



Ocorrência de Macrófitas Aquáticas no lado Brasileiro do Reservatório de Itaipu com o Uso de Imagens Sentinel-2a

Occurrence of aquatic macrophytes in the Brazilian side of the Itaipu reservoir with the use of sentinel-2a images

*Cristiano Niederauer da Rosa*¹
*Waterloo Pereira Filho*²
*Jean Ricardo Favaretto*³
*Ana Carolina Paim Benedetti*⁴

Recebido em janeiro de 2018.
Aprovado em agosto de 2018.

RESUMO

As macrófitas aquáticas possuem grande amplitude ecológica e capacidade adaptativa. Devido a isso, algumas plantas são favorecidas por alterações ambientais ou desequilíbrios no corpo hídrico, este quadro faz com que algumas espécies formem densas populações em detrimento de outras, causando problemas para os usos da água. Com base no exposto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a capacidade do sensor MultiSpectral Instrument (MSI), a bordo do satélite Sentinel-2A, em identificar as áreas de ocorrências de macrófitas aquáticas emersas presentes no compartimento aquático do Rio São Francisco Verdadeiro (SFV) no reservatório Itaipu. Para isso, foram gerados mapas temáticos, a partir de três imagens MSI em uma análise temporal para um período de março a setembro de 2016, com as seguintes classes: Macrófita 1 (M1), Macrófita 2 (M2), Macrófita 3 (M3), Água, Vegetação da Área de Preservação Permanente (APP) do reservatório, Solo Exposto, Vegetação rasteira (áreas cultivadas) e Construção/areia/asfalto. Nos resultados foi constatado que o algoritmo classificador supervisionado que apresentou melhor desempenho foi o Máxima verossimilhança ($Kappa=0,884$) com o conjunto de dados de entrada contendo as bandas 2, 3, 4, 8. A inclusão dos índices NDVI e NDWI além das bandas utilizadas não apresentou aumento no desempenho na discriminação das classes de macrófitas. A abordagem multitemporal permitiu constatar redução na classe M3 (175,74 ha) entre a cota normal e

¹ Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: cristianonrd@gmail.com

² Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. E-mail: waterloopf@gmail.com

³ Departamento de Engenharias e Ciências da Computação, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Brasil. E-mail: xxxxxxxxx@universidade.br

⁴ Colégio Politécnico da UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. E-mail: anacaroline@politecnico.ufsm.br

baixa. Por outro lado, na classe M2 constatou-se aumento de 81,87 ha neste mesmo período. As macrófitas emergentes enraizadas (M1) não apresentaram grandes oscilações quanto a área de ocorrência. Portanto, o sensor MSI consiste em uma alternativa válida para realizar mapeamento e identificação de macrófitas aquáticas no reservatório de ITAIPU-PR-Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto. macrófitas aquáticas emergentes. SIG. ITAIPU.

ABSTRACT

Aquatic macrophytes have a large ecological range and adaptive capability. Due to this fact, some plants benefit from environmental changes or hydric imbalance, and it causes some species to develop denser population overcoming other species, leading up to water usage problems. Considering this, the objective of this paper is to evaluate the capability of MultiSpectralInstrument (MSI), on board of Sentinel-2A satellite, to identify the areas of occurrence of aquatic macrophytes existent in the aquatic compartment of São Francisco Verdadeiro (SFV) river, in the reservoir of Itaipu. Therefore, particular maps were developed, coming out of images from MSI in a temporal analysis from March to September of 2016, including the following classes: Macrophyte 1 (M1), Macrophyte 2 (M2), Macrophyte (M3), water, vegetation from preservation areas of the reservoir (APP), exposed soil, undergrowth (farming area) and construction/sand/asphalt. The output results from the classifying monitored algorithm show that best performance was the maximum likelihood ($Kappa=0.884$) along with input data from bands 2, 3, 4 and 8. The inclusion of index NDVI and NDWI likewise the other utilized bands, did not show growth on the performance of macrophytes classes discrimination. The temporal approach displayed reduction on M3 class (175.74 ha) between the normal and low height. Moreover, the M2 class, displayed increase of 81.87 ha in the same period of time. The emerging macrophytes (M1) did not show greater oscillation due to occurrence area. In conclusion, the sensor MSI is a valid way to map and identify aquatic macrophyte on the reservoir of Itaipu – PR – Brazil.

KEYWORDS: Remote sensing. emerging macrophytes. GIS. ITAIPU.

* * *

Introdução

As macrófitas aquáticas são importantes para o meio ambiente, pois contribuem para a ciclagem e estocagem de nutrientes, propiciam a permanência de organismos aquáticos que auxiliam na oxigenação da água e alteram a estrutura espacial dos ecossistemas aquáticos (THOMAZ e ESTEVES, 2011). Fato este, devido à sua grande capacidade adaptativa e

amplitude ecológica, que possibilita que a mesma espécie colonize diferentes tipos de ambientes, contribuindo para o aumento da heterogeneidade estrutural de habitats, influenciando na diversidade biológica e na troca de nutrientes (AGOSTINHO et al., 2000).

Segundo Thomaz e Esteves (2011) a velocidade da água, profundidade, turbidez, concentrações de nutrientes e nível d'água, estão dentre os principais fatores que alteram o habitat das macrófitas aquáticas. Mais especificamente Freedman e Lacoul (2006), Finlayson (2005), Antunes et al. (2012) e Rosa et al. (2017) relatam reduções e ampliações na ocorrência de espécies de macrófitas como reflexo das flutuações do nível da água em áreas úmidas.

Corroborando com isto Costa et al. (1996) e Gastal JR. et al. (2003) afirmaram que em locais onde ocorrem ações antrópicas acontece desequilíbrio do ambiente natural do corpo hídrico. Neste sentido Thomaz e Esteves (2011) destacam a regularização de ciclos hidrológicos, comuns nos reservatórios Brasileiros. Em função disso algumas espécies de macrófitas têm seu desenvolvimento favorecido, formando extensas populações, reduzindo assim a turbulência da água, e, como consequência, ocasionando a perda das trocas gasosas entre a água e o ar. além disso, esse crescimento excessivo causa impactos negativos no ambiente, como por exemplo, na operacionalidade de usinas hidrelétricas devido a obstrução de suas turbinas, bem como, a saúde das populações residentes. Perante isso, tem-se a necessidade do emprego de métodos para o monitoramento das macrófitas aquáticas quanto a área de ocorrência e sua dinâmica temporal.

Neste contexto, o Sensoriamento Remoto apresenta-se como uma ferramenta eficaz na espacialização populacional das macrófitas aquáticas (MESQUITA, 2013 e FRAGAL et al., 2012). Ainda, este recurso permite identificar as condições de ocorrências das plantas aquáticas em locais de difíceis acessos como as planícies de inundações. Portanto, com o uso desta ferramenta é possível acompanhar o crescimento e decréscimo das comunidades de macrófitas aquáticas (SILVA et al., 2011).

Com o intuito de monitorar as macrófitas aquáticas da margem esquerda do reservatório de ITAIPU, a Itaipu Binacional iniciou em 1995, em parceria com o Nupélia /UEM (Núcleo de Pesquisa em Limnologia, Ictiologia e Aquicultura / Universidade Estadual de Maringá), os trabalhos de acompanhamento da dinâmica desta vegetação no lado brasileiro (BENASSI et al., 2010). Entretanto, tal monitoramento é realizado apenas uma vez a cada semestre, com visitas in loco.

Deste modo, o presente trabalho busca avaliar a capacidade do sensor MultiSpectral Instrument (MSI) a bordo do satélite Sentinel-2A em auxiliar nas pesquisas de dinâmicas populacionais das macrófitas aquáticas do reservatório. Deste modo espera-se contribuir para o preenchimento de lacunas existentes entre as visitas semestrais realizadas pelo Nupélia. Neste sentido, a identificação da variação nas áreas de ocorrência das macrófitas aquáticas emergentes e flutuantes frente a cota d'água presente no reservatório é realizada.

2 Material e Métodos

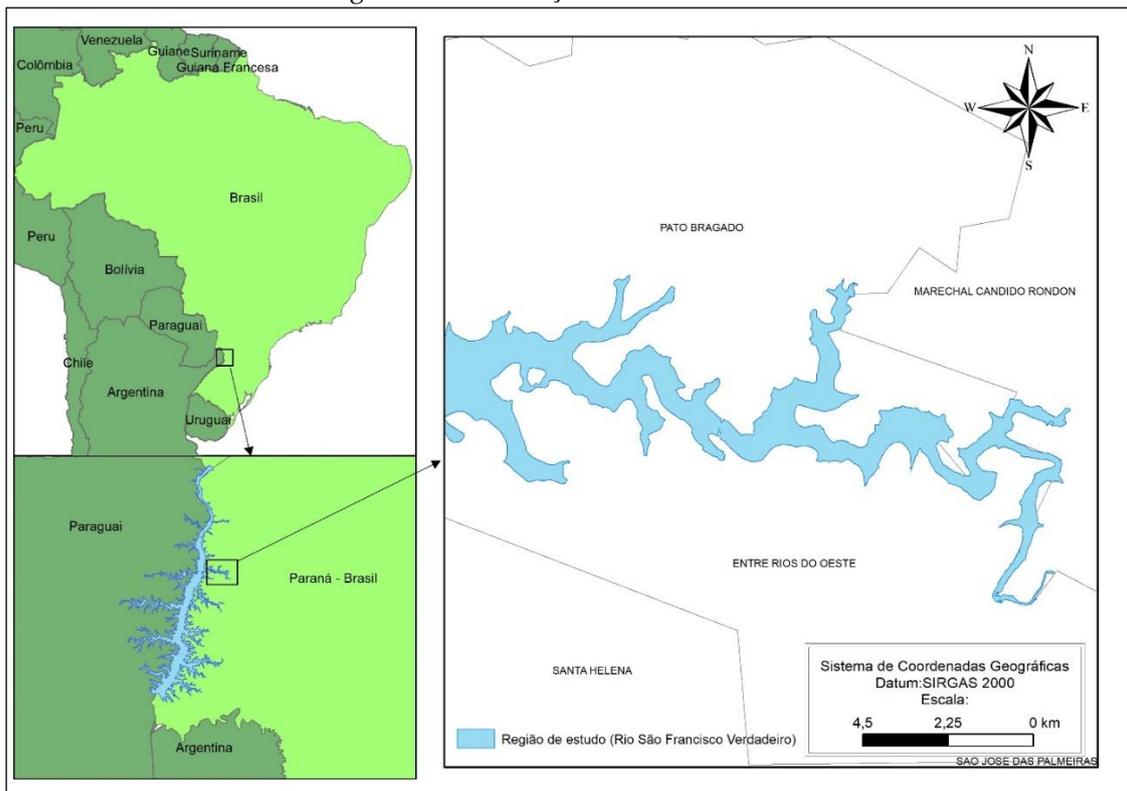
2.1 Caracterização da Região em Estudo

A região de estudo é o compartimento aquático localizado na margem esquerda do reservatório de ITAIPU, na divisa entre os municípios de Entre Rios do Oeste e Pato Bragado no Estado do Paraná, Brasil. Por ser o local de deságue do Rio São Francisco no reservatório de ITAIPU, o local é popularmente denominado como braço do rio São Francisco Verdadeiro (SFV). O local apresenta superfície de água de aproximadamente 22,5 km², com largura mínima, máxima e extensão, entorno de 0,2 km, 1 km e 16 km respectivamente (Figura 1).

Este rio tem uma área de captação de 220.844,5 ha, onde predomina a atividade agropecuária, cujos principais usos do solo são agricultura (cultivo de soja e milho) e pastagem (criação de gado). Na região, tem-se também a

avicultura e suinocultura, ambas muito incentivadas devido à presença de cooperativas e empresas existentes na Bacia do Paraná 3, como por exemplo Copagrill e Sadia.

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: Adaptado da malha digital IBGE, (2015).

O clima da região é do tipo Cfa, cuja característica é de um clima chuvoso, sem estação seca, verões quentes com temperatura média superior a 22°C, e média inferior a 18°C no inverno (AYOADE, 2002; IAP, 2018). A precipitação média na região é de 1.650 mm o que dá a usina uma vazão média afluyente de 11.663 m³/s (ITAIPU, 2017).

2.2 Banco de Dados

Três imagens do Sensor MSI (Zona: 21JYN) foram utilizadas. As imagens foram obtidas do site da European Space Agency (ESA, 2016) para o período de março a setembro de 2016.

A alta qualidade radiométrica dos dados do MSI (Pahlevan et al., 2017), bem como, a resolução espacial de 10 e 20 metros são importantes características do sensor para estudos de águas interiores. Foi facultado apenas o uso das bandas com 10 metros de resolução espacial para maximizar a ocorrência de pixels mais puros em relação ao tema em estudo. Na Tabela 1 são descritas as características das bandas utilizadas.

Tabela 1– Características das bandas espectrais utilizadas do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2A

Resolução Espacial	Nº da Banda	Nome da Banda	Comprimento de Onda Central (nm)
10 m	2	Azul	490
	3	Verde	560
	4	Vermelho	665
	8	Infravermelho Próximo	842

Fonte: Adaptado de ESA (2015).

A aquisição das séries de cota d'água, vazão vertida e vazão turbinada foi realizada por meio do site do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, mantido pela Agência Nacional das Águas (SAR, 2017). Já os dados de batimetria do reservatório obtidos no decorrer de 2016 foram cedidos pela ITAIPU Binacional.

2.3 Correção do efeito atmosférico, conversão de níveis digitais para refletância.

Os processos de correção dos efeitos atmosféricos e conversão de nível digital (ND) para refletância foram realizados por meio da ferramenta Semi Automatic Classification Plugin (SCP) (CONGEDO, 2016) no software QGIS. Essa ferramenta foi empregada apenas para a etapa de pré-processamento dos dados, na qual estes processos são feitos de forma automática, sendo as imagens adquiridas em reflectância de topo da atmosfera (TOA) em escala (nível-1C), convertidas para reflectância conforme descrito em Gatti et al.

(2015), e sequencialmente submetidas a correção atmosférica com o método Dark Object Subtraction (DOS) (CHAVEZ JR, 1988).

As demais etapas, detalhadas a seguir, que envolvem a composição dos índices de vegetação, classificação automática das imagens e avaliação dos resultados foram realizadas com o uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS 10.3.

2.4 Composição dos índices NDVI e NDWI

Índices como o índice de vegetação por diferença normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) e o índice de diferença normalizado da água (Normalized difference Water Index – NDWI) vêm sendo utilizados frequentemente no sensoriamento remoto (LEIVAS et al., 2013). Estes índices facilitam a modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, como a área foliar, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, áreas de lâmina d'água aparente.

O NDVI é dado pela diferença entre a reflectância das bandas do infravermelho próximo (Near Infra Red – NIR) e vermelho (Red), normalizado pela soma de suas refletâncias nestas faixas espectrais. Este índice tem como base o contraste entre a baixa refletância da vegetação na banda do vermelho e alta refletância na banda do NIR, seu objetivo é demonstrar o vigor e a densidade da cobertura vegetal (ROUSE et al., 1973). Já o NDWI é dado pela equação 1, fundamentada na alta refletância da água no comprimento de onda do verde e sua baixa refletância no NIR, esse índice foi desenvolvido por Mcfeeters (1996), para delinear os recursos hídricos, eliminando as características da vegetação terrestre e do solo.

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR) \quad (1)$$

Sendo: NIR e GREEN as bandas espectrais 8 e 3 do satélite Sentinel-2A.

2.5 Recorte e Classificação Digital das Imagens

Os autores Oyama et al. (2015), Villa et al. (2015) e Han et al. (2018) reportam bons resultados no mapeamento de macrófitas em ambientes lênticos, com o emprego de limiares nos índices NDVI e NDWI. Assim, para verificar se os índices de vegetação têm capacidade de melhorar a distinção entre as classes temáticas, estes dois índices foram avaliados. Deste modo, considerou-se como dados de entrada no algoritmo classificador, dois conjuntos de dados, um apenas com as bandas 2, 3, 4 e 8, e outro com a inserção dos índices NDVI e NDWI além das bandas 2, 3, 4 e 8.

Considerando a cota média de operação do reservatório de ITAIPU, de 220 metros (Canzi et al. 2014) foi realizada uma consulta nos dados de batimetria, no qual foi selecionada tal cota e gerada sobre ela um polígono considerado como área de lâmina d'água do reservatório. Posteriormente, a fim de diminuir o tempo de processamento gasto na classificação de áreas não contempladas no estudo, foi realizado um "buffer" de 200 metros, referente a parte terrestre, que serviu como máscara para o recorte das bandas.

A partir de pesquisas de campo e análise prévia das imagens Sentinel, a composição colorida RGB234 foi a que melhor permitiu a distinção visual entre os alvos de interesse com o realce aplicado foi de 0,5.

Considerou-se como classes de mapeamento as macrófitas emersas como a *Uruchloa Subquadripara* e *Hymenachne Amplexicaule*, representadas pela coloração verde. As demais macrófitas foram divididas em duas outras classes, uma de coloração verde escura que pode representar algumas espécies de *Salvinia* e *E. crassipes*. A outra, de coloração verde clara, acredita-se ser composta por *Pistia stratiotes*. Deste modo, na classificação das imagens, determinou-se as seguintes classes temáticas: I) Macrófitas 1 (M1),

de coloração verde; II) Macrófitas 2 (M2), de coloração verde escura); II) Macrófitas 3 (M3), de coloração verde clara; IV) Água; V) Vegetação da Área de Preservação Permanente (APP) do reservatório; VI) Solo Exposto; VII) Vegetação rasteira (áreas cultivadas) e; VIII) Construção/areia/asfalto. Embora tenham sido definidas estas oito classes temáticas para se compreender o cenário da área de estudo, somente as classes relacionadas as macrófitas aquáticas foram interpretadas para atender diretamente os objetivos do trabalho.

A classificação das imagens foi realizada a partir de dois algoritmos de classificação supervisionada. Considerados por Campos et al. (2016) como alguns dos classificadores individuais com melhor desempenho. O Máxima verossimilhança (Maxver) calcula as distribuições de probabilidade para as classes, relacionadas ao teorema de Bayes, estimando se um pixel pertence a uma classe de cobertura territorial; e a Distância mínima calcula a distância euclidiana $d(x, y)$ entre as assinaturas espectrais dos pixels da imagem e as assinaturas espectrais de treinamento, atribuindo ao pixel a classe da assinatura espectral que está mais próxima (RICHARDS e JIA, 2006).

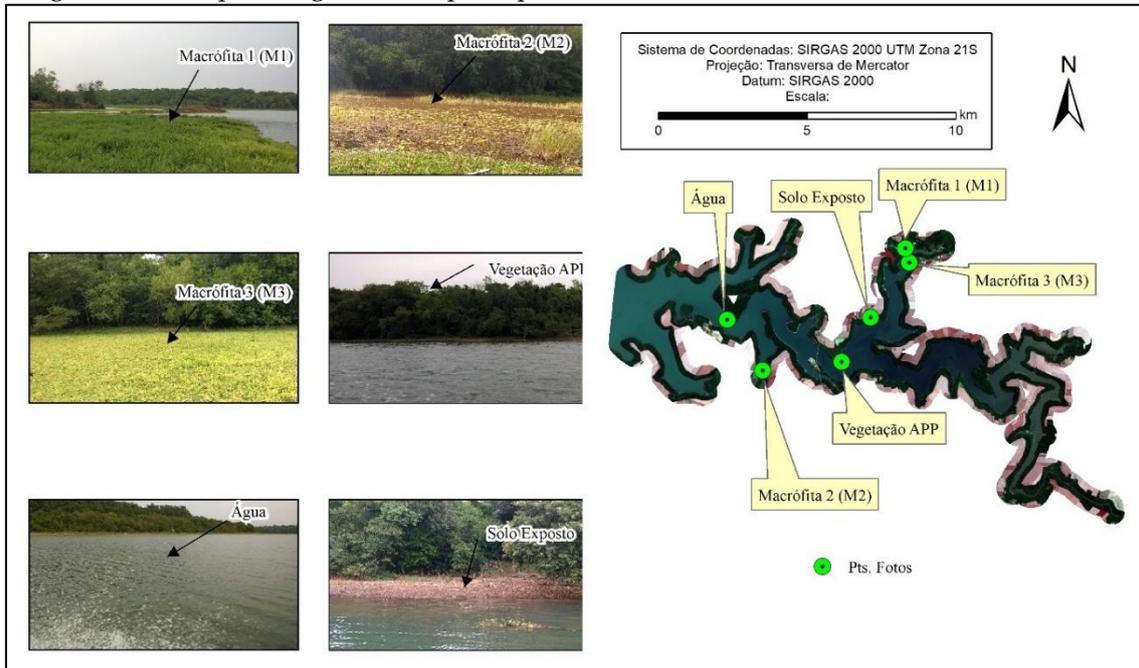
No que se refere ao treinamento das amostras inseridas nos classificadores foi utilizado os pontos de monitoramento de macrófitas do Nupelia. A Figura 2 traz alguns exemplos fotográficos das principais classes temáticas do estudo, a tabela 2 apresenta a quantidade de pixels contidos nas amostras de treinamento de cada classe da imagem.

Tabela 2– Quantidade de pixels contidas nas amostras de treinamento.

Nome da classe	17/03/16	16/04/16	23/09/16
M1	77	1.933	73
M2	184	4.987	130
M3	48	1.210	35
Água	13.368	334.198	14.660
APP	4.532	133.313	4.424
Solo Exposto	652	8.206	3.610
Vegetação rasteira	3.299	86.150	179
Construção/ areia/asfalto	51	1.378	12

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 2 – Exemplo fotográfico das principais classes de interesse, obtidas no dia 30/09/2016.



Fonte: elaborada pelo autor

Com o intuito de demonstrar o algoritmo classificador mais efetivo, foi utilizado a matriz de confusão, por meio da qual foram calculados o coeficiente de concordância Kappa (ANTUNES et al., 1997). A avaliação de concordância foi analisada conforme proposto por Landis & Koch (1977) (Tabela 3), e o índice de exatidão global.

Tabela 3– Tabela de referência para os valores do índice Kappa.

Índice Kappa	Concordância
0,00	Péssima
0,01 a 0,02	Ruim
0,21 a 0,40	Razoável
0,41 a 0,60	Boa
0,61 a 0,80	Muito Boa
0,81 a 1,00	Excelente

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977, p. 165).

Sobre os resultados da classificação, foi realizado um novo recorte. Entretanto, nesse momento foi utilizado apenas o polígono representativo da área de lâmina d'água para a cota de 220 metros. Na sequência foi realizada

a análise temporal quantitativa das áreas de ocorrência das macrófitas aquáticas, por meio do classificador e do conjunto de dados que atingiu melhor desempenho.

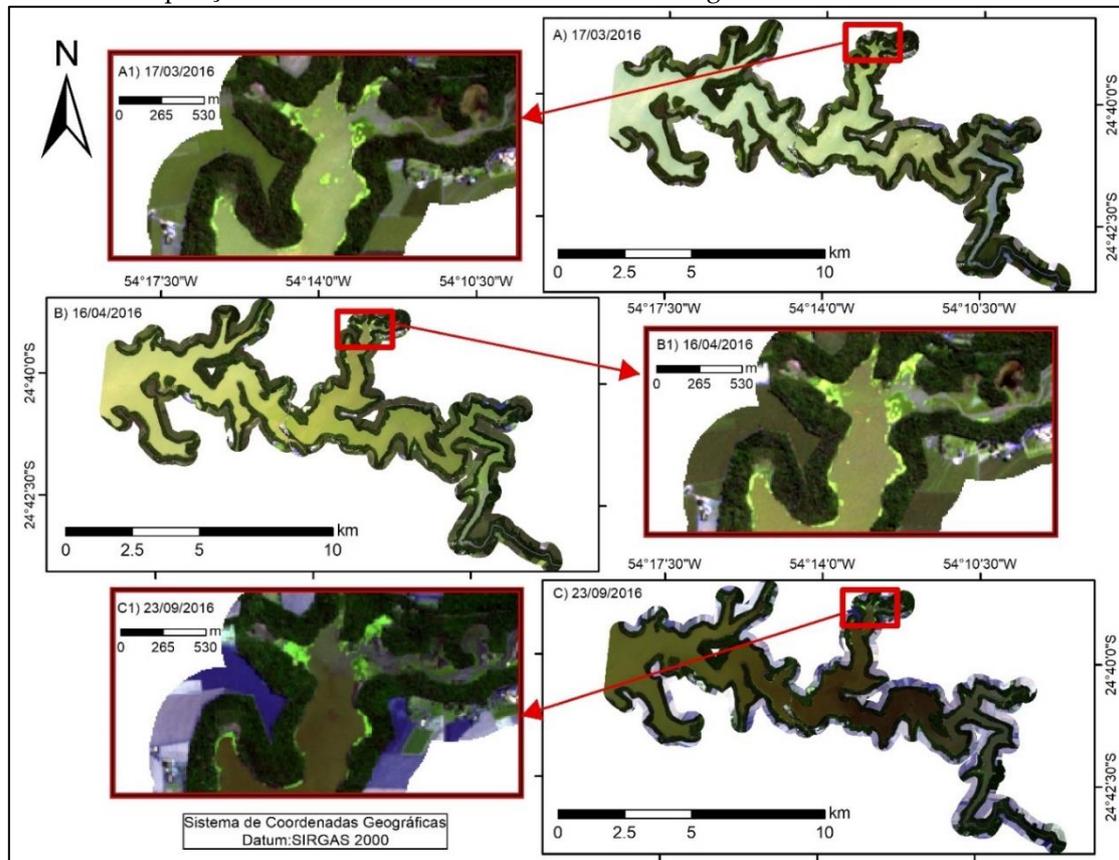
3 Resultado e Discussão

3.1 Imagens selecionadas e suas respectivas cotas

Como resultado da consulta realizada na base de dados da ESA, para o período estudado, foram encontradas imagens sem cobertura de nuvens nas datas de 23/09/2016, 16/04/2016 e 17/03/2016 (Figura 3), cujos valores de cota d'água, vazão vertida e vazão turbinada são mostrados na Tabela 4.

Analisando a série histórica dos dados do SAR (2017) pode-se ver que a cota do mês de setembro está 0,27% abaixo da cota de operação normal da usina (Cota baixa) e a de março 0,14% maior (Cota alta), sendo que a data de abril corresponde a cota média de operação do reservatório (Cota média). A vazão turbinada foi de 17,63%, 32,24% e 24,50%, ambas maiores que a média nos meses de setembro, abril e março respectivamente. Os níveis de vazão vertida foram nulos nos meses de setembro e abril, diferentemente do mês de março que apresentou valores para esta variável 72,03% maiores que a média para a cota máxima de operação.

Figura 3 – Imagens selecionadas, na Composição de bandas RGB234. Onde os quadros A1, B1 e C1 são ampliações do local de estudo em uma área com grande ocorrência de macrófitas.



Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 4– Variáveis hidrológicas na data da imagem.

Data	Cota d'água (m)	Vazão vertida (m ³ /s)	Vazão turbinada (m ³ /s)
17/03/2016	220,30	4241	12.013
16/04/2016	220,00	0	12.759
23/09/2016	219,14	0	11.350

Fonte: SAR (2017).

3.2 Melhor conjunto de dados e melhor algoritmo classificador

A Tabela 5 apresenta os resultados do coeficiente Kappa e do índice de exatidão global para as bandas e classificadores testados. Nela pode-se observar que o melhor classificador foi o Máxima verossimilhança com um coeficiente de 0,884 para as bandas 2, 3, 4, 8. Os dados de entrada que continham as bandas e os índices de vegetação atingiram valores muito

próximos daqueles com somente as bandas. Por outro lado, o classificador Distância Mínima apresentou melhora quando composto pelas bandas e índices, porém, ainda inferior ao Máxima verossimilhança somente com as bandas.

Contudo foi escolhido como padrão para a classificação das demais imagens, o conjunto de dados com as bandas 2, 3, 4, 8 e o classificador Máxima verossimilhança.

Tabela 5-- Coeficiente Kappa da classificação da imagem de 23/09/2016.

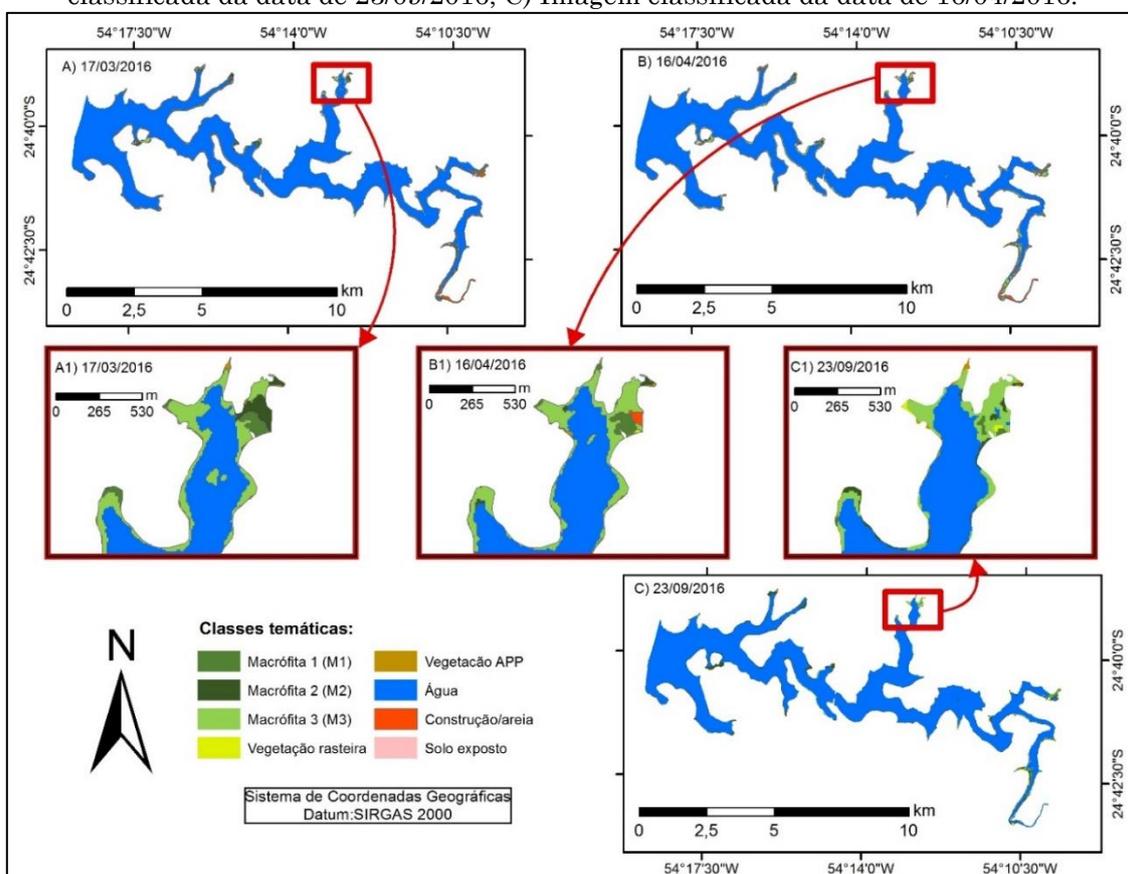
Conjunto dados de entrada	Algoritmo classificador	Coeficiente Kappa	Concordância segundo Landis e Koch (1977, p. 165)	Exatidão Global
2, 3, 4 e 8	Máxima verossimilhança	0,884	Excelente	0,916
2, 3, 4, 8, NDVI, NDWI	Máxima verossimilhança	0,878	Excelente	0,912
2, 3, 4 e 8	Distância mínima	0,814	Excelente	0,869
2, 3, 4, 8, NDVI, NDWI	Distância mínima	0,882	Excelente	0,916

Fonte: elaborada pelo autor

3.3 Análise temporal

Os resultados das análises das imagens deram origem a mapas temáticos, por meio dos quais foram identificadas alterações nas áreas de ocorrência das macrófitas no reservatório de ITAIPU (Figura 4). Acredita-se que essas alterações ocorreram devido aos deslocamentos dos estandes das mesmas para áreas menos protegidas do vento, da correnteza e da redução dos níveis de água ocasionando a morte ou crescimento de alguns exemplares. Guasselli, (2005), Zoffoli, et al. (2008) e Rosa et al. (2017) relatam dificuldades na identificação de macrófitas quando se tem o aumento dos níveis d'água, em imagens dos sensores TM e ETM, devido a confusão na resposta espectral dos pixels, ocasionada pela mistura entre água e macrófitas. No entanto, esta constatação não foi verificada nesta mesma condição, fato que pode estar relacionada a melhor resolução espacial do MSI.

Figura 4 – Classes temáticas. A) Imagem classificada da data de 17/03/2016; B) Imagem classificada da data de 23/09/2016; C) Imagem classificada da data de 16/04/2016.

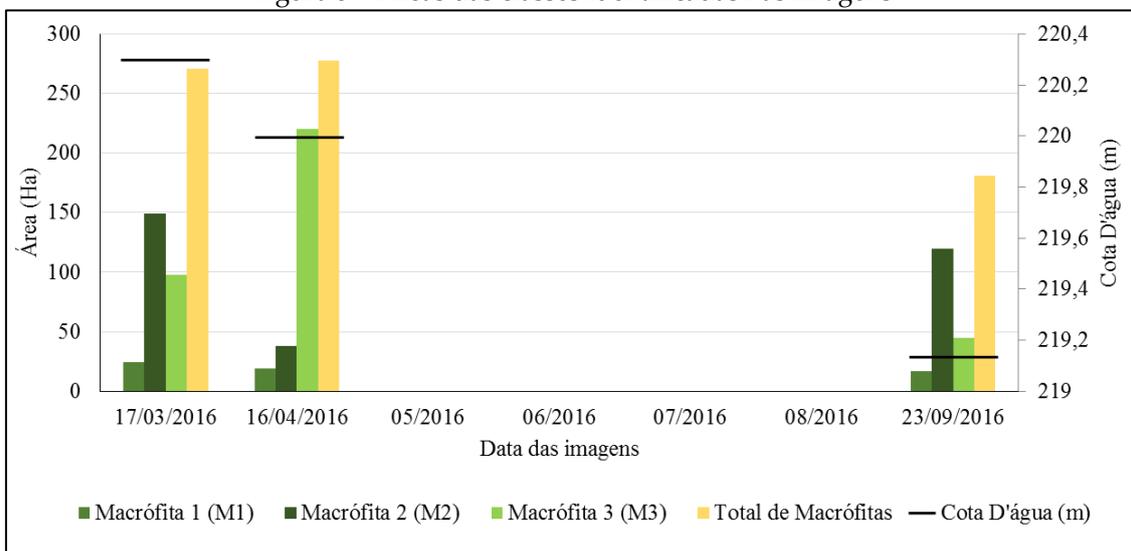


Fonte: elaborada pelo autor

Durante o período de estudo, considerando as áreas totais de macrófitas, foi detectado aumento de 6 ha de março até abril, período no qual o SFV passou da cota alta para média. Considerando as ocorrências das macrófitas de abril até setembro, cota média para cota baixa, ocorreram reduções de 96,14 ha (Figura 5). Entre a cota alta e baixa (março até setembro) foi constatada redução na área de ocorrência de macrófitas no SFV de 89,94 ha.

A classe M1 mostrou-se menos suscetível a mudança na sua área de ocorrência no período avaliado. Nesta classe houve a redução de aproximadamente 5 ha entre março e abril e 2 ha de abril a setembro. Sendo que entre março e setembro foi detectada redução de apenas 7 ha em sua área de ocorrência.

Figura 5 – Áreas das classes identificadas nas imagens



Fonte: elaborada pelo autor

As macrófitas flutuantes, aqui denominadas de M2 e M3, mostraram um padrão diferenciado quando comparado com a M1 (emersa). Com o estabelecimento da cota média no reservatório, de março para abril, a área de ocorrência da M2 diminuiu 111,37 ha, enquanto que neste mesmo período a M3 aumentou 112,57 ha. Este quadro registra que a M2 é favorecida na condição de cotas mais altas e a M3, pelo contrário, é beneficiada com a manutenção da cota média. Considerando o outro momento, no qual se tem a cota baixa, as macrófitas flutuantes têm respostas opostas, pois, nesse ambiente a M3 foi mais afetada, tendo sua área de ocorrência reduzida (175 ha). Já a M2 aumentou em área de ocorrência (81,87 ha).

Conforme estudo realizado no Taylor Slough, no parque nacional do Everglads na Florida-Estados Unidos, níveis de água mais elevados ocasionam redução da vegetação aquática (SAH et al., 2013). Situação contrária ocorreu no compartimento aquático SFV, pois as reduções nas áreas de ocorrência da vegetação aquática foram mais significativas quando se tem o rebaixamento do nível da água. No entanto, ressalta-se que o cenário encontrado no SFV difere daquele encontrado em Everglads, onde se tem

hidroperíodos (variações de cota d'água) mais bem definidos. Para melhor comparação deste quadro recomenda-se análise temporal mais robusta.

As alterações aqui observadas fornecem indícios de que apesar de se tratar de uma área de alagado de uma usina hidrelétrica, a região tem características peculiares de um ecossistema de área úmida que segundo Carvalho (2007) tem solo saturado e rico em matéria orgânica de origem vegetal, que resulta em um ambiente de alta biodiversidade, colonizado por uma biota também particular, adaptada morfológica e fisiologicamente ao hidroperíodo (variações de cota d'água) do sistema

4 Conclusões

Ambos os algoritmos classificadores apresentaram alto desempenho, com destaque para o classificador Máxima Verossimilhança que apresentou o maior valor de coeficiente Kappa com o uso somente das bandas espectrais. O conjunto com as bandas 2, 3, 4, 8, NDVI, NDWI apresentou melhores resultados quando submetido à análise pelo algoritmo classificador Distância mínima.

Estes resultados dão indícios da possibilidade de distinguir tipos de macrófitas com altos contrastes de tons de verde. Entre os bancos de macrófitas flutuantes as espécies representadas pela classe M3 são mais suscetíveis as alterações no regime hidrológico de Itaipu, pois apresentaram maior variação em área de ocorrência no período analisado. Conforme esperado, poucas diferenças na área de ocorrência da classe M1 foram constatadas, devido a sua condição emersas enraizadas, as quais dependem menos dos nutrientes disponíveis na água.

Ressalta-se ainda, que entre as classes consideradas de maior representatividade flutuante, a M3 foi mais vulnerável ao rebaixamento das cotas e a M2 mostrou-se mais adaptável as mudanças de cota, sendo favorecida na condição de cota alta e menos impactada em cota baixa. No

cenário com cota d'água média a classe M3 foi a mais representativa no local. Entretanto, estes fatos devem ser melhores analisados em trabalhos futuros.

De modo geral conclui-se que o sensor MSI do Sentinel-2 é válido no monitoramento da distribuição das macrófitas aquáticas na região de estudo. Entretanto, uma limitação para seu uso foi a baixa disponibilidade de imagens do local de estudo, sendo que dos 6 meses de monitoramento foram encontradas apenas 3 imagens sem presença de nuvens. Acredita-se, ainda, que a detecção de macrófitas aquáticas pode ser mais eficiente com a utilização de sensores de igual ou melhor resolução espacial e espectral.

Agradecimentos

Os autores agradecem a ITAIPU Binacional, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processo 310758/2016-5 a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001, pelo fomento ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ANTUNES, C.; CORREIA O.; SILVA, J. M.; CRUCES, A.; FREITAS, M. C.; BRANQUINHO, C. Factors involved in spatiotemporal dynamics of submerged macrophytes in a Portuguese coastal lagoon under Mediterranean climate. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 110, 2012. pp. 93–100.
- ANTUNES, A. F. B. **Uso do Processamento Digital de Imagens na Segmentação de Tipologias Vegetais na APA de Guaraqueçaba-PR.** Dissertação de Mestrado, Curitiba: Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná. 1996. 119p.
- AGOSTINHO, A. A.; THOMAZ, S. M.; MINETE-VERA, C. V.; WINEMILLER, K. O. Biodiversity in the high Paraná River floodplain. **Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation**, v. 1. 2000. pp. 89-118.

- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. 332p.
- BENASSI, S. F.; MACIEL, J. N.; BENASSI, R. F. Trajetória do Programa de Monitoramento Limnológico do Reservatório da UHE ITAIPU. **Boletim ABLimno**, v. 38, n. 2, 2010. Site: <[http://www.ablimno.org.br/publiBoletim.php?issue=bol_38\(2\)](http://www.ablimno.org.br/publiBoletim.php?issue=bol_38(2))>. Acessado em outubro de 2017.
- CANZI, C.; FIALHO, N. S.; BUENO, G. W. Monitoramento e ocorrência do mexilhão dourado (*limnoperna fortunei*) na hidrelétrica da Itaipu binacional, Paraná (BR). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 5, n. 2, 2014. pp. 117-122.
- CARVALHO, T. M.; CARVALHO, C. M. Sistemas de informações geográficas aplicadas à descrição de habitats. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**. Maringá, v. 34, n. 1, 2012. pp. 79-90.
- CHAVEZ JR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, 1988, pp. 459-479.
- CHUVIECO, E. **Tratamiento digital de imágenes: II**. generación de información temática. In: Fundamentos de Teledetección espacial 3º ed revisada. RIALP, 1996. pp. 319-464.
- COSTA, M. P. F; AHERN, F.J; NOVO, E. M. L. M.; PIETSCH, R. W.; NOERNBERG, M. A. Efeitos dos dados de multipolarização SAR-C aero-transportado na separabilidade do retroespalhamento de plantas aquáticas do reservatório de Tucuruí – Amazônia. **Anais do 8º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Salvador, Brasil, INPE, 1996. pp. 107-113.
- CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation**. 2016. Site: < https://www.researchgate.net/publication/307593091_Semi-Automatic_Classification_Plugin_Documentation_Release_5361?channel=doi&linkId=57cb03bd08ae3ac722b1ec30&showFulltext=true> Acessado em janeiro de 2016.
- ESA (European Space Agency). Sentinels Scientific Data Hub. Site:<<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>>. Acessado em maio de 2017.

- European Space Agency (ESA). **Sentinel-2, User Handbook**. 2015. Site: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xslst4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook>. Acessado em fevereiro de 2017.
- FINLAYSON, C. M. Plant Ecology of Australia's Tropical Floodplain Wetlands: A Review. **Annals of Botany**, v. 96, n. 4, 2005. pp. 541–555.
- FRAGAL, E. H.; ALVES, F. C.; FILHO E. E. DE S. A Influência do nível fluviométrico sobre as variações de área de água e da cobertura vegetal na planície do alto rio paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.3, 2012. pp. 299-310.
- FREEDMAN, B.; LACOUL, P. Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. **Environmental Review**, v. 14, n. 2, 2006. pp. 89-136.
- FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ. **Nupélia/Itaipu Binacional Estudos das macrófitas no reservatório de Itaipu: relatório (5a etapa: 2003-2005)**. Maringá, 106 p., il. Relatório técnico – Apoio Itaipu Binacional. 2005.
- GASTAL JR, C. V. S.; IRGANG, B. E.; MOREIRA, C. Problemas com infestação de macrófitas aquáticas na área de influência da usina hidrelétrica de itá. **ACTA SCIENTIAE**, v. 5, n. 1, 2003, pp. 87-92.
- GATTI, A.; BERTOLINI, A. **Sentinel-2 Products Specification Document**. European Space Agency. 2015. Site: <<https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2-Product-specificationsDocument>>. Acessado em abril de 2018.
- GUASSELLI, L. A. **Dinâmica da Vegetação no Banhado do Taim, RS**. 2005. 157 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- HAN, X.; Feng, L.; Huc, C.; Chena, X. Wetland changes of China's largest freshwater lake and their linkage with the Three Gorges Dam. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, 2018. pp. 799–811.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, 2018. Site: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acessado em abril de 2018.

- ITAIPU. Itaipu em números. Site < <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/itaipu-em-numeros>>. Acessado em abril de 2017.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo demográfico 2010**. Site: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acessado em março de 2017.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: Uma perspectiva e recursos terrestres; Tradução José Carlos Neves Epiphany et al. – São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.
- LANDIS, J.; KOCH, G. G. The measurements of agreement for categorical data. **Biometrics**, Washington, v. 33, n. 3, 1977. pp. 159-179.
- LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICENTE, L. E.; TORRESAN, F. E.; VICTORIA, D.; BOLFE, É. L. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation. **Anais do 16º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2013. pp. 364-370.
- MESQUITA, F. D. O.; ALVES, A. D. S.; MALHEIROS, S. M. M.; SILVA, P. C. M. D.; SANTOS, W. D. O.; & BATISTA, R. O. Uso do Sensoriamento Remoto Para Avaliação da Distribuição Espacial e Quantificação de Macrófitas na Barragem Umari–Upanema, RN. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, n. 2, 2013. pp. 102-109.
- MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 7, 1996. pp. 1425-1432.
- OYAMA, Y.; MATSUSHITA, B.; FUKUSHIMA, T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 157, 2015. pp. 35–47.
- PAHLEVAN, N.; SARKAR, S.; FRANZ, B. A.; BALASUBRAMANIAN, S. V.; HE, J. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. **Remote Sensing of Environment**, v. 201, p. 47–56, 2017. Site: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717303991>>. Acessado em abril de 2018.
- RICHARDS, J. A.; JIA X. **Remote Sensing Digital Image Analysis**: An Introduction. Berlin, Germany: Springer, 2006.

- ROSA, C. N.; TASSI, R.; PICCILLI, G. G. A.; PEREIRA FILHO, W.; FAVARETTO, J. R.; FONTOURA, J. R. Identificação do padrão de distribuição de macrófitas aquáticas emergentes no banhado do taim-rs-brasil, frente a diferentes condições hidrológicas. **Geociências**, v. 36, n. 4, p. 771–784, 2017. Site: <https://www.researchgate.net/publication/322643620_IDENTIFICACAO_DO_PADRAO_DE_DISTRIBUICAO_DE_MACROFITAS_AQUATICAS_EMERGENTES_NO_BANHADO_DO_TAIM-RS-BRASIL_FRENTE_A_DIFERENTES_CONDICOES_HIDROLOGICAS> Acessado em abril de 2018.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. In: Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium, 3, 1973. Proceedings. Washington, v.1, 1973. pp. 309 – 317.
- SAH, J. P.; ROSS, M. S.; SAHA, S.; MINCHIN, P.; SADLE, J. Trajectories of vegetation response to water management in Taylor Slough, Everglades National Park, Florida. **Wetlands**, v. 34, n. 1, 2013. pp. 65-79.
- SAR (Sistema de Acompanhamento de Reservatórios). Site <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoSIN>>. Acessado em janeiro de 2017.
- SILVA, T. S. F.; COSTA, M. P. F.; MELACK, J.; MORAES NOVO, E. M. L. Influência de variações na intensidade do pulso de inundação sobre a cobertura e crescimento da vegetação herbácea aquática na Amazônia. **Anais do 15º Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, PR, Brasil. v. 1, 2011. pp. 3205-3212.
- THOMAZ, S. M.; ESTEVES, F. de A. Comunidades de Macrófitas aquáticas. In: ESTEVES, F. A. (Coord.). **Fundamentos de Limnologia**. Rio de Janeiro: Intercedencia, v. 3, 2011. pp. 461–521.
- VILLA, P.; BRESCIANI, M. BOLPAGNI, R.; PINARDI, M.; GIARDINO, C. A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, 2015. pp. 218–233.
- ZOFFOLI, M. L.; KANDUS, P.; MADANES, N.; CALVO, D. H. Seasonal and interannual analysis of wetlands in South America using NOAA-AVHRR

NDVI time series: the case of the Parana Delta Region. **Landscape Ecology**, v. 23, n. 7, 2008. pp. 833-848.