

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA CLOROFILA-A NO COMPLEXO ESTUARINO-LAGUNAR MUNDAÚ-MANGUABA (AL)

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

RESUMO – A análise da eutrofização requer grande esforço de amostragem no espaço-tempo. Assim, um modelo de duas bandas *NIR-Red* foi desenvolvido para reconstruir séries mensais de clorofila-a (indicador do estado trófico) a partir de imagens MODIS (500 m) no período de 2000 a 2016 no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba. Tais séries reconstituídas foram utilizadas para analisar a variabilidade espaço-temporal da clorofila-a no sistema. O uso inovador de estatísticas multivariadas combinadas possibilitou a redução da dimensionalidade dos dados e identificação de padrões espaço-temporais da variabilidade da clorofila-a, sendo possível sugerir a associação entre a variabilidade da clorofila-a e fatores ambientais.

ABSTRACT– Eutrophication analysis requires great effort of sampling over space and time. Thus, a two-band *NIR-Red* model was developed to reconstruct monthly chlorophyll-a (a trophic state indicator) series from MODIS images (500 m), from 2000 to 2016, at the Mundaú-Manguaba Estuarine-Lagoon System. Such reconstituted series were used to analyze spatiotemporal variability of chlorophyll-a in the system. The innovative use of combined multivariate statistics reduced data dimensionality and identified the main spatiotemporal patterns of chlorophyll-a variability. In addition, our results suggested probable association between chlorophyll-a variability and environmental factors.

Palavras-Chave – Eutrofização, MODIS, Estatística Multivariada

¹Bolsista de Pós Doutorado Júnior PDJ/CNPq (IPH/UFRGS). 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

A variabilidade espaço-temporal da comunidade fitoplanctônica em ambientes estuarinos é influenciada por diversos fatores ambientais, tais como: (a) temperatura da água e intensidade luminosa, (b) carreamento de nutrientes oriundos da descarga dos rios afluentes e do oceano, (c) padrões hidrodinâmicos do sistema, influenciando no transporte do plâncton e (d) predação por herbívoros, controlando o aumento da biomassa de fitoplâncton.

Diversos métodos analíticos podem ser usados para realizar uma avaliação adequada desta variabilidade espaço-temporal da clorofila-a em ambientes estuarinos (BIERMAN et al., 2011). Métodos estatísticos multivariados são especialmente apropriados, fornecendo poderosas ferramentas para reduzir a dimensionalidade e analisar grandes quantidades de dados. Por exemplo, técnicas como Análise de Componentes Principais (ACP), Análise de Cluster proporcionam uma rápida avaliação espaço-temporal de padrões de variabilidade e de associações entre as variáveis, e vem sendo utilizadas de maneira isolada, mas bem sucedida, em ambientes estuarinos (HARAGUCHI et al., 2015). Porém, o potencial do uso em conjunto destas técnicas estatísticas, aplicadas aos produtos de imagens de satélite, ainda é pouco conhecido na área de sensoriamento remoto de águas continentais e, portanto, pouco explorado para avaliação espaço-temporal de variáveis de qualidade da água. Desta forma, o objetivo deste estudo é identificar os padrões espaço-temporais da clorofila-a em um sistema estuarino-lagunar, utilizando técnicas de sensoriamento remoto e de estatísticas multivariadas.

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 e Análises Laboratoriais

Seis campanhas de campo foram realizadas a bordo de embarcação entre os meses de Maio a Setembro de 2015. 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.

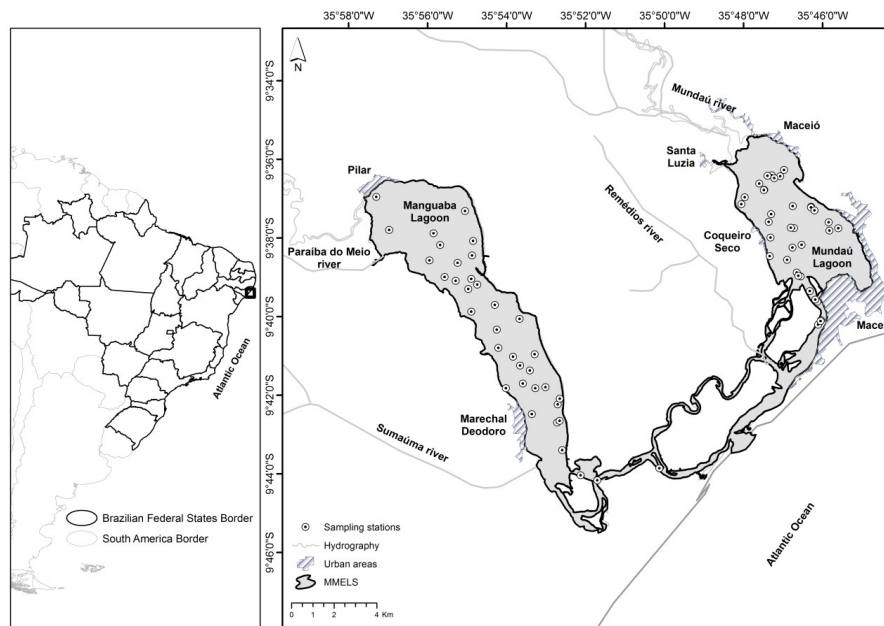


Figura 1. Localização do CELMM e distribuição espacial das estações de amostragem, onde foram coletadas amostras de água e radiometria (LINS *et al.*, 2018).

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 $^{\circ}\text{C}$, até atingirem um peso constante por medição gravimétrica (American Public Health *et al.* 2005).

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 lagunas Mundaú e Manguaba, entre os anos 2000 e 2016. 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) visando evitar, ou minimizar, a interferência da reflectância do fundo das lagunas ou mistura espectral de alvos diferentes da água,.

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.

Geração das séries espaço-temporais de clorofila-a

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 um modelo de duas bandas NIR/Red. O método de filtragem por autovetores (IBANEZ; CONVERSI, 2002) foi utilizado para eventual preenchimento de falhas nas séries históricas.

Padrões espaço-temporais da clorofila-a

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi utilizada para identificar os principais padrões de variabilidade de clorofila-a e discutir sobre os potenciais fatores ambientais que podem explicar estes padrões. A ACP foi aplicada à matriz de concentrações estimadas de clorofila-a contendo a informação de mês/ano nas linhas e os centróides dos pixels como colunas. Uma matriz, com valores de clorofila, de dimensão 139 linhas (tempo) por 53 colunas (espaço) foi disposta para análise na laguna Mundaú, e outra matriz de 83 linhas e 79 colunas para a laguna Manguaba. Neste sentido, a ACP é importante para reduzir o número de dados a serem analisados em componentes principais, cujos pesos representam a variabilidade de cada componente. Um número suficiente de componentes principais foi selecionado de maneira que a variabilidade total dos dados originais fosse representada em mais de 70%. Além disto, as componentes principais foram rotacionadas aplicando o procedimento varimax a fim de atenuar as restrições de ortogonalidade da ACP e facilitar o entendimento dos padrões espaciais (RICHMAN, 1986).

Com o intuito de identificar regiões similares de variabilidade espacial da clorofila-a estimada por satélite, uma Análise de Agrupamento (Cluster) foi realizada. Foram utilizadas as primeiras componentes principais rotacionadas com a finalidade de filtrar o ruído na série original dos dados. O método de Ward foi utilizado para estabelecer os grupos homogêneos. Tanto a AA quanto a ACP foram realizadas utilizando um pacote estatístico do programa MATLAB.

RESULTADOS

Modelo *NIR-Red* para estimativa da clorofila-a

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. Nota-se que o ajuste dos baixos valores de clorofila-a se concentram na Mundaú enquanto os valores mais elevados de clorofila-a são ajustados aos dados da Manguaba.

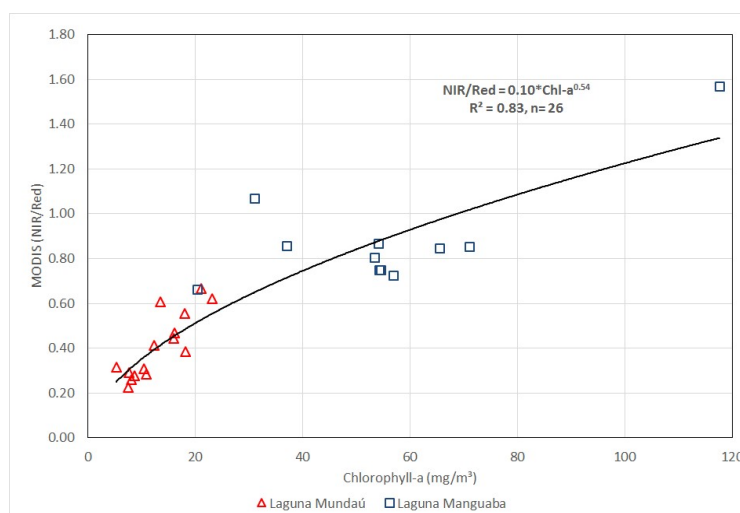


Figura 2. Correlação entre concentração medida de clorofila-a e modelo *NIR-Red* duas bandas utilizando dados MODIS.

Padrões espaço-temporais da clorofila-a no CELMM

As quatro primeiras Componentes Principais (CP) rotacionadas da Análise de Componentes Principais (ACP) conseguem explicar cerca de 70% da variabilidade dos dados originais de clorofila-a no CELMM (Tabela 1), sendo mais de 50% desta variabilidade concentrada nos 2 primeiros eixos nas duas lagunas. A distribuição dos autovetores resultantes da ACP rotacionada, aplicada à laguna Mundaú, é apresentada na Figura 3.

Tabela 1 – Percentual da variância explicada através das quatro primeiras componentes principais rotacionadas nas lagunas Mundaú e Manguaba.

Laguna	CP1	CP2	CP3	CP4
Mundaú	28,11%	25,27%	13,23%	6,05%
Manguaba	36,70%	27,93%	7,16%	6,71%

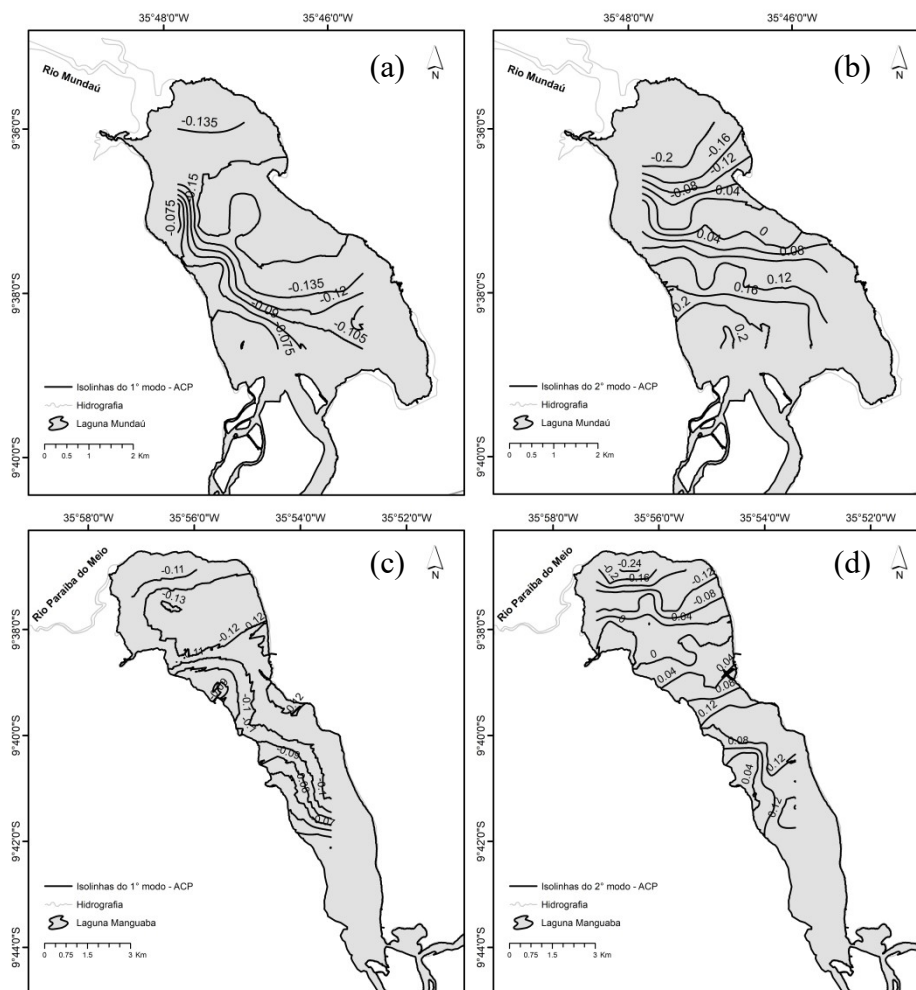


Figura 3 – Isolinhas dos autovetores da matriz de co-variância da (a,c) primeira e (b,d) segunda componentes da ACP rotacionada de clorofila-a nas lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente (LINS *et al.*, 2018).

A Análise de Agrupamento, utilizando as quatro primeiras componentes principais, permitiu a identificação de 4 (quatro) Grupos Homogêneos em cada laguna. A distribuição espacial dos grupos é apresentada na Figura 4. Observa-se, na laguna Manguaba (Figura 4b), um gradiente longitudinal de clorofila-a entre os grupos, com as maiores concentrações presentes no GH1 e as menores no GH4 (Tabela 2).

A Figura 5 apresenta as médias mensais das concentrações de clorofila-a, estimadas por bandas MODIS, em cada grupo homogêneo definido para as lagoas Mundaú e Manguaba, respectivamente. Na laguna Mundaú, observa-se a ocorrência de valores mais elevados de clorofila-a nos meses de período seco (entre Outubro e Março), com destaque para o mês de Março no GH4. Já na Manguaba, os meses de período chuvoso (Abril, Maio e Junho) apresentam elevadas concentrações de clorofila-a, com destaque para o mês de Maio observado no GH1.

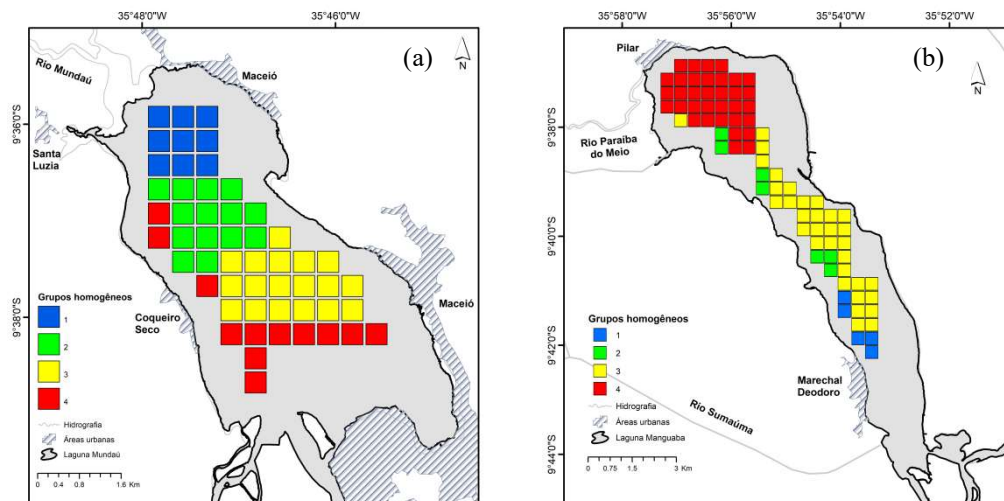


Figura 4 – Grupos Homogêneos (GH) identificados pela análise de agrupamento obtida a partir dos autovalores das quatro primeiras componentes rotacionadas da Análise de Componentes Principais (ACP), no domínio da: (a) lagoa Mundaú, e (b) lagoa Manguaba (LINS *et al.*, 2018).

Tabela 2 – Estatísticas da concentração da clorofila-a nos Grupos Homogêneos em cada lagoa.

Lagoa	Grupo	Mínimo(mg/m ³)	Máximo(mg/m ³)	Média (mg/m ³)	Desv Pad (%)
Mundaú	GH1	6,42	46,88	18,81	7,18
	GH2	5,95	37,29	17,48	6,15
	GH3	4,22	35,44	17,04	5,95
	GH4	6,62	51,24	22,54	7,94
Manguaba	GH1	9,96	263,77	72,86	51,73
	GH2	13,85	139,05	41,88	25,13
	GH3	8,27	155,10	31,05	16,69
	GH4	8,25	79,42	23,68	10,11

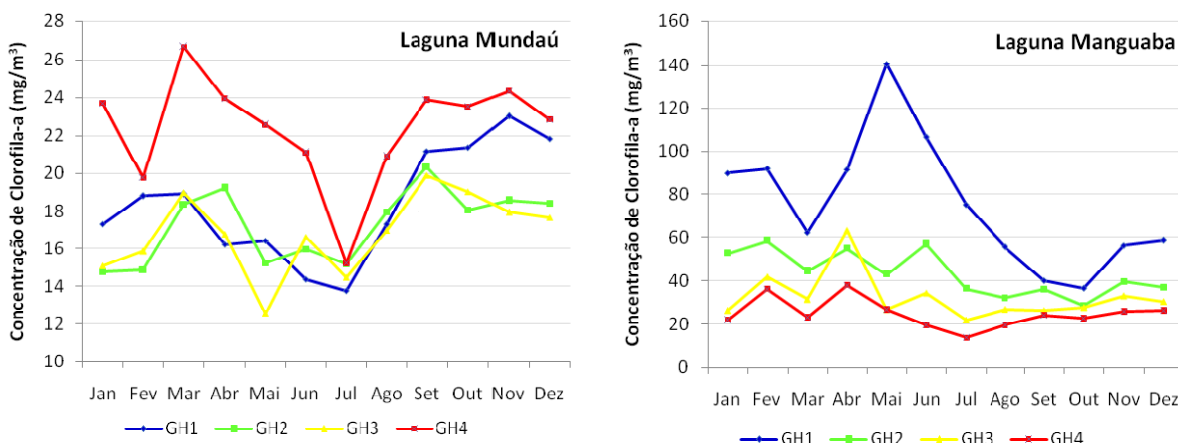


Figura 5 – Variabilidade temporal da concentração média estimada de clorofila-a dos grupos homogêneos (GH) identificados nas lagoas Mundaú e Manguaba, no período de 2002 a 2016 (LINS *et al.*, 2018).

DISCUSSÃO

A primeira componente da Análise de Componentes Principais (ACP) rotacionada (Figura 3a), apresenta um gradiente transversal (entre as margens oeste-leste) constituído por valores negativos

de autovetores em toda a laguna Mundaú. Com relação à Manguaba, tem-se que a primeira componente da ACP rotacionada (Figura 3c) é constituída por valores negativos de autovetores e apresenta um gradiente transversal (entre as margens oeste-leste) que abrange o centro e sul da laguna, enquanto a região norte destaca-se por um gradiente distinto das demais regiões. Este padrão principal de variabilidade pode estar associado ao tempo de residência hidráulica (TRH). Em termos gerais, o TRH médio na laguna Mundaú é menor que o TRH na laguna Manguaba (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993; SOUZA, 2017). Isto ocorre em função da menor influência das forçantes de maré na laguna Manguaba devido a um maior estrangulamento nos canais de ligação em comparação com a laguna Mundaú, resultando em uma menor penetração de águas oceânicas nesta laguna. Na Mundaú, os menores TRH (variando entre 6 horas no sul e 18 dias no norte) são encontrados próximos à margem oeste, o que indica uma maior circulação nesta região desde a foz do rio Mundaú até a entrada do canal que interliga a laguna ao oceano (BRITO JR.; FRAGOSO JR.; LARSON, 2018). Já a região mais central e a região próxima à margem leste foram encontrados TRH maiores (entre 23 e 27 dias), o que as tornam mais estagnadas e, neste caso, com menor variabilidade na concentração de clorofila-a (ver desvio padrão na Tabela 2). O comportamento espacial do TRH na laguna Manguaba foi estimado recentemente por Souza (2017), porém, o efeito da circulação devido ao vento não foi considerado. No entanto, alguns estudos mostraram que o vento exerce papel fundamental na distribuição de correntes e mistura na laguna Manguaba (OLIVEIRA; KJERFVE, 1993). Desta forma, a associação da distribuição espacial da clorofila-a com o TRH pode ser limitada na laguna Manguaba.

Outro fator que pode influenciar neste padrão de variabilidade é a contribuição lateral de carga orgânica por fontes pontuais e difusas provenientes do uso e ocupação do solo no entorno das lagunas. Neste caso, Costa et al. (2011) identificaram, para o período chuvoso, que as principais fontes de matéria orgânica particulada proveniente do entorno do CELMM foram principalmente: o lançamento de esgotos não tratados na laguna Mundaú pelos municípios de Santa Luzia e Coqueiro Seco (margem oeste) e Maceió (margem leste) e, na Manguaba, fertilizantes e nutrientes provavelmente resultantes do cultivo de cana-de-açúcar. Os mesmos autores observaram que a contribuição por esgotos na Manguaba foi praticamente inexistente, sendo observada uma pequena parcela próxima aos exutórios dos rios Sumáuma e Paraíba do meio.

A Segunda componente principal apresenta um gradiente longitudinal diferenciando a variabilidade da concentração de clorofila-a encontrada entre a extremidade norte das lagunas (próximas ao aporte fluvial dos rios Mundaú e Paraíba do Meio) e a região sul (mais próxima à

entrada do canal que as interligam ao oceano), através da indicação dos valores de autovetores com sentidos opostos (Figura 3b, Figura 3d).

Na laguna Mundaú, esta componente pode estar captando os efeitos da descarga fluvial e de maré nas extremidades norte/sul que apresentaram as maiores concentrações de clorofila-a. Porém, não se observa um crescimento exagerado de algas nesta região, sugerindo que o principal aporte de SST (i.e. descarga de sólidos pelo rio Mundaú, OLIVEIRA; KJERFVE, 1993) pode limitar o crescimento de algas. Na região centro-leste da laguna Mundaú (GH2 e GH3), apesar dos elevados TRH (BRITO JR.; FRAGOSO JR.; LARSON, 2018) e aporte constante de nutrientes (por esgotos domésticos e/ou resultantes da própria decomposição do fitoplâncton), não foram observados altos valores de clorofila-a (por exemplo acima de 60 µg/L) nesta região central. Esta limitação está possivelmente relacionada a uma maior taxa de mortalidade e de predação por bivalves (sobretudo pelo sururu, *Sp. Mytella charruana*) e devido a uma maior limitação de crescimento por inibição da luz na água, limitando o desenvolvimento de fitoplâncton nesta região.

Na laguna Manguaba o gradiente longitudinal da clorofila-a parece estar associado à sazonalidade das estações secas e chuvosas. No período seco, o desenvolvimento de espécies de fitoplâncton mais adaptadas a água doce parece estar mais associado ao menor aporte de material particulado inorgânico pelo rio Paraíba do Meio e à elevada produção autóctone de nutrientes. No período chuvoso, o aumento da descarga fluvial e de sólidos, possivelmente, limita o crescimento do fitoplâncton na região norte da laguna Manguaba (GH4) em comparação às demais regiões.

Na região central da laguna Manguaba (GH2 e GH3), são observados valores muito altos de clorofila-a, quando comparados à laguna Mundaú, que ocorrem, provavelmente, não apenas em função das menores concentrações de material particulado inorgânico em suspensão, em relação à região norte, mas, principalmente, em função do tipo de espécie dominante nesta região. Melo-Magalhães *et al.* (2009) identificaram que as espécies dominantes na Manguaba são as cianofíceas de águas doces, principalmente *Anabaena spiroides*, no período seco, e *Microcystis aeruginosa*, no período chuvoso, e espécies de diatomáceas, com dominância de *Cytonella meneghiniana*. Ao sul da laguna Manguaba (GH1), a variabilidade da clorofila-a parece estar mais relacionada ao maior aporte de nutrientes e matéria orgânica do rio Sumaúma e do Município de Marechal Deodoro, menor turbidez em relação à região norte e a dominância de espécies de cianobactérias de água doce, sobretudo *Microcystis aeruginosa*, reconhecidas como estrategistas, capazes de se movimentar rapidamente na vertical, o que lhe permite buscar melhores condições de luminosidade e, portanto, propiciar o seu desenvolvimento.

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. et al. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF, 2005. ISBN 0875530478 9780875530475.

BIERMAN, P. et al. A review of methods for analysing spatial and temporal patterns in coastal water quality. *Ecological Indicators*, v. 11, n. 1, p. 103-114, 2011.

BRITO JR., A. N. D.; FRAGOSO JR., C. R.; LARSON, M. *Tidal exchange in a choked coastal lagoon: A study of Mundaú Lagoon in northeastern Brazil*.: Lund University 2017.

COSTA, T. L. F. et al. Sources and Distribution of Particulate Organic Matter of a Tropical Estuarine-Lagoon System from NE Brazil as Indicated by Lipid Biomarkers. *Aquat Geochem*, v. 17, p. 1-19, 2011.

HARAGUCHI, L. et al. Long-term changes of the phytoplankton community and biomass in the subtropical shallow Patos Lagoon Estuary, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 162, p. 76-87, 2015.

IBANEZ, F.; CONVERSI, A. Prediction of missing values and detection of ‘exceptional events’ in a chronological planktonic series: a single algorithm. *Ecological Modelling*, v. 154, n. 1–2, p. 9-23, 2002.

LINS, C. R. et al. Assessment of Chlorophyll-a Remote Sensing Algorithms in a Productive Tropical Estuarine-Lagoon System. *Remote Sensing*, v. 9, 2017.

LINS, C. R. et al. A Multivariate Analysis Framework to Detect Key Environmental Factors Affecting Spatiotemporal Variability of Chlorophyll-a in a Tropical Productive Estuarine-Lagoon System. *Remote Sensing*, v. 10, 2018.

MELO-MAGALHÃES, E. et al. Determination of eutrophic areas in Mundaú/Manguaba lagoons, Alagoas-Brazil, through studies of the phytoplanktonic community. *Brazilian Journal of Biology*, v. 69, p. 271-280, 2009.

OLIVEIRA, A. M.; KJERFVE, B. Regular Article: Environmental Responses of a Tropical Coastal Lagoon System to Hydrological Variability: Mundaú-Manguaba, Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 37, p. 575-591, 1993.

RICHMAN, M. B. Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, v. 6, n. 3, p. 293-335, 1986.

SOUZA, A. *Avaliação do efeito do assoreamento na hidrodinâmica e no tempo de residência de um Complexo Estuarino Lagunar tropical*. 2017. (Master). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL.