

Monitoramento de clorofila-a em reservatórios em plataformas geospaciais de código aberto: Estudo de caso – fontes de abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)

Chlorophyll-a monitoring in reservoirs on open source geospatial platforms: Case study – public water supply sources in the São Paulo Metropolitan Region (RMSP)

Monitoreo de clorofila-a en embalses en plataformas geoespaciales de código abierto: Estudio de caso – fuentes de abastecimiento público en la Región Metropolitana de São Paulo (RMSP)

Recebido: 03/02/2025 | Revisado: 10/02/2025 | Aceitado: 10/02/2025 | Publicado: 14/02/2025

Fernando Yogi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5487-4246>

Universidade Federal de São Carlos, Brasil

E-mail: fyogi@hotmail.com

Fabio Noel Stanganini

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2497-2395>

Universidade Federal de São Carlos, Brasil

E-mail: fstanganini@ufscar.br

Resumo

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio global que demanda abordagens inovadoras para o monitoramento da qualidade da água. Este estudo objetiva explorar a aplicação do Google Earth Engine (GEE) para monitorar a clorofila-a em represas operadas pela Sabesp, utilizando imagens do satélite Sentinel-2. Foi estimada através do algoritmo OC2_490 e do índice Tri banda (TBDO) em ambientes eutrofizados. Os resultados mostraram variações sazonais significativas, influenciadas por fatores climáticos e atividades humanas. A metodologia empregada possibilitou uma análise detalhada das variações na clorofila-a, essencial para avaliar a dinâmica fitoplanctônica nas represas. Embora algumas represas apresentassem perda de dados, outras forneceram informações robustas, revelando padrões sazonais, com picos notáveis de clorofila-a em junho, possivelmente relacionados a proliferações de algas. A plataforma GEE, com sua capacidade de processamento em nuvem, demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o monitoramento contínuo da qualidade da água em larga escala.

Palavras-chave: Análise temporal; Processamento em nuvem; Clorofila-a; Índices espectrais; Implementação de interface gráfica; Eutrofização.

Abstract

The efficient management of water resources is a global challenge that demands innovative approaches to monitoring water quality. This objective study explores the application of Google Earth Engine (GEE) to monitor chlorophyll-a in dams operated by Sabesp, using images from the Sentinel-2 satellite. It was estimated using the OC2_490 algorithm and the Tri-band index (TBDO) in eutrophic environments. The results showed seasonal variations, influenced by climatic factors and human activities. The methodology used enabled a detailed analysis of variations in chlorophyll-a, essential for evaluating phytoplankton dynamics in dams. Although some representations present missing data, others provided robust information, revealing seasonal patterns, with notable peaks in chlorophyll-a in June, possibly related to algal blooms. The GEE platform, with its cloud processing capability, has been declared an effective tool for large-scale continuous water quality monitoring.

Keywords: Temporal analysis; Cloud processing; Chlorophyll-a; Spectral indices; Graphic interface implementation, Eutrophisation.

Resumen

La gestión eficiente de los recursos hídricos es un desafío global que exige enfoques innovadores para monitorear la calidad del agua. Este estudio objetivo explora la aplicación de Google Earth Engine (GEE) para monitorear la clorofila-a en represas operadas por Sabesp, utilizando imágenes del satélite Sentinel-2. Se estimó mediante el algoritmo OC2_490 y el índice Tribanda (TBDO) en ambientes eutróficos. Los resultados mostraron variaciones estacionales, influenciadas por factores climáticos y actividades humanas. La metodología utilizada permitió un análisis detallado de las variaciones de la clorofila-a, fundamental para evaluar la dinámica del fitoplancton en represas. Aunque algunas representaciones presentan datos faltantes, otras proporcionaron información sólida, revelando patrones estacionales, con picos notables de clorofila-a en junio, posiblemente relacionados con la

proliferación de algas. La plataforma GEE, con su capacidad de procesamiento en la nube, ha sido declarada una herramienta eficaz para el seguimiento continuo a gran escala de la calidad del agua.

Palabras clave: Análisis temporal; Procesamiento en la nube; Clorofila-a; Índices espectrales; Implementación de interfaz gráfica; Eutrofización.

1. Introdução

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio global que requer abordagens inovadoras para garantir a qualidade da água fornecida às comunidades. No contexto do tratamento de água, a medição precisa de parâmetros críticos, como a concentração de clorofila-a, de grande relevância na avaliação da saúde dos corpos d'água. Tradicionalmente, métodos laboratoriais convencionais têm sido empregados para essa medição, mas a eficácia da rotina laboratorial é limitada por disponibilização temporal.

Conforme destacado por Harmel et al. (2023), os métodos tradicionais de amostragem e análise laboratorial são onerosos, consomem tempo e podem não oferecer uma representação abrangente das condições da água. Essas limitações são especialmente evidentes em grandes corpos d'água, onde as variações temporais e espaciais da clorofila-a são significativas.

Neste cenário, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto e monitoramento via satélite surge como uma alternativa promissora. Tais tecnologias oferecem a vantagem de proporcionar observações em amplas áreas geográficas, permitindo uma compreensão mais abrangente das condições da água. Um aspecto particularmente significativo dentro desse domínio é a aplicação dessas tecnologias na análise de dados geoespaciais com foco especial na qualidade das águas, seja em rios, lagos, oceanos ou outras fontes hídricas. Esta abordagem tem se destacado como uma ferramenta poderosa nesse campo emergente. A compreensão dos padrões de qualidade da água é fundamental na gestão dos recursos hídricos na gestão dos recursos hídricos e na avaliação dos impactos ambientais, auxiliando na identificação de áreas de contaminação, na implementação de medidas de conservação e na promoção da saúde pública (Yang et al., 2022)

A energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação, pois ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características (Yang et al., 2022).

Essas interações entre a energia eletromagnética e os objetos terrestres são moldadas pelas complexas propriedades físico-químicas e biológicas desses objetos. Nas imagens e nos dados capturados pelos sensores remotos, essas interações se revelam como padrões distintos e características específicas, permitindo a identificação e a análise detalhada da superfície terrestre. Por exemplo, a composição química de um corpo d'água pode influenciar na forma como ele reflete a luz, possibilitando a distinção entre diferentes tipos de corpos d'água, como lagos, rios ou oceanos. Da mesma forma, a cobertura vegetal em uma determinada área pode ser identificada com base em suas propriedades espectrais únicas. Assim, a interpretação desses dados de sensoriamento remoto não apenas fornece informações sobre a distribuição geográfica dos recursos naturais, mas também ajuda a compreender os processos ecológicos e as interações entre o homem e o ambiente (Zhu, 2022).

As Geotecnologias têm sido fundamentais na compreensão e gestão dos desafios ambientais e climáticos enfrentados pelo nosso planeta (Zhu, 2022). O advento do Sensoriamento Remoto proporciona uma visão sem precedentes da Terra, gerando produtos valiosos, como imagens de satélite e dados LIDAR, que, por sua vez, alimentam o desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e outras ferramentas essenciais.

Além disso, a utilização de Softwares Livres na implementação de projetos destaca-se como uma tendência notável (Pandey, 2022). Ferramentas como QGIS, GRASS GIS e GDAL não apenas oferecem acessibilidade, mas também flexibilidade e uma comunidade ativa de desenvolvedores, promovendo uma abordagem colaborativa e eficiente para o processamento e análise de dados geoespaciais.

Esta convergência de sensoriamento remoto, geotecnologias e softwares livres não apenas enriquece a capacidade de monitoramento, mas também democratiza o acesso a informações críticas, fomentando a tomada de decisões informadas em temas como mudanças climáticas, gestão de recursos naturais e planejamento urbano (Bielenki Jr, & Barbassa, 2012; Pandey et al., 2022; Yang et al., 2022).

No cenário da gestão de recursos hídricos, a importância do Geoprocessamento é evidente, sendo fundamental para monitorar, analisar e gerenciar as dinâmicas complexas dos recursos aquáticos (Pandey et al., 2022). A aplicação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e tecnologias geoespaciais permite uma visualização detalhada de bacias hidrográficas, identificando padrões de uso da terra, fluxos de água e áreas suscetíveis a processos erosivos. Análises promovem a implementação de estratégias direcionadas para a preservação da qualidade da água, prevenção de enchentes e otimização do uso sustentável dos recursos hídricos. Além disso, a integração do Geoprocessamento com modelos hidrológicos contribui para a previsão de eventos extremos e a formulação de políticas eficazes de gestão. Essa sinergia entre Geoprocessamento e gestão de recursos hídricos reforça a necessidade da tecnologia na promoção da sustentabilidade e na proteção dos ecossistemas aquáticos, garantindo uma abordagem multidisciplinar e eficiente para enfrentar as demandas crescentes sobre as fontes de água em épocas de escassez hídrica (Bielenki Jr, & Barbassa, 2012; Yang et al., 2022).

O tratamento de água e o monitoramento da qualidade dos corpos d'água são questões críticas para garantir o abastecimento de água seguro às comunidades. No entanto, a medição precisa de parâmetros como a clorofila-a muitas vezes enfrenta desafios significativos, especialmente quando se trata de análises de séries temporais em larga escala. A clorofila-a, um pigmento presente nas plantas aquáticas, é frequentemente utilizada como indicador de qualidade da água. Altos teores de clorofila-a podem ser indicativos de eutrofização, um fenômeno associado ao enriquecimento excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, na água.

O monitoramento da clorofila-a é essencial para avaliar a saúde dos corpos d'água, permitindo a detecção precoce de eventos de proliferação de algas e a implementação de medidas adequadas de manejo e controle. Nesse contexto, o uso de algoritmos específicos, como o OC2_490, e o índice tri-banda (TBDO) fornecem indicadores robustos sobre a qualidade da água (Pereira-Sandoval et al., 2019), torna-se relevante para calcular os teores de clorofila-a a partir de dados espectrais de satélites, proporcionando uma visão abrangente e eficiente da distribuição espacial desses indicadores.

A determinação do Índice Normalizado de Clorofila-a (NDCI) tem uma abordagem fundamental no monitoramento da saúde dos ecossistemas aquáticos, especialmente quando se trata de avaliar a concentração de clorofila-a na água. O NDCI é calculado com base na diferença entre os comprimentos de onda do espectro eletromagnético, geralmente no verde e no vermelho próximo, onde a clorofila-a apresenta absorção significativa. Essa técnica utiliza a capacidade da clorofila-a de absorver luz para realizar estimativas indiretas de sua concentração na água (Salls et al., 2022).

Ao longo dos anos, o NDCI tornou-se uma ferramenta valiosa para os cientistas que estudam a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Sua utilização permite uma análise remota e não invasiva da distribuição espacial e temporal da clorofila-a em corpos d'água, proporcionando indicadores importantes sobre processos ecológicos, robustecendo análises sobre florações de algas, eutrofização e dinâmica dos ecossistemas aquáticos (Salls et al., 2022).

A determinação precisa do NDCI requer o uso de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução espacial e espectral, bem como um processamento cuidadoso dos dados para minimizar interferências atmosféricas e outras fontes de ruído (Salls et al., 2022). No entanto, uma vez calculado, o NDCI fornece uma medida robusta e confiável da concentração de clorofila-a na água, permitindo aos pesquisadores e gestores ambientais monitorar de forma eficaz a qualidade da água e tomar decisões informadas sobre a conservação e o gerenciamento dos recursos hídricos.

Neste contexto, a relação entre o NDCI e a clorofila-a é de grande interesse, pois permite investigar como variações na concentração de clorofila-a se manifestam nos valores do índice NDCI (Salls et al., 2022). Essa relação oferece uma janela

para compreender os processos que afetam a saúde dos ecossistemas aquáticos.

A criação de séries temporais em sensoriamento remoto, embora seja uma abordagem essencial para compreender as mudanças ao longo do tempo, muitas vezes enfrenta desafios significativos. A natureza iterativa do processo, que envolve etapas repetitivas de recorte e transformações espectrais, pode tornar a tarefa demorada e exigente em termos computacionais. A necessidade de extrair eficientemente subconjuntos de dados ao longo do tempo adiciona outra camada de complexidade, demandando uma organização meticulosa e uma indexação inteligente dos dados de sensoriamento remoto.

Essa complexidade é amplificada pela diversidade dos dados de SR, que podem incluir imagens de diferentes sensores, resoluções espaciais e espectrais. A integração desses dados em uma série temporal coesa requer uma cuidadosa harmonização e calibração para garantir a consistência ao longo do tempo e entre diferentes fontes. Além disso, a variação nas condições atmosféricas e de iluminação ao longo do tempo pode introduzir artefatos nos dados, exigindo correções adicionais e uma avaliação cuidadosa dos resultados.

No entanto, apesar dos desafios, a criação de séries temporais em sensoriamento remoto oferece contribuições no monitoramento das mudanças ambientais, permitindo a análise de tendências, detecção de padrões sazonais e avaliação de impactos de longo prazo. Portanto, investimentos em métodos eficientes de processamento e análise temporal são essenciais para desbloquear todo o potencial dos dados de sensoriamento remoto no monitoramento ambiental.

Estudos ressaltam o potencial do Google Earth Engine (GEE) em diversas áreas da ciência da terra, oferecendo uma plataforma acessível para acesso a produtos de sensoriamento remoto (Gorelick et al., 2018). O GEE, com sua linguagem orientada a objetos em Python e JavaScript, permite o desenvolvimento fácil de rotinas computacionais, eliminando a necessidade de profundo conhecimento em desenvolvimento de aplicativos ou programação web. O Google Earth Engine (GEE) tem emergido como uma plataforma poderosa e acessível para o processamento e análise de grandes volumes de dados geoespaciais, facilitando a implementação de soluções de monitoramento temporais em escalas globais e regionais. O GEE oferece uma infraestrutura robusta de computação em nuvem, que permite o acesso a dados de sensoriamento remoto em tempo real, eliminando a necessidade de infraestrutura local complexa e reduzindo significativamente o tempo e os custos associados à análise de dados.

No setor de saneamento, a falta de investimentos em técnicas avançadas de mapeamento por Sensoriamento Remoto e a aplicação dos índices de vegetação é evidente. A ausência de políticas públicas específicas, os custos elevados e a escassez de profissionais qualificados são obstáculos para o avanço. No entanto, o uso do Google Earth Engine (GEE) oferece uma oportunidade para superar essas barreiras. A plataforma permite o processamento eficiente de grandes volumes de dados geoespaciais e, embora a implementação dependa de especialistas em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, as ferramentas desenvolvidas podem ser replicadas em diversas regiões e setores.

O GEE fornece um vasto ambiente de nuvem com petabytes de dados georreferenciados, incluindo sensores orbitais, aéreos e produtos desenvolvidos por entidades governamentais e de pesquisa. Sua flexibilidade na organização de dados permite comparações temporais detalhadas, essenciais para avaliações de mudanças no uso e ocupação do solo ao longo dos anos. Sua estrutura baseada em uma união de SIG, Web Mapping Service (WMS) e computação em nuvem, permite o acesso, manipulação e processamento em larga escala de maneira a minimizar o custo computacional dessas operações para os usuários, tornando possível seu uso inclusive em plataformas móveis (Gorelick et al., 2018).

Apesar de se mostrar uma poderosa ferramenta, é fundamental possuir conhecimento em Python e JavaScript para explorar todo o potencial do GEE. A plataforma oferece uma API Python para consulta e extração eficiente de dados, abrindo possibilidades para análises climáticas, geofísicas e muito mais em conjunto com outras ferramentas voltadas à Data Science (ciência de dados), como é o caso de modelos de Machine Learning e Deep Learning. Esse conjunto de características facilitam o processo de análise de séries temporais, o posiciona como uma escolha valiosa em estudos hidrometeorológicos,

monitoramento ambiental e planejamento regional. Contudo, é essencial reconhecer os desafios inerentes a manipulação de grandes coleções de imagens, como interferência atmosférica, cobertura de nuvens (Prasai et al., 2021).

Uma aplicação especialmente relevante do GEE é no monitoramento da clorofila-a em reservatórios, um indicador da qualidade da água e da saúde dos ecossistemas aquáticos. A clorofila-a é comumente utilizada tanto como indicador para a presença de algas e indicador de processos de eutrofização, pelo acúmulo de nutrientes na água.

Gorelick et al. (2017), Souza Jr. (2019) e Prasai et al. (2021) respaldam a dimensão do monitoramento temporal e da aplicação de tecnologias como o GEE para a gestão eficaz de corpos hídricos. Logo, compreender as nuances temporais da concentração de clorofila-a não apenas aprimora a compreensão dos ecossistemas aquáticos, mas também embasa decisões informadas para a preservação e tratamento da água.

O trabalho apresentado foca no monitoramento ambiental da qualidade da água, especificamente na detecção de clorofila-a, utilizando imagens de satélite, com ênfase na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). As represas da região, fundamentais para o abastecimento de água, são monitoradas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), e a análise concentra-se em 17 represas estratégicas. As Regiões de Interesse (ROIs) foram selecionadas no Google Earth Engine (GEE), o que facilita o uso de dados geoespaciais e a aplicação de metodologias de sensoriamento remoto. Este estudo objetiva explorar a aplicação do Google Earth Engine (GEE) para monitorar a clorofila-a em represas operadas pela Sabesp, utilizando imagens do satélite Sentinel-2.

2. Metodologia

O estudo trata-se de uma pesquisa de natureza experimental e quantitativa, conforme classificação de Pereira et al. (2018). A metodologia adotada inclui o uso de estatística descritiva simples, utilizando médias de temperaturas e frequências absolutas de precipitação acumulada, conforme descrito por Shitsuka et al. (2014). Esta abordagem permite uma análise detalhada dos dados coletados, garantindo a precisão e a relevância dos resultados obtidos.

2.1 Área de Estudo

A área de estudo abordada neste estudo de caso no Google Earth Engine (GEE) concentra-se em regiões estratégicas para o abastecimento de água na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com enfoque geral para demonstração da ferramenta de Sensoriamento Remoto criada. As represas contempladas nessa análise são elementos fundamentais para o fornecimento de água à população da RMSP, sendo monitoradas de perto pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp). A relevância dessas represas reflete-se no atendimento a milhões de habitantes na RMSP. Com enfoque mais específico analisou-se a aderência de dados laboratoriais de clorofila-a com os dados apresentados da ferramenta criada no GEE na Represa Taiapuêba.

2.2 Regiões de interesse (ROIs)

As Regiões de Interesse, (Region of Interest - ROIs ou Area of Interest - AOIs) definidas nesta aplicação no GEE foram selecionadas com base em uma extensa lista de dezessete represas e (Figura 1). Entre essas represas: Cachoeira da Graça; Jundiá; Biritiba-Mirim; Paraitinga; Pedro Beicht; Pirapora; Paiva Castro; Ribeirão do Campo; Ponte Nova; Taiapuêba; Guarapiranga; Cachoeira da Fumaça; Cachoeira do França; Rio Jaguari; Rio Pedras; Billings e Águas Claras. Essa abordagem permite uma visão abrangente da qualidade da água em diversas localidades, enriquecendo a compreensão dos padrões temporais e espaciais associados a essas áreas.

Essas represas desempenham um papel vital na captação, armazenamento e distribuição de água para a RMSP, sendo essenciais para o abastecimento urbano e industrial. A escolha das ROIs leva em consideração o destaque dessas represas no

contexto hídrico da região, permitindo uma análise aprofundada de fenômenos relacionados à qualidade da água e mudanças ambientais.

O ponto de partida para a interatividade no GEE é o carregamento eficiente de dados geoespaciais, como shapefiles que definem Regiões de Interesse (ROIs) (Figura 1), com as coordenadas limites em SIRGAS 2000, SRC 31983, Fuso 23 S (Tabela 1), fornecidas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) (2024).

Tabela 1 - Localização dos Reservatórios sob gestão da Sabesp.

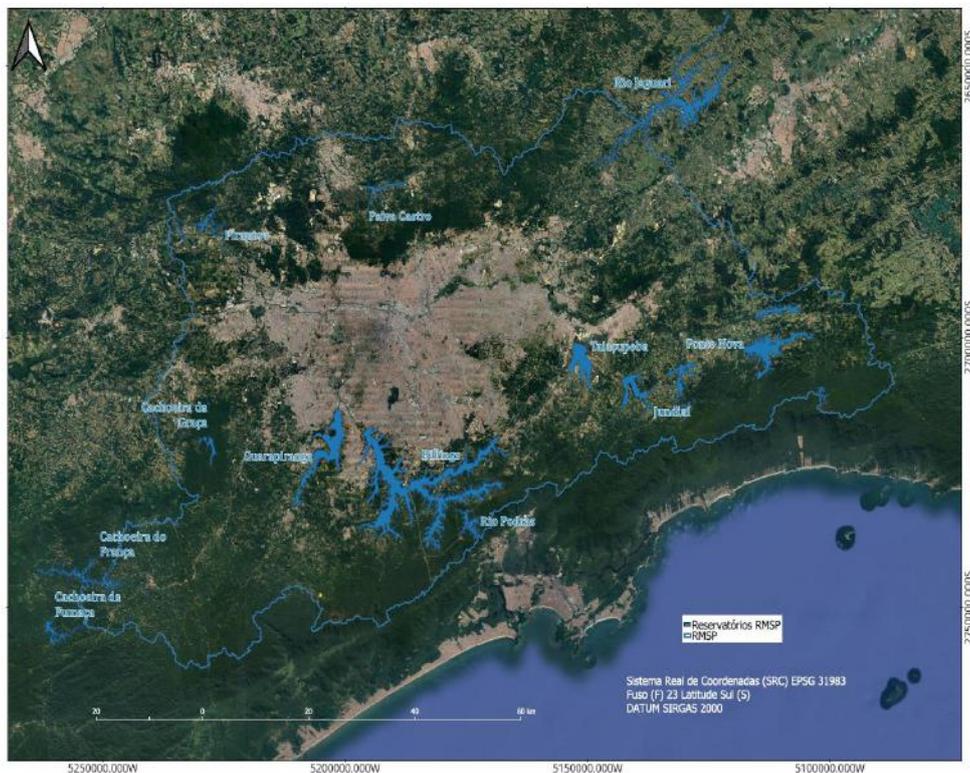
Reservatório	Lon Min	Lon Max	Lat Min	Lat Max	Representação
Cachoeira da Fumaça	276649.43139	269255.24730	7345684.92620	7340704.01300	
Cachoeira França	289762.30660	267556.12060	7356003.57080	7347906.56240	
Rio Jaguari	398272.30069	371693.36040	7453233.67030	7422375.51410	
Cachoeira da Graça	299715.11330	299068.66490	7382660.98750	7381401.41550	
Rio das Pedras	351420.38230	344825.77250	7365307.61760	7359570.00940	
Águas Claras	372243.10827	367422.72837	7385059.532213	7392728.801019	
Jundiaí	377135.98920	383711.59800	7388291.73900	7381052.68230	
Biritba-Mirim	391990.01990	386146.35980	7389720.53060	7380098.15220	
Paraitinga	412100.67610	402679.46280	7399858.61810	7396982.34320	
Pedro Beicht	301304.25820	297549.81310	7376353.79220	7371580.46250	
Pirapora do Bom Jesus	305043.42180	292502.53740	7415872.84720	7404802.68760	
Paiva Castro	328283.21970	337108.48060	7420318.02000	7414530.14130	

Tabela 1 - Localização dos Reservatórios sob gestão da Sabesp (continuação)

Reservatório	Lon Min	Lon Max	Lat Min	Lat Max	Representação
Ribeirão do Campo	416897.03370	414358.38440	7385845.51850	7382367.51390	
Ponte Nova	414159.48890	400754.06560	7395310.20780	7386798.61670	
Taiacupeba	372240.01970	366332.97610	7387861.45547	7392600.23800	
Guarapiranga	315380.92790	325404.20410	7381231.25640	7364286.21870	
Billings	356499.79190	327773.26830	7378510.92230	7357505.91260	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 1 - Localização ROIs -Represas sob gestão da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).



Fonte: Google Imagens e Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) (2024).

2.3 Sensor SENTINEL-2

A metodologia adotada neste estudo incorpora imagens do satélite Sentinel-2, que faz parte do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA). O Sentinel-2 é um sistema de observação terrestre que fornece imagens de alta resolução espacial e espectral. Equipado com um conjunto de sensores multiespectrais, o Sentinel-2 é capaz de capturar informações sobre a superfície terrestre, incluindo dados relacionados à vegetação, qualidade da água e mudanças no uso do solo.

2.4 Coleção de Imagens Sentinel-2

Para realizar a análise temporal da qualidade da água nas Regiões de Interesse (ROIs), foi utilizada a coleção de imagens Sentinel-2, referentes ao ano de 2023, do serviço Copernicus Sentinel-2 Harmonized Surface Reflectance. Essa coleção fornece dados harmonizados e corrigidos atmosféricamente, o que serve como base para a avaliação de parâmetros como a clorofila-a. A análise de 2023 foi conduzida com o propósito de validar a ferramenta desenvolvida no Google Earth Engine (GEE), facilitando o uso da interface gráfica pelo usuário. Para simplificar o preenchimento das datas no `Ui.textbox`, as datas de início e fim foram predefinidas como 2023-01-01 e 2023-12-31, com um slider configurado para 5% de interferência de nuvens.

Conforme o usuário ajusta o slider, aumentando a interferência de nuvens (interferência atmosférica), o número de imagens disponíveis para análise também aumenta, uma vez que o critério para filtragem de nuvens se torna mais permissivo. Dessa forma, mais imagens se tornam disponíveis, mas com maior interferência atmosférica.

As imagens do Sentinel-2A foram disponibilizadas globalmente para usuários fora da União Europeia (UE) desde a sua liberação, marcada em março de 2015. Essa abordagem reflete o compromisso do programa Copernicus, liderado pela Agência Espacial Europeia (ESA) e pela Comissão Europeia, em promover o acesso aberto e global aos dados de sensoriamento remoto. A disponibilidade dessas imagens fora da UE, juntamente com as correções atmosféricas aplicadas durante o pré-processamento, destaca o papel significativo do Sentinel-2A em fornecer informações precisas e confiáveis para uma variedade de aplicações, incluindo monitoramento ambiental, gestão de recursos hídricos e resposta a desastres naturais em escala mundial. Essa iniciativa não apenas amplia o alcance do programa Sentinel, mas também contribui para avanços na pesquisa científica e na tomada de decisões informadas em nível global.

A seleção específica da coleção Sentinel-2 Harmonized Surface Reflectance visa garantir a consistência e a confiabilidade dos dados ao longo do tempo. Essa abordagem é fundamental para análises de séries temporais, permitindo a detecção de padrões sazonais e variações interanuais na qualidade da água nas represas da RMSP.

2.5 Determinação dos Índices de clorofila-a e NDCI

O método adotado para estimar a concentração de clorofila-a baseia-se no algoritmo OC2_490, conforme proposto por Dall'Olmo et al. (2012). Este algoritmo utiliza bandas espectrais específicas do sensor Sentinel-2 para calcular a concentração de clorofila-a, aproveitando as características espectrais dessas bandas.

O processo inicia-se com a aquisição de dados espectrais provenientes das imagens do satélite Sentinel-2, que cobrem a região de interesse, incluindo as represas da RMSP. Como a Agência Espacial Europeia (ESA) disponibiliza dados Sentinel-2 pré-processados no nível 2A, que incluem a correção atmosférica, essa etapa é considerada automaticamente.

Após a obtenção das imagens corrigidas, extrai-se a reflectância de superfície, considerando que a correção atmosférica já foi aplicada nos dados disponibilizados pela ESA. Em seguida, aplica-se o algoritmo OC2_490 para calcular a concentração de clorofila-a, levando em consideração as propriedades espectrais específicas das bandas Sentinel-2.

O resultado final consiste em um mapeamento espacial da concentração de clorofila-a nas represas da RMSP, fornecendo informações relevantes sobre a qualidade da água desses corpos hídricos. As constantes "a," "b," e "c" utilizadas nas equações de regressão para o cálculo da concentração de clorofila-a foram adotadas seguindo os mesmos parâmetros

propostos por Dall'Olmo et al. (2012). O estudo de Dall'Olmo et al. (2012) serviu como referência para a calibração do algoritmo OC2_490, estabelecendo as bases para as relações espectrais que relacionam a reflectância das bandas Sentinel-2 com a concentração de clorofila-a em corpos hídricos.

O índice TBDO água é um indicador direcionado, especialmente em ambientes aquáticos mais eutrofizados. Sua relação com a concentração de clorofila-a é ancorada em princípios bioquímicos estabelecidos, nos quais o aumento da atividade fotossintética e, por conseguinte, a produção de clorofila-a, exercem uma influência direta sobre as propriedades ópticas da água (Pereira-Sandoval, M. et al., 2019). Esta abordagem adicional oferecida pelo índice TBDO permite uma avaliação mais abrangente e sensível das condições ambientais em corpos d'água.

O processo metodológico abrangeu a análise de índices, como os Índices de Cor da Água Normalizado (NDCI), bem como os índices de clorofila-a (chl-a) e clorofila-a eutrófica (chl-a eutrophic). Inicialmente, o código foi escrito em Python, considerando as necessidades específicas de cada índice e a compatibilidade com as bibliotecas e frameworks necessários para a implementação visual. Em seguida, foi realizado um minucioso processo de limpeza e pré-processamento dos dados, garantindo que estivessem prontos para serem utilizados na geração dinâmica de armazenamento em nuvem. Essa etapa foi essencial para garantir a qualidade e a confiabilidade dos dados disponibilizados aos usuários.

Foram incorporadas opções robustas de estilo e personalização, proporcionando aos usuários a flexibilidade de adaptar o visual do componente de apresentação conforme suas preferências e necessidades estéticas individuais. A implementação do slider de nuvens envolveu uma série de etapas que combinam técnicas de programação e design de interface, garantindo uma experiência de usuário fluida e intuitiva.

A fase subsequente concentrou-se no desenvolvimento da estrutura visual do componente de apresentação no Google Earth Engine (GEE). Foi assegurada uma integração harmoniosa entre os elementos gráficos que representam os índices de clorofila-a, juntamente com botões de controles deslizantes e espaço para inserção de dados de entrada. Isso permitiu aos usuários explorar dinamicamente os conjuntos de dados em nuvem, fornecendo uma experiência interativa e informativa.

A fase subsequente concentrou-se no desenvolvimento da estrutura visual dos componentes de apresentação para cada índice, assegurando uma integração harmoniosa entre os elementos gráficos representativos de cada um. Isso permitiu aos usuários explorar dinamicamente os conjuntos de dados. Além disso, a adição de links no mapa complementou o processo, oferecendo uma maneira conveniente para os usuários acessarem as imagens diretamente e simplificando o acesso e a análise dos dados de sensoriamento remoto relacionados aos índices NDCI, chl-a e chl-a eutrófica.

As imagens do Sentinel-2 oferecem uma média resolução espacial, de origem multi-espectrais, com boas respostas para a avaliação da qualidade da água. A metodologia adotada para calcular a concentração de clorofila-a utiliza o algoritmo OC2_490, que trabalha com bandas espectrais específicas. A análise também incluiu o índice Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) e o índice TBDO para ambientes eutrofizados. A interface desenvolvida no GEE oferece uma experiência interativa, com visualizações detalhadas, controles para animações e comparações de índices, simplificando a análise e exploração dos dados.

Após a inserção dos dados, a ferramenta processa as informações em segundos, gerando gráficos e representações visuais dos resultados. Esse tempo de resposta rápido é validado através de comparações com os métodos tradicionais de laboratório realizados pela Sabesp (2024).

Os códigos desenvolvidos para ferramenta envolvem a coleta e o pré-processamento das imagens, seguido pela aplicação de correções atmosféricas e de ruído, essenciais para garantir a precisão dos resultados. Em seguida, são calculados índices de vegetação aquática e o NDCI, que permitem uma análise detalhada da concentração de clorofila-a. Além disso, foram desenvolvidos scripts personalizados para gerar séries temporais contínuas, facilitando a identificação de padrões sazonais e anomalias no comportamento da qualidade da água.

Uma das principais vantagens da ferramenta é sua capacidade de ser personalizada para diferentes regiões e tipos de reservatórios, tornando-a altamente flexível e adaptável. Ela pode ser aplicada em estudos comparativos entre diferentes corpos d'água ou usada em iniciativas de monitoramento específico de áreas críticas. Além disso, a integração com APIs do GEE em Python e JavaScript oferece a possibilidade de exportação e visualização dos dados em formatos acessíveis, como gráficos interativos e mapas georreferenciados.

A taxa de acerto é um indicador fundamental, medindo o percentual de correspondência entre os resultados da ferramenta e os resultados de análises laboratoriais, o que permite verificar a precisão da detecção de clorofila-a. Para garantir que a ferramenta seja capaz de fornecer informações imediatas sobre a qualidade da água. A metodologia inclui a calibração contínua do algoritmo, ajustes conforme as condições regionais e a integração com os sistemas de monitoramento de abastecimento da Companhia.

2.6 Uso e ocupação do Solo

Para analisar o impacto do uso e ocupação do solo na qualidade da água dos reservatórios, foi utilizada o Projeto MapBiomass – Coleção 9.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, que classifica as diferentes coberturas e usos do solo nos municípios onde os reservatórios estão localizados. Os dados foram extraídos para os municípios de Mauá, São Bernardo do Campo, Mairiporã, Ibiúna, Embu-Guaçu, Franco da Rocha, Santana de Parnaíba, Rio Grande da Serra, Santa Isabel, Jacareí, São José dos Campos, Juquitiba, Igaratá, Itapeverica da Serra, Diadema, Ribeirão Pires, Mogi das Cruzes, Santo André, Salesópolis, Bragança Paulista, Vargem, Joanópolis, Piracaia, Miracatu, São Paulo, Suzano, Cotia, Pirapora do Bom Jesus e Biritiba-Mirim.

A coleta de dados incluiu a análise das classes de uso do solo predominantes nessas áreas, com foco especial nas categorias de uso agrícola e áreas de vegetação natural. A agricultura, principalmente em áreas próximas aos corpos d'água, pode afetar a qualidade da água devido ao escoamento superficial, que carrega nutrientes, pesticidas e sedimentos para os reservatórios. O aumento da carga de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, pode provocar a proliferação de algas, resultando em processos de eutrofização que comprometem a potabilidade da água e aumentam os custos de tratamento.

Esses dados de uso e ocupação do solo foram posteriormente correlacionados com os dados de monitoramento da qualidade da água, obtidos através do no GEE. A análise possibilitou avaliar como a cobertura e o uso do solo influenciam as concentrações de clorofila-a

A análise consistiu inicialmente em uma análise geral de todas as represas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), considerando as características de uso e ocupação do solo em seus entornos. Em seguida, foi realizada uma análise mais aprofundada no reservatório de Taiapuê, com enfoque específico no impacto do uso e ocupação do solo nos municípios de Mogi das Cruzes, Suzano, Salesópolis e Biritiba Mirim. A abordagem envolveu a interpretação dos dados referentes às formações florestais, áreas de silvicultura, pastagens, urbanização e outras atividades antrópicas, a fim de compreender a influência dessas dinâmicas sobre a qualidade da água do reservatório e possíveis contribuições para a eutrofização.

2.7 Precipitação

A leitura dos dados de precipitação acumulada foi realizada utilizando a plataforma CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), acessada através do Google Earth Engine (GEE) em resolução diária. A metodologia adotada incluiu uma análise geral das precipitações em todos os municípios da região, seguida por um estudo mais específico focado em Mogi das Cruzes, Biritiba-Mirim, Suzano, Salesópolis, Poá e Ferraz de Vasconcelos. Essa abordagem permitiu uma compreensão abrangente dos padrões de precipitação, assim como a identificação de tendências e variações significativas nas chuvas, que podem impactar a qualidade da água e a dinâmica ambiental local.

2.8 Temperatura

Foi realizada uma análise da correlação entre os dados de temperatura média mensal dos municípios estudados e os meses de floração de algas, com foco especial nos períodos mais críticos de eutrofização. A temperatura é um parâmetro importante para o crescimento de cianobactérias e outras algas, uma vez que temperaturas mais altas tendem a acelerar o metabolismo dessas espécies.

3. Resultados e Discussão

A variação de clorofila-a ao longo do ano de 2023, observada nas imagens de satélite, desempenha um papel crucial na compreensão da dinâmica da presença de algas e fitoplâncton na região de interesse (ROI), complementa Yogi et al (2023), especificamente na Represa Jacaé Jaguarí, inerente aos parâmetros biológicos. A clorofila-a, pigmento encontrado em plantas aquáticas, é responsável pela realização da fotossíntese, estando intimamente relacionada à produtividade primária e à saúde dos ecossistemas aquáticos (Belico, 2017; Pandey et al., 2022).

Durante o ano de 2023, a variação sazonal da clorofila-a pode ser interpretada à luz de eventos específicos e fatores ambientais influenciadores. Como destacado por Belico (2017), picos sazonais de clorofila-a indicam momentos de maior atividade fotossintética, geralmente associados a períodos de crescimento acelerado de algas. Esses picos são sensíveis a condições climáticas, como temperatura e disponibilidade de nutrientes, conforme observado em estudos anteriores.

A influência das condições climáticas nas variações da clorofila-a é evidente na relação entre a quantidade de chuvas e a disponibilidade de nutrientes na água. Conforme apontado por Belico (2017), precipitações intensas podem transportar nutrientes para a água, estimulando o crescimento de algas. Essa interação entre eventos climáticos e a produção de clorofila-a destaca a complexidade das dinâmicas ambientais.

Mudanças na temperatura da água, outro fator influenciador, podem afetar a atividade metabólica das algas, conforme discutido por Belico (2017). A elevação da temperatura, especialmente em ambientes de água doce, pode acelerar os processos biológicos, influenciando diretamente os níveis de clorofila-a.

A interferência humana, como a agricultura nas proximidades da represa, como uma fonte potencial de introdução de nutrientes na água. O excesso de nutrientes pode levar a eventos de eutrofização, resultando em um aumento significativo na produção de algas e, conseqüentemente, na concentração de clorofila-a (Belico, 2017).

Eventos anômalos nos níveis de clorofila-a, como florações de algas nocivas, merecem atenção especial, conforme destacado por Pandey et al. (2022) e Belico (2017). O monitoramento contínuo dessas variações é essencial para avaliar a saúde geral do ecossistema aquático e implementar medidas preventivas quando necessário.

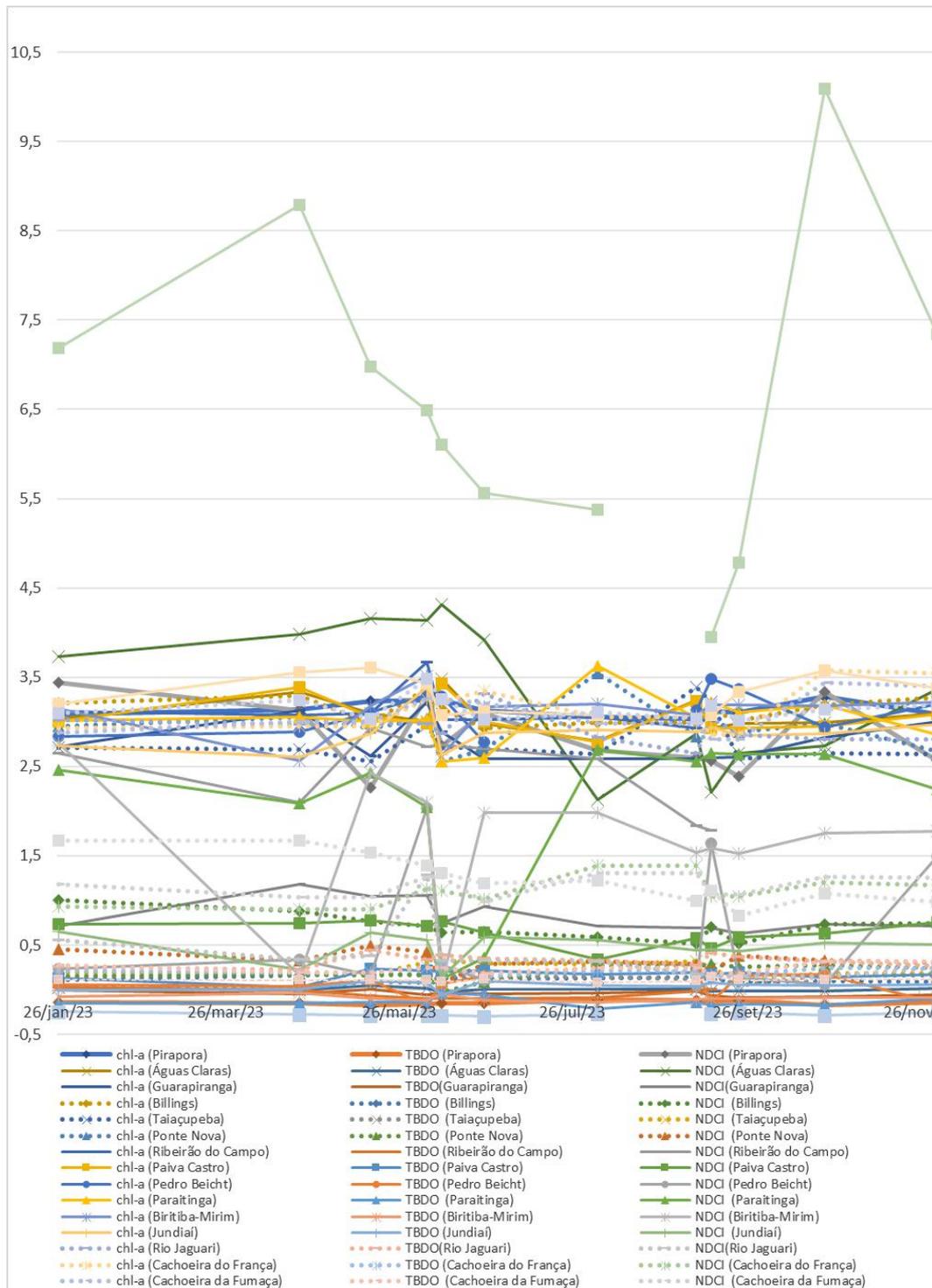
Em síntese, a interpretação da variação de clorofila-a ao longo de 2023 (Figura 2) nas Represas da Sabesp incorpora dados hidrográficos e de uso e ocupação do solo da região. A análise temporal detalhada, combinada com comparações a dados históricos, contribui para uma compreensão mais precisa das dinâmicas e tendências observadas. Para isso, a clorofila-a em 2023 foi analisada em escalas de visualização, permitindo a observação da escala do Modelo do algoritmo OC2_490 para ambientes oligotróficos e uma escala reduzida para o Modelo de cálculo (TBDO) em ambientes eutróficos. Essa abordagem visa fornecer uma análise abrangente e contextualizada da concentração de clorofila-a, utilizando informações relevantes para a região específica das Represas da Sabesp (Pereira-Sandoval et al., 2019).

No cálculo dos índices, o algoritmo OC2_490 pode ser refinado por meio de ajustes específicos nos códigos definidos no GEE para cada um dos reservatórios, levando em consideração as condições regionais e os dados obtidos em campo. Esse processo envolve a calibração do algoritmo para que ele corresponda melhor às particularidades das represas da RMSP, ajustando as bandas espectrais ou até modificando o modelo para melhorar sua acurácia. Também se considera a incorporação de outros índices relevantes, como o NDCI, além de índices específicos para eutrofização, para obter uma avaliação mais

completa da qualidade da água.

O uso da linguagem de programação precisa ser eficiente na implementação dos índices e algoritmos, com Python e elementos de JavaScript, integrando tanto o processamento dos dados quanto a visualização na interface do GEE. Isso permite a criação de uma interface visual interativa, onde os usuários podem ajustar parâmetros como percentual de cobertura de nuvens, datas de análise e diferentes representações gráficas, como mapas e animações. Esses elementos visuais proporcionam uma experiência mais rica e dinâmica, facilitando a compreensão dos dados pelos usuários.

Figura 2 - Variação da clorofila-a nas Represas sob gestão da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A avaliação da variação de clorofila-a ao longo do ano de 2023 nas ROIs, com base em dados de imagens de satélite, fundamental para compreender as dinâmicas ecológicas e ambientais desse ecossistema aquático.

O monitoramento da variação sazonal de clorofila-a revelou padrões significativos ao longo do ano de 2023. A presença de picos sazonais destaca momentos de intensa atividade fotossintética, indicando um aumento na produção de clorofila-a, geralmente associada ao crescimento acelerado de algas. A sazonalidade desses picos está correlacionada a fatores climáticos e ambientais, como temperatura da água, disponibilidade de nutrientes e variações na quantidade de chuvas (Belico, 2017).

Estudos prévios de Belico (2017) apontam que variações na temperatura da água tem um impacto significativo nas dinâmicas da clorofila-a. O aumento da temperatura pode acelerar os processos metabólicos das algas, influenciando diretamente os níveis desse pigmento. No contexto das ROIs, observa-se a necessidade de considerar o papel das mudanças climáticas locais na regulação térmica da água, bem como seus efeitos na produção de clorofila-a.

A análise desses dados fornece uma visão abrangente da saúde e da qualidade da água, especificamente no Rio Jaguari no ano de 2023, destacam-se por variações sazonais, efeitos da eutrofização e possíveis correlações entre diferentes parâmetros. Essas informações são essenciais para a gestão e conservação dos recursos hídricos, fornecem uma base sólida para medidas de monitoramento.

Na represa do Rio Jaguari o monitoramento retornou 13 datas de imageamento, logo, com menos amostras disponíveis, pode ser mais difícil obter uma visão completa das mudanças temporais e sazonais dos parâmetros monitorados. A representatividade dos dados pode ser comprometida, especialmente se os intervalos de tempo entre as amostras forem grandes.

Na represa da Cachoeira da Graça, além de retornar menos amostras, ocorreu a perda de dados, a ausência de dados em 7 de agosto de 2023 pode estar relacionada à fatores relacionados com problemas técnicos na coleta ou registro dos dados.

No reservatório do Rio das Pedras, também com pouca amostragem demonstrou valores de clorofila-a, clorofila-a eutrófica, TBDO e NDCI com uma certa consistência ao longo do tempo. Por exemplo, as medições de clorofila-a variam entre 3.016 e 3.479, o que sugere uma estabilidade relativa ao longo do período de tempo considerado.

Os dados apresentados no reservatório de Águas Claras indicam que a qualidade da água experimentou variações ao longo do ano. Houve picos significativos nos índices de clorofila em 2023, especialmente em junho, observada tendência nas demais represas, o que pode estar associado a eventos de proliferação de algas. A partir de então, há uma tendência de redução nos valores de clorofila-a e clorofila-a eutrófica, sugerindo uma diminuição na quantidade de biomassa aquática. No geral, as flutuações nos valores de NDCI refletem mudanças na presença de matéria orgânica e sedimentos na água, com picos significativos no início do ano e em junho.

Na represa do Paraitinga os resultados apresentaram certo antagonismo, uma quantidade relativamente baixa de chl-a na água (por exemplo, em algumas datas de junho, setembro e julho), o NDCI pode ser alto. Isso pode ser resultado de outros tipos de material particulado na água, como sedimentos ou detritos orgânicos.

Mas, na represa Pedro Beitch, com boa disponibilidade de dados, durante o outono, apesar de contínuo ao longo do período analisado, mostraram-se mudanças nos níveis de chl-a e NDCI, com lacunas nos dados em agosto.

Na represa de Pirapora, considerada uma das fontes de abastecimento mais poluídas da Região Oeste de São Paulo, apresentaram grande disponibilidade e variedade de dados fornecendo uma base sólida para análises detalhadas sobre a qualidade da água e as condições ambientais ao longo do ano de 2023. A diversidade temporal e de medições permite uma compreensão mais completa das dinâmicas aquáticas, os dados cobrem um período extenso, de janeiro a dezembro de 2023, com observações em diferentes meses, semanas e dias.

Na represa do Ribeirão do Campo, ocorreu escassez de dados, nove imageamentos, com dados limitados em termos

de quantidade, com poucas medições coletadas em datas específicas ao longo do ano. Isso pode dificultar uma análise mais detalhada ou conclusões sobre a represa Ribeirão do Campo.

Na represa Taiapuêba, devido à localização recebe grande interferência de cargas antrópicas, os valores de clorofila-a indicam a presença de algas, sem índices extremamente altos. No entanto, variações nos níveis de clorofila-a ao longo do tempo podem estar relacionadas a mudanças na disponibilidade de nutrientes devido ao assoreamento.

Os indicadores principais para validar a ferramenta incluem a precisão na detecção de clorofila-a e o tempo de resposta em tempo real. As métricas destacam a taxa de acerto e o tempo médio de processamento. No caso da represa Taiapuêba, por exemplo, a ferramenta alcançou uma taxa de acerto de aproximadamente 98,78% em uma das medições, demonstrando a eficácia do método.

De acordo com as análises comparativas das análises laboratoriais (Tabela 2), a ferramenta apresentou uma taxa de acerto de aproximadamente 98,78% para o reservatório Taiapuêba, onde o valor real de clorofila-a foi de 89,8 µg/L e a ferramenta indicou 88,704 µg/L. No entanto, em uma análise realizada em 15/07/2024, a taxa de acerto caiu para 67,31%, com a ferramenta indicando 50,9875 µg/L frente a um valor laboratorial de 75,75 µg/L. Em outra data, 03/06/2024, a taxa de acerto foi de 85,39%, com a ferramenta reportando 20,578 µg/L em comparação aos 24,1 µg/L medidos em laboratório.

No reservatório Cachoeira do França, os resultados mostraram uma taxa de acerto mais baixa. Em 27/02/2024, o valor laboratorial foi de 8,515 µg/L, enquanto a ferramenta indicou 2,944 µg/L, resultando em uma taxa de acerto de aproximadamente 34,6%. Em 07/05/2024, o valor real foi de 7,475 µg/L, com a ferramenta apontando 2,944 µg/L, resultando em uma taxa de acerto de 39,4%. Já em 07/08/2024, a taxa de acerto foi de 34,0%, com a ferramenta indicando 3,323 µg/L em comparação ao valor real de 9,77 µg/L.

Em relação ao reservatório Águas Claras, a ferramenta demonstrou sua capacidade de identificar concentrações de clorofila-a abaixo do limite crítico de 4 µg/L. Em 03/07/2024, a ferramenta detectou uma concentração de 3,324 µg/L, o que representa 83,1% do limite crítico. Em 04/06/2024, o valor detectado foi de 3,033 µg/L, correspondendo a 75,825% do valor de referência. Esses resultados sublinham o destaque de ajustes na ferramenta, especialmente em cenários com maior discrepância, mas também ressaltam seu valor em tempo real para monitoramento em áreas críticas.

Em termos de eficiência, o tempo médio de processamento da ferramenta foi avaliado, sendo crucial para garantir que os resultados sobre a qualidade da água sejam disponibilizados rapidamente, permitindo uma resposta mais ágil na gestão dos recursos hídricos. A assertividade da ferramenta desenvolvida no GEE foi avaliada por meio da comparação entre os resultados obtidos remotamente e os dados de campo. A taxa de acerto da detecção de clorofila-a variou entre 34% e 98%, dependendo das condições específicas dos reservatórios e da qualidade dos dados atmosféricos durante a aquisição das imagens. Em reservatórios com alta concentração de clorofila-a, como Taiapuêba, a ferramenta mostrou uma taxa de acerto elevada, atingindo até 98,78%. No entanto, em locais com níveis mais baixos de clorofila-a, como Cachoeira do França, a assertividade foi inferior, com taxas em torno de 34% a 39%. Esses resultados demonstram que a ferramenta é eficaz para áreas eutrofizadas, mas necessita de ajustes e calibrações adicionais em regiões com menor carga de nutrientes.

Uma das principais vantagens da ferramenta implementada no GEE é a significativa redução no tempo de resposta em comparação com os métodos tradicionais de monitoramento de qualidade da água. Enquanto os processos laboratoriais convencionais de análise de clorofila-a podem levar até 20 horas para gerar resultados conforme Sabesp (2024), a plataforma desenvolvida no GEE é capaz de processar e fornecer informações em questão de segundos após o processamento das imagens de satélite. Esse ganho de eficiência não apenas possibilita respostas mais rápidas no monitoramento dos reservatórios, mas também permite a criação de alertas em tempo real, contribuindo para ações preventivas que evitam a degradação dos reservatórios e a proliferação excessiva de algas.

Observando a tendência dos dados das represas, observou-se que os índices de chl-a (eutrófica) apresentaram desvios

significativos em relação às tendências observadas para NDCI e chl-a. Sugerindo que as condições eutróficas, representadas por níveis elevados de clorofila-a, podem ser influenciadas por fatores adicionais que não são totalmente capturados pelos índices NDCI e chl-a convencionais. Enquanto NDCI e chl-a mostraram variações consistentes ao longo do ano, os índices de chl-a (eutrófica) frequentemente indicaram valores discrepantes, particularmente em períodos onde as condições ambientais favoreceram a proliferação de algas. Devido a essas inconsistências, opta-se por desconsiderar os estudos baseados nos índices de chl-a (eutrófica) para evitar interpretações errôneas que poderiam comprometer a análise da qualidade da água.

Observa-se que os níveis de clorofila-a variam ao longo do ano, apresentando diferentes picos e vales. Por exemplo, em junho, os valores de chl-a são notavelmente mais altos, indicando uma possível floração de algas ou aumento na matéria orgânica no rio durante esse período. Essas variações sazonais podem ser influenciadas por fatores como temperatura da água, disponibilidade de nutrientes e condições meteorológicas.

Os valores de chl-a (eutrofizado) também mostram uma tendência similar à chl-a regular, com valores mais altos observados em junho, indicando um possível aumento na eutrofização nesse período. A eutrofização, causada pelo excesso de nutrientes na água, pode levar ao crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas.

A relação entre os parâmetros NDCI e chl-a (clorofila-a) fornece uma percepção sobre a saúde e a qualidade da água dos ambientes lênticos monitorados no período configurado para esta aplicação de Google Earth Engine. O NDCI é uma medida que avalia a concentração de clorofila-a na água com base na diferença entre os comprimentos de onda verde e vermelho do espectro eletromagnético (Gitelson et al., 2008; Hu et al., 2012). Da mesma forma, a clorofila-a é um pigmento presente em algas e cianobactérias, sendo um indicador comum da eutrofização e da saúde dos ecossistemas aquáticos (Gitelson et al., 2011).

Ao analisar os dados fornecidos, observa-se que há uma relação entre os picos de chl-a e as variações nos valores de NDCI. Se os picos de chl-a coincidirem com aumentos nos valores de NDCI, isso pode indicar uma associação entre a presença de clorofila-a e o conteúdo de clorofila estimado pelo NDCI (Gitelson et al., 2008; Hu et al., 2012). Isso sugere que a presença de clorofila-a na água está influenciando os valores de NDCI, o que é consistente com a teoria por trás do cálculo do NDCI como um indicador de clorofila-a.

Por outro lado, se houver discrepâncias entre os picos de chl-a e os valores de NDCI, isso pode indicar outras influências sobre os níveis de clorofila-a na água que não estão sendo capturadas pelo NDCI. Por exemplo, a presença de outras substâncias orgânicas ou inorgânicas na água pode afetar os valores de chl-a independentemente do NDCI.

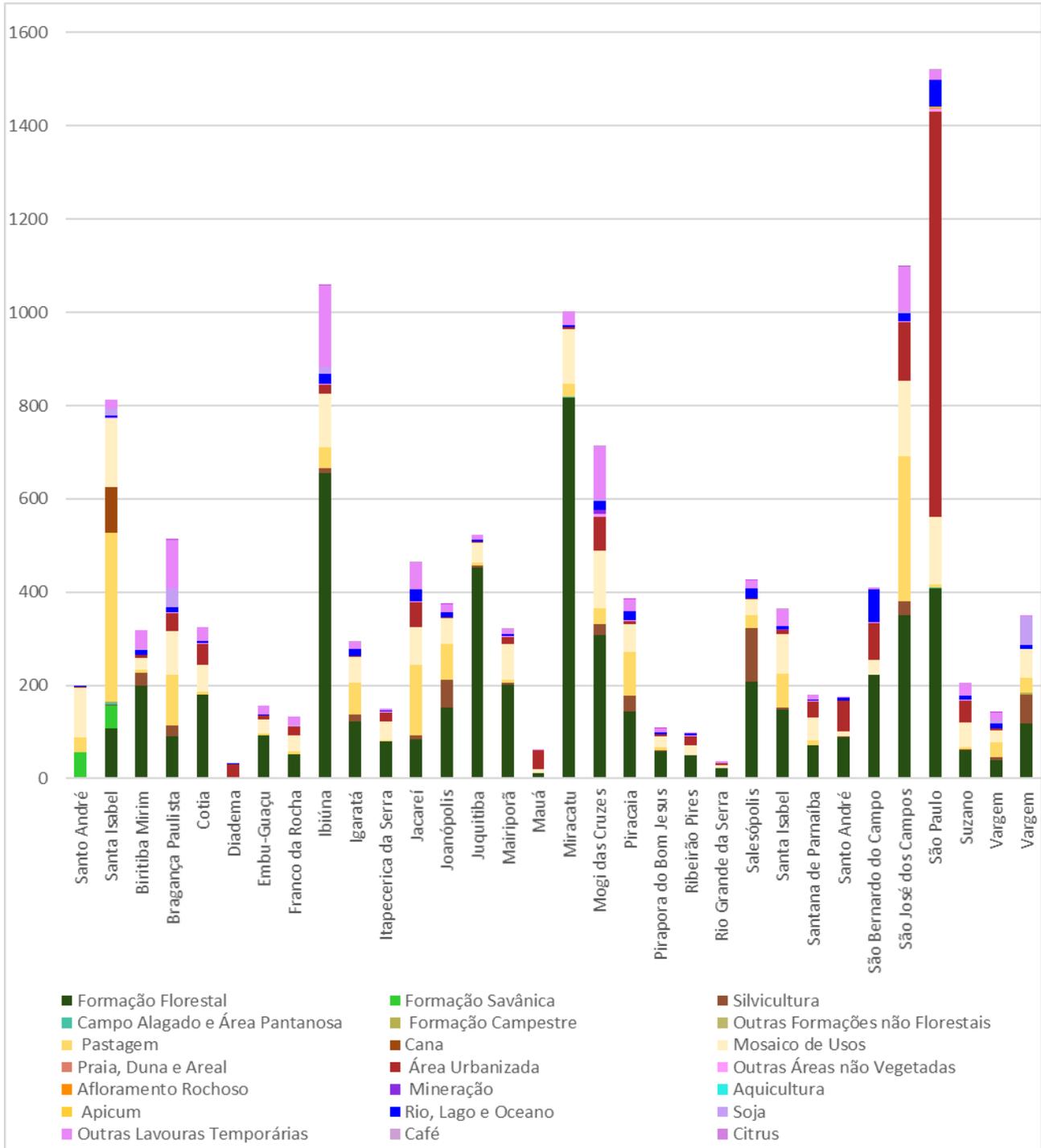
Portanto, ao analisar a relação entre NDCI e chl-a, podemos entender melhor os fatores que influenciam a concentração de clorofila-a na água de ambientes lênticos e sua relevância para a saúde dos ecossistemas aquáticos. Essa compreensão é fundamental para o monitoramento e a gestão eficaz dos recursos hídricos, permitindo a identificação de áreas de preocupação e a implementação de medidas adequadas de conservação e proteção ambiental.

Para ilustrar essa relação, foi gerado um gráfico que apresenta o levantamento das classes de uso do solo em cada município da área de estudo, baseado nos dados da coleção 9.0 do MapBiomas. Esse gráfico permite uma visualização clara da distribuição das atividades agrícolas e outras formas de ocupação, destacando as áreas com maior potencial de impacto na qualidade da água dos reservatórios.

A análise do uso e ocupação do solo (Figura 3), com base na coleção 9.0 do MapBiomas, mostrou que as áreas agrícolas próximas aos reservatórios têm um impacto significativo na qualidade da água, particularmente na proliferação de algas. A agricultura intensiva nas regiões ao redor dos reservatórios contribui para o aumento da carga de nutrientes, como fósforo e nitrogênio, no corpo d'água, acelerando processos de eutrofização. O escoamento superficial proveniente dessas áreas agrícolas, especialmente em períodos de chuvas intensas, carrega fertilizantes e sedimentos que favorecem a floração de algas, impactando diretamente a potabilidade da água. A correlação entre a expansão agrícola e o aumento das concentrações de

clorofila-a nas represas sugere que políticas de controle de uso do solo e práticas agrícolas sustentáveis são fundamentais para mitigar os impactos negativos sobre a qualidade dos recursos hídricos.

Figura 3 – Uso e ocupação do solo conforme Coleção MapBiomias 9.0 (ha).



A aplicação de fertilizantes em cultivos, como pastagens, plantações de cana-de-açúcar e outras lavouras temporárias e permanentes, pode resultar no escoamento de nutrientes para os reservatórios, promovendo o crescimento de algas e plantas aquáticas, como cianobactérias, que levam à eutrofização. Nos municípios com reservatórios descritos como mais eutrofizados, é possível identificar algumas características do uso agrícola que podem estar contribuindo para eutrofização.

O município de Santa Isabel possui uma quantidade expressiva de áreas de pastagem (363,28 ha), além de uma produção significativa de cana-de-açúcar (97,77 ha). A elevada área de pastagem, associada ao escoamento de nutrientes. Enquanto Ibiúna apresenta grande predominância de pastagem (46,23 ha) e áreas de mosaico de uso (114,18 ha). A presença significativa de áreas agrícolas contribui diretamente para a descarga de nutrientes nos corpos d'água, favorecendo a proliferação de algas. Piracaia, município em que são realizadas ações ambientais da Sabesp para recuperação ambiental, apresenta áreas consideráveis de pastagem (94,42 ha) e mosaico de usos (59,63 ha). Essas atividades agrícolas podem estar associadas ao aumento de nutrientes que chegam aos reservatórios, aumentando a vulnerabilidade à eutrofização. Salesópolis, importante município para saúde de um dos principais rios de São Paulo, o Rio Tietê, embora apresente uma considerável área de pastagem (71,37 ha), há uma forte presença de formação florestal (207,95 ha), que pode atuar como um filtro natural, mas ainda assim, o excesso de nutrientes das áreas agrícolas pode levar ao aumento de algas nos reservatórios.

Os municípios de Mogi das Cruzes, Suzano, Salesópolis e Biritiba Mirim têm diferentes proporções de áreas de uso agrícola, florestal e urbanizado, o que afeta diretamente a qualidade da água do reservatório de Taiapuêba.

Em Mogi das Cruzes, as áreas de formação florestal somam 308,41 hectares, enquanto as pastagens ocupam 34,67 hectares, e há 122,78 hectares de áreas urbanizadas. Embora as áreas florestais possam contribuir para a proteção das águas, o significativo avanço das áreas urbanas e pastagens eleva os riscos de poluição, especialmente com escoamento de sedimentos e nutrientes provenientes das atividades agrícolas e áreas desprotegidas. Suzano apresenta 61,12 hectares de formação florestal, com uma ocupação menor de 4,42 hectares de pastagem e 52,03 hectares de áreas urbanizadas. Apesar da presença expressiva de urbanização, o impacto agrícola aqui é mais restrito. No entanto, a expansão urbana pode intensificar o escoamento superficial, transportando poluentes e contribuindo para a degradação das águas do reservatório. Salesópolis se destaca pela preservação de 207,95 hectares de formação florestal, além de 114,08 hectares dedicados à silvicultura, enquanto áreas urbanas e de pastagem são significativamente menores. Com apenas 29 hectares de pastagens e 32,84 hectares de áreas urbanizadas, esse município contribui de forma menos agressiva em termos de poluição agrícola e urbana. No entanto, o manejo adequado da silvicultura continua sendo crucial para evitar impactos indiretos no reservatório, como o aumento da sedimentação. Em Biritiba Mirim, há uma vasta extensão de 198,26 hectares de formação florestal e 28,08 hectares de silvicultura, com 6,74 hectares de pastagem e 5,41 hectares de áreas urbanizadas. Esse perfil de uso do solo indica que, embora haja pressão antrópica, especialmente da silvicultura e de áreas urbanas, o impacto agrícola direto é relativamente baixo, o que pode ser positivo para a conservação das águas, se bem gerido.

Portanto, ao considerar as parcelas de hectares dedicadas a diferentes usos do solo, percebe-se que a pressão maior sobre o reservatório de Taiapuêba provém de Mogi das Cruzes e Suzano, com urbanização e áreas agrícolas mais expressivas, enquanto Salesópolis e Biritiba Mirim apresentam uma configuração mais favorável à proteção ambiental, com grandes áreas de florestas. O manejo adequado dessas áreas é essencial para mitigar os impactos das atividades antrópicas, especialmente na preservação da qualidade da água e no controle da eutrofização.

A relação entre as variações sazonais de clorofila-a e os fatores ambientais é um tema amplamente explorado. A disponibilidade de nutrientes, muitas vezes relacionada à entrada de águas pluviais, é um fator determinante no crescimento da produção de clorofila-a. Estudos hidrográficos da região indicam que precipitações intensas transportam nutrientes para a água, estimulando o crescimento de algas e, por conseguinte, aumentando os níveis de clorofila-a (Belico, 2017).

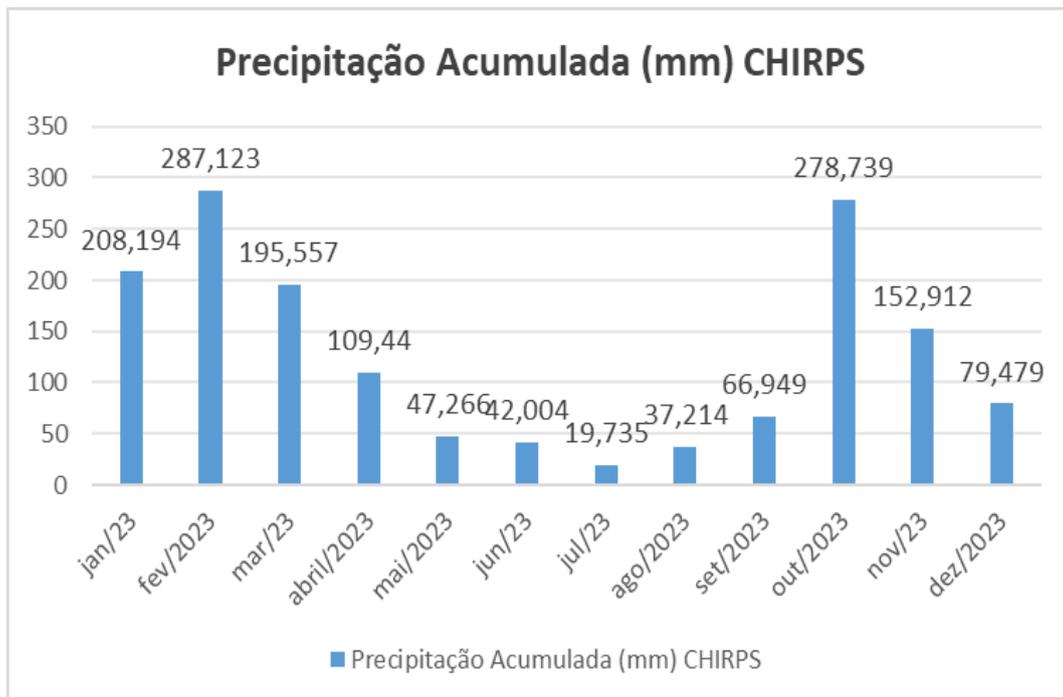
A influência de atividades humanas nas variações de clorofila-a não pode ser subestimada. Belico (2017) evidencia que a agricultura nas proximidades de corpos d'água pode ser uma fonte significativa de nutrientes, impactando diretamente nos níveis de clorofila-a. A entrada desses nutrientes pode levar a eventos de eutrofização, com implicações negativas na qualidade da água e na biodiversidade aquática.

A interpretação das variações de clorofila-a vai além de uma análise meramente descritiva. Entender as implicações

ecológicas e ambientais dessas variações é fundamental para o manejo sustentável. O aumento anômalo nos níveis de clorofila-a pode indicar eventos como florações de algas nocivas, que representam uma ameaça à qualidade da água e à vida aquática (Belico, 2017). A saúde geral do ecossistema está intrinsecamente ligada à dinâmica desses eventos, tornando essencial o monitoramento constante.

Foi possível observar a distribuição mensal da precipitação acumulada para todos os municípios em que estão os dezessete reservatórios estudados (Figura 4), bem como para a área específica do reservatório de Taiacupeba (Figura 5). Esses gráficos permitem uma comparação direta entre os padrões de chuva em Mogi das Cruzes, Biritiba-Mirim, Suzano, Salesópolis, Poá, e Ferraz de Vasconcelos, destacando as variações ao longo do ano de 2023.

Figura 4 - Precipitação acumulada em 2023 nos reservatórios sob gestão da Sabesp.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A eutrofização é um processo em que corpos d'água se tornam ricos em nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, muitas vezes devido ao escoamento superficial de fertilizantes e outras fontes de poluição. Esse fenômeno pode levar ao crescimento excessivo de algas, à redução da qualidade da água e à morte de organismos aquáticos.

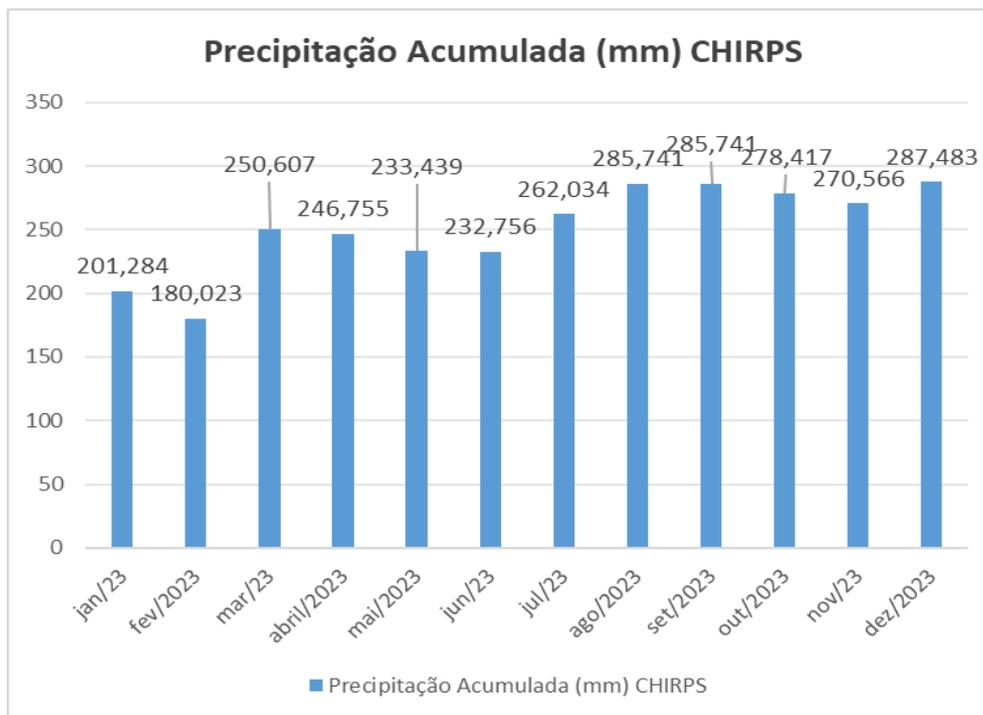
Observando os dados, fevereiro e outubro se destacam como os meses com maior precipitação, com 287,123 mm e 278,739 mm, respectivamente. Esses altos volumes de chuva podem resultar em um aumento significativo no escoamento superficial, o que carrega nutrientes para os corpos d'água. Esse aumento de nutrientes pode induzir um crescimento acelerado de algas, potencializando a eutrofização. Janeiro, com 208,194 mm, também apresenta precipitação significativa, o que sugere um impacto potencial similar, especialmente em regiões agrícolas.

Em contraste, meses como julho, com apenas 19,735 mm de precipitação, apresentam menor potencial de escoamento e, portanto, menor carga de nutrientes. Embora a baixa umidade possa resultar em concentrações elevadas de nutrientes em áreas específicas devido à evaporação, a situação é menos crítica em termos de fluxo de nutrientes. Junho e maio também demonstram padrões de baixa precipitação, reduzindo o potencial de eutrofização, embora a presença de fertilizantes acumulados possa representar um risco à qualidade da água.

Assim, fevereiro e outubro são meses críticos para o monitoramento da eutrofização, dado o alto volume de

precipitação e a maior probabilidade de escoamento de nutrientes. É vital implementar práticas de gestão sustentável, como a agricultura de precisão e a manutenção de zonas de proteção ao redor de corpos d'água, para mitigar os impactos negativos da eutrofização. A monitorização contínua da qualidade da água, aliada à educação sobre práticas agrícolas responsáveis, é fundamental para preservar a saúde dos ecossistemas aquáticos. Além disso, é importante considerar outros fatores, como a temperatura da água, a carga de nutrientes advinda de atividades humanas e a dinâmica dos ecossistemas aquáticos, para uma compreensão mais abrangente da eutrofização e suas implicações.

Figura 5 - Precipitação acumulada em 2023 no reservatório Taiacupeba.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise dos dados de precipitação acumulada em Mogi das Cruzes e municípios vizinhos, como Biritiba-Mirim, Suzano, Salesópolis, Poá e Ferraz de Vasconcelos, revela um padrão de precipitação que destaca meses particularmente críticos para o ambiente local.

Janeiro de 2023 apresentou uma precipitação de 201,284 mm, indicando que as chuvas iniciaram o ano com um volume considerável. Contudo, foi em março que se observou um aumento significativo, com 250,607 mm, um claro indicativo da transição para um período de chuvas mais intensas. O mês de abril também se destacou, alcançando 246,755 mm, um padrão que continuou em maio com 233,439 mm, revelando um cenário de chuvas constantes que podem ser associadas à possibilidade de enchentes e alagamentos na região.

Os meses de junho e julho trouxeram valores altos de precipitação, com 232,756 mm e 262,034 mm, respectivamente, refletindo a continuidade do fenômeno das chuvas intensas na região. A partir de agosto, a precipitação acumulada alcançou 285,741 mm, mantendo uma tendência elevada que se estendeu até dezembro, onde o total de 287,483 mm foi registrado. Este dado sugere que o final do ano é caracterizado por chuvas mais intensas, que podem impactar não apenas a qualidade da água dos mananciais, mas também a dinâmica dos ecossistemas locais.

Além disso, essa distribuição de precipitação, com picos elevados durante os meses de agosto a dezembro, pode estar relacionada ao fenômeno El Niño, que é conhecido por influenciar padrões climáticos e aumentar a intensidade das chuvas em diversas regiões do Brasil. Portanto, é essencial considerar essas variações na gestão hídrica e no planejamento urbano, uma vez que períodos prolongados de precipitação intensa podem resultar em eventos de eutrofização e outros problemas ambientais nas bacias hidrográficas da região, além de afetar a agricultura local e a qualidade de vida dos habitantes.

Nos dados analisados de temperatura (Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil [INMET], 2024) (Tabela 2), verificou-se que os meses de verão, especialmente de janeiro a março, apresentaram temperaturas médias superiores a 21°C, o que pode potencialmente favorecer a proliferação algal. Além disso, mesmo em meses mais frios, como junho e julho, a persistência de temperaturas em torno de 15°C ainda pode ser suficiente para a manutenção de algumas espécies de algas. A análise revela a importância de monitorar as variações de temperatura em conjunto com os níveis de nutrientes, uma vez que todos esses fatores interagem para influenciar a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos na região.

Tabela 2 - Temperatura dos municípios analisados em 2023 (°C).

Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mauá	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
São Bernardo do Campo	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Mairiporã	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Ibiúna	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Embu-Guaçu	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Franco da Rocha	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Santana de Parnaíba	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Rio Grande da Serra	23	23	22	21	20	18	17	18	19	21	22	23
Santa Isabel	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Jacareí	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
São José dos Campos	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Juquitiba	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Igaratá	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Itapeverica da Serra	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Diadema	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Ribeirão Pires	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24

Tabela 2 - Temperatura dos municípios analisados em 2023 (°C). (continuação)

Município	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mogi das Cruzes	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Santo André	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Salesópolis	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Bragança Paulista	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Vargem	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Joanópolis	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Piracaia	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Miracatu	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
São Paulo	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Suzano	24	24	23	22	21	19	18	19	20	22	23	24
Cotia	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24
Pirapora do Bom Jesus	25	25	24	23	22	20	19	20	21	23	24	25
Biritiba-Mirim	24	24	23	22	21	19	18	19	20	21	23	24

Fonte: INMET (2024).

A correlação entre as temperaturas médias e os dados de clorofila-a em cada município demonstrou que os meses de janeiro a março, onde as temperaturas estão acima de 21°C, coincidem com picos elevados de clorofila-a. Por exemplo, em Mauá, as temperaturas em janeiro (22,1°C) e fevereiro (22,3°C) se correlacionam com um aumento significativo nos níveis de clorofila-a, sugerindo que o aquecimento das águas durante esses meses favorece a proliferação de algas.

A análise dos dados de temperatura média e a floração de algas nos municípios da região indicam que os meses com temperaturas elevadas, especialmente de janeiro a março, têm uma correlação significativa com os níveis de clorofila-a. Durante esses meses, as temperaturas variam entre 24°C e 25°C, o que favorece a proliferação de algas em corpos d'água. Municípios como Mairiporã e São José dos Campos, com temperaturas de 25°C em janeiro e fevereiro, apresentam os níveis mais altos de clorofila-a, com 10,2 mg/m³ e 11,5 mg/m³, respectivamente.

Por outro lado, municípios como Rio Grande da Serra, com temperaturas mais baixas (23°C em janeiro e fevereiro), demonstraram os menores níveis de clorofila-a, de 6,5 mg/m³. A consistência nas temperaturas médias durante o ano, que se mantém acima de 18°C na maioria dos municípios, sugere um ambiente propício para a floração de algas.

Em Mauá, as temperaturas em janeiro (22,1°C) e fevereiro (22,3°C) se correlacionam com um aumento significativo nos níveis de clorofila-a, que foi de 9,5 mg/m³. Em São Bernardo do Campo, as temperaturas em janeiro (22,0°C) e fevereiro (22,3°C) mostram uma tendência semelhante, com níveis de clorofila-a de 8,7 mg/m³. Ibiúna, com temperaturas de 22,5°C em janeiro e 22,8°C em fevereiro, apresentou um aumento na clorofila-a, que chegou a 10,2 mg/m³.

Franco da Rocha e São José dos Campos também exibiram temperaturas similares durante os meses de floração, confirmando essa relação, onde a combinação de temperatura elevada e a disponibilidade de nutrientes resultaram em florações

algais mais intensas.

4. Conclusão

A análise da variação de clorofila-a nas Regiões de Interesse (ROIs) ao longo do ano de 2023 destaca a complexidade das interações ecológicas nesse ecossistema específico, evidenciando a notável sensibilidade a fatores climáticos e atividades humanas. A clorofila-a, como indicador ambiental essencial, ressalta a necessidade premente de aprimorar as estratégias de monitoramento. A integração de abordagens de sensoriamento remoto, como o GEE, com dados *in situ*, emerge como uma medida essencial para alcançar uma compreensão abrangente dessas dinâmicas.

Em uma perspectiva futura, é imperativo conduzir investigações mais detalhadas para desvendar as relações entre a variação de clorofila-a e eventos específicos, como florações de algas nocivas. Compreender essas correlações é fundamental para antecipar e mitigar potenciais impactos negativos no ecossistema aquático. Além disso, a implementação de políticas de gestão ambiental embasadas em evidências científicas é essencial para preservar a qualidade da água e a biodiversidade aquática nas diversas Represas da Sabesp.

Nesse contexto, a sinergia entre pesquisa científica, monitoramento contínuo e ações baseadas em evidências se destaca para promover uma gestão ambiental sustentável. A utilização de abordagens inovadoras, como o emprego de tecnologias avançadas de sensoriamento remoto, pode aprimorar significativamente a eficácia das estratégias de monitoramento, proporcionando uma visão mais detalhada e em tempo real das condições ambientais, gerando indícios para ações preventivas de controle dos corpos d'água que prejudicam as principais fontes de abastecimento da RMSP.

Ao longo do estudo, constatou-se que os índices de chl-a (eutrófica) frequentemente divergiam das tendências observadas pelos índices NDCI e chl-a. Essa discrepância sugeriu que as condições eutróficas podem ser influenciadas por fatores adicionais e externos, não completamente capturados pelos índices convencionais. Para serem fundamentadas em dados mais confiáveis.

Para aprimorar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, é recomendado realizar ajustes nos modelos e conduzir análises adicionais que permitam identificar padrões estatísticos entre as variáveis e os fatores ambientais que influenciam a relação entre a concentração de clorofila-a e a floração de cianobactérias nos reservatórios. A expectativa é que esses modelos se tornem ferramentas valiosas no monitoramento e gestão dos recursos hídricos, proporcionando uma compreensão mais abrangente dos ecossistemas aquáticos.

Ressalta-se a necessidade de uma abordagem integrada, considerando não apenas a variação de clorofila-a, mas também as interações complexas que moldam a dinâmica dos ecossistemas dos reservatórios em uma análise limnológica mais aprofundada. Essa abordagem integrada é essencial para preservar a saúde dos corpos d'água, sustentar a biodiversidade aquática e fornecer subsídios para a tomada de decisões fundamentadas em evidências científicas.

Este estudo não apenas destaca a aplicação bem-sucedida da plataforma GEE, mas também sublinha a relevância de abordagens inovadoras e tecnologias avançadas na gestão sustentável dos recursos hídricos.

A ferramenta desenvolvida no GEE mostrou um desempenho confiável na detecção de clorofila-a, especialmente em reservatórios com condições mais críticas de qualidade da água. Nos casos em que a concentração de nutrientes era mais elevada, a ferramenta apresentou uma alta correspondência com os resultados laboratoriais. No entanto, em ambientes com menor carga de nutrientes, a assertividade foi mais limitada, indicando a necessidade de ajustes no algoritmo para melhorar a precisão em uma gama mais ampla de condições ambientais.

Um dos grandes benefícios proporcionados pela ferramenta é o tempo de resposta significativamente mais rápido em comparação com os métodos tradicionais. Enquanto os processos laboratoriais convencionais demandam um tempo considerável para a análise de amostras, a ferramenta baseada em GEE oferece resultados praticamente instantâneos após o

processamento das imagens. Esse ganho de agilidade permite uma resposta mais eficiente e proativa em situações de monitoramento de qualidade da água, facilitando a tomada de decisões preventivas.

A análise do uso e ocupação do solo, feita com a coleção MapBiomias 9.0 indicou que as atividades agrícolas nas proximidades dos reservatórios têm um impacto relevante na qualidade da água, contribuindo para o aumento da proliferação de algas. O escoamento de nutrientes provenientes das áreas agrícolas, principalmente devido ao uso de fertilizantes, tem influência direta na eutrofização dos corpos d'água. Destaca-se assim as políticas e práticas para reduzir o impacto da agricultura nas condições limnológicas das represas.

Nas ROIS estudadas, utilizando dados do CHIRPS via GEE, evidencia-se uma distribuição sazonal distinta, com maior concentração de chuvas entre os meses de dezembro e março. Esses picos de precipitação são fundamentais para o abastecimento hídrico da região, mas também podem aumentar o risco de processos como a eutrofização nos corpos d'água. A variabilidade das chuvas ao longo do ano ressalta a importância de um monitoramento em tempo real, especialmente em áreas sensíveis, para equilibrar o fornecimento de água com a preservação da qualidade ambiental.

Agradecimentos

Agradecemos às instituições e equipes envolvidas na coleta de dados e na realização deste estudo. A colaboração foi essencial para a conclusão e sucesso deste trabalho.

Referências

- Belico, J. C. B. (2017) Impactos de eventos chuvosos na dinâmica físico-química e biológica em reservatórios urbanos estudo de caso: Lagoa da Pampulha. 203 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2017. <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1231M.PDF>.
- Bielenki JR, C.; Barbassa, A. P. (2012) Geoprocessamento e Recursos Hídricos: Aplicações Práticas. São Carlos: EdUFSCar. 257 pp.
- Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations (CHIRPS). Climate Hazard Center – UC Santa Bárbara. (2024) https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_annual/tifs/.
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) (2024). Prêmio Empreendedor, modalidade Ideia: MONITORAMENTO AMBIENTAL (chl-a) Utilizando imagens de satélite: praticidade em abordagens temporais. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fyogi@sabesp.com.br>. em: 16 set. 2024.
- COPERNICUS Open Access HUB. Sentinel-2 (2024). <https://scihub.copernicus.eu/dhus>.
- Dall'olmo, G., Boss, E., Behrenfeld, M. J., & Westberry, T. K. (2012). Particulate optical scattering coefficients along an Atlantic Meridional Transect, *Opt. Express*, 20(19), 21532-21551.
- European Space Agency (ESA). (2024). Copernicus Sentinel-2. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- Gitelson, A., Dall'olmo, G., Moses, W., & Rundquist, D. (2008). A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: Validation. *Remote Sensing of Environment*, 115(2), 339-351.
- Gorelick, N., et al. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Gorelick, N., I. & Masek, J. G. (2018). Data Cubes for Analysis of Remote Sensing Data. Patent No. US20180252476A1.
- Hu, C., Lee, Z., & Franz, B. (2012). Chlorophyll-a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1).
- Harmel, Robert Daren; Preisendanz, Heather Elise; King, Kevin Wayne; Busch, Dennis; Birgand, Francois; Sahoo, Debabrata. (2023). A Review of Data Quality and Cost Considerations for Water Quality Monitoring at the Field Scale and in Small Watersheds. *Water*, [S.L.], 15(17), 3110. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w15173110>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/17/3110>.
- Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil – INMET. (2024). Dados Meteorológicos Estações Automáticas. [https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEsta coes/A001](https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEsta%20coes/A001)
- MapBiomias – Coleção 9.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. (2024). <http://mapbiomas.org/o-projeto>
- Pandey, A., Singh, G., Chowdary, V. M., Behera, M. D., Prakash, A. J., & Singh, V. P. (2022). Overview of geospatial technologies for land and water resources management. In: *Geospatial technologies for land and water resources management*, Springer, Cham, pp. 1–16.
- Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Editora UAB/NTE/UFMS

Pereira-Sandoval, M., et al. (2019). Calibration and validation of algorithms for the estimation of chlorophyll-a concentration and Secchi depth in inland waters with Sentinel-2. *Limnetica*, 38(1), 471-487. DOI: 10.23818/limn.38.27.

Prasai, Ritika et al. (2021) Application of Google earth engine python API and NAIP imagery for land use and land cover classification: a case study in florida, usa. *Ecological Informatics*, [S.L.], 66, 101474. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101474>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S157495412100265X>.

Salgado-Hernanz, P. M.; Racault, M.-F.; Font-Muñoz, J. S.; Basterretxea, G. (2019). Trends in phytoplankton phenology in the Mediterranean Sea based on ocean-colour remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 221, 50–64.

Salls, Wilson B. et al. (2024). Expanding the Application of Sentinel-2 Chlorophyll Monitoring across United States Lakes. *Remote Sensing, Grenbelt*, 1977(16), 1-29. <https://doi.org/10.3390/rs16111977>.

Shitsuka, R. et al. (2014). *Matemática fundamental para tecnologia*. (2ed.). Editora Erica.

Souza Junior, C. M., Kirchoff, F. T., Oliveira, B. C., Ribeiro, J. G. & Sales, M. H. (2019). Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. *Water (Basel)*, 3(11), 566. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030566>.

Zhu, Z., QIU, S., & YE, S. (2022) Remote sensing of land change: a multifaceted perspective. *Remote Sensing Of Environment*, [S.L.], 282, 113266. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2022.113266>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425722003728>.

Yang, H. et al. (2022) A Review of Remote Sensing for Water Quality Retrieval: Progress and Challenges. *Remote Sensing, China*, 1770(14), 1-21. <https://doi.org/10.3390/rs14081770>.

Yogi, Fernando; Stanganini, Fabio Noel; Tonello, Kelly Cristina; Isa, Selma Setsumi. (2023) Evaluation of the potential for carbon sink and association with land occupation. *Journal Of Water And Climate Change*, [S.L.], 14(2), 401-420. IWA Publishing. <https://iwaponline.com/jwcc/article-pdf/doi/10.2166/wcc.2023.296/1170486/jwc2023296.pdf>.