

MARCO ANTONIO SARAIVA DA SILVA

**ANÁLISE DE IMPACTO CLIMÁTICO EXTREMO, A PARTIR DE IMAGENS DE
SENSORES REMOTOS, NOS MANGUEZAIS DA RESERVA MUNICIPAL DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PIRAQUÊ AÇU-MIRIM EM
ARACRUZ (ES)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: André Luiz Lopes de Faria

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586a
2022
Silva, Marco Antonio Saraiva da, 1981-
Análise de impacto climático extremo, a partir de imagens de sensores remotos, nos manguezais da Reserva Municipal de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim em Aracruz (ES) / Marco Antonio Saraiva da Silva. – Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (107 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: André Luiz Lopes de Faria.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Geografia, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.061>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Mudanças climáticas. 2. Vegetação - Mapeamento.
3. Plantas do manguezal. 4. Plantas costeiras. 5. Sensoriamento remoto. 6. Mudanças ambientais globais. I. Faria, André Luiz Lopes de, 1970-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

CDD 22. ed. 551.5253

MARCO ANTONIO SARAIVA DA SILVA

**ANÁLISE DE IMPACTO CLIMÁTICO EXTREMO, A PARTIR DE IMAGENS DE
SENSORES REMOTOS, NOS MANGUEZAIS DA RESERVA MUNICIPAL DE
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PIRAQUÊ AÇU-MIRIM EM
ARACRUZ (ES)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Geografia, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

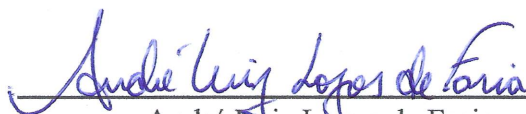
APROVADA: 01 de fevereiro de 2022.

Assentimento:



Marco Antonio Saraiva da Silva

Autor



André Luiz Lopes de Faria

Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao criador por estar me proporcionando esta incrível experiência. Certamente, sem amparo espiritual e familiar nada disso seria possível. Por isso, agradeço os meus pais Antonio Saraiva da Silva e Maria Martins Saraiva da Silva e meu irmão Júlio César Martins da Silva que sempre se fizeram presentes em minha vida. Também agradeço, imensamente, minha esposa Natália Ap. Barbosa da Silva e meu filho Júlio César Saraiva da Silva pelas orações, carinho, confiança, e companheirismo em todos os momentos.

Agradeço ao professor Dr. André Luiz Lopes de Faria pela generosidade e paciência na transmissão do conhecimento. Sem sombra de dúvidas, essa pesquisa só logrou êxito em função da sua percepção de realidade que, frente à Covid-19, redirecionou o trabalho de modo a honrarmos nosso compromisso com o programa de pós graduação em Geografia da UFV.

Esta pesquisa teve o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e os custos do campo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001. Com relação ao campo, meus sinceros agradecimentos ao Dr. Pablo de Azevedo Rocha e seu orientando João Pedro Dornellas que nos acompanhou na exploração da área.

Muitas pessoas contribuíram com essa empreitada, dentre elas, estão: Guilherme Vieira; Joyce Santiago Moreira; Heitor Carvalho Lacerda; Humberto Paiva Fonseca; Marcelo Batista Krause; e Wesley Oliveira Soares. Também agradeço ao corpo técnico do departamento, Fábio Lopes da Silva, Gilmar de Castro Botelho e Patrícia dos Santos Bernardo, que sempre se mostram solícitos e acessíveis.

Para além desses, agradeço a todos os professores do departamento e do programa, principalmente os professores Dr. André Luiz Lopes de Faria, Dr. Edson Soares Fialho, Dr. Leonardo Civale e o Dr. Ulysses da Cunha Baggio com os quais, além de outros colegas, divido publicações. Também agradeço o professor Dr. Liovando Marciano da Costa um exemplo de humildade, dedicação e inteligência.

Estendo meus agradecimentos aos professores Prof. Dr. Valter Machado da Fonseca, Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes e Prof. Dr. José Marinaldo Gleriani que compuseram a banca e muito contribuíram com as correções e sugestões. Peço desculpas aos que, aqui, não tiveram seus nomes grafados, mas agradeço a todos que de alguma forma se fizeram presentes durante essa jornada.

Por fim, o sentimento que me resta é de realização e paz, pois “Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé” (2 Timóteo 4:7-8).

Ainda que eu ande pelo vale da sombra da morte,
não temerei mal algum, pois tu estás comigo;
a tua vara e o teu cajado me protegem.

Salmo 23:4.

RESUMO

SILVA, Marco Antonio Saraiva da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Análise de impacto climático extremo, a partir de imagens de sensores remotos, nos manguezais da Reserva Municipal de Desenvolvimento Sustentável do Piraquê Açú-Mirim em Aracruz (ES)**. Orientador: André Luiz Lopes de Faria.

Dentre os variados ambientes presentes no planeta, que merecem a devida atenção, por possuírem particularidades e especificidades de ordens químicas, físicas e biológicas, faz-se um destaque para os manguezais. Os manguezais são ecossistemas tropicais localizados em locais específicos das planícies costeiras onde há o encontro de águas continentais e oceânicas. São fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos, que variam da escala local à global. Devido a sua localização e especificidade esses ecossistemas também se colocam numa posição de fragilidade e, portanto, sensíveis às mudanças bruscas como, por exemplo, as causadas por alterações significativas das condições de tempo e clima, que também podem estar relacionadas ao aquecimento global. Diante disso, essa pesquisa teve como objetivo geral avaliar a eficácia dos índices Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil-adjusted vegetation index (SAVI), Leaf area index (LAI), *CO₂ flux*, *Normalized Difference Water Index* (NDWI) e *Land Surface Temperature* (LST) no registro das consequências do evento climático extremo, tempestade de granizo, ocorrido no dia 1 de junho de 2016 nos mangues da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú-Mirim, localizada em Aracruz (ES) no Brasil. Para isso, foi utilizado imagens de sensores orbitais para o período de 2015 e 2020 de modo a fazer comparações entre o antes e o depois do evento. Os resultados são compostos tanto por mapas temáticos de cada índice como, também, por gráficos de estatística descritiva, que foram gerados a partir de pontos amostrais. Desse modo, após gerar esses produtos fez-se investidas a campo com o intuito de verificar se os resultados obtidos com os índices eram correlatos com a realidade dos locais. Esse processo, foi fundamental para o escopo da pesquisa, pois além de confirmar a capacidade dos índices em registrar o impacto, em diferentes graus (menor, média e maior), possibilitou identificar quais índices obtiveram maior precisão.

Palavras-chave: Manguezais. Índices de vegetação. Ecossistema costeiro. Sensoriamento remoto. Mudança na paisagem.

ABSTRACT

SILVA, Marco Antonio Saraiva da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Analysis of extreme climate impact, from remote sensor images, in the mangroves of the Piraquê Açu-Mirim Municipal Sustainable Development Reserve in Aracruz (ES).** Advisor: André Luiz Lopes de Faria.

Among the various gifts, which are exclusively for man, for having peculiarities and specificities that stand out on the planet, physical and biological, they are one. Mangroves are tropical ecosystems in natural locations on the beaches of continental waters and oceans. They are providers of various ecosystem services, ranging from local to global scale. Its location is also characterized by these ecosystem specificities, which can also be considered as, for example, important weather and climate changes, which can also be in line with the characteristics of the global climate. Therefore, this research had the general objective of evaluating the normalized difference vegetation indices (NDVI), adjusted soil index (LAI), normalized difference CO₂ flow index (NDWI) and CO₂ flow index (NDWI) Surface Temperature (LST) in the record of the consequences of the extreme weather event, hail storm, which occurred on June 1, 2016 in the mangroves of the Piraquê Açu-Mirim Municipal Sustainable Development Reserve, located in Aracruz (ES) in Brazil. For this, images from orbital sensors were used for the period of 2015 and 2020 in order to make comparisons between before and after the event. The results are composed both of points by thematic maps of each, as well as by graphs of descriptive statistics, which were generated from a sample. In this way, after generating products, investments were made in the field in order to verify if the results obtained with the indices were correlated with the reality of the places. This process was fundamental for the scope of the research, because in addition to confirming the ability of the indices to record the impact, in different degrees (lower, medium and greater), it made it possible to identify which indices were more accurate.

Keywords: Mangrove. Vegetation index. Coastal ecosystem. Remote sensing. Change in landscape.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

APRESENTAÇÃO DO TEMA

Figura 01-	Faixa de presença de manguezais no Brasil e no mundo.....	13
------------	---	----

CAPÍTULO 1

Figura 01-	Localização da área de pesquisa.....	24
Figura 02-	Distribuição dos pontos amostrais.....	30
Figura 03-	Composição em cores verdadeira 432/RGB da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020....	33
Figura 04-	NDVI gerado a partir de dados MSI/ <i>Sentinel-2</i> da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020....	34
Figura 05-	Gráficos estatísticos do NDVI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	35
Figura 06-	SAVI gerado a partir de dados MSI/ <i>Sentinel-2</i> da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020....	36
Figura 07-	Gráficos estatísticos do SAVI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	37
Figura 08-	LAI gerado a partir de dados MSI/ <i>Sentinel-2</i> da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020....	38
Figura 09-	Gráficos estatísticos do LAI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	39
Figura 10-	Imagens dos manguezais de acordo com a intensidade do impacto.....	43
Figura 11-	Imagens registradas na expedição de campo.....	44

CAPÍTULO 2

Figura 01-	Localização da área de pesquisa.....	57
Figura 02-	Imagens de vegetações e erosões na foz do rio Piraquê-Açu.....	59
Figura 03-	Distribuição dos pontos amostrais.....	66
Figura 04-	Composição em cores verdadeira 432/RGB da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020....	68
Figura 05-	NDWI gerado a partir de dados MSI/ <i>Sentinel-2</i> para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	69

Figura 06-	Gráficos estatísticos do NDWI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	70
Figura 07-	CO ₂ flux gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.....	71
Figura 08-	Gráficos estatísticos do CO ₂ <i>flux</i> da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.	72
Figura 09-	LST gerado a partir de dados OLI/Landsat-8 para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2015 e 2020.....	73
Figura 10-	Gráficos estatísticos do LST da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2015 e 2020.....	74
Figura 11-	Imagens dos mangues de acordo com a intensidade do impacto.....	79
Figura 12-	Imagens da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	80

APÊNDICE

Figura 01-	Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Mirim (vista terrestre)	90
Figura 02-	Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Mirim (vista aérea)...	91
Figura 03-	Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Açu (vista terrestre)..	92
Figura 04-	Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Açu (vista aérea)	93
Figura 05-	Imagens de mangues não atingidos pela tempestade.....	94
Figura 06-	Dinâmica de embarcações na foz do Piraquê-Açu.....	95
Figura 07-	Estatísticas do NDVI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	96
Figura 08-	Estatísticas do NDVI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	97
Figura 09-	Estatísticas do SAVI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	98
Figura 10-	Estatísticas do SAVI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	99
Figura 11-	Estatísticas do LAI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	100
Figura 12-	Estatísticas do LAI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	101
Figura 13-	Estatísticas do NDWI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	102
Figura 14-	Estatísticas do NDWI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	103
Figura 15-	Estatísticas do CO ₂ <i>flux</i> da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	104
Figura 16-	Estatísticas do CO ₂ <i>flux</i> da área de maior impacto no Piraquê-Mirim....	105
Figura 17-	Estatísticas do LST da área de maior impacto no Piraquê-Açu.....	106
Figura 18-	Estatísticas do LST da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.....	107

LISTA DE SIGLAS

AVIRIS	<i>Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer.</i>
BOA	<i>Bottom of Atmosphere.</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CO ₂	Dióxido de Carbono (Gás Carbônico).
DGE	Departamento de Geografia
ES	Espírito Santo
ESA	<i>European Space Agency.</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IUGS	<i>International Union of Geological Sciences.</i>
LAI	<i>Leaf area index.</i>
LST	<i>Land Surface Temperature.</i>
NC	Níveis de Cinza.
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Indexd.</i>
NDWI	<i>Normalized Difference Watter Index.</i>
NIR	<i>Near infrared.</i>
PA	Piraquê Açu.
PAM	Piraquê Açu-Mirim.
PE	Pernambuco.
PM	Piraquê Mirim.
PRI	<i>Photosynthetic Reflectance Index.</i>
RDS	Reserva de Desenvolvimento Sustentável.
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft.</i>
SAVI	<i>Soil-adjusted vegetation index.</i>
SR	Sensoriamento Remoto.
SWIR	<i>Shortwave infrared.</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere.</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa.
USGS	<i>United States Geological Survey.</i>

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO DO TEMA	12
REFERÊNCIAS.....	16
CAPÍTULO 1	
Avaliação do impacto de evento climático extremo em mangues do litoral do Sudeste brasileiro a partir dos índices de vegetação NDVI, SAVI e LAI.....	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	20
2 MATERIAIS DE MÉTODOS.....	23
2.1 Caracterização da área de pesquisa.....	23
2.2 Equipamentos e ferramentas.....	25
2.3 Fonte e base de dados.....	26
2.4 Etapas de desenvolvimento.....	26
2.5 Procedimentos metodológicos.....	26
3 RESULTADOS.....	33
4 DISCUSSÃO.....	40
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
AGRADECIMENTOS.....	46
REFERÊNCIA.....	47
CAPÍTULO 2	
Avaliação do impacto de tempestade de granizo em mangues no litoral brasileiro a partir de Sensoriamento Remoto.....	50
RESUMO.....	50
ABSTRACT.....	51
1 INTRODUÇÃO.....	52
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
2.1 Caracterização da área de pesquisa.....	56
2.2 Equipamentos e ferramentas.....	59
2.3 Fonte e base de dados.....	59
2.4 Etapas de desenvolvimento.....	60

2.5	Procedimentos metodológicos.....	60
3	RESULTADOS.....	68
4	DISCUSSÃO.....	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
	AGRADECIMENTOS.....	84
	REFERÊNCIAS	85
	CONCLUSÕES GERAIS	87
	APÊNDICE	89

APRESENTAÇÃO DO TEMA

O contato sociedade/natureza é intrínseco à existência humana e se configura como uma relação de mão dupla, ou seja, à medida que o homem modifica o meio, ele também é modificado. Com a evolução das técnicas e das tecnologias, a forma de apropriação da natureza pelo homem mudou substancialmente, deixando de lado uma interação holística para dar lugar a uma exploração desordenada, que na maioria das vezes tem como objetivo principal a acumulação de capital.

A luz disso, pode-se dizer que a exploração dos recursos naturais passou a caminhar de forma sincrônica ao avanço da industrialização que, por sua vez, necessita cada vez mais de matérias-primas. Essa lógica produtiva além de aumentar a pressão sobre a natureza acaba, quase sempre, modificando a paisagem local e interferindo no equilíbrio dos ecossistemas.

A partir principalmente, da segunda metade do século XX movimentos pró-ambiente começaram a ganhar mais expressividade e, portanto, sendo as pautas de reuniões que envolvem decisão das políticas mundiais podendo se destacar as de Estocolmo, em 1972, a Rio-92; a Rio+10, em 2002, e a Rio+20, em 2012. Uma das pautas dessas reuniões, diz respeito às modificações sofridas pelo meio ambiente, decorrentes das ações antrópicas, que está subjugada à lógica de acumulação de capital.

Ao acrescentar o fator antrópico nas discussões, os debates científicos tem contribuído para esclarecer as reais consequências das interferências do homem sobre o meio. Essas interferências são tão relevantes que a União Internacional das Ciências Geológicas (*International Union of Geological Sciences, IUGS*) está criando o antropoceno para distinguir a influência antropogênica, nas dinâmicas naturais.

Quanto a isso, sabe-se que nosso planeta já passou por vários ciclos climáticos e estruturais ao longo de sua formação, ou seja, glaciações e aquecimento fazem parte de sua formação pretérita e futura. Em estudos ambientais, muitas são as preocupações e suposições que giram em torno das mudanças climáticas e seus possíveis desdobramentos. Dentre as diferentes pautas, o aquecimento global é, certamente, umas das mais debatidas nas duas primeiras décadas do século XXI.

Nesse sentido, a interferência do homem no processo de aquecimento global vem se tornando cada vez mais debatida entre os cientistas que demandam suas energias para o estudo de tal processo. Entre os estudos, as discussões acerca das variações no nível dos oceanos e a ocorrência de eventos climáticos ditos como extremos se apresentam muito importantes, pois

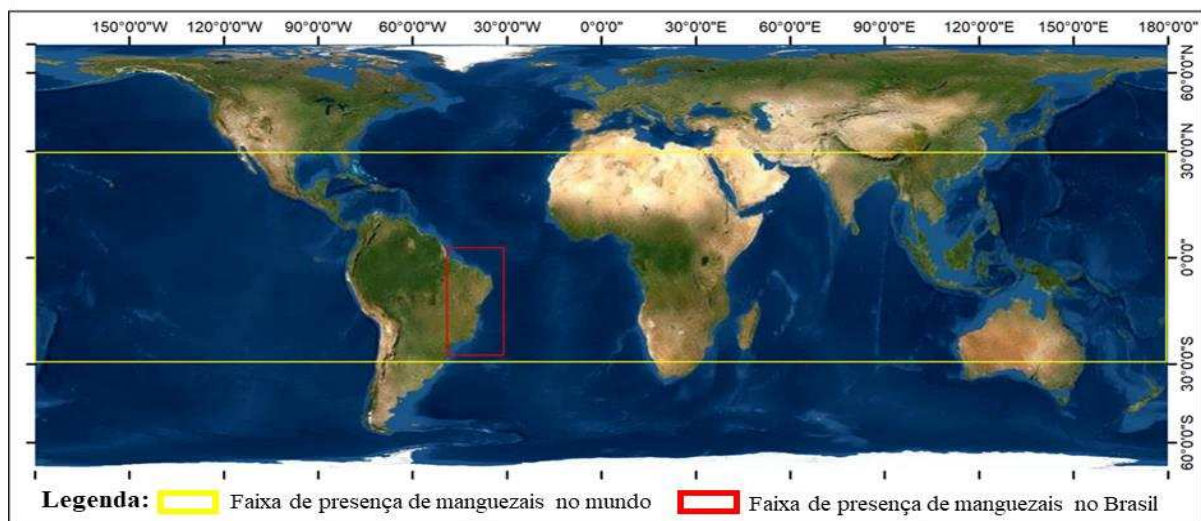
seus resultados podem servir de direcionamento quanto às ações necessárias para a preservação de ambientes tidos como frágeis ecologicamente.

Dentre os ambientes que se enquadram nesta designação, em função de suas particularidades e especificidades de ordens químicas, físicas e biológicas, destaca-se aqui os manguezais que, devido ao seu caráter único, sofre variações tanto externamente quanto internamente. Essas variações, a grosso modo, estão atreladas a algumas características como: sua localização; o relevo; a geometria do exutório; o volume hídrico do contribuinte continental; a dinâmica das marés; a proximidade de áreas com concentração humana; e etc.

Diante disso, é possível afirmar que as características locais possuem influências diretas tanto na constituição da paisagem (com destaque para os mangues) quanto nas interações geossistêmicas que ocorrem nesse ambiente. Para se evitar qualquer tipo de confusão, faz-se necessário diferenciar mangue de manguezal. Em síntese, é possível dizer que o mangue se refere aos diferentes grupos de vegetações que se localizam em um manguezal que, por sua vez, é o local onde vários organismos se interagem. Dessa maneira, quando se referir ao ecossistema o termo mais apropriado é manguezal (SCHAEFFER-NOVELLI, 2018a).

Presente em vários lugares do planeta (Figura 01), “os manguezais são formados às margens de baías, enseadas, barras, desembocaduras de rios, lagunas e reentrâncias costeiras, onde ocorre o encontro das águas dos rios com a água do mar” (ROCHA, 2016, p. 1). No Brasil, esse ecossistema está compreendido entre as latitudes 04°20’N (Oiapoque, AP) e 28°30’S (Laguna, SC), de modo que somente o Rio Grande do Sul não tem registro de vegetação típica de bosques de mangue (SCHAEFFER-NOVELLI, 2018b).

Figura 01- Faixa de presença de manguezais no Brasil e no Mundo.



Fonte: O autor.

No que se refere ao mangue, pode-se dizer que, de modo geral, ele é composto por três gêneros, sendo eles: *Rhizophora*; *Avicennia*; e *Laguncularia* (WALTERS *et al.*, 2008). De acordo com Schaeffer-Novelli (2018b), no Brasil, em grande medida, esses gêneros abarcam seis espécies de modo que; a *Rhizophora mangle*, a *Rhizophora harrisonii* e a *Rhizophora racemosa*, pertencem ao primeiro gênero exposto; a *Avicennia schaueriana* e *Avicennia germinans*, pertencem ao segundo; e a *Laguncularia racemosa*, pertence ao terceiro.

Para além disso, vale destacar que os manguezais assumem papel crucial para uma grande diversidade de espécies que encontram, nesse ambiente, condições que lhes possibilitam viver e reproduzir. Ademais, esse ecossistema também é para muitos moradores locais, como pescadores tradicionais e caranguejeiros, um lugar fundamental para suas sobrevivências, assumindo, portanto, importante função socioeconômica.

Nesse sentido, muitos pesquisadores têm dedicado a estes geoambientes parte de suas energias em pesquisas que, apesar da importância, ainda não são suficientes para explicar suas complexidades. Diante disso, uma das opções que, certamente, podem minimizar essas dificuldades é a utilização do Sensoriamento Remoto que de acordo com Meneses e Almeida (2012, p.3) “[...] é uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto”.

Complementado esta definição, pode-se dizer que no campo da pesquisa o Sensoriamento Remoto vai muito além de uma técnica, ou seja, ele é uma metodologia que a partir de diferentes técnicas (aplicação de índices, composição de bandas, modelagens) permite a extração de informações sem que, haja efetivamente, contato físico entre o pesquisador e o seu objeto de interesse.

Atualmente, nosso planeta tem sido imageado por sensores localizados em diferentes satélites, que geram uma grande diversidade de dados os quais muitas vezes, podem ser acessadas gratuitamente, via internet, junto a diferentes instituições. Dependendo da fonte e do recorte espaço-temporal que se deseja, é possível inclusive, obter séries históricas a partir da década de 70 do século XX. Essas possibilidades, podem potencializar a pesquisa permitindo uma análise mais sistemática dos diferentes sistemas presentes na Terra.

No que se refere a esses sistemas, no entanto se atentando ao atmosférico, sabe-se que quando suas dinâmicas fogem dos padrões normais seus resultados podem gerar modificações, significativas, nos locais de ocorrência interferindo na vida das pessoas e no equilíbrio do ambiente. Nesse último, as consequências podem ter implicações irreversíveis, principalmente, quando se trata de sistemas frágeis como é o caso dos manguezais.

Quanto a isso, Imbert (2018) tentando entender as repercussões de perturbações de furacões na dinâmica de manguezais no leste do Caribe, aponta que nos últimos anos têm aumentado significativamente a frequência desse tipo de evento na área pesquisada. Dentre os questionamentos levantados pelo autor está a preocupação quanto a resistência e recuperação das espécies de mangues. Ao comparar as espécies *Avicennia germinans* e *Rhizophora mangle*, o autor identificou que a segunda é bem menos resistente a ação de furacões. Quanto a recuperação, o tempo médio necessário para essas espécies fica em torno de 23 anos (IMBERT, 2018).

Outro episódio envolvendo evento climático extremo, agora no Brasil, foi identificado quando, no dia 1 de junho de 2016, a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim foi atingida por uma forte chuva de granizo destruindo parte do mangue. (SEVERINO et al, 2018). Diante disso, são levantados alguns questionamentos acerca de: Como está a paisagem da área atingida pela chuva de granizo no dia 1 de junho de 2016; quais as consequências do impacto para o ambiente do manguezal; quais as dimensões desse impacto para a bacia a qual a área pertence; e quais metodologias são capazes de registrar tal acontecimento de forma detalhada.

Como já dito, o ecossistema manguezal apresenta uma série de particularidades/especificidades que precisam ser detalhadas e analisadas. Sua localização, apenas em regiões tropicais e nas áreas de contato do continente com o oceano, pode fornecer importantes informações para seu manejo, considerando sua conservação/preservação. Além do mais, pesquisas utilizando o Sensoriamento Remoto nesses ambientes, principalmente relacionadas a eventos climáticos extremos, ainda não são suficientes para que possamos entender com mais profundidade toda sua dinâmica.

Sendo assim, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, por meio de imagens de satélites de alta resolução (Temporal, Radiométrica e Espectral), as consequências do evento climático extremo ocorrido, no dia 1 de junho de 2016, nos mangues da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim, localizada em Aracruz (ES).

REFERÊNCIAS

- IMBERT, Daniel. Hurricane disturbance and forest dynamics in east Caribbean mangroves. **Ecosphere**, v. 9, n. 7, p. 1-13, 2018.
- MENESES, P. R., & ALMEIDA, T. D. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- ROCHA, P. A. **Solos do manguezal da Baía de Guarapari – ES**: mineralogia e fósforo como indicador de contaminação por esgoto doméstico. 2016. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Mangue e Manguezal. 1aed.Brasília, D.F.: **ICMBio**, 2018a, p. 17-22.
- _____. A diversidade do ecossistema manguezal. 1aed.Brasília, D.F.: **ICMBio**, 2018b, p. 23-36.
- SERVINO, Ricardo Nogueira; Gomes, Luiz Eduardo de Oliveira; Bernardino, Angelo Fraga. Extreme weather impacts on tropical mangrove forests in the Eastern Brazil Marine Ecoregion. **Science of the Total Environment**. New York, USA; n. 628, p.233-240, 2018. doi:10.1016/j.scitotenv. 2018.02.068.
- WALTERS, B. B; Ronnbacck, P.; Kovacs, J. M.; Crona, B.; Hussain, S. A.; Badola, R.; Primavera, J. H.; Barbier, E.; Dahdoucha-guebas, F. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: a review. **Aquatic Botany**, v. 89, p. 220-263, 2008. Disponível em <https://core.ac.uk/download/pdf/207692921.pdf>. Acessado em 21 de maio de 2021.

CAPÍTULO 1

Avaliação do impacto de evento climático extremo em mangues do litoral do Sudeste brasileiro a partir dos índices de vegetação NDVI, SAVI e LAI

RESUMO

Dentre os variados ambientes presentes no planeta, que merecem a devida atenção, por possuírem particularidades e especificidades de ordens químicas, físicas e biológicas, faz-se um destaque para os manguezais. Presente em vários lugares do planeta, esses ecossistemas, da planície costeira, localizam-se, majoritariamente, nas zonas intertropicais em locais específicos de encontro de águas continentais e oceânicas. Os manguezais assumem papel crucial para uma grande diversidade de espécies que encontram, nesse ambiente, condições que lhes possibilitam viver e reproduzir. Para além disso, esse ecossistema, também, é para muitos moradores locais, como pescadores tradicionais e caranguejeiros, um lugar de geração de renda assumindo, portanto, importante função socioeconômica. No mais, os manguezais, por meio das vegetações, também atuam como importantes sequestradores e estocadores de carbono. Ademais, os manguezais servem como zona de amortecimento entre o continente e o oceano recebendo os impactos de variados eventos como, por exemplo, os extremos, advindos de processos que podem ser resultado de mudanças climáticas. De modo geral, tem-se que desenvolver pesquisas em manguezais não é uma tarefa fácil, haja vista as características desse ambiente que, em algumas áreas, além de apresentar oscilações no nível da água, devido a dinâmica das marés, também dificulta a locomoção por causa da profundidade dos sedimentos e (ou) pela consistência variada do solo. Outro fator que impõe dificuldades ou impossibilita os deslocamentos nesses locais, deve-se às características de algumas espécies de vegetação que, devido ao processo de adaptação, possuem raízes entrelaçadas formando um tipo de cerca natural. Desse modo, dentre as metodologias menos invasivas capazes de proporcionar variadas análises diminuindo os custos com deslocamento e otimizando o tempo, destaca-se o Sensoriamento Remoto (SR). Diante disso, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, a partir de dados espectrais do sensor MSI/*Sentinel-2*, a eficácia do NDVI e do SAVI na caracterização do desfolhamento - descrito pelo IAF - e da consequente perda de vigor do mangue frente ao evento climático extremo ocorrido, no dia 1 de junho de 2016, nos mangues da Reserva de

Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim, localizada em Aracruz (ES). Para alcançar o objetivo foi feita a aplicação de índices em séries temporais compreendidas entre fevereiro de 2016 (antes do evento) e dezembro de 2020. Nos resultados, são apresentados tanto mapas temáticos quanto gráficos estatísticos referentes aos índices utilizados. Vale destacar, que todos esses registraram tanto o impacto da tempestade de granizo quanto a capacidade de reação do mangue frente a essa.

Palavras-chave: índices de vegetação; ecossistema costeiro; sensoriamento remoto em manguezais; mudanças na paisagem.

ABSTRACT

Among the various environments on the planet which deserves true attention due to their chemical, physical and biological particularities and specificities, mangrove forests stand out. Present in several places around the planet, these coastal plains ecosystems are mostly located in the intertropical zones, in specific locations where continental and oceanic waters meet. Mangroves forests have a crucial role for a great diversity of species, which find in this environment the conditions for living and reproducing. Furthermore, this ecosystem is also - for local inhabitants such as traditional fishermen and crab collectors - a place for income generation, undertaking an important socioeconomic role. Moreover, mangrove forests, through their vegetation, also act as important carbon sequestrants and stockpilers. In addition, mangrove forests serve as a buffer zone between the continent and the ocean, taking the impacts of several events, as the extremes that arose from processes that might be a result of climate change. Generally, it is not an easy task to develop researches in mangrove forests, given the characteristics of these environments which, in some areas, besides presenting fluctuations in the water level due to tidal dynamics, also makes displacement difficult because of the depth of the sediments and (or) the assorted consistency of the soil. Other factors that impose difficulties or precludes displacement in these places are the characteristics of some species of vegetation that, due to the adaptation process, have intertwined roots forming sort of a natural fence. Therefore, the general objective of this research was to evaluate, based on spectral data from the MSI/Sentinel-2 sensor, the effectiveness of the NDVI and SAVI in the characterization of defoliation - described by the IAF - and the consequent loss of mangrove vigor against the extreme weather event that took place on June 1, 2016, in the mangroves of the Piraquê Açumirim Municipal Sustainable Development Reserve, located in Aracruz (ES). In order to achieve the objective, indexes were applied in time series between February 2016 (before the event) and December 2020. In the results, both thematic maps and statistical graphics referring to the used indexes are presented. It is worth noting that all of them managed to register both the impact of the hailstorm and the mangrove's ability to react to it.

Keywords: vegetation index; coastal ecosystem; remote sensing; change in landscape.

1 INTRODUÇÃO

A Terra com seus, aproximados, 4,5 bilhões de anos é um grande sistema vivo integrante da Via Láctea e essa, juntamente a outras dezenas de galáxias, formam um conglomerado que, somados a tantos outros, compõem o nosso universo. Numa relação escalar inversa, do macro para o micro, tem-se que as grandezas das relações chegam a níveis microscópicos. Como pode ser observado tudo é uma questão de escala, sendo essa fundamental para se entender tanto o funcionamento de determinados sistemas quanto suas inter-relações.

Dentre os variados ambientes presentes no planeta, que merecem a devida atenção, por possuírem particularidades e especificidades de ordens químicas, físicas e biológicas, faz-se um destaque para os manguezais. Localizados, majoritariamente, nas zonas intertropicais, esses ecossistemas da planície costeira são formados em locais específicos de encontro de águas continentais e oceânicas.

Para se evitar qualquer tipo de confusão, faz-se necessário diferenciar mangue de manguezal. Em síntese, é possível dizer que o mangue se refere aos diferentes grupos de vegetações que se localizam em um manguezal que, por sua vez, é o local onde vários organismos se interagem. Dessa maneira, o termo manguezal será, aqui, utilizado para se referir ao ecossistema.

Presente em vários lugares do planeta, os manguezais assumem papel crucial para uma grande diversidade de espécies que encontram, nesse ambiente, condições que lhes possibilitam viver e reproduzir. Para além disso, esse ecossistema, também, é para muitos moradores locais, como pescadores tradicionais e caranguejeiros, um lugar de geração de renda assumindo, portanto, importante função socioeconômica. No mais, os manguezais, por meio das vegetações, também atuam como importantes sequestradores e estocadores de carbono (SOAVINSKI; MARETTI, 2018). Quanto a isso, ao se fazer comparações com outros ambientes, tanto na capacidade de sequestro quanto de estoque desse elemento, os mesmos autores afirmam que os manguezais tropicais chegam a se equivaler ou superar outras florestas tropicais úmidas e, até mesmo, a amazônica.

Ademais, os manguezais servem como zona de amortecimento entre o continente e o oceano recebendo os impactos de variados eventos como, por exemplo, os extremos, advindos de processos que podem ser resultado de mudanças climáticas. Nesse sentido, dentre tantos outros, pesquisadores como: Santos *et al.* (2012); Bernardino *et al.* (2015); Kawamuna *et al.* (2017); e Servino *et al.* (2018), têm dedicado a estes geoambientes parte de suas energias em

pesquisas que, apesar da importância e evolução, ainda não são suficientes para explicar suas complexidades.

De modo geral, tem-se que desenvolver pesquisas em manguezais não é uma tarefa fácil, haja vista as características desse ambiente que, em algumas áreas, além de apresentar oscilações no nível da água, devido a dinâmica das marés, também dificulta a locomoção por causa da profundidade dos sedimentos e (ou) pela consistência variada do solo. Outro fator que impõe dificuldades ou impossibilita os deslocamentos nesses locais, deve-se às características de algumas espécies de vegetação que, devido ao processo de adaptação, possuem raízes entrelaçadas formando um tipo de cerca natural (NOVELLI *et al.*, 2016; NOVELLI, 2018a; NOVELLI, 2018b).

Por conseguinte, devido a essas e outras particularidades, pesquisas que envolvem esse ecossistema costumam apresentar custos elevados, dificultando, assim, futuros desdobramentos e aprofundamentos. Desse modo, dentre as metodologias menos invasivas capazes de proporcionar variadas análises diminuindo os custos com deslocamento e otimizando o tempo, destaca-se o Sensoriamento Remoto (SR). Quanto a esse, Meneses e Almeida (2012, p. 3) o define como “[...] uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja um contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto”.

Uma proposta para a evolução desse conceito é que o SR não é simplesmente uma técnica, pois está diretamente atrelado a possíveis caminhos metodológicos para resolução de determinado problema de pesquisa. Desse modo, o Sensoriamento Remoto é uma metodologia que a partir de diferentes técnicas (aplicação de índices, composição de bandas, modelagens) permite a extração de informações sem que, haja efetivamente, contato físico entre o pesquisador e o seu objeto de interesse.

A utilização do Sensoriamento Remoto e das transformações espectrais, comumente denominadas índices de vegetação, para o entendimento de dinâmicas de florestas de mangue, tem-se tornado cada vez mais frequentes entre pesquisadores. Quanto a isso, Kawamuna *et al.* (2017) além de fazerem uma classificação de imagem de modo a diferenciar as florestas de mangues das demais vegetações presentes na área costeira de Banyuwangi (regência da província de Java Oriental, na Indonésia), também, fizeram a aplicação do NDVI para qualificarem o vigor vegetativo das mesmas.

Com a mesma metodologia, no entanto objetivando diferenciar e entender qual o melhor procedimento para se obter informações relacionadas ao volume foliar dos mangues, Tian *et al.* (2017) trabalharam em um manguezal de 68 km² localizado na província de Guangxi, na China.

Como técnica, os autores fizeram a aplicação dos índices LAI e NDVI nas imagens provenientes tanto do *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) quanto do satélite *WorldView-2*.

Para além desses, George *et al.* (2018), em sua pesquisa na Baía de Bengala (Índia), fizeram proposições quanto as bandas e os índices espectrais ideais para a obtenção do LAI de vegetação de mangue. Dessa maneira, ao trabalhar com imagens hiperespectrais do sensor Hyperion à bordo do satélite EO-1, os autores também fizeram a aplicação dos índices NDVI e SAVI. Em suas notas conclusivas, eles identificaram que as bandas do infravermelho de onda curta (SWIR) e infravermelho próximo (NIR) foram as que apresentaram maior potencial para a formação do índice LAI.

Quanto a análises de impactos de eventos climáticos extremos em áreas de mangues, a partir de sensores remotos, chama-se atenção para a pesquisa desenvolvida por Servino *et al.* (2018). Nessa, para quantificar o tamanho da área atingida por uma tempestade de granizo ocorrida, em 2016, em dois estuários no estado do Espírito Santo (Brasil), os autores se valeram de séries históricas do NDVI derivado de dados espectrais do sensor OLI/Landsat8. Dentre os resultados, os autores identificaram mais de 500 hectares de mangues totalmente destruídos pela tempestade.

Apesar da importância da contribuição dos autores, devido ao tamanho e importância desse manguezal, ainda há necessidade de maior entendimento da repercussão do evento no ambiente. Para isso, a aplicação tanto do NDVI quanto de outros índices advindos de sensores com capacidade de fornecerem dados numa escala mais detalhada é de real importância.

Diante disso, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, a partir de dados espectrais do sensor MSI/*Sentinel-2*, a eficácia do NDVI e do SAVI na caracterização do desfolhamento - descrito pelo IAF - e da consequente perda de vigor do mangue frente ao evento climático extremo ocorrido, no dia 1 de junho de 2016, nos mangues da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú-Mirim, localizada em Aracruz (ES).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

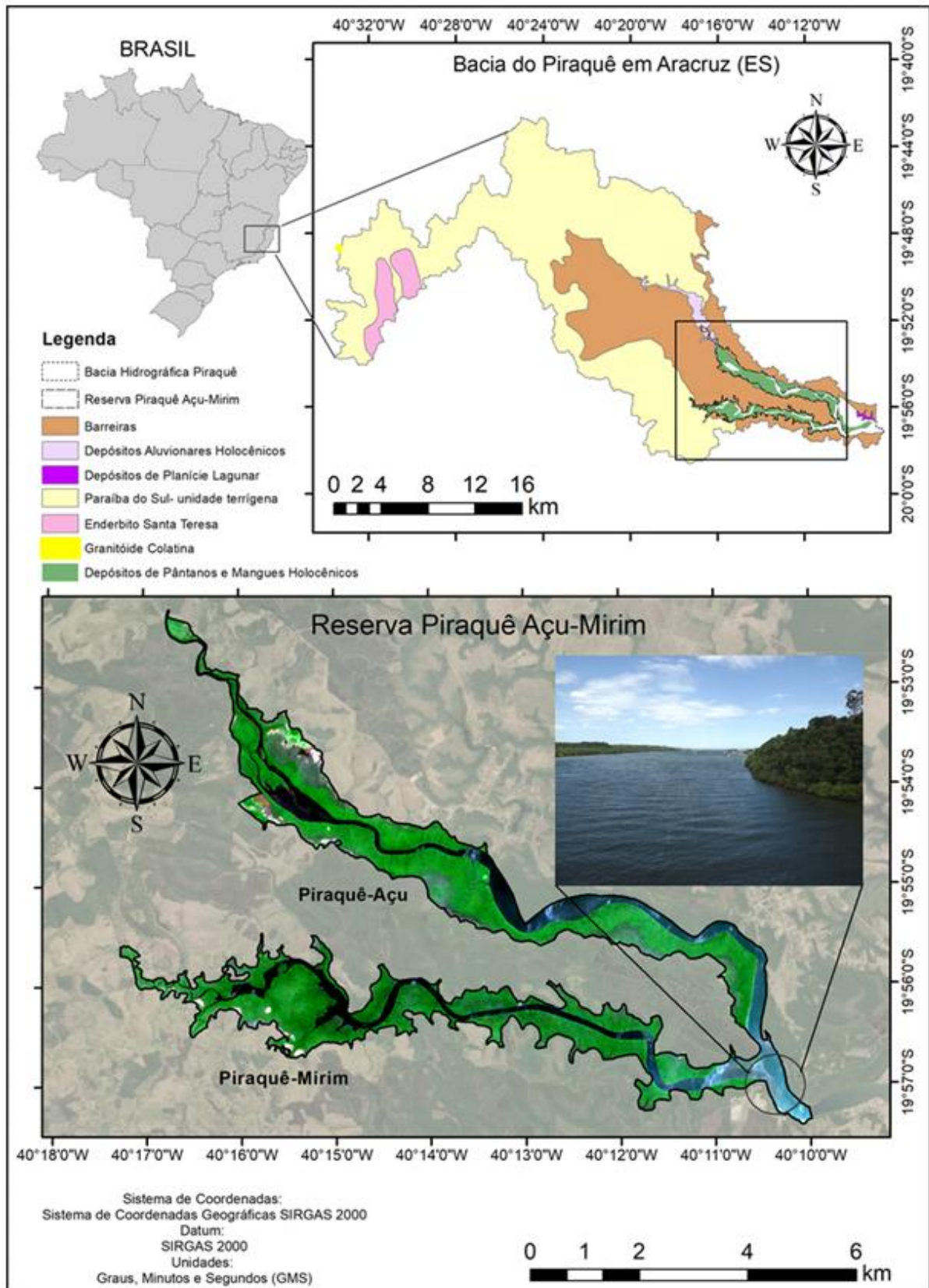
Para imprimir maior detalhamento aos processos metodológicos utilizados nessa pesquisa, este tópico está dividido da seguinte forma: caracterização da área de pesquisa; equipamentos e ferramentas utilizadas; fonte e base de dados; etapas de desenvolvimento; e procedimentos metodológicos.

2.1 Caracterização da área de pesquisa

A área pesquisada (manguezal) encontra-se na Ecorregião Marítima do Brasil Oriental possuindo duas estações bem definidas de modo que os meses de abril a setembro referem-se ao inverno seco e os de outubro a março ao verão úmido (BERNARDINO *et al.*, 2015).

O manguezal em questão, localiza-se em dois sistemas estuarinos que fazem parte da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim a qual ocupa uma área de 2079 hectares, no município de Aracruz (ES), sudeste do Brasil. Essa reserva, está contida na microbacia do Piraquê tendo como rios principais o Piraquê Açu e o Piraquê Mirim, que ao se encontrarem, próximo à foz, apresentam uma forma análoga à letra Y (Figura 01). Nesse local, as profundidades das águas variam entre 4 a 16 metros (LANA; BERNARDINO, 2018).

Figura 01- Localização da área de pesquisa.



Fonte: O autor.

Outra característica que abrange tanto os estuários quanto a Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS), refere-se à compartimentação topográfica e a estrutura geológica. Numa escala de 1:250.000 (IBGE, 2019), tem-se que a RDS se localiza nos depósitos de pântanos e mangues holocênicos sendo cercada, quase totalmente, pelo Grupo Barreiras, que há tempos vem sendo dissecado por processos intempéricos naturais e associados à dinâmica econômica regional.

Esses processos interferem diretamente na drenagem da bacia fazendo com que os rios se encontrem encaixados em vales profundos e estreitos. Além disso, devido ao entalhamento do relevo, em muitos locais localizados na margem direita do rio Piraquê-Mirim ocorrem afloramentos de rochas e expressivos campos de matacões.

O uso e ocupação do entorno da RDS não é muito heterogêneo, apesar de existirem: áreas destinadas a agropecuária; com resquícios da mata atlântica, que em sua maioria fazem parte de reservas indígenas; e construções urbanas, a maior parcela é composta por plantações de espécies vegetais exóticas (*Eucalyptus*).

Além disso, destaca-se que das seis espécies de mangues encontradas no Brasil três estão presentes nesses estuários, sendo elas: *Avicennia schaueriana*; *Laguncularia racemosa*; e *Rhizophora mangle*. Dessas, a *Rhizophora mangle* (mangue vermelho) assume maior representatividade em área quando comparada às demais (SERVINO *et al.*, 2018).

Essas espécies, combinado às demais, são essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos desempenhadas pelo manguezal. Esses são de repercussão tanto local, como é o caso das populações tradicionais que dependem tanto da coleta de caranguejo como da pesca para o sustento de suas famílias, quanto global relacionado a espécies marinhas que fazem dali o lugar ideal para a reprodução.

2.2 Equipamentos e ferramentas

Tanto a aquisição quanto o processamento dos dados foram feitos utilizando as infraestruturas do Laboratório de Geomorfologia do Quaternário, no Departamento de Geografia (DGE), da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Todos os dados utilizados nessa pesquisa foram trabalhados e processados nos *softwares* SNAP e ArcGis™ 10.5.

2.3 Fonte e base de dados

Todos os dados utilizados foram adquiridos gratuitamente junto a órgãos governamentais ou instituições vinculadas a eles. Desse modo, os arquivos *rasters* com as imagens do satélite *Sentinel-2* foram baixadas no site oficial do programa Copernicus, vinculado a European Space Agency (ESA). Além desses, também foram utilizados arquivos vetoriais contendo tanto os limites políticos administrativos das unidades federativas do Brasil quanto a área referente à Reserva de Desenvolvimento Sustentável pesquisada. Esses arquivos foram adquiridos, respectivamente, junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e à Secretaria de Meio Ambiente do município de Aracruz (ES).

2.4 Etapas de desenvolvimento

De modo geral, os procedimentos adotados nessa pesquisa seguiram uma sequência de sete etapas que foram desenvolvidas na seguinte ordem:

- I. Localização da área impactada a partir de imagens de satélites e definição de recorte temporal para aquisição de dados;
- II. Aquisição de dados para geração de índices;
- III. Aplicação dos índices espectrais *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil-Adjusted Vegetation Index* (SAVI) e do índice biofísico *Leaf Area Index* (LAI);
- IV. Delimitação da área de interesse e geração dos pontos amostrais;
- V. Extração dos valores dos pontos amostrais e geração de gráficos para a avaliação do impacto;
- VI. Exploração da realidade de campo;
- VII. Confecção e organização dos *layouts* referentes aos dados gerados na pesquisa.

2.5 Procedimentos metodológicos

Com o conhecimento prévio sobre o evento climático ocorrido na RDS deu-se início a etapa (I), que contou com a utilização da plataforma *Google Earth Pro*. Com ela, a partir da coleção histórica de cenas, foi possível fazer o enquadramento temporal do evento, que teve como base a visualização de mudanças no padrão de cobertura vegetal da área. Tais mudanças

caracterizavam um expressivo desfolhamento e quebra da vegetação de mangue. Esse procedimento foi fundamental para a realização da etapa (II), pois permitiu a definição das datas de interesse, que ficaram compreendidas entre os anos de 2016 e 2020.

No que se refere a aquisição de dados (etapa II), apesar de existir na rede muitas imagens de satélites disponíveis, gratuitamente, para todo o território brasileiro, em regiões litorâneas essa disponibilidade diminui, substancialmente, devido a constante presença de nuvens. Essa situação dificulta a padronização das datas, pois nos bancos de dados abertos fica difícil encontrar imagens, sem nuvens, compreendidas em um mesmo período numa sequência anual.

Diante disso, após analisar, criteriosamente, todas as datas disponíveis para o local de interesse, entre os anos de 2016 a 2020, levando em consideração tanto as resoluções quanto a ausência de nuvens, sobre a mesma, optou-se por utilizar as imagens do satélite *Sentinel-2* que além de um tempo de revisita de 5 dias, apresenta resolução radiométrica de 12 bits e resoluções espaciais de 10 m e 20 m, nas bandas utilizadas.

Dessa maneira, selecionou-se 6 arquivos com as seguintes datas: 11/02/2016; 09/08/2016; 26/01/2017; 11/05/2018; 21/04/2019; e 10/05/2020. Dentre essas, a de fevereiro de 2016 representa o local antes da ocorrência do evento climático, que se deu no dia 1 de junho do mesmo ano e, portanto, serviu de base comparativa para as demais.

Quanto a aquisição das imagens, salienta-se que essas foram baixadas no Nível-1C, ou seja, elas passaram por processos de ortorretificações de refletâncias no topo da atmosfera (*Top Of Atmosphere-TOA*). Além disso, elas, também, passaram por máscaras de terra/água e nuvem. Ainda em relação as imagens, destaca-se que para dar melhor qualidade aos produtos foi feita, utilizando o pacote Sen2Cor do *software* SNAP, as devidas correções atmosféricas e radiométricas tendo como produto final imagens no Nível-2A, na qual as ortorretificações estão na base da atmosfera (*Bottom Of Atmosfera-BOA*).

Feito isso, partiu-se para a etapa (III) que diz respeito a geração dos índices *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil-Adjusted Vgetation Index* (SAVI) e *Leaf Area Index* (LAI). Como todos esses índices fazem parte do pacote de opções do SNAP, optou-se por utilizá-lo para a geração desses. Dessa maneira, o primeiro a ser gerado foi o NDVI que, dentre os variados índices radiométricos, está entre os mais aplicados em pesquisas ambientais (PEREIRA *et al.*, 2018).

Proposto por Rouse *et al.* (1973), o NDVI é um índice que, baseado na resposta espectral, possui, dentre outras funcionalidades, a capacidade de fornecer informações acerca do vigor da vegetação. Para sua obtenção, o *software* efetua a divisão do resultado da diferença

das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (*Red*) pela soma dessas mesmas (Equação 1).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}} \quad (1)$$

Nesse índice, os valores variam no entre -1 a 1 de modo que valores negativos são, geralmente, respectivos a superfícies com presença de água ou lugares com cobertura de nuvens e valores positivos, porém próximos de 0, indicam que os alvos podem ser tanto solo exposto quanto plantas com vigor vegetativo muito baixo. Com relação ao indicativo de baixo vigor, essa condição pode ser resultante tanto de processos naturais, relacionados às sazonalidades climáticas (situação comum em plantas caducifólias e semi-caducifólias), quanto outros de causas variadas como, por exemplo, deficiências nutricionais, ataques de pragas, intervenção antrópica, e anormalidades climáticas.

Em prosseguimento à presente etapa, efetuou-se a geração do SAVI (Equação 2) que também é um índice relacionado a vegetação. Este, proposto por Huete (1988), se diferencia do NDVI por incorporar em sua equação matemática variáveis que tem como função levar em consideração os locais que apresentam solo exposto. Desse modo, o *software*, ao processar a equação, correlaciona dados do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (*Red*) a uma constante (L). Essa constante, serve para ajustar a variação dos valores, que estão compreendidos entre 0,25 e 1, em função da cobertura do solo (BORATO *et al.*, 2013).

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L)(\text{NIR} - \text{Red})}{(L + \text{NIR} + \text{Red})} \quad (2)$$

Quanto a isso, tem-se que 1 é indicativo de floresta com baixa densidade; 0,5 floresta de média densidade; e 0,25 floresta de alta densidade (HUETE, 1988). Diante disso, o valor da constante aqui empregado foi 0,5, pois dentro da poligonal utilizada, para gerar os índices, existem lugares tanto com presença de vegetação densa quanto de solo exposto. Tanto o processo de geração do SAVI, quanto o do NDVI, se dão por meio da resposta espectral dos alvos, no entanto, como já dito, eles se diferenciam pela variável do solo exposto.

Outro índice utilizado nessa pesquisa, que permitiu a obtenção de informações espaciais quanto a reação dos mangues diante da tempestade de granizo, foi o LAI. De modo geral, este é “[...] um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, constituindo-se, portanto, em um

índice biofísico, que é definido pela razão entre a área foliar de toda vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação” (BORATO *et al.*, 2013, p.7350).

Uma das vantagens desse método, a partir de imagens de satélite, deve-se ao fator não destrutivo, ou seja, não foi necessário arrancar as folhas das árvores para se ter uma estimativa das suas concentrações por unidade de medida. Outra vantagem, quando comparado ao método destrutivo, refere-se à acessibilidade, pois além de muitas árvores possuírem porte alto, situação que dificulta a coleta de material (folhas), esse procedimento envolve uma série de medidas de segurança, tendo em vista que muitas dessas árvores estão em locais de difícil acesso.

Ademais, a utilização de imagens de satélite permiti abranger áreas de variados tamanhos em diferentes períodos temporais possibilitando, portanto, uma visualização mais ampla do objeto de pesquisa. Diante disso, a utilização do LAI para áreas de mangues estão se tornando mais frequentes como, por exemplo, nas pesquisas de Silva (2012); Melo (2017); e Cavalcanti-Silva *et al.* (2018).

Assim como nos índices anteriores, o LAI foi obtido a partir do processo biofísico integrado presente no *Tool box* do SNAP. Para gerar esse índice o *software* utiliza dados tanto de angulações (zênite, zênite solar e azimute) quanto de reflectância de oito bandas (B3, B4, B5, B6, B7, B8A, B11 e B12). Todo esse processo se dá a partir de algoritmos de redes neurais (WEISS; BARET, 2016; KGANYAGO *et al.*, 2020).

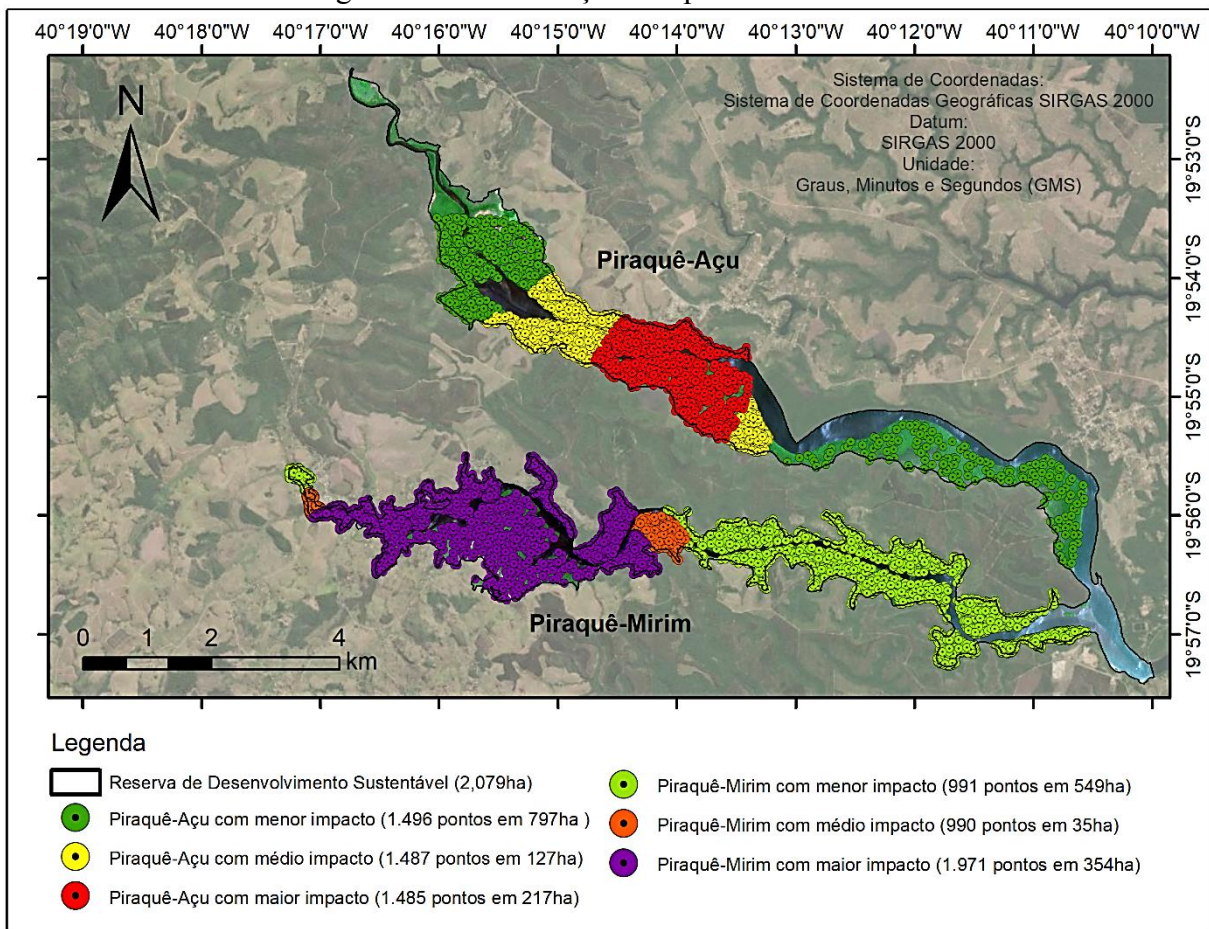
Com os índices gerados, partiu-se para a etapa (IV) na qual o primeiro procedimento, utilizando o *software* ArcGis™, foi o recorte da área de interesse (Reserva de Desenvolvimento Sustentável-RDS). Para tal, valeu-se do arquivo vetorial, disponibilizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Aracruz (ES). Dando sequência, o segundo procedimento realizado nessa etapa, que foi a delimitação das áreas de acordo com a intensidade do impacto. O critério utilizado para tal, foi a comparação das imagens e as variações espaciais dos valores dos índices entre as mesmas. Dessa maneira, o produto que melhor destacou as variações de acordo com o grau de impacto foi o do NDVI de 2017.

Como a RDS é composta por dois estuários (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim) e esses tiveram repercussões distintas frente ao ocorrido, eles foram analisados separadamente e subdivididos em locais de maior, médio e menor impacto. Feito essas subdivisões, partiu-se para o terceiro procedimento dessa etapa que foi a geração dos pontos amostrais. Esses, por sua vez, foram gerados aleatoriamente, utilizando a ferramenta *Create Random Points* do *software* ArcGis™.

O critério utilizado para definição da quantidade de pontos para cada área, foi tanto o tamanho dessas quanto as variações espaciais dos valores. Desse modo, para cada uma das subdivisões de impacto (maior, médio e menor) do Piraquê-Açu foram lançados 1.500 pontos. No Piraquê-Mirim a distribuição se deu da seguinte forma: 2.000 pontos para o local de maior impacto; e 1.000 pontos para o de médio e menor. Ao término desse procedimento deu-se início ao quarto e último dessa etapa (IV), que foi a eliminação de pontos não representativos.

Para isso recorreu-se ao produto do NDVI de fevereiro de 2016, que representa a área antes do acontecimento do evento. Basicamente, o que se fez foi inserir todos os pontos amostrais nessa imagem e extrair os respectivos valores dos pixels. Com esses em mãos, partiu-se para a eliminação dos que apresentavam valores correlatos aos corpos d'água, ou seja, negativos. Tanto o número de pontos, com suas distribuições em função das áreas, quanto as subdivisões dessas, de acordo com cada estuário, podem ser observadas na Figura 02.

Figura 02 – Distribuição dos pontos amostrais.



Fonte: O autor.

Finalizado a etapa (IV), prosseguiu-se para a (V) na qual, para cada índice gerado, foi feita a extração dos valores dos pixels, sob os pontos amostrais, utilizando a ferramenta *Extract Values to Points* do software ArcGis™. Feito isso, todos os valores foram organizados em planilhas sendo gerados diferentes gráficos de análise estatística.

A sexta (VI) e penúltima etapa de desenvolvimento dessa pesquisa teve como objetivo principal, comparar os dados obtidos dos sensores remotos com a realidade de campo e fazer as devidas avaliações tanto do real estado dos mangues atingidos pela tempestade de granizo, quanto da capacidade dos índices aplicados em registrar as consequências do impacto desse evento climático, extremo, nesse ambiente.

Essa etapa, foi fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa, pois permitiu uma melhor apreensão e análise das consequências geradas pela tempestade de granizo nos mangues dos dois estuários (Piraquê Açu e Piraquê Mirim). Nesse sentido, de posse de um GPS Garmin 60 Cxs e mapas impressos, em diferentes escalas, foi estabelecido, via planejamento, um itinerário de percurso para o reconhecimento tanto da RDS bem como da microbacia que a engloba.

O trajeto, que foi realizado de carro e teve como ponto de partida a foz dos rios, se iniciou à margem direita do rio Piraquê-Mirim contornando a reserva e retornando pela margem esquerda do Piraquê-Açu ao ponto de origem. Durante o percurso, foram feitas diversas paradas que ocorreram tanto nos locais predefinidos quanto em outros. Essa exploração de campo, dentre outras coisas, permitiu a identificação dos diferentes níveis de impactos ocorridos na vegetação. Esses se mostraram correlatos às divisões estabelecidas na etapa (IV).

Além disso, foi possível a realização de registros tanto do estado dos mangues nas áreas impactadas como, também, da foz do rio principal (Piraquê Açu). Outros registros feitos, referem-se a locais com presença de afloramento de rochas, campo de matacão e representantes da microfauna local (caranguejo), dentre outros.

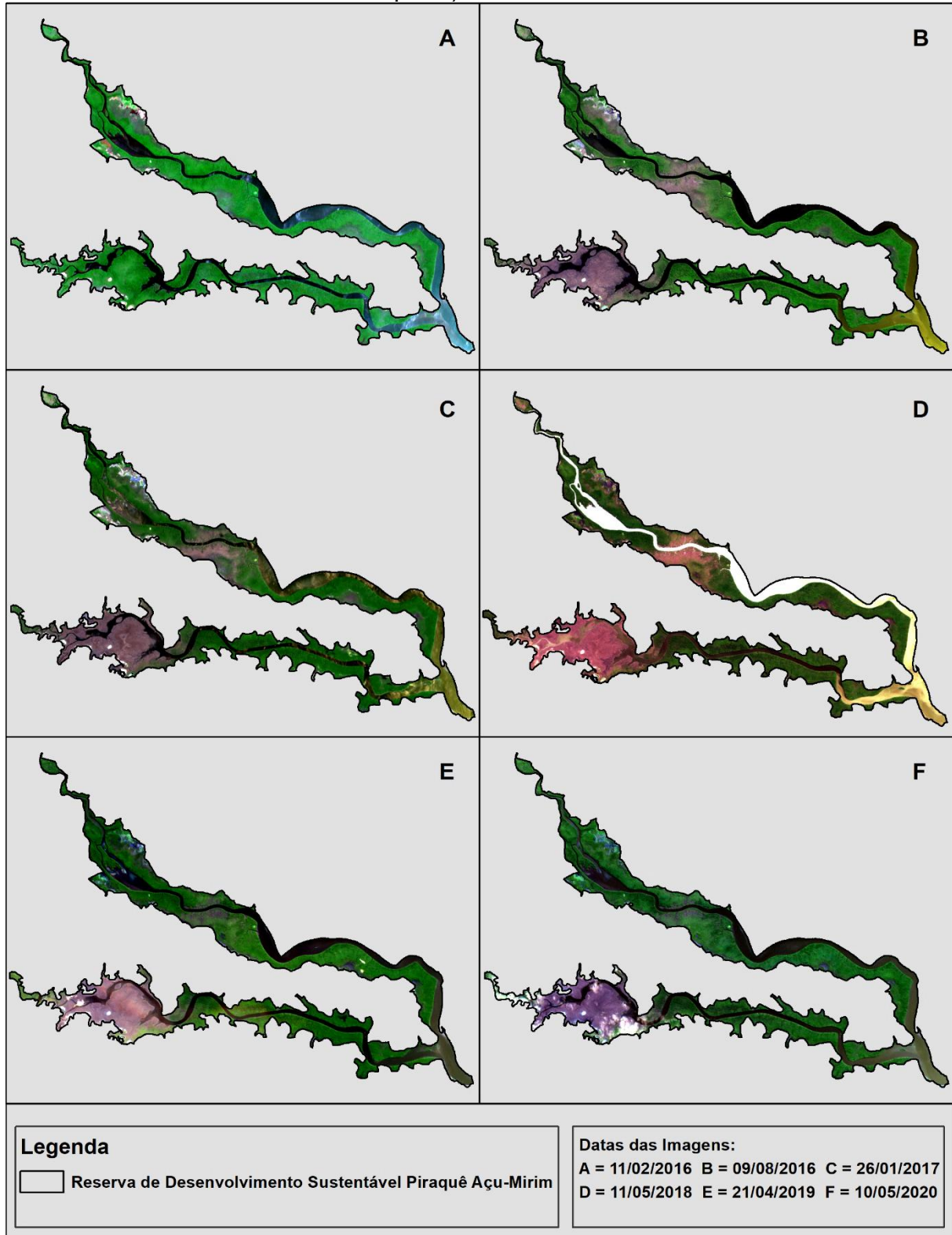
A sétima (VII) e última etapa de desenvolvimento dessa pesquisa consistiu na compilação de todos os produtos gerados nas etapas anteriores. Foi nessa etapa que se deu a confecção e organização dos *layouts* das figuras, que são referentes tanto aos dados gerados na pesquisa, oriundos dos índices aplicados nas imagens de satélites quanto dos diferentes gráficos estatísticos como, também, das imagens obtidas em campo.

Nessa etapa, buscou-se organizar os dados mantendo uma correlação entre as figuras apresentadas, ou seja, para cada data de imagem utilizada para gerar os índices e a composição de bandas foi atribuída uma letra do alfabeto. Essa organização, visou facilitar a articulação das

ideias no tópico referente à discussão dos resultados. Dessa maneira, para esses produtos todas as letras estão assim correlacionadas: (A) à data de 11 de fev. de 2016; (B) à 09 de ago. de 2016; (C) à 26 de jan. de 2017; (D) à 11 de maio de 2018; (E) à 21 de abr. de 2019; e (F) à 10 de maio de 2020.

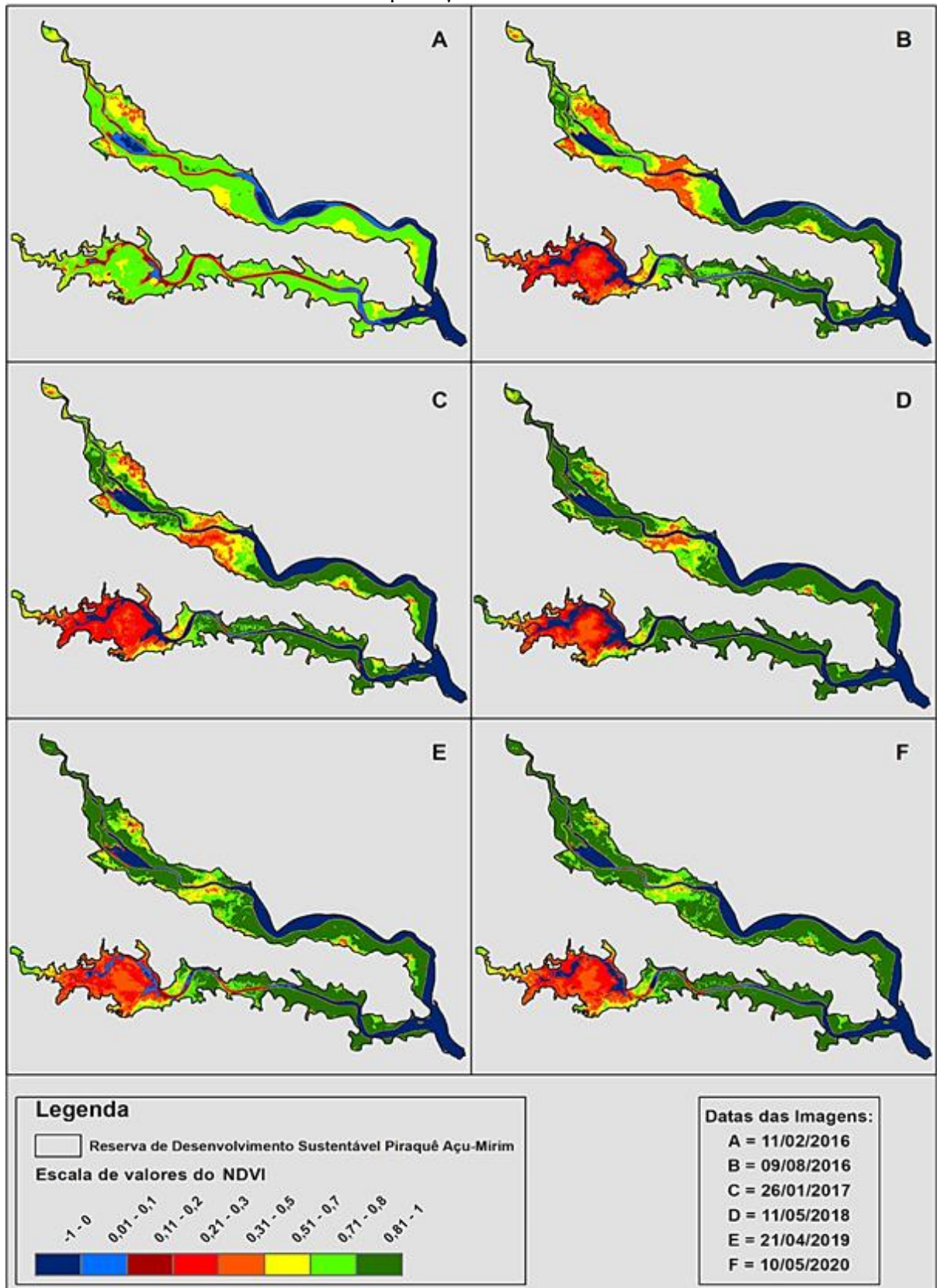
3 RESULTADOS

Figura 03 – Composição em cores verdadeira 432/RGB da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



Fonte: O autor.

Figura 04- NDVI gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



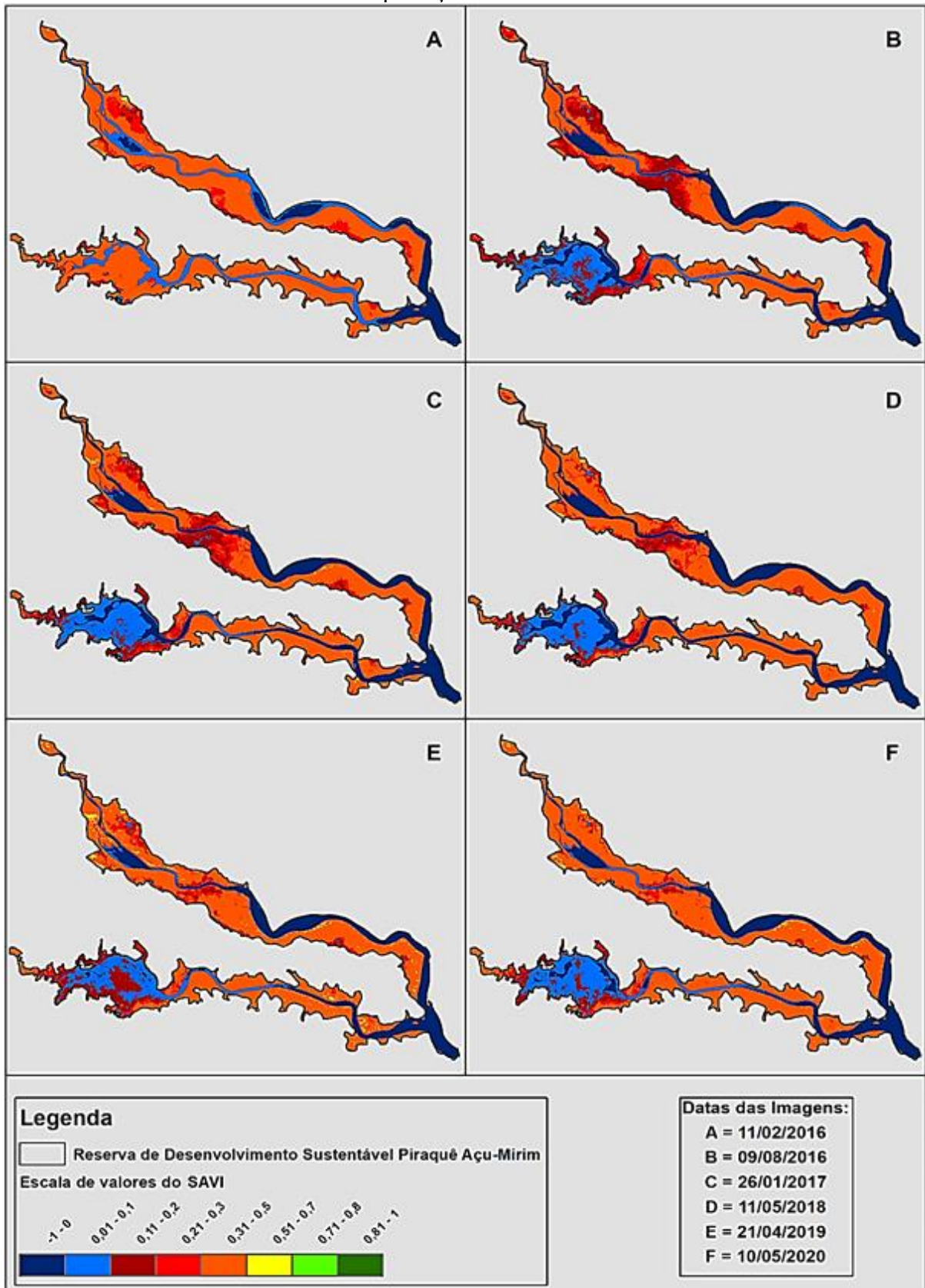
Fonte: O autor.

Figura 05- Gráficos estatísticos do NDVI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



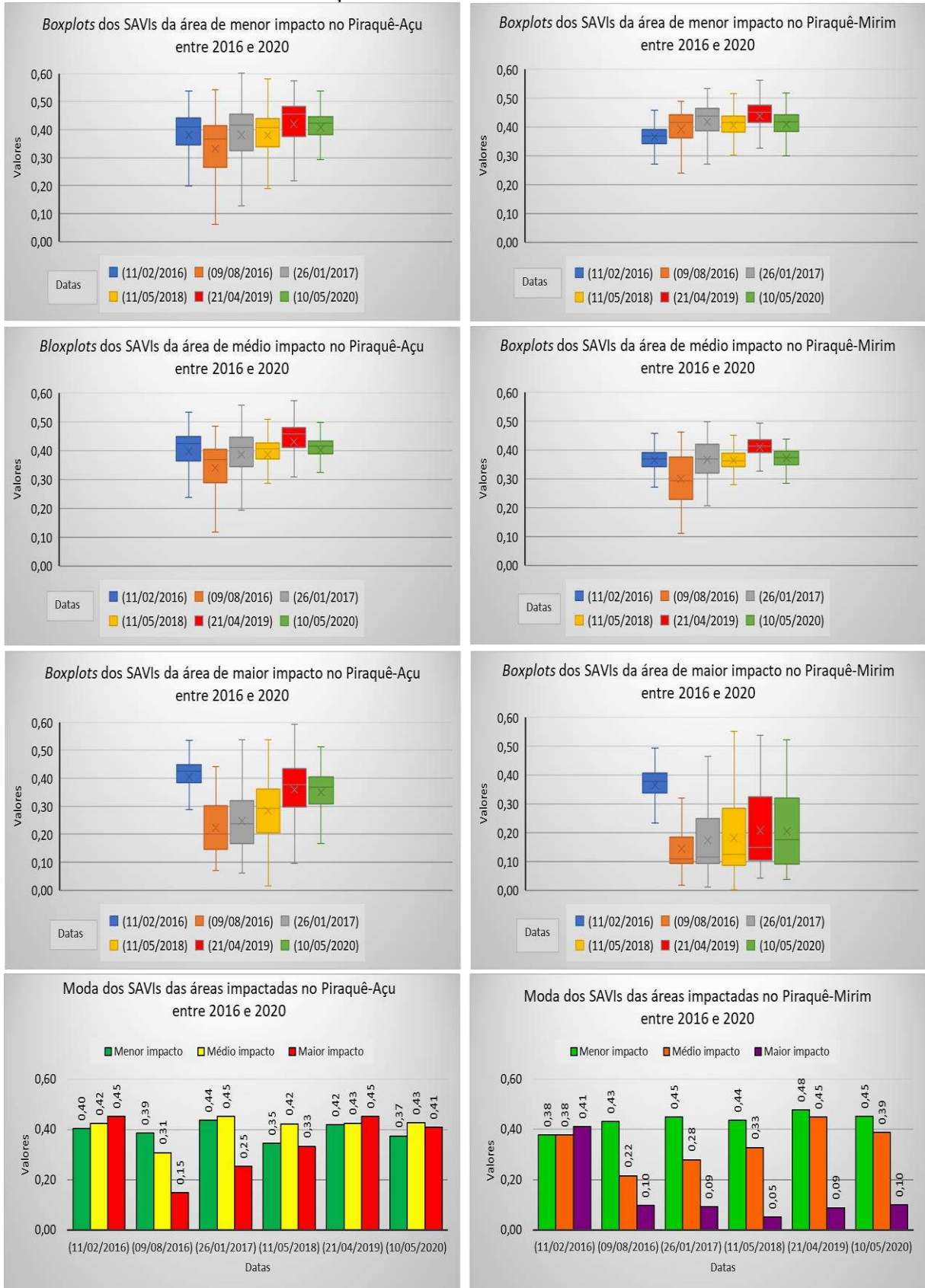
Fonte: O autor.

Figura 06- SAVI gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



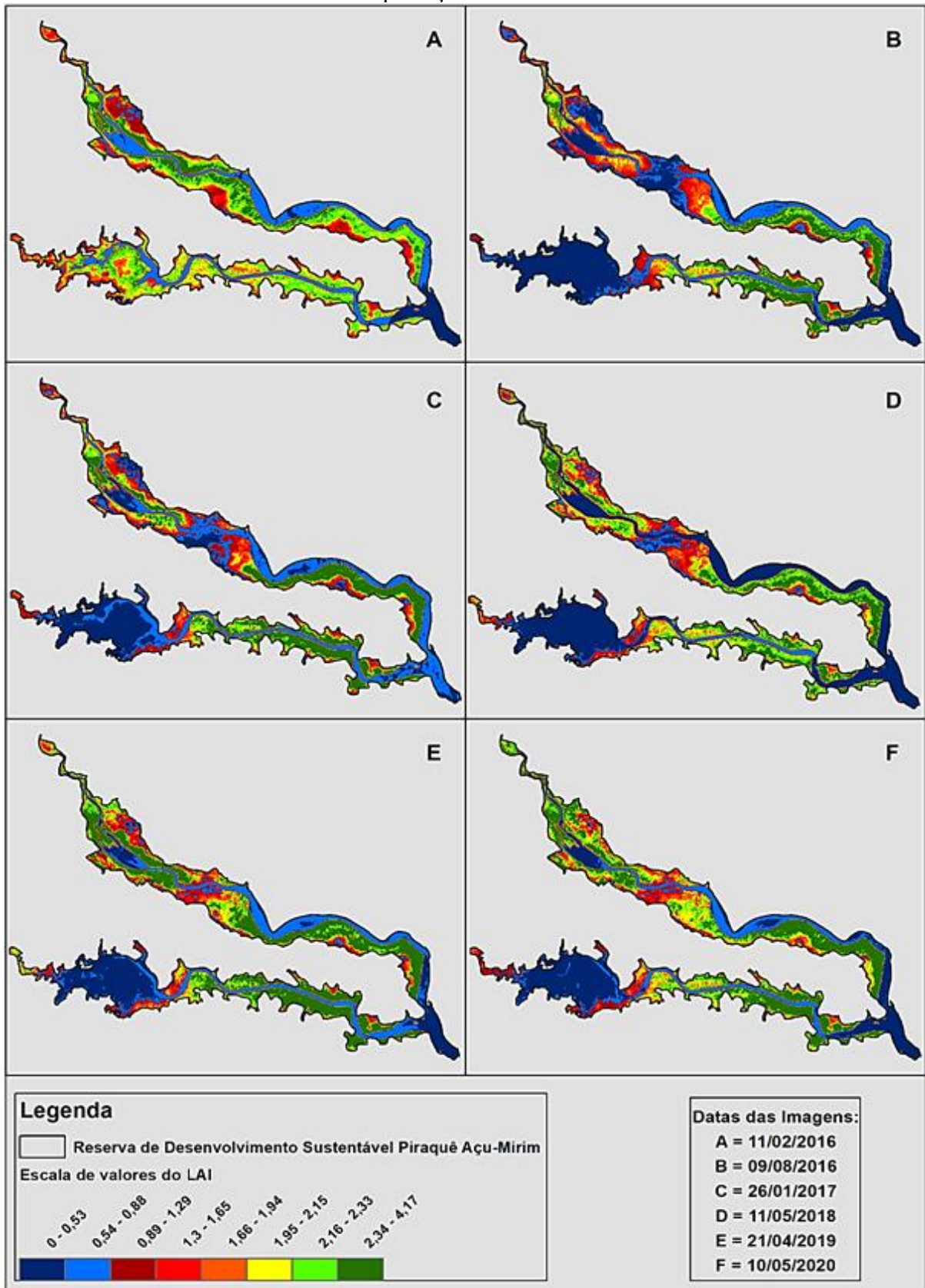
Fonte: O autor.

Figura 07- Gráficos estatísticos do SAVI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



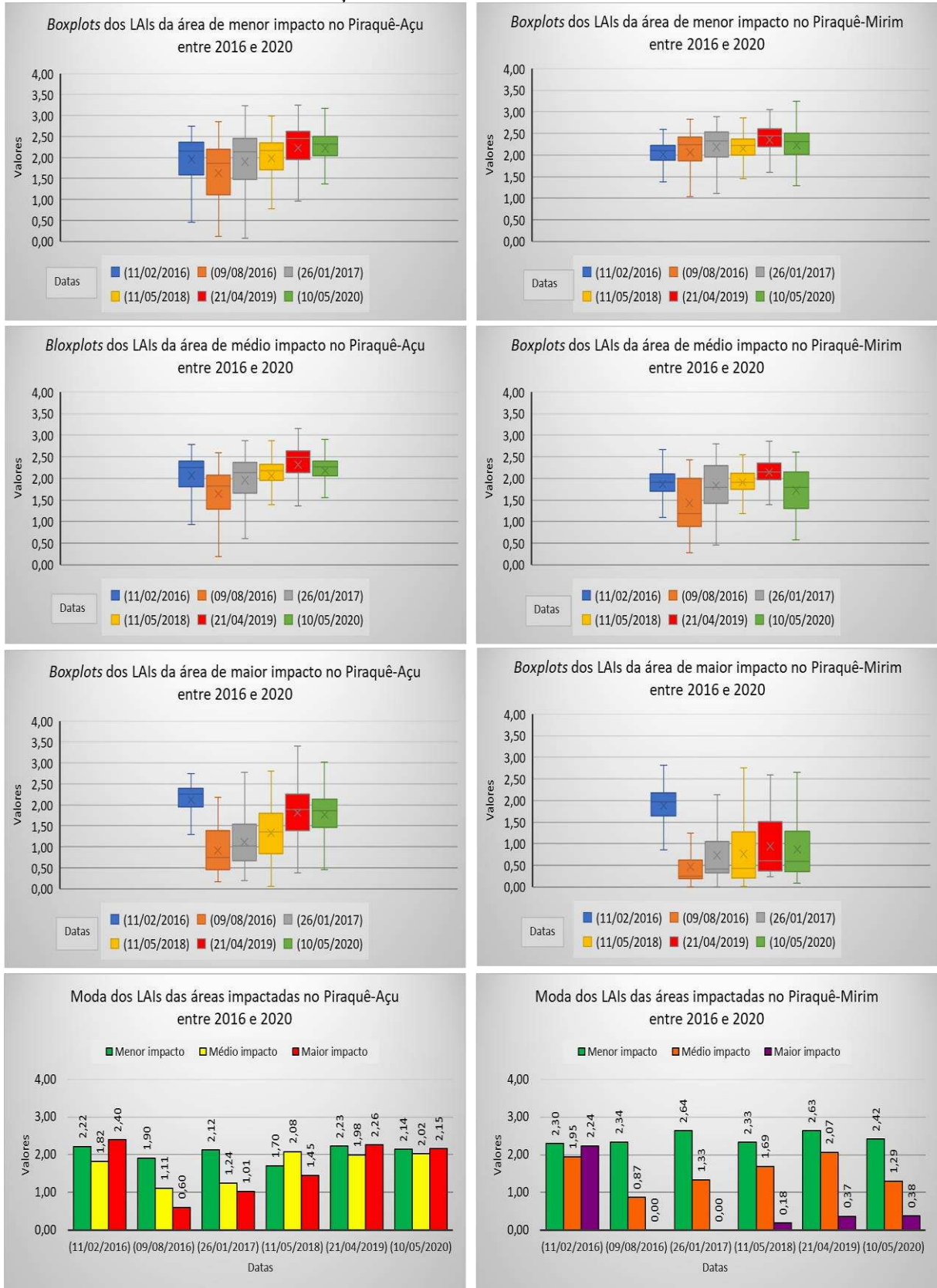
Fonte: O autor.

Figura 08- LAI gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.



Fonte: O autor.

Figura 09- Gráficos estatísticos do LAI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



Fonte: O autor.

4 DISCUSSÃO

Primeiramente, chama-se a atenção para as imagens do dia 11/02/2016 (Figura 04, Figura 06 e Figura 08) e seus respectivos produtos, resultado dos diferentes índices aplicados. Como já dito, anteriormente, essa imagem representa o local da pesquisa antes da tempestade de granizo e, portanto, foi utilizada como base na comparação com as demais. Além disso, dos três índices aplicados para essa data o que estabeleceu maior correlação com a imagem de cor verdadeira (Figura 03), quanto as diferenciações de alvos, foi o produto do NDVI (Figura 04).

Dessa maneira, os alvos em tons de azul e vermelho referem-se aos corpos hídricos e bancos de areia e os em tons de laranja, amarelo e verde são, respectivamente, solo exposto, vegetação rasteira e floresta de mangue. Com relação a esse último componente, é possível observar na legenda, que seus valores de NDVI estão compreendidos entre 0,71 e 0,8 podendo, desse modo, ser classificada como vegetação sadia.

Ainda em relação à data de 11/02/2016, mas, agora, analisando o SAVI (Figura 06-A) tem-se que este, por incluir na sua fórmula um valor de constante que amenizar as influências de solo exposto, promoveu uma generalização dos alvos. Tal generalização, mascarou em alguns locais, principalmente no Piraquê-Mirim, parcelas de vegetação rasteira.

Essa generalização pode ser evitada reduzindo o valor positivo da escala de sanidade da planta, ou seja, se substituir a escala de -1 a + 1 pela de -1 a +0,5 no mapa essas classes não serão mascaradas. No entanto, aqui não se fez essa alteração, pois isso impossibilitaria uma comparação direta entre esse índice (SAVI) e o NDVI. Dessa maneira, a escala utilizada foi a mesma do NDVI (-1 a +1), haja vista que ambos são índices indicadores de vigor vegetativo das plantas e o que se buscou a eficiência desses em áreas de mangues.

Quanto ao produto do LAI (Figura 08-A), tem-se que as áreas que apresentam pouca ou nenhuma presença de biomassa foliar são, justamente, os locais de vegetações rasteiras, corpos hídricos, bancos de areia e solo exposto.

Para o dia 09/08/2016 (B) percebe-se que em comparação à imagem de cor verdadeira, todos os índices registraram as mudanças provocadas pela tempestade de granizo. Tais mudanças são evidenciadas tanto pelas escalas de valores de cada índice quanto pelos dados estatísticos desses. Vale destacar, que o SAVI, novamente, promoveu generalizações na imagem, mas isso não inviabiliza a utilização desse índice, pois os valores extraídos dos pontos amostrais foram capazes de registrar as mudanças ocorridas. No entanto, como já dito, nessa pesquisa o NDVI se mostrou mais representativo.

Ao se analisar os produtos dos índices gerados para o dia 26/01/2017 (C), com exceção para o SAVI, o que se vê são que os resultados do LAI e do NDVI, mas principalmente desse último permitiram estabelecer, claramente, uma diferenciação entre as áreas impactadas nos seus variados graus. Desse modo, utilizando o índice em questão, dividiu-se cada estuário em áreas de menor, médio e maior impacto (Figura 02). Essa diferenciação, fica mais evidente ao se analisar os produtos estatísticos que além de demonstrarem, quantitativamente, a repercussão do evento climático na RDS, também, evidenciam os diferentes graus de resiliência entre o mangue do Piraquê-Mirim e do Piraquê-Açu.

Quanto aos produtos referentes ao dia 11/05/2018 (D), é possível observar uma suave modificação nos valores. Tais modificações são mais evidentes no Piraquê-Açu e se deram tanto nas áreas de médio quanto de maior impacto. De modo geral, pode-se inferir que as vegetações presentes nessas áreas iniciaram um processo de recuperação. Essa torna-se mais perceptível nas imagens dos anos seguintes, 21/04/2019 (E) e 10/05/2020 (F), nas quais todos os índices foram capazes de registrar tal processo. Quanto a isso, mais uma vez, chama-se a atenção para a acentuação das diferenças entre o mangue do Piraquê-Açu (PA) e o Piraquê-Mirim (PM).

Nesse sentido, tomando como base o NDVI (Figura 04) nota-se que enquanto na área de maior impacto do PA os valores para o dia 09/08/2016 (B) passaram do intervalo de 0,31-0,5 para 0,71-0,8, no dia 10/05/2020 o mesmo não ocorre com o PM, que se manteve estagnado. Toda essa diferenciação também é perceptível ao se observar as imagens em cor verdadeira (Figura 03) e os gráficos para as áreas com diferentes graus de impacto.

Quanto a isso, ao se comparar os gráficos estatísticos com os produtos dos índices, percebe-se que nas áreas classificadas como de menor impacto não houve indícios de alterações causadas pela tempestade. Com base nos gráficos de moda, de cada índice entre 11/02/2016 (A) e 10/05/2020 (F), tem-se que para o Piraquê-Açu os dados demonstraram que os valores do LAI reduziram aproximadamente 3,5%, os do SAVI reduziram 7% e os do NDVI aumentaram 13,5%. Já no Piraquê-Mirim os valores registrados tiveram acréscimos sendo: 5,5% no LAI; 18,5% no SAVI; e 15% no NDVI. Ainda em relação às áreas de menor impacto, ao se analisar as imagens do NDVI é notório um aumento nos valores indicando ter havido uma melhora na sanidade do mangue dentro desse período.

No mesmo recorte temporal, mas, agora, avaliando as áreas classificadas como de médio impacto, o que se vê são que as diferenças entre os estuários começam a ficar mais intensas. Nos gráficos de moda de cada índice, tanto no Piraquê-Açu (PA) quanto no Piraquê-Mirim

(PM) as maiores reduções dos valores ocorrem em 08/09/2016, aproximadamente, dois meses após a tempestade de granizo. Dessa maneira, as reduções no PA para o LAI, o SAVI e o NDVI são, respectivamente, 39%, 26% e 20% ao passo que para o PM as reduções ficaram na casa de 55% no LAI, 40% no SAVI e 25% no NDVI.

Ainda com relação às diferenças da capacidade de regeneração dos mangues, nas áreas de médio impacto, dos dois estuários, o que se vê, nos gráficos de moda, é que enquanto no Piraquê-Açu, em 2017, o valor de NDVI já superava o registrado antes do evento, no Piraquê-Mirim isso só ocorreu em 2018. Ao se analisar os gráficos de *boxplots* dos estuários para todo o período, é possível perceber uma diferenciação na distribuição dos valores demonstrando que, após a tempestade de granizo, no PM os números se encontram mais dispersos que no PA. Apesar dessas diferenças, ao se comparar todos os produtos é notável a recuperação dessas áreas.

As áreas mais impactadas estão assim divididas: Piraquê-Açu de maior impacto com, aproximadamente, 217ha; e Piraquê-Mirim de maior impacto com 354ha. Assim como nas áreas de médio impacto, o PA, também, se diferenciou do PM no processo de regeneração do mangue. No Piraquê-Mirim, apesar desses mesmos produtos, também, terem evidenciado o impacto os valores se mantiveram quase inalterados demonstrando, com isso, uma estagnação no que se refere à recuperação ou regeneração dos mangues.

Com relação a essas diferenças, tomando como base os gráficos referentes à moda de cada índice, entre 11/02/2016 (A) e 10/05/2020 (F), tem-se que para o Piraquê-Açu os dados demonstraram que enquanto os valores, respectivos, do LAI e do SAVI reduziram aproximadamente 10,5%, e 8,5% o NDVI registrou um aumento em torno de 8%. Em contra partida, no Piraquê-Mirim todos os índices registraram decréscimos em seus valores de modo que as reduções foram: 83% no LAI; 75% no SAVI; e 61% no NDVI.

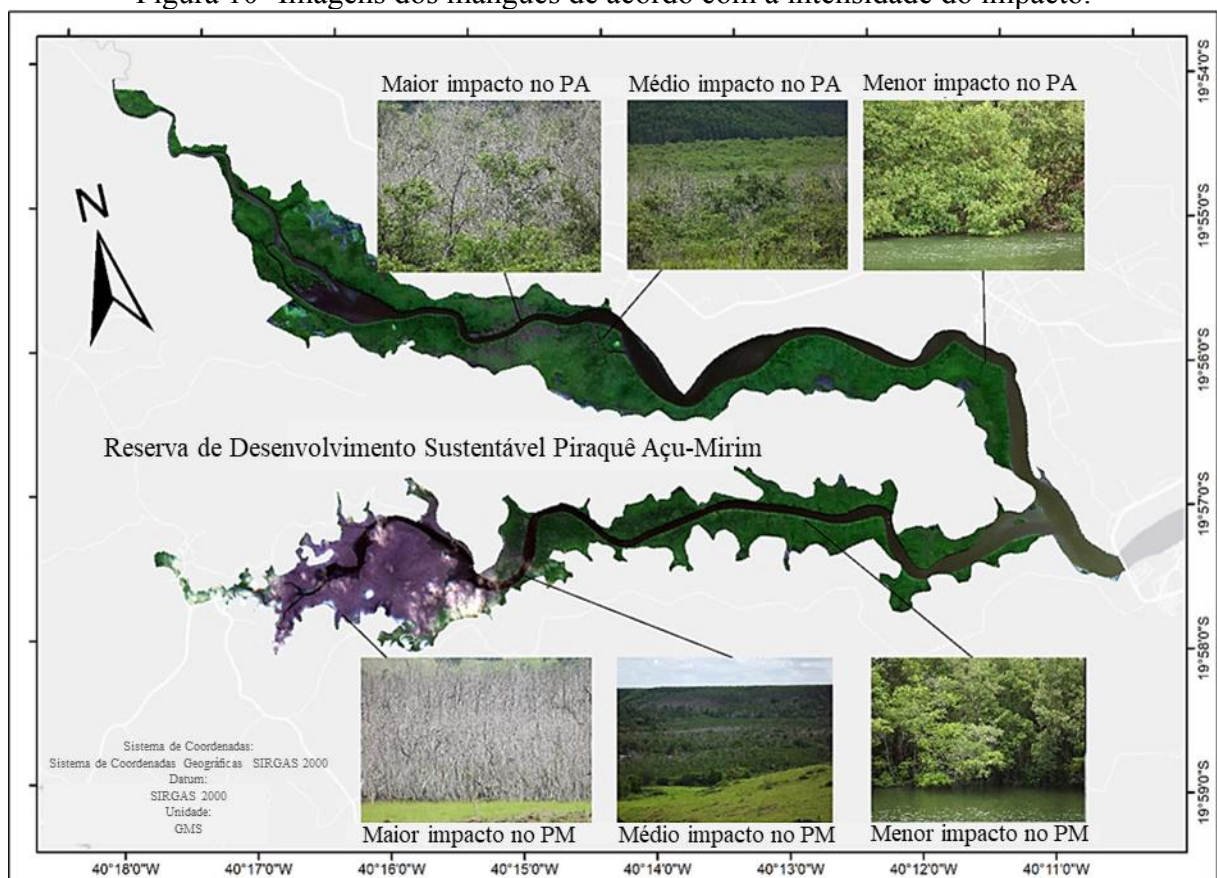
No Piraquê-Açu, a partir de 09/08/2016, (período de forte redução dos valores médios, medianos e aumento de dispersão em função da tempestade de granizo) o que se vê é um aumento gradativo dos dois primeiros parâmetros estatístico e uma redução na dispersão.

No Piraquê-Mirim, assim como no Piraquê-Açu, a partir de 09/08/2016, também ocorre um pequeno acréscimo nos valores das médias e das medianas. Com relação às dispersões, o que se tem é uma alternância entre reduções e acréscimos, mas de modo geral ainda se mantém relativamente alta. Uma das explicações para os acréscimos, é o efeito de borda, ou seja, esses valores podem ser correlatos de pontos localizados nos limites das áreas classificadas como médio impacto, a qual aos poucos vem se regenerando.

As informações geradas pelos índices demonstram haver um descompasso na resiliência entre os mangues do Piraquê-Açu e do Piraquê-Mirim, situação que certamente interfere nas inúmeras interações ecossistêmicas desse ambiente. Ao se avaliar, criteriosamente, essas informações, nota-se uma certa estagnação quanto a recuperação do mangue do Piraquê-Mirim. Tendo em vista a quantidade de serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais e essa situação percebida, surge a necessidade de algum tipo de intervenção para reverter tal estágio.

Nos registros de campo (Figura 10), foi possível estabelecer correlações entre os resultados dos índices e a situação real da vegetação nos diferentes níveis de impacto.

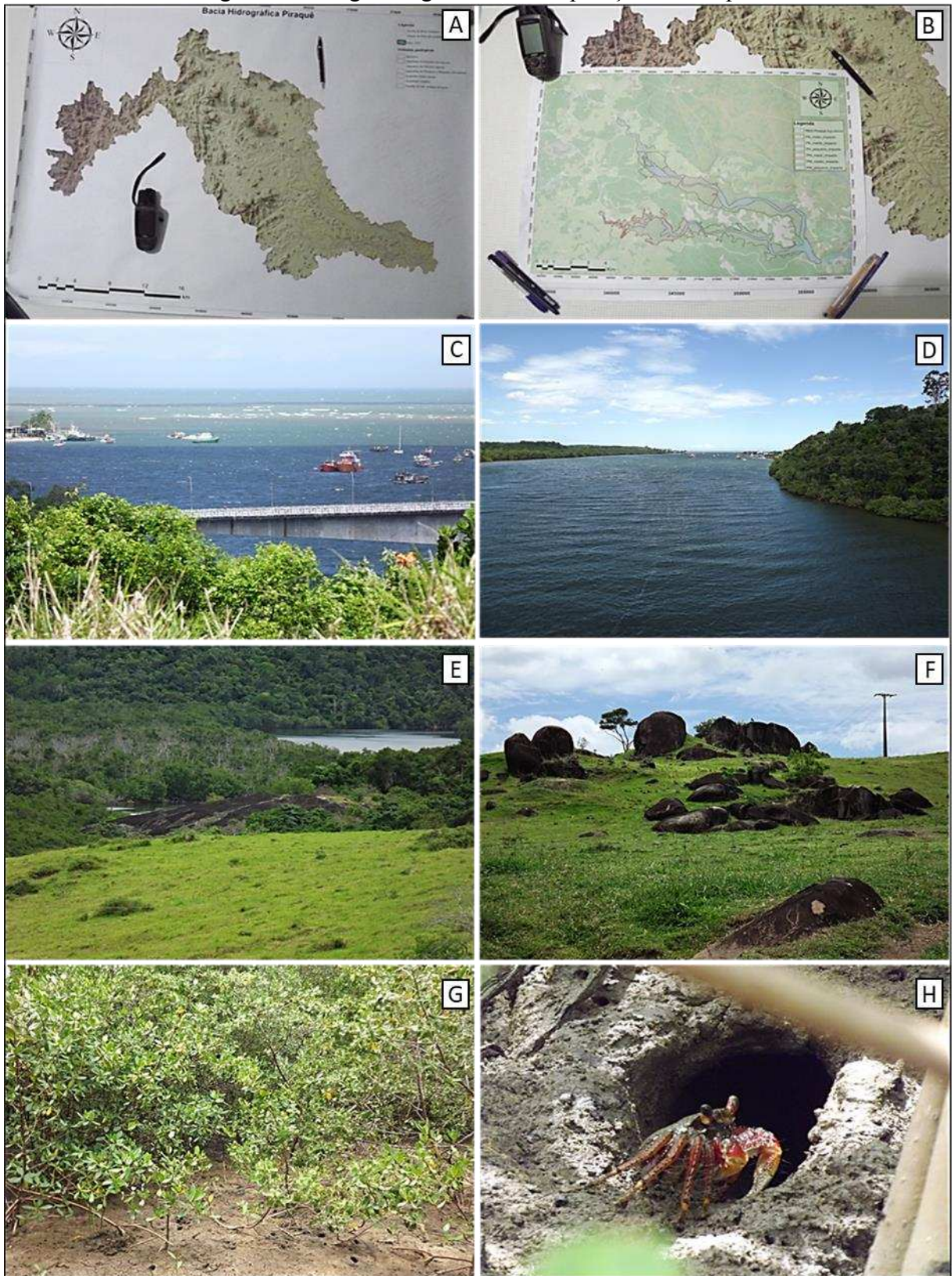
Figura 10- Imagens dos mangues de acordo com a intensidade do impacto.



Fonte: O autor.

Ainda com relação aos registros feitos no campo, é possível verificar (Figura 11), além das bases cartográficas utilizadas para o planejamento das rotas (A, B), um pouco da diversidade local como, por exemplo, a largura da foz do rio Piraquê-Açu (C, D), afloramentos de rochas (E,F) e um dos locais de intensa atividade de bioturbação do solo promovida por caranguejos (G, H), um de seus agentes.

Figura 11- Imagens registradas na expedição de campo.



Fonte: O autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os índices foram capazes de registrar tanto o impacto da tempestade de granizo quanto a capacidade de reação do mangue frente a essa. Nos mangues analisados, apesar das imagens do SAVI (Figura 06) evidenciar os locais impactados, elas não foram capazes de registrar os estágios de recuperação com riqueza de detalhes, pois este índice reduz os valores da resposta espectral da vegetação. No entanto, os produtos estatísticos (Figura 07) referentes aos valores dos seus pixels se mostraram eficazes para tal registro. Quanto aos produtos do NDVI e o LAI, tem-se que além de terem sido eficientes no registro do evento climático, também, demonstraram uma complementariedade no processo de avaliação.

Afirmar-se que o desencadeamento da mortalidade da vegetação se deu após a tempestade de granizo. Desse modo, acompanhamentos de médio e longo prazo ainda se fazem necessárias para entender as diferentes dinâmicas do local e desenvolver projetos que objetivem contribuir com a gestão da reserva.

Contudo, tanto os resultados quanto a metodologia aplicada nessa pesquisa se mostraram eficientes na análise de vegetação e mangue podendo, inclusive, auxiliar nos processos de decisões que podem relacionados tanto às ações que visem uma aceleração da recuperação quanto a gestão da reserva como um todo, haja vista sua importância sociocultural, socioambiental, socioeconômica, etc.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e os custos do campo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- ARACRUZ, Prefeitura Municipal de. Secretaria Municipal de Meio Ambiente- SEMAM. **Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim**. Aracruz, 2020. Disponível em: <http://www.pma.es.gov.br/meio-ambiente/27>. Acesso em 15 de abr. de 2021.
- AGÊNCIA ESPACIAL EUROPÉIA – ESA. **Copernicus**. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Acesso em 20 de abr. de 2021.
- BERNARDINO, A.F.; Netto, S.A.; Pagliosa, P.R.; Barros, F., Christofolletti, R.A.; Rosa-Filho, J.S.; Colling, J.; Lana, P.C. Predicting ecological changes on benthic estuarine assemblages through decadal climate trends along Brazilian Marine Ecoregions. *Estuar. Coast. Shelf Sci*, v.166, p. 74–82, 2015. DOI.org/10.1016/j.ecss.2015.05.021.
- BORATTO, I. M. P.; Gomide, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XVI, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais**. São José dos Campos: INPE, p. 7345-7352, 2013.
- GEORGE, Rajee; Padalia, Hitendra; Sinha, S. K. & Kumar, A. Senthil. Evaluation of the Use of Hyperspectral Vegetation Indices for Estimating Mangrove Leaf Area Index in Middle Andaman Island, India, **Remote Sensing Letters**, v. 9, n.11, p. 1099-1108, 2018. DOI: 10.1080/2150704X.2018.1508910.
- Huete, A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295-309, 1988.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Informações ambientais**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/geologia/15822-geologia-1-250-000.html?=&t=downloads>. Acesso em 18 de abr. de 2021.
- _____. **IBGE Malhas Territoriais**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>. Acesso em 18 de abr. de 2021.
- KAWAMUNA, Arizal; Suprayogi, Andri; & Wijaya, Arwan Putra. Analysis of mangrove forest health based on NDVI classification method in Sentinel-2 image (Case Study: Teluk Pangpang, Banyuwangi Regency), **Undip Geodesy Journal**, v. 6, n. 1, pp. 277-284, 2017.
- KGANYAGO, M.; Mhangara, P.; Alexandridis, T.; Laneve, G.; Ovakoglou, G.; Mashiyi, N. Validation of sentinel-2 leaf area index (LAI) product derived from SNAP toolbox and its comparison with global LAI products in an African semi-arid agricultural landscape. **Remote Sens. Lett.** 2020, v.11, p. 883–892.
- LANA, P.C.; Bernardino, A.F. Brazilian estuaries: a benthic perspective. In: Turra, A. (Ed.) **Brazilian Marine Biodiversity Series**, p.2520-1085, 2018. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-77779-5 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77779-5>.

- MELO, Carlos Antônio Avelar de. **Modelo para estimativa de biomassa de vegetação em áreas de manguezais por técnicas de sensoriamento remoto**. 2016. Dissertação (Mestrado de Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- MENESES, P. R., & ALMEIDA, T. D. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- PEREIRA, Luciana Escalante; Amorim, Gustavo; Grigio, Alfredo Marcelo; & Filho, Antonio Conceição Paranhos. Análise Comparativa entre Métodos de Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI) em Área Úmida Continental. **Anuário do Instituto de Geociências**. Rio de Janeiro, v. 41, p. 654-662, 2018.
- ROUSE, J. W; Haas, R. H; Schell, J. A; & Deering, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ETRS**. In: Third ETRS Symposium, NASA SP353, Washington, DC. 1: 309-317. 1973.
- SANTOS, L. C. M.; Cunha-Lignon, M.; Schaeffer-Novelli, Y.; & Cintrón-Molero, G. Long-term effects of oil pollution in mangrove forests (Baixada Santista, Southeast Brazil) detected using a GIS-based multitemporal analysis of aerial photographs. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 60, n. 2, p. 159-170, 2012.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y; Soriano-Sierra, Eduardo Juan ; Vale, Claudia Câmara Do ; Bernini, Elaine ; Rovai, André Scarlate ; Pinheiro, Marcelo Antonio Amaro ; Schmidt, Anders Jensen ; Almeida, Renato De ; Coelho Júnior, Clemente ; Menghini, Ricardo Palamar ; Martinez, Diego Igawa ; Abuchahla, Guilherme Moraes De Oliveira ; Cunha-Lignon, Marília ; Charlier-Sarubo, Sarah ; Shirazawa-Freitas, Jussara ; Cintrón-Molero, Gilberto . Climate changes in mangrove forests and salt marshes. **Brazilian Journal of Oceanography (Online)**, v. 64, p. 37-52, 2016.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Mangue e Manguezal. In: **Atlas dos Manguezais do Brasil** (1ª ed.). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. –ICMBio, Brasília, D.F, p. 17-22, 2018a.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. A diversidade do ecossistema manguezal. In: **Atlas dos Manguezais do Brasil** (1ª ed.). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. – ICMBio, Brasília, D.F, p. 23-36, 2018b.
- SERVINO, Ricardo Nogueira; Gomes, Luiz Eduardo de Oliveira; Bernardino, Angelo Fraga. Extreme weather impacts on tropical mangrove forests in the Eastern Brazil Marine Ecoregion. **Science of the Total Environment**. New York, USA; n. 628, p.233-240, 2018. doi:10.1016/j. scitotenv. 2018.02.068.
- SILVA, Janaína Barbosa da. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do ecossistema manguezal em Pernambuco/Janaína Barbosa da Silva. 2012. Dissertação (Doutorado em Ecossistema e Impactos Ambientais). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- SILVA, E. R. A. C.; Assis, D.R.S.; Silva, J.F.; Melo, J.G.S.; Galvêncio, J.D. Análise espaço-temporal das características do mangue urbano no estuário do Pina (Pernambuco). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 1, n. 1, 2018

SOAVINSKI, Ricardo; MARETTI, Cláudio. **Atlas dos Manguezais do Brasil / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. – Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018. 176 p.: il.

TIAN, Jinyan; Wang, Le; Li, Xiaojuan; Gong, Huili; Shi, Chen; Zhong, Ruofei; Liu, Xiaomeng. Comparison of UAV and WorldView-2 imagery for mapping leaf area index of mangrove forest. **Int.J. Appl.Earth Obs.Geoinf.** v. 61, p. 22–31, 2017.

VALDERRAMA-LANDEROS, L.; Flores-de-Santiago, F.; Kovacs, J.M.; Flores-Verdugo, F. Uma avaliação de sensores remotos baseados em satélite comumente empregados para mapear espécies de mangue no México usando um esquema de classificação baseado em NDVI. **Environ Monit Assess**, v.190, n. 23, p. 1-13,2018. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6399-z>

WEISS, Marie; Baret, Fred. S2ToolBox Level 2 Products: LAI, FAPAR, FCOVER. **Avignon: Institut National de la Recherche Agronomique (INRA)**. 2016.

CAPÍTULO 2

Avaliação do impacto de tempestade de granizo em mangues no litoral brasileiro a partir de Sensoriamento Remoto

RESUMO

Os manguezais são ecossistemas tropicais localizados em locais específicos das planícies costeiras onde há o encontro de águas continentais e oceânicas. São fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos, que variam da escala local à global. Devido a sua localização e especificidade esses ecossistemas também se colocam numa posição de fragilidade e, portanto, sensíveis às mudanças bruscas como, por exemplo, as causadas por alterações significativas das condições de tempo e clima, que também podem estar relacionadas ao aquecimento global. Diante disso, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, respectivamente, a partir dos índices *Normalized Difference Water Index* (NDWI) e *CO₂ flux* assim como do *Land Surface Temperature* (LST), a eficácia no registro de alterações das atividades fotossintéticas dos mangues bem como mudanças na temperatura das superfícies impactadas pela tempestade de granizo, ocorrida no dia 1 de junho de 2016, no manguezal da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú-Mirim, localizada em Aracruz (ES). Para isso, foi utilizado imagens de sensores orbitais para o período de 2015 e 2020 de modo a fazer comparações entre o antes e o depois do evento. Os resultados são compostos tanto por mapas temáticos de cada índice como, também, por gráficos de estatística descritiva, que foram gerados a partir de pontos amostrais. Desse modo, após gerar esses produtos fez-se investidas a campo com o intuito de verificar se os resultados obtidos com os índices eram correlatos com a realidade dos locais. Esse processo, foi fundamental para o escopo da pesquisa, pois além de confirmar a capacidade dos índices em registrar o impacto, nas suas diferentes escalas (menor, média e maior), também foi possível identificar qual índice obteve maior precisão.

Palavras-chave: ecossistema costeiro; índices de vegetação; NDWI; *CO₂ flux*; LST.

ABSTRACT

Mangroves are tropical ecosystems located in specific locations on the coastal plains where continental and oceanic waters meet. They are providers of various ecosystem services, ranging from local to global scale. Due to their location and specificity, these ecosystems are also in a position of fragility and, therefore, are sensitive to sudden changes, such as those caused by significant changes in weather and climate conditions, which may also be related to global warming. Therefore, the general objective of this research was to evaluate, respectively, from the Normalized Difference Water Index (NDWI) and CO₂ flux as well as the Land Surface Temperature (LST), the effectiveness in recording changes in the photosynthetic activities of mangroves as well as changes in the temperature of surfaces impacted by the hail storm, which occurred on June 1, 2016, in the mangrove swamp of the Piraquê Açú-Mirim Municipal Sustainable Development Reserve, located in Aracruz (ES). For this, images from orbital sensors were used for the period of 2015 and 2020 in order to make comparisons between before and after the event. The results are composed both by thematic maps of each index and also by graphs of descriptive statistics, which were generated from sample points. Thus, after generating these products, field investigations were carried out in order to verify if the results obtained with the indices were correlated with the reality of the places. This process was fundamental for the scope of the research, because in addition to confirming the ability of the indexes to record the impact, in their different scales (small, medium and largest), it was also possible to identify which index was more accurate.

Keywords: coastal ecosystem; vegetation index; NDWI; CO₂ flux; LST

1 INTRODUÇÃO

Presentes em lugares específicos onde há o encontro das águas oceânicas e continentais, os manguezais são ecossistemas frágeis, que possuem uma complexa rede de interrelação entre os seres aquáticos e terrestres. Distribuídos pelo globo e localizados, quase exclusivamente, entre os trópicos de Capricórnio e Câncer, no Brasil esse ecossistema pode ser encontrado entre as latitudes 04°20'N (Oiapoque, AP) e 28°30'S (Laguna, SC), de modo que somente o Rio Grande do Sul não tem registro de vegetação típica de bosques de mangue (SCHAEFFER-NOVELLI, 2018b).

Das variadas constituintes ou componentes da paisagem dos manguezais, chama-se a atenção para os mangues, que se referem às vegetações características desse complexo ecossistema. Diante do exposto, fica evidente as diferenças conceituais entre manguezal (ecossistema) e mangue (vegetação). No Brasil, o mangue é representado majoritariamente por 6 espécies, sendo elas: *Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora racemosa*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia schaueriana* e *Avicennia germinans*.

Os manguezais são fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos que pode ser sistematizado, segundo Almeida e Júnior (2018), em quatro grupos distintos sendo eles: serviços de produção ou abastecimento, serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais. Diante disso, chama-se a atenção para o mangue com suas diferentes espécies, pois tamanha é a importância da vegetação nesse ambiente que ela está presente nos quatro grupos descritos acima.

Nos serviços de produção e abastecimento, os mangues além de prover alimentos às diversas espécies de animais marinhos e terrestres, através das sementes e flores, também é explorado para a retirada de madeira e fibras pelos povos tradicionais. No que diz respeito aos serviços de regulação, destaca-se seu importante papel no microclima local propiciando às espécies um ambiente térmico mais equilibrado assim como a proteção da faixa costeira na medida em que suas raízes entrelaçadas atenuam o impacto das ondas oceânicas.

Nos serviços de suporte, é possível elencar uma série de atuações dos mangues com destaque para a formação de solos, ciclagem de nutrientes e fixação de CO₂ utilizada na fotossíntese. Quanto a isso, Soavinski e Maretti (2018) destacam que quando levado em consideração o sistema radicular de algumas espécies de mangues, a fixação de CO₂ supera as taxas da Mata Atlântica e da Amazônia. Por último, mas não menos importante, destaca-se os

serviços culturais com a valorização da beleza estética, espiritual e outras relacionadas às subjetividades humanas.

Frente ao exposto, percebe-se que os manguezais são essenciais tanto em escala local quanto global e, portanto, carecem de acompanhamento mais pontuais no que diz respeito às mudanças desencadeadas tanto por processos naturais (Tsunamis) quanto antrópicos, que podem ser divididos em duas categorias básicas. A primeira, refere-se as interferências diretas do homem como é o caso do desmatamento e aterramento dessas áreas para fins do mercado imobiliário ou industrial. Como consequência, o que se têm, em muitos desses locais, é o despejo de esgotos sem nenhum tratamento aumentando o risco de proliferação de agentes nocivos à saúde tanto dos animais quanto dos humanos.

A segunda categoria, refere-se às interferências indiretas como é o caso, por exemplo, da elevação do nível dos oceanos mediante o derretimento das calotas polares frente ao processo de aquecimento global, que pode estar sendo acelerado em função da emissão de gases com grande capacidade de retenção de calor como é o caso do Gás Carbônico (CO₂) e do Metano (CH₄). Essas modificações, dentre tantas outras consequências, acabam por interferir nas dinâmicas atmosféricas aumentando a incidência de tempestades ou furacões com alta capacidade destrutiva.

Diante disso, faz-se necessário acompanhamentos mais pontuais das repercussões desses eventos, pois dependendo do grau do impacto de determinado fenômeno os resultados podem ser irreversíveis necessitando, inclusive, de ações que busquem a aplicação de práticas de recuperação.

Dentre as metodologias capazes de apresentar resultados satisfatórios referentes às diferentes fitofisionomias desse ambiente diminuindo as investidas a campo, os custos e os riscos de acidentes no processo de coleta, o Sensoriamento Remoto (SR) se apresenta como um dos mais promissores. O Sensoriamento Remoto é uma metodologia que a partir de diferentes técnicas (aplicação de índices, composição de bandas, modelagens) permite a extração de informações sem que, haja efetivamente, contato físico entre o pesquisador e o seu objeto de interesse.

Uma importante informação que pode ser obtida das vegetações com o SR, é a sua capacidade de sequestro de CO₂, que é utilizado no seu processo de respiração de modo que quanto mais sadia estiver a planta maior será sua atividade fotossintética. Nesse sentido, um índice que pode contribuir significativamente para a averiguação da capacidade de fixação do Gás Carbônico é o CO₂ *flux* que tem como um de seus precursores Rahman *et al.* (2000).

Em sua pesquisa (*Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery*) os autores correlacionaram dados de torres de fluxo de CO₂, localizadas em florestas nos USA, com dados do *Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS). Após gerarem os índices (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI e *Photosynthetic Reflectance Index* - PRI) e multiplicá-los entre si, eles estabeleceram uma relação entre dados do espectrômetro de imagem e a variação de CO₂ nos sensores terrestres.

Diante disso, Baptista (2003), com o intuito de validar os pressupostos de Rahaman *et al.* (2000), utilizou duas cenas AVIRIS e uma cena do sensor *Hyperion* com diferentes extratos de vegetação dos Cerrados. Na pesquisa em questão, o autor também fez correlações entre os dados e identificou que os locais onde os valores de CO₂ na atmosfera se apresentaram baixos correspondiam, exatamente, às áreas vegetadas ao passo que os locais onde ocorria o inverso se tratava de áreas urbanas ou com solo exposto.

No intuito de avaliar a aplicabilidade do CO₂ *flux* em outros ambientes, Gerhardt *et al.* (2011) e Rocha (2018), assim como Rahman *et al.* (2000), buscaram comparar os resultados de medidores de CO₂ em campo com as respostas espectrais de imagens, no entanto, em substituição ao AVIRIS, foi utilizado dados do sensor Hyperion a bordo do satélite EO-1. Como resultado, ambos encontraram correlação entre o índice e os dados de campo reforçando, assim, seu potencial.

Outro importante índice que possui uma relação direta com a sanidade das plantas é o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Esse índice, permite identificar diferentes níveis de quantidade de água nas folhas das plantas sendo possível diferenciar áreas em que as atividades fotossintéticas da vegetação estão mais ativas ou reduzidas. Diante disso, Ferreira *et al.* (2013), no intuito de identificar mudanças espaço-temporal em áreas de vegetação de mangue no estado de Pernambuco (PE) logrou êxito ao trabalhar com alguns índices sendo o NDWI um deles.

De forma similar, Oliveira (2013), objetivando gerar subsídios para a gestão do uso e ocupação do solo na zona de amortecimento da Reserva Biológica Saltinho (PE), lançou mão de alguns índices, como, por exemplo o NDWI. De acordo com o autor, a utilização dos índices se mostrou eficiente uma vez que possibilitaram, a partir de mapas, demonstrar as variações da vegetação dentro e um recorte temporal de 14 anos (2006-2010).

Para além desses dois, outro índice que fornece informações para o entendimento da importância da cobertura vegetal e sua relação com o microclima, que interferem diretamente na dinâmica sistêmica dos locais, é o *Land Surface Temperature* (LST). Esse, a partir da

utilização da banda termal e aplicação de equações, permite que se tenha informações quanto a temperatura superficial dos alvos.

Muitos pesquisadores têm investido tempo e energia na análise das potencialidades desse índice. Nesse sentido, Godoy *et al.* (2009) na procura de entender a relação entre vegetação e temperatura de superfície nos parques urbanos do Distrito Federal, por meio de dados ASTER, concluíram que o LST se mostrou eficaz ao estabelecer uma relação direta entre a vegetação e os locais identificados como de melhor conforto térmico.

Na mesma linha de raciocínio, no entanto analisando a eficiência do sensor termal do *Landsat-8* em estabelecer relações e diferenciações de ambientes, a partir de dados da temperatura superficial, Coelho e Correia (2013) concluíram como positivo os resultados. De forma similar Sharma e Bisht (2019), ao utilizarem o LST na cidade de Agra na Índia, conseguiram estabelecer correlações entre a temperatura superficial mensurada e o tipo de cobertura da terra.

Como pode ser observado, diferentes autores obtiveram resultados que reforçam a eficácia do índice LST, principalmente ao se avaliar possíveis efeitos de mudanças da cobertura da Terra. Vale ressaltar que tais mudanças podem ser desencadeadas tanto por ação antrópica (edificações, desmatamento, mineração e etc.) quanto por eventos “naturais” como vulcanismo e tempestades. Quanto a esse último, salienta-se que o aumento de sua incidência pode estar relacionado ao processo de aquecimento global que pode estar sendo agravado pelas atividades humanas que lançam na atmosfera quantidade, significativas, de gases com grande capacidade de retenção de calor como é o caso do Gás Carbônico (CO₂) e do Metano (CH₄).

Diante do exposto, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, respectivamente, a partir dos índices *Normalized Difference Water Index* (NDWI) e *CO₂ flux* assim como do *Land Surface Temperature* (LST), a eficácia no registro de alterações das atividades fotossintéticas dos mangues bem como mudanças na temperatura das superfícies impactadas pela tempestade de granizo, ocorrida no dia 1 de junho de 2016, no manguezal da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú-Mirim, localizada em Aracruz (ES).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

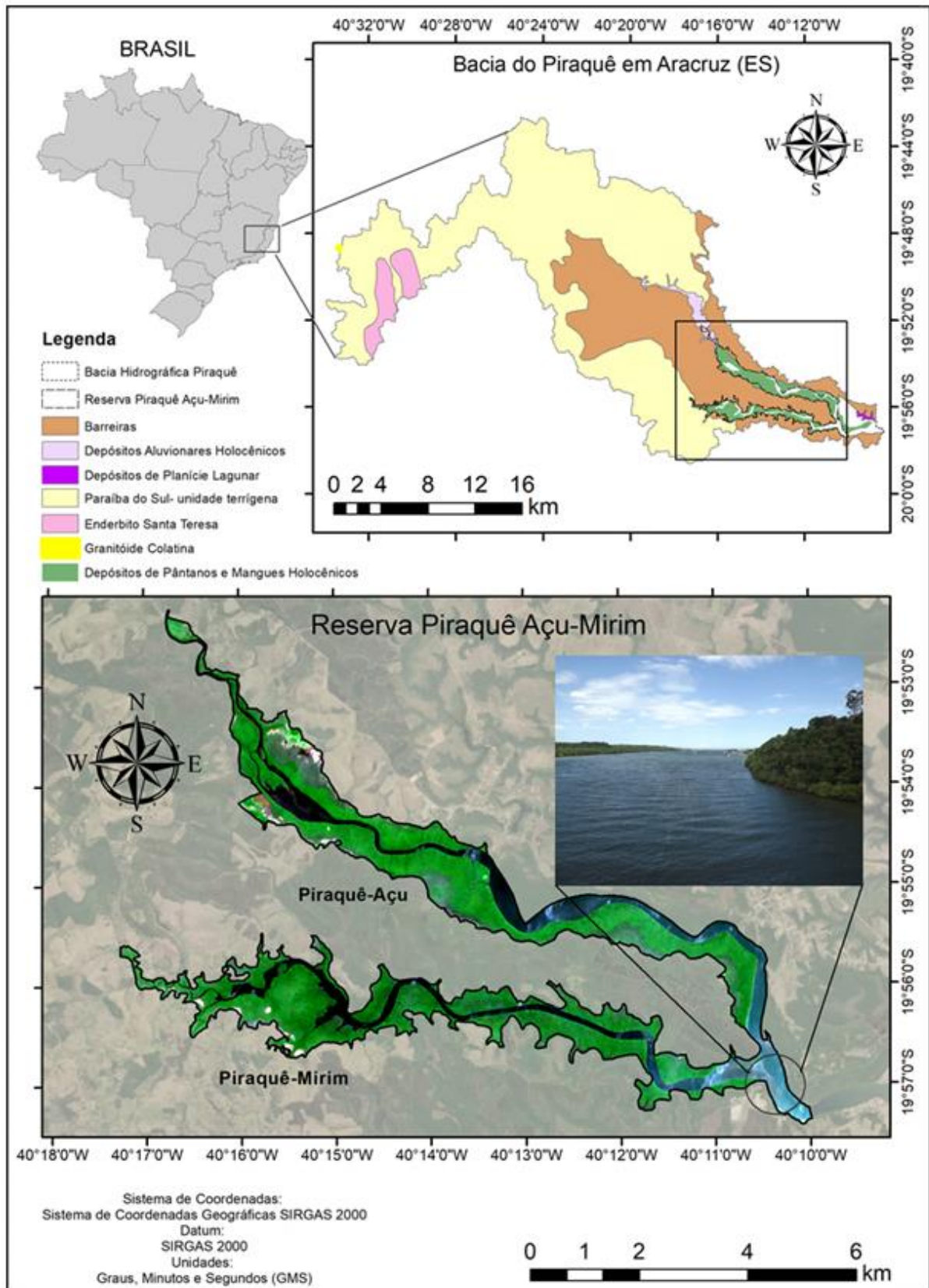
Com o intuito de dar maior clareza aos processos metodológicos utilizados optou-se por dividir este tópico do seguinte modo: caracterização da área de pesquisa; equipamentos e ferramentas utilizadas; fonte e base de dados; etapas de desenvolvimento; e procedimentos metodológicos.

2.1 Caracterização da área de pesquisa

A área de pesquisa (mangue), localiza-se na Ecorregião Marítima do Brasil Oriental sendo, portanto, banhado pelo oceano Atlântico. Dentre as características climáticas, tem-se que essa região possui duas estações bem definidas, ou seja, os meses compreendidos entre abril e setembro referem-se ao inverno seco e os entre outubro e março ao verão úmido (BERNARDINO *et al.*, 2015).

Abrangido por dois sistemas estuarinos (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim), o mangue pesquisado está localizado dentro dos limites da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim, precisamente, no município de Aracruz (ES), sudeste do Brasil (Figura 01). A reserva em questão, possui uma área de 2079 hectares e está contida na microbacia do Piraquê, que tem como principais rios o Piraquê-Açu e o Piraquê-Mirim. Em 1 de junho de 2016 uma grande parcela dessa reserva foi atingida por uma tempestade de granizo que impactou diretamente mais de 500 hectares da área (SERVINO *et al.*, 2018).

Figura 01- Localização da área de pesquisa.



Fonte: O autor.

O Piraquê-Açu, com seus aproximados 50 km de extensão, é o principal rio da Bacia do Piraquê. Desde sua nascente, na Reserva Ecológica da Nova Lombardia ou Augusto Ruschi, à aproximadamente 1.000 metros de altitude, no município de Santa Tereza (ES), esse rio é a fonte principal de abastecimento de água para cerca de 140.000 pessoas (Aracruz, 2021).

O Piraquê-Mirim com aproximadamente 22 km de extensão é o segundo rio em contribuição para a Bacia do Piraquê. Apesar de possui menos de 50% da extensão do Piraquê-Açu, esse mostra-se muito importante para a manutenção das atividades econômicas ligadas à agropecuária, a pesca e coleta de caranguejos por parte das comunidades de pescadores.

Além desses, vale destacar que toda a região é fundamental para a manutenção da vida dos índios Tupiniquim e Guarani que vivem às margens do Piraquê-Açu. Com uma lógica totalmente diferente de se relacionar com o meio ambiente, a preservação e conservação dos manguezais é vital para esses seres humanos. Nesse sentido, afirma-se que o nível de importância tanto desses rios quanto dos outros componentes da paisagem do manguezal, que são fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos, não são importantes apenas em escala local, mas também na regional e, até mesmo global.

Ademais, a reserva Piraquê Açu-Mirim, nas suas formações arbóreas é composta, quase exclusivamente, por mangues. Das seis espécies, até o momento, registradas no Brasil (*Rhizophora mangle*, *Rhizophora harrisonii*; *Rhizophora racemosa*; *Laguncularia racemosa*; *Avicennia schaueriana* e *Avicennia germinans*), três podem ser encontradas nesse local sendo elas: *A. schaueriana*; *Laguncularia racemosa*; e *R. mangle*.

Dessas, a que possui maior preponderância, em área, é a *Rhizophora mangle* (mangue vermelho) (SERVINO *et al.*, 2018). A espécie em questão encontra-se distribuída por todo o manguezal, inclusive nas franjas do Grupo Barreiras onde dividem espaço com vegetações de terra firme (Figura 02). Nessa Figura que foi registrada na foz do rio, onde a incisão no relevo é mais profunda e a energia das ondas é maior, é possível identificar locais em estágio inicial de erosão.

Figura 02- Imagens de vegetações e erosões na foz do rio Piraquê-Açu.



Fonte: O Autor.

Diante da fragilidade dos mangues a mudanças bruscas do tempo e clima, a erosão é outro fator que merece um acompanhamento mais pontual, pois além de interferir na estabilidade das encostas elas também dificultam sua fixação.

2.2 Equipamentos e ferramentas

Tanto a aquisição dos dados quanto os seus respectivos processamentos foram realizados nas instalações do Departamento de Geografia (DGE), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), mais precisamente, no Laboratório de Geomorfologia do Quaternário. Para isso, valeu-se dos *softwares* SNAP e ArcGis™.

2.3 Fonte e base de dados

Os dados aqui utilizados, foram obtidos, de forma gratuita, junto a órgãos governamentais ou instituições a eles vinculadas. Dessa maneira, imagens do sensor MSI/Sentinel-2 foram adquiridas no site oficial do programa Copernicus, que possui vínculo com a *European Space Agency* (ESA).

Outros arquivos como, por exemplo, os vetoriais contendo os limites políticos administrativos do Brasil e a área da Reserva, foram, respectivamente, baixados junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e à Secretaria de Meio Ambiente do município de Aracruz (ES).

2.4 Etapas de desenvolvimento

Em síntese, essa pesquisa foi desenvolvida seguindo sete etapas procedimentais que estão organizadas na seguinte ordem:

- I. Localização da área impactada e definição de recorte temporal;
- II. Aquisição de dados;
- III. Geração dos índices *Normalized Difference Water Index* (NDWI), *CO₂ flux* e do *Land Surface Temperature* (LST);
- IV. Delimitação da área de interesse e geração dos pontos amostrais;
- V. Geração de gráficos a partir dos valores dos pixels;
- VI. Expedição de campo;
- VII. Compilação dos resultados em imagens.

2.5 Procedimentos metodológicos

A etapa (I) dessa pesquisa deu-se com a utilização da plataforma *Google Earth Pro*. Valendo-se da série histórica da plataforma em questão, foi definido o recorte temporal dos dados que pudessem registrar as consequências do evento (tempestade de granizo). Com *Google Earth Pro* foi possível visualizar mudanças, significativas, da cobertura vegetal da área de interesse. Tal evento, provocou um expressivo desfolhamento e quebra do mangue presente na Reserva. Perante o exposto, os dados utilizados ficaram compreendidos entre os anos de 2015 e 2020.

Quanto à aquisição dos dados (Etapa II), apesar do Brasil possuir registros para todo o seu território, locais com constante presença de nuvens, como é o caso da região amazônica e litorâneas, reduzem a oferta desses dados dificultando, portanto, a padronização das datas.

Após uma busca criteriosa, optou-se por utilizar imagens tanto do satélite *Landsat-8* quanto do *Sentinel-2* dos quais a partir do primeiro foi gerado o LST e do segundo, os índices NDWI e *Co₂flux*. A escolha pelo *Landsat-8*, se deu por este possuir, além do sensor *Operational Land Imager* (OLI) com resolução espacial de 30m e radiométrica de 16 bits, o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) que gera informações dos alvos numa resolução espacial de 100m dentro da mesma faixa de tempo e radiometria das demais bandas. Já o *Sentinel-2*, apesar de não possuir o sensor termal, o *MultiSpectral Instrument* (MSI) entrega dados com um tempo de revisita de

5 dias, resolução radiométrica de 12 bits e resoluções espaciais de 10 m e 20 m, nas bandas utilizadas.

Posto isso, para gerar o LST selecionou-se 6 arquivos com as seguintes datas: 26 de ago. de 2015; 12 de ago. de 2016; 31 de ago. de 2017; 08 de jul. de 2018; 04 de jul. de 2019; e 29 de jul. de 2020. De forma similar, para gerar o NDWI e o $CO_2 flux$, também, foram baixados 6 arquivos que, por sua vez, datam de: 11/02/2016; 09/08/2016; 26/01/2017; 11/05/2018; 21/04/2019; e 10/05/2020. Vale pontuar, que a primeira data de ambos os satélites, representam o local antes do impacto da tempestade de granizo, no dia 1 de junho de 2016, servindo, portanto, de base comparativa para as demais.

Ainda com relação às imagens, destaca-se que as advindas do *Sentinel-2* foram baixadas no Nível-1C. Isso significa que elas já haviam passado por máscaras de terra/água e nuvem e processos de ortorretificações de refletâncias no topo da atmosfera (*Top of Atmosphere-TOA*). Dessa maneira, com o objetivo de imprimir maior qualidade a esses dados optou-se por utilizar o pacote *Sen2Cor* do *software* SNAP, que após realizar correções atmosféricas e radiométricas gerou imagens no Nível-2A. Nesse processo as ortorretificações estão na base da atmosfera (*Bottom of Atmosfera-BOA*).

Após tal operação seguiu-se para a etapa (III), que é da geração dos índices. Os procedimentos a seguir foram realizados utilizando o *software* ArcGis™. O primeiro, *Normalized Difference Water Index* (NDWI), foi obtido a partir da fórmula matemática (Equação 1) desenvolvida por Gao (1996). O índice em questão possibilita obter informações, quanto ao estado fisiológico de uma vegetação uma vez que permite a mensuração do teor de umidade presente nas plantas. A água é indispensável para essas espécies, principalmente as aquáticas como é o caso dos mangues.

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

Como pode ser observado, o NDWI é o quociente dos resultados da diferença do infravermelho próximo (NIR) para infravermelho de onda curta (SWIR) pela soma dos mesmos. O SWIR, se apresenta mais sensível tanto a quantidade de água presente nas vegetações quanto a umidade do solo, mas, de forma geral, está relacionado ao conteúdo de água presente nas folhas de modo que valores positivos correlacionam-se à vegetação verde e valores negativos à vegetação seca (OLIVEIRA, 2013). Essas correlações, reforçam o motivo

da escolha desse índice, uma vez que, normalmente, existe uma relação direta entre a umidade foliar e vigor vegetativo das plantas.

O segundo índice gerado foi o CO_2flux , que é obtido a partir do produto matemático do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) pelo *Photosynthetic Reflectance Index* (PRI). O NDVI, proposto por Rouse *et al.* (1973), é um indicador gráfico que permite a partir da resposta espectral da vegetação, obter informações quanto ao seu vigor vegetativo. O PRI que também é um índice capaz de fornecer dados sobre a capacidade fotossintética das plantas, no nível das folhas e dossel, foi pensado por Gamon *et al.* (1992) ao estudar o comportamento espectral de plantas de Girassol na América do Norte.

Como o CO_2flux envolve a realização de mais de um procedimento, fez-se, primeiro, a geração do NDVI. O índice em questão, é obtido a partir da divisão do resultado da diferença das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (*Red*) pela soma dessas mesmas (Equação 2).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

O PRI, pode ser obtido a partir das reflectâncias das bandas do verde e do azul. Seus resultados, permitem interpretações quanto ao comportamento das vegetações no que se refere a utilização do CO_2 atmosférico. Sua geração provém da divisão do resultado da diferença das bandas do azul e do verde pela soma dessas mesmas (Equação 3).

$$PRI = \frac{Blue - Green}{Blue + Green} \quad (3)$$

Tanto nesse índice como no NDVI, os valores variam entre -1 e 1, desse modo quanto mais próximo de zero forem os resultados, entende-se que maior está sendo a eficiência da vegetação na utilização da luz no processo de fotossíntese (GAMON *et al.*, 1992). Como já exposto, esses resultados podem variar entre positivo e negativo (± 1) no entanto, caso estes se apresentem negativo, é necessário a realização de mais um procedimento, que tem por finalidade fazer sua adequação. Desse modo, como isso aconteceu, aplicou-se a Equação 4.

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2} \quad (4)$$

Após essa correção foi gerado finalmente, o índice $CO_2 flux$, Equação 5, que expressa a taxa relativa da capacidade fotossintética da vegetação estudada (RAHMAN *et al.*, 2000;

BAPTISTA, 2003). Tal capacidade possui correlação direta com os processos de captura/utilização e fixação do carbono atmosférico nos mangues pesquisados.

$$\text{CO}_2 \text{ flux} = \text{NDVI} * \text{sPRI} \quad (5)$$

Dando prosseguimento à Etapa (3), no entanto utilizando os dados do *Landsat-8*, iniciou-se o processo de geração do *Land Surface Temperature* (LST). Diferentemente dos anteriores, esse possibilita estimar a temperatura superficial do alvo que, também, se dá por meio da reflectância. Isso é possível utilizando-se imagens orbitais digitais correspondentes à faixa do infravermelho termal. No entanto, para se ter a um produto final de melhor qualidade faz-se necessário a realização de vários procedimentos, sendo estes, divididos em diferentes etapas de acordo com suas especificidades.

Para a obtenção do LST, inicialmente, fez-se aquisição de imagem termal. Vale ressaltar, que essas foram disponibilizadas em níveis de cinza (NC) sendo, portanto, necessário convertê-las para valores de radiância espectral. Para isso, foram utilizados parâmetros fixos contidos nos metadados da imagem (COELHO; CORREA, 2013). Tal conversão, foi possível a partir da Equação 6 (USGS, 2020).

$$L\lambda = \text{ML} * \text{Qcal} + \text{AL} \quad (6)$$

Na equação em questão, $L\lambda$ refere-se à radiância espectral, ML ao fator de reescalonamento multiplicativo da Banda 10 (0.0003342), AL ao fator de reescalonamento aditivo da Banda 10 (0,1) e Qcal ao valor quantizado calibrado pelo pixel em DN (Banda 10).

Após a obtenção da radiância foi necessário converter os números digitais, que estão em valores de pixel, para valores correlatos à temperatura de brilho. Além disso, também foi preciso adequá-la à unidade de medida do Brasil, que adota para temperatura a escala de Celsius (C). Isso se faz necessário uma vez que os dados estavam em graus Kelvin (K). O procedimento em questão se deu aplicando a Equação 7 (USGS, 2020).

$$T_c = \left(\frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L\lambda} \right) + 1} \right) - 273.15 \quad (7)$$

Nessa equação, T_c corresponde à temperatura de brilho da atmosfera (Celsius), K_1 à constante de calibração 1 (774.8853 W/ m² sr μm), K_2 à constante de calibração 2 (1321.0789 K) e $L\lambda$ a radiância espectral (W/m² sr μm).

Feita a conversão deu-se continuidade ao procedimento que teve como produto o índice de Proporção de vegetação (Pv). Esse índice (Equação 8), tem por finalidade tornar os resultados mais fiéis à realidade tendo em vista que leva em consideração as variações entre o mínimo e o máximo do NDVI (BARBOSA *et al.*, 2020). Apesar de já se ter gerado o NDVI a partir do *Sentinel-2* foi necessário gerá-lo novamente, pois além das diferenças entre as resoluções (espacial, temporal e radiométrica) as datas também se divergiram em relação ao *Landsat-8*. Sendo assim, primeiro foi gerado o NDVI (Equação 8) e depois o PV (Equação 9).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (8)$$

$$Pv = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2 \quad (9)$$

Com a Proporção de vegetação calculada, prosseguiu-se para a geração da Emissividade (ϵ). Esse está relacionado à capacidade de emissão de energia por radiação de determinado corpo sob a superfície do planeta. Para isso, será usado a Equação 10 a qual já possui algumas variáveis fixas (SHARMA; BISHT, 2019). Quanto às variáveis, a primeira (0.004) representa o desvio padrão de 49 espectros de solo os quais apresentam um valor médio de refletância de 0,97 e a segunda é a média desse valor com o da vegetação estipulada em 0,99 (JIMÉNEZ-MUÑOZ *et al.*, 2014):

$$\epsilon = 0.004.Pv + 0.986 \quad (10)$$

Feito esta sequência de operações, finalmente, deu-se início ao cálculo do *Land Surface Temperature* (LST) a partir da Equação 11. Para isso, foram utilizados os valores obtidos nas operações anteriores (Equações 6 a 10).

$$LST = \left(\frac{Tc}{1 + (\lambda * \frac{Tc}{\rho}) * Ln(\epsilon)} \right) \quad (11)$$

Nesta equação, LST é a temperatura de superfície (C), Tc é a temperatura de brilho (C), λ é o comprimento de onda da radiação emitida, ρ é o $((h \times c) / \sigma) = 1,438 \times 10^{-2} mK$: h é constante de Planck ($6,26 \times 10^{-34} Js$); c é a velocidade da luz ($2,998 \times 10^8 m/s$); σ é constante de Stefan Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} JK^{-1}$) e ϵ a emissividade da superfície. Finalizada a etapa (III) deu-se início a (IV) que consistiu na extração da área pesquisada (Reserva de Desenvolvimento Sustentável-RDS). Essa operação foi realizada utilizando o arquivo vetorial,

disponibilizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Aracruz (ES).

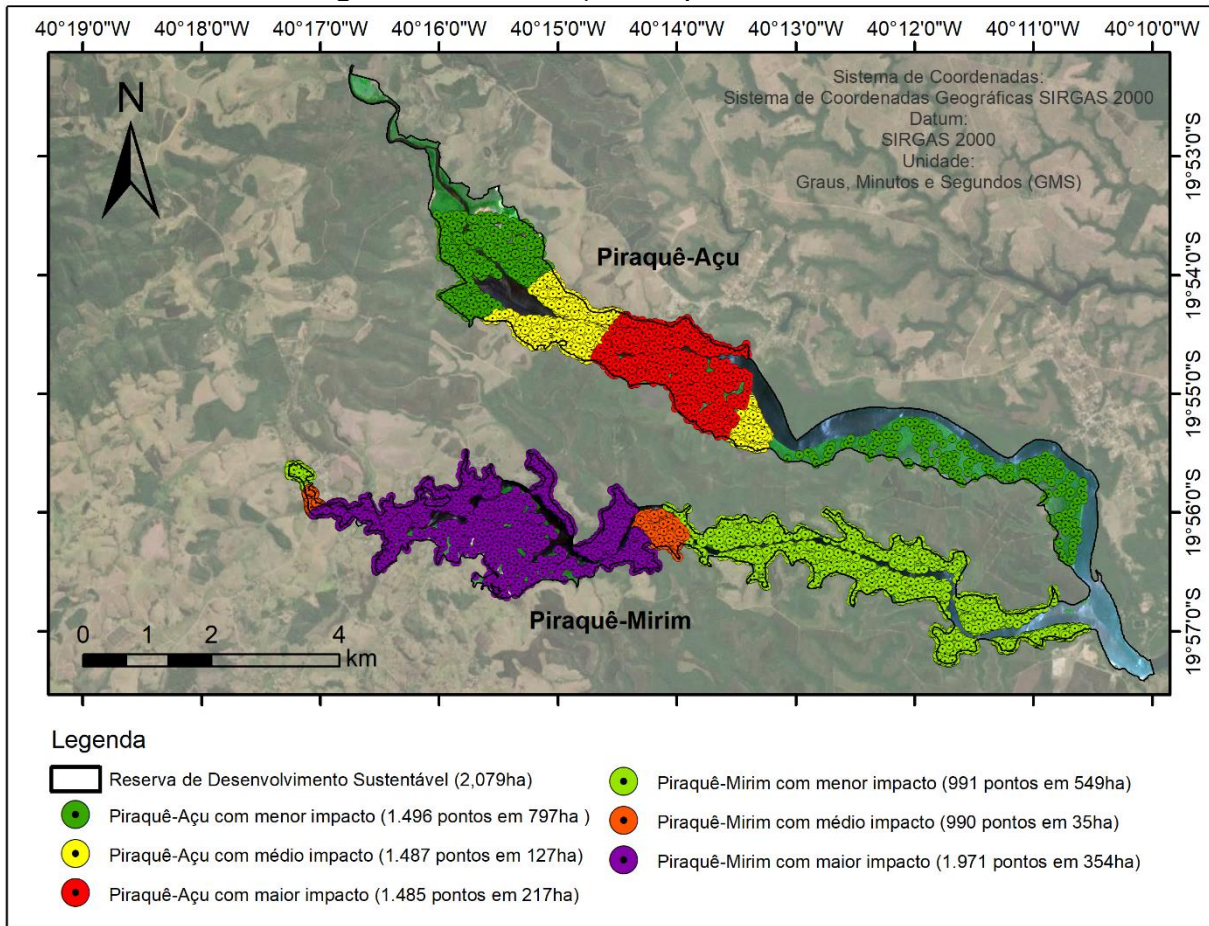
Como a Reserva foi atingida de forma desigual pela tempestade, as implicações também se deram de forma heterogênea. Desse modo foi realizado a subdivisão das áreas de acordo com a intensidade do impacto. Esse procedimento foi possível após a comparação das imagens que evidenciam as variações espaciais dos valores dos índices aplicados.

Apesar dos três índices aplicados terem sido capazes de evidenciar o impacto, o NDWI de 2017 se destacou no que diz respeito às diferenciações das áreas, pois foi o que apresentou maior variação na escala de cores.

Como já dito, o impacto na reserva se deu de forma desigual. Somando isso ao fato da reserva ser composta por dois estuários (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim) os resultados estão apresentados separadamente. Dessa maneira esses estuários foram subdivididos em locais de maior, médio e menor impacto. Com as áreas devidamente separadas partiu-se para a geração dos pontos amostrais utilizando para isso a ferramenta *Create Random Points* do software ArcGis™.

A definição da quantidade de pontos para cada área se deu a partir da análise da grandeza física de cada e das variações espaciais dos valores, visivelmente observáveis. Desse modo, os números de pontos para cada uma das subdivisões de impacto (maior, médio e menor) em ambos os estuários (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim) estão representados na Figura 03.

Figura 03 – Distribuição dos pontos amostrais.



Fonte: O autor.

Com a etapa (IV) finalizada, na etapa (V) foi efetuado a extração dos valores de cada ponto alocado. Vale salientar que para o NDWI e o CO_2 flux os valores de referência são relativos ao ano de 2016 ao passo que para o LST a base é 2015. Após a extração dos valores de cada índice foi feita a confecção de gráficos que teve como objetivo principal evidenciar, quantitativamente a repercussão do impacto nos distintos locais.

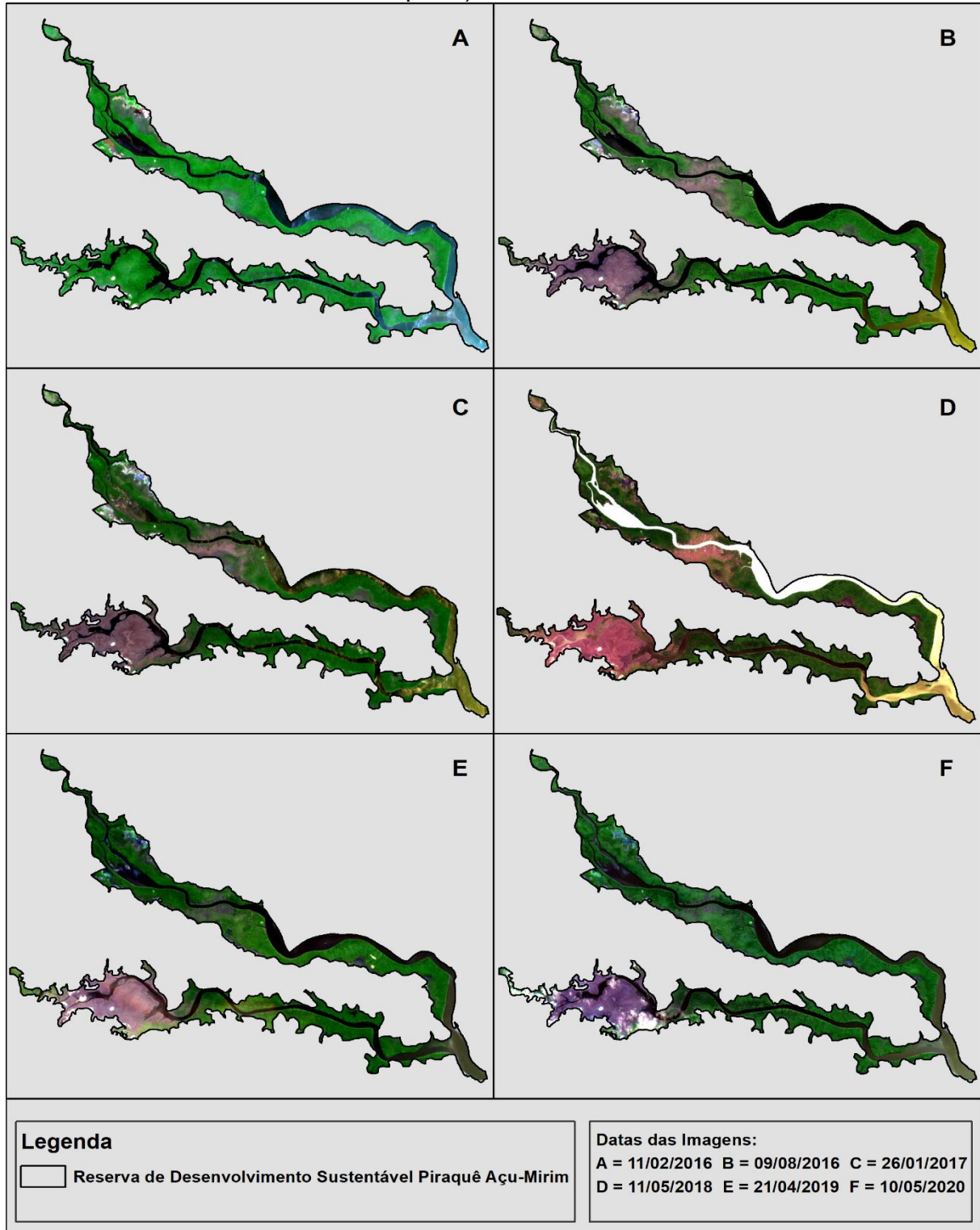
A penúltima etapa realizada (VI), consistiu na investida a campo de modo a comparar os resultados obtidos remotamente com a realidade de campo. Essa etapa foi fundamental para averiguar a capacidade de apreensão do evento por parte dos índices utilizados.

De posse de mapas contendo a espacialização dos eventos e seus distintos graus de impacto (menor, médio e maior) para ambos os estuários e de um GPS Garmin 60 Cxs percorreu-se todo o perímetro da reserva de modo a acessar as áreas representativas de cada tipo de impacto. Além da repercussão do evento na paisagem local também foi possível observar outros componentes importantes nesse ambiente como por exemplo, os de cunho socioambiental, socioeconômico e sociocultural.

Após a investida ao campo e as averiguações dos dados, foi possível a realização da etapa (VII) que se refere a estruturação dos resultados em forma de figuras. Essas, estão representadas tanto por mapas temáticos quanto por gráficos contendo itens de estatística descritiva. É importante salientar que no processo de organização das figuras apenas os índices NDWI e $CO_2 flux$ compartilham as datas presentes nas letras de identificação. Já nas figuras que representam os produtos do LST as datas divergem em função dos dados serem de um satélite diferente. As datas referentes a cada letra de identificação estão presentes nas legendas das figuras.

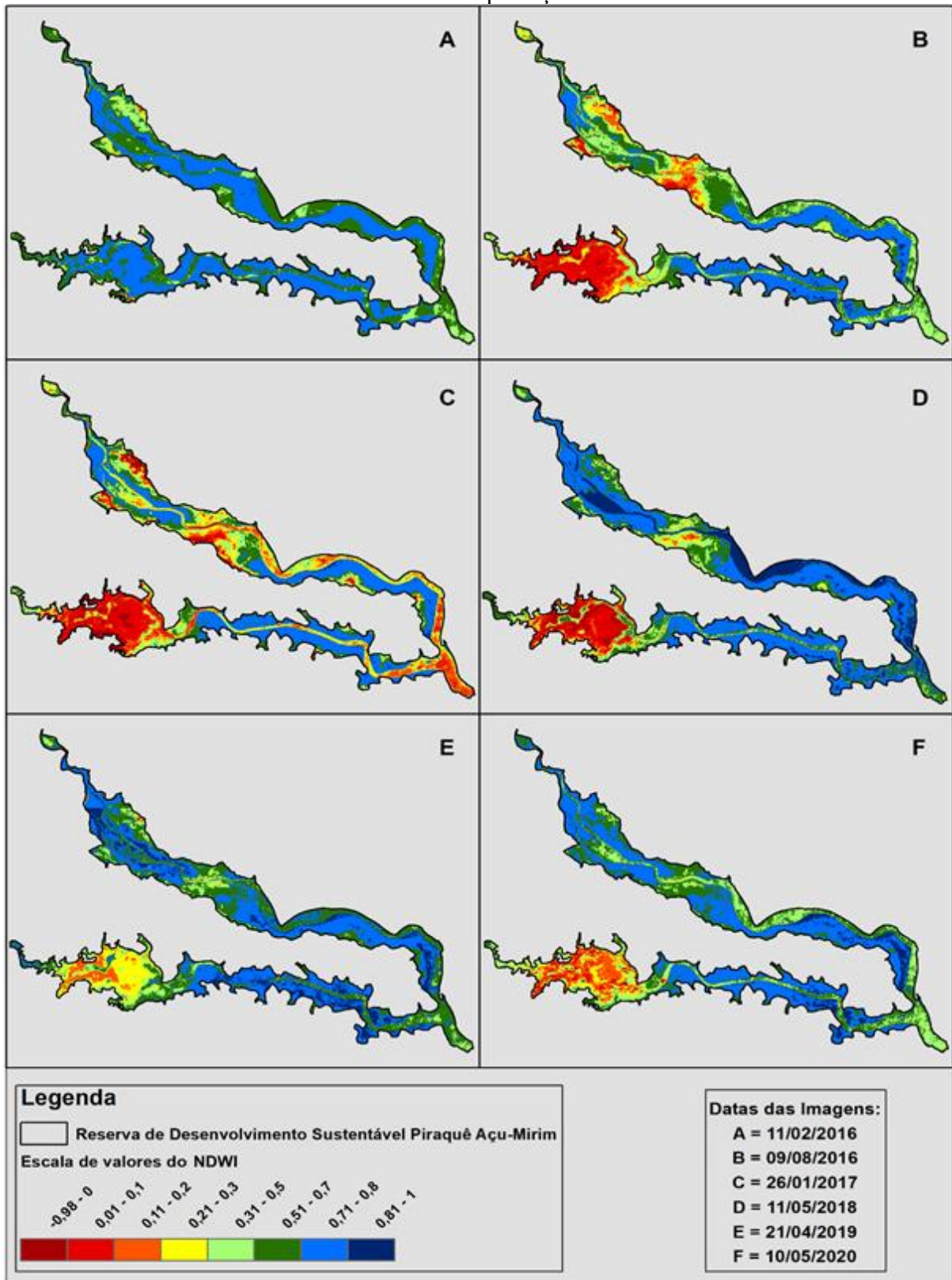
3 RESULTADOS

Figura 04 - Composição em cores verdadeira 432/RGB da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.



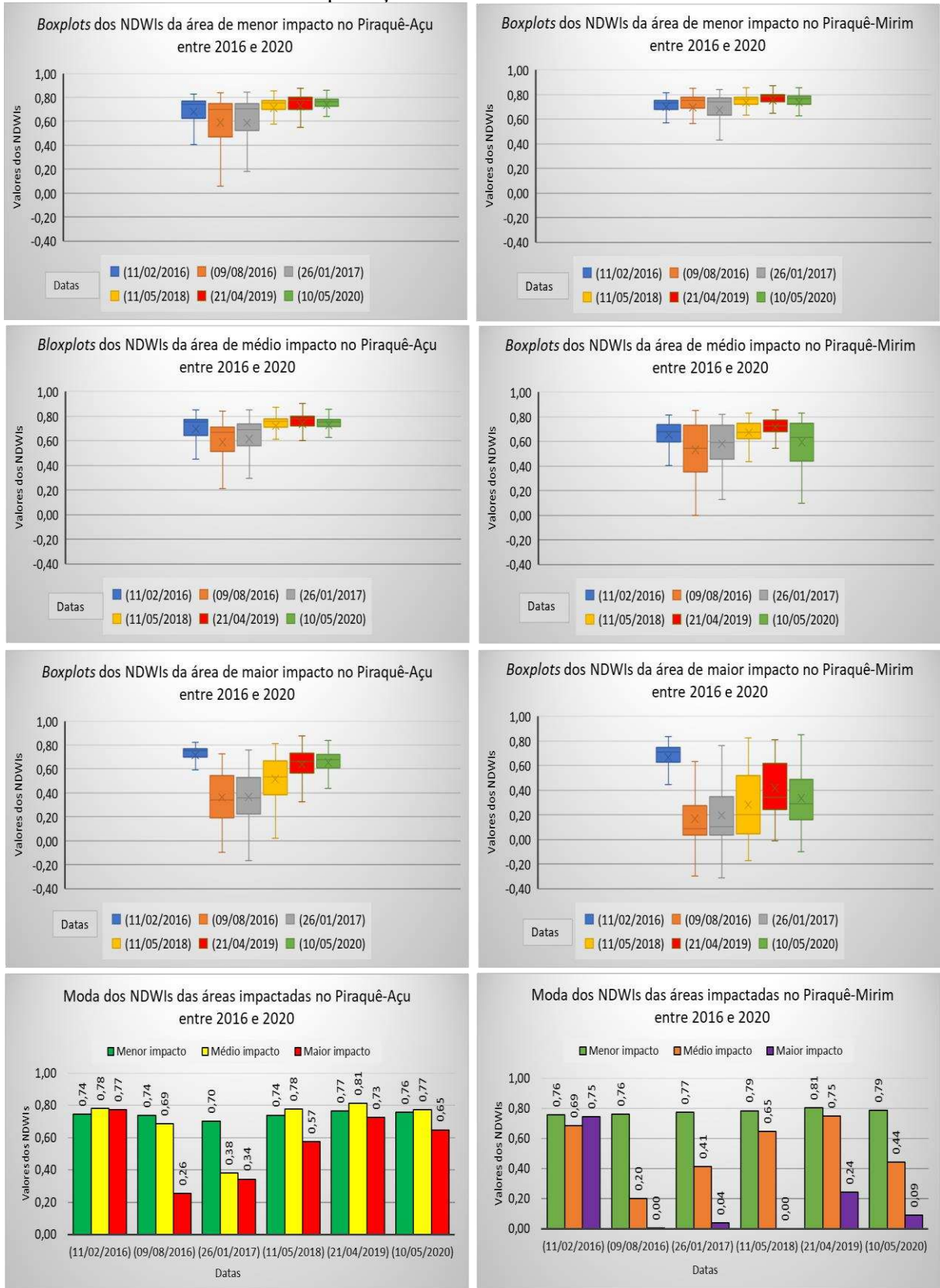
Fonte: O autor.

Figura 05 - NDWI gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



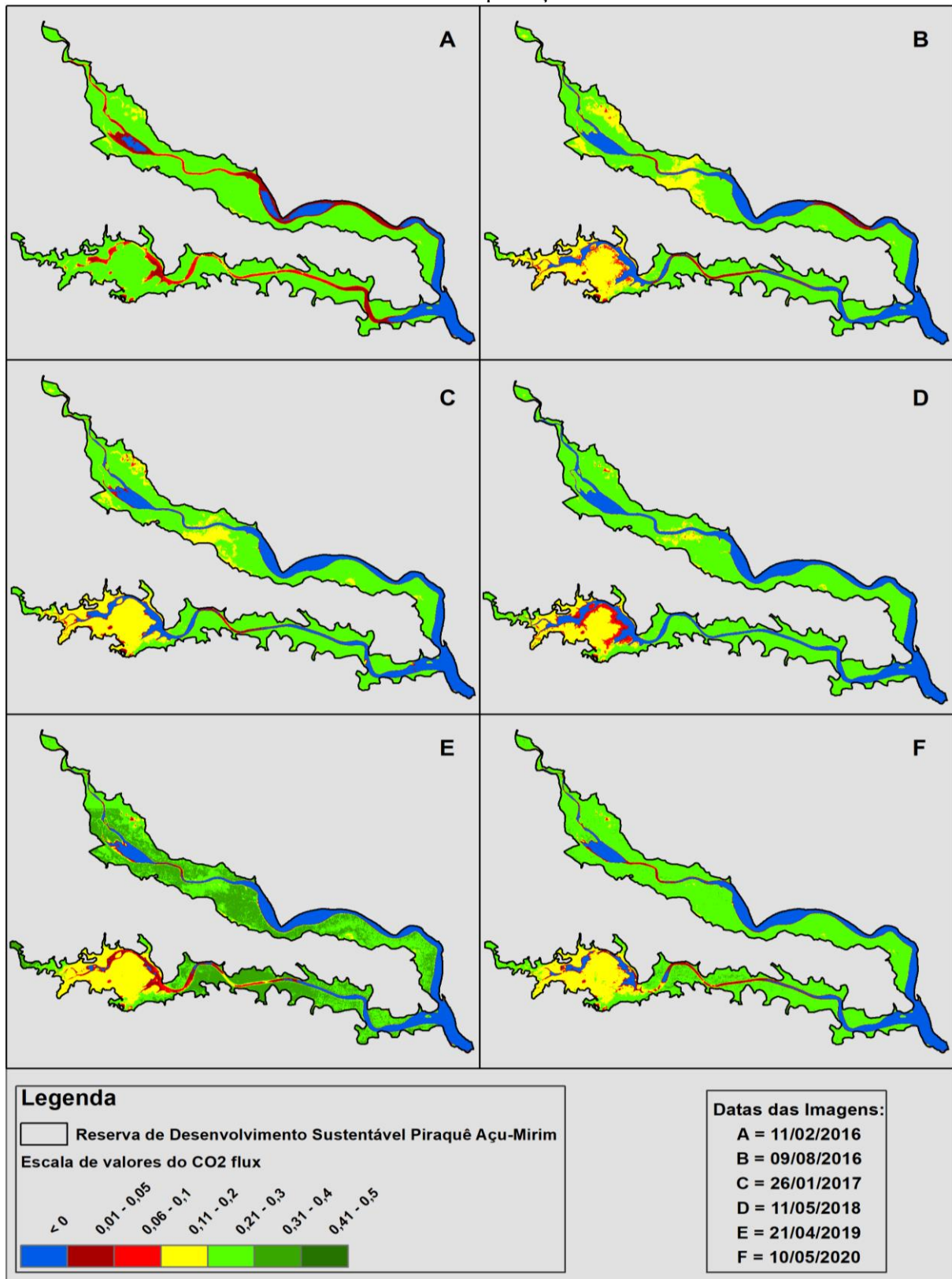
Fonte: O autor.

Figura 06- Gráficos estatísticos do NDWI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



Fonte: O autor

Figura 07- CO₂ flux gerado a partir de dados MSI/Sentinel-2 para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



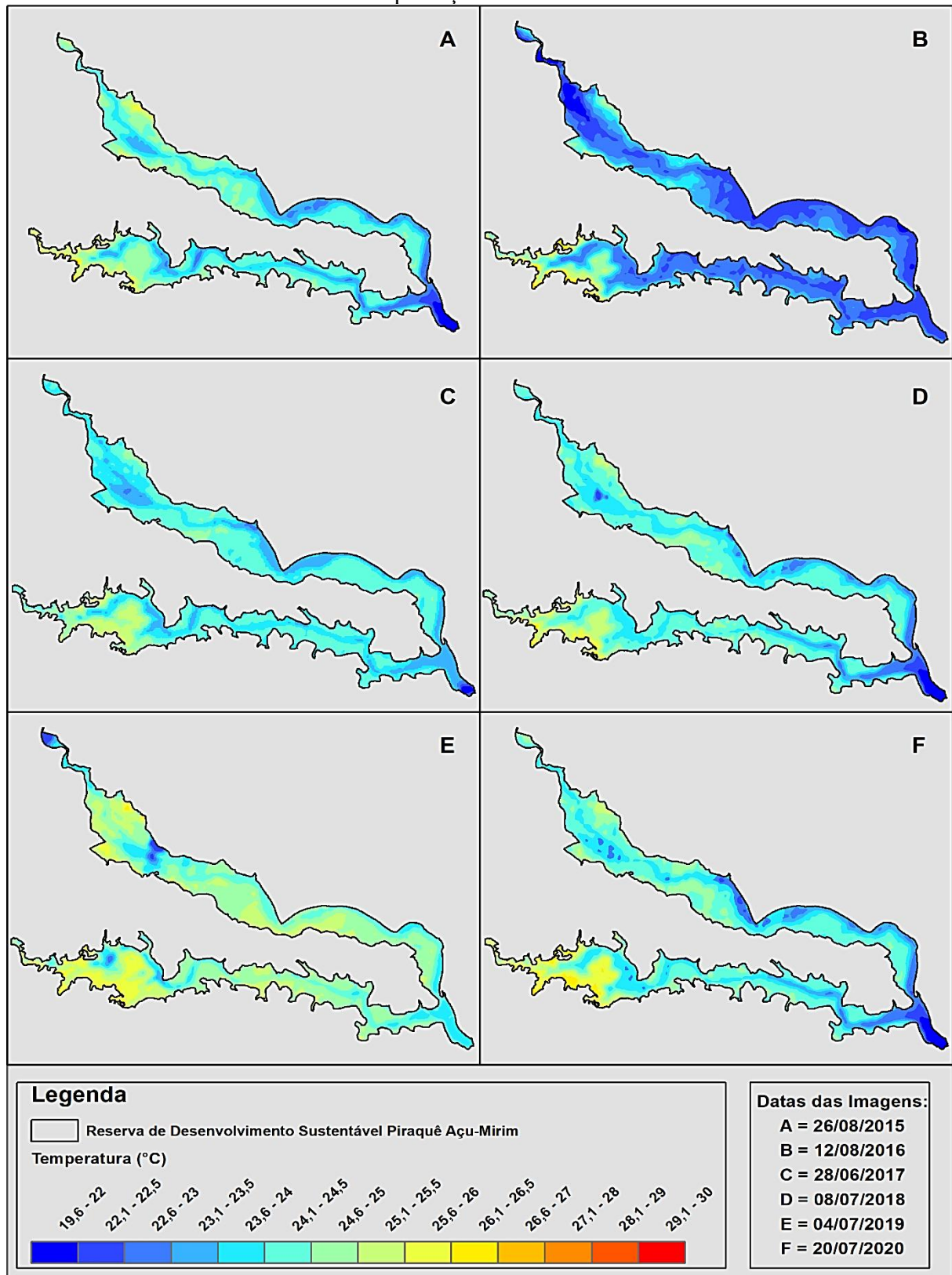
Fonte: O autor.

Figura 08- Gráficos estatísticos do CO₂ flux da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020.



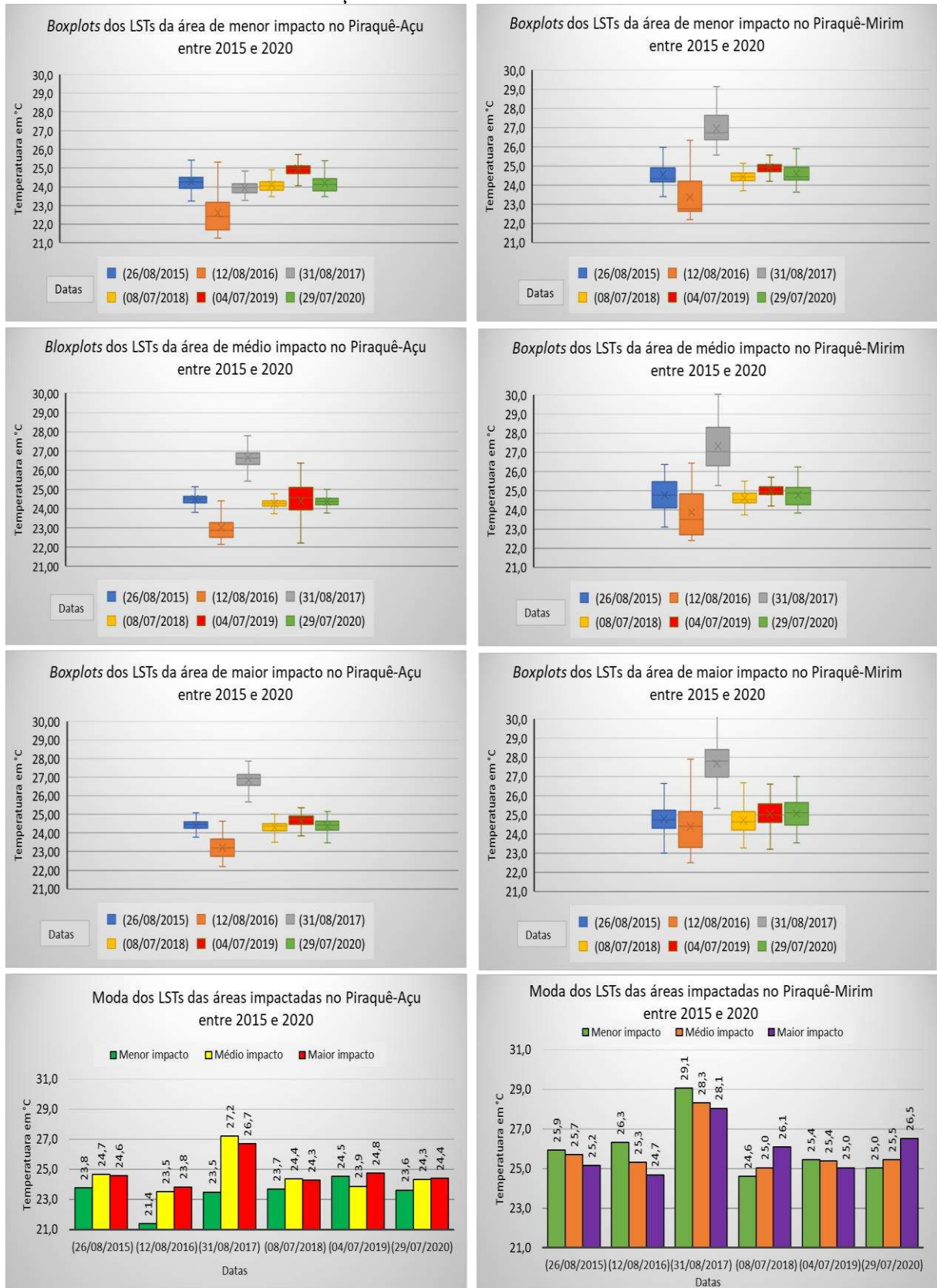
Fonte: O autor.

Figura 09- LST gerado a partir de dados OLI/Landsat-8 para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2015 e 2020.



Fonte: O autor.

Figura 10- Gráficos estatísticos do LST da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2015 e 2020.



Fonte: O autor.

4 DISCUSÃO

Inicialmente, faz-se alguns apontamentos que poderão auxiliar no processo de entendimento dos resultados apresentados acima. O primeiro é um resgate quanto à data de ocorrência da tempestade de granizo que atingiu a reserva, neste caso, dia 01 de junho de 2016. O segundo refere-se a base de dados e as datas das imagens, que são diferentes entre o LST, proveniente do *Landisat-8*, e os outros dois (NDWI e *CO₂ flux*), oriundos do *Sentinel-2*.

Os índices trabalhados nesse artigo, conforme apresentado, estão consolidados e são amplamente aplicados para entender a dinâmica de diferentes locais. Todavia, a utilização desses no ecossistema manguezal ainda é pouco pronunciada, mas os resultados aqui, apresentados mostram as potencialidades desses índices e reforçam a eficácia do Sensoriamento Remoto também para essas áreas. Nesse sentido, é importante tecer algumas considerações tanto acerca dos resultados obtidos em cada índice, assim como da correlação desses no campo.

De forma geral, ao se correlacionar a Figura 04, que representa a área em diferentes datas na composição de cor verdadeira, com as imagens das Figuras 05, 07 e 09 fica evidente a eficácia de ambos os índices em registrar modificações ocorridas nos mangues. Dentre essas, a que apresentou, visualmente uma maior variação de valores é a correspondente ao NDWI.

Desse modo ao analisar a Figura 05 é possível observar que na imagem (A), que representa a área antes da tempestade, os valores referentes à quantidade de água no sistema da vegetação de mangue estão compreendidos entre 0,71 e 0,88. Ressalta-se, que os locais dessa mesma imagem, que estão com valores compreendidos entre 0 e 0,5, são referentes a áreas de solo exposto, bancos de areia e vegetação de gramíneas.

Salvo as devidas correlações de valores nos índices LST e *CO₂ flux* também é possível ver que antes da ocorrência da tempestade esses se mantêm uniforme. Essa homogeneidade é facilmente comprovada tanto pelos gráficos de *boxplots* quanto de moda de ambos os estuários (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim).

Um fato importante de se chamar a atenção é para os produtos que representam a área pouco mais de dois meses após o evento climático extremo. Tanto no NDWI quanto no *CO₂ flux*, a imagem (B) e os diferentes gráficos mostram com clareza as alterações do local, pois é possível perceber a redução nos valores de umidade e de atividade fotossintética das plantas, principalmente nas áreas classificadas como de maior impacto.

No que diz respeito as estatísticas desses dois índices têm-se que no Piraquê-Açu o valor do NDWI da área de maior impacto diminuiu 66% enquanto o do $CO_2 flux$ diminuiu 18%. No Piraquê-Mirim, os valores registrados para a área de mesmo grau de impacto mostram uma diminuição de 100% para o NDWI e 62% para o $CO_2 flux$. Além disso, nos *boxplots* de ambos os índices, é possível observar a redução nos valores médios e o aumento na amplitude das dispersões. Novamente, os dados apontam que no Piraquê-Mirim o impacto foi mais severo que no outro estuário.

No LST, ao se comparar as imagens (A) e (B), Figura 09, também é possível perceber modificações, mas os gráficos se mostraram mais eficientes em demonstrá-las. Esses gráficos registraram diferenças entre os estuários de modo que, tomando como base os valores da moda, enquanto no Piraquê-Açu (PA) a área classificada como de menor impacto a temperatura diminuiu 2,4 °C, no Piraquê-Mirim (PM), no mesmo tipo de área houve um acréscimo de temperatura de 0,4°C. Essa diferença de valores entre os estuários, pode estar relacionada a diferentes fatores ligados ao formato, a extensão dos rios principais, assim como de todo o entorno.

Quanto a isso, o que se tem é que no PM, de maneira geral a área é mais aberta quando comparado ao PA, que está mais encaixada na formação do Grupo Barreiras. Além do mais, o Rio Piraquê-Açu, que é bem mais extenso que o PM, também possui um fluxo de água superior e, portanto, promove uma maior circulação das águas. Desse modo, a menor temperatura no PA, que se mostra presente nas imagens das demais datas, pode estar relacionada tanto a aos aspectos acima citados como características outras que necessitam de maiores investigações, mas que fogem ao escopo dessa pesquisa.

Em prosseguimento às análises e tomando como base a imagem (C), referente à 2017, é possível observar que, novamente, o índice NDWI apresentou uma maior variação de cores que os demais. Nessa imagem, identifica-se claramente as áreas classificadas como de menor, médio e maior impacto. Ao se analisar os gráficos, nota-se também a diferenciação entre as áreas dos estuários. Quanto a isso, enquanto no Piraquê-Açu a moda dos NDWIs registrou uma reação de 31% em relação ao valor anterior, no Piraquê-Mirim praticamente não se teve modificação.

Com relação ao $CO_2 flux$, destaca-se que em ambos os estuários registraram um aumento de valores de modo que no PA foi de 24% e no PM de 20%. Novamente, chama-se a atenção para os gráficos de *boxplots* que tanto pela média dos valores quanto pelos quadrantes e suas dispersões, foram capazes de registrarem a repercussão do impacto.

Ainda com relação à 2017, mas tomando como base o LST, o que se vê nas áreas de maior impacto é um aumento significativo nos valores de temperatura. Enquanto no PA a temperatura aumentou 2,9 °C, no PM esse aumento foi de 3,4 °C. Vale ressaltar que esse acréscimo de temperatura também se verificou nas demais áreas e isso pode ter graves repercussões, principalmente em locais onde o material (solo, substrato, matéria orgânica) é escuro, como é o caso dos manguezais, pois superfícies com baixo albedo tendem a reter calor.

Desse modo, o aumento de temperatura nesses locais pode gerar desequilíbrios ecossistêmicos interferindo nos processos bioquímicos como por exemplo, os que envolvem a decomposição da matéria orgânica. Essas alterações podem levar à morte microrganismos bioturbadores indispensáveis ao ambiente. Tal afirmativa se comprova na pesquisa de Gomes e Bernardino (2020), que ao estudarem os efeitos da seca nas assembleias bentônicas nos estuários Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, entre 2015 e 2016, identificaram perdas significativas na população desses microrganismos nos sedimentos dos manguezais.

Nas imagens referentes a 2018 (D), tanto do NDWI quanto do CO₂ *flux*, é possível perceber que nas áreas de maior impacto as diferenças entre o PA e o PM se tornam mais evidentes. Isso, também se faz presente nos gráficos estatísticos que demonstram que enquanto no PA os valores continuam aumento, no PM eles ainda se mantêm, praticamente, estagnados. Nos *boxplots* dos NDWIs, por exemplo, enquanto a média dos valores do PA está, aproximadamente, na casa de 0,5, no PM ela não passa de 0,2. De maneira geral, no CO₂ *flux*, salvo as devidas proporções, essa diferença se mantém.

Nas áreas de médio impacto, tanto no PA quanto no PM esses índices demonstram que a vegetação conseguiu se recuperar atingindo valores iguais ou próximos de antes do evento. O mesmo pode ser observado nas áreas classificadas como de menor impacto onde os valores se mantiveram, praticamente, constantes o tempo todo.

Quanto ao LST, o que se observa em relação aos dados do ano anterior, é uma queda de temperatura em ambos os estuários. No PA, por exemplo, todas as áreas apresentam valores quase iguais de antes do evento. No PM, a temperatura dos locais de menor e médio impacto também se mostraram muito próximas de antes do evento, mas no mais impactado a diferença chega a quase um grau Célsius mais quente. Com já dito, anteriormente, essa diferença possui sérias implicações na dinâmica ecossistêmica podendo, inclusive, interferir no processo de regeneração dos mangues.

Com relação à 2019 e suas respectivas imagens (E) e estatísticas, nota-se que tanto o NDWI quanto o CO₂ *flux* foram capazes de registrar a recuperação dos mangues, inclusive, na

área mais impactada do Piraquê-Mirim, que teve um aumento no valor de 24% para o primeiro índice e 56% para o segundo. A explicação para essa diferença pode estar relacionada com o comprimento das ondas das bandas utilizadas nesses índices. Enquanto no *CO₂ flux* o infravermelho próximo é a que apresenta maior comprimento de onda (0,78 - 0,9 micrômetros) no NDWI essa característica compete ao infravermelho de ondas curtas - SWIR (1,56 -1,65 micrômetros).

Sabe-se que a capacidade de penetração da SWIR em relação a essas outras é maior e, portanto, sofre menos interferência atmosférica. Nesse sentido, apesar de todos os produtos terem passado por correções radiométrica e atmosférica em software específico, tais interferências não são eliminadas 100% ainda mais se tratando de ambiente costeiro que possui uma dinâmica atmosférica muito intensa. Por isso, o campo é um elemento indispensável, pois é nele que se coloca em confronto os resultados obtidos no laboratório e a realidade, propriamente dita.

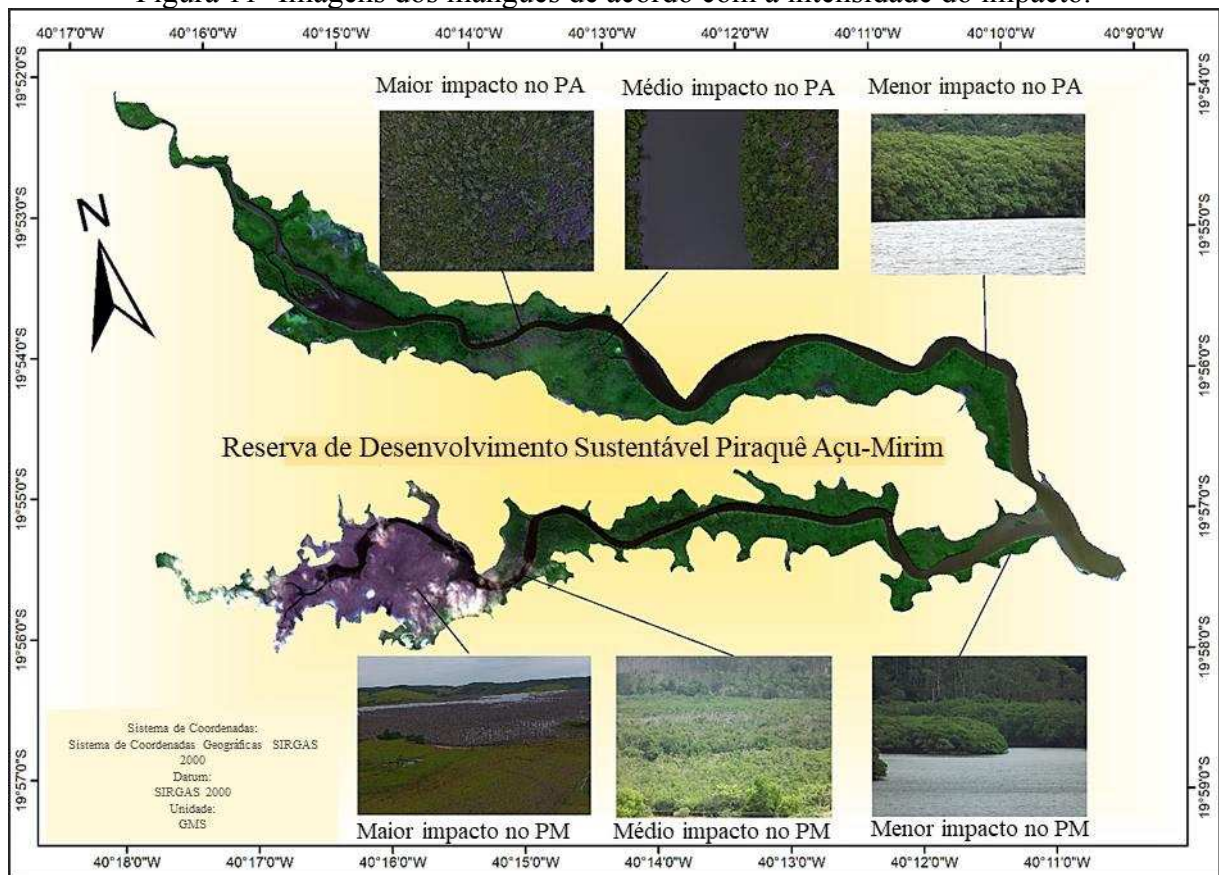
No índice LST, para o mesmo ano, os valores de temperatura das áreas do PA não se mostraram muito diferentes do que os do ano anterior tendo oscilações na casa dos 0,5°C para mais ou para menos. No PM as variações foram maiores, sendo que nas áreas de menor, médio e maior impacto os valores foram, respectivamente 0,5°C maior, 0,4°C maior e 1,1 °C menores que no ano anterior.

Finalmente, na imagem (F) referente a 2020, os índices NDWI e *CO₂ flux*, foram capazes de registrar a modificação da paisagem nas áreas impactadas. Com relação a esses índices no estuário do Piraquê-Açu, o que se viu foi uma certa estabilidade nos valores indicando que a vegetação das áreas impactadas está quase totalmente regenerada. Por outro lado, no Piraquê-Mirim os dados demonstram que as áreas passaram por processos desiguais de recuperação, ou seja, enquanto nas áreas de menor e médio impacto os valores estão próximos de antes do evento climático extremo, na área de maior impacto a situação é bem diferente.

Quanto a isso, enquanto no NDWI os valores estão 88% abaixo do ideal, que seria o valor de antes do impacto, no *CO₂ flux* os valores é 48% inferior ao ideal. Essa diferença entre os índices se mostrou muito alta indicando que, ou o *CO₂ flux* está superestimando os valores, ou o NDWI os está subestimando.

Nesse sentido, as investidas a campo foram fundamentais, pois possibilitou, dentre outras coisas, identificar com facilidade as áreas classificadas como de menor, médio e maior impacto em ambos os estuários (Figura 11).

Figura 11- Imagens dos mangues de acordo com a intensidade do impacto.

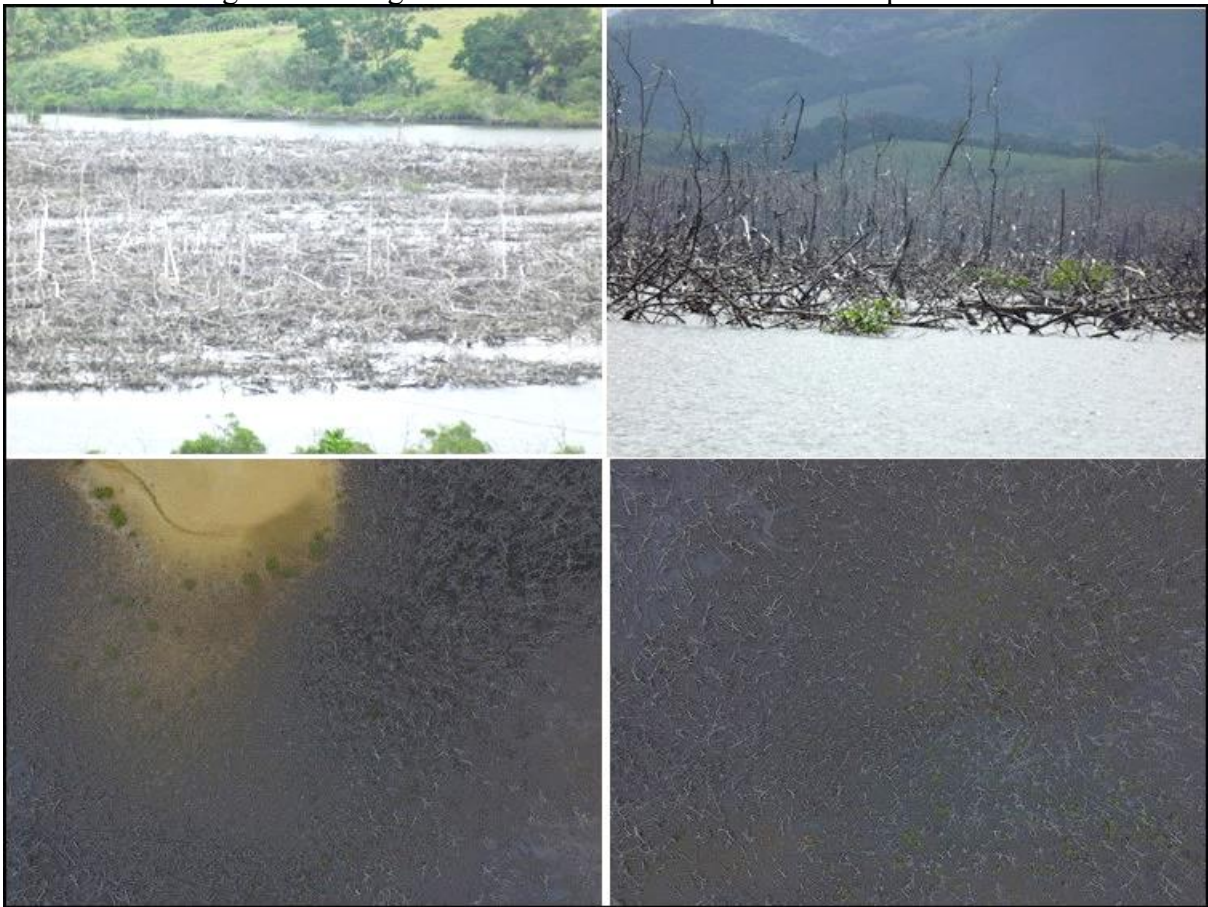


Fonte: O autor.

Além disso, foi possível tecer considerações acerca das diferenças entre esses dois índices, especificamente, na área de maior impacto do PM. Acredita-se que o CO_2 flux promoveu a superestimação dos valores haja vista que a área de maior impacto do PM quase não apresenta biomassa sendo essa condição indispensável no processo fotossintético.

Nos registros de campo (Figura 12), é possível observar as consequências do impacto na vegetação que, de modo geral, foi quase totalmente destruída. Até existem lugares onde algumas plantas estão rebrotando o que indica um início de recuperação, mas é difícil dizer se essas conseguirão se desenvolver e chegarem ao estágio adulto. Tais registros reforçam a ideia de que os dados do NDWI estão mais próximos da realidade do local quando comparado ao CO_2 flux.

Figura 12- Imagens da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



Fonte: O autor.

Com relação ao LST de 2020, novamente é possível observar as diferenças entre o Piraquê-Açu (PA) e o Piraquê-Mirim (PM). No primeiro analisando o gráfico da moda, tem-se que apesar da área de menor impacto registrar uma queda de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação ao ano anterior, esse valor, assim como em 2018, é praticamente o mesmo de antes do evento. Nas áreas de médio e maior impacto, também houve pequenas oscilações para cima e para baixo, respectivamente, mas igual a área de menor impacto, os valores ficaram próximos de antes da tempestade. Essa possível volta à normalidade pode ser observado nos gráficos *boxplots* nos diferentes graus de impacto.

No que diz respeito ao Piraquê-Mirim, os *boxplots* mostram que, em todas as áreas, a diferença entre a média de antes do evento e 2020 é inferior a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. No gráfico da moda, com exceção da área de maior impacto, que está com a temperatura $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais elevada que em 2015, as temperaturas se mostram inferiores que as de antes do impacto de granizo.

Tendo ciência que o LST registra a temperatura superficial dos alvos e essa pode variar em função das condições atmosféricas, é possível afirmar que esse índice foi capaz de registrar

variações de temperatura no local em função da tempestade. Infelizmente, a reserva e seu entorno não possuem estações meteorológicas para que fosse feita análises de correlação entre as temperaturas superficiais e atmosféricas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do Sensoriamento Remoto em áreas de manguezais implica vários desafios, pois em função da geolocalização desse ecossistema a presença de nuvens é constante e isso, certamente, é um dificultador para se manter um padrão entre as datas das imagens. No entanto, diante das dinâmicas de marés e a constante oscilação das águas nesse local, o que dificulta o acesso ao interior do mesmo, é possível afirmar que essa metodologia apresenta um grande potencial para o entendimento desse ambiente, principalmente para identificar mudanças abruptas na paisagem.

Nesse sentido, todos os índices aqui utilizados foram capazes de registrar tanto a destruição quanto a recuperação de algumas áreas. Obviamente, ficou evidente que o NDWI foi o que se mostrou mais preciso quando feita a correlação entre os dados obtidos de forma remota e a realidade de campo. Isso pode ser verificado nas imagens presentes na Figura 12 que evidenciou a destruição dos mangues.

Como o local não tinha nem estação meteorológica e tão pouco torre de medição de CO₂ atmosférico, tanto no LST quanto no CO₂ *flux* os dados foram interpretados sem aplicar uma análise de correlação estatística, mas sim uma análise comparativa onde foi possível foi identificar padrões entre os índices que denotassem as mudanças nos valores em função da tempestade de granizo.

Outro importante fato a se destacar diz respeito a diferença de fonte de dados e suas resoluções espaciais. Quanto a isso, como já dito, o CO₂ *flux* e o NDWI foram gerados com os dados do *Sentinel-2* apresentando resolução espacial de 10m e 20m, respectivamente, ao passo que o LST foi obtido a partir do *Landsat-8* que para a banda do termal apresenta resolução espacial de 100m. Diante disso, pode-se dizer que devido a área de pesquisa possuir uma grandes variações em virtude das correntes oceânicas, que além da oscilação do nível das águas também lança no ar sprays salinos que podem interferir nos resultados mesmo fazendo as devidas correções, pode-se dizer que esses se mostraram promissores para a região.

Frente ao exposto e diante da importância do manguezal pesquisado para as populações de pescadores, índios e agricultores do entorno, bem como para os animais de forma geral, faz-se necessário maiores investimentos em pesquisas que busquem avaliar as perdas ecossistêmicas ocorridas em função do impacto. Além disso, os resultados aqui apresentados servem de alerta para a necessidade de intervenção que vise o plantio de mangues na área de

maior impacto do Piraquê-Mirim. O que observou com o NDWI, é que desde o impacto, salvo um fracassado início de recuperação em 2019, os dados se mostram estagnados. Como já dito repetidas vezes, essa situação se confirmou na pesquisa de campo.

Contudo, espera-se que as informações geradas nessa pesquisa possam auxiliar na tomada de decisão que busque a recuperação desse ambiente, pois como a natureza é sistêmica as ações nesse local poderão ter repercussões no global.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e os custos do campo foi financiado, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código Financeiro 001.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R.; Junior, C. C. Manguezal e serviços ecossistêmicos. In: **Atlas dos Manguezais do Brasil / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. – Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018. p.: 85 – 95.
- ARACRUZ, Prefeitura Municipal de. Secretaria Municipal de Meio Ambiente- SEMAM. **Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim**. Aracruz, 2020. Disponível em: <http://www.pma.es.gov.br/meio-ambiente/27>. Acesso em 15 de abr. de 2021.
- ARACRUZ, Prefeitura Municipal de. Secretaria de Turismo e Cultura - SEMTUR. **Rio Piraquê-Açu**. Aracruz, 2021. Disponível em: <http://www.aracruz.es.gov.br/turismo/atracoes-turisticas/14>. Acesso em 15 de abr. de 2021.
- BAPTISTA, G. M. M. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. In: XI SBSR, 2003, Belo Horizonte. Brasil. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044.
- BARBOSA, Eliezio Nascimento; Neto, Francisco das Chagas Bezerra; Caiana, Clarice Ribeiro Alves. Sensoriamento Remoto aplicado à análise do fenômeno de Ilhas de Calor Urbano na Cidade de Vitória, Espírito Santo. **Research, Society and Development**. Itabora, v. 9, n. 6, 2020. Disponível em: <https://rsd.unifei.edu.br/index.php/rsd/article/view/3655>. Acesso em 12 de junho de 2020.
- BERNARDINO, A.F.; Netto, S.A.; Pagliosa, P.R.; Barros, F., Christofolletti, R.A.; Rosa-Filho, J.S.; Colling, J.; Lana, P.C. Predicting ecological changes on benthic estuarine assemblages through decadal climate trends along Brazilian Marine Ecoregions. **Estuar. Coast. Shelf Sci**, v.166, p. 74–82, 2015. DOI.org/10.1016/j.ecss.2015.05.021.
- COELHO, André Luiz Nascentes; Correa, Wesley de Souza Campos. Temperatura de superfície celsius do sensor tirs/landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**. Boa Vista, v. 7, n.1, p. 31-45, 2013.
- FERREIRA, Johnny Mayron Santana; Ferreira, Pedro dos Santos; Moraes, Ygor Cristiano Brito; Gomes, Viviane Pedroso; França, Luciana Mayla de Aquino; Galvêncio, Josiclêda Domiciano. Uso de técnicas de Sensoriamento Remoto na detecção de mudanças espaço-temporais das áreas de vegetação de mangue em Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife, v. 06, n. 03, p. 356-372, 2013.
- GAMON, J. A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, p. 35–44, 1992.
- GAO, B. C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257-266. 1996
- GERHARDT, Anderson Rafael; Rodrigues, Celso Pinheiro; Alves, Gilca; & Fontana, Denise Cybis. Mapeamento do fluxo de CO2 em lavouras de soja usando imagens orbitais landsat TM5. **Anais**, XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, p. 039-046, 2011.

GODOY, Lorena Becale; Baptista, Gustavo Macedo de Mello; Almeida, Tati. Relação entre vegetação e temperatura de superfície nos parques urbanos do Distrito Federal, por meio de dados ASTER. **Anais**, XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, v. 14, p. 699-705, 2009.

GOMES, Luiz Eduardo de Oliveira; Bernardino, Angelo Fraga. Drought effects on tropical estuarine benthic assemblages in Eastern Brazil. **Science of the Total Environment**. v. 703, p. 1-10, 2020.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C; Sobrino, J. A; Skoković, D; Mattar, C; & Cristóbal, J. "Land Surface Temperature Retrieval Methods From Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data," in: **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, vol. 11, n. 10, p. 1840-1843, 2014. doi: 10.1109/LGRS.2014.2312032.

OLIVEIRA, Josemary Santos e Silva. **Índices de vegetação (NDVI, IVAS, IAF, NDWI) como subsídio à gestão do uso e ocupação do solo na zona de amortecimento da Reserva Biológica de Saltinho, Pernambuco**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Geográficas) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

RAHMAN, A.F.; Gamon, J.A.; Fuentes, D.A.; Roberts, D.; Prentiss, D.; Qiu, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop**, JPL/NASA, Pasadena, Califórnia, 2000.

ROCHA, Luísa Resende. **Modelagem para determinação do fluxo de Co₂ em paisagens naturais e antrópicas na região amazônica a partir de dados do sensor MODIS**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

ROUSE, J. W; HAAS, R. H; SCHELL, J. A; & DEERING D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ETRS**. In: Third ETRS Symposium, NASA SP353, Washington, DC. 1: 309-317. 1973.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. A diversidade do ecossistema manguezal. In: **Atlas dos Manguezais do Brasil** (1ª ed.). Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. – ICMBio, Brasília, D.F, p. 23-36, 2018b.

SERVINO, Ricardo Nogueira; Gomes, Luiz Eduardo de Oliveira; Bernardino, Angelo Fraga. Extreme weather impacts on tropical mangrove forests in the Eastern Brazil Marine Ecoregion. **Science of the Total Environment**. New York, USA; n. 628, p.233-240, 2018. doi:10.1016/j. scitotenv. 2018.02.068.

SHARMA, Vishwa Raj; Bisht, Kamal. Estimation of Land Surface Temperature using LANDSAT DATA: A case study of Agra city, India. **International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology**. India, v. 5, n. 2, p. 1850 – 1857, 2019.

OAVINSKI, R; Maretti, C. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio. Brasília, 2018. 176 p.: i

CONCLUSÕES GERAIS

A utilização do Sensoriamento Remoto (SR) no monitoramento de atividades agrícolas, na detecção de focos de incêndios, em estudos que buscam registrar as diferentes formas de uso e ocupação da terra e o monitoramento das dinâmicas atmosféricas já é algo consolidado. No entanto, ainda existe um enorme campo a ser explorado por essa técnica/metodologia.

Dentre os locais em que SR ainda é relativamente pouco utilizada e permite a aplicação de diferentes procedimentos para o entendimento de suas dinâmicas, o ecossistema manguezal se apresenta como um dos mais promissores, pois suas características de formação o configuram como um sistema de transição entre o ambiente marinho e terrestre recebendo, por conseguinte, características de ambos.

Nesse sentido, os manguezais estão sujeitos a transformações que podem se dar tanto pela ação direta do homem, como é o caso da ocupação das áreas para fins imobiliários, quanto pela indireta como, por exemplo, a elevação dos níveis dos oceanos devido à aceleração do derretimento das calotas polares. Tal derretimento pode estar diretamente ligado ao lançamento na atmosfera de gases com maior capacidade de retenção de calor que, por conseguinte, podem aumentar a temperatura do planeta repercutindo na intensidade dos eventos climáticos que se mostram cada vez mais destrutivos.

Diante disso, essa pesquisa se valeu de diferentes índices espectrais (NDVI, SAVI, NDWI, CO_2 flux) índice biofísico (LAI) e do LST para avaliar a repercussão do impacto da tempestade de granizo que atingiu a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açumirim no dia 1 de junho de 2016. Diante a disponibilidade de imagens dos Satélites *Landsat-8* e *Sentinel-2* que entregam bases de dados de altas resoluções temporais, espaciais, espectrais e radiométricas, foi possível avaliar a condição fisiológica do mangue estabelecendo comparações do antes e depois do acontecimento do evento.

De forma geral, todos os índices registraram mudanças nos valores da resposta espectral dos alvos, mas em se tratando do produto em forma de imagem o NDVI e o NDWI foram mais eficientes, pois foram capazes de demonstrar uma maior diversidade de cores permitindo que fosse feita a separação das áreas de menor, médio e maior impacto. Essa divisão, possibilitou a alocação de pontos amostrais utilizados para extrair os valores das séries temporais trabalhadas.

Essa operação foi fundamental para se entender quantitativamente tanto as alterações provocadas pela tempestade de granizo quanto da capacidade de reação da vegetação. Quanto

a isso, o que se teve é que enquanto todas as áreas impactadas do Piraquê-Açu (PA) iniciaram um processo de recuperação em 2018, no Piraquê-Mirim (PM) essa melhora só foi observada nas áreas de menor e médio impacto restando à de maior uma destruição quase que total.

Para expressar os resultados obtidos na estatística descritiva optou-se por trabalhar com os *boxplots* que além dos valores médios também demonstram a dispersão dos valores e a concentração entre os quartis. Outro item que permitiu realizar comparações mais sistemáticas foi a moda. Quando comparada de forma isolada, essa foi a que trouxe melhores resultados, uma vez que sua função permitiu identificar quais valores mais se repetiam em cada índice dentro do recorte temporal utilizado.

Retornando aos índices, mas agora analisando o LST, o que se observou é que apesar de registrar alterações na temperatura, principalmente, nas áreas de maior impacto sua aplicabilidade seria mais eficiente se na área existisse uma estação de monitoramento da temperatura atmosférica. Isso também se aplica ao CO₂ *flux* que poderia ser mais explorado caso houvesse dados do percentual de gases no local para que fossem feitas correlações diretas.

Outro apontamento com relação a esse último índice, é que na área de maior impacto do PM houve uma superestimação dos valores. Tal constatação foi possível com a pesquisa de campo que possibilitou correlacionar os dados obtidos com o índice e a situação real do lugar. Para isso, foram feitas excursões ao campo que possibilitaram ter acesso as áreas externa e internamente. O acesso externo se deu via automóvel com o qual se fez o contorno da reserva onde em vários pontos foi possível visualizar a destruição dos mangues. Nesse percurso, também foi utilizado um *Remotely Piloted Aircraft* (RPA) para averiguar e registrar imagens de lugares de difícil acesso.

Quanto à investida ao interior do manguezal, essa foi realizada via barco que possibilitou o registro de locais onde a intensidade do impacto se deu de diferentes formas. Essa etapa, foi fundamental tanto para a validação dos dados quanto para o entendimento que ainda há uma miríade de dinâmicas nesse ecossistema que precisa ser entendida mais a fundo como, por exemplo, a diferença de resiliência entre a vegetação terrestre, a borda do manguezal, e o mangue frente a tempestade de granizo.

Contudo, a presente pesquisa foi capaz não só de responder os questionamentos iniciais que giraram em torno do real estado da paisagem e das dimensões e consequências do impacto do evento climático extremo para o manguezal, mas também propôs uma rotina de procedimentos que se seguida a rigor poderá ser aplicado em outras áreas que tenham ou estejam passando por modificações/transformações na cobertura vegetal.

APÊNDICE – Imagens dos mangues e foz do rio Piraquê-Açu e detalhamento dos produtos estatísticos.

No intuito de trazer maiores detalhes a respeito dos mangues e da dinâmica de embarcações na foz do rio Piraquê-Açu que em sua grande maioria, estão relacionadas às atividades pesqueiras, sentiu-se a necessidade de apresentar outras imagens registradas na expedição de campo. Salienta-se que essas são apenas uma pequena parcela do acervo, que poderá ser acessado na íntegra no site do Laboratório de Geomorfologia do Quaternário (<https://www.geomorfologia.ufv.br/>) do Departamento de Geografia da UFV.

Para além disso, mas também objetivando apresentar outros produtos estatísticos gerados, separadamente, a partir dos pontos amostrais de acordo com o nível do impacto, optou-se por apresentar tanto gráficos de dispersão quanto tabelas contendo a estatística descritiva relativos a esses pontos. Os dados dessas tabelas foram cruciais para a escolha dos gráficos apresentados nos capítulos. Desse modo o *boxplot*, que reúne informações acerca da média, desvio padrão, mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil (mediana) e terceiro quartil e *outliers*, permitiu uma análise comparativa nos diferentes anos, da repercussão do evento nas áreas impactadas.

Diante do exposto, salienta-se que aqui serão apresentados apenas os dados referentes às áreas de maior impacto de ambos os estuários, uma vez que foram estas as que apresentaram maiores oscilações nos valores.

Figura 01- Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Mirim (vista terrestre).



Fonte: O autor.

Figura 02- Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Mirim (vista aérea).



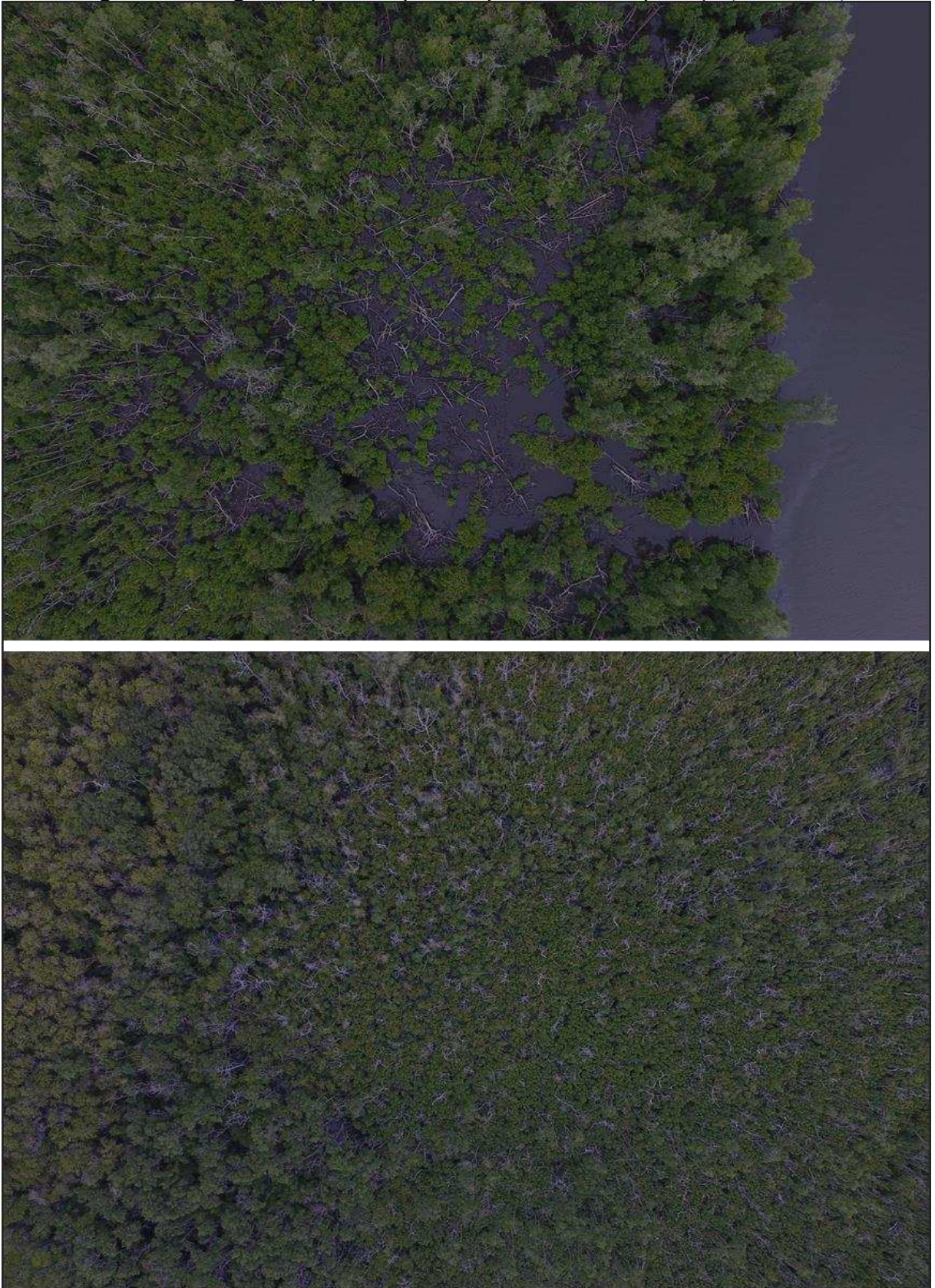
Fonte: O autor.

Figura 03- Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Açu (vista terrestre).



Fonte: O autor.

Figura 04- Mangues impactados pela tempestade no Piraquê-Açu (vista aérea).



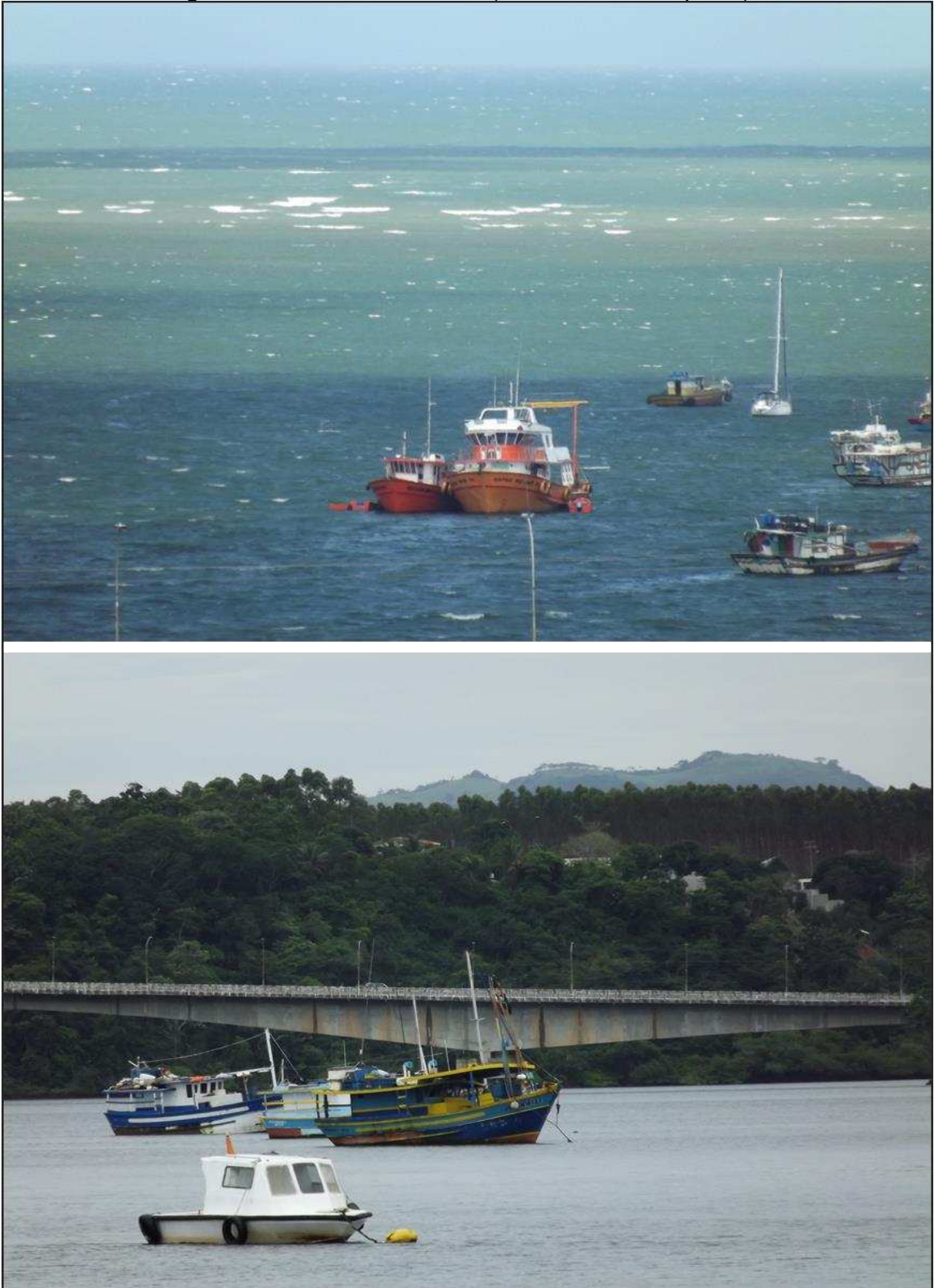
Fonte: O autor.

Figura 05- Imagens de mangues não atingidos pela tempestade.



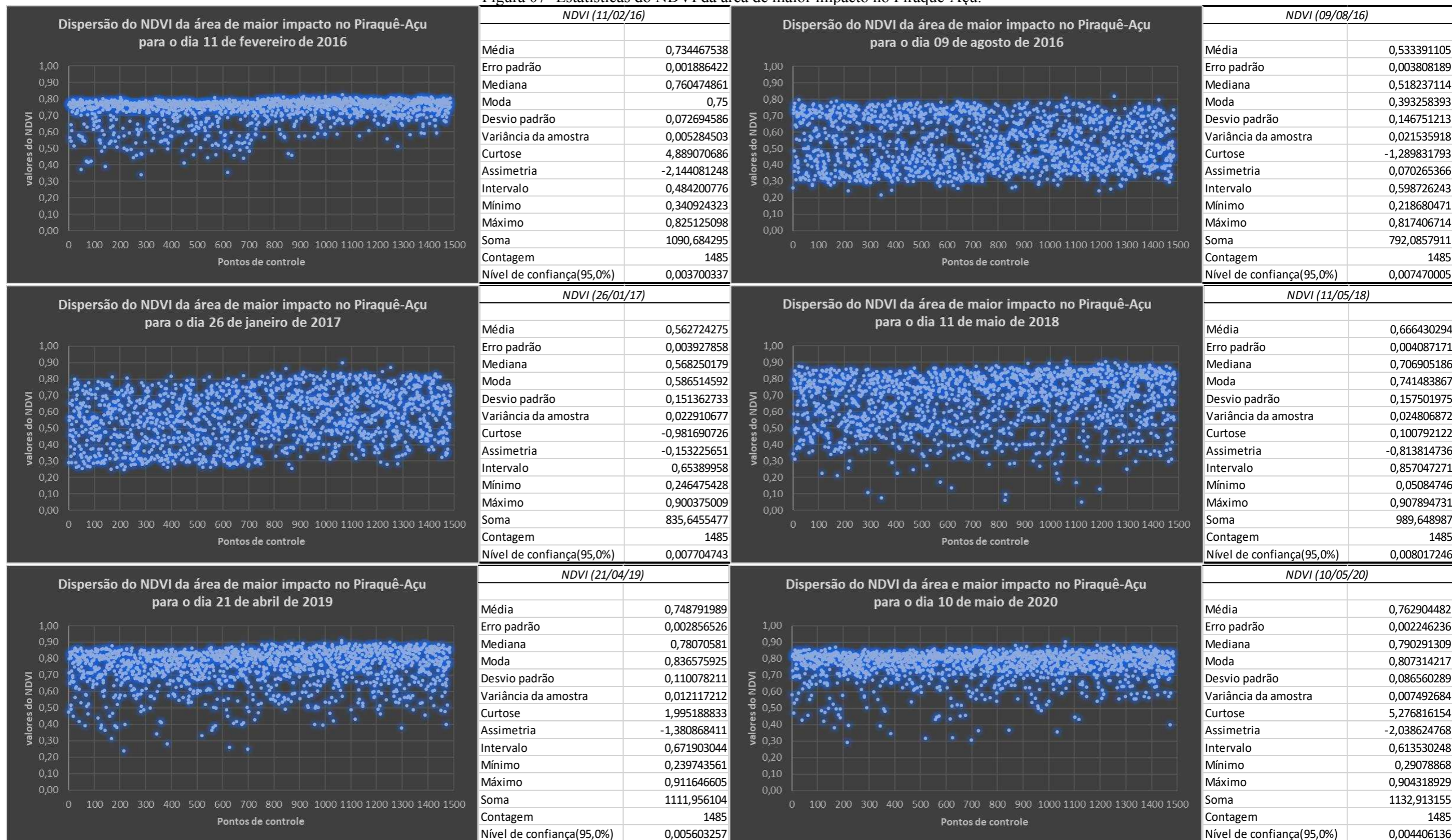
Fonte: O autor.

Figura 06- Dinâmica de embarcações na foz do Piraquê-Açu.



Fonte: O autor.

Figura 07- Estatísticas do NDVI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.



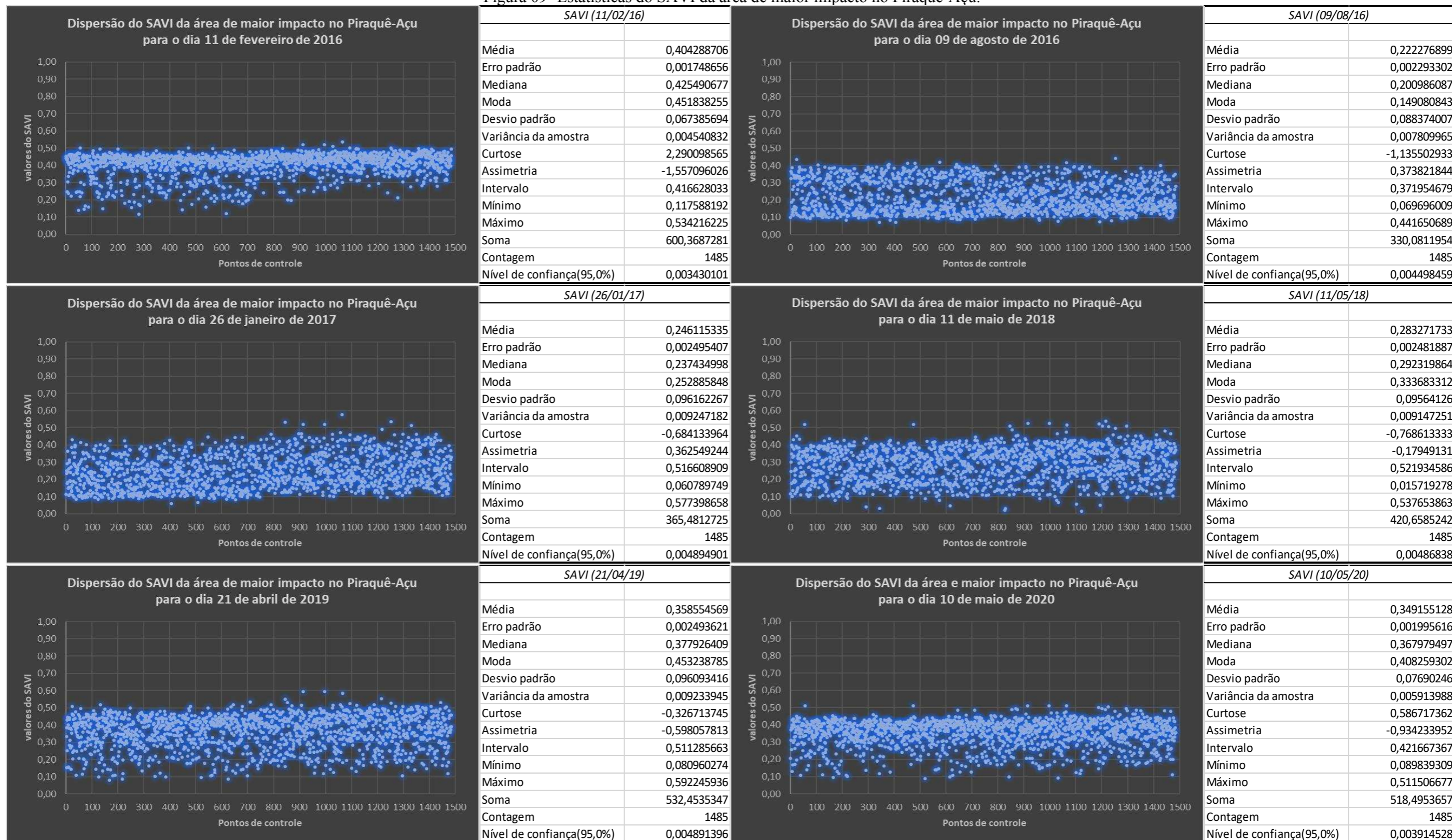
Fonte: O autor.

Figura 08- Estatísticas do NDVI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



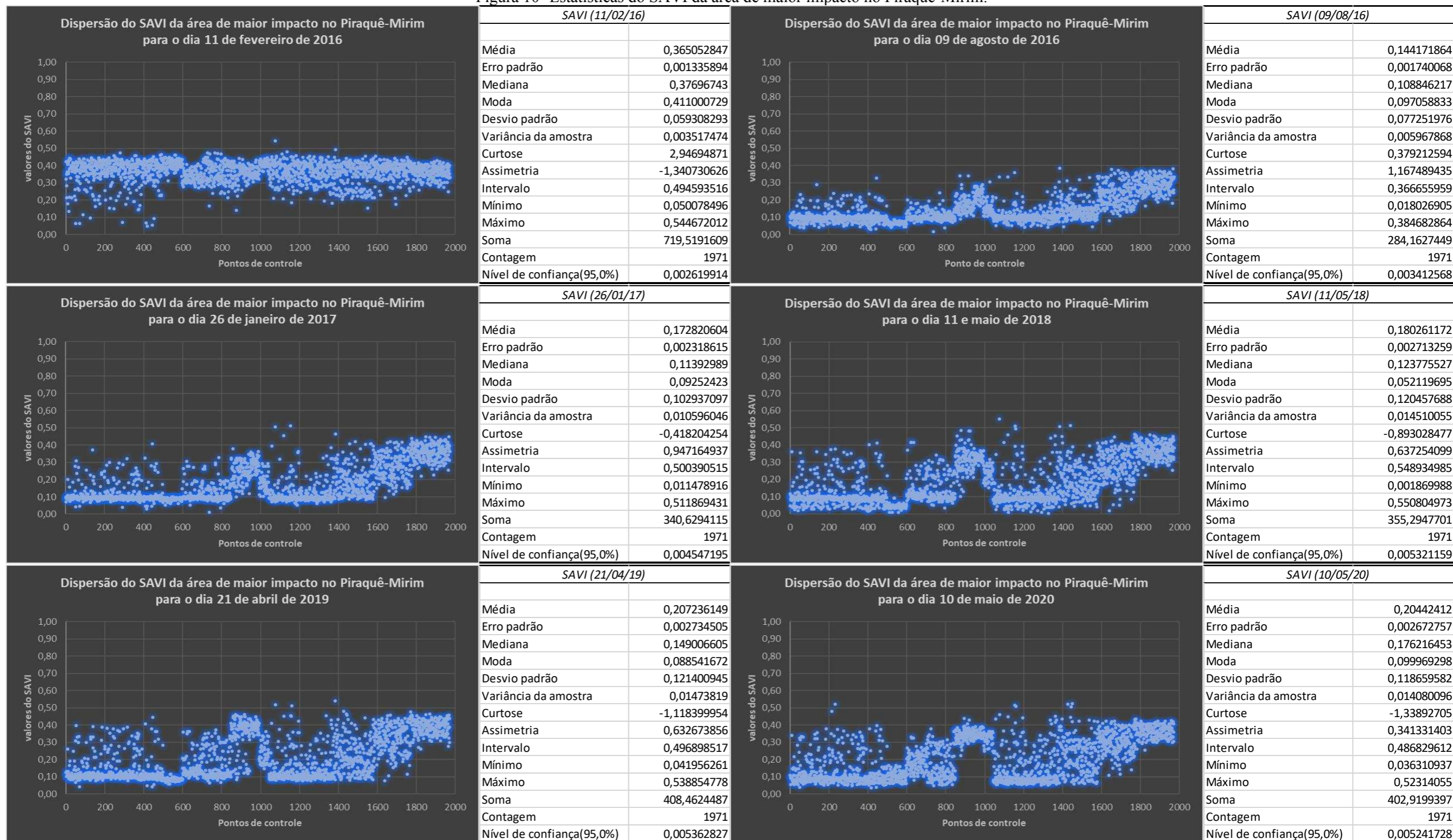
Fonte: O autor.

Figura 09- Estatísticas do SAVI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.



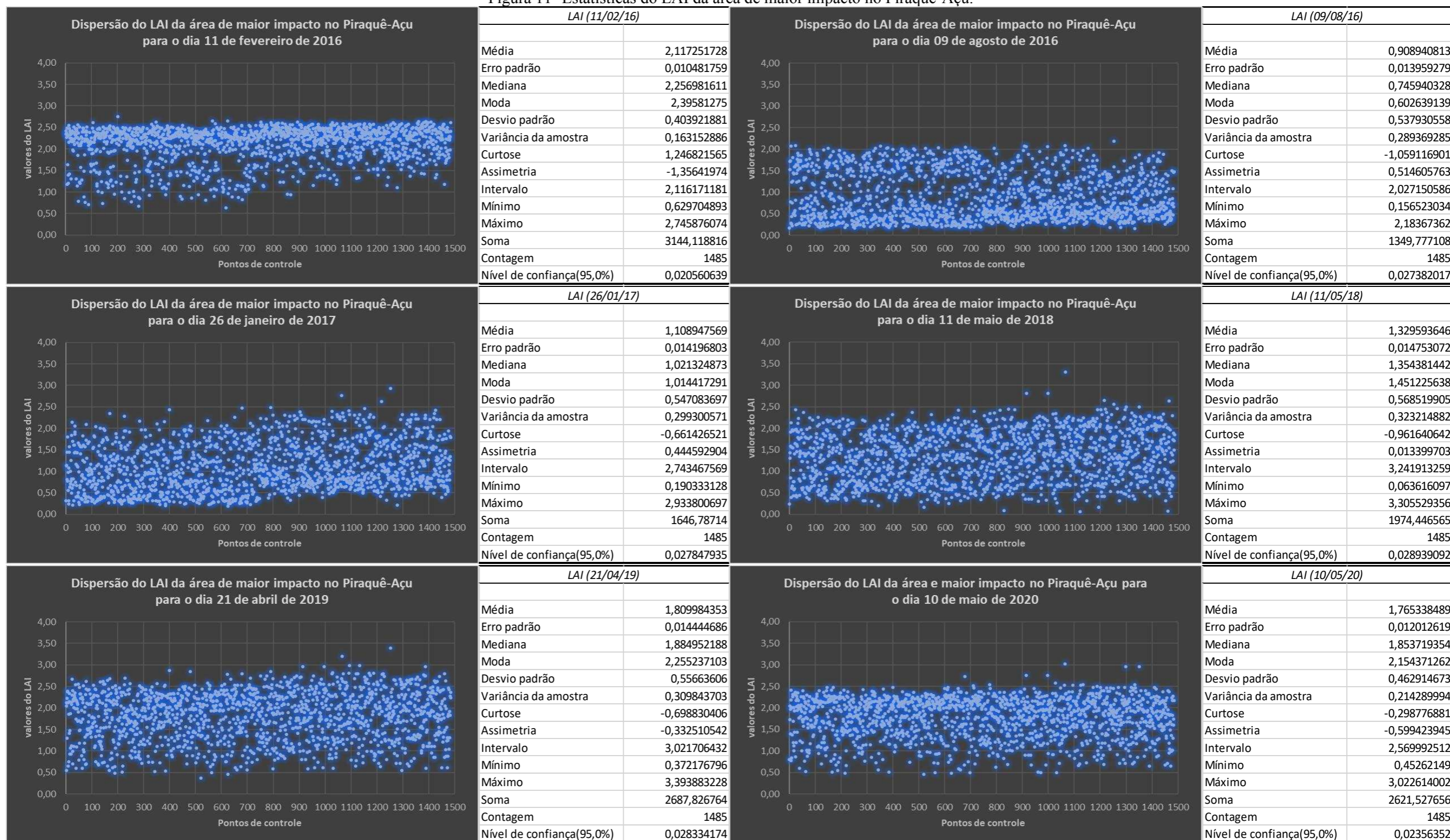
Fonte: O autor.

Figura 10- Estatísticas do SAVI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



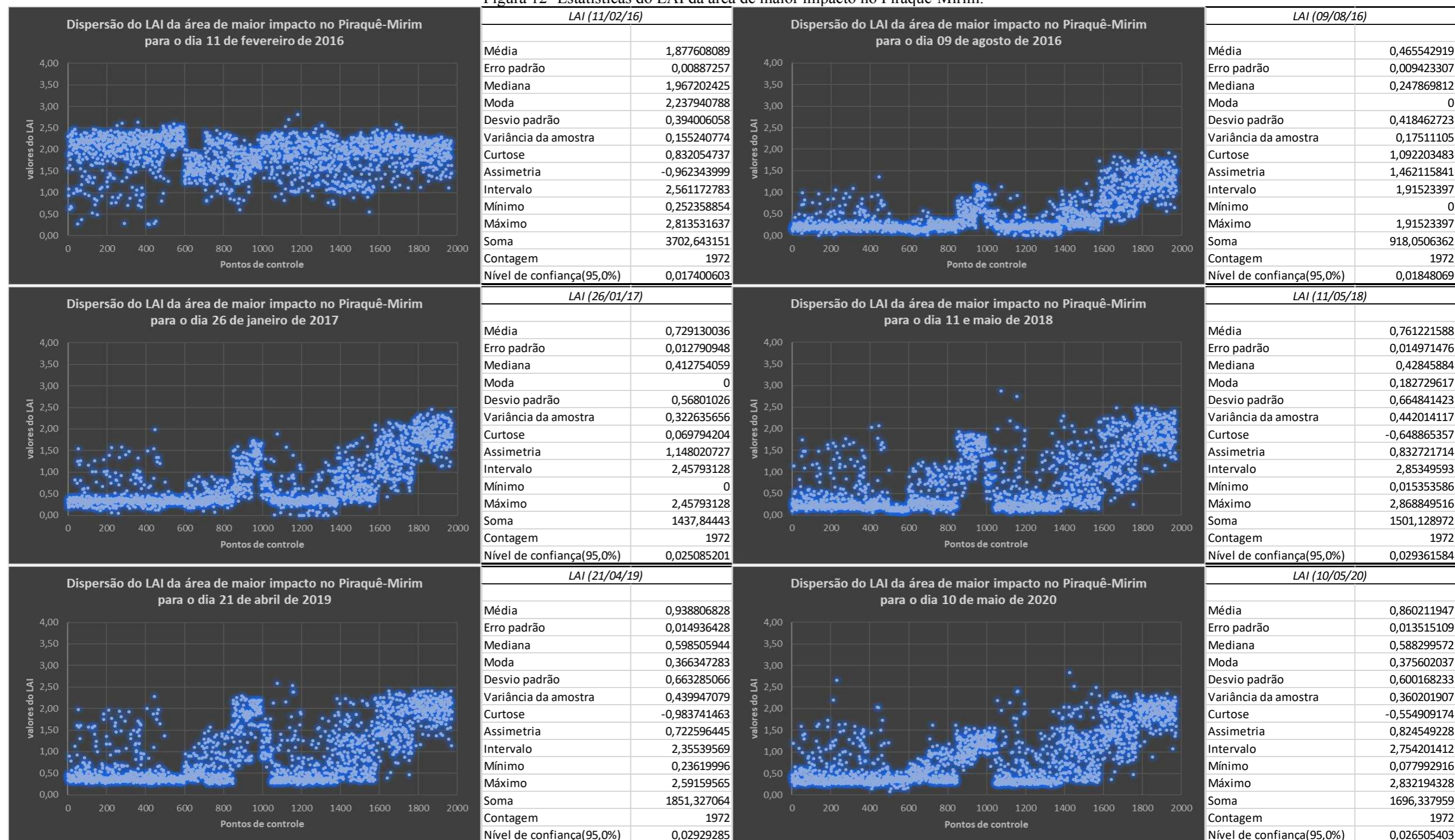
Fonte: O autor.

Figura 11- Estatísticas do LAI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.



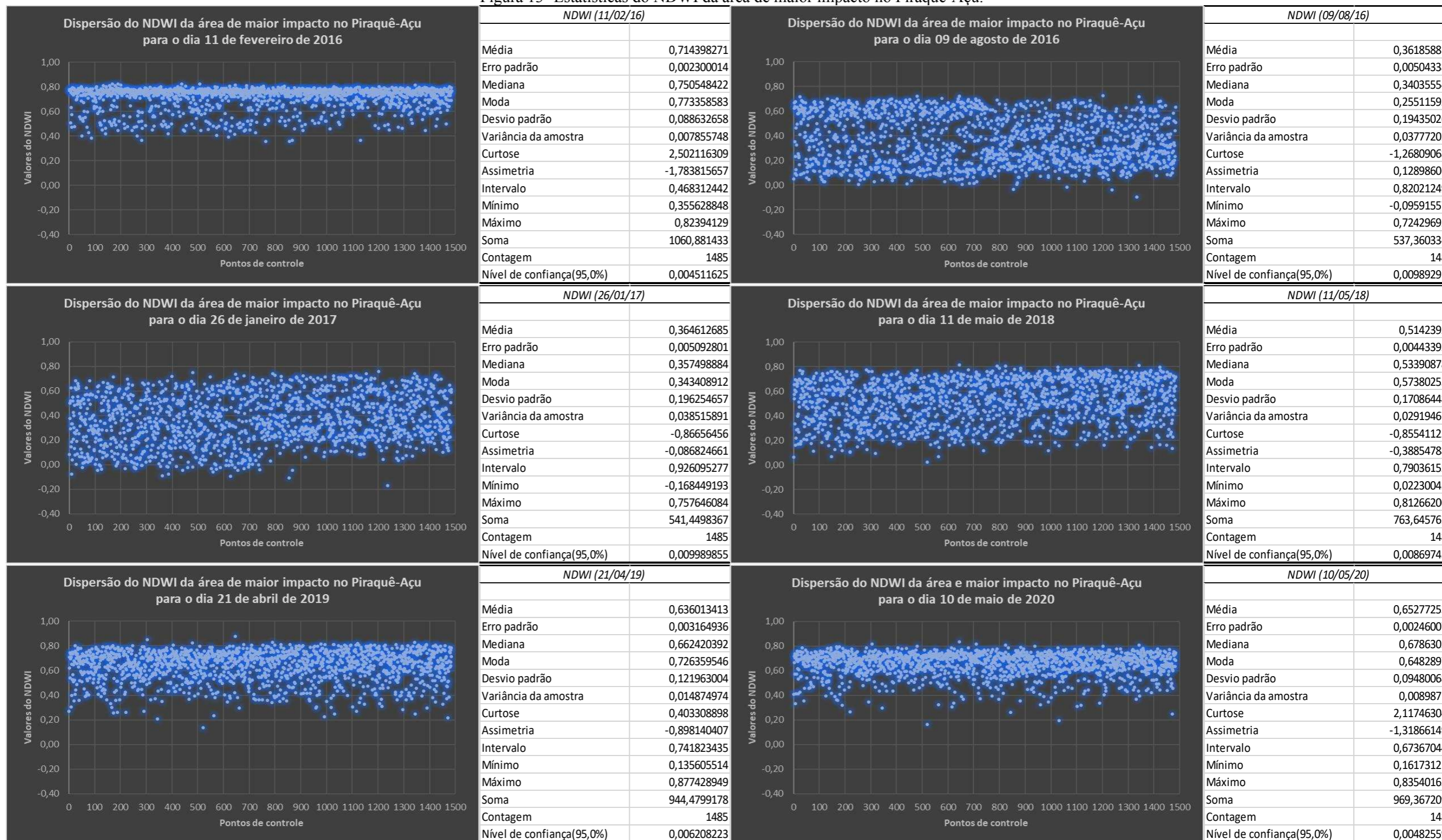
Fonte: O autor.

Figura 12- Estatísticas do LAI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



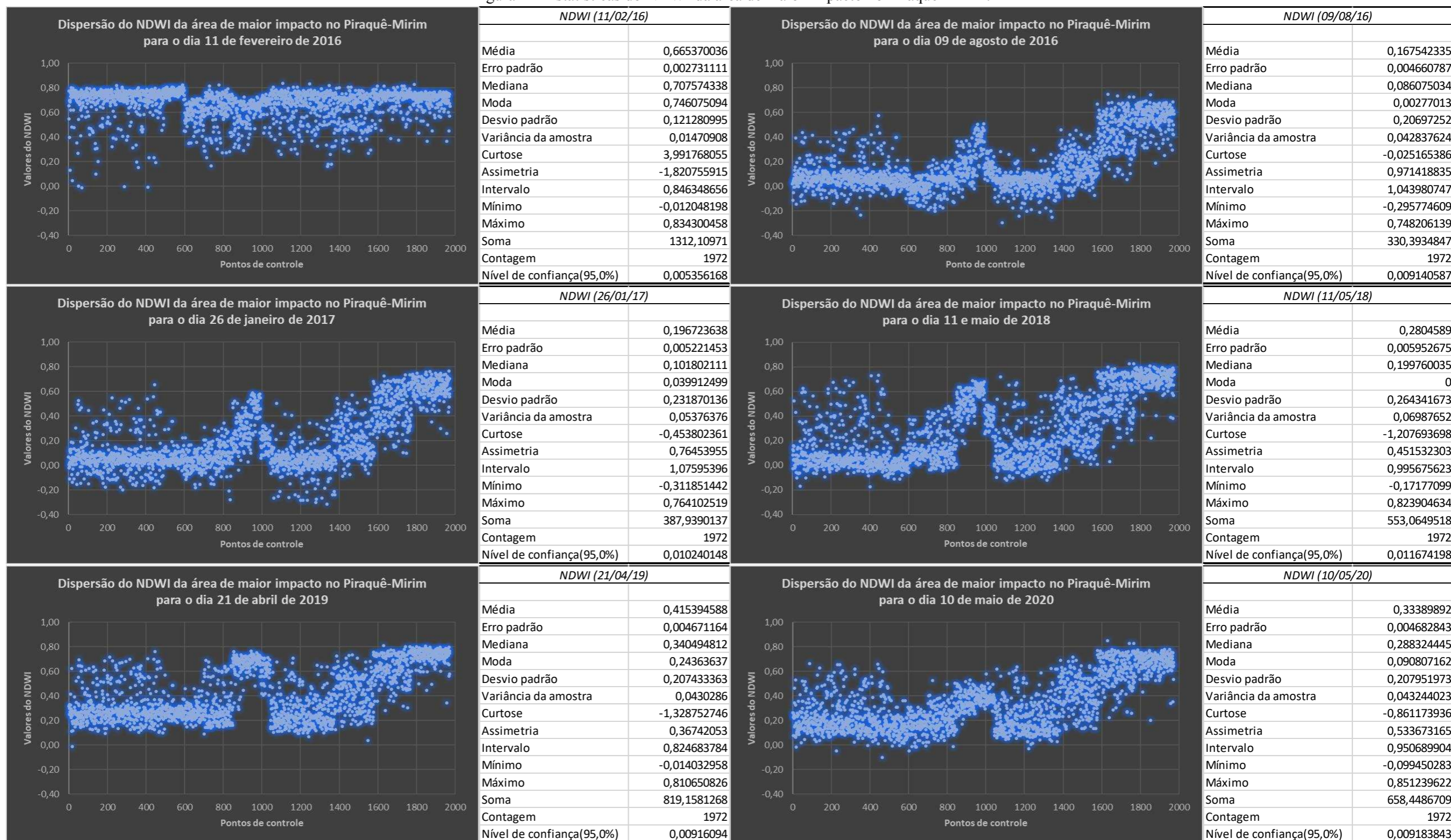
Fonte: O autor.

Figura 13- Estatísticas do NDWI da área de maior impacto no Piraquê-Açu.

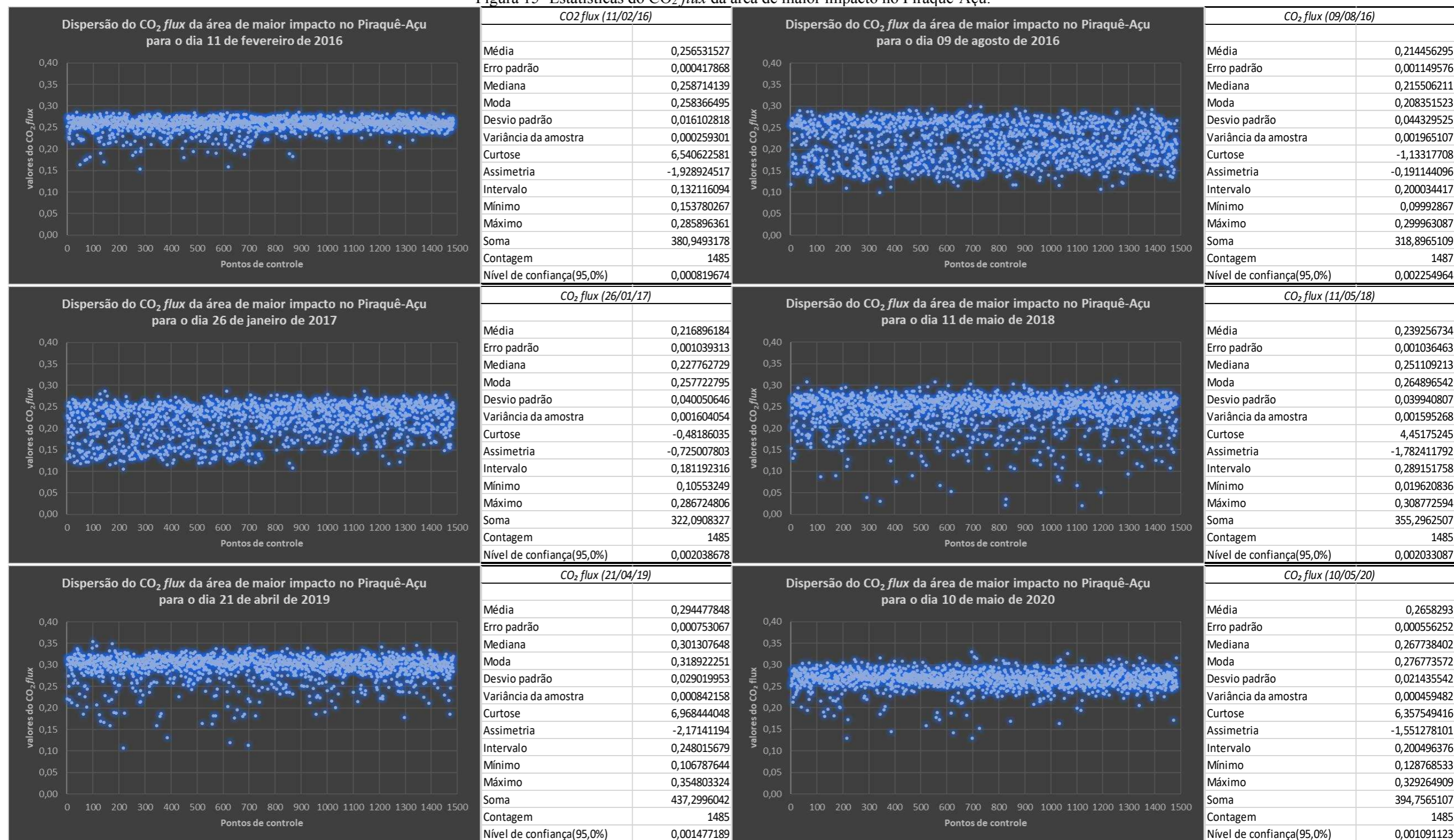


Fonte: O autor.

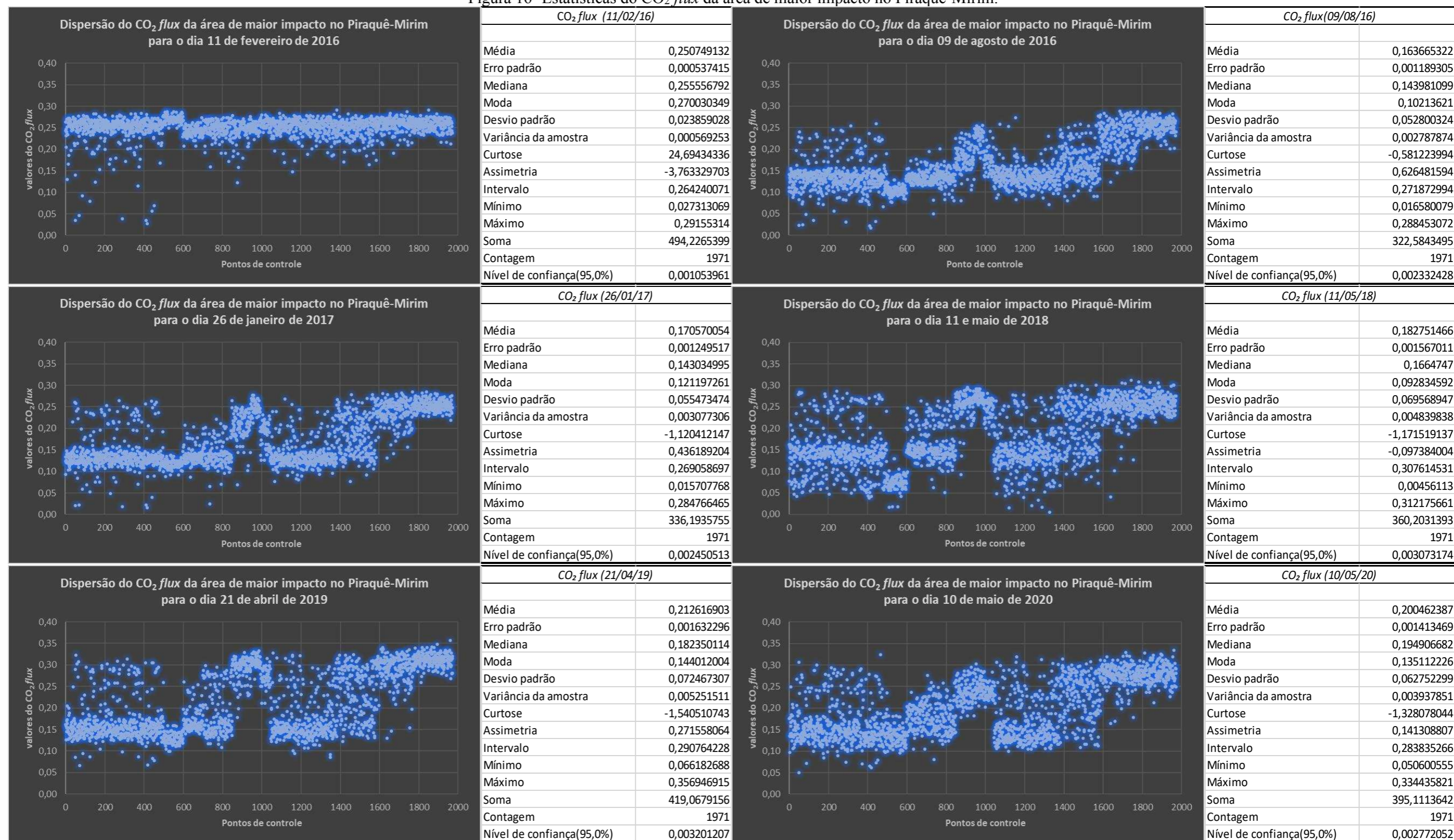
Figura 14- Estatísticas do NDWI da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



Fonte: O autor.

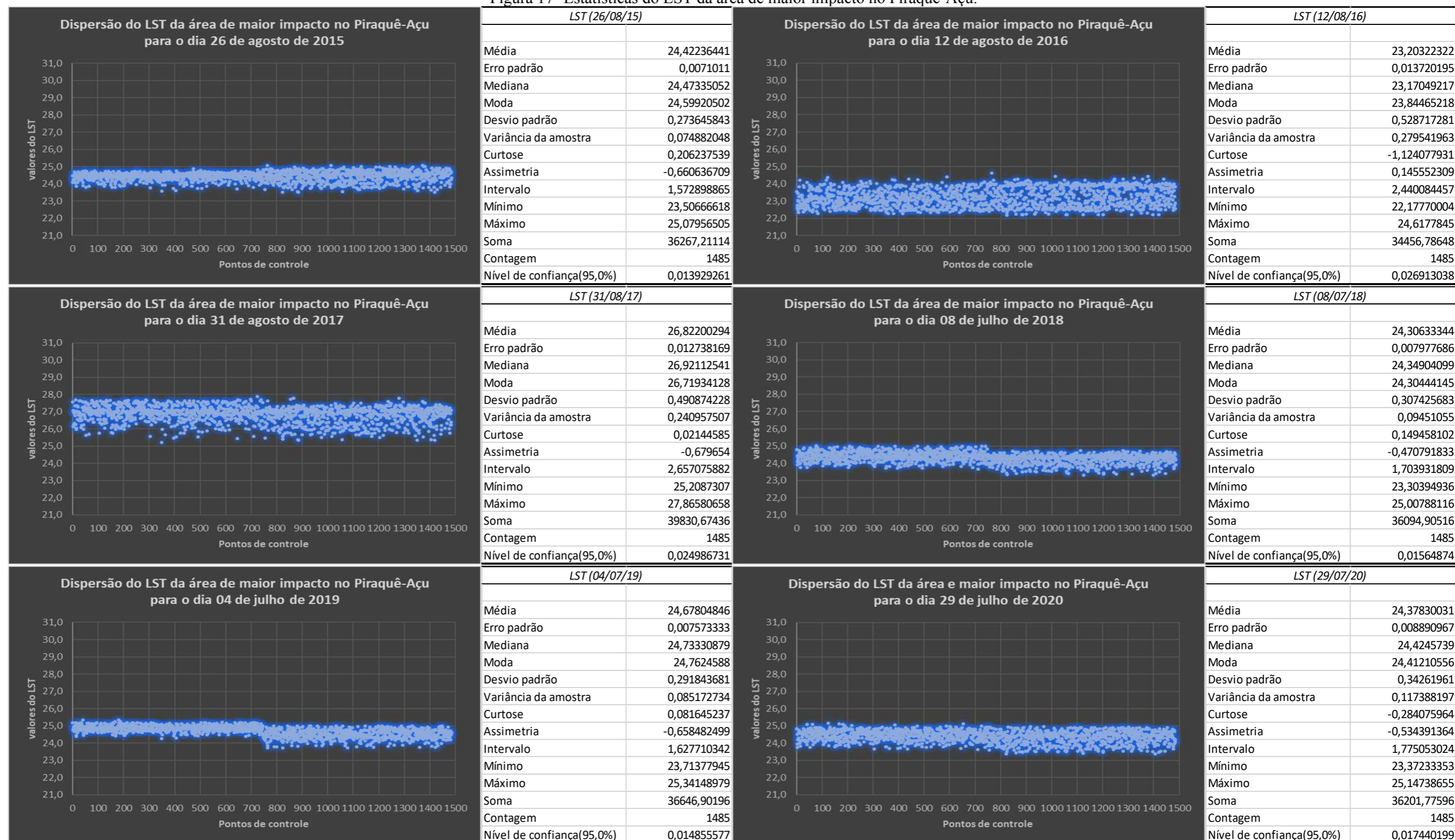
Figura 15- Estatísticas do CO₂ flux da área de maior impacto no Piraquê-Açu.

Fonte: O autor.

Figura 16- Estatísticas do CO₂ flux da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.

Fonte: O autor.

Figura 17- Estatísticas do LST da área de maior impacto no Piraquê-Açu.



Fonte: O autor.

Figura 18- Estatísticas do LST da área de maior impacto no Piraquê-Mirim.



Fonte: O autor.