MAPAQUALI – PLATAFORMA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DE QUALIDADE DE ÁGUA

Claudio Barbosa[1], Daniel Maciel[1], Evlyn Novo[1], Vitor Gomes[2], Rejane Paulino[3], Vitor Martins[3], Gabriel Sansigolo[1], Gilberto Ribeiro[1], Raianny Wanderley[1]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos/SP, Brasil, {claudio.barbosa, daniel.maciel, evlyn.novo, gilberto.queiroz.brgabrielsansigolo}@inpe.br, raiannylnw@alumni.usp.br; [2]Instituto de Estudos Avançados – IEAv/DCTA, São José dos Campos/SP, Brasil, vconrado@gmail.com; [3]Department of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University, Starkville, Mississippi, USA, vmartins@abe.msstate.edu, rdp282@msstate.edu

RESUMO

Monitoramentos bi ou trimestrais, em algumas estações amostrais, fornecem informações relevantes para o gerenciamento da qualidade de água (QA) em escala de bacias hidrográficas, mas carecem de abrangência espaço-temporal para melhor embasar políticas públicas de uso sustentável de sistemas aquáticos ao nível local. Dada às elevadas taxas de variação das propriedades ópticas dos sistemas aquáticos, a frequência de monitoramento deve permitir o acompanhamento contínuo da dinâmica temporal da QA, para que os órgãos reguladores possam emitir, quando necessário, alertas aos gestores. Apesar de existirem constelações de sensores ópticos orbitais que possibilitam o monitoramento sistemático desses sistemas por sensoriamento remoto, até o momento não existe uma plataforma que os monitore de forma contínua e automatizada. Este trabalho apresenta o protótipo da plataforma modular de monitoramento contínuo - MAPAQUALI no qual foram integrados três sistemas aquáticos.

Palavras-chave – *Indicadores de qualidade da água, plataforma de monitoramento contínuo, OLI, MSI e OLCI.*

ABSTRACT

Bi or quarterly monitoring at some sampling stations provides relevant water quality (WQ) management information on the watershed scale. However, it does not provide enough spatial coverage and temporal frequency to support effective public policies for the sustainable use of local aquatic systems. Due to the high variability in the optical properties of aquatic systems, the monitoring frequency should allow for continuous tracking of WQ temporal dynamics, enabling regulatory agencies to issue alerts to managers when necessary. Despite the availability of orbital optical sensor constellations for systematic remote sensing of aquatic systems, there is no platform for continuous and automatic WQ monitoring. This paper introduces the prototype of the MAPAQUALI platform, a modular continuous monitoring platform that integrates three aquatic systems.

Keywords *- Water quality indicators, continuous monitoring platform, OLI, /MSI e OLCI.*

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial tanto ao bem-estar social como ao desenvolvimento econômico das nações. O Brasil com uma disponibilidade hídrica de ~12% da água doce líquida da superfície terrestre, tem uma posição privilegiada, entretanto, o tamanho, a diversidade e a distribuição espacial são um grande desafio para seus gestores quando se trata de monitorar e gerenciar o uso sustentável desses recursos no atual contexto de mudanças climáticas e escassez hídrica em algumas regiões.

Existem relatos da intensificação de eventos de floração e contaminação por algas tóxicas em muitos sistemas aquáticos brasileiros [1]. O monitoramento, bi ou trimestral, em algumas estações amostrais, apesar de contribuírem para o entendimento da qualidade da água, carece de abrangência espaço-temporal para melhor embasar políticas públicas de uso sustentável destes sistemas aquáticos. Avanços recentes de sensores orbitais com resolução radiométrica, espectral e temporal adequadas, associados ao desenvolvimento de algoritmos bio-ópticos, têm demonstrado a viabilidade de uso do sensoriamento remoto orbital para o monitoramento de sistemas aquáticos com abrangência espacial adequada [2,3,4]. Contudo, além da abrangência espacial é importante desenvolver ferramentas para o acompanhamento contínuo da dinâmica temporal da qualidade de água, que permitam a emissão, quando necessário, de alertas aos gestores.

As atuais constelações das missões Sentinel 2 e 3, e LandSat 8 e 9, possibilitam especificar uma plataforma de monitoramento contínuo de sistemas aquáticos por sensoriamento remoto. Entretanto, o desenvolvimento de uma plataforma com estas características impõe grandes desafios tecnológicos, como o de armazenamento, processamento, análise e gerenciamento de um grande volume de dados geoespacial.

Pesquisadores da Divisão de Observação da Terra e Geoinformática do INPE (DIOTG), com base no conceito de "*Spatial Data Infrastructure*" (SDI), desenvolveram o chamado *Brazil Data Cube* (BDC) que é uma plataforma de big data de dados de Observação da Terra (OT), com capacidade de armazenamento, processamento, e gerenciamento de grandes volumes de dados de OT [5].

Desta forma, o objetivo deste trabalho é apresentar a primeira versão da plataforma MAPAQUALI, que foi

desenvolvida utilizando a infraestrutura de hardware e de software da plataforma BDC, que inclui a ferramenta BDC-WE, para construção e execução de fluxos de processamento [6]. Nesta versão da MAPAQUALI foram integrados modelos de indicadores de qualidade de água bio-ópticos (IQAs), que são derivados de sensoriamento remoto (clorofila-a (Chl-a), ficocianina (PC), Total de Sólidos Suspensos (TSS), Profundidade Secchi (PS)) para a represa Billings, para o reservatório de Promissão-SP, e alguns lagos da planície da inundação amazônica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O projeto MAPAQUALI definiu os pré-requisitos essenciais para o desenvolvimento de uma plataforma para monitoramento contínuo de sistemas aquáticos por sensoriamento remoto: i) ser um sistema modular, flexível e expansível, onde modelos para o monitoramento de novos sistemas aquáticos pudessem ser adicionados; ii) estimar IQAs com a maior acurácia possível, a partir de dados de Sensoriamento Remoto; iii) permitir a programação e automatização de fluxos de processamento (*pipelines*-sequências encadeadas de processamento).

Com base nesses pré-requisitos, especificou-se uma estrutura de quatro módulos para plataforma (Figura 1-a), por meio da qual foram agrupados em cada módulo um conjunto de processamentos correlacionados.No módulo 1 concentra-se a pesquisa e download de novas imagens disponíveis sobre o sistema aquático de interesse e já integrado a plataforma, executam-se todas as etapas de pré-processamento das imagens, e a inserção e catalogação (metadados) num banco de dados de imagens pré-processadas. O módulo 2 é o repositório de todos os modelos estimadores de IQA, desenvolvidos e agrupados para cada sistema aquático integrado á plataforma. O módulo 3 é o repositório dos produtos gerados (mapas e séries temporais), e das ferramentas para gerenciamento e disponibilização dos produtos para os usuários. O módulo 4, WEB, é a interface por meio da qual os usuários fazem pesquisas e donwloads dos produtos disponíveis. Desta forma, todas as etapas de processamento das imagens e geração dos produtos estão concentrados nos módulos 1 e 2, enquanto nos módulos 3 e 4 são realizadas as etapas de gerenciamento dos produtos gerados e sua disponibilização para os usuários.

A Figura 1-b, ilustra a configuração dos módulos da plataforma MAPAQUALI utilizando a infraestrutura da BDC. O módulo 1 utiliza a ferramenta Workflow Engine do BDC (BDC-WE) [6], que permite programar e concatenar sequências de busca, e etapas de pré-processamento de novas imagens, montando um fluxo de processamento automatizado, para cada sistema aquático integrado na plataforma. Este fluxo consiste em: i) seleção de uma nova imagem na coleção de imagens do BDC ou se não estiver disponível pesquisar e baixar de um provedor externo; ii) recortar a imagem para manter somente a área do sistema aquático; iii) aplicar correção atmosférica; iv) aplicar máscara de nuvens e de sombra; v) aplicar correções de adjacência e de sunglint. vi) utilizando ferramentas da infraestrutura do BDC, nesta etapa cada imagem corrigida é depositada no banco de imagens pré-processadas associada aos respectivos metadados.

O módulo 2 também utiliza a BDC-WE para construir fluxos de processamentos (pipelines) para cada modelos de cada sistema aquático integrado na plataforma. Estes fluxos consultam periodicamente se existe nova imagem disponível na base de dados de imagens pré-processadas. Caso exista, aplica o modelo e encaminha o resultado para o modulo 3, que realiza o procedimento necessário de catalogação dos metadados no banco de dados de produtos IQA. Todo o processamento realizado pelo módulo 3, incluindo o suporte para disponibilização dos produtos, é baseado integramente na infraestrutura do BDC.

Diferente dos módulos anteriores, nos quais os processamentos e armazenamentos são realizados na plataforma BDC, o módulo 4 (WEB), é provido por um servidor do BDC para ser visualizado na máquina do usuário. Ao executar o aplicativo WEB MAPAQUALI o usuário pode pesquisar os produtos gerados, realizar algumas análises, e visualizar mapas e séries temporais de IQA.

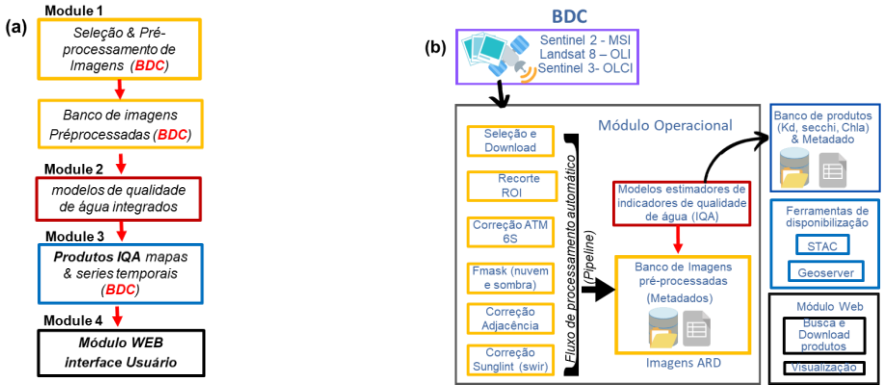


Figura 1. Plataforma MAPAQUALI (a) Fluxograma da estrutura conceitual modular especificada para a plataforma. (b) Arquitetura do MAPAQUALI implementada no ambiente da BDC.

3. RESULTADOS

Na versão atual da plataforma, que é um protótipo para demonstrar a viabilidade do seu desenvolvimento, foram integrados modelos de Chl-a, PC, TSS, TSI, Kd e Prof. de Secchi, para três sistemas aquáticos: represa Billings, reservatório de Promissão, e lagos da planície de inundação de Curuai-PA. Para a represa Billings, devido sua dimensão, os modelos para estimar PC (proxy de Cianobactéria) utilizaram imagens dos sensores PRISMA e OLI (por simulação da banda laranja [7,8]. Para mapear TSS, Secchi e coeficiente de atenuação difusa utilizaram-se imagens MSI [9]. Para Promissão e planície de Curuai foram utilizadas imagens OLI, MSI e OLCI [3,9,10].

As etapas (metodologias) de pré-processamento e os modelos de IQA, antes de serem integrados ao BDC, foram desenvolvidos e validados com dados *in situ*, no contexto de dissertações e teses na pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, por alunos vinculados ao LabISA. Os fluxos de processamento automatizados, dos módulos 1 e 2 foram desenvolvidos para cada sistema aquático/sensor, e para cada modelo de cada sensor.

A Figura 2 mostra a interface de usuário (módulo WEB), por onde é realizada a pesquisa, visualização e *download* dos produtos IQA disponibilizados. Esta interface, desenvolvida em Python e Javascript interage com as ferramentas de gerenciamento e disponibilização da BDC (*GeoSERVER*, STAC), para realizar consultas e visualizar mapas e séries temporais de IQA. As pesquisas podem ser feitas por local, por IQA, por sensor (OLI, MSI, OLCI) e por período.

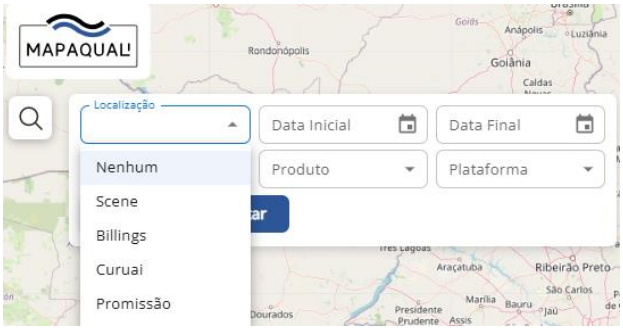


Figura 2. Interface WEB (usuário) do MAPAQUALI.

A Figura 3-a ilustra o resultado de uma consulta e da visualização de um mapa de PC, gerado a partir de uma imagem Sentinel3/OLCI, adquirida em 16/03/2024, no reservatório de Promissão, no interior de São Paulo. Já a Figura 3-b mostra uma sequência de quatro mapas de PC gerados a partir de imagens adquiridas entre 16/03/2024 e 01/04/2024.

Na versão atual da plataforma, modelos de estimativas de Chl-a, PC, profundidade de Secchi, coeficiente de atenuação difusa, e total de sedimentos em suspensão foram integrados para três sistemas aquáticos.

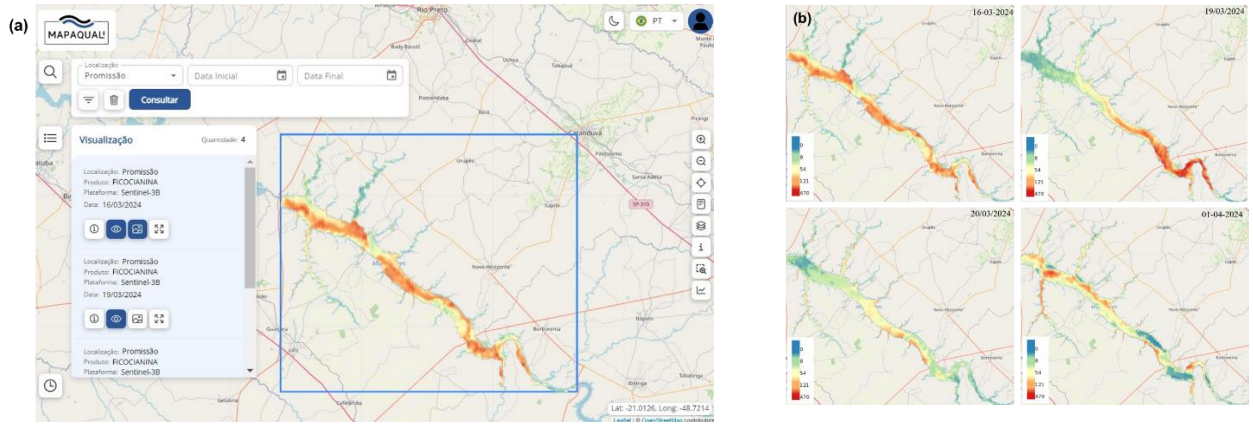


Figura 3. Exemplo de consulta pela Interface WEB do MAPAQUALI. (a) resultado de uma consulta sobre produtos de ficocianina no reservatório de Promissão (b) mapas de ficocianina (PC) gerados entre 16/03/2024 a 01/04/2024.

4. DISCUSSÃO

O monitoramento de sistemas aquáticos no Brasil, feito por agências governamentais, não inclui de forma rotineira dados de sensoriamento remoto. De modo geral, são monitoramentos pontuais em poucas estações amostrais, e realizados em grandes intervalos temporais, muitas vezes limitados por questões financeiras. São monitoramentos relevantes porque incluem inúmeras variáveis químicas, biológicas e físicas do corpo de água, e produzem uma radiografia acurada do corpo de água. Entretando, carecem de abrangência espaço-temporal para melhor embasamento de políticas públicas de uso sustentável dos sistemas aquáticos.

Apesar do avanço no desenvolvimento de algoritmos que permitem estimativas mais precisas de IQAs por sensoriamento remoto, até o momento, não há uma plataforma que possa gerar de forma contínua e automatizada tais informações. Essa lacuna se deve, principalmente, ao desafio de armazenar, gerenciar, processar e disponibilizar o

grande volume de dados num sistema de monitoramento contínuo por sensoriamento remoto.

Os avanços recentes na área de informática, integrando computação em nuvens, sistemas distribuídos de bancos matriciais, serviços WEB, e processamento em clusters de hardware, têm permitido o desenvolvimento de infraestruturas de dados espaciais para sistemas de big data de OT. Em sintonia com tais avanços, pesquisadores da DIOTG/INPE, desenvolveram a plataforma de big data de OT Brazil Data Cube (BDC) [5]. Adicionalmente está sendo integrada ao BDC uma ferramenta, baseada na orquestração de fluxo de processamento de dados, que possibilita automatizar sequências de processamento na própria BDC.

Em 2019, a equipe do LabISA propôs o desenvolvimento da MAPAQUALI após: i) avaliarem diferentes métodos de correção atmosférica [10,11]; ii) desenvolverem um sistema semiautomático de correção atmosférica para multi-sensores [12] iii) e desenvolverem vários modelos estimadores de IQA para diferentes sistemas aquáticos [3,4,9,10]. Na proposta inicial, a plataforma seria instalada e executaria todo o processamento na máquina do usuário. Entretando, por ser uma proposta de um sistema expansível que resultaria num grande volume de dados, optou-se pela parceria com a equipe do projeto BDC, pois além da infraestrutura de hardware e de software que permitiria construir e automatizar pipelines de processamentos, todas as imagens já estariam disponíveis no mesmo ambiente computacional.

A versão atual da plataforma MAPAQUALI é um protótipo desenvolvida para testar uma prova de conceito e demonstrar a viabilidade de se construir um sistema com as características propostas: i) arquitetura modular que permitisse não só a inserção de novos modelos para os sistemas aquáticos já integrados a plataforma, como também a sua expansão, com inserção de novos sistemas aquáticos; ii)monitoramento contínuo e passível de automatização l; iii)) estimar IQA com a maior acurácia possível a partir de dados de Sensoriamento Remoto o que implica em desenvolver e calibrar os modelos de IQA para cada sistema aquático a partir de dados in situ do sistema.

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento da plataforma MAPAQUALI integrada a BDC, na sua versão protótipo demonstrou a viabilidade de se construir um sistema automático de monitoramento de sistemas aquáticos utilizando imagens dos sensores Landsat-8/9OLI, Sentinel-2/MSI e Sentinel-3/OLCI. A modularidade e automatização dos fluxos de processamentos da MAPAQUALI são características importantes porque possibilitam: i) tanto a inserção de novos modelos quanto e a integração de novos sistemas aquáticos; ii) a busca de novas imagens, permitindo o monitoramento contínuo, por sensoriamento remoto orbital, dos sistemas aquáticos já integrado. Os benefícios de plataformas brasileiras autônomas e integradas com dados de sensoriamento remoto para a qualidade da agua incluem a captura da dinâmica espacial e temporal dos corpos d'agua e auxiliam na gestão.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESP pelo financiamento da coleta de dados projeto 2020/14613-8, que viabilizou o desenvolvimento do protótipo da MAPAQUALI.

7. REFERÊNCIAS

[1] M.D.C. Bittencourt-Oliveira et al. Cyanobacteria, microcystins and cylindrospermopsin in public drinking supply reservoirs of Brazil. Anais da Academia Bras. de Ciências 2014, 86, 297–309

[2] C. Giardino et al., A tool for estimating water quality and bottom properties from remote sensing images. Comput. Geosci. 45, 313–318, 2012.

[3] T.M. A Lima, et al., Assessment of Estimated Phycocyanin and Chlorophyll-a Concentration from PRISMA and OLCI in Brazilian Inland Waters: A Comparison between Semi-Analytical and Machine Learning Algorithms. Remote Sensing, 15, 1299, 2023.

[4] C. Cairo et al., Hybrid chlorophyll-a algorithm for assessing trophic states of a tropical Brazilian reservoir based on MSI/sentinel-2 data. Remote Sensing, v. 12, n. 1, 2020.

[5] K. R Ferreira, et al. 2020. "Earth Observation Data Cubes for Brazil: Requirements, Methodology and Products." Remote Sensing 12 (24): 4033. https://doi.org/10.3390/rs12244033.

[6] V. Gomes et al., Brazil Data Cube Workflow Engine: a tool for big Earth observation data processing. International Journal of Digital Earth, v. 17, p. 1-21, 2024.

[7] A. Castagna et al. Extending Landsat 8: retrieval of an orange contra-band for inland water quality applications. Remote Sens. (Basel) 12, 1–27. https://doi.org/10.3390/rs12040637. 2020.

[8] F. N. Begliomini. et al., Machine learning for cyanobacteria mapping on tropical urban reservoirs using PRISMA hyperspectral data. ISPRS J. Photog. Remote Sens., v. 204, p. 378-396, 2023.

[9] D.A Maciel, et al., Water clarity in Brazilian water assessed using Sentinel-2 and machine learning methods. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 182, 134–152. 2021

[10] V. S. Martins et al., "Assessment of atmospheric correction methods for sentinel-2 MSI images applied to Amazon floodplain lakes," *Remote Sens.*, vol. 9, no. 4, 2017.

[11] R. S. Paulino et al., Assessment of Adjacency Correction over Inland Waters Using Sentinel-2 MSI Images. Remote Sensing, v. 14, p. 1829, 2022.

[12] F. M. Carlos et al., Sistema semiautomático de correção atmosférica para multi-sensores orbitais. In: XIX SBSR, 2019, Santos. Proceedings XIX SBSR. Campinas, 2019. v. Vol 17. p. 96336.