

Estimativa, por sensoriamento remoto, das concentrações de clorofila-a e carbono orgânico total em reservatórios do semiárido brasileiro, a partir de imagens do sensor OLI/ LANDSAT 8

Estimate of chlorophyll-a and total organic carbon concentrations in reservoirs in the brazilian semi-arid-climate regions through remote sensing using OLI/LANDSAT-8 sensor images

Estimación por sondeo remoto de las concentraciones de clorofila-a y carbono orgánico total en depósitos de la región semiárida brasileña, a partir de imágenes del sensor OLI/ LANDSAT8.



Herbster De-Carvalho

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

prof.herbster.ricarvalho@gmail.com



Gustavo Henry-Silva

Universidade Federal Rural do Semiárido

gustavo@ufersa.edu.br

Resumo: O objetivo do estudo foi estimar, por meio de sensoriamento remoto (OLI/LANDSAT 8 – LS8), as concentrações de clorofila-a (Cl-a) e carbono orgânico total (COT). Entre 2017 e 2018 foram realizadas seis coletas de amostras de água nos reservatórios de Umari e Mendubim, no

semiárido nordestino, para determinação dos valores Cl-a e COT. Foram calculados os coeficientes de correlação entre as bandas espectrais das imagens OLI/LS8 e os valores de Cl-a e COT para selecionar as bandas a serem utilizadas nas regressões lineares simples e múltiplas entre os valores de reflectância e os valores das variáveis limnológicas. Houve correlação entre os dados de campo e os valores estimados a partir da combinação das bandas B4 e B5 para Cl-a ($R^2=0,87$) e B2 e B5 para COT ($R^2=0,80$). Houve correlação entre os dados obtidos nos reservatórios e os recuperados a partir das imagens OLI/LS8, com coeficientes de correlação de 0,76 para Cl-a e 0,71 para COT em Umari e de 0,78 para Cl-a e 0,72 para COT em Mendubim. Os modelos foram eficientes na estimativa de Cl-a e COT nos ambientes estudados, mostrando a viabilidade no uso de imagens no monitoramento remoto destas variáveis limnológicas em reservatórios do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica. Variáveis opticamente ativas. Imagem de Satélite. Variáveis Limnológicas.

Abstract: The purpose of the study was to estimate the chlorophyll-a (Chl-a) and total organic carbon (TOC) concentration through remote sensing (OLI/LANDSAT-8 – LS8). During 2017 and 2018, water was collected six times from the Umari and Mendubim reservoirs, located in the semi-arid-climate regions of the Brazilian Northeast area, so as to determine the Chl-a and TOC values. Correlation coefficients between the spectral bands of OLI/LS8 images and the Chl-a and TOC values were calculated to select the bands to be used in simple and multiple linear regressions between the reflectance values and the limnological variable values. A correlation was found between the field data and the values estimated from the combination of B4 and B5 bands for Chl-a ($R^2=0.87$), and B2 and B5 for TOC ($R^2=0.80$). A correlation was found between the data obtained in the reservoirs and recovered from the OLI/LS8 images, with correlation coefficients of 0.76 for Chl-a and 0.71 for TOC in Umari, and 0.78 for Chl-a and 0.72 for TOC in Mendubim. The models were efficient in the Chl-a and TOC estimates in the environments studies, showing the feasibility of image use in the remote monitoring of these limnological variables in reservoirs located in the semi-arid-climate regions of Brazil.

Keywords: Drainage Basin. Optically-Active Variables. Satellite Image. Limnological Variables.

Resumen: El objetivo del estudio era estimar, mediante sondeo remoto (OLI/LANDSAT-8 - LS8), las concentraciones de clorofila-a (Cl-a) y carbono

(OLI/LANDSAT 8 - LS8), las concentraciones de clorofila-a (Cl-a) y carbono orgánico total (COT). Entre 2017 y 2018 se realizaron seis recolecciones de muestras de agua en los depósitos de Umari y Mendubim, en el noreste semiárido, para determinar los valores de Cl-a y COT. Se calcularon los coeficientes de correlación entre las bandas espectrales de las imágenes OLI/LS8 y los valores de Cl-a y COT para seleccionar las bandas que se utilizarían en las regresiones lineales simples y múltiples entre los valores de reflectancia y los valores de las variables limnológicas. Hubo correlación entre los datos de campo y los valores estimados a partir de la combinación de las bandas B4 y B5 para el Cl-a ($R^2=0.87$) y B2 y B5 para el COT ($R^2=0.80$). Hubo correlación entre los datos obtenidos de los depósitos y los recuperados de las imágenes OLI/LS8, con coeficientes de correlación de 0.76 para el Cl-a y 0.71 para el COT en Umari y 0.78 para el Cl-a y 0.72 para el COT en Mendubim. Los modelos fueron eficientes en la estimación de Cl-a y COT en los ambientes estudiados, mostrando la viabilidad del uso de imágenes en el seguimiento remoto de estas variables limnológicas en depósitos de la región semiárida brasileña.

Palabras clave: Cuenca Fluvial. Variables Ópticamente Activas. Imagen De Satélite. Variables Limnológicas.

Introdução

A taxa de consumo mundial de água cresce 1% ao ano; sendo que, fatores como o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico tendem a aumentar de forma exponencial essa taxa em duas décadas (UNESCO, 2018). O uso inadequado da água, aliado ao aumento da demanda e, a crescente degradação dos recursos hídricos pela poluição, têm levado algumas regiões a uma situação de escassez (FAITÃO, *et al.*, 2018).

Em regiões semiáridas, os reservatórios são as principais fontes de água para o consumo humano, agrícola e industrial, o que torna essencial medidas preventivas e de controle da poluição desses corpos hídricos (LOPES, *et al.*, 2016; ROCHA, ANDRADE e LOPES, 2015). A necessidade de suprir a demanda hídrica, principalmente, durante os longos períodos de estiagem, culminou com criação de uma rede de reservatórios complexa de ser administrada, e com uma grande parte destes ambientes aquáticos estando atualmente eutrofizados ou em processo de eutrofização (MALVEIRA, ARAÚJO e GÜNTNER, 2012). A eutrofização é o principal resultado da deterioração da qualidade da água, sendo resultante do desequilíbrio provocado pelo aporte excessivo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo (CALLISTO, *et al.*, 2004; OLIVEIRA, *et al.*, 2017). Assim, para aumentar a efetividade da gestão dos recursos hídricos, é relevante o desenvolvendo de tecnologias e procedimentos que venham facilitar o monitoramento dos reservatórios, principalmente em regiões do semiárido brasileiro.

Os métodos de monitoramento aplicados na avaliação dos corpos hídricos são limitados, tanto em escala espacial, como temporal. Neste contexto, o sensoriamento remoto é uma ferramenta para obtenção de informações importantes para monitoramento destes corpos hídricos (LOPES, *et al.*, 2014a; LOPES *et al.*, 2014b; PALMER, TIITKUTSER e HUNTER, 2014). O uso do sensoriamento remoto permite inferir a relação entre compostos limnológicos opticamente ativos e a resposta espectral da água em função da concentração desses compostos (BONANSEA *et al.*, 2015). Alguns trabalhos analisaram a relação das concentrações de compostos opticamente ativos (COAs), utilizando imagens geradas por sensores abordo de satélites, tais como: carbono orgânico dissolvido (ALCÂNTARA, BERNARDO, *et al.*, 2017), clorofila (COELHO, *et al.*, 2017; MUNAR, *et al.*, 2018; WATANABE, *et al.*, 2018), transparência da água (GOMES, *et al.*, 2020) e matéria orgânica

dissolvida (MASOCHA, *et al.*, 2017; CAO, *et al.*, 2018). O monitoramento da concentração de Cl-a possibilita avaliar, de forma indireta, a qualidade da água em função da densidade fitoplanctônica, sendo uma potencial indicadora da densidade de cianobactérias nos ambientes aquáticos (MARINO, 2017). Já a análise da variação do carbono orgânico total (COT) permite avaliar, indiretamente, a concentração de matéria orgânica dissolvida, tendo em vista a forte correlação entre essas variáveis (ALCÂNTARA, BERNARDO, *et al.*, 2017).

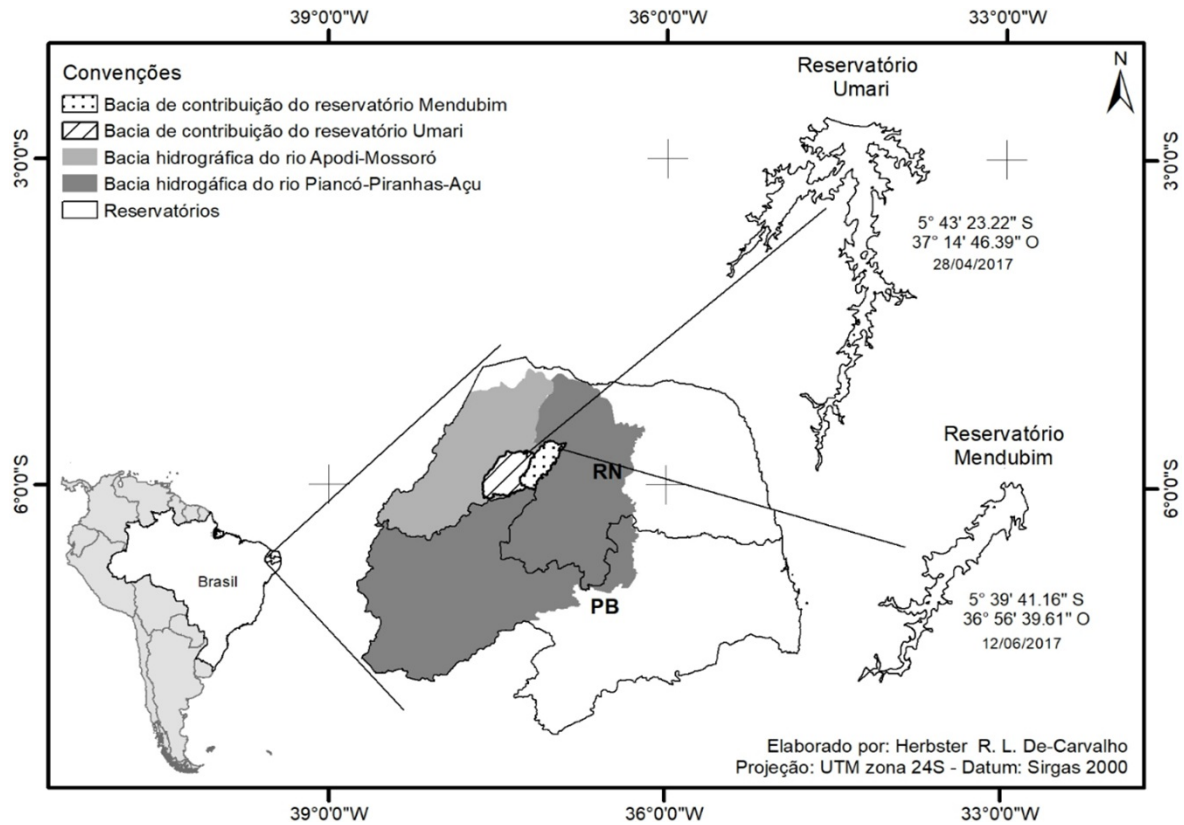
A maioria dos modelos usados no monitoramento da qualidade da água foram desenvolvidos para águas oceânicas, usando principalmente os sensores MODIS, MERIS e TM/Landsat 5. Apesar de os dois últimos serem os mais adequados para ambientes aquáticos continentais, estão inativos (WATANABE, *et al.*, 2017). Com resolução espacial semelhante ao sensor TM/LS5, o sensor OLI (Operational Land Imager), abordo do satélite Landsat 8 (LS8), lançado pela NASA em 2013, pode ser uma ferramenta importante no monitoramento remoto de ambientes aquáticos. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo estimar as concentrações de clorofila-a (Cl-a) e carbono orgânico total (COT) em dois reservatórios do semiárido brasileiro, por meio de sensoriamento remoto, usando imagens do sensor OLI/LS8.

Materiais e métodos

Área de estudo

O reservatório Umari é resultante do barramento do rio do Carmo e localiza-se no município de Upanema-RN (05°43' 23,22" S; 37°14' 46,39" O). Sua bacia de contribuição possui uma área de 1.546,21 km², sendo uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró (SEMARH, 2010). O reservatório de Mendubim é resultante do barramento do Rio Paraú e localiza-se no município de Açu/RN (05°39'41,6" S; 36° 56'36,61" O). Possui uma bacia de contribuição de 968,13 km², sendo uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu, uma das bacias federais do Rio Grande do Norte (OLIVEIRA, BARBOSA e DANTAS NETO, 2013)(Figura 1).

Figura 1 - Reservatórios Umari, na bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró, e Mendubim, na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu. Ambos no semiárido do estado do Rio Grande do Norte.



As bacias de contribuição dos reservatórios Umari e Mendubim, são geminadas, com características morfométricas semelhantes, possuem formato alongado, baixa tendência a enchentes, canais principais com baixa velocidade de escoamento e potencial de contribuição hídrica (DE-CARVALHO e HENRY-SILVA, 2020). A região dos reservatórios possui clima do tipo BSw'h', quente e semiárido, com estações chuvosas mal distribuídas, com atraso para o outono (KÖPPEN e GEIGER, 1936).

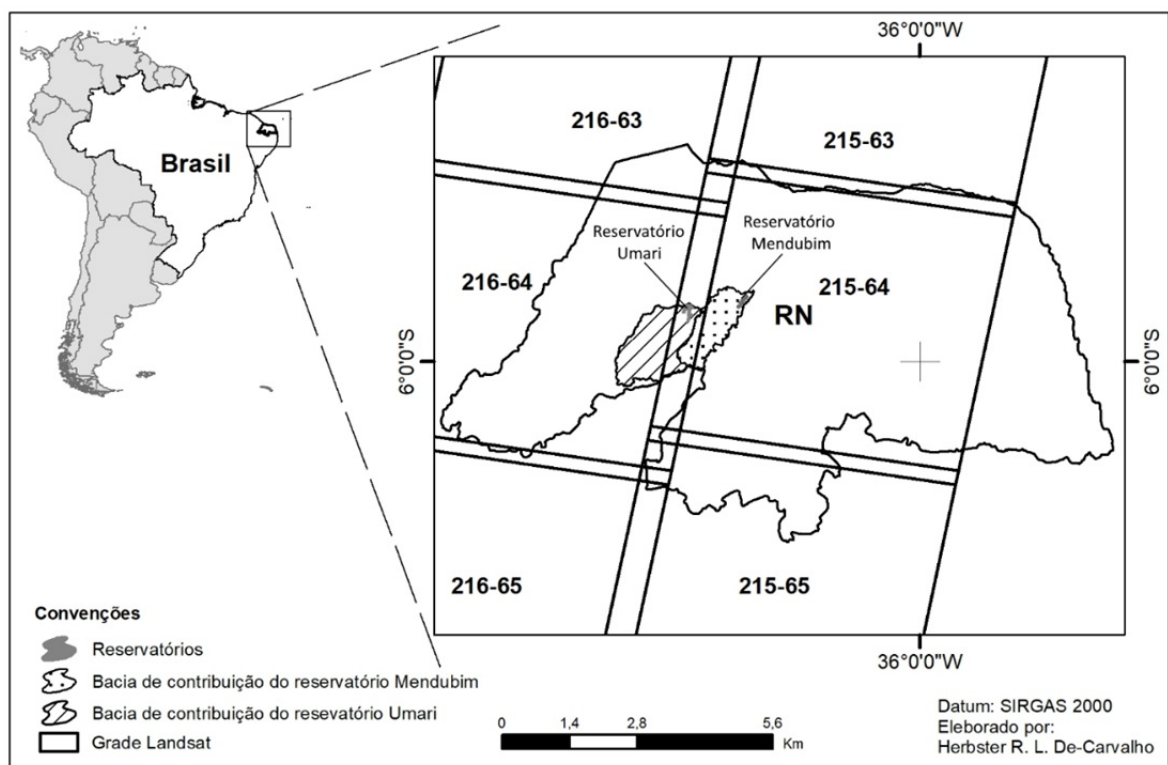
Locais de amostragem

Os locais de coleta das variáveis limnológicas nos reservatórios Umari e Mendubim foram selecionados utilizando os shapes dos reservatórios, resultantes do geoprocessamento de

de imagens do satélite LANDSAT 8 (LS8). As imagens foram escolhidas em função de dois parâmetros: serem as mais recentes possíveis e apresentarem o mínimo de cobertura de nuvens sobre as áreas dos reservatórios em estudo. As imagens LS8 foram adquiridas do site do “United States Geological Survey” (USGS). Nesse site as imagens e suas coberturas estão organizadas de acordo com a grade LANDSAT, sendo as mesmas identificadas por sua respectiva órbita/ponto (Umari: 216-64, Mendubim: 215-64), (Figura 2).

Para extração do layout dos reservatórios, foi criada uma máscara d'água a partir das imagens escolhidas (Umari 28/04/2017; Mendubim 12/06/2017), aplicando o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), adaptado para o uso em imagens LANDSAT 8 (BORGES, PACHÊCO e SANTOS, 2015).

Figura 2 - Cobertura da grade LANSAT, por orbita/ponto, das áreas de estudo



Fonte: Grade LANDSAT 8 (USGS, 2013).

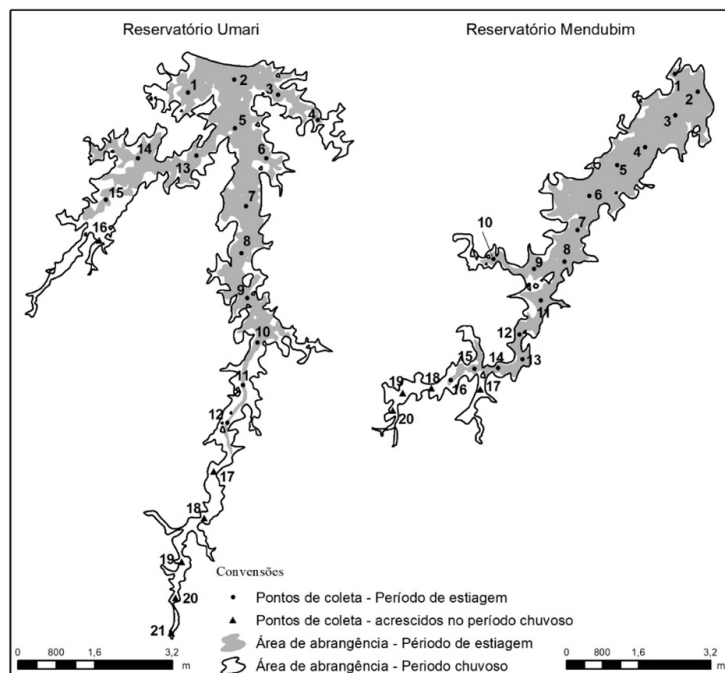
Usando operação booleana, foram delimitados os corpos hídricos nas imagens e, exportados como “shapes” os layouts dos reservatórios em estudo. A partir dos layouts, inicialmente foram

georreferenciados 18 pontos de coleta no reservatório Umari e 12 pontos em Mendubim. Posteriormente, com a expansão das áreas abrangidas pelos reservatórios, por conta do período chuvoso, o número de locais de amostragens aumentou para 21 em Umari e, para 20 em Mendubim (Figura 3).

Coleta de dados limnológicos

Os dados limnológicos foram coletados a cada dois meses, respeitando a resolução temporal do satélite Landsat 8, entre outubro de 2017 e agosto 2018. As coletas foram realizadas no dia da passagem do satélite pelos reservatórios ou, no mais tardar, no dia seguinte. Ao todo foram realizadas seis coletas em cada reservatório, três no período de estiagem e três no período no chuvoso (jan. a mai.). No reservatório de Mendubim, uma coleta não foi aproveitada, e outras coletas, em ambos os reservatórios, tiveram quantidades de pontos parcialmente aproveitadas devido a impossibilidade de extração de dados espectrais, tendo em vista a cobertura de nuvens de alguns desses pontos de coleta (Tabela 1). Durante as coletas foi mensurada *in loco* a transparência com o disco de Secchi, e determinados em laboratório: carbono orgânico total (COT) e clorofila-a (Cl-a) e fósforo total (PT).

Figura 3 - Pontos de coleta nos reservatórios Umari e Mendubim.



Fonte: Grade LANDSAT 8 (USGS, 2013).

Tabela 1 - Percentual de aproveitamento de amostras em função da cobertura de nuvens.

Reservatórios	Coleta	% Cobertura nuvens*	Aproveitamento	Pontos coletados	Nº Pontos Válidos	% de pontos válidos
Umari	1 ^a	11,85	Parcial	18	9	50,0
	2 ^a	24,32	Parcial	18	9	50,0
	3 ^a	25,77	Parcial	18	7	38,9
	4 ^a	40,20	Parcial	21	20	95,2
	5 ^a	0,49	Total	21	19	90,4
	6 ^a	1,28	Total	21	19	90,4
Mendubim	1 ^a	54,82	Parcial	12	7	58,3
	2 ^a	51,75	Parcial	12	6	50,0
	3 ^a	29,75	Parcial	12	7	58,3
	4 ^a	24,00	Total	20	18	90,0
	5 ^a	30,39	Parcial	20	11	55,0
	6 ^a	90,17	-	20	0	0,0

*Índice fornecido pelo "United States Geological Survey (USGS)", refere-se cobertura de nuvens de toda a cena imageada, não apenas do espaço sobre as áreas dos reservatórios estudados.

Na análise estatística descritiva das variáveis limnológicas (média e desvio padrão) foram considerados apenas os dados dos pontos de coleta que não estivessem encobertos por nuvens. A partir da tabulação dos dados coletados, foi criado um shape de pontos georreferenciados, por coleta, usando o programa livre QGis 2.18., a fim de ser utilizado na extração dos dados espectrais das imagens. Além da análise espacial das variáveis limnológicas, foram calculados os índices de estado tróficos de acordo com Toledo Jr (1990), utilizando as concentrações de nitrogênio, de fósforo determinadas em laboratório e a transparência de Secchi medida em campo (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes tróficas (TOLEDO JR, 1990)

Classificação trófica	Índice de estado trófico (IET)
Ultraoligotrófico	$IET \leq 24$
Oligotrófico	$24 < IET \leq 44$
Mesotrófico	$44 < IET \leq 54$
Eutrófico	$54 < IET \leq 74$
Hipereutrófico	$IET > 74$

Extração de dados espectrais

As imagens foram adquiridas bimestralmente, em função das datas de coleta de campo, da *Landsat Collection Level-1*, sensor Landsat8/OLI C1 *Level-1*, a partir da plataforma “Earth Explore” do USGS, sendo estas reprojadas para o Datum SIRGAS 2000, projeção UTM Zona 24S. Com intuito realizar as correções atmosféricas, projetou-se as imagens para reflectância de topo de atmosfera (*Top of atmosphere reflectance* - TOA), utilizando os metadados das imagens e a metodologia indicada pelo USGS (IHLEN, 2019). Em seguida, aplicou-se o método da subtração de objeto escuro (*Dark Object Subtraction* - DOS), com a finalidade de verificar a existência de pixels inválidos. No entanto, por ter sido verificada pouquíssima variação para os valores de pixel, não foi necessário manter as correções derivadas da aplicação do DOS.

Nas combinações de bandas aplicadas na análise da distribuição da concentração das variáveis opticamente ativas, foram utilizadas duas bandas do espectro visível: Banda do azul (B2, 450-510 nm), Banda vermelha (B4, 640-670 nm), e uma no comprimento de onda do infravermelho próximo NIR (B5, 850-880 nm) e duas no comprimento de ondas curtas na região do infravermelho SWRI1(1570-1650) e SWRI2(2110-2290). A escolha das bandas, utilizadas nas combinações testadas, foi realizada em função da literatura consultada e, das análises de regressões lineares entre os dados espectrais, extraídos das bandas Landsat 8, e as concentrações de clorofila-a e carbono orgânico total, oriundas dos dados de campo. Os dados espectrais de reflectância, utilizadas nas análises estatísticas, foram extraídos diretamente das bandas ou combinações escolhidas, após os procedimentos de correção. Em todos os procedimentos de geoprocessamento, aplicados nesse trabalho, foram priorizados programas e bancos de dados livres.

Integração entre dados limnológicos e espectrais

A escolha das bandas utilizadas no presente trabalho baseou-se em dados acadêmicos de outros autores como Bitencourt e Mantelli (2015), Brezonik, *et al.* (2014), Mishra e Mishra (2012), dentre outros; os quais indicaram os intervalos de comprimento de onda adequados para a análise das variáveis limnológicas opticamente ativas aqui estudadas. Inicialmente, foi calculado o coeficiente de correlação entre as bandas espectrais das imagens LS8 (B1 a B7) e os dados limnológicos (Cl-a, COT), com a finalidade de escolher as bandas que seriam utilizadas na análise dos modelos de regressão. Neste caso, só foram utilizadas bandas que resultaram em coeficiente de determinação maior ou igual a 50% ($R^2 \geq 0,5$). Em seguida, foram realizadas regressões lineares simples e múltiplas entre os valores de reflectância e as concentrações de Cl-a e COT e, calculado o coeficiente de determinação R^2 , a fim de determinar a melhor equação de ajuste entre os dados limnológicos e os espectrais. Para validar as equações de ajuste encontradas, foi calculado o erro quadrático médio (RMSE) entre os dados de Cl-a e COT das amostras coletadas em ambos os reservatórios e os valores recuperados a partir das imagens geradas com a aplicação das equações de ajuste. Em todas as análises estatísticas, foi considerado um nível de significância de 0,05. Após a validação estatística, as equações de ajuste foram aplicadas em uma das coletas realizadas nos reservatórios, afim de gerar um mapa temático para ambas as variáveis limnológicas e, revalidar as relações estatísticas encontradas.

Resultados e Discussão

Na tabela 3, são apresentados os valores médios e desvios padrão das variáveis opticamente ativas (Cl-a e COT) e das variáveis fósforo total e transparência da água, obtida com o uso do Disco de Secchi, que foram utilizadas para cálculo do índice de estrado trófico.

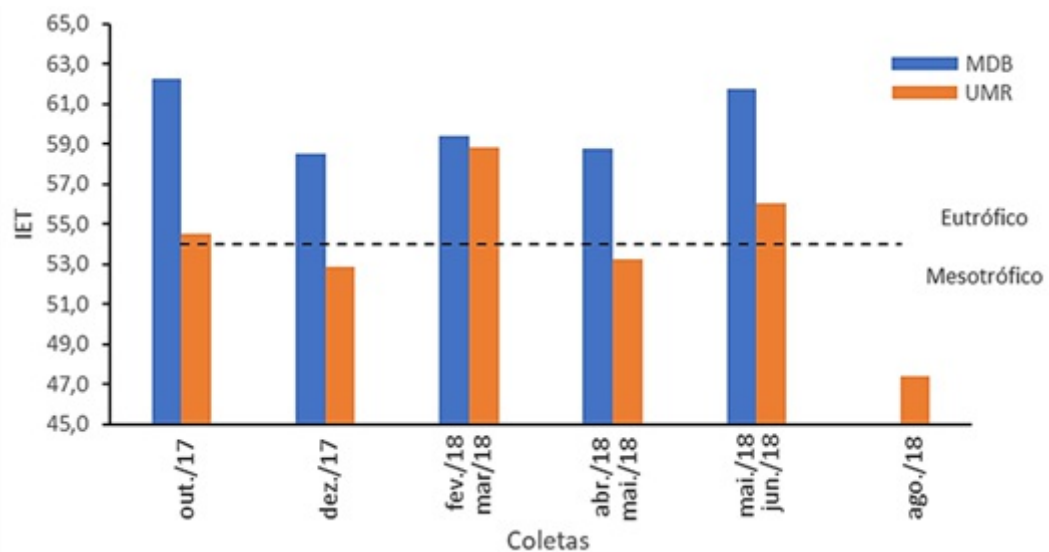
Tabela 3 - Médias e desvios padrão, por coleta, das variáveis limnológicas avaliadas nos reservatórios Mendubim e Umari.

Coleta:	Mendubim								
	Cl _a		COT		PT		DS		
	Média	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	Méd.	DP	
1 ^a	11,5	3,4	17,8	2,4	50,5	9,5	0,9	0,18	
2 ^a	12,8	1,6	21,3	2,5	34,1	8,6	0,8	0,28	
3 ^a	12,5	1,9	18,6	1,5	43,7	11,5	0,9	0,30	
4 ^a	9,9	3,6	16,6	1,5	45,1	19,3	0,9	0,30	
5 ^a	14,6	8,3	*	*	74,8	8,9	1,1	0,35	
Coleta:	Umari								
	1 ^a	5,3	2,2	21,2	2,1	28,0	2,0	1,3	0,29
	2 ^a	6,7	1,6	18,3	1,4	21,0	10,2	1,4	0,36
	3 ^a	6,2	0,9	20,6	2,1	24,4	3,5	1,5	0,11
	4 ^a	16,7	9,2	16,7	1,0	52,2	11,4	1,4	0,26
	5 ^a	2,8	3,2	*	*	80,6	9,5	1,4	0,39
	6 ^a	0,7	0,3	*	*	29,5	10,2	1,5	0,32

Cl-a clorofila a ($\mu\text{g.l}^{-1}$); COT carbono orgânico total ($\mu\text{g.l}^{-1}$); PT fósforo total ($\mu\text{g.l}^{-1}$); DS transparência disco de Secchi (m); DP desvio padrão ($\mu\text{g.l}^{-1}$).

O estado trófico do reservatório Umari variou entre mesotrófico e eutrófico e o de Mendubim se apresentou eutrófico, durante todo o período de estudo (Figura 4).

Figura 4 - Índice de estado trófico (IET) nos reservatórios Mendubim (MDB) e Umari (UMR), segundo Toledo Jr (1990).



Constatou-se que o reservatório Mendubim (MDB) apresentou valores semelhantes de Cl-a) entre as coletas, sendo que em Umari (UMR), nas três primeiras coletas, não houve variação nas médias de Cl-a, ocorrendo um maior valor na quarta, e seguido por uma redução dos valores.

As análises de regressão linear, entre as bandas das imagens LS8 (B1 a B7) e variáveis limnológicas, identificaram as bandas que apresentaram coeficiente de determinação (R^2) maior ou igual a 0,5, com as concentrações de Cl-a e COD (Tabela 4).

Tabela 4 - Coeficientes de determinação entre bandas Landsat 8 e as variáveis opticamente ativas, Clorofila-a (Cl-a) e carbono orgânico dissolvido (COD).

Banda	Comprimento de onda (nm)	Espectro	R^2	
			Cl-a	COD
B1	430-450	Ultra azul	0,47	0,48
B2	450-510	Azul	0,48	0,50
B3	530-590	Verde	0,34	0,02
B4	640-670	Vermelho	0,50	0,39
B5	850-880	NIR	0,51	0,54
B6	1570-1650	SWIR 1	0,50	0,57
B7	2110-2290	SWIR 2	0,48	0,50

NIR – Nearby infrared (infravermelho próximo); SWIR – Short wave infrared region (região infravermelha de ondas curtas).

Para recuperar os valores de concentração de Cl-a e COD, a partir de dados espectrais, foram testadas diversas combinações de bandas, em especial a razão entre bandas, ou entre as combinações aritméticas destas. Entretanto, só foram utilizadas as combinações que apresentaram coeficiente de determinação maior ou igual a 0,6. Foram aplicados métodos de regressão linear, tanto simples, como múltipla. Sendo a regressão linear simples a que mais se adequou ao conjunto de dados analisados.

As equações que definiram os modelos estatísticos de melhor ajuste entre as concentrações de Cl-a e COT aos valores de reflectância (p), oriundos das combinações de bandas LS8, mostram forte correlação entre estes parâmetros, para $p < 0,05$ (Tabela 5; Figura 5).

Tabela 5 - Equações ajustadas das estimativas das concentrações de Cl-a e COT a partir de imagens LS8/OLI

Variáveis limnológicas	Bandas	Equações	R ²	RMSE
Cl-a	B4, B5		0,87	0,82
COT	B2, B5		0,80	0,88

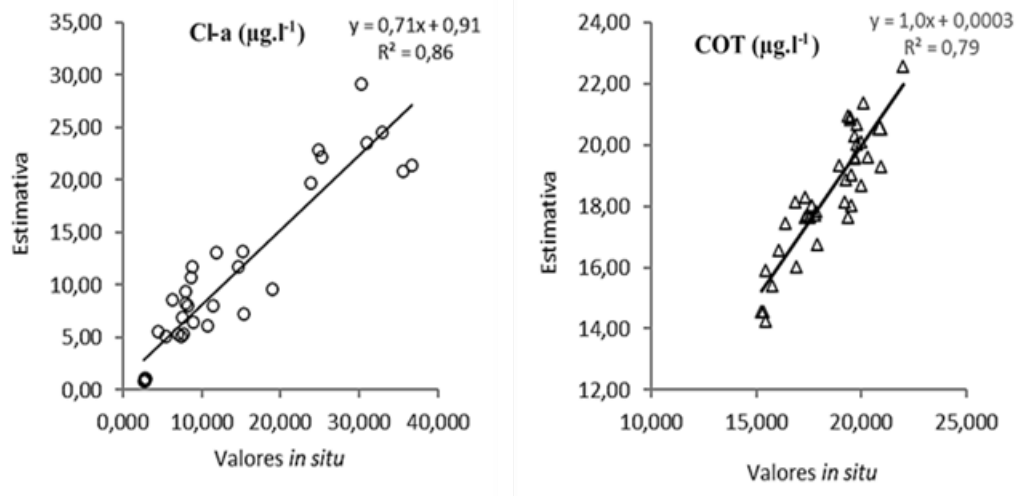
p: reflectância das bandas LS8/OLI; valores de Cl-a e COD em $\mu\text{g.l}^{-1}$

Figura 5 - Representação gráfica das correlações entre concentrações das variáveis limnológicas (Cl-a, COD) e reflectância resultante das combinações de bandas LS8/OLI).

As combinações de bandas tendem a ser mais eficientes na detecção da variação de parâmetros limnológicos complexos, tendo em vista acentuarem as diferenças ou similaridades espectrais entre essas bandas, provocadas por determinadas substâncias dissolvidas e/ou em suspensão na água. Entre os diversos trabalhos, utilizando imagens de satélites na análise da distribuição da clorofila-a em águas continentais, é consenso que o comprimento de onda entre o vermelho (B4) e o infravermelho próximo (B5) são adequados a estimativa da concentração desse pigmento a partir de dados espectrais, principalmente, na presença de carbono orgânico (BITENCOURT; MANTELLI, 2015), o que vem corroborar com o uso das combinações entre as bandas B4 (Vermelho) e B5 (infravermelho próximo) do sensor LS8/OLI na recuperação das concentrações de Cl-a. Munar, *et al.* (2018), consideraram o uso de combinações dessas bandas de imagens de satélites eficientes na estimativa de concentrações de Cl-a em reservatórios meso-oligotróficos. A razão entre a subtração das bandas B4 (vermelho) e B5 (infravermelho próximo) e a adição destas, mostrou-se eficiente na estimativa da concentração de Cl-a usando dados MERIS (MISHRA; MISHRA, 2012). Brezonik *et al.* (2014), testaram com êxito a utilização de razões de bandas LS8 (1 a 5) na recuperação da concentração de matéria orgânica dissolvida a partir de dados espectrais.

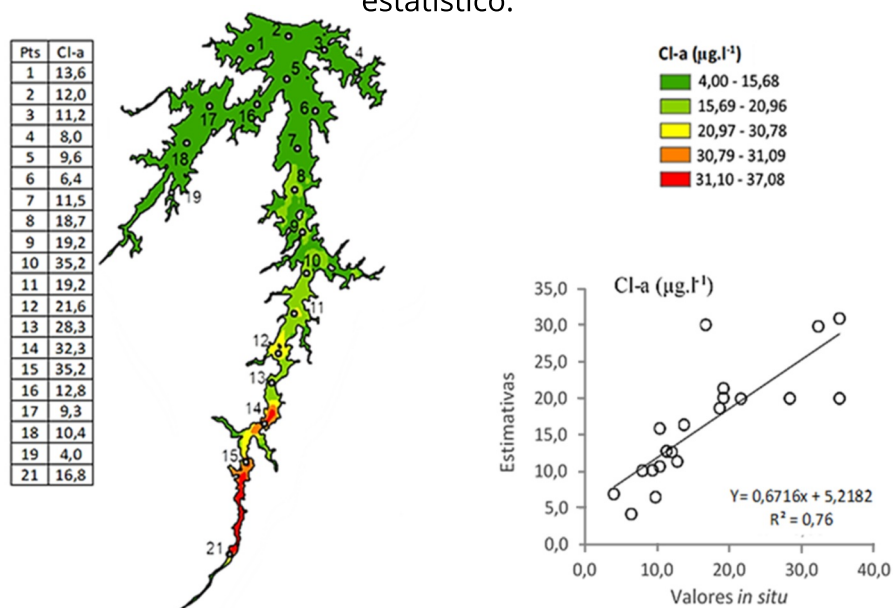
Para validar os modelos desenvolvidos no presente trabalho, analisou-se a correlação entre os valores de Cl-a e COT, estimados pelos modelos matemáticos, e os valores *in situ* (Figura 6), o que reafirmou a eficiência dos modelos, apresentando valores elevados de para R^2 .

Figura 6 - Correlação entre as concentrações de clorofila (Cl-a) e de carbono orgânico total (COT) determinadas *in situ* e as estimadas a partir dos modelos estatísticos, usando imagens LS8.



Os mapas de espacialização das concentrações de Cl-a e COT nos reservatórios Umari (Figuras 7 e 8) e Mendubim (Figuras 9 e 10) foram gerados com auxílio dos modelos de regressões lineares. Nesse caso, apenas as imagens da quarta coleta foram utilizadas por estarem isentas de nuvens, permitindo maior percentual de pontos válidos (95,2% em Umari e 90,0% em Mendubim) (Tabela 1). Os valores estimados de Cl-a e COT, para cada ponto de coleta, foram correlacionados com os valores reais (*in situ*) destas duas variáveis.

Figura 7 - Mapa temático da distribuição do clorofila-a (Cl-a) no reservatório Umari, e correlação entre valores *in situ* e os valores estimados pelo modelo estatístico.



Nos reservatórios Umari e Mendubim, a espacialização verificada nos mapas temáticos mostrou um aumento das concentrações de Cl-a e COT à medida que os pontos de amostragem se distanciavam das barragens. Em ambos os reservatórios houve um aumento da concentração de Cl-a nas proximidades das margens e nas regiões de transição flúvio-lacutres, provavelmente resultante da menor profundidade nessas áreas, com maior entrada de luz e maior atividade fotossintética a montante dos reservatórios. Os modelos estatísticos utilizados foram validados, e se mostraram eficientes na predição e na análise da distribuição de clorofila-a e carbono orgânico total em ambos os reservatórios estudados.

Figura 8 - Mapa temático da distribuição do carbono orgânico total (COT) no reservatório Umari, e a correlação entre valores em *in situ* e os valores estimados pelo modelo estatístico.

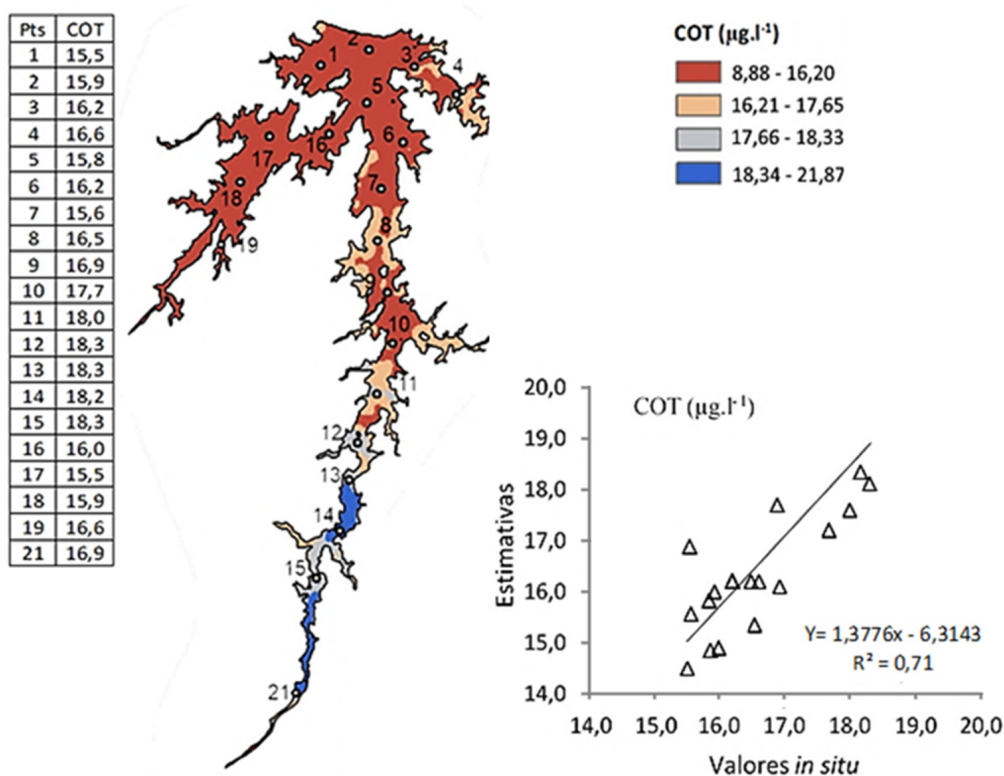


Figura 9 - Mapa temático da distribuição do clorofila-a (Cl-a) no reservatório Umari, e a correlação entre valores em *in situ* e os valores estimados pelo modelo estatístico.

Estimativa, por sensoriamento remoto, das concentrações de clorofila-a e carbono orgânico total em reservatórios do semiárido brasileiro, a partir de imagens do sensor OLI/ LANDSAT 8
Herbster De-Carvalho · Gustavo Henry-Silva

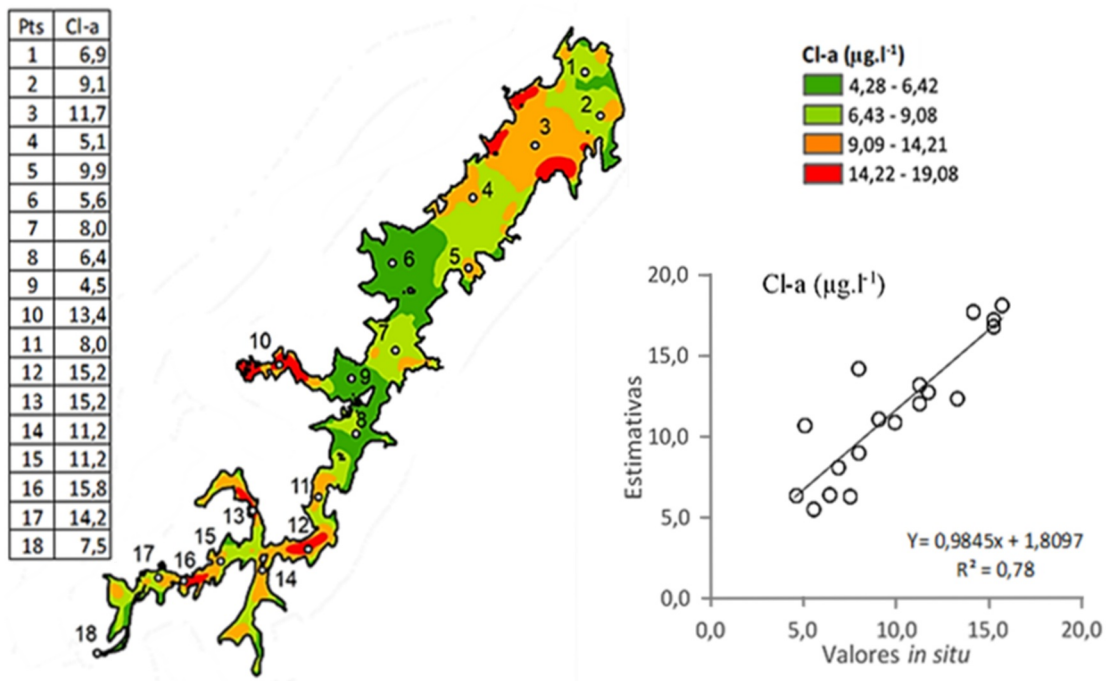
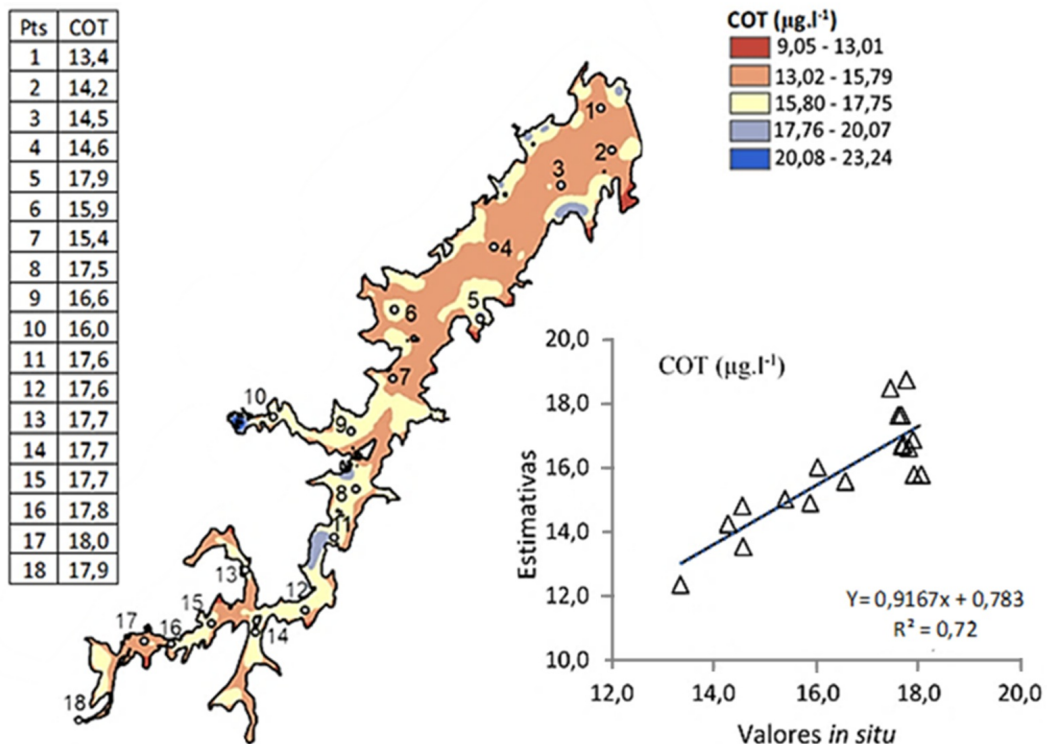


Figura 10 - Mapa temático da distribuição do carbono orgânico total (COT) no reservatório Mendubim, e a correlação entre valores em *in situ* e os valores estimados pelo modelo estatístico.



Considerações Finais

Os modelos estatísticos desenvolvidos para avaliação das concentrações de Cl-a e COT, a partir dos valores de reflectância obtidos de imagens do sensor OLI/Landsat 8, mostraram-se eficientes, explicando 87% e 80% da variação das concentrações de Cl-a e COT, respectivamente. Relacionando os modelos estatísticos aos dados obtidos com as coletas *in situ* nos reservatórios, constatou-se correlações positivas. No reservatório de Umari, os coeficientes de correlação (R^2) foram de 0,76 para Cl-a e 0,71 para COT. Em Mendubim, os coeficientes foram de 0,78 para Cl-a e 0,72 para COT. O desenvolvimento de um modelo adequado para o monitoramento de variáveis limnológicas opticamente ativas, pode possibilitar sua aplicação em diferentes situações geográficas e tipos de ambientes aquáticos. Na presente abordagem, o sensoriamento remoto, usando imagens do sensor OLI/LS8, se mostrou eficiente no monitoramento de clorofila-a e carbono orgânico em ambientes mesotrófico e eutrófico do semiárido do Rio Grande do Norte.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro fornecido para o desenvolvimento desta pesquisa.

aos estados da região do MATOPIBA, além do Mato Grosso (Arco de Desmatamento) e do norte de Goiás, regiões notadamente reconhecidas como fronteiras de expansão das atividades agrícolas no bioma.

De mesma forma, a análise conjuntural de toda série temporal, sobretudo auxiliada pela técnica de análise de pontos quentes emergentes, retrata maior concentração e tendência de incremento de queimadas na porção setentrional do Cerrado. Ao passo que na porção meridional do bioma se evidencia maior quantitativo e também tendência de redução da incidência de queimadas.

Dessa forma, a metodologia empregada se mostrou apropriada, uma vez que a aplicação das técnicas estatísticas de autocorrelação espacial (global e local) e o emprego da ferramenta de análise de pontos quentes emergentes – ambos casos implementados sob o aporte de sistemas de informação geográfica (SIG), em muito contribuíram com a análise da ocorrência espacial das queimadas no Cerrado ao fornecerem indicativos da associação espacial e dos padrões e tendências espaço-temporais dos focos de queimadas no referido bioma.

Por fim, vale frisar que a adoção de medidas sustentáveis de exploração e de estratégias de conservação do Cerrado não são apenas necessárias, mas sobretudo urgentes. É preciso reconhecer e valorizar o Cerrado a partir de sua rica biodiversidade e de sua cultura milenar, materializadas nos saberes e ritos dos povos tradicionais.

No contexto das queimadas, salienta-se que, para o manejo racional do fogo, deve-se levar em consideração tanto o comportamento do fenômeno (fogo) quanto as características de resiliência e fragilidade dos distintos elementos e componentes do ambiente. Assim, medidas preventivas exigem mais do que a simples exclusão desse agente ecológico tão essencial para o Cerrado.

Por se tratar de um ambiente pirofítico, isto é, dependente do fogo, é necessário compreender as reais necessidades e as melhores práticas de uso e manejo do fogo no Cerrado, não apenas propor bani-lo. Assim, sugere-se o resgate e a valorização do conhecimento de povos que coexistem de maneira harmônica com esse bioma, como é o caso dos povos tradicionais.

Referências

ALCÂNTARA, E.; BERNARDO, N.; THANAN, R.; WATANNABE, F. Modeling the spatio-temporal dissolved organic carbon concentration in Barra Bonita reservoir using OLI/Landsat-8 images. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 1, p. 11, 2017.

BITENCOURT, M. D.; MANTELLI, L. R. Análise espacial de parâmetros limnológicos utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento: dois estudos de caso. In: POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; NISHIMURA, P. Y.; SILVA, S. C.; DOVAL, J. C. L. **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015. p. 160-176.

BONANSEA, M.; RODRIGUES, M. C.; PINOTTI, L.; FERRERO, S. Using multi-temporal Landsat imagery and linear mixed models for assessing water quality parameters in Río Tercero reservoir (Argentina). **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 28-41, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.032>.

BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. D. P.; SANTOS, F. K. S. D. Sensoriamento remoto: avanços e perspectivas. **Revista de Geografia**, v. 32, n. 2, p. 267-292, 2015.

BREZONIK, P. L.; OLMASON, L. G.; FINLAY, J. C.; BAUER, E. M. Factors affecting the measurement of CDOM by remote sensing of optically complex inland waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, p. 199-215, 2014.

CALLISTO, M.; GOULART, M.; MEDEIROS, A.; MORENO, P.; ROSA, C. Diversity assessment of benthic macroinvertebrates, yeasts, and microbiological indicators along a longitudinal gradient in Serra do Cipó, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, 64, n. 4, 2004. 743-755.

CAO, F.; TZORTZIOU, M.; HU, C.; MANNINO, A.; FICHOT, C.; VECCHIO, R. D.; NAJJAR, R.G.; NOVAK, M. Remote sensing retrievals of colored dissolved organic matter and dissolved organic carbon dynamics in North American estuaries and their margins. **Remote Sensing of Environment**, v. 205, p. 151-165, 2018.

COELHO, C.; HEIM, B.; FOERSTER, S.; BROSINSKY, A.; ARAÚJO J. C. In Situ and Satellite Observation of CDOM and Chlorophyll-a Dynamics in Small Water Surface Reservoirs in the Brazilian

In Situ and Satellite Observation of CDOM and Chlorophyll-a Dynamics in Small Water Surface Reservoirs in the Brazilian Semiarid Region. **Water**, v. 9, p. 913, 2017.

DE-CARVALHO, H. R. L.; HENRY-SILVA, G. H. G. D. S. Caracterização morfológica das bacias de contribuição dos reservatórios Umari e Mendubim, Semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista de Geografia (Recife)**, 37, n. 3, 2020. 221-238.

FAITÃO, J. A.; STEFFENS, J.; STEFFENS, C.; DALLAGO, R. M.; STORTI, A. T.; BORTOLUZZI, A. C. Development of a Model with Critical Factors of Success, Predominant in Implementation of a Membrane System in the Wastewater Treatment—Review of the Case Study of a Dairy Industry. **Scientific Research Publishing**, v. 9, p. 117-135, 2018.

GOMES, A. C.; ALCÂNTARA, E.; RODRIGUES, T.; BERNARDO, N. Satellite estimates of euphotic zone and Secchi disk depths in a colored dissolved organic matter-dominated inland water. **Ecological Indicator**, v. 110, 2020.

IHLEN, V. **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. 5.0. ed. Sioux Falls, South Dakota: Department of the Interior - Survey, U.S. Geological, 2019.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Classificação de Köppen**. [S.l.]: [s.n.], 1936.

LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; BECKER, H.; BATISTA, A. A. Assessment of the water quality in a large reservoir in semi-arid region of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 437-445, 2014a.

LOPES, F. B.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 513-519, 2014b.

LOPES, F. B.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; ANDRADE, E. M.; FERREIRA, R. D. Simulation of spectral bands of the MERIS sensor to estimate chlorophyll-a concentrations in a reservoir of the semi-arid region. **Revista Agroambiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 96-106, 2016.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C. D.; GÜNTNER, A. Hydrological

p. 96-106, 2016.

MALVEIRA, V. T. C.; ARAÚJO, J. C. D.; GÜNTNER, A. Hydrological Impact of a High-Density Reservoir Network in Semiarid Northesatern Brazil. **JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEER ING**, January 2012. 109-117.

MARINO, L. Relação entre clorofila-a e cianobactérias no estado de São Paulo. **Revista DAE**, p. 32-43, 2017.

MASOCHA, M.; DUBE, T.; NHIWAITIWA, T.; CHORUMA, D. Testing utility of Landsat 8 for remote assessment of water quality in two subtropical African reservoirs with contrating trophic states. **Geocarto International**, v. 33, n. 7, p. 667-680, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2017.1289561>.

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

MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M.; MARQUES, D. M. L. M. JÚNIOR, C. R. F. Can chlorophyll-a in meso-oligotrophic shallow waters be estimated using statistical approaches and empirical models from MODIS imagery? **RBRH**, v. 23, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.231820170106>.

OLIVEIRA, K. F.; LACERDA, L. D.; PERES, T. F.; MARINS, R. V.; SANTOS, J. A. The Fate of Cu, Zn and Mn in an Intensive Fish Aquaculture (Tilapia - *Oreochromis niloticus*) in an Artificial Reservoir in Northeastern Brazil. **Environmental Processes**, 4, 2017. 107-121.

OLIVEIRA, M. A.; BARBOSA, E. N.; DANTAS NETO, J. Gestão de recursos hídricos no Rio Grande do Norte: uma análise da implementação da política hídrica. **HOLOS**, p. 3-25, 2013. ISSN 1518-1634.

PALMER, S. C. J.; TIITKUTSER; HUNTER, P. D. Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. **Remote Sensing of Environment**, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.021>.

calculated from biological, physical and chemical attributes. **Environ Monit Assess**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4163-1>.

SEMARH. **Manual de instrução para licenciamento ambiental de fontes potencialmente poluidoras**. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS. Goiânia-GO. 2010.

TOLEDO JR, A. P. **Informe preliminar sobre os estudos para a obtenção de um índice para a avaliação do estado trófico de reservatórios de regiões quentes tropicais**. São Paulo: CETESB, 1990. 12 p.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídrico: O manejo dos recursos hídrico em condições de incerteza e risco**. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. [S.l.]. 2018. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002154/21549por.pdf>. Acesso em: 10 ago 2018.

WATANABE, F. ; ALCÂNTARA, E.; RODRIGUES, T.; ROTTA, L.; BERNARDO, N.; IMAI, N. Remote sensing of the chlorophyll-a based on OLI/Landsat-8 and MSI/Sentinel-2A (Barra Bonita reservoir, Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1987-2000, 2017.