

RECONSTRUÇÃO DE UMA SÉRIE HISTÓRICA DE CLOROFILA-A USANDO IMAGENS DO SENSOR MODIS NO COMPLEXO ESTUARINO- LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (CELM/AL)

Regina Camara Lins^{1}; Jean-Michel Martinez²; David M. L. da Motta Marques³; José Almir Cirilo⁴ & Carlos Ruberto Fragoso Júnior⁵*

Resumo – Informações sobre as concentrações de clorofila-a em ambientes continentais são fundamentais para avaliar o índice de estado trófico (IET) no corpo hídrico. Um monitoramento completo e preciso da qualidade da água requer obtenção de amostras repetidas no tempo e espaço, o que torna seu custo operacional elevado e de difícil manutenção. Desta forma, esse trabalho tem como objetivo determinar e avaliar o comportamento temporal da clorofila-a através da reconstrução da série histórica temporal média entre os anos de 2000 a 2016 nas lagunas do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELM), localizado no Estado de Alagoas. Para isto, o modelo de duas bandas NIR-Red foi aplicado a imagens do sensor MODIS para reconstruir a série de clorofila-a. Este modelo foi calibrado com dados de clorofila-a coletados em campo ($r^2 = 0.83$). A reconstrução da série temporal de longo prazo de clorofila-a por sensoriamento permitiu realizar uma avaliação mais completa dos padrões temporais do estado trófico no CELM. A série de clorofila-a estimada nas duas lagunas, não se observa uma tendência de aumento ou diminuição das concentrações de clorofila-a ao longo dos anos. Já o IET é mais elevado na laguna Manguaba, com uma permanência de 29% do tempo em Estado Supereutrófico.

Palavras-Chave – qualidade de água, sensoriamento remoto, estuários.

TIME-SERIES RECONSTITUTION OF CHLOROPHYLL-A USING MODIS IMAGERY IN MUNDAÚ-MANGUABA ESTUARINE-LAGOON SYSTEM

Abstract – Long-term chlorophyll-a data is essential for a comprehensive evaluation of trophic state of the inland waters. In general, water quality monitoring requires a huge effort to collect and analyze a repeated sampling in time and space, leading to high costs and difficult to maintain. Therefore, the purpose of this study is to evaluate the temporal variability of chlorophyll-a through the time-series reconstruction of chlorophyll-a between the years 2000 and 2016 in the two lagoons of the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System (MMELS) located in Alagoas State, Brazil. For this purpose, a two-band NIR-Red model based in MODIS bands was used to build time-series of chlorophyll-a. This model was calibrated using chlorophyll-a in-situ measurements in field campaigns conducted in 2014 ($r^2 = 0.83$). The reconstruction of the long-term time series of chlorophyll-a by remote sensing allowed a more complete evaluation of temporal variability of trophic state for both lagoons. It was not observed any trend of increase or decrease chlorophyll-a concentrations over the years. The trophic state is higher in the Manguaba lagoon, with a time permanence of 29% in supereutrophic state.

Keywords – water quality, remote sensing, estuaries.

¹Doutoranda em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC/UFPE). reginacamaralins@hotmail.com.

²Pesquisador GET, UMR 5563, IRD/CNRS/Université Toulouse 3, Toulouse, France. martinez@ird.fr.

³Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). dmm@iph.ufrgs.br.

⁴Professor Titular do Centro acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (PPGEC/CTG/UFPE). almir.cirilo@gmail.com.

⁵ Professor do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (CTEC/UFAL). cruberto@gmail.com.

INTRODUÇÃO

Naturalmente ao longo do tempo, por fatores físicos, químicos e biológicos, os estuários passam por processos lentos de degradação que são geralmente por eles absorvidos. Porém, quando a estes processos naturais são agregados impactos contínuos resultantes de atividades humanas (despejo de esgoto doméstico e industrial, contribuição difusa de agrotóxicos e fertilizantes, desmatamento, entre outros) ou eventos naturais críticos, os estuários perdem a capacidade de absorção e passam a apresentar problemas sérios de eutrofização, perda da diversidade biológica, aumento da turbidez, da sedimentação e da toxicidade, alterações no ciclo hidrológico e suas consequências (Tundisi e Tundisi 2008).

Apesar de relevante, o monitoramento de variáveis que sirvam de indicadores de qualidade de água (como a concentração de clorofila-a, indicadora do estado trófico dos estuários) ainda é escasso ou mesmo inexistente em alguns ambientes aquáticos. Um monitoramento completo e preciso da qualidade da água requer a obtenção de amostras repetidas no tempo e no espaço, o que torna seu custo operacional elevado e de difícil manutenção.

Uma técnica alternativa para a avaliação da qualidade da água é a aquisição destas informações a partir de dados de sensoriamento remoto da cor da água. A presença de componentes orgânicos/inorgânicos nos corpos d'água provocam alterações nos processos de espalhamento e absorção da luz no seu interior, que permitem esta interpretação. Rotineiramente aplicada em águas oceânicas (e.g. Campbell e O'reilly 1988; Yool 1997), estudos recentes mostraram que estimativas de clorofila-a através de imagens de sensores espaciais, como o Moderate-Resolution Image Spectroradiometer (MODIS), também pode ser utilizada satisfatoriamente em ecossistemas aquáticos continentais com o propósito de monitorar remotamente a qualidade da água destes ambientes (Le *et al.* 2013; Wang *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2016). A vantagem do uso do MODIS, além do baixo custo de aquisição das informações, é abrangência espacial (com resoluções de 250, 500 e 1000 m) e temporal das imagens multiespectrais (imagens diárias), da superfície da água auxiliando o entendimento de fenômenos em diferentes escalas (McCluney 1976). Portanto, este trabalho pretende reconstruir a série de clorofila-a estimada a partir de imagens do sensor MODIS calibradas com informações de campo, visando a obtenção de análises de longo prazo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é um sistema tropical de lagunas rasas (profundidade máxima de 3.5 m) localizado do Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 9°35'00" S e 9°46'00" S latitude e 35°34'00" W e 35°58'00" W longitude. O sistema é composto por três compartimentos: (a) a Laguna Mundaú (27 km²) na parte leste do CELMM, que recebe água doce principalmente da bacia do rio Mundaú (vazão média anual de 35 m³/s); (b) a Laguna Manguaba (42 km²) na parte oeste do CELMM, que recebe uma descarga média anual de 28 m³/s de água doce das bacias dos rios Paraíba do Meio e Sumaúma; e (c) o sistema de canais estreitos de 12 km², que conecta as lagunas através de uma única entrada de maré de 250 m de largura no Oceano Atlântico. O CELMM apresenta um clima tropical semi-úmido com períodos secos (de outubro a dezembro) e úmidos (de maio a julho) bem definidos (Lins *et al.* 2017).

Monitoramento de Campo

Seis campanhas de campo foram realizadas a bordo de embarcação entre os meses de Maio a Setembro de 2015 (Tabela 1). Em cada campanha foram coletadas amostras de água em 12 pontos distintos (ver Figura 1). Em cada ponto de coleta, duas garrafas plásticas de 1 litro foram utilizadas

para amostragem da água superficial (profundidade < 0.5 m) que foram mantidas no escuro e sob refrigeração até a filtragem.

Análises Laboratoriais

Todas as amostras foram filtradas em laboratório, não mais de 12h após a coleta, utilizando filtros de fibra de vidro Whatman GF/F (tamanho do poro 0.45 μm). A Clorofila-a foi extraída dos filtros em etanol concentrado, 90%, por 18h em balão volumétrico âmbar, e medida através do método tricromático espectrofotométrico (American Public Health *et al.* 2005). O resíduo retido nos filtros das amostras para Sólidos Suspensos Totais (TSS) passou por secagem em estufa, entre 103 e 105 °C, até atingirem um peso constante por medição gravimétrica (American Public Health *et al.* 2005).



Figura 1. Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). Destaque em amarelo para a máscara gerada no programa GetModis para identificação dos pixels no interior das lagoas Mundaú e Manguaba.

Imagens de Satélite

Neste estudo foram analisados dois produtos orbitais do sensor MODIS (MOD09A1 - Plataforma Terra e MYD09A1 - Plataforma Aqua). Nestes produtos, com Nível 3 de processamento, cada pixel dentro da imagem, com resolução de 500 m, representa a melhor observação diária no intervalo de 8 dias, selecionado com base em alguns critérios de observação, tais como: baixo ângulo de visada, presença de nuvens e aerossóis.

Através do GetModis, foi possível baixar a série histórica de imagens, das lagoas Mundaú e Manguaba, entre os anos 2000 e 2016. Além disto, o GetModis foi utilizado para converter o contorno de cada laguna, obtido em Google Earth, em arquivo no formato raster (ver Figura). A fim de evitar, ou minimizar, a interferência da reflectância do fundo das lagoas ou mistura

espectral de alvos diferentes da água, optou-se pela eliminação dos pixels cujos centros estivessem situados a uma distância inferior a 500 m da margem (equivalente a resolução de 1 pixel).

Utilizando o programa MOD3R foi possível extrair a série temporal da reflectância (bandas Azul, Verde, Vermelho e Infravermelho Próximo) dos dois produtos orbitais (MOD09A1 e MYD09A1) em cada pixel da máscara, como também em cada coordenada específica dos levantamentos de clorofila de campo. Além disto, o MOD3R apresenta uma aba com a classificação qualitativa de cada imagem, calculada considerando a geometria de aquisição do satélite, o espectro radiométrico e coberturas de nuvens, atribuindo os seguintes valores: (a) Qualidade 0 - sem informação; (b) Qualidade 1 - excelente; (c) Qualidade 2 - duvidosa, e (d) Qualidade 3 - descartar. Neste estudo optou-se por utilizar apenas as imagens com Qualidade 1.

Os valores de reflectância obtidos nas imagens MODIS, que abrangem as datas das campanhas realizadas em campo, foram correlacionados com as concentrações de clorofila-a levantadas em campo, utilizando o modelo de duas bandas NIR/Red. Foram descartados os levantamentos de campo próximos à margem ou nos canais de ligação, que podem influenciar na reflectância do MODIS devido à mistura espectral no pixel de 500 m. Além disto, as imagens sem informação, com qualidade ruim ou duvidosa (classificadas pelo MOD3R) não foram utilizadas na determinação do modelo NIR/Red para estimativa da clorofila-a.

Neste estudo, não foi possível realizar a validação do modelo NIR/Red por falta de um conjunto de dados de campo independente do que foi utilizado na obtenção da equação do modelo.

Índice de Estado Trófico

Após a geração da série de clorofila-a em cada laguna, foi realizada uma análise da permanência do tempo dos valores de concentração de clorofila-a. Faixas de classificação do Índice de Estado Trófico (IET) foram demarcadas nas curvas de permanência com base nos critérios utilizados por Lamparelli (2004), estabelecidos para ambientes lênticos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do Modelo

A Figura 2 apresenta o ajuste de um modelo potencial aos dados observados. Observa-se um bom ajuste ($r^2 = 0.83$) entre concentração de clorofila-a das amostras de campo e a razão entre as reflectâncias MODIS das bandas do infravermelho próximo e vermelho (R_{858}/R_{645}), para o CELMM. Além disto, nota-se que os valores de clorofila-a são complementares entre as lagunas, de maneira que o ajuste dos baixos valores de clorofila-a se concentram na laguna Mundaú enquanto os valores mais elevados de concentração de clorofila-a são ajustados aos dados da laguna Manguaba.

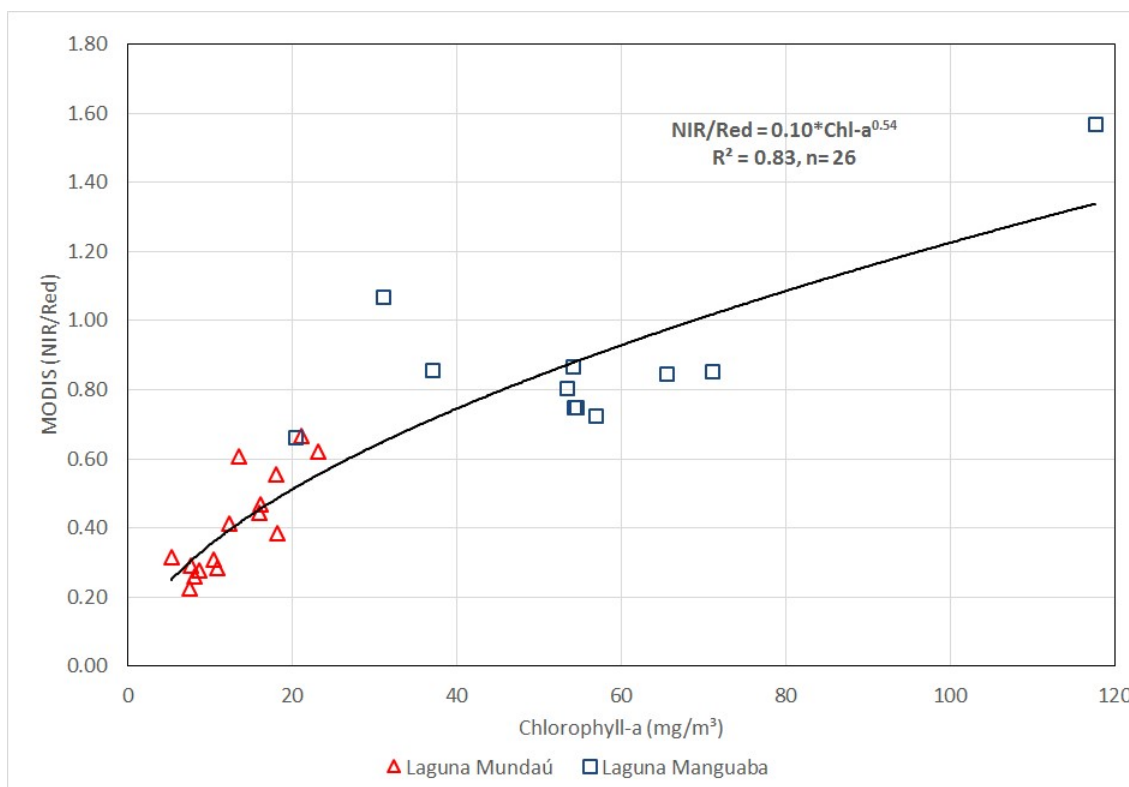


Figura 2. Correlação entre concentração medida de clorofila-a e modelo *NIR-Red* duas bandas utilizando dados MODIS.

Geração da Série Temporal de Clorofila-a

O modelo NIR/Red foi aplicado à série histórica mensal, sem falhas, de reflectância dos dados MODIS para gerar as séries temporais mensais médias de clorofila-a estimadas em cada laguna no período de 2000 a 2016. As estatísticas das séries geradas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Estatísticas da concentração estimada de clorofila-a em cada laguna.

Laguna	Mínimo	Máximo	Média	Desv Pad
	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	(%)
Mundaú	6.55	34.54	18.70	5.64
Manguaba	8.87	114.17	26.35	12.53

Analisando a série de clorofila-a estimada nas duas lagunas (Figura 3), não se observa uma tendência de aumento ou diminuição das concentrações de clorofila-a ao longo dos anos. Com relação ao IET nas lagunas ao longo do tempo, observa-se um grau de trofia mais elevado na laguna Manguaba (Figura 3d). Na Manguaba, cerca de 29% do período analisado (2002 – 20016) apresentou concentrações de clorofila-a equivalentes a ambientes supereutróficos, enquanto na Mundaú, este índice foi mantido por menos de 4% do período (2000 – 2015).

A reconstrução da série temporal de longo prazo de clorofila-a por sensoriamento permitiu realizar uma avaliação mais completa dos padrões temporais do estado trófico no CELMM. Esta avaliação também pode suportar ações estratégicas de gestores para mitigar os problemas relacionados à eutrofização no CELMM.

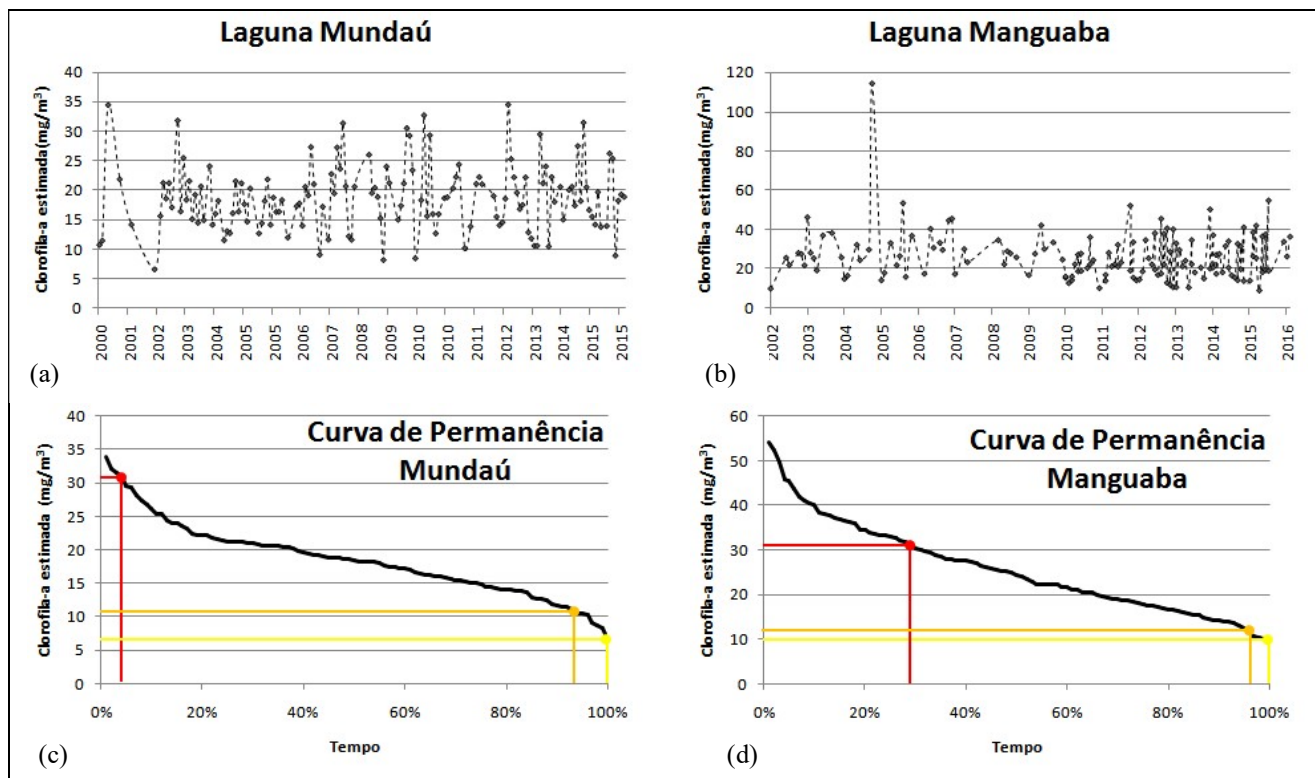


Figura 3. Série histórica da clorofila-a média estimada na (a) Laguna Mundaú e na (b) Laguna Manguaba. Curva de permanência no tempo do Índice de Estado Trófico na (c) Mundaú e na (d) Manguaba. Os marcos em amarelo, laranja e vermelho indicam Estado Mesotrófico, Eutrófico e Supereutrófico, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Edital MCTI/CNPq/2013 – Universal) e a FINEP (Edital No. 01.13.0419.0) que possibilitaram a compra dos radiômetros utilizados em campo, através dos referidos editais. À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de doutorado ofertada através do Edital PBPG-1148-3.01/12. Ao IMA/AL pela embarcação concedida para a realização das campanhas de campo realizadas.

REFERÊNCIAS

American Public Health, A., Eaton, A.D., American Water Works, A., & Water Environment, F. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF

Campbell, J. W.; e O'Reilly, J. E. (1988). Role of satellites in estimating primary productivity on the northwest Atlantic continental shelf. *Continental Shelf Research*, volume 8, number 2, pages 179-204

Lamparelli, M. C. 2004. Graus de Trofia em Corpos d'água do Estado de São Paulo: Avaliação dos métodos de monitoramento. *Tese de Doutorado- Ecologia Aplicada*. Universidade de São Paulo-Instituto de Biociências. 191 p

Le, C., Hu, C., English, D., Cannizzaro, J., Chen, Z., Feng, L., Boler, R., & Kovach, C. (2013). Towards a long-term chlorophyll-a data record in a turbid estuary using MODIS observations. *Progress in Oceanography*, 109, 90-103

Lins, C.R., Martinez, J.-M., Motta Marques, D.D., Cirilo, A.J., & Fragoso, R.C. (2017). Assessment of Chlorophyll-a Remote Sensing Algorithms in a Productive Tropical Estuarine-Lagoon System. *Remote Sensing*, 9

McCluney, W. R. (1976). Remote Measurement of Water Color. *Remote Sensing of Environment*, volume 5, pages 3-33.

Tundisi, J. G. e Tundisi, T.M. (2008). *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 610p.

Wang, M., Shi, W., & Tang, J. (2011). Water property monitoring and assessment for China's inland Lake Taihu from MODIS-Aqua measurements. *Remote Sensing of Environment*, 115, 841-854

Zhang, Y., Ma, R., Duan, H., Loiselle, S., Zhang, M., & Xu, J. (2016). A novel MODIS algorithm to estimate chlorophyll a concentration in eutrophic turbid lakes. *Ecological Indicators*, 69, 138-151

Yool, A. (1997). The dynamics of open-ocean plankton ecosystem models. Thesis Submitted for the Degree of PhD. University of Warwick. Department of Biological Sciences. England, United Kingdom. <http://go.warwick.ac.uk/wrap/1129>.