

Índices de vegetação aplicados ao mapeamento de um episódio de florações de algas no Lago Guaíba - RS

Rosana Corazza^{1,3}
Waterloo Pereira Filho²
Luis Alberto Basso³

¹ Instituto Federal do Rio Grande do Sul - Campus Sertão
Rodovia RS 135, Km 25, Distrito Eng. Luiz Englert, Sertão-RS, Brasil. CEP: 99170-000.
rosana.corazza@sertao.ifrs.edu.br

² Universidade Federal de Santa Maria
Prédio Inpe. Av. Roraima, 1000, Camobi, Santa Maria-RS, Brasil. CEP: 97105-900.
waterloopf@gmail.com.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500, Bairro Agronomia, Porto Alegre-RS, Brasil. CEP: 91501-900.
lbasso@terra.com.br

Abstract: The process of algal blooms in aquatic environments is a natural process, but it has intensified due to the anthropogenic influence. Besides the decrease in water quality, blooms of some species of cyanobacteria can produce toxins which, if ingested by man or aquatic biota, can have negative consequences and even poisoning. Thus, the monitoring and study of the blooms is necessary and remote sensing is one of the techniques that can be employed in this task. Vegetation indices produced from bands of multispectral sensors have been developed for studies of terrestrial environments, but recently started to be used in aquatic environments. In this sense, the present study aimed to evaluate the correlation between vegetation indices and some limnological data collected in Lago Guaíba - Rio Grande do Sul, during an episode of algal bloom. The NDVI, SAVI and MSAVI indices produced from a Landsat TM5 of March 25, 2008, atmospherically corrected by using the USGS LEDAPS software were used. For vegetation indices obtained correlations of 0.84; 0.93 and 0.94 between chlorophyll-a and NDVI, SAVI and MSAVI respectively. High and positive correlations were also found between the indices and cyanobacteria. It is concluded that vegetation indices are useful for mapping intense blooms, especially the SAVI and MSAVI indexes that remove the effect of the soil and make them more suitable for mapping the results blooms.

Palavras-chave: Clorofila-a, fitoplâncton, LEDAPS, NDVI, SAVI, MSAVI, Chlorophyll-a, phytoplankton, LEDAPS, NDVI, SAVI, MSAVI.

1. Introdução

A eutrofização de ambientes aquáticos continentais é um processo lento e natural, mas que tem se intensificado sobremaneira devido a influencia das atividades antrópicas. Em ambientes com maior grau de trofia ocorre um maior desenvolvimento do fitoplâncton, composto por organismos de diferentes reinos, como as cianobactérias (reino Monera), as clorofíceas (reino Plantae), as diatomáceas (reino Chromista) e as euglenas (reino Protozoa). Todavia, todos estes organismos são genericamente conhecidos como algas em razão do tamanho microscópico e da autotrofia (Calijuri et al., 2006).

Quando em condições ambientais favoráveis, as algas crescem em altas densidades e se localizam principalmente nas camadas superficiais da água, fenômeno este denominado floração de algas (em inglês *harmful algal blooms* – HABS, ou simplesmente *blooms*), que ocorre em dias quentes e calmos em lagos com grandes quantidades de nutrientes (Esteves, 2011; Roset et al., 2001). Algumas espécies de algas, principalmente de cianobactérias, podem, em determinadas situações, produzir toxinas que oferecem risco tanto ao homem quanto à biota aquática e terrestre e, por isso, carecem atenção especial.

O Lago Guaíba é um importante corpo hídrico do Estado do Rio Grande do Sul (Figura

1). Ele banha parte dos municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) e serve como manancial de abastecimento para a capital do Estado. Apresenta área de 470 km², 50 km de comprimento, largura variável entre 900 m e 19 km e profundidade média de 2 metros, armazenando volume aproximado de 1,5 bilhões de metros cúbicos de água (DMAE, 1986). Neste lago, as florações de algas têm sido presenciadas com uma frequência cada vez maior, colocando em alerta as autoridades da saúde pública e àquelas responsáveis pelo abastecimento de água (Cybis et al., 2006).

Como consequência do processo de eutrofização artificial, no período entre os anos de 2003 e 2012, em oito ocasiões, entre o verão e o outono, as cianobactérias proliferaram-se no Guaíba, impregnando-o de substâncias que conferem sabor e odor ruins à água (Amorim e Melo, 2012). As cianobactérias não são um problema exclusivo de Porto Alegre e estas superpovoam o Guaíba não porque este lago seja mais poluído do que outros ambientes semelhantes, mas porque algumas de suas áreas oferecem condições propícias para as florações, como baixa profundidade média, grande área e baixa circulação da água (Amorim e Melo, 2012). Com a implantação do Projeto Integrado Socioambiental (PISA) no ano de 2014, a Prefeitura de Porto Alegre aumentará a capacidade de tratamento de esgotos da capital de 27% para 77%, o que, provavelmente levará a uma redução das florações de algas (Prefeitura de Porto Alegre, 2013).

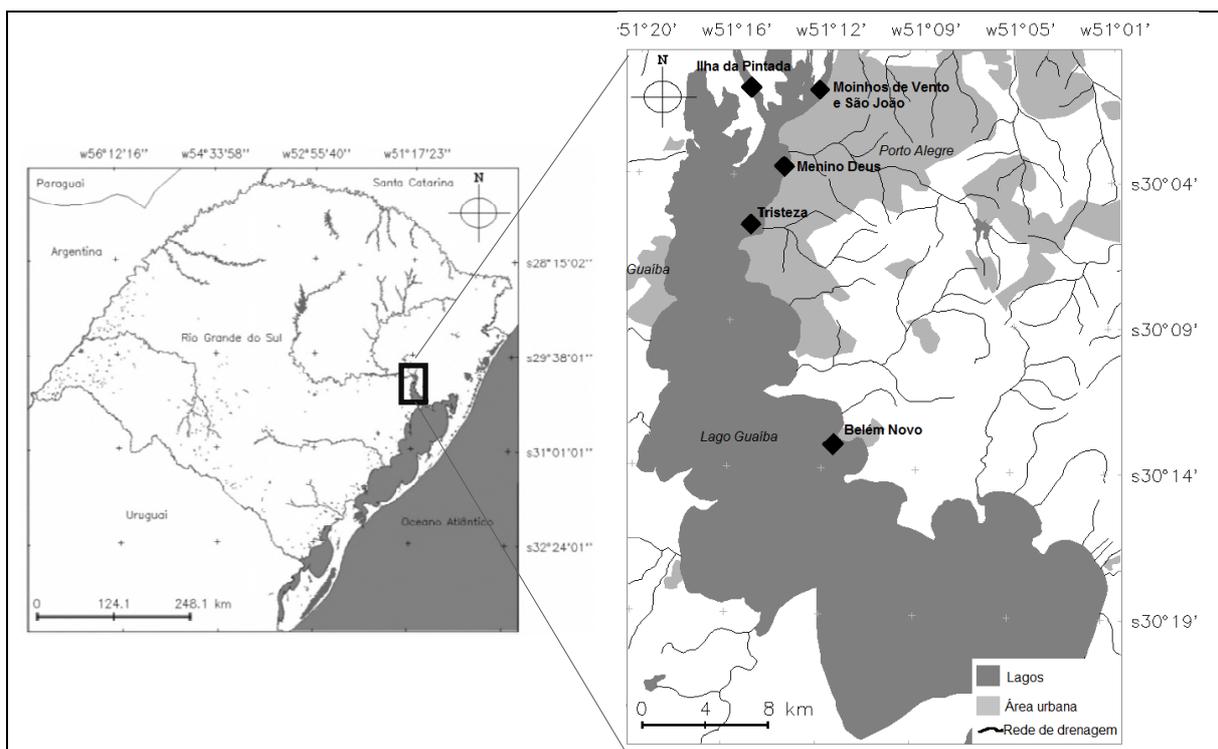


Figura 1 - Localização do Lago Guaíba no Estado do Rio Grande do Sul, com detalhe para a área do lago e localização das Estações de Bombeamento de Água Bruta (EBABs) pertencentes ao sistema de abastecimento do Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) de Porto Alegre.

Dentre as técnicas de monitoramento de ambientes aquáticos, o sensoriamento remoto óptico tem se destacado, uma vez que proporciona uma análise sinótica das áreas e a avaliação temporal dos processos. A geração de índices de vegetação é uma das técnicas de sensoriamento remoto mais empregadas para o estudo de ambientes terrestres e, recentemente, começou a ser aplicada para o monitoramento de corpos hídricos. Um dos índices mais conhecidos é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) proposto por (Rouse et al., 1973) e que é obtido pela razão entre

a reflectância no infravermelho próximo (NIR) e a reflectância no vermelho (R), variando entre -1 e +1. Os valores mais elevados (+1) estão relacionados às áreas com maiores quantidades de vegetação fotossinteticamente ativa, enquanto os menores valores (-1) representam áreas com menor quantidade de vegetação (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

A clorofila-a (Chl-a) é um dos principais pigmentos responsáveis pela fotossíntese e o conhecimento de sua concentração tem sido utilizada para determinar a biomassa da comunidade fitoplanctônica e para caracterizar ambientes aquáticos (Calijuri et al., 2006; EstevesEsteves, 2011). Londe (2008) obteve um excelente desempenho do NDVI na previsão da concentração de Chl-a a partir de dados radiométricos de campo obtidos num reservatório eutrófico com concentrações de clorofila variando entre 20 $\mu\text{g.L}^{-1}$ e 140 $\mu\text{g.L}^{-1}$. Para testar o desempenho do NDVI a autora o aplicou em imagens Landsat TM5 referentes a outro reservatório para o qual dispunha de dados experimentais. A partir do modelo empírico ($y = 237x + 6,5$), onde y é a concentração de Chl-a e x o valor de NDVI, Londe (2008) constatou que o NDVI foi sensível à presença de Chl-a, permitindo converter os intervalos de classe do NDVI em concentração de Chl-a (Tabela 1), com o mapeamento da distribuição espacial de florações de cianofíceas.

Tabela 1 - Valores estimados de clorofila para os intervalos de NDVI

Classe de NDVI	Classe de concentração de clorofila-a (mg.L^{-1})
< 0	< 8,87
0,01 - 0,27	8,87 - 70,40
0,28 - 0,47	70,50 - 72,86
0,48 - 0,67	73,00 - 117,00

Fonte: Londe (2008); Novo et al. (2009).

Conforme Novo et al. (2009), os resultados apresentados por Londe (2008) indicam que os índices de vegetação tradicionalmente aplicados no estudo de ecossistemas terrestres podem ser adaptados para o monitoramento do estado trófico de sistemas aquáticos. Lissner (2011) analisou a variação dos valores de NDVI na lagoa Itapeva, localizada no Litoral Norte do Rio Grande do Sul, por meio de imagens Landsat TM5 e ETM+7, no período de 1985 a 2010. A série temporal de imagens mostrou que os valores de NDVI aumentaram durante os períodos de floração do fitoplâncton no outono e primavera, apresentando um bom desempenho na visualização da dinâmica da lagoa e para o estabelecimento de padrões de distribuição da Chl-a (Lissner, 2011).

Outro índice de vegetação que pode ser útil para o mapeamento de florações de algas é o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo - SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*). Conforme Huete (1988) e Ponzoni e Shimabukuro (2007) em dosséis vegetais esparsos, as características do solo têm uma considerável influência no espectro de radiação e, conseqüentemente, no cálculo dos índices de vegetação, ocasionando o aumento no valor de índices como a razão simples e o NDVI. Tendo em vista que intensas florações de algas possuem característica espectral semelhante à das vegetações dispersas, e muitas vezes ocorre a influência do material de fundo, especialmente em ambientes aquáticos rasos, vislumbra-se a possibilidade de realizar o monitoramento de florações empregando este índice. A principal característica do SAVI é justamente minimizar o efeito do solo no resultado final (Ponzoni e Shimabukuro, 2007).

De acordo o *Product Guide* do Landsat *Surface Reflectance-Derived Spectral Indices* (USGS, 2014), o SAVI é calculado pela razão entre a banda do vermelho e a banda do infravermelho próximo, com um fator de correção de brilho do solo (L) definido como 0,5 para acomodar a maioria dos tipos de cobertura do solo. De acordo com Huete et al. (1988) e Ponzoni e Shimabukuro (2007) de forma geral o fator $L = 0,5$ oferece um índice espectral superior ao NDVI para um amplo intervalo de condições de vegetação.

O terceiro índice de vegetação que foi utilizado na presente pesquisa denomina-se Índice de Vegetação Ajustado para Solo Modificado - MSAVI (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index*) (Qi et al., 1994), o qual é uma modificação do SAVI e calcula a razão entre os valores da banda do vermelho e do infravermelho estimando um fator de correção L de maneira não arbitrária, maximizando a redução dos efeitos do solo no sinal da vegetação (Oliveira, 2007; USGS, 2014).

Tendo em vista o exposto, o objetivo do presente trabalho foi explorar a utilização dos índices de vegetação NDVI, SAVI e MSAVI produzidos a partir de uma imagem Landsat TM5 para o mapeamento de florações de algas no Lago Guaíba e correlacionar os valores obtidos com as variáveis limnológicas relacionadas às florações, especialmente a Chl-a.

2. Metodologia de Trabalho

Os dados limnológicos utilizados na presente pesquisa foram coletados pelo DMAE entre os dias 10 e 13 de março de 2008. Este órgão realiza o monitoramento contínuo de parâmetros químicos, físicos e biológicos da água coletada nas Estações de Bombeamento de Água Bruta (EBABs) situadas no Lago Guaíba e que destinam água para as Estações de Tratamento de Água (ETAs) (Figura 1). As variáveis limnológicas que foram utilizadas na presente pesquisa referem-se à: profundidade da coluna d'água, transparência da água (medida com o Disco de Secchi), turbidez e aos Sólidos Suspensos Totais (SST), bem como às variáveis relacionadas às florações: a concentração de Chl-a e feofitina obtidas pelo método espectrofotométrico e a contagem de cianobactérias, algas verdes, diatomáceas, flagelados pigmentados e fitoplâncton total através do método das Câmaras de Sedgwick-Rafter. Os dados limnológicos foram correlacionados entre si e com os dados provenientes das imagens de satélite.

A imagem de satélite Landsat TM5 utilizada foi selecionada com base no exame visual, tendo sido produzida no dia 09 de março de 2008. Optou-se por empregar uma imagem já corrigida atmosféricamente e convertida para reflectância de superfície, a qual foi processada sob demanda no site: <https://espa.cr.usgs.gov/login/?next=/>. O Serviço Geológico Norte Americano (*U.S. Geological Survey – USGS*), através da *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center*, tem produzido dados Landsat de maior qualidade para apoiar estudos das mudanças na superfície terrestre. Para tal, as imagens Landsat TM5 estão sendo processadas a partir de um software especializado denominado *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Sistema de Processamento (LEDAPS)*, originalmente desenvolvido pela NASA e pela Universidade de Maryland (Masek et al., 2006). Este *software* aplica rotinas de correção atmosférica através do modelo de transferência radiativa denominado *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, produzindo, dentre outros produtos, a reflectância de superfície para as todas as bandas do sensor. A caracterização dos dados de reflectância de superfície LEDAPS realizada por Maier-Sperger et al. (2013), mostraram-se consistentes com o desempenho esperado para o algoritmo. A USGS também disponibiliza índices de vegetação com resolução espacial de 30 m produzidos a partir dos dados de reflectância de superfície, dentre os quais o NDVI, SAVI e MSAVI empregados neste trabalho.

Após o download das bandas da imagem convertidas para reflectância e dos índices de vegetação NDVI, SAVI e MSAVI processados pelo LEDAPS, procedeu-se com o georreferenciamento dos mesmos no software QGIS Desktop (versão 2.4) e importação para o banco de dados implementado no software SPRING (versão 5.2.6). Com base nos pontos amostrais referentes às EBABs do DMAE, foi realizada a leitura de pixels a partir de uma matriz de 3 x 3 pixels e, na sequência, calculada a média destes. Esta média foi correlacionada com as variáveis limnológicas que podem proporcionar alterações nas características espectrais das imagens e nas razões de bandas, aplicando-se também a análise de regressão

linear e o teste *t* de Student a fim de verificar a significância estatística das correlações resultantes.

A partir do algoritmo obtido por Londe (2008) para a estimativa da distribuição espacial da Chl-a com base nos valores de NDVI foi realizado o fatiamento da imagem de NDVI e criação das classes de Chl-a, permitindo avaliar a distribuição espacial deste pigmento.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados limnológicos obtidos pelo DMAE para as 5 EBABs. Na data da imagem (09/03/2008) ocorreu uma intensa floração de algas, o qual pode ser visualizada na imagem, bem como na concentração de Chl-a verificada no ponto (47) Belém Novo, situado na margem esquerda da porção central do Lago. Neste ponto também foram constatadas as maiores concentrações de espécies fitoplanctônicas (Org.mL⁻¹), especialmente cianobactérias e flagelados pigmentados.

De acordo com DMAE (2012), embora a EBAB Belém Novo seja a mais distante em relação às demais e à área urbana de Porto Alegre (Figura 1), neste local, as características hidromorfológicas são favoráveis ao desenvolvimento fitoplanctônico, especialmente pela característica de enseada, pela baixa profundidade média (3,4 m, no ponto amostral) e a menor influência dos fluxos de água e dos ventos, tornando as águas mais calmas e transparentes, propícias às florações de cianobactérias, principalmente no verão (DMAE, 2012).

Nos demais pontos, as concentrações de Chl-a não foram tão elevadas, o que demonstra o aspecto regionalizado das florações de algas. Neste sentido, amostragens realizadas *in situ* e de maneira esparsa podem não contemplar as áreas com ocorrência da floração. As imagens de satélite, por sua vez, podem favorecer a identificação deste processo, conforme pode ser constatado na Figura 2.

Tabela 2 – Valores e concentrações das variáveis limnológicas nas EBABs do Lago Guaíba.

Ponto	Moinhos de Vento e São João	Menino Deus	Tristeza	Belém Novo	Ilha da Pintada
Data	13/03/2008	13/03/2008	12/03/2008	10/03/2008	12/03/2008
Profundidade (m)	6,9	8,8	4,3	3,4	3,8
Transparência (cm)	40,0	60,0	90,0	50,0	90,0
Turbidez (NTUs)	36,5	16,0	12,7	9,8	13,6
SST (mg.L ⁻¹)	22,0	10,0	10,0	12,0	10,0
pH	7,0	6,9	7,0	9,8	7,0
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	75,4	76,5	67,0	69,6	57,4
Clorofila (µg.L ⁻¹)	2,2	2,6	2,0	63,5	0,4
Feoftina (µg.L ⁻¹)	0,4	10,6	2,2	1,3	10,2
Cianobactérias ¹ (Org.mL ⁻¹)	54,4	102,6	0	172,5	0
Algas verdes ² (Org.mL ⁻¹)	64,6	171,0	13,2	158,7	110,4
Diatomáceas ³ (Org.mL ⁻¹)	88,4	461,7	26,4	117,3	869,4
Flagelados Pigmentados (Org.mL ⁻¹)	955,4	3984,3	930,6	1835,4	1469,7
Fitoplâncton total ⁵	1162,8	4719,6	970,2	2283,9	2449,5

¹Cyanophyta; ²Chlorophyta; ³Bacillariophyta.

Na imagem “a” da Figura 2, a composição cor verdadeira (RGB321) permite verificar o aspecto esverdeado da água. Na composição falsa cor (RGB543) apresentada em “b”, a identificação da área de floração é favorecida pois sua cor assemelha-se à da vegetação

terrestre. Nas imagens dos índices de vegetação presentes em “c” (NDVI), “d” (SAVI) e “e” (MSAVI), a identificação visual das florações não foi tão favorecida, porém, obteve-se elevadas correlações entre os valores dos pixels próximos às EBABs e a Chl-a, conforme pode ser verificado na Tabela 3. Em “f” é apresentado o fatiamento do NDVI de acordo com o algoritmo proposto por Londe (2008). Apesar das altas correlações obtidas entre o NDVI e a Chl-a, o baixo número de pontos amostrais não permitiu a geração de um modelo próprio. O fatiamento da imagem e conversão dos valores de NDVI em classes de concentração de Chl-a foi a técnica que melhor permitiu identificar a distribuição espacial da floração.

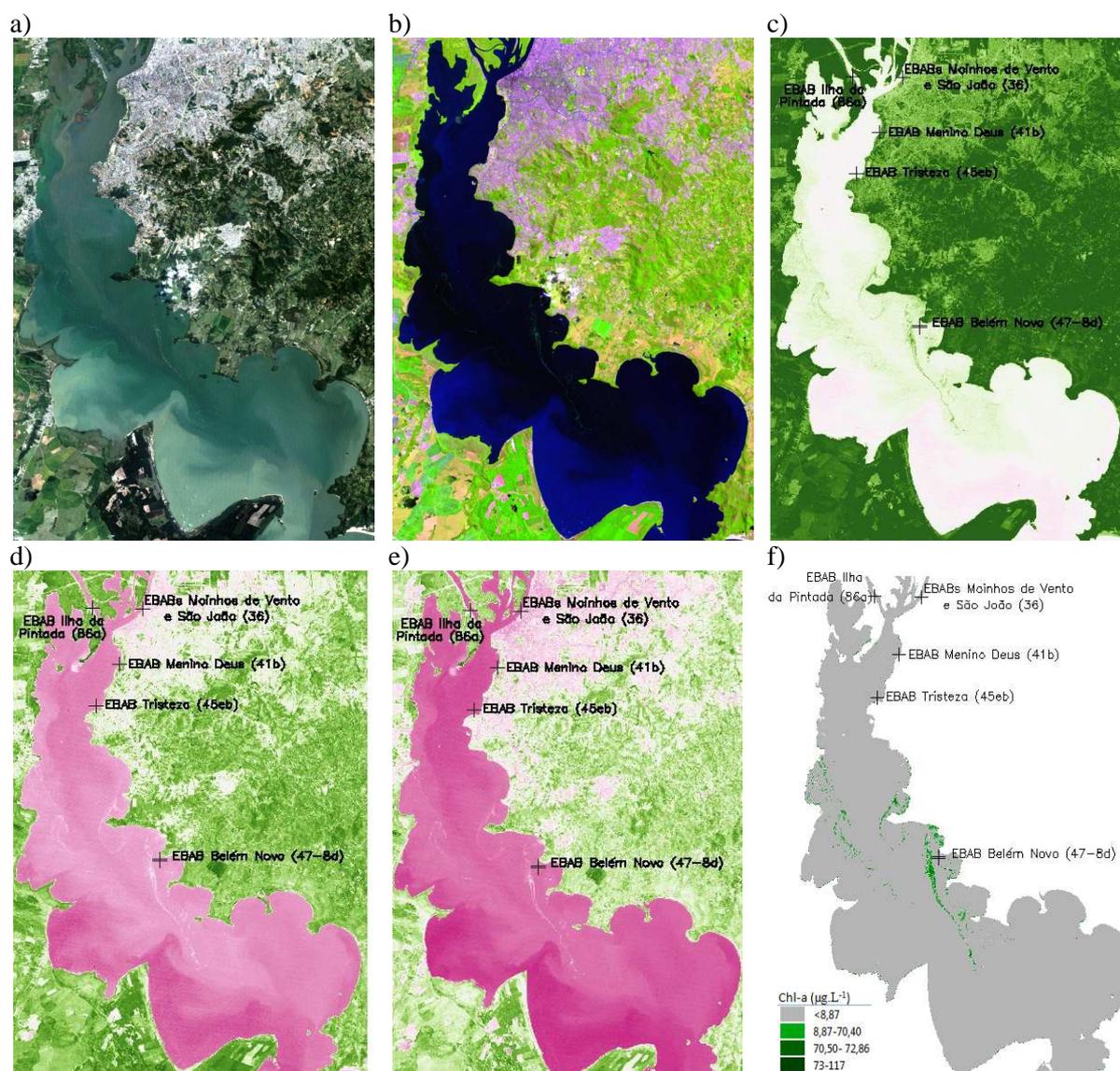


Figura 2 – Imagem Landsat TM5 de 09/03/2008: a) composição colorida cor verdadeira RGB321; b) composição colorida falsa cor RGB543; c) imagem NDVI; d) imagem SAVI; e) imagem MSAVI e f) distribuição espacial da Chl-a.

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis limnológicas relacionadas ao fitoplâncton e os índices de vegetação. Os valores destacados em negrito são os que apresentaram correlações estatisticamente significativas de acordo com teste de hipóteses t de Student, com um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$). Dentre as correlações obtidas destaca-se a alta correlação positiva entre a Chl-a e as cianobactérias. Embora não significativa estatisticamente, esta correlação positiva indica que

o aumento da concentração de cianobactérias conduz a um aumento da concentração de Chl-a. A Chl-a mostrou-se correlacionada de forma significativa tanto com o NDVI, quanto com o SAVI e MSAVI, porém, os dois últimos índices trouxeram um aumento na correlação, justamente por diminuírem a influência do solo na resposta da floração. Este aspecto é bastante importante uma vez que o Lago Guaíba apresenta uma baixa profundidade média, o que pode comprometer a interpretação dos resultados da imagem. O melhor desempenho tanto do SAVI quanto do MSAVI pode ser explorado para a geração de algoritmos preditivos da Chl-a quando se dispõe de um maior número de pontos amostrais, permitindo um ajuste adequado da equação de regressão.

Tabela 3 – Matriz de correlação entre as variáveis limnológicas relacionadas ao fitoplâncton e os índices de vegetação.

	CHL-A	FEOF.	CIANOB.	CLOROF.	DIAT.	FLAG.	FITO. TT.	NDVI	SAVI	MSAVI
CHL-A	-									
FEOF.¹	-0,42	-								
CIANOB.²	0,82	-0,20	-							
CLOROF.³	0,47	0,48	0,74	-						
DIAT.⁴	-0,33	0,88	-0,29	0,40	-					
FLAG.⁵	0,01	0,66	0,47	0,78	0,32	-				
FITO. TT.⁶	-0,01	0,77	0,41	0,83	0,51	0,98	-			
NDVI	0,84	-0,03	0,74	0,72	0,17	0,15	0,24	-		
SAVI	0,93	-0,11	0,87	0,74	-0,02	0,25	0,28	0,96	-	
MSAVI	0,94	-0,16	0,91	0,73	-0,10	0,27	0,28	0,94	0,99	-

¹Feofitina; ²Cianobactérias, ³Clorofíceas (Algas Verdes); ⁴Diatomáceas; ⁵Flagelados; ⁶Fitoplâncton Total.

As correlações entre a contagem de cianobactérias e o SAVI e MSAVI também foi significativa, o que comprova o potencial de utilização destes índices para o monitoramento de florações. Este aspecto é de fundamental importância, haja vista a potencialidade de produção de toxinas que algumas espécies de cianobactérias possuem. Por fim, as altas correlações encontradas entre os índices de vegetação demonstram a consistência dos produtos gerados a partir do software LEDAPS.

4. Conclusões

Os resultados obtidos permitiram constatar a viabilidade da utilização de índices de vegetação para o mapeamento de florações de algas. Neste sentido, os índices de vegetação processados a partir do software LEDAPS e disponibilizados pela USGS mostraram-se consistentes e esta característica pode facilitar a utilização dos mesmos para diversos fins.

O SAVI e MSAVI apresentaram melhores correlações com os dados das florações uma vez que incluem em suas fórmulas índices que buscam remover os efeitos do solo na resposta espectral. A resposta espectral de corpos hídricos de baixa profundidade, caso do Lago Guaíba, pode ser influenciada pela resposta do fundo, e por isso, estes índices mostraram-se mais adequados do que o NDVI.

A utilização de dados de sensoriamento remoto mostrou-se efetiva para o mapeamento de florações e pode auxiliar grandemente no estudo deste fenômeno, especialmente pela possibilidade de avaliar a distribuição espacial da Chl-a e outros parâmetros. Todavia, as coletas em campo são fundamentais para balizar a compreensão dos dados de sensoriamento remoto, o que significa que o uso combinado das duas técnicas pode trazer resultados ainda mais significativos para a compreensão dos processos que se estabelecem nos corpos hídricos e que muitas vezes tem efeitos diretos na qualidade da água, caso das florações de algas.

Agradecimentos: ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) da Prefeitura de Porto Alegre pela disponibilização dos dados; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Amorim, F.; Melo, I. Do esgoto às torneiras. **Jornal Zero Hora**, Porto Alegre, p. 20-23, 03 jun. 2012.
- Calijuri, M.C.; Alves, M. S. A.; Santos, A. C. A. **Cianobactérias e cianotoxinas em águas continentais**. São Carlos: RiMA, 2006, 118p.
- Cybis, L. F. et al. **Manual para estudo de cianobactérias planctônicas em mananciais de abastecimento público: caso da represa Lomba do Sabão e Lago Guaíba**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro: ABES, 2006. 64p.
- Departamento Municipal De Água E Esgotos De Porto ALEGRE (DMAE). **A ocorrência de florações no Lago Guaíba**. Disponível em: <http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/cs/usu_doc/ocorrencia_de_floracoes_lago_guaiba.pdf>. Acesso em: 31 ago. 2012.
- Esteves, F. A. (Coord.) **Fundamentos de Limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011, p. 375-445 e p. 625-655.
- Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, 25; p. 295-309, 1988.
- Lissner, J. B. **Variação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada na lagoa Itapeva, Litoral Norte do Rio Grande do Sul, Brasil, a partir de análise se séries temporais**. 2011. 120f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- Londe, L. R. **Comportamento espectral do fitoplâncton de um reservatório brasileiro eutrofizado – Ibitinga (SP)**. 2008. 223p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.
- Maiersperger, T. K. et al. Characterizing LEDAPS surface reflectance products by comparisons with AERONET, field spectrometer, and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**. 136, p. 1–13, 2013.
- Masek, J.G., et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter**. 3(1), p. 68-72, 2006.
- Novo, E. M. L. M.; et al. Integração de dados do sistema automático de monitoramento de variáveis ambientais (SIMA) e de imagens orbitais na avaliação do estado trófico do Reservatório da UHE Funil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p. 4797-4804.
- Oliveira, L. G. L. et al. Estudo da variabilidade de índices de vegetação através de imagens do ETM+ /LANDSAT 7. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. p. 5995-6002.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Ed. PARÊNTESE, 2007.
- Prefeitura de Porto Alegre. **Projeto Integrado Socioambiental (Pisa)**. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/pisa/default.php?p_secao=3>. Acesso em: 17 jan. 2013.
- Qi J., et al. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). **Remote Sensing of Environment**. 48, p.119-126, 1994.
- Roset, J.; Aguayo, S.; Muñoz, M. J. Detección de cianobactérias y sus toxinas: una revisión. **Revista de Toxicología**. n. 18, p.65-71, 2001.
- Rouse, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington. **Anais...** Washington: 1973, v. 1, sec. A, p. 309-317.
- U.S. Geological Survey (USGS). **Product guide: Landsat surface reflectance-derived spectral indices**. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/documents/si_product_guide_sr_samples.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2014.