

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
COLÉGIO POLITÉCNICO DA UFSM  
ESPECIALIZAÇÃO EM GEOMÁTICA

Cristiano Niederauer da Rosa

**ÍNDICE DE VEGETAÇÃO APLICADO NO MAPEAMENTO DAS  
MACRÓFITAS AQUÁTICAS DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU**

Santa Maria, RS  
2018

**Cristiano Niederauer da Rosa**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO APLICADOS NO MAPEAMENTO DAS MACRÓFITAS  
AQUÁTICAS DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU**

Monografia apresentada ao Curso de especialização em Geomática, do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Especialista em Geomática**.

Orientador: Prof. Dr. Waterloo Pereira Filho

Santa Maria, RS  
2018

Cristiano Niederauer da Rosa

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO APLICADOS NO MAPEAMENTO DAS MACRÓFITAS  
AQUÁTICAS DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU**

Monografia apresentada ao Curso de especialização em Geomática, do Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Geomática.

**Aprovado em 23 de Agosto de 2018:**



---

**Waterloo Pereira Filho, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)



---

**Ulisses Franz Bremer, Dr. (UFRGS)**



---

**Giseli Kramer. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2018

## RESUMO

### ÍNDICE DE VEGETAÇÃO APLICADO NO MAPEAMENTO DAS MACRÓFITAS AQUÁTICAS DO RESERVATÓRIO DE ITAIPU

AUTOR: Cristiano Niederauer da Rosa  
ORIENTADORA: Dr. Waterloo Pereira Filho

Algumas espécies de macrófitas são favorecidas por alterações ambientais ou desequilíbrios no corpo hídrico, fazendo com que algumas destas formem densas populações em detrimento de outras, reduzindo a biodiversidade e causando problemas para os usos da água no local. Devido a importância de estudos ecológicos aplicados para melhor compreender a dinâmica temporal da comunidade de macrófitas aquáticas. O presente trabalho tem como objetivo analisar a distribuição das macrófitas aquáticas do reservatório de ITAIPU, a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) e geoprocessamento, com o emprego de limiares aos valores de reflectância da banda do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em uma série temporal de imagens do sensor OLI do Landsat 8. Os resultados do mapeamento revelaram uma acurácia global de 0,87 com índices Kappa em torno dos 0,73, considerando as seguintes classes e limiares: água ( $NDVI < 0,10$  e  $SWIR < 0,08$ ); Solo Exposto ( $0,10 \leq NDVI < 0,20$ ); Macrófitas A ( $0,20 \leq NDVI < 0,75$ ); (Macrófitas B  $NDVI \geq 0,75$ ). As macrófitas apresentaram menor área de ocorrência na presença de cotas d'água acima dos 220 m (34,28 km<sup>2</sup>). O contrário ocorreu na presença de cotas mais baixas, nas quais foi detectada a ocorrência das mesmas em uma área de 126,47 km<sup>2</sup>. Deste modo conclui-se que as técnicas de SR e geoprocessamento, empregadas, mostraram-se uma ferramenta eficaz no mapeamento das macrófitas, demonstrando indicativos de que níveis d'água acima de 220 metros causam maior impacto na distribuição das macrófitas aquáticas do reservatório de ITAIPU.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto, macrófitas aquáticas, ITAIPU, SIG.

## ABSTRACT

### VEGETATION INDEX APPLIED IN THE MAPPING OF ITAIPU'S RESERVOIR AQUATIC MACROPHITES

AUTHOR: Cristiano Niederauer da Rosa  
ADVISOR: Dr. Waterloo Pereira Filho

Some species of macrophytes are favored by environmental changes or imbalances in the water body, causing some of them to form dense populations to the detriment of others, reducing biodiversity and causing problems for local water uses. Due to the importance of ecological studies applied to better understand the temporal dynamics of the community of aquatic macrophytes. The present work aims to analyze the distribution of the aquatic macrophytes of the ITAIPU reservoir, using Remote Sensing (SR) and geoprocessing techniques, using threshold values for the SWIR reflectance values and of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in a time series of Landsat 8 OLI sensor images. The mapping results showed an overall accuracy of 0.87 with Kappa indices around 0.73, considering the following classes and thresholds: water (NDVI <0.10 and SWIR <0,08); Only exposed ( $0.10 \leq \text{NDVI} < 0.20$ ); Macrophytes A ( $0.20 \leq \text{NDVI} < 0.75$ ); (Macrophytes B NDVI  $\geq 0.75$ ). The macrophytes presented smaller area of occurrence in the presence of water levels above 220 m (34.28 km<sup>2</sup>). On the contrary, in the presence of lower levels, the occurrence of the same in an area of 126.47 km<sup>2</sup> was detected. In this way, it was concluded that the techniques of SR and geoprocessing, used, have proved to be an effective tool in the mapping of macrophytes capable of assisting in the management of local biodiversity.

**Keywords:** Remote sensing, Aquatic macrophytes, GIS, ITAIPU.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Referência dos valores do índice Kappa. ....	19
Tabela 2 - Resultado da álgebra de mapas aplicadas na equação 2 .....	22

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização .....	15
Figura 2 – Data de aquisição das Imagens LANDSAT-8 com suas respectivas cotas d'água.....	20
Figura 3 – Fotos da visita a campo no dia 28/09/2016; .....	23
Figura 4 - Fotos da visita a campo no dia 22/02/2018; .....	23
Figura 5 - Resultado da metodologia proposta em imagem com ocorrência de floração de algas. A) imagem OLI de 18/05/14; B) Imagem resultante do mapeamento de macrófitas com a aplicação da banda do SWIR para distinção entre áreas de macrófitas e floração de algas.....	24
Figura 6 - Comparativo entre o resultado da delimitação das áreas de ocorrência das macrófitas com a imagem do sobrevoo realizado com VANT no dia 28/09/2016. A) imagem do sobrevoo; B) Resultado da metodologia de mapeamento. ....	25
Figura 7 - Comparativo entre o resultado da delimitação das áreas de ocorrência das macrófitas com a imagem do sobrevoo realizado com o VANT no dia 22/02/2018. A1) imagem do sobrevoo 1; A2) Resultado da metodologia de mapeamento aplicada na região do sobrevoo 1; B1) imagem do sobrevoo 2; B2) Resultado da metodologia de mapeamento das macrófitas aplicada na região do sobrevoo 2.....	26
Figura 8 – Áreas de ocorrência das classes temáticas, conforme os limiares utilizados na classificação do NDVI;.....	27
Figura 9 – Detalhamento do mapeamento realizado com a classificação do NDVI no compartimento aquático do Rio São Francisco Verdadeiro no reservatório de ITAIPU.....	28
Figura 10 – Correlação de Pearson entre as classes mapeadas e o nível de cota d'água.....	29

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>IR</b>	<i>Infrared</i>
<b>NDVI</b>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>SR</b>	Sensoriamento Remoto
<b>SAR</b>	Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
<b>SWIR</b>	Infravermelho de Ondas Curtas



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL.....	11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>12</b>
2.1 TIPOS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	12
2.2 DINÂMICA DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	12
2.3 SENSORIAMENTO REMOTO (SR) DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS.....	13
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	15
3.2 PROCESSAMENTO DA BASE DE DADOS.....	16
3.3 MAPEAMENTO DE MACRÓFITAS COM O USO DO NDVI E DA BANDA DO INFRAVERMELHO DE ONDAS CURTAS.....	17
3.4 ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>20</b>
4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS LIMIARES APLICADOS NO NDVI e No SWIR PARA O MAPEAMENTO DAS MACRÓFITAS.....	21
4.2 ACURÁCIA DO MAPEAMENTO.....	22
4.3 ANÁLISE TEMPORAL DA OCORRÊNCIA DE MACRÓFITAS.....	27
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Macrófitas aquáticas contribuem para o aumento da heterogeneidade estrutural de habitats devido a sua alta capacidade adaptativa e amplitude ecológica, possibilitando que as mesmas colonizem diversos tipos de ambientes (AGOSTINHO; THOMAZ, 2000). Além disso, as macrófitas prestam um importante serviço ao meio ambiente, contribuindo na ciclagem e estocagem de nutrientes, que propiciam a permanência de organismos aquáticos utilizados na oxigenação da água (THOMAZ; ESTEVES, 2011). Entretanto, por vezes, tem-se uma superpopulação de algumas destas plantas, favorecidas por alterações ambientais ou desequilíbrios no corpo hídrico, que por sua vez traz prejuízos como: à produção de peixes, captura do pescado, redução da capacidade de armazenamento, tempo de vida útil de reservatórios, interferência na produção de energia elétrica; passando a partir de então a exigir métodos de monitoramento e controle (GASTAL JR; IRGANG; MOREIRA, 2003).

Neste contexto, Mormul et al. (2015) ressalta que estudos ecológicos aplicados para melhor compreender a dinâmica temporal da comunidade de macrófitas aquáticas podem ajudar a melhorar futuras propostas de gestão da biodiversidade (MORMUL et al., 2015). Entretanto, o monitoramento das macrófitas normalmente é restrita a amostragem de campo, cuja execução é difícil (SILVA; COSTA; MELACK, 2010). Devido a isso, as técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) são uma alternativa interessante para a realização do monitoramento das macrófitas, aplicada eficazmente em ambientes dominados por macrófitas (SILVA; COSTA; MELACK, 2010; ZHAO et al., 2013; OYAMA; MATSUSHITA; FUKUSHIMA, 2015; VILLA et al., 2015; ROSA et al., 2017).

Com o emprego de técnicas de SR Oyama et al. (2015) e Villa et al. (2015) encontraram bons resultados no monitoramento de macrófitas, com o uso de índices de vegetação obtidos a partir de SR, otimizados para a detecção de vegetação aquática (macrófitas), em bandas espectrais de sensores com resolução média como a do Landsat.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a distribuição das macrófitas aquáticas do reservatório de ITAIPU, a partir da aplicação de limiares aos valores de reflectância na banda do SWIR e no NDVI. Em uma série temporal de imagens do sensor OLI do Landsat 8 definido pelo período de janeiro de 2013 até fevereiro de 2018.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as áreas de ocorrência de macrófitas aquáticas no reservatório de Itaipu por meio de imagens do sensor OLI do landsat 8;
- Avaliar a dinâmica temporal das macrófitas aquáticas no reservatório de Itaipu.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 TIPOS DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

As macrófitas aquáticas são vegetais que habitam ambientes com variados níveis de água, desde brejos até locais verdadeiramente aquáticos. Devido a isso, locais com excelentes condições para o crescimento de macrófitas aquáticas são, em definição mais generalista, classificados como Áreas úmidas (MALTCHIK et al., 2010; POTT et al., 2012; THOMAZ e ESTEVES, 2011)

Devido a diversidade de características filogenéticas e taxonômica das macrófitas é mais simples classifica-las quanto ao seu biótopo. Essa classificação reflete uma distribuição variável e dependente da capacidade de adaptação de cada macrófita ao meio aquático. Sendo assim, os principais grupos ecológicos de macrófitas são classificados como: emersas, flutuantes, submersas enraizadas, submersas livres e com folhas flutuantes (THOMAZ e ESTEVES, 2011).

As macrófitas emergentes tem suas raízes embaixo da água com a grande maioria de sua parte basal (caule e folhas) acima da superfície da água. Seu processo de reprodução acontece acima da água, sendo o sistema radicular sua única fonte de nutrientes; as flutuantes se desenvolvem livremente no espelho d'água retirando seus nutrientes diretamente da coluna d'água; As submersas são plantas enraizadas que crescem e vivem submersas na água, são subdivididas ainda em submersas livres, que são plantas com raízes pouco desenvolvidas e que flutuam submersas em águas tranquilas e, aquelas com folhas flutuantes, que embora sejam enraizadas possuem folhas flutuando na lâmina d'água (CRONK; FENNESSY, 2001; THOMAZ; ESTEVES, 2011).

### 2.2 DINÂMICA DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

O crescimento e desenvolvimento das espécies no habitat aquático está condicionado às características químicas e físicas do corpo d'água. Pois o nível da água e as propriedades do escoamento têm alta influência no desenvolvimento das macrófitas, sendo relacionados com a redução na disponibilidade de oxigênio, nutrientes, alteração da textura e composição do substrato, pressão mecânica na

estrutura das plantas, e até redução da disponibilidade de luz para as espécies submersas. Essas variações ocasionadas no habitat aquático comprometem a sobrevivência da vegetação (TASSI, 2008).

Mais especificamente, Conticello et al. (2002) e Teixeira (2013) relatam que alterações no regime hidrológico de compartimentos aquáticos causam predominância de algumas espécies de macrófitas que, por sua vez, trazem a redução de outras, diminuindo a variabilidade de habitats. Fato semelhante é constatado por Foti et al. (2013), no Parque Nacional Everglades - Estados Unidos, onde mudanças extremas nos períodos de flutuação da água ocasionaram graves perdas na flora nativa do Parque. Nesse sentido, Zohary e Ostrovsky (2011) alertam que alterações extremas nos níveis d'água modificam a fisiologia de algumas espécies de macrófitas, refletindo na perda da biodiversidade local.

Dada a relevância que alterações ambientais causam nas comunidades de macrófitas, é importante que se tenha um amplo conhecimento de como as macrófitas responde a tais alterações. Sendo o estudo da dinâmica das macrófitas o responsável por produzir informações úteis para a compreensão de como se dá seu desenvolvimento no corpo aquático, auxilia a melhorar futuras propostas de manejo e proteção da biodiversidade (MORMUL et al., 2015).

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO (SR) DE MACRÓFITAS AQUÁTICAS

O SR apresenta-se como importante ferramenta no mapeamento e acompanhamento do estado da vegetação (CARVALHO; CARVALHO, 2012). Seus produtos possibilitam uma melhor gestão dos recursos hídricos, aprimorando a identificação de áreas hídricas sob processos de eutrofização, avaliação de clorofila e avaliação e quantificação de áreas de ocorrência de macrófitas em corpos hídricos (BABAN, 1999). Esta ferramenta proporciona maior agilidade no mapeamento devido a utilização de sofisticados sensores, que captam e quantificam a energia eletromagnética que emana de um objeto ou área geográfica remotamente (JENSEN, 2009).

Com a utilização do SR Silva et al. (2010), Ward et al. (2014) e Rosa et al. (2017) avaliaram a dinâmica da vegetação em ambientes de áreas úmidas, ambos autores identificaram melhora expressiva na compreensão das dinâmica destes

ambientes. Neste contexto, Oyama et al. (2015) Zhao et al., (2013) propõem métodos de mapeamento de macrófitas aquáticas com a utilização de índices vegetativos, provenientes da integração de duas ou mais bandas espectrais, que visam o realce das variações de densidade da cobertura vegetal em relação a outros tipos de cobertura (PONZONI, 2001).

O SR é um importante aliado no monitoramento das macrófitas. Sendo aplicados na identificação de problemas relacionados a cheias ou secas anormais ao ciclo d'água no ambiente (ESQUERDO; ANTUNES, 2010). Esse fato, otimiza a utilização de recursos pessoais e financeiros, melhorando também as regras de gerenciamento dos ecossistemas.

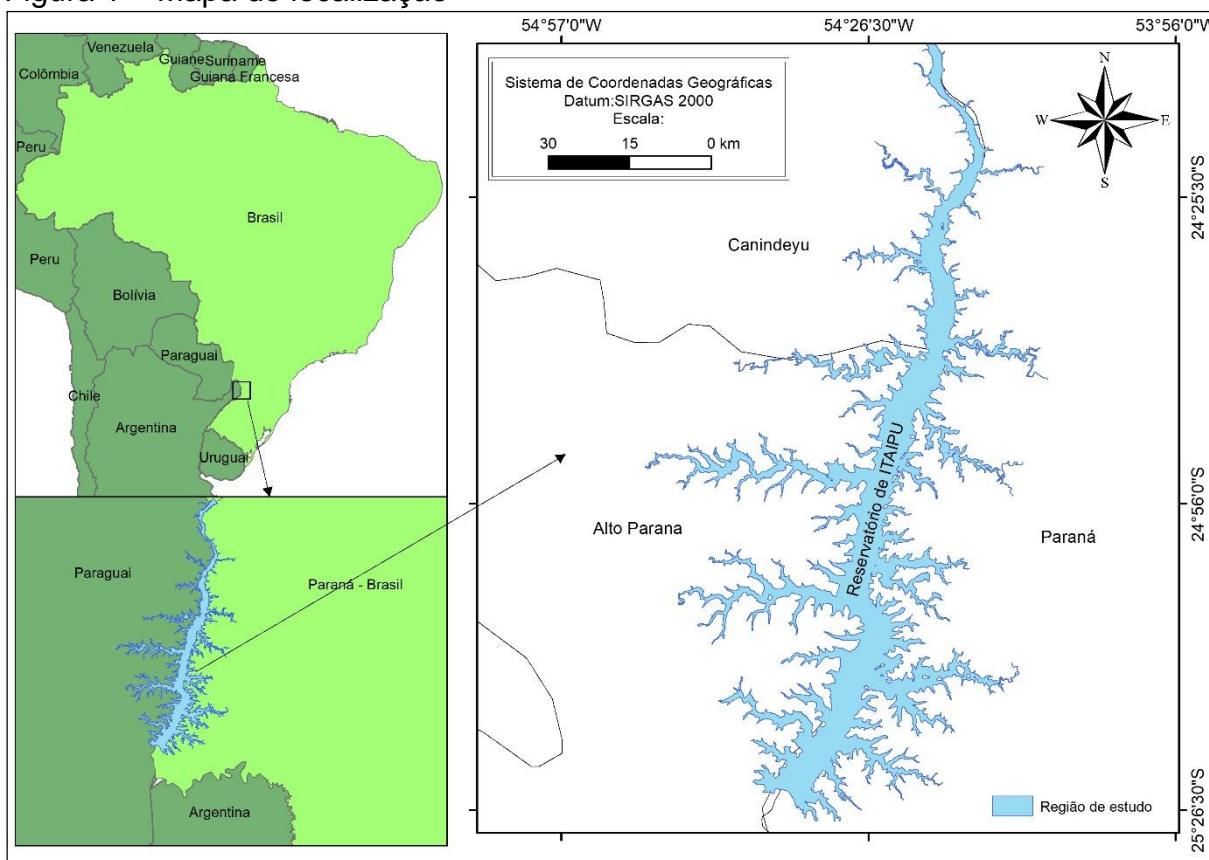
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

O reservatório de ITAIPU é o sétimo maior do Brasil. Possui o melhor índice de aproveitamento de água para produzir energia, com índice de produção de 10,4 MW por km<sup>2</sup> (ou seja, a cada 0,1 km<sup>2</sup> de área alagada pode gerar 1 MW) (ITAIPU, 2017). Sendo inclusive agraciada com o título de maior geradora de energia elétrica limpa e renovável do planeta, com a marca de 103 milhões de MWh, em 2016 (BRASIL, 2017).

Fica localizado na bacia hidrográfica do rio Paraná, oitavo maior rio do mundo em extensão (4.880 km) e o segundo maior da América do Sul, sua bacia abrange cerca de 10% do território Brasileiro. Esse reservatório tem 1350 km<sup>2</sup> de área inundada (ITAIPU, 2017) situada na fronteira do estado do Paraná, no Brasil, com os estados Alto Parana e Canindeyu, no Paraguai (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização



Fonte: Malha digital IBGE (2015)

A região pertence ao bioma mata atlântica, com predomínio da vegetação composta pela Floresta Estacional Semidecidual, cuja diversidade ecológica é grande. A presença de solos de qualidade faz com que a agricultura intensiva seja uma das principais atividades econômicas da bacia hidrográfica da região. Na qual se destacam as culturas de soja, milho e trigo, bem como, a presença da suinocultura, bovinocultura e avicultura (PEREIRA e SCROCCARO, 2010). Conforme dados do Instituto Agrônomo do Paraná (2016) o clima na região é temperado úmido com verão quente (cfa), com temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C e nos meses mais quentes acima dos 22°C, com maior concentração de precipitações pluviométricas no verão.

No local são encontrados diversos tipos de macrófitas aquáticas, principalmente nas zonas mais rasas de seus braços. Com destaque para as espécies *Hydrilla verticillata* e a *Urochloa arrecta* (previamente identificada como *Urochloa subquadripara* em Thomaz et al. (2009)), a primeira é uma espécie submersa enraizada que foi registrada pela primeira vez no rio Paraná em 2005 e chegou rapidamente ao reservatório de Itaipu (THOMAZ et al., 2009). Já a segunda tem causado problemas, especialmente ao acesso aos corpos aquáticos e à biodiversidade de macrófitas aquáticas nativas. Trata-se de uma gramínea também conhecida como capim-bengo, bastante desenvolvida em Itaipu.

Entretanto, destaca-se que a situação do reservatório frente a proliferação excessiva de macrófitas continua estável, sendo relatado apenas a emissão de um alerta aos técnicos de Itaipu em dezembro de 2009, referente a expansão de *H. verticillata* no interior do reservatório (THOMAZ, 2010).

### 3.2 PROCESSAMENTO DA BASE DE DADOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas imagens do sensor OLI do Landsat 8 em reflectância, Órbita/Ponto: 224/77, sem presença de nuvens, com resolução espacial de 30 metros e com os erros atmosféricos e geométricos já eliminados. As imagens foram obtidas do banco de dados do USGS (Global Visualization Viewer) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) para o período de Janeiro de 2013 a Fevereiro de 2018. A aquisição dos valores de cota d'água, nas respectivas imagens foi realizada por meio do site do Sistema de Acompanhamento de



Reservatórios, mantido pela Agência Nacional das Águas (“SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios”, 2018).

Mediante o conjunto de ferramentas do software ArcGIS© 10.3, as bandas do visível e infravermelho (2, 3, 4, 5, 6 e 7) de cada data foram inseridas na calculadora raster, na qual procedeu-se com a correção do sistema de coordenada e a divisão por 10.000, procedimento necessário para a conversão dos valores dos pixels para a escala de 0 a 1. Posteriormente, com o emprego da ferramenta *combine*, foi realizada uma composição multibanda para cada data, viabilizando a realização de diversas composições RGB (Red – Blue – Green), de modo a ressaltar e facilitar a identificação de diferentes alvos.

O limite de reservatório foi obtido a partir da delimitação manual da área de alague do reservatório, com base nas imagens disponibilizadas por meio do programa Google Earth. Essa delimitação foi utilizada como máscara para os recortes das bandas utilizadas no decorrer da pesquisa. Este procedimento reduz a probabilidade da identificação de áreas correspondentes a mata ciliar como região de ocorrência de macrófitas.

### 3.3 MAPEAMENTO DE MACRÓFITAS COM O USO DO NDVI E DA BANDA DO INFRAVERMELHO DE ONDAS CURTAS

O NDVI é frequentemente usado no SR (LEIVAS et al., 2013) por facilitar a modelagem de parâmetros biofísicos das plantas, como a área foliar, biomassa e porcentagem de cobertura do solo. Este procedimento utiliza a região do espectro eletromagnético do infravermelho, que pode fornecer importantes informações sobre a evapotranspiração das plantas (JENSEN, 2009).

Esse índice é dado pela diferença entre os níveis digitais da reflectânciadas bandas do Infravermelho (NIR) próximo e vermelho, devido ao contraste entre a baixa reflectânciada vegetação na banda do vermelho e alta reflectância na banda do IR próximo, e assim, demonstrar o vigor e a densidade da cobertura vegetal (ROUSE et al., 1973; CHUVIECO, 1996). Sumariamente, o NDVI é dado pela diferença entre as bandas supracitadas, normalizado pela soma de suas refletâncias nos dois comprimentos de onda, conforme equação 1.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

Sendo: NIR e RED as bandas espectrais 5 e 4 do satélite LANDSAT-8.

Nesse contexto, foi realizado o processo de classificação do NDVI para as imagens selecionadas, conforme os limiares descritos nos estudos de Demarchi et al. (2011), Zhao et al. (2013), Gandhi et al. (2015) e Oyama et al. (2015), ajustados a partir da determinação do comportamento médio dos valores de NDVI de acordo com a área de interesse; água e solo exposto. Similarmente, os limiares aplicados nas classes de macrófitas desse estudo seguiram a metodologia dos autores supracitados, somado a registros da resposta espectral de locais de ocorrência dessas plantas aquáticas nas imagens de 28/09/2016 e 22/02/2018.

A água em estado puro, apresenta pouca absorção da luz nas regiões azul e verde do espectro, aumentando gradativamente a partir da região do vermelho, e infravermelho (ESTEVEZ; BARBIERI, 2011; KIRK, 2011; NOVO, 2001). Desse modo, a banda do SWIR foi utilizada para eliminar áreas com florações de algas identificadas como macrófitas pelo limiar atribuído na classificação do NDVI. Isso ocorre devido a fluorescência de clorofila, encontrada em épocas de floração, ocasionar um máximo de reflectância para a região do verde e um aumento da energia refletida no vermelho, tornando o valor de NDVI da água semelhante ao da vegetação (DEKKER et al., 1993 e NOVO, 2001).

A partir disso foi realizada uma análise nos valores de reflectância das bandas do SWIR. E assim, a obtenção do valor de reflectância máxima de áreas com lâminas de água. Esse valor foi utilizado como o limiar de separação entre água e outros alvos, o qual originou uma imagem binária contendo áreas com presença de água (valor de pixel 0) e outros alvos (valor de pixel 1).

Concluídas as etapas de classificação do NDVI e do SWIR foi realizada uma álgebra de mapas, com o intuito de integrar a classificação do NDVI com a classificação das reflectâncias encontradas na banda do SWIR. Para isso, foi inserida na calculadora de campo a equação 2.

$$\text{OCM} = \text{CNDVI} \times \text{CSWIR} \quad (2)$$

Sendo: OCM imagem que contém a classificação final com as áreas de ocorrência das Macrófitas; CNDVI a classificação do NDVI; CSWIR a classificação binária da banda do SWIR.

### 3.4 ANÁLISE E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.

Com a finalidade de avaliar a eficácia da metodologia empregada foram utilizados os dados de visitas de campo realizadas nas datas das imagens de 28/09/2016 e 22/02/2018 para a validação dos resultados. Tais campos contemplaram amostragens de bancos de macrófitas com fotografias georreferenciadas, a partir de levantamentos com Veículo Aéreo não Tripulado (VANT) e coleta de pontos com GPS.

Para o cálculo do coeficiente de concordância Kappa (ANTUNES, 1996) fez-se uso das duas imagens de satélite Landsat 8, sem nuvens, com datas de aquisição mais próximas às visitas de campo e dos pontos amostrais dos bancos de macrófitas com área mínima de 900 m<sup>2</sup>. Os resultados foram comparados com a tabela de referência dos valores kappa proposta por Landis et al. (1977) (Tabela 1).

Tabela 1 - Referência dos 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

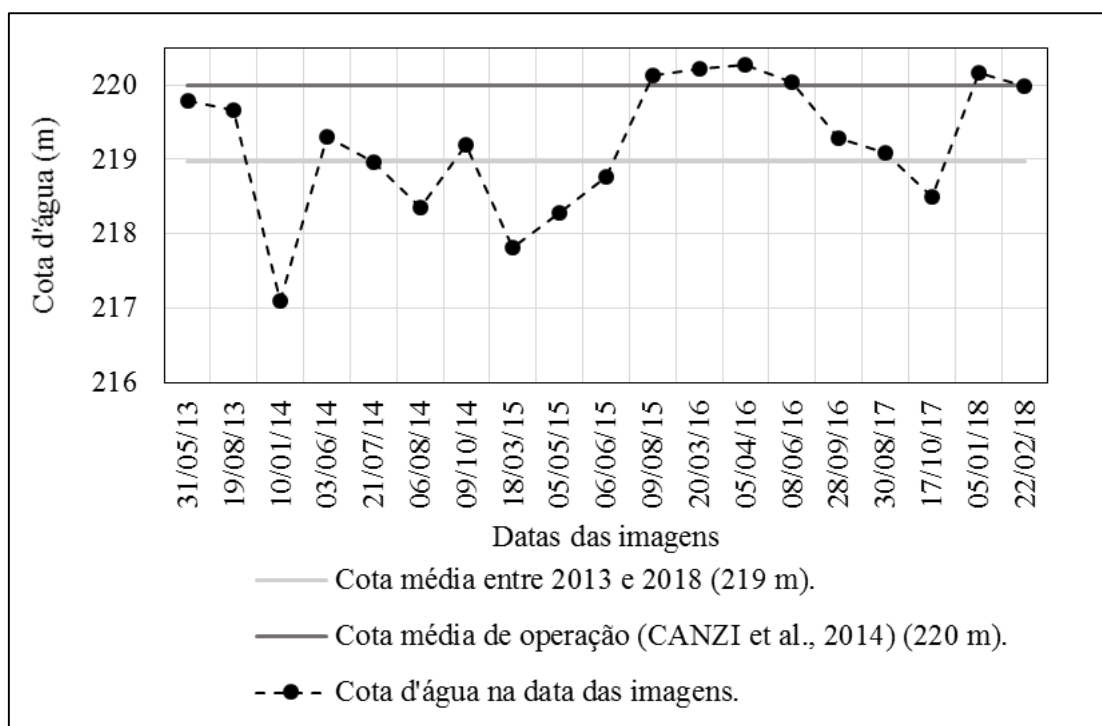
Fonte: adaptado de Landis e Koch (1977, p. 165).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A consulta realizada no site da USGS resultou na aquisição de 24 imagens Landsat 8, entre as quais 5 apresentaram pixels com valores anômalos, sendo, portanto, desconsideradas. A análise da série histórica das cotas d'água do reservatório de ITAIPU nessas imagens, revelou uma cota média de 218,98 m e desvio padrão de 1,23 m para o período de análise que vai de 31/05/2013 até 22/02/2018, indicando uma alta variabilidade dos dados em torno dessa média. Dada essa alta variabilidade, considerou-se como cota média de operação do reservatório a cota de 220 m indicada por Canzi et al. (2014).

A figura 2 apresenta a cota d'água na data de aquisição das imagens, juntamente com o valor da cota média de operação de ITAIPU. Observa-se que mais de 50% das imagens apresentaram valores inferiores as cotas médias para o período de 2013 a 2018 (219m) e de operação do reservatório (220m). Bem como, um significativo aumento das cotas em 2015, 2016 e 2018.

Figura 2 – Data de aquisição das Imagens LANDSAT-8 com suas respectivas cotas d'água.



Fonte: Construído a partir de ("SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios", 2018).

#### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS LIMIARES APLICADOS NO NDVI E NO SWIR PARA O MAPEAMENTO DAS MACRÓFITAS

Nas visitas a campo foram observados os locais de ocorrência das classes temáticas consideradas no mapeamento, por meio das quais foi analisado o comportamento médio dos valores de NDVI nos pixels das imagens. Demarchi et al. (2011) e Gandhi et al. (2015) relataram valores de NDVI acima de 0,2 para vegetação rala e em torno de 0,60 para vegetação densa. Mais especificamente, em relação as macrófitas, Oyama et al. (2015) observaram valores de NDVI acima dos 0,68 para áreas de ocorrência desse tipo de vegetação em lagos Japoneses. Já Zhao et al. (2013) atribuíram valores de NDVI acima dos 0,63 para as macrófitas do lago Tayhu na China. Baseados nesses valores de NDVI, este estudo considerou-se os seguintes limiares para cada classe (Tabela 1).

Tabela 2 – Limiares utilizados no mapeamento das Macrófitas

<b>Classes</b>	<b>Valores</b>
Água	NDVI < 0,10
Solo exposto	0,10 < NDVI < 0,20
Macrófitas A*	0,20 ≤ NDVI < 0,75
Macrófitas B**	NDVI ≥ 0,75

\* bancos de macrófitas menos densas

\*\* bancos de macrófitas mais densas

Com o intuito de eliminar os efeitos de áreas com ocorrência de floração de algas na identificação dos bancos de macrófitas, Oyama et al. (2015) utilizaram medições espectrais in situ para avaliar o comportamento da reflectância destas florações. Os autores encontraram notável distinção entre a reflectância das macrófitas e das florações de algas na banda do SWIR, com valores maiores e menores, respectivamente. O que possibilitou ao autor a atribuição do limiar de reflectância de até 0,057 para a identificação de pixels com locais de ocorrência de floração de algas ou água.

Nesse estudo, os resultados assemelham-se aos de Oyama et al. (2015), pois o limiar atribuído na banda do SWIR foi de 0,08 para a distinção de água com floração de algas (ou ausente) e de água com áreas de vegetação (ou solo exposto). Deste modo, o resultado final do mapeamento da ocorrência das macrófitas aquáticas no

reservatório de ITAIPU, obtido a partir da aplicação da equação 2, resultou em um mapa temático, obedecendo as seguintes classes, apresentadas na

Tabela 3 - Resultado da álgebra de mapas aplicadas na equação 2

<b>Classe Temática</b>	<b>Resultado do valor de pixel após a álgebra de mapas</b>
Água	Locais identificados como água na banda 6 e como outras classes no NDVI. Locais identificados como outros alvos na banda 6 e como água no NDVI.
Solo Exposto/vegetação rala	Locais identificados como outros alvos na banda 6 e como Solo Exposto no NDVI.
Macrófitas A	Locais identificados como outros alvos na banda 6 e como Macrófitas A no NDVI
Macrófitas B	Locais identificados como outros alvos na banda 6 e como Macrófitas B no NDVI

#### 4.2 ACURÁCIA DO MAPEAMENTO

De acordo com os dados adquiridos nas visitas de campo nas datas de 28/09/2016 e 22/02/2018, mostrados nas figuras 3 e 4, ficou evidente a capacidade da metodologia em delimitar as áreas de ocorrência de macrófitas, na qual é possível observar as áreas de ocorrência das macrófitas fotografadas em campo e mapeadas nas imagens de satélite.

Além disso, os cálculos do coeficiente de concordância Kappa apresentaram valores de 0,74 com índice de exatidão de 0,87 na imagem de 28/09/2016; e de 0,73 com índice de exatidão de 0,87 na imagem de 22/02/2018. Corroborando isto, Oyama et al. (2015) relatam a eficácia dos índices de vegetação no mapeamento de macrófitas aquáticas advindos de imagens Landsat, sobre os quais, Villa et al. (2015) e Zhao et al. (2013), citam valores de coeficiente Kappa entre 0,92, 0,76 com índices de exatidão global de 0,92 e 0,91 no mapeamento de macrófitas em lagos da Itália, Hungria e China.

Figura 3 – Classificação das macrófitas e os registros no campo de 28/09/2016

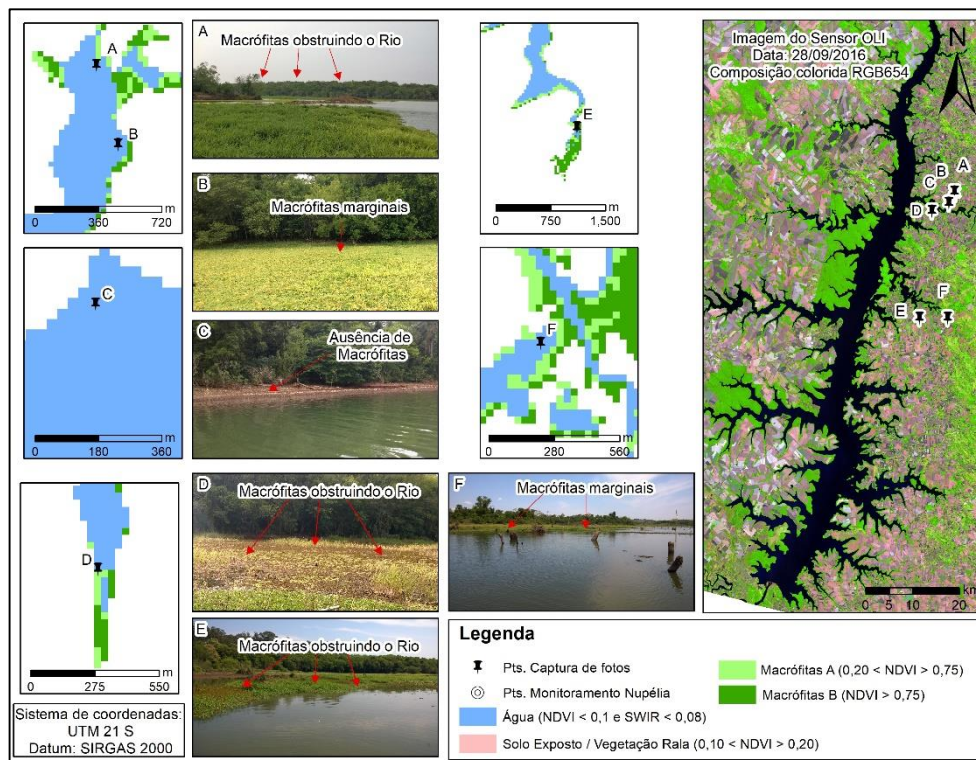
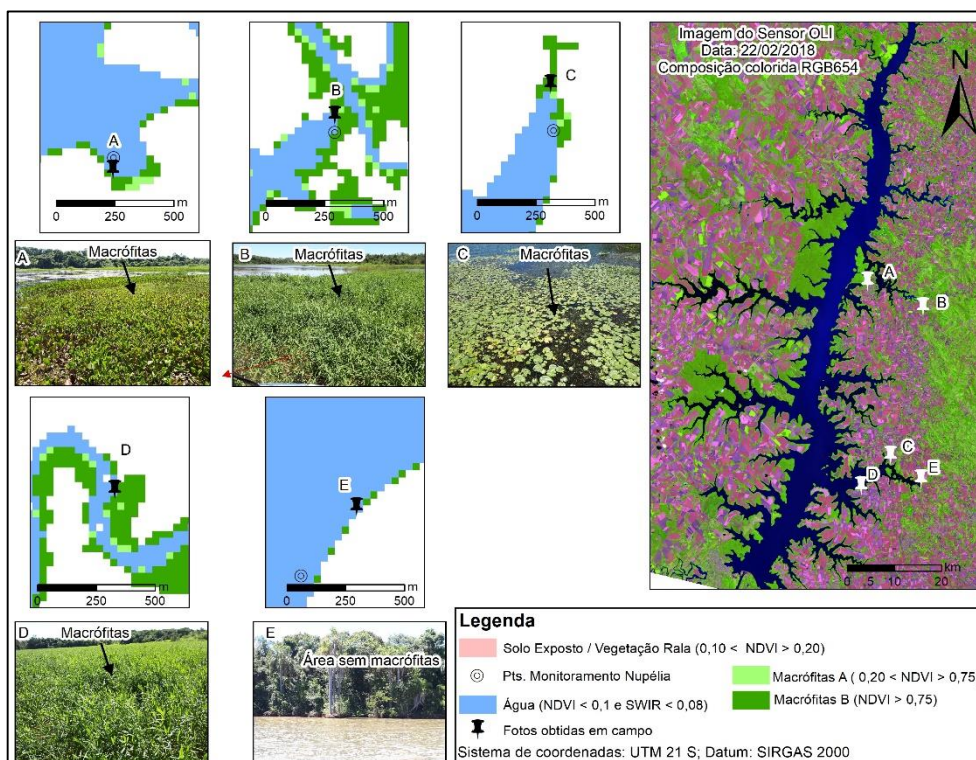
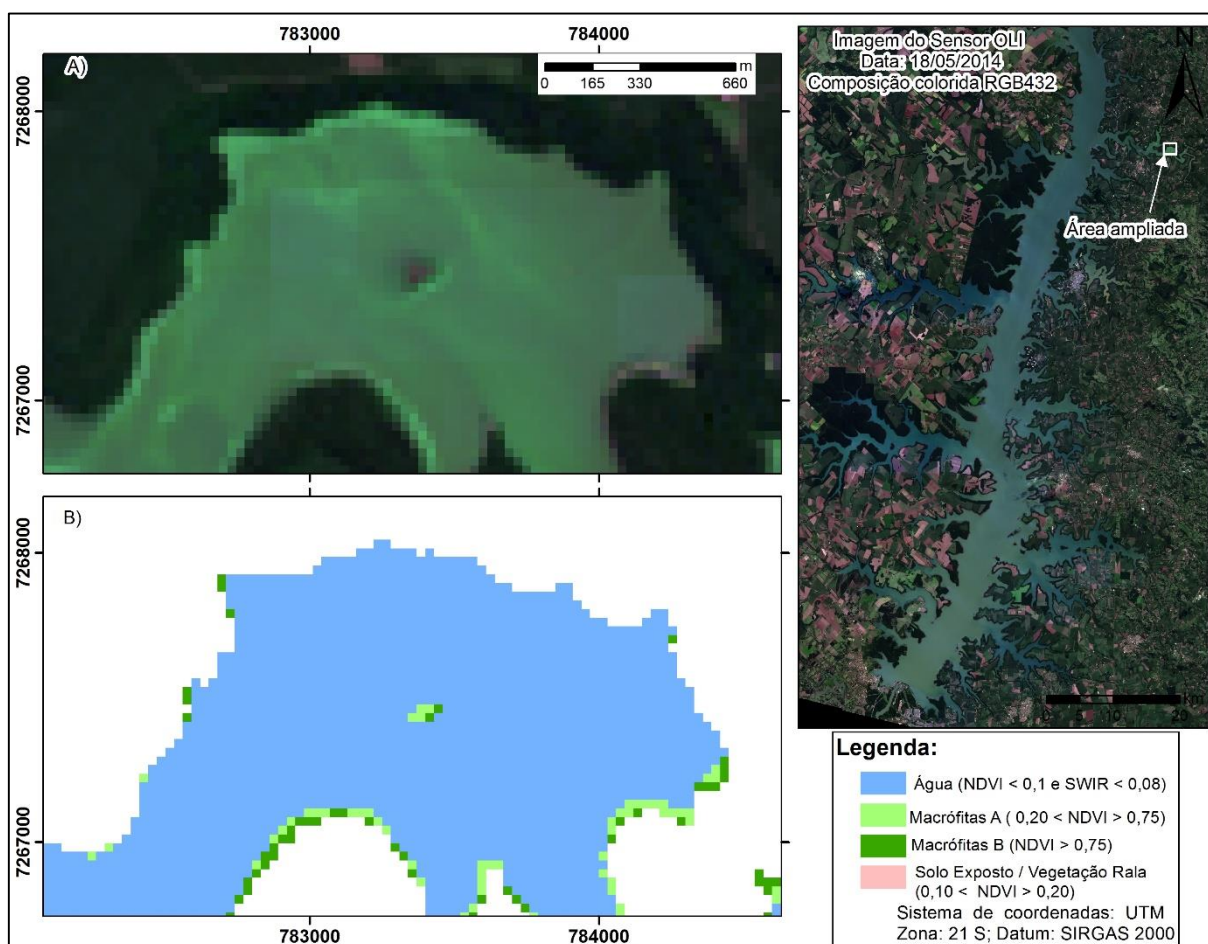


Figura 4 – Classificação das macrófitas e os registros no campo de 22/02/2018;



No que se refere a exclusão das áreas com floração de algas, a figura 5 apresenta o resultado da aplicação da metodologia de mapeamento das macrófitas em uma imagem com a ocorrência de floração de algas (de 18/05/14). Confirmou-se, portanto, a exclusão do evento de florações de algas, evitando a classificação equivocada de áreas de macrófitas. Assim, o resultado mostrou efetivamente, a espacialização da ocorrência das macrófitas A e B.

Figura 5 - Resultado da metodologia de eliminação das áreas com floração de algas na imagem, onde: A) imagem OLI de 18/05/14 ampliada na área de floração; B) imagem resultante do mapeamento de macrófitas com a aplicação da banda do SWIR para distinção entre áreas de macrófitas e floração de algas.



As figuras 6 e 7 apresentam os resultados da espacialização das macrófitas corroboradas com os registros das imagens obtidas com VANT nos dias 28/09/16 e 22/02/18. Pode-se verificar que as áreas de ocorrência das macrófitas aquáticas



identificadas nas imagens OLI (de resolução moderada) foram evidenciadas nas imagens com VANT (de resolução alta).

Figura 6 - Comparativo entre o resultado da delimitação das áreas de ocorrência das macrófitas com a imagem do sobrevoo realizado com VANT no dia 28/09/2016, onde: A) imagem do sobrevoo; B) Resultado da metodologia de mapeamento.

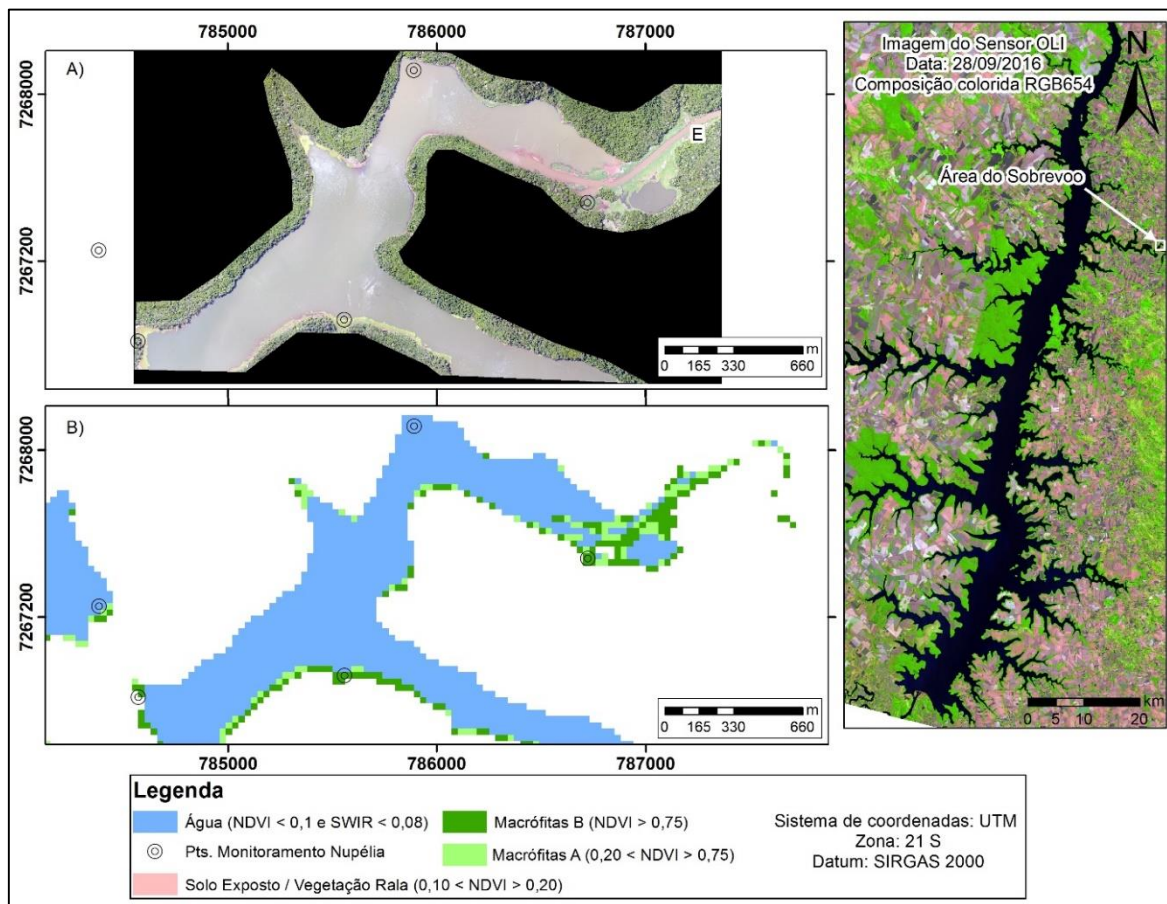
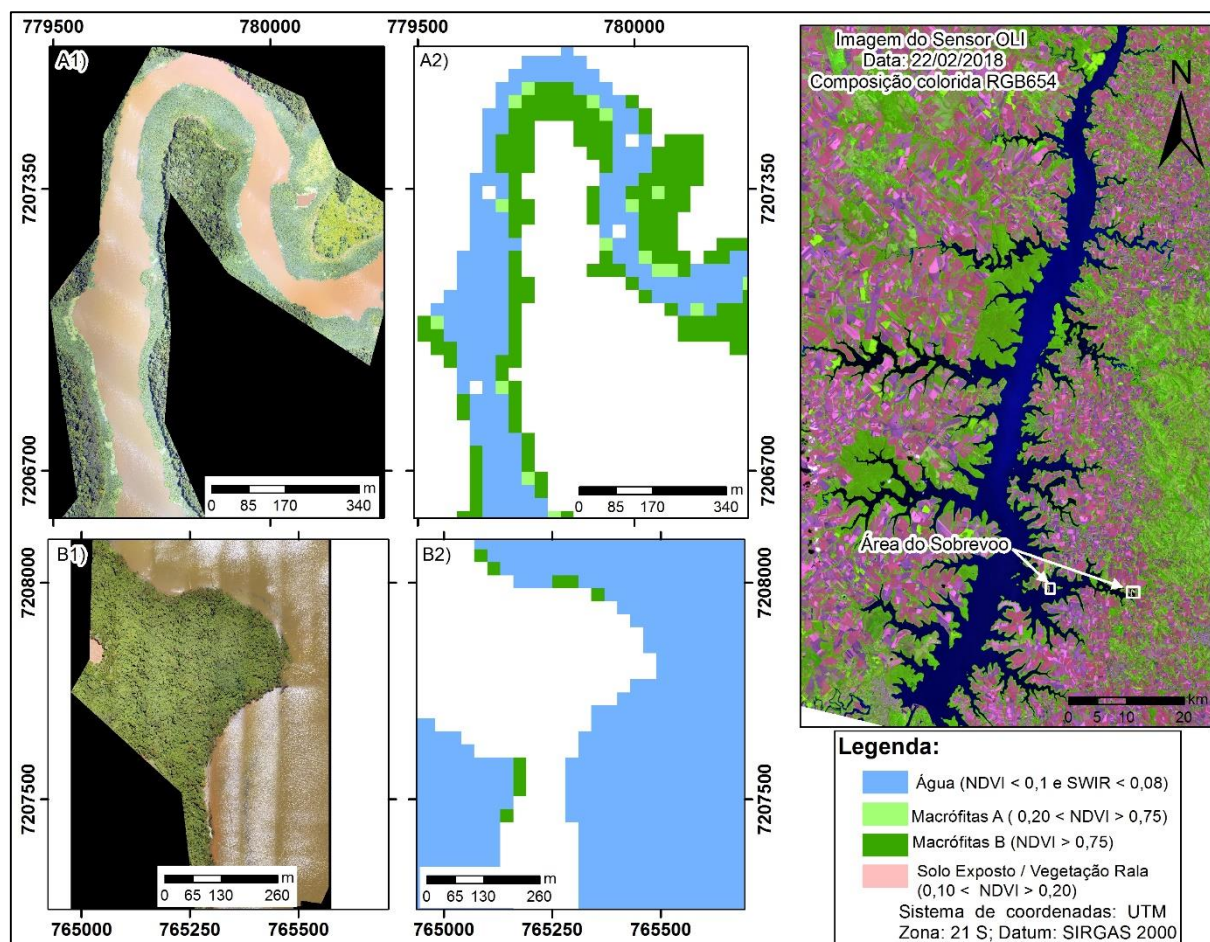


Figura 7 - Comparativo entre o resultado da delimitação das áreas de ocorrência das macrófitas com a imagem do sobrevoo realizado com o VANT no dia 22/02/2018, onde: A1) imagem do sobrevoo 1; A2) resultado da metodologia de mapeamento aplicada na região do sobrevoo 1; B1) imagem do sobrevoo 2; B2) Resultado da metodologia de mapeamento das macrófitas aplicada na região do sobrevoo 2.



A partir da interpretação do cenário de campo do dia 28/09/16 e dos valores mapeados a partir da classificação do NDVI, acredita-se que a classe Macrófitas A seja caracterizada por espécies de macrófitas flutuantes como a *Pistia stratiotes* e algumas espécies de *Salvinia*. Já a classe Macrófitas B tem maior representatividade de espécies emersas como a *Urochloa arrecta* e *Hymenachne Amplexicaule*. O cenário retratado no dia 22/02/2018 apresentou pouca ocorrência das espécies de macrófitas flutuantes (classe Macrófitas A), enquanto que as espécies emersas (classe Macrófitas B) apresentaram maior predominância. No entanto, ressalta-se que a atribuição de espécies a cada classe de mapeamento, deve ser verificada mediante a aquisição de mais amostras de campo.

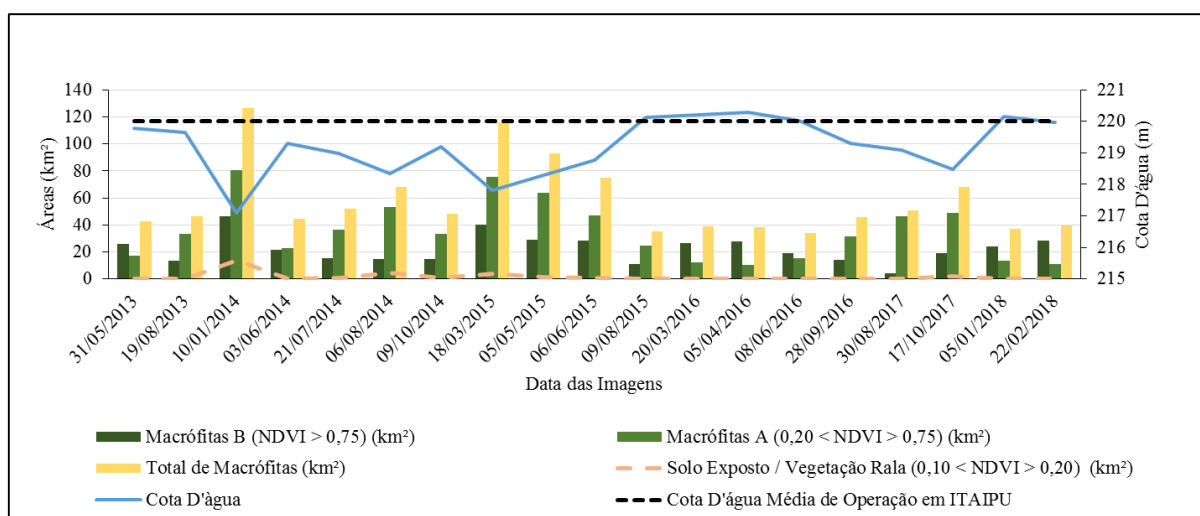
### 4.3 ANÁLISE TEMPORAL DA OCORRÊNCIA DE MACRÓFITAS

As imagens dos períodos 10/01/14, 18/03/2015 e 05/05/2015 se destacaram por apresentarem maior área de ocorrência das classes de macrófitas (Figura 8). A menor variação dos níveis de cota d'água do reservatório nas imagens de 09/08/15, 20/03/16, 05/04/16 e 08/06/16, refletiu na menor alteração da distribuição das macrófitas no reservatório. Outro fato relevante a ser considerado é de que apenas quando se tem as cotas acima dos 219,5 metros tem-se uma maior expansão da classe macrófitas B se comparada a classe macrófita A, imagens de 2016.

No geral, constatou-se uma redução nas áreas de macrófitas naqueles períodos de cotas d'água superiores a 220 m. Acredita-se que este resultado é natural, uma vez que os baixos valores de cota d'água em um reservatório propiciam a penetração da luz solar em bancos de sementes de macrófitas adormecidas e que sob um cenário de nível d'água reduzido, condicionam um rápido desenvolvimento dessa vegetação (SHIPLEY et al., 1989).

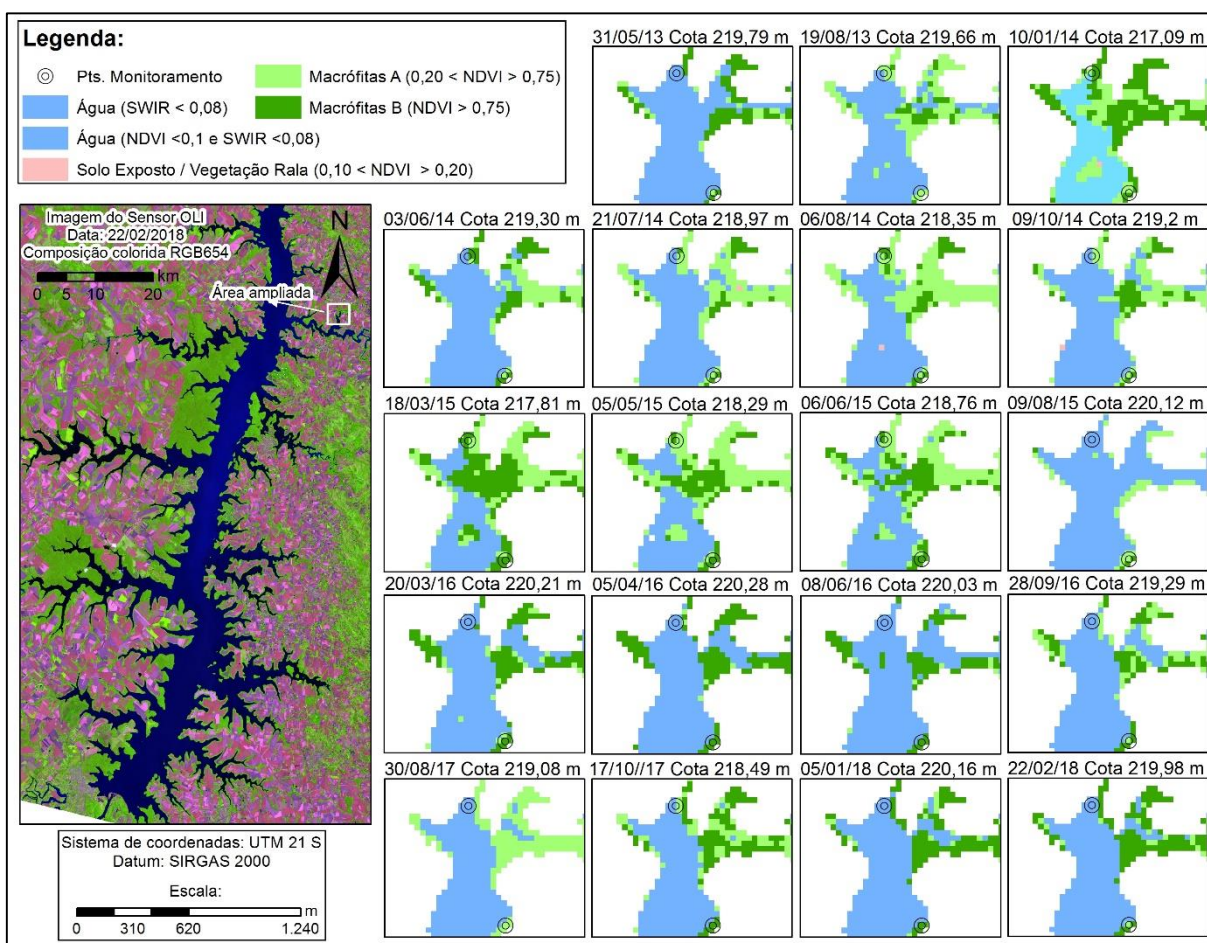
Complementarmente, Rosa et al. (2017) ao estudar a dinâmica de macrófitas emersas no Banhado do Taim, por meio de SR, identificaram redução nas áreas de ocorrência de algumas espécies de macrófitas emersas enraizadas, na condição de altos níveis de cota d'água. Fato semelhante ocorreu em Itaipu, no qual níveis de cota maiores reduziram a área de ocorrência de macrófitas.

Figura 8 – Áreas de ocorrência das classes temáticas, conforme os limiares utilizados na classificação do NDVI



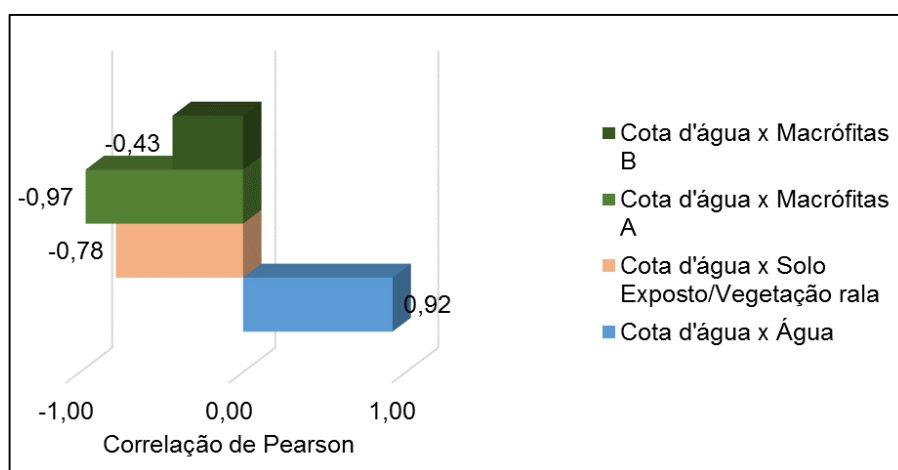
Na figura 9 pode ser observado em detalhe o mapeamento realizado em todo o reservatório de ITAIPU. Ressalta-se que devido as baixas concentrações de clorofila encontradas na área de estudo (ABUJANRA; AGOSTINHO, 2002; BUFFON, 2016), aliadas a utilização do limiar na banda do SWIR, reduziram a probabilidade de ocorrer confusão entre floração de algas e macrófitas aquáticas. Logo, pode-se dizer que a metodologia propiciou o mapeamento de estandes de macrófitas flutuantes ( Figura 9, nas datas de 19/08/13, 06/06/15, 18/03/15 e 08/06/16). Fato que pode estar ligado a baixa flutuação dos valores de cota d'água dos dias anteriores a obtenção das imagens. Além disso, as características hidrológicas desempenham um papel importante no crescimento de macrófitas aquáticas (YANG et al., 2017).

Figura 9 – Detalhamento do mapeamento realizado com a classificação do NDVI no reservatório de ITAIPU. Para melhorar a visualização das classes mapeadas, a figura em questão apresenta uma área ampliada no compartimento aquático do SFV.



A figura 10 apresenta os valores de correlação adquiridos para as variáveis cota d'água e áreas de cada classe obtidos no mapeamento. Com as correlações obtidas, verificou-se que a classe com maior correlação negativa é a Macrófitas A (-0,97), seguida das áreas de solo exposto (-0,78) e Macrófitas B (-0,43). No sentido oposto ocorre nas áreas de água, que conforme previsto, apresentaram altas correlações positivas, fortalecendo os indicativos de confiabilidade da metodologia empregada. Esses resultados ressaltam a importância do regime hidrológico do reservatório de ITAIPU na produção de habitats para a ocorrência de macrófitas aquáticas.

Figura 10 – Correlação de Pearson entre as classes mapeadas e o nível de cota d'água.



## 5 CONCLUSÕES

Os estandes de macrófitas aquáticas no interior do reservatório foram identificados a partir dos seguintes limiares: água  $NDVI < 0,10$  e  $SWIR < 0,08$ ; Solo Exposto  $0,10 \leq NDVI < 0,20$ ; Macrófitas A  $0,20 \leq NDVI < 0,75$ ; Macrófitas B  $NDVI \geq 0,75$ . Mediante a aplicação destes limiares, as áreas de ocorrência das macrófitas aquáticas no reservatório de ITAIPU foram delimitadas, para uma série temporal de 5 anos de imagens.

A análise temporal das macrófitas, na região de estudo, apresentou valores de ocorrência variando entre muito baixa ( $34,28 \text{ km}^2$ ) na imagem de 08/06/2016, na qual as cotas d'água eram superiores a 220 m, e se mantiveram assim a aproximadamente 6 meses, a elevada ( $126,47 \text{ km}^2$ ) na imagem de 10/01/14, quando os níveis de cota

d'água estava abaixo da cota média de operação fato que ocorreu por aproximadamente 4 meses.

A classe macrófitas A mostrou-se mais suscetível a níveis de cota d'água acima dos 220 metros. Essa classe apresentou ainda elevado coeficiente de correlação negativa (-0,97). Em sentido oposto foi constatado na classe macrófitas B, a qual se demonstrou mais estável, durante todo o período estudado, se mantendo com área média de ocorrência de 22 km<sup>2</sup> com reduzido coeficiente de correlação (-0,47). Entretanto, sugere-se que em trabalhos futuros este fato seja verificado com a intensificação de visitas a campo.

As técnicas de SR e geoprocessamento empregadas mostraram-se uma ferramenta eficaz no mapeamento das macrófitas. Tais ferramentas aliadas a outras informações, como a limnologia e uso do solo, podem ser úteis no monitoramento de atividades causadoras da proliferação excessiva das mesmas. Acredita-se que com o advento de sensores remotos de maior resolução espectral e temporal, seja possível, inclusive, a distinção precisa de algumas espécies de macrófitas aquáticas. Sugere-se ainda, que a atribuição dos limiares seja aprimorada com o uso de dados espectrais coletados in situ, em diferentes épocas do ano e períodos vegetativos da macrófitas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUJANRA, F.; AGOSTINHO, A. A. Dieta de *Hypophthalmus edentatus* (Spix, 1829) (Osteichthyes, Hypophthalmidae) e variações de seu estoque no reservatório de Itaipu. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 24, n. 2, p. 401–410, 2002.
- AGOSTINHO, A.; THOMAZ, S. M. Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation. **Biodiversity in the high Paraná River floodplain. Biodiversity in wetlands: assessment, function and conservation**, v. 1, p. 89–118, 1 jan. 2000.
- ANTUNES, A. F. B. **Análise do uso do processamento digital de imagens na segmentação de tipologias vegetais da APA de Guaraqueçaba-PR**. Dissertação de mestrado em engenharia florestal—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996.
- BABAN, S. M. J. Use of remote sensing and geographical information systems in developing lake management strategies. In: HARPER, D. M. et al. (Eds.). . **The Ecological Bases for Lake and Reservoir Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. p. 211–226.
- BRASIL. **Usina de Itaipu bate novo recorde de geração diária de energia**. Disponível em: <[www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/04/usina-de-itaipu-bate-novo-recorde-de-geracao-diaria-de-energia](http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/04/usina-de-itaipu-bate-novo-recorde-de-geracao-diaria-de-energia)>. Acesso em: 5 out. 2017.
- BUFFON, E. C. **CARACTERIZAÇÃO LIMNOLÓGICA E ESPECTRAL DE DOIS COMPARTIMENTOS AQUÁTICOS DO RESERVATÓRIO ITAIPU**. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- 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, p. 117, 15 nov. 2014.
- CARVALHO, T. M.; CARVALHO, C. M. Sistemas de informações geográficas aplicadas à descrição de habitats. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 34, n. 1, 3 ago. 2012.
- CHUVIECO, E. S. Tratamiento digital de imágenes: II. generación de información temática. In: **Fundamentos de Teledetección espacial 3º edición revisada**. Espanha, Madrid: RIALP, 1996. p. 319–464.
- CONTICELLO, L.; CERAZO, B.; BUSTAMANTE, A. DINAMICA DE COMUNIDADES HIDROFILAS ASOCIADAS A CANALES DE RIEGO EN EL ALTO VALLE DE RIO NEGRO (ARGENTINA). **Gayana. Botánica**, v. 59, n. 1, 2002.
- CRONK, J. K.; FENNESSY, M. S. Introduction to Wetland Plants. In: **Wetland plants biology and ecology**. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2001. p. 4–27.
- DEKKER, A. G. **Detection of optical water quality parameters for entrophic waters by high resolution remote sensing**. Amsterdam: Free University, 1993.

DEMARCHI, J. C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C. R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação ndvi e savi no município de Santa Cruz do Rio Pardo – SP usando imagens LANDSAT-5. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 21, 12 abr. 2011.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G. Monitoramento Temporal de Variáveis Espectrais em Áreas do Pantanal Utilizando Dados AVHRR/NOAA-17. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 4, p. 639–647, 2010.

ESTEVES, F. DE A.; BARBIERI, R. A Radiação e seus Efeitos em Ecossistemas Aquáticos Continentais. In: **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 137–166.

FOTI, R. et al. Signs of critical transition in the Everglades wetlands in response to climate and anthropogenic changes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 16, p. 6296–6300, 16 abr. 2013.

GANDHI, G. M. et al. Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis – A Case Study of Vellore District. **Procedia Computer Science**, v. 57, p. 1199–1210, 2015.

GASTAL JR, C. V. DE 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.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=863>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

ITAIPU. **Energia**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/capa-energia>>. Acesso em: 5 dez. 2017.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestre**. 2º edição ed. São José dos Campos: Parêntese: Epiphâneo, J. N., 2009.

KIRK, J. T. O. **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 3rd ed ed. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2011.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159, mar. 1977.

LEIVAS, J. F. et al. **Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOTVegetation**. . In: XVI SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Foz do Iguaçu, PR, Brasil: INPE, 2013

MALTCHIK, L.; ROLON, A.; STENERT, C. Aquatic macrophyte and macroinvertebrate diversity and conservation in wetlands of the Sinos River basin. **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, n. 4 suppl, p. 1179–1184, dez. 2010.



MORMUL, R. P. et al. Space and seasonality effects on the aquatic macrophyte community of temporary Neotropical upland lakes. **Aquatic Botany**, v. 126, p. 54–59, out. 2015.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento Espectral da Água. In: MENESES, P. R. (Ed.). . **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília, 2001. p. 203–224.

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, p. 35–47, fev. 2015.

PEREIRA, M. C. B.; SCROCCARO, J. L. (EDS.). **Bacias Hidrográficas do Paraná: Série Histórica**. Curitiba: SEMA, 2010.

PONZONI, F. J. Comportamento Espectral da Vegetação. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. DA S. (Eds.). . **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília, 2001. p. 197–199.

POTT, A. et al. Macrófitas aquáticas do Pantanal e de outras áreas úmidas em Mato Grosso do Sul. **Heringeriana**, v. 6, n. 1, p. 72–75, 2012.

ROSA, C. N. DA et al. 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.

ROUSE, J. W. et al. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS**. . In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE – 1 SYMPOSIUM. Washington: 1973Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19740022614>>. Acesso em: 7 jun. 2018

**SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios**. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/MedicaoSIN>>. Acesso em: 7 jun. 2018.

SHIPLEY, B. et al. Regeneration and Establishment Strategies of Emergent Macrophytes. **The Journal of Ecology**, v. 77, n. 4, p. 1093, dez. 1989.

SILVA, T. S. F.; COSTA, M. P. F.; MELACK, J. M. Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, p. 1998–2010, set. 2010.

TASSI, R. **Gerenciamento Hidroambiental de Terras Úmidas**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

TEIXEIRA, E. **Influência do Nível da Água e da Disponibilidade de Nutrientes na Alocação Reprodutiva e Vegetativa de *Salvina auriculata* Aublet (Salviniaceae)**. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada, área de concentração em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais em Ecossistemas Fragmentadas e Agrossistemas)—Lavras, MG: Universidade Federal de Lavras, 2013.

THOMAZ, S. M. et al. Temporal trends and effects of diversity on occurrence of exotic macrophytes in a large reservoir. **Acta Oecologica**, v. 35, n. 5, p. 614–620, set. 2009.

THOMAZ, S. M. **Estudo das macrófitas aquáticas no reservatório de Itaipu Binacional - Relatório Final 7ª etapa. Universidade Estadual de Maringá/ Núcleo de pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aquacultura.** [s.l.] Maringá: UEM, 2010.

THOMAZ, S. M.; ESTEVES, F. DE A. Comunidades de Macrófitas aquáticas. In: **Fundamentos de Limnologia.** Rio de Janeiro: Intercedencia, 2011. v. 3p. 461–521.

VILLA, P. et al. A rule-based approach for mapping macrophyte communities using multi-temporal aquatic vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 171, p. 218–233, 2015.

WARD, D. P. et al. Floodplain inundation and vegetation dynamics in the Alligator Rivers region (Kakadu) of northern Australia assessed using optical and radar remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 147, p. 43–55, maio 2014.

YANG, N.; ZHANG, Y.; DUAN, K. Effect of Hydrologic Alteration on the Community Succession of Macrophytes at Xiangyang Site, Hanjiang River, China. **Scientifica**, v. 2017, p. 1–10, 2017.

ZHAO, D. et al. Spatio-Temporal Variability of Aquatic Vegetation in Taihu Lake over the Past 30 Years. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, p. e66365, 18 jun. 2013.

ZOHARY, T.; OSTROVSKY, I. Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. **Inland Waters**, v. 1, n. 1, p. 47–59, 1 abr. 2011.