# MONITORAMENTO DE CLOROFILA-A POR MEIO DE SENSORIAMENTO REMOTO: ESTUDO DE CASO PARA O RESERVATÓRIO RIO GRANDE - SÃO PAULO

*Mateus Luiz Demarchi[1] Douglas Stefanello Facco[2] Victor Fernandez Nascimento[3]*

[1] Universidade Federal do ABC (UFABC) , mateus.demarchi@aluno.ufabc.edu.br; [2]UFABC, douglas.s.facco@gmail.com;
[3]Laboratório de Gestão de Riscos - LABGRIs, UFABC , victor.fernandez@ufabc.edu.br

## RESUMO

A baixa amostragem e falta de dados *in-situ* torna crescente o uso de dados de sensoriamento remoto para monitorar variáveis relacionadas à qualidade de água. A clorofila-a (Chl-a) é uma dessas variáveis, sendo um indicador da quantidade de fitoplâncton. Utilizando o aplicativo "Algae MAp", desenvolvido usando o *Google Earth Engine* e imagens do Sentinel-2, foi conduzido um estudo de caso para avaliar as concentrações estimadas de Chl-a, a evolução do estado trófico e sua relação com a precipitação no reservatório Rio Grande, localizado no estado de São Paulo. O erro quadrático médio dos valores estimados foi 21,73 µg/L, elevado ao ser comparado com as classes de estado trófico. Os maiores valores se concentraram no leste do reservatório e foi obtida uma correlação de 75% entre a área eutrófica do reservatório e a precipitação anual indicando uma possível associação entre os fatores.

***Palavras-chave*** — estado trófico, índices espectrais, qualidade de água, google earth engine.

## *ABSTRACT*

*The low sampling and lack of in-situ data have increased the use of remote sensing data to monitor variables related to water quality. Chlorophyll-a (Chl-a) is one of these variables, serving as an indicator of phytoplankton quantity. Using the "Algae MAp" application, developed with Google Earth Engine and Sentinel-2 images, a case study was conducted to assess the estimated concentrations of Chl-a, the evolution of the trophic state, and its relationship with precipitation in the Rio Grande reservoir, located in the state of São Paulo. The root mean square error of the estimated values was 21.73 µg/L, which is high when compared to trophic state classes. The highest values were concentrated in the eastern part of the reservoir, and a 75% correlation was found between the eutrophic area of the reservoir and annual precipitation, indicating a possible association between these factors.*

***Keywords*** — *trophic state, spectral indices, water quality, google earth engine.*

## 1. INTRODUÇÃO

Reservatórios em regiões urbanizadas como o caso do reservatório de Rio Grande, estão sob alta pressão devido à crescente demanda de água, também, por ser um ambiente lêntico, favorece o acúmulo de matéria orgânica [1]. A clorofila (Chl-a) é componente opticamente ativo responsável pelo processo fotossintético, sendo a principal variável indicadora do estado trófico de ambientes aquáticos [2].

O seu monitoramento pode prevenir problemas como a falta de oxigênio na água e a proliferação de cianobactérias tóxicas. A interação entre a luz e os pigmentos fotoativos nas células dos fitoplânctons, como a Chl-a, permite sua estimativa a partir de dados de sensoriamento remoto, com índices espectrais, como o Índice de Clorofila por Diferença Normalizada (NDCI), que pode ser usado para calcular sua concentração e consequentemente o nível de estado trófico do corpo hídrico [3].

A gestão de corpos hídricos enfrenta limitações quando há escassez de dados *in-situ*, os quais são cruciais para monitoramento e planejamento. A ausência de dados adequados afeta a capacidade de compreender as condições atuais e prever mudanças, além de dificultar a implementação de estratégias de gestão eficazes. Ademais, dados *in-situ* são geralmente pontuais, o que pode ser insuficiente para cobrir toda a extensão de um corpo hídrico, exigindo complementos, como dados remotos ou modelagens para uma visão mais abrangente. Dessa forma, para criar tecnologias de monitoramento remoto, o desenvolvimento de algoritmos depende de medições *in situ,* nesse caso das concentrações de Chl-a. Assim, a cobertura espacial e o aumento da frequência de aquisição de imagens tornam o sensoriamento remoto eficaz para auxiliar programas de monitoramento [4].

A plataforma do *Google Earth Engine* (GEE) oferece recursos de computação em nuvem de alto desempenho para processar grandes quantidades de dados geoespaciais, ele foi utilizado para desenvolver o "Algae MAp" utilizado para esse estudo, o que permitiu análises temporais e espaciais das concentrações de Chl-a no reservatório de estudo [3].

O principal objetivo do estudo é utilizar o "Algae MAp", para analisar a distribuição espacial e temporal das concentrações de Chl-a, no reservatório Rio Grande, durante o período de 2016 até 2021, a fim de observar a evolução do estado trófico no corpo hídrico. Para isso foram comparados dados obtidos pela CETESB *in-situ* e dados obtidos a partir do sensoriamento remoto. Também foi avaliada a influência

e correlação da precipitação anual com a área eutrofizada do reservatório obtida pelos valores de Chl-a.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de Estudo

O Reservatório Rio Grande (**Figura 01**), localizado nos municípios de São Bernardo do Campo, Santo André e Ribeirão Pires, é um dos principais braços da represa Billings, ele é separado do restante da represa e possui funções importantes, como uso recreativo, para navegação, irrigação, e principalmente para o abastecimento humano [5].

O reservatório está localizado na UGHRI 6 do Alto Tietê, sendo a região mais populosa do estado de São Paulo. O reservatório é classificado como de Classe 2, pela Resolução CONAMA N° 357, sendo a máxima concentração permitida de Chl-a de 30 mg/m³ [6].

Para as análises foram utilizadas variáveis limnológicas e climáticas dos relatórios da CETESB para Águas Interiores, de 2016, ano que o "Algae MAp" começou a gerar informações até 2021, data do último relatório publicado.

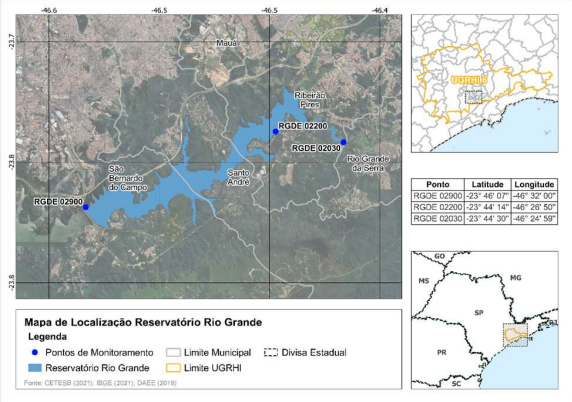



**Figura 01 - Mapa de Localização Reservatório Rio Grande - SP**

### 2.2. Aquisição e processamento de dados

Foram utilizados os resultados gerados pelo "Algae MAp" no intervalo de Janeiro e Dezembro de 2016 até o mesmo período de 2021. O "Algae MAp" utiliza imagens do Sentinel-2, com resolução temporal de 5 dias, as imagens são corrigidas para efeitos atmosféricos e brilho solar a fim de gerar o índice espectral. O NDCI é uma variável intermediária, ao ser comparado com valores *in-situ* de Chl-a, ele pode ser usado para estimar estes valores com base em um modelo de ajuste não linear, calibrado com reservatórios da bacia do Tietê [3].

A correção atmosférica foi feita pelo modelo de Correção Atmosférica Invariante de Satélite (SIAC) implementada no GEE. Após as correções tanto os pixels de massa d'água, quanto de nuvens foram identificados por metodologias existentes do GEE. Finalizada a etapa de pré-processamento, o NDCI foi calculado através da seguinte (**Equação 1**) [7].

$$NDCI = (SR_{705} - SR_{665})/(SR_{705} + SR_{665}) \quad (1)$$

Sendo SR, a reflectância de superfície, dessa forma, os comprimentos de onda do infravermelho próximo ($SR_{705}$) e do vermelho ($SR_{665}$) são usados para o cálculo do NDCI, o SIAC exige muito poder computacional, então as imagens de resolução de 10 metros do Sentinel-2 precisaram ser reamostradas para 30 metros [3].

### 2.3. Estudo de Caso Reservatório Rio Grande

Para alcançar os objetivos deste estudo, foram utilizadas imagens anuais obtidas usando o "Algae MAp", que representam a concentração média de clorofila-a no reservatório Rio Grande, além de imagens para dias específicos com um intervalo de defasagem máxima de até três dias em relação as medições realizadas pela CETESB. Foram usados os dados de precipitação média anual da UGRHI 6, disponíveis nos relatórios da CETESB para obter a correlação entre o volume de chuva e a área eutrófica do reservatório e por fim, foi avaliada a evolução anual do estado trófico, a partir da concentração de Chl-a (**Tabela 01**). Seguindo a resolução CONAMA 357 às águas do reservatório deveriam permanecer no estado eutrófico ou melhor.

**Tabela 01 - Classificação do Estado Trófico para a variável clorofila-a em Reservatórios**

| Categoria (Estado Trófico) | Clorofila-a (mg/m³) |
|---|---|
| Ultraoligotrófico | CL ≤ 1,17 |
| Oligotrófico | 1,17 < CL ≤ 3,24 |
| Mesotrófico | 3,24 < CL ≤ 11,03 |
| Eutrófico | 11,03 < CL ≤ 30,55 |
| Supereutrófico | 30,55 < CL ≤ 69,05 |
| Hipereutrófico | 69,05 < CL |

Fonte: Lamparelli, 2004 [8]

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Comparação dados *in-situ* e dados de sensoriamento remoto

Vale salientar que o número de medições em campo é um fator limitante para as análises e correto manejo dos corpos hídricos. É possível afirmar que através do sensoriamento remoto novas possibilidades são disponibilizadas e expandidas. Analisando a área de estudo foram obtidas 125 medições da concentração de Chl-a com imagens de satélite, ou seja, 125 datas em que o "Algae MAp" registrou dados de Chl-a, mais do que o dobro dos 47 dias medidos *in-situ* pela

CETESB para o período de estudo. Além de obter um maior número de dados, as medições à distância são mais baratas, embora possuam maior grau de incerteza nos resultados.

Durante os seis anos de estudo, apenas 12 medições coincidiram com o intervalo de desfasagem máxima estipulado de até três dias, tendo dados para ambas medições, em campo e remoto. Esses 12 dados resultaram em 30 pontos para a comparação com os três pontos de monitoramento da CETESB (**Figura 02**). Com eles foi possível calcular a correlação entre as duas fontes de informação para a Chl-a, assim como o erro médio quadrático (RMSE) (**Equação 2**).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{i}(chl\ medida, i - chl\ estimada, i)^2} \quad \textbf{(2)}$$

Vale destacar que em alguns dias não foram coletados dados de clorofila-a para todas as estações da CETESB, por isso 30 pontos ao invés de 36.

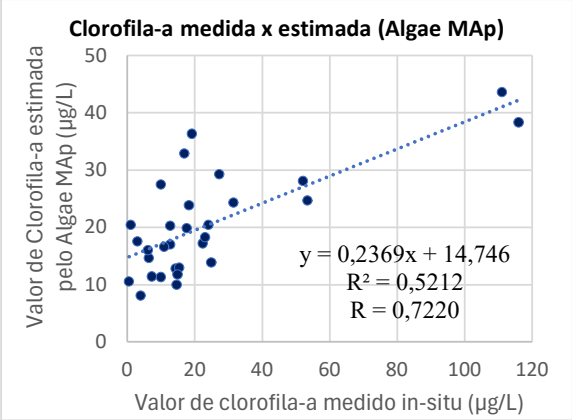



**Figura 02 - Relação entre a concentração de clorofila-a medida *in-situ* e estimada pelo Algae MAp**

O valor de RMSE obtido foi de 21,73 µg/L, considerado elevados visto os intervalos de cada classe do estado trófico, principalmente para os pontos RGDE 02200 e RGDE 02030, isso pode estar vinculado ao fato de que o "Algae MAp" funciona melhor na faixa entre 10 e 70 µg/L, visto nas medições acima de 100 µg/L no ponto RGDE 02200 e nas medições abaixo de 10 µg/L no ponto RGDE 02030, em que o modelo não obteve os resultados esperados. Dessa forma, nota-se que os valores eutróficos são mais frequentes, visto que valores baixos são superestimados e valores altos subestimados. Além disso, a alta amplitude vinculada aos valores de Chl-a podem ampliar o erro calculado. Outro fator de incerteza se refere aos pontos de coleta da CETESB, já que não se sabe se o pixel analisado é o alvo fixo de todas as medições

Por fim, a correlação entre os valores é de 72,2% e o coeficiente de determinação foi de 52,1% o que indica uma correlação positiva moderada entre os valores medidos e estimados informando outros fatores podem estar influenciando a estimativa.

### 3.2. Evolução do estado trófico

A partir da classificação do estado trófico e das médias anuais de Chl-a geradas pelo "Algae MAp" foi possível encontrar a classificação para cada pixel do reservatório, com valores, principalmente no leste, ultrapassando os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357. A evolução das categorias e áreas de estado trófico ao longos dos anos de estudo, segundo o "Algae MAp", são apresentados nas (**Tabela 02 e 03**), respectivamente.

**Tabela 02 Evolução das Categorias de Estado Trófico para o Período de Estudo**

| Classe | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % | % | % |
| Mesotrófico | 0,06 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| Eutrófico | 90,92 | 95,47 | 87,26 | 97,09 | 87,55 | 67,52 |
| Supereutrófico | 8,26 | 3,74 | 12,00 | 2,35 | 11,60 | 28,67 |
| Hipereutrófico | 0,75 | 0,77 | 0,75 | 0,56 | 0,85 | 3,79 |
| **Total** | **100** | **100** | **100** | **100** | **100** | **100** |

**Tabela 03- Evolução em área das Categorias de Estado Trófico para o Período de Estudo**

| Ano | Meso | Eutró | Super | Hiper | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| | (ha) | (ha) | (ha) | (ha) | (ha) |
| **2016** | 0,90 | 1368,36 | 124,38 | 11,34 | **1504,98** |
| **2017** | 0,36 | 1437,66 | 56,34 | 11,52 | **1505,88** |
| **2018** | 0,00 | 1313,82 | 180,63 | 11,25 | **1505,70** |
| **2019** | 0,00 | 1462,32 | 35,46 | 8,37 | **1506,15** |
| **2020** | 0,00 | 1318,14 | 174,60 | 12,78 | **1505,52** |
| **2021** | 0,27 | 1017,27 | 432,00 | 57,06 | **1506,60** |

Nota-se que nenhum pixel foi classificado como ultraoligotrófico ou oligotrófico, e os pontos mesotróficos foram mínimos durante toda a série, no decorrer dos anos (**Figura 03)**. Além disso, existe uma tendência no aumento dos estados supereutrófico e hipereutrófico, sendo 2021, o ano com a maior área dessa classe.

Observa-se que região nordeste do reservatório é a que mais apresentou piora, provavelmente devido ao desague do Ribeirão Pires que pode estar transportando resíduos e matéria orgânica para o reservatório, a região do ponto RGDE 02900, ao leste, adjacente a rodovia Anchieta não apresentou piora e é onde está localizada a captação e a estação de tratamento de água da SABESP.

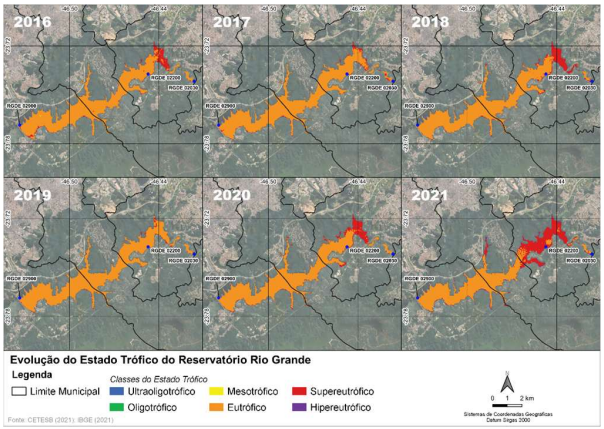



**Figura 03 - Evolução do Estado Trófico no Reservatório Rio Grande**

### 3.3. Correlação com precipitação

Os valores de pluviosidade foram coletados nos relatórios de águas interiores da CETESB para UGRHI 6 [2], e estão apresentados na (**Figura 04**) que também contém as áreas da categoria eutrófica.

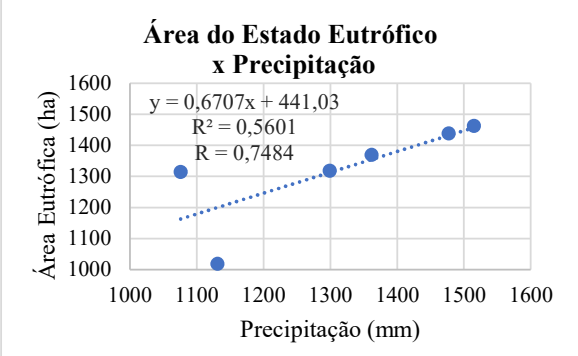



**Figura 04 - Relação entre Estado Trófico e Pluviosidade**

A partir da evolução dos índices de estado trófico foi calculada a correlação entre ambas variáveis e resultou-se em uma correção (r) forte de aproximadamente 75%.

A quantidade de chuva pode afetar a concentração de nutrientes e sedimentos que são carreados para os reservatórios, os dados mostram que mais precipitação pode aumentar a quantidade de Chl-a no reservatório Rio Grande, o que pode influenciar o crescimento e a atividade de organismos fotossintéticos. De qualquer forma é importante ressaltar que outros fatores podem influenciar no aumento ou redução da concentração de Chl-a nos reservatórios, como a temperatura, quantidade de luz solar, oxigênio dissolvido e lançamentos de matéria orgânica.

## 4. CONCLUSÕES

O monitoramento *in-situ* de reservatórios ou por imagens remotas é fundamental para análise e manutenção da qualidade da água. Dados de sensoriamento remoto têm crescido nos últimos anos e são importantes para contornar o baixo número de medidas *in-situ*. O "Algae MAp", desenvolvido no GEE, permite estimar a concentração de Chl-a partir de imagens de satélite. No período de estudo nota-se que a frequência dos dados de sensoriamento remoto é mais do que o dobro da quantidade dos dados coletados em campo.

Nos seis anos de análise, há uma tendência no aumento das concentrações de Chl-a no reservatório gerando aumento das áreas dos níveis supereutrófico e hipereutrófico. Também foi constatada uma possível relação com dados de chuva, isso pode ser melhor estudado em trabalhos futuros, para intervalos de tempo maiores, com mais dados, o que pode ser importante visto as mudanças climáticas e aumento de eventos extremos de precipitação.

## 5. REFERÊNCIAS

[1] TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Limnologia. 1ª Ed. São Carlos: Oficina de Textos, 2008.

[2] CETESB, Águas Interiores. Publicações e Relatórios. 2016-2021.

[3] LOBO, F. d. L. et al. AlgaeMAp: Algae Bloom Monitoring Application for Inland Waters in Latin America. Remote Sensing, v. 13, n. 2874, 2021. DOI: 10.3390/rs13152874.

[4] NOVO, Evlyn M. L. de Moraes. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

[5] MARIANI, C. F.; POMPÊO, M. L. M. Potentially bioavailable metals in sediment from a tropical polymictic environment—Rio Grande Reservoir, Brazil. Journal of Soils and Sediments, 8(5), 284–288, 2008. doi:10.1007/s11368-008-0018-0.

[6] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União, Brasília. 2005.

[7] MISHRA, S.; MISHRA, D. R. Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. Remote Sensing of Environment, 117, 394–406, 2012.

[8] LAMPARELLI, M. C. Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia., 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, 2004.