transport of sediments. As such, the rainfall becomes more erosive, and influences runoff velocity.

Increases in these attributes are related, since a rise in sediment concentration in the reservoir increases turbidity, and according to Albertoni (2014), the predominance of phytoplankton and a high concentration of nutrients, especially phosphorous, can be seen in waters with this characteristic.

CONCLUSIONS

Rainfall has an influence on the chlorophyll-a and suspended sediment concentrations in an artificial surface reservoir in the semi-arid region due to the entrainment of nutrient-rich sediments that contribute to an increase in the processes of eutrophication and silting;

Considering the limits for chlorophyll-a concentration established by CONAMA for a class II reservoir, the water of the General Sampaio reservoir was considered unfit for human consumption on the dates under analysis. On the dates of the images under study, the reservoir was classified as eutrophic;

The greatest concentrations of suspended sediments are seen at the inlets to the Curu River and the Salvação Stream;

It is possible to estimate the concentrations of chlorophyll-a and suspended sediments using orbital images from the Landsat 8 satellite. It is recommended that models for the semi-arid region of Brazil be developed, calibrated and validated.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors wish to thank the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for granting scientific initiation scholarships to the first two authors and for their financial support of this research. The authors would also like to thank the Projeto Universal do CNPq, process no 439304/2018-0, and the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for granting the master's scholarship to the fourth author.

A ausência de cobertura vegetal causa maior desprendimento de partículas do solo provocadas pela energia cinética da chuva, o que ocasiona carreamento e deposição de sedimentos na água, ricos em nutrientes, que contribui para o processo de eutrofização da água. A maior intensidade de chuva implica em maior desprendimento e transporte de sedimentos. Logo, a chuva torna-se mais erosiva, além de influenciar na velocidade do escoamento superficial.

O aumento desses atributos está relacionado entre si, pois a elevação da concentração de sedimentos no reservatório aumenta sua turbidez e, de acordo com Albertoni (2014), ocorre em águas com essa característica a predominância de fitoplânctons e alta concentração de nutrientes, em especial o fósforo.

CONCLUSÕES

A precipitação pluviométrica influencia nas concentrações de clorofila-a e de sedimentos suspensos em reservatório superficial artificial da região semiárida, devido ao carreamento de sedimentos ricos em nutrientes que contribui para o aumento do processo de eutrofização e assoreamento;

A água do reservatório General Sampaio é considerada imprópria para o consumo humano nas datas analisadas, considerando os limites de concentração de clorofila-a estabelecidos pelo CONAMA para classe II. Para as datas das imagens em estudo o reservatório foi classificado como eutrófico;

As maiores concentrações de sedimentos em suspensão são observadas nas entradas do rio Curu e do riacho Salvação;

É possível estimar as concentrações de clorofila-a e de sedimentos suspensos utilizando imagens orbitais do satélite Landsat 8. Recomenda-se desenvolver, calibrar e validar modelos para a região semiárida do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de iniciação científica às duas primeiras autoras e pelo apoio financeiro à pesquisa, Projeto Universal do CNPq n° do processo 439304/2018-0. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de mestrado a quarta autora.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

- ALBERTONI, F. E.; SILVA, C. P.; TRINTADE, C. R.; FURLANETTO, L. M. Field evidence of the influence of aquatic macrophytes on water quality in a shallow eutrophic lake over a 13-year period. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 26, n. 2, p. 176-185, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2014000200008>
- ALMEIDA, A. M. M.; ANDRADE, E. M.; ALMEIDA, C. L.; LOPES, F. B.; OLIVEIRA, L. C. Avaliação de carbono orgânico total em reservatório no semiárido- Caso Pereira de Miranda. *Revista Geonorte*, v. 7, n. 26, p. 35-47, 2016.
- ANDRADE, M. A.; FERREIRA, K. C. D.; LOPES, F. B.; ARAUJO, I. C. S.; SILVA, A. R. Balance of nitrogen and phosphorus in a reservoir in the tropical semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, v. 51, n. 1, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200020>
- ARAÚJO, J. C. Assoreamento em reservatórios do semiárido: Modelagem e validação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 2, p. 39-56, 2003. DOI: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p39-56>
- BATISTA, A. A.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; IZIDIO, N. S. C.; LOPES, F. B. Sazonalidade e variação espacial do índice de estado trófico do açude Orós, Ceará, Brasil. *Agro@ambiente On-line*, v. 8, n. 1, p. 39, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1362>
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 357 de 17 de março de 2005. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acessado em: 10 de janeiro 2020.
- CEARÁ, **Portal Hidrológico**: Nível pluviométrico diário: < <http://www.hidro.ce.gov.br/acude/nivel-diario> > Acessado em: 22 de dezembro de 2018.
- CHAVES, L. C. G.; LOPES, F. B.; MAIA, A. R. S.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M. Qualidade da água e impactos antrópicos em bacias hidrográficas de açudes no semiárido brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 50, n. 2, p. 223-233, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190026>
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Inventário Ambiental do Açude General Sampaio 2011**. Acessado em: 08 de janeiro de 2020, Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br/publicacoes-inventarios/>.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2018. 355p.
- FERREIRA, K. C. D.; LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; SILVA, G. S. Adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation ao semiárido brasileiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 46, n. 2, p. 277-286, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150007>
- HA, N. T. T.; KOIKE, K.; NHUAN, T.; CANH, B. D.; THAO, N. T. P.; PARSONS, M. Landsat 8/OLI Two Bands Ratio Algorithm for Chlorophyll-A Concentration Mapping in Hypertrophic Waters: An Application to West Lake in Hanoi (Vietnam). *Journal of selected topics in applied Earth observations and remote sensing*, v. 10, n. 11, p. 4919-4928, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2739184>
- ICOLD - International Commission on Large Dams. (1989). Sedimentation control of reservoirs/Maitrise de l'alluvionnement des retenues. **Committee on Sedimentation of Reservoirs. Guidelines**. Paris. Bulletin 67.
- KAISER, E. A.; DOS SANTOS, C. F.; PEREIRA FILHO, W. Influência da precipitação pluviométrica e uso da terra em variáveis limnológicas do reservatório da usina Hidrelétrica Ernestina, RS. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, n. 16, p. 3-22, 2015.
- LE, C.; HU, C.; CANNIZZARO, J.; ENGLISH, D.; MULLER-KARGER, F.; LEE, Z. Evaluation of chlorophyll-a remote sensing algorithms for an optically complex estuary. *Remote Sensing of Environment*, v. 129, p. 75-89, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.11.001>
- LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; BECKER, H.; BATISTA, A. A. Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p. 437-445, 2014a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000400012>
- LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; TEIXERA, A. S.; CAITANO, R. F.; CHAVES, L. C. G. Uso de geoprocessamento na estimativa da perda de solo em microbacia hidrográfica do semiárido brasileiro. *Agro@ambiente On-line*, v. 5, n. 2, p. 88-96, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.503>

- LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13-19, 2014b. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps13-s19>
- LOPES, F. B.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; ANDRADE, E. M.; FERREIRA, F. D. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i2.3482>
- MONTEIRO, F. M. Presença de macrófitas submersas altera a dinâmica do fitoplâncton em reservatórios do semiárido. 2016. CDD 577.6. Dissertação (Mestrado em ciência e tecnologia ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande.
- NOVO, E. M. L. M.; LONDE, L. R.; BARBOSA, C.; ARAUJO, C.; R. Proposal for a remote sensing trophic state index based upon Thematic Mapper/Landsat images. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 3, p. 65-82, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1229>
- NYENJE, P. M.; FOPPEN, J. W.; UHLENBROOK, S.; KULABAKO, R.; MUWANGA, A. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa-A review. **Science of the Total Environment**, v. 408, n. 3, p. 447-455, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.020>
- ROCHA, F. C.; ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; PAULA FILHO, F. J.; FILHO COSTA, J. H.; SILVA, M. D. Physical-chemical determinant properties of biological communities in continental semi-arid waters. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 188, p. 1-15, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-016-5497-7>
- SANTOS, M. G.; SANTINO, M. B. C.; JUNIOR, I. B. Alterações espaciais e temporais de variáveis limnológicas do reservatório do Monjolinho (*campus da Ufscar*). **Journal Oecologia Australis**, v. 15, n. 3, p. 682-696, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4257/oeco.2011.1503.18>
- SCHINDLER, D. W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 1032, p. 1-12, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>
- SILVA, D. C. C.; SALES, J. C. A.; FILHO, J. L. A.; LOURENÇO, R. W. Caracterização morfométrica e suas implicações no acúmulo de sedimentos em reservatórios: o caso da represa Hedberg, Iperó/ SP. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 36, p. 225 - 247, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v36i0.42324>
- SOUZA, J. R.; MORAES, M. E. B.; SONODA, S. L.; SANTOS, H. C. R. G. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **Revista Eletrônica do Prodemá**, v. 8, n. 1, p. 26-45, 2014.
- TOLEDO, J. R. A. P. (1990). Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais. São Paulo, CETESB, 12p.
- WU, G.; CUI, L.; LIU, L.; CHEN, F.; FEI, T.; LIU, Y. Statistical model development and estimation of suspended particulate matter concentrations with Landsat 8 OLI images of Dongting Lake, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 1, p. 343-360, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.995273>