

Geração de um modelo semi-empírico para quantificação de floração de cianobactéria no reservatório de Guarapiranga por meio de imagens MODIS

Diogo de Jesus Amore¹
Daniel Schaffer Ferreira Jorge¹
Igor Ogashawara²
José Luiz Stech¹

¹National Institute for Space Research
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{amore,danielsfj,stech}@dsr.inpe.br

²Department of Earth Sciences, Indiana University-Purdue University Indianapolis – School of Sciences/IUPUI
723 W. Michigan Street, SL118, 46202 - Indianapolis - IN, USA
igoroga@gmail.com.br

Abstract. In this paper it was developed a semi-empirical model for MODIS/Terra to quantify cyanobacteria bloom in Guarapiranga Reservoir, SP – Brazil. Cyanobacteria densities (cel/mL) were calculated by SABESP (Basic Sanitation for São Paulo State) from 2 hydrographic stations arranged in the reservoir 2 to 3 times a week, and were freely available from its website. Then, these densities were related to the daily overpass of the MODIS sensor. The satellite imagery spans from January to December of 2013. The images were acquired already atmospherically corrected by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). A band ratio was applied to the second (841-876 nm) and first (620-670 nm) bands, and a correlation between the bands showed an indication of phytoplankton bloom. This allowed the model generation based on the correlation between the in situ cell count and remote sensing reflectance (R_{rs}) acquired from the imagery. R^2 and equation slope values from collection point 101 showed a better result than point 104 before calibration and validation. The values from this point were then calibrated and validated and a final model generated. The final semi-empirical model R^2 was 0.85 and the normalized root mean square error (NRMSE) was 0.24. This study shows the potential for the MODIS/Terra sensor to be used in cyanobacteria bloom spatio-temporal monitoring programmes, therefore, allowing the bloom density quantification and the comprehension of ecological processes in an inland tropical reservoir.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, floração, fitoplâncton, algoritmo semi-empírico, qualidade da água

1. Introdução

No Brasil, a construção de grandes reservatórios foi inicialmente voltada para fins de abastecimento público e geração de energia, entretanto atualmente esses sistemas possuem usos múltiplos de maneira à estimular e impulsionar o desenvolvimento regional (Tundisi e Matsumura Tundisi, 2008). Os reservatórios localizados próximos à ambientes urbanos, como é o caso dos reservatórios localizados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), são utilizados para a recreação, pesca, produção de hidroeletricidade e turismo (Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2008).

Apesar desse múltiplos usos para a humanidade, a construção e a utilização de reservatórios artificiais em centros urbanos causam impactos, sendo os principais citados por Straskraba e Tundisi (1999): o desmatamento e a redução da cobertura vegetal; o aumento da contaminação e da toxicidade no sistema; a poluição orgânica; a eutrofização acelerada; a alteração da biodiversidade, como a remoção de espécies; além de efeitos negativos à saúde humana, resultantes da deterioração da qualidade da água.

A toxicidade citada pelos autores ocorre devido à habilidade de alguns táxons de cianobactérias terem a habilidade de produzir toxinas, o que é um fenômeno bem conhecido por meio da intoxicação de animais (Sivonen e Jones, 1999). Portanto, florações nocivas têm sido motivo de preocupação constante de órgãos ambientais e de saúde, institutos de pesquisa e companhias de saneamento, em escala global.

O monitoramento da qualidade da água em reservatórios urbanos, principalmente em reservatórios de abastecimento, faz-se necessário uma vez que existe o potencial risco a saúde humana. A utilização de técnicas de sensoriamento remoto auxiliam o monitoramento e o estudo da dinâmica das florações. Esta ferramenta, aliada ao conhecimento da taxonomia do fitoplâncton e de seus pigmentos acessórios, pode contribuir para estudos relacionados à identificação destes microorganismos presentes em um determinado ambiente (Londe et al. 2005). A utilização dos produtos gerados a partir do sensoriamento remoto pode fornecer uma visão sinóptica do ecossistema, adquirindo informações multitemporais em escala local.

Estudos já realizados no reservatório de Guarapiranga como o de Sant`Anna et al. (2004) identificaram a presença de 26 táxons de cianobactérias planctônicas da ordem Chroococcales de várias represas do Estado de São Paulo; Sant`Anna et al. (2007) estudaram a biodiversidade de 48 espécies de cianobactérias planctônicas presentes em seis represas do Alto Tietê, da qual faz parte o reservatório de Guarapiranga; Ogashawara et al. (2014) estimaram a presença de ficocianina para Guarapiranga utilizando imagens Landsat Thematic Mapper (TM) e Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM⁺).

O presente trabalho buscou desenvolver um algoritmo para quantificação de florações de cianobactérias por meio de imagens do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS/Terra) em um sistema aquático localizado em ambiente urbano tropical, através da correlação entre medidas de densidade de cianobactérias por dados coletados in situ e a razão entre a reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}) para as bandas 1 (620-670 nm) e 2 (841-876 nm) do MODIS, possibilitando assim auxiliar programas de monitoramento por meio de sensores remotos orbitais.

2. Metodologia de Trabalho

2.1 Área de Estudo

O reservatório de Guarapiranga está localizado a 23°43' S e 46°32' O (Figura 1).

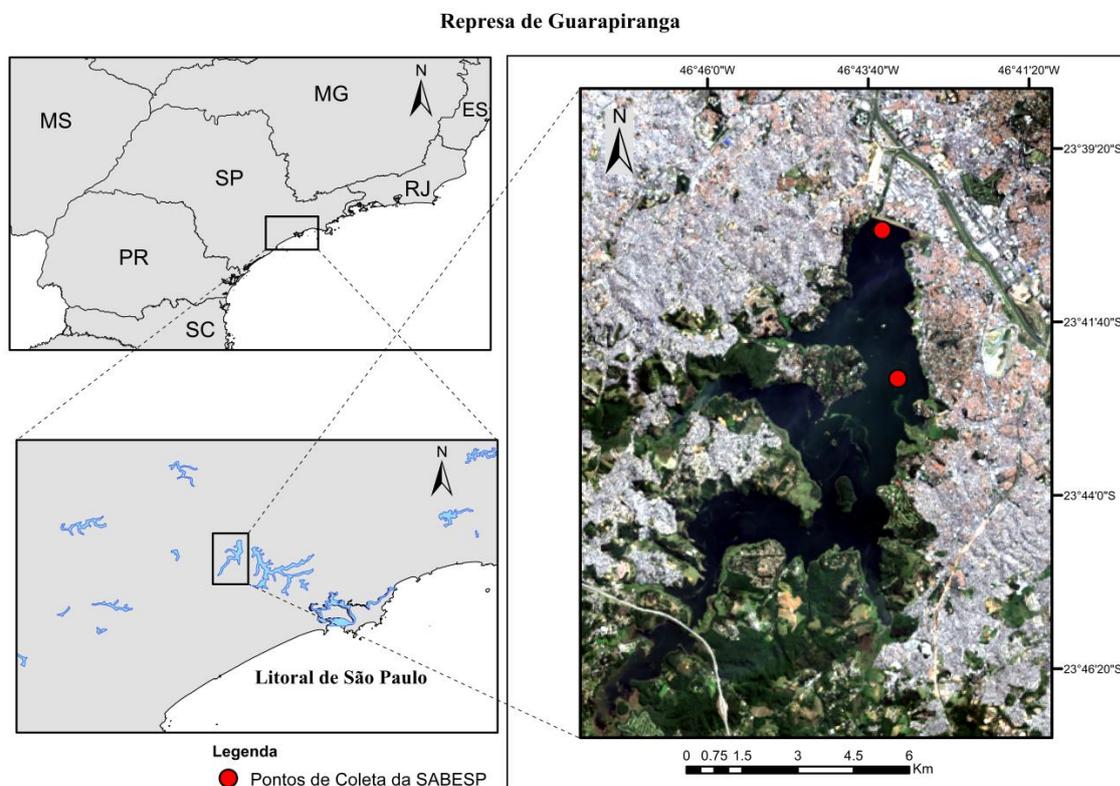


Figura 1. Reservatório de Guarapiranga no Estado de São Paulo. O ponto de coleta 101 está localizado ao norte, e o ponto 104 é o mais ao sul.

O reservatório possui área inundada de aproximadamente 33 km², profundidade máxima de 13 metros e tempo de retenção de 185 dias, fornecendo 11 mil litros de água por segundo para cerca de 3,7 milhões de pessoas (Gemelgo et. al., 2008). Possui morfologia do tipo dendrítica, estreita e alongada, o que acentua a influência do uso e ocupação do solo em sua bacia hidrográfica (CETESB, 2003). O Reservatório foi construído entre 1906 e 1908, com a intenção de produção de energia elétrica e regulação da vazão do rio Tietê; e se insere na porção sudoeste da bacia do Alto Tietê (Gemelgo et. al., 2008). Diferentemente de suas intenções iniciais, atualmente o reservatório possui usos múltiplos, não apenas para a geração de energia, mas também para lazer, banho, e esportes náuticos.

2.2 Dados de Sensoriamento Remoto

Neste trabalho foram utilizadas as bandas espectrais 1 e 2 (centradas em 650 nm e 850 nm) do sensor MODIS a bordo dos satélite Terra. As imagens foram adquiridas através do portal da Administração Nacional de Espaço e Aeronáutica (NASA) Reverb-ECHO, onde foram escolhidas cenas para o ano de 2013. As cenas foram pré processadas para utilizar apenas as que continham zero por cento de cobertura de nuvem sobre a região de interesse. As cenas com pixels categorizados como de baixa qualidade também foram excluídas. Desse modo, apenas as cenas sem cobertura de nuvem sobre a área de interesse e com pixels de qualidade satisfatória foram utilizadas.

Imagens em nível L2G (com correção atmosférica) foram processadas no software Matrix Laboratory (Matlab) para a extração do valor de reflectância de sensoriamento remoto (R_{rs}). O valor de R_{rs} foi recuperado para a localização geográfica correspondente aos pontos de coleta de dados limnológicos utilizados nesse estudo.

Nota-se, também, que a quantidade de pontos (dias imageados) no diagrama de dispersão é relativamente reduzido em relação a quantidade de cenas inicialmente adquiridas. Inicialmente, foram selecionadas imagens para cada dia do ano de 2013. Porém, apenas 17 imagens foram utilizadas para o ponto 101, e 19 para o ponto 104. Isso deu-se pelo fato de, no processo de seleção das imagens úteis para a geração da correlação entre as variáveis, ter ocorrido a interferência de diferentes fatores: determinação de pixels inválidos (qualidade não-satisfatória); ângulo de imageamento do sensor, influenciando no borramento de pixels vizinhos; presença de nuvens, impossibilitando a recuperação do R_{rs} local; ausência de dados limnológicos coletados para a data, impedindo a incorporação deste dia no gráfico de correlação. Esses fatores somados, diminuíram significativamente o espaço amostral utilizados na geração do modelo.

A menor sensibilidade radiométrica do sensor MODIS/Terra em relação ao MODIS/Aqua foi o principal fator avaliado para a geração desse modelo. Isso permitiu que os valores adquiridos de R_{rs} representassem melhor a área de estudo evitando a saturação dos pixels.

2.3 Dados Limnológicos

Os dados utilizados foram coletados com uma frequência entre 2 e 3 vezes por semana pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) de 1º de Janeiro de 2013 até 31 de Dezembro de 2013 em 2 diferentes pontos do reservatório de Guarapiranga (figura 1) - Captação Guarapiranga (GU 101), e Meio do corpo da represa (GU 104), sendo utilizado para o presente trabalho a densidade de cianobactérias (cel/mL).

O ponto GU 107 (Braço do rio Parelheiros) foi excluído do processamento devido a contaminação do valor de reflectância de sensoriamento remoto da camada superficial da água dada a sua proximidade à borda do reservatório. Apesar da proximidade do ponto GU 101 à borda, ele manteve-se a uma distância de um pixel do último pixel contaminado pela borda, o que permitiu sua utilização na análise do dados espectrais.

As análises da densidade de cianobactérias foram realizadas segundo a metodologia descrita na Norma Técnica L5.303 (CETESB, 2005), que descreve a metodologia com a utilização do retículo de Whipple como auxiliar na contagem de células de formas coloniais. Pode-se contar quantas células ocupam cada quadrado do retículo, calcular a média de 10-30 quadrados e multiplicar esse número pelo número de quadrados ocupados pela colônia.

A contagem de organismos de uma faixa horizontal corresponderá à contagem dos organismos contidos no retângulo cuja largura será delimitada pelo retículo de Whipple e o comprimento será o da própria câmara. Dessa forma o fator de contagem é a área da câmara de Sedgwick-Rafter pela área examinada conforme mostra na equação 3.

$$F = \frac{A}{a} \quad (3)$$

Onde: F = fator de contagem; A = Área da câmara; e a = área da faixa horizontal

O fator de contagem é necessário para a sua multiplicação pelo número de células ou organismos de um mesmo gênero ou espécie encontrados em uma faixa da câmara. Através dessa operação, será obtido o número de células ou organismos deste gênero ou espécie contidas em 1 cm³ da amostra preservada com lugol. Se a amostra foi concentrada 10 vezes, o fator de contagem será dividido por 10 antes de se calcular o número de organismos por cm³.

2.4 Geração do Modelo para quantificação de cianobactérias durante florações

A razão entre as bandas 2 (841-876 nm) e 1 (620-670 nm) do sensor MODIS foi utilizada para quantificar florações de cianobactérias ao longo do ano de 2013. Os comprimentos foram selecionados para maximizar o efeito da razão entre o aumento da R_{rs} na banda 2 devido a formação de uma espuma de cianobactérias na superfície da água e o baixo pico da R_{rs} na banda 1 devido a fluorescência da ficocianina (centrada em 650 nm). A razão entre as bandas foi, então, correlacionada com a concentração de células de cianobactérias para os dois pontos de coleta utilizados no estudo.

2.5 Calibração e Validação do Modelo

Utilizou-se uma simulação Monte Carlo para o desenvolvimento e calibração do modelo. Onze amostras foram aleatoriamente selecionadas para calibrar o algoritmo através de um ajuste linear entre os valores da razão entre a banda 2 e a banda 1 e o número de células. Os valores resultantes da inclinação da curva, intercepto, e coeficiente de determinação (R²) foram gravados para cada iteração. Esse processo foi repetido um milhão de vezes.

Como primeiro critério para a seleção do melhor ajuste para o conjunto de dados, a média e o desvio padrão da inclinação da curva e intercepto foram estimados para as equações que possuíam um R² mínimo de 0.8. O segundo critério foi selecionar apenas as equações que possuíam ambos a inclinação e intercepto numa série baseada na suas média (média +/- desvio padrão). Por fim, a partir deste grupo, todo o conjunto de equações foi validada para seis amostras distintas, e a equação com o menor Erro Médio Quadrático Normalizado em percentual (NRMSE%) foi selecionada. Para visualizar o resultado do algoritmo proposto, foi gerado um gráfico de dispersão entre as contagens de cianobactérias medidas in situ e estimadas pelo algoritmo. Como última etapa, foram gerados dois mapas do modelo proposto, demonstrando o seu potencial para programas de monitoramento e as condições para a obtenção de dados com maior precisão.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise do Modelo Semi-Empírico

Águas dominadas por floração de cianobactérias produzem um aumento na reflectância na região do Infravermelho Próximo (NIR – Near Infrared) devido a fluorescência e aumento do retroespalhamento. Quanto maior a densidade do fitoplâncton, maior a reflectância nas bandas do NIR (Singh e Shanmugam, 2014). Esse aumento na reflectância no NIR foi observado na banda 2 do sensor MODIS em relação a banda 1. O mesmo efeito foi evidenciado por Ogashawara et al. (2013) em outra área de estudo (figura 2) com espectros medidos *in situ* em duas condições distintas, em um ambiente extremamente eutrofizado (catfish ponds) e em condições oligotróficas (Reservatório de Funil).

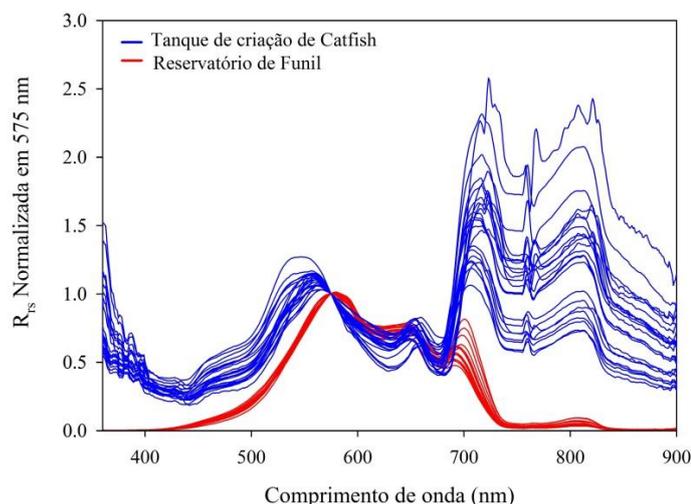


Figura 2. Espectros de reflectância de R_{rs} do reservatório de Funil e do lago com criação de Catfish (adaptado de Ogashawara, 2013).

Devido a esse processo, a correlação entre as duas bandas para os pontos de coleta de interesse demonstrou um indicativo da presença de floração de fitoplâncton (Figura 3(a)). Isso foi percebido pela tendência de que durante florações, os pontos da distribuição se distanciaram da razão 1:1 devido a uma maior inclinação na curva. Essa característica da distribuição dos dados permitiu uma melhor interpretação da correlação entre a razão das bandas e a contagem de células.

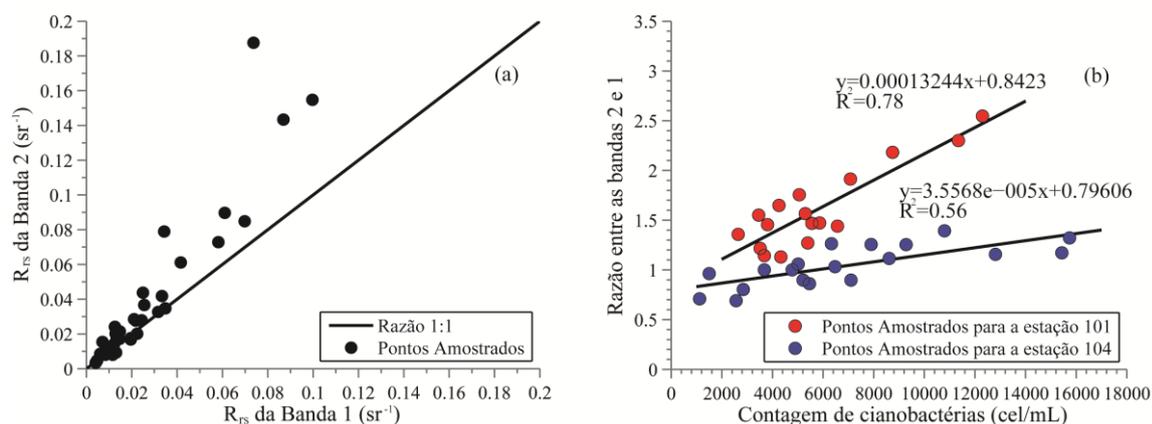


Figure 3. (a) Razão entre as reflectâncias de sensoriamento remoto das bandas 2 e 1 do Sensor MODIS Terra para os pontos 101 e 104. (b) Distribuição da variação diária entre a razão entre as bandas 2 e 1 do sensor MODIS e a contagem de células de cianobactéria no Reservatório para os dois pontos de coleta no estudo.

A figura 3(b) demonstra a relação entre a razão de bandas e a contagem de células para as duas estações de coleta (101 e 104). A estação 104 apresentou um baixo coeficiente de determinação (0.56) entre as variáveis, e a distribuição dos valores de reflectância dessa estação encontraram-se entre 0.5 e 1.5, indicando que a razão de bandas variou pouco em

relação ao aumento na densidade de cianobactérias. Em contrapartida, a distribuição dos valores obtidos na estação 101 demonstrou um R^2 (0.78) mais significativo. A distribuição dos valores da razão de bandas variou entre 1 e 2.5, indicando uma maior R_{rs} na banda 2 em relação a banda 1, condizente com o esperado durante florações, como indicado na figura 2.

O intercepto de ambas as curvas ajustadas apresentaram valores abaixo do valor 1. Isso ocorreu devido a razão entre as bandas ser sensível principalmente a presença de cianobactérias na camada superficial da água, e na ausência destas florações, a razão tende a ser negativa. Ao compararmos as distribuições para as estações 101 e 104, notamos dois padrões distintos. Para a estação 104 notamos um pequeno aumento na razão entre as bandas com o aumento do número de células, enquanto que para a estação 101, este aumento é mais acentuado. Esta relação indica que apesar da R_{rs} da estação 101 responder de forma esperada a presença de florações, para a estação 104, fatores externos podem estar influenciando esta relação. O espectro de reflectância medido para um determinado ambiente depende das condições do meio, e a presença de alta concentração de sedimentos ou maior distribuição das cianobactérias ao longo da coluna d'água pode influenciar no espectro. Para o presente trabalho, considerou-se que o ponto 104 não respondeu de forma esperada a variação na densidade de cianobactérias, e desta forma, foi removido das análises subsequentes.

Baseando-se nas colocações apresentadas, foi possível desenvolver um modelo semi-empírico para detecção de floração no reservatório. A curva utilizada para a geração do modelo foi a referente a estação 101. Equação 1 representa o modelo final gerado. Figura 4 representa o gráfico de dispersão entre os valores de contagem de células medidos *in situ* e estimados. O R^2 e o NRMSE foram de aproximadamente 0.85 e 0.24, respectivamente.

$$[\text{Contagem de cianobactérias}] = 6259.2[\text{Razão das bandas 2 e 1}] - 4927.5 \quad (1)$$

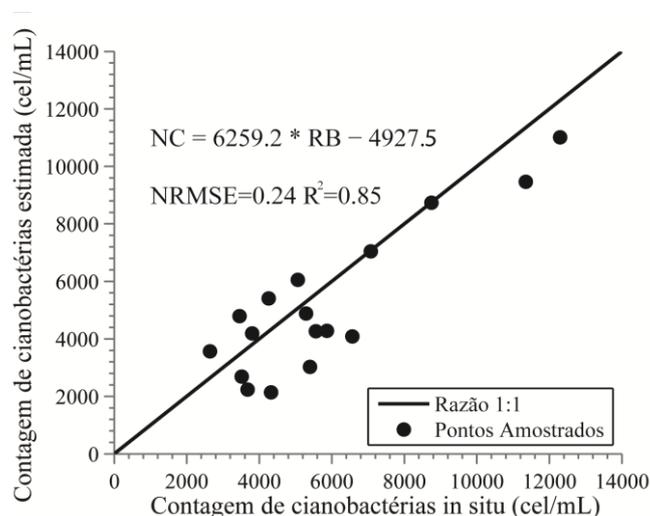


Figura 4. Resultado da estimação do algoritmo após a calibração e validação.

Em reservatórios tropicais, espera-se variabilidade na densidade de cianobactérias em decorrência do horário de aquisição do dado, devido a possíveis variações diárias na irradiância incidente e turbulência (Jeong et al., 2013). As diferenças no horário de coleta *in situ* e de passagem do sensor orbital podem ter contribuído para a incerteza atribuída ao modelo. Outro fator relevante refere-se à influência da concentração de sedimentos no valor de R_{rs} podendo mascarar parte do sinal referente a florações de cianobactérias (Ruddick et al., 2000). Dada estas incertezas esperava-se uma maior diferença entre os dados estimados e medidos e, por consequência, um NRMSE elevado. Contudo, obteve-se um valor satisfatório de R^2 e NRMSE.

3.2 Espacialização do Modelo

Duas imagens foram utilizadas para a espacialização do modelo (figura 4). As duas imagens exemplificam duas situações: uma com maior concentração de cianobactérias (a), e outra com menor concentração (b). Utilizou-se como critério para a aplicação do modelo valor mínimo para a razão de bandas acima de zero, auxiliando na determinação da extensão do corpo d'água. Porém pode-se notar nos mapas como as bordas possuem valores não representativos da variável de interesse. Isso ocorre devido a contaminação dos pixels pelas bordas do reservatório, podendo ocasionar uma superestimação do valor final do modelo para as bordas do reservatório.

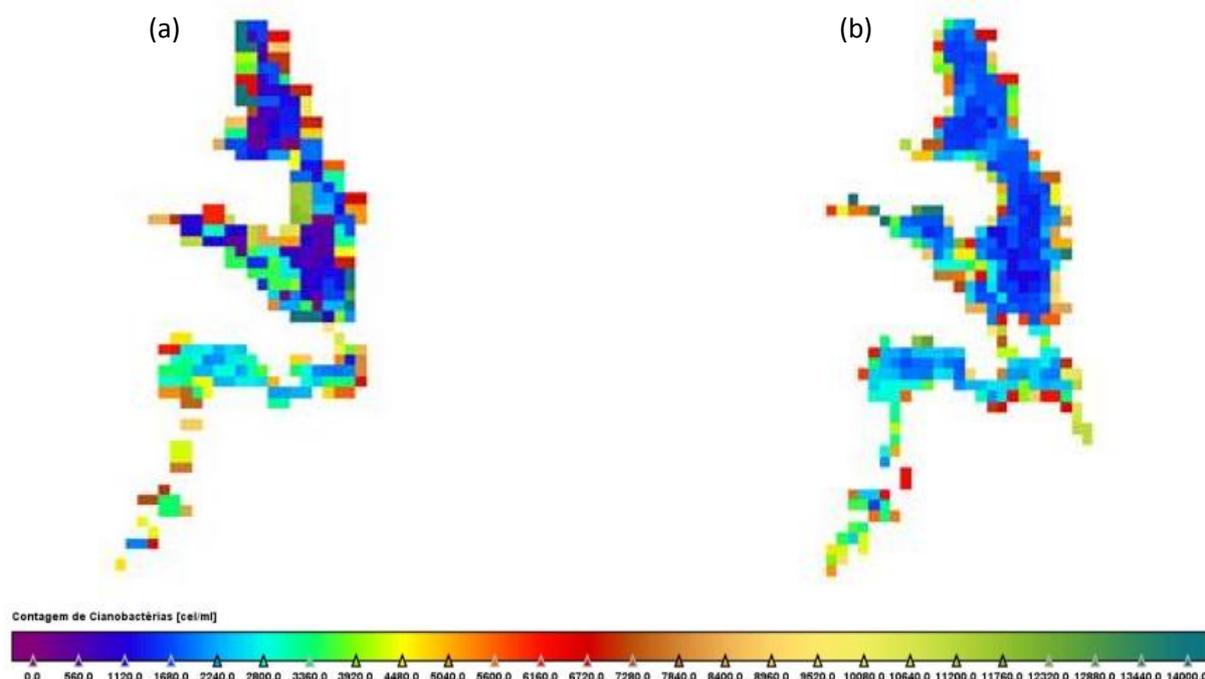


Figura 4 Mapa demonstrando a aplicação do modelo para o reservatório de Guarapiranga.

4. Conclusão

No presente trabalho procurou-se utilizar geotecnologias, como as imagens MODIS/Terra para mapear quantitativamente a floração de cianobactérias no reservatório de Guarapiranga. Através de medidas *in situ* durante o imageamento do satélite Terra, foi possível correlacionar quantitativamente a densidade de cianobactérias com a R_{rs} obtida das imagens MODIS/Terra.

O produto de R_{rs} com correção atmosférica disponibilizado pela NASA demonstrou-se adequado para o desenvolvimento do modelo semi-empírico. A alta resolução temporal do satélite permitiu a aquisição de informação espectral diária. Essa frequência de imageamento foi essencial para o estudo bio-óptico do reservatório devido a variabilidade temporal nos constituintes opticamente ativos. Assim, a aquisição de dados diários permitiu o desenvolvimento de um modelo mais consistente com os padrões locais.

Mesmo utilizando a melhor resolução espacial (250m) no que tange às diferentes resoluções do sensor MODIS, ainda foi necessário excluir um dos pontos de coleta de dados limnológicos (GU 107) devido a contaminação dos pixels pela borda do reservatório. Esse foi um fator importante que deve ser considerado em futuros estudos nesse reservatório, e em outros reservatórios de largura moderada.

Pode-se concluir no presente estudo que o sensor MODIS/Terra tem o potencial de ser utilizado em programas de monitoramento temporal e espacial de florações de cianobactérias,

permitindo quantificar a densidade destas florações e auxiliar a compreensão de processos ecológicos neste meio.

5. Referências

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Complexo metropolitano. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=36>> Acesso em: 01 Out. 2012.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade de Águas Superficiais do Estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2003. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/media/files/Agua/relatorios/rios/rel_aguas_int_2003/relatorio_anual_aguas_int_2003.zip>. Acesso em: 26Set. 2012.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Norma Técnica L5.303**. São Paulo: CETESB, 2005. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/servicos/normas/pdf/L5303.pdf>>. Acesso em: 26 Set. 2012.

Gemelgo, M.C.P.; Sant'anna, C.L.; Tucci, A.; Barbosa, H.R. Population dynamics of *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya & Subba Raju, a cyanobacteria toxic species, in water supply reservoirs in São Paulo, Brazil. **Hoehnea** n.35, p.297-307, 2008.

Jeong, H.J.; Yoo, Y.D.; Lee K.H.; Kim, T.H.; Seong, K.A.; Kanga, N.S.; Lee, S.Y.; Kim, J.S.; Kim, S.; Yih, W.H., Red tides in Masan Bay, Korea in 2004–2005: I. Daily variations in the abundance of red-tide organisms and environmental factors. **Harmful Algae** v.30, s.1, p.S75-S88, 2013.

Londe, L.R.; Novo, E. M. L. M.; Calijuri, M. C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 389-396. On-line. Disponível em: <<http://martedpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.18.09.49/doc/389.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2012.

Ogashawara, I.; Mishra, D.R.; Mishra, S.; Curtarelli, M.P.; Stech, J.L. A Performance Review of Reflectance Based Algorithms for Predicting Phycocyanin Concentrations in Inland Waters. **Remote Sensing**, v.5, p.4774-4798, 2013.

Ogashawara, I.; Alcântara, E.H.; Stech, J.L.; Tundisi, J.G. Cyanobacteria detection in Guarapiranga Reservoir (São Paulo State, Brazil) using Landsat TM and ETM+ images. **Rev. Ambient. Água**, vol. 9, n. 2, 2014

Ruddick, K. G.; Ovidio, F.; Rijkeboer, M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters. **Applied Optics**, v.39, n.6, p.897-912, 2000.

Sant'anna, C.L.; Azevedo, M.T.P.; Senna, P.A.C.; Komárek, J.; Komárková, J. Planktic Cyanobacteria from São Paulo State, Brazil: Chroococcales. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, p. 213 - 227, 2004.

Sant'anna, C.L.; Melcher, S.S.; Carvalho, M.C.; Gemelgo, M.P.; Azevedo, M.T.P. Planktic Cyanobacteria from upper Tietê Basin reservoirs, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 1, p. 1 - 15, 2007.

Singh, R.K.; Shanmugam, P. A novel method for estimation of aerosol radiance and its extrapolation embark in the atmospheric correction of satellite data over optically complex oceanic waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 142, p.188-206, 2014.

Sivonen, K.; Jones, G. Cyanobacterial Toxins. In: Chorus, I.; Bartram, J. (Editors). **Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management**. London: UNESCO/WHO/UNEP, 1999. cap. 3, p.55-124.

Straskraba, M.; Tundisi, J.G. **Reservoir Water Quality Management: Guidelines of Lake Management**. Kusatsu (Japan): International Lake Environmental Committee, 1999. V.9, 227 p.

Tundisi, J.G.; Matsumura-Tundisi, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.