

Capítulo XIV

APLICAÇÃO DO *NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX* (NDWI) PARA AVALIAR AS CONSEQUÊNCIAS DO IMPACTO DE TEMPESTADE DE GRANIZO EM MANGUES NO SUDESTE DO BRASIL





APLICAÇÃO DO NORMALIZED DIFFERENCE WATER INDEX (NDWI) PARA AVALIAR AS CONSEQUÊNCIAS DO IMPACTO DE TEMPESTADE DE GRANIZO EM MANGUES NO SUDESTE DO BRASIL

Marco Antonio Saraiva da Silva¹; André Luiz Lopes de Faria²

¹Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista, Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, São Paulo, CEP 19060-900, marco.saraiva@unesp.br (autor correspondente)

²Departamento de Geografia, Universidade Federal de Viçosa, Avenida Paulo Henrique Rolfs, s/n, Viçosa, Minas Gerais, CEP 36570-900, andre@ufv.br

RESUMO

Os manguezais são ecossistemas de planícies costeiras, formados em locais específicos onde há o encontro das águas continentais com as oceânicas. Ricos em biodiversidade, a importância desse ecossistema ultrapassa a escala do local na medida que muitas espécies de peixe, que vivem em mar aberto, só se reproduzem nesses ambientes. Dentre as espécies da flora que vivem nesse ecossistema, faz-se um destaque para as florestas de mangues, que são provedoras de uma série de serviços ecossistêmicos como, por exemplo, abrigo a animais, retenção de sedimentos, proteção da linha da costa e fixação de CO₂. Quaisquer alterações nessas florestas podem desencadear uma série de problemas gerando perdas de difícil recuperação. Dentre os métodos que podem fornecer informações sobre o vigor vegetativo das plantas, a aplicação de índices radiométricos em imagens de satélites estão entre os mais eficazes, pois além de implicar em menor custo, possibilita obter informações de períodos pretéritos. O objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, por meio do *Normalized Difference Water Index* (NDWI), as alterações na vegetação de mangue provocadas por uma tempestade de granizo que atingiu, no dia 1 de junho de 2016, a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açu-Mirim, localizada em Aracruz, Espírito Santo, Brasil. Tanto o índice utilizado quanto as estatísticas aplicadas foram eficazes em registrar, com detalhes, os diferentes graus de impacto que ocorreram na reserva. Foi constatado que na área de médio impacto do Piraquê-Açu as vegetações se recuperaram, completamente, após uma brusca redução da umidade registrada em janeiro de 2017. Nesse mesmo estuário, porém de forma mais lenta, as vegetações da área mais impactada também registraram melhoras após sofrerem reduções de até 66% da umidade. No Piraquê-Mirim, apesar das vegetações da área de médio impacto terem esboçado melhoras até abril de 2019, em maio de 2020 elas tiveram um declínio. Por sua vez, na área de maior impacto, com exceção para 2019 que apresentou uma melhora, os valores de umidade registrados em maio de 2020 estavam 88% menores ao que se tinha antes do evento climático. Após comparar os dados do índice com os registros de campo, é possível afirmar que o estuário do Piraquê-Mirim dificilmente irá se recuperar sem a intervenção

humana. Dentre outras coisas, os dados gerados nessa pesquisa evidenciam o quanto suscetíveis são as florestas de mangues a eventos climáticos extremos, que podem ou não estarem relacionados às mudanças climáticas. Independente disso, espera-se que esta pesquisa possa contribuir com outras que buscam ampliar o conhecimento acerca desse importante ecossistema.

Palavras-chave: Manguezais. Sensoriamento Remoto. Índice de vegetação. Ecossistema costeiro.

ABSTRACT

Present in various places on the planet, mangroves are ecosystems of coastal plains, formed in specific places where continental and oceanic waters meet. Rich in biodiversity, the importance of this ecosystem goes beyond the scale of the place, as many species of fish, which live in the open sea, only reproduce in these environments. Among the flora species that live in this ecosystem, the mangrove forests stand out, as they provide a series of ecosystem services such as, for example, shelter for animals, retention of sediments, protection of the coastline and fixation of CO₂. Any changes in these forests can trigger a series of problems, generating losses that are difficult to recover. Among the methods that can provide information on the vegetative vigor of plants, the application of radiometric indices in satellite images are among the most effective, as in addition to implying a lower cost, it makes it possible to obtain information from past periods. The general objective of this research was to evaluate, through the *Normalized Difference Water Index* (NDWI), the changes in the mangrove vegetation caused by a hail storm that hit, on June 1, 2016, the Piraquê Municipal Sustainable Development Reserve Açu-Mirim, located in Aracruz, Espírito Santo, Brasil. Both the index used and the statistics applied were effective in recording, in detail, the different degrees of impact that occurred in the reserve. It was found that in the medium impact area of Piraquê-Açu, the vegetation recovered completely after a sudden reduction in humidity recorded in January 2017. In this same estuary, but more slowly, the vegetation in the most impacted area also recorded improvements after suffering reductions of up to 66% of the

humidity. In Piraquê-Mirim, despite the vegetations in the medium impact area showing improvement until April 2019, in May 2020 they had a decline. In turn, in the area of greatest impact, with the exception of 2019, which showed an improvement, the humidity values recorded in May 2020 were 88% lower than before the weather event. After comparing the index data with field records, it is possible to state that the Piraquê-Mirim estuary will hardly recover without human intervention. Among other things, the data generated in this research show how susceptible mangrove forests are to extreme weather events, which may or may not be related to climate change. Regardless, it is expected that this research can contribute to others that seek to expand knowledge about this important ecosystem.

Keywords: Mangroves. Remote sensing. Vegetation index. Coastal ecosystem.

INTRODUÇÃO

Presentes em vários lugares do planeta, os manguezais são ecossistemas de planícies costeiras formados em locais específicos, onde há o encontro das águas continentais com as oceânicas (SILVA & FARIA, 2022). Fornecedores de uma série de serviços ecossistêmicos, eles são para muitas espécies marinhas o principal local para reprodução.

Dentre as características que tornam esse local especial, uma das principais é a estrutura de raízes de algumas espécies de mangues como é o caso da *Rhizophora mangle* (mangue vermelho) que além de amortecer a energia das ondas do mar em ocasiões de ressacada, servem de abrigo e proteção para uma série de animais. Ademais, os manguezais são para as comunidades locais (Indígenas, pescadores, marisqueiros e catadores de caranguejo), a principal fonte de sustento.

No litoral brasileiro, com exceção para o estado do Rio Grande do Sul que não apresenta formações de bosques de mangue, mas sim de marismas, é possível identificar feições desse ecossistema desde o Oiapoque no estado do Amapá à Laguna em Santa Catarina (SCHAEFFER-NOVELLI, 2018b).

Entre os locais que possuem a presença de manguezais no Brasil, faz-se um destaque para o município de Aracruz, no estado do Espírito Santo,

que após a ocorrência de um evento climático extremo em 2016, teve, além de casas com telhados danificados, mais de 500 hectares de florestas de mangue impactadas por tempestade de granizo (SERVINO et al., 2018; SILVA & FARIA, 2022). Por ser um ecossistema sensível, situações como esta geram stress e interferem na dinâmica das interações entre as espécies.

Como não há registros da ocorrência de eventos desse tipo no local e, portanto, não existem informações suficientes para prever quais serão as consequências para o mangue afetado pela tempestade, o local carece de maiores investigações. Quanto a isso BERNARDINO et al. (2015) e SERVINO et al. (2018) foram uns dos primeiros a empreenderem esforços para entender as repercussões do evento no manguezal de Aracruz, Espírito Santo, Brasil.

Apesar de existir uma quantidade muito grande de espécies que compõem esse ecossistema, as florestas são, sem dúvida, as que mais se destacam, seja pelo tamanho e formato das árvores, seja pelas múltiplas funções que elas desempenham como, por exemplo, abrigo a animais, retenção de sedimentos, proteção da linha da costa e fixação de CO₂. Desse modo, a análise da sanidade das florestas de mangue torna-se fundamental para ampliar o conhecimento sobre as consequências do impacto da tempestade ocorrida.

Dentre os métodos capazes de fornecer resultados confiáveis, quanto ao vigor das vegetações, o Sensoriamento Remoto é um dos mais utilizados, pois, além de reduzir o número de investidas a campo, possibilita o acesso a dados pretéritos que, a depender da fonte, podem ser adquiridos gratuitamente. Os avanços tecnológicos empregados nos satélites de monitoramento da superfície da Terra têm possibilitado, dentre outras coisas, o desenvolvimento de uma grande variedade de índices de vegetação. Obviamente, a potencialidade e a aplicabilidade de cada um desses índices vão depender das especificidades de cada local e das propriedades do sistema sensor disponível.

Apesar de alguns índices como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que foi proposto por ROUSE et al. (1973), possuir

ampla aplicação, sabe-se que seus resultados podem sofrer variações a depender das características da vegetação. Desse modo, ao se analisar um determinado tipo de vegetação, recomenda-se a utilização de diferentes índices, pois esses poderão gerar informações complementares. Caso o índice utilizado apresente resultados melhores, ele servirá de base até que apareça um sucessor.

Nesse sentido, um importante índice, que possui relação direta com as vegetações, é o *Normalized Difference Water Index* (NDWI). Um fator positivo desse índice, é que ele possibilita identificar diferentes níveis de umidade nas folhas das plantas. Isso, faz com que seja possível diferenciar áreas em que as atividades fotossintéticas da vegetação estão mais ativas ou reduzidas.

Apesar deste índice ter a eficácia comprovada para analisar vários tipos de vegetação, em mangues, seu uso ainda é insipiente. Dentre os que o fizeram, destaca-se FERREIRA et al. (2013) que, juntamente com outros índices, utilizou o NDWI para identificar mudanças espaço-temporal em áreas de vegetação de mangue no estado de Pernambuco, Brasil.

Outro autor que também se valeu do NDWI foi OLIVEIRA (2013). Esse por sua vez, o fez com o intuito de gerar subsídios para a gestão do uso e ocupação da terra na zona de amortecimento da Reserva Biológica Saltinho, Pernambuco, Brasil. Novamente o índice em questão mostrou-se eficiente, pois possibilitou gerar mapas com registros das variações da vegetação de mangue para um recorte temporal de 14 anos (2006-2010). Como pode ser observado nos exemplos acima, a aplicação do NDWI em manguezais foi feita com a finalidade de estabelecer distinções entre as vegetações de mangues e outras.

Diante disso, entende-se que existe lacunas a serem preenchidas quanto as potencialidades do NDWI nessas vegetações. Portanto, acredita-se que análises mais detalhadas dos dados fornecidos por esse índice podem fornecer informações mais precisas sobre a sanidade das florestas de mangues.

Frente ao exposto, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, por meio do *Normalized*

Difference Water Index (NDWI), as alterações na vegetação de mangue provocadas por uma tempestade de granizo que atingiu, no dia 1 de junho de 2016, a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú-Mirim, localizada em Aracruz, Espírito Santo, Brasil.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de pesquisa

A área escolhida para realizar a pesquisa é a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim, que se localiza no município de Aracruz no estado do Espírito Santo, Brasil (Figura 01). O clima da região é caracterizado por uma estação seca, que compreende os meses de outubro a março, e outra úmida, que vai de abril a setembro.

A reserva em questão recebeu este nome, pois sua área de 2.079 hectares abarca tanto o estuário Piraquê-Açú quanto o Piraquê-Mirim. De forma geral, tem-se que a floresta da reserva é composta majoritariamente pelas espécies *Laguncularia racemosa* (mangue branco), *Avicennia schaueriana* (mangue preto) e *Rhizophora mangle* (mangue vermelho). Contudo, essa última é a que ocupa maior área.

Como já exposto, o manguezal englobado pela reserva é de real importância para uma série de pessoas que mantêm o sustento de suas famílias com o que é gerado nesse ecossistema. Dentre as atividades desenvolvidas por elas, destaca-se a pesca e a coleta de caranguejos. Quanto a isso, sabe-se que além da vegetação, a tempestade de granizo também interferiu na a reprodução dessas espécies, uma vez que as árvores servem de proteção elas. Isso por si só justifica maiores esforços para entender as reais consequências do impacto nesse ecossistema.

Fonte e base de dados

Os dados utilizados nessa pesquisa, foram obtidos, gratuitamente, de diferentes instituições. Ao passo que as imagens matriciais provenientes do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), que está acoplado ao satélite *Sentinel-2*, foram adquiridas junto ao Copernicus (programa de observação da Terra da União Europeia vinculado a *European Space Agency* - ESA), os arquivos com os dados

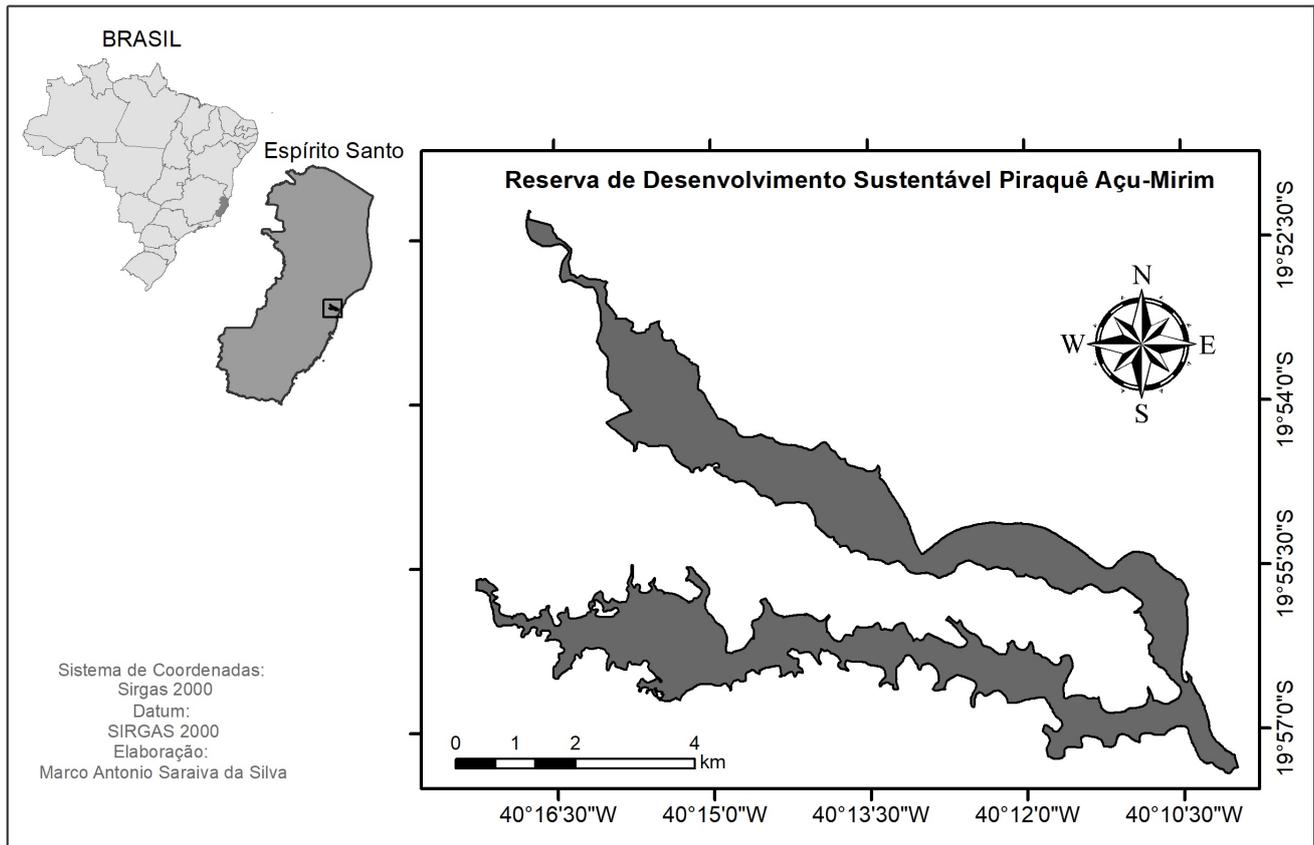


Figura 1. Localização da área de pesquisa. Fonte: Elaborado pelos autores.

vetoriais referentes aos limites políticos e administrativos do Brasil e a área da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim, são provenientes, respectivamente, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Secretaria de Meio Ambiente (SEMAM) do município de Aracruz, Espírito Santo, Brasil.

Enquanto o mapa de localização (Figura 01) foi construído utilizando o sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000, os outros materiais cartográficos foram confeccionados a partir do sistema de coordenadas projetadas (SIRGAS_2000_UTM_Zona_24S). A projeção utilizada foi a transversa de Mercator.

Procedimentos metodológicos

Em suma, os métodos empregados nessa pesquisa seguiram uma ordem procedimental dividida em diferentes etapas:

- I. Aquisição e tratamento das imagens;
- II. Geração de imagem RGB/Cor verdadeira e do índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI);
- III. Divisão da área de acordo com os

diferentes graus de impacto;

IV. Geração dos pontos amostrais e análises estatísticas;

V. Validação de campo;

Conforme já exposto, os dados do MSI/*Sentinel-2* foram adquiridos junto ao programa de observação da Terra da União (Copernicus). O motivo da escolha desse, em detrimento a outros, foi devido a um conjunto de fatores que variam desde características técnicas do equipamento como, por exemplo, resolução espacial de 10 m e 20 m para as bandas utilizadas, tempo de revisita de até 5 dias, 13 bandas espectrais e radiometria de 12 bits. Além disso, também foi priorizado a padronização dos dados quanto aos períodos do ano e a qualidade da imagem quanto a presença de nuvens.

Na etapa (I), que se refere à aquisição e tratamento das imagens, foram adquiridos 6 arquivos datados de 11/02/2016, 09/08/2016, 26/01/2017, 11/05/2018, 21/04/2019 e 10/05/2020. Com relação as datas dos arquivos, algumas observações se fazem necessárias; A primeira é que o arquivo de fevereiro de 2016 possui registros da

área antes de acontecer o impacto da tempestade e, por isso, serviu de base comparativa para as demais.

Uma importante observação é que com exceção ao de janeiro de 2017, todos os arquivos com dados de pós evento, estão compreendidos entre abril e setembro que, para região, refere-se ao período seco. A justificativa para essa exceção, é que para o ano em questão, não havia imagens sem a presença de nuvens que atendessem os critérios estabelecidos.

Outro detalhe sobre as imagens, é que elas foram baixadas no Nível-1C, ou seja, com correções de ortorretificações e refletâncias no topo da atmosfera (*Top of Atmosphere-TOA*). Diante disso, para a efetuar correções na base da atmosfera (*Bottom of Atmosfera-BOA*) e obter dados com melhor qualidade, optou-se por utilizar o pacote Sen2Cor do software SNAP. Após os procedimentos, os dados passaram para Nível-2A.

Após essas correções, seguiu-se para a etapa II, que abarca os processos de composição da imagem RGB em cor verdadeira e a geração do índice *Normalized Difference Water Index* (NDWI). O índice em questão foi obtido a partir de cálculos matemáticos (Equação 1) desenvolvidos por GAO (1996). De forma geral, o NDWI possibilita obter informações quanto ao estado fisiológico das vegetações, uma vez que permite a mensuração do teor de umidade presente nas plantas.

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

Como pode ser observado, o NDWI é o quociente da divisão entre a diferença e a soma do infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR). De acordo com CECCATO et al. (2001), a combinação dessas bandas são fundamentais para obter informações quanto ao teor de água nas vegetações.

Com valores compreendidos entre -1 e +1, tem-se que quanto mais próximo de 1, melhor é a sanidade da vegetação ao passo que valores próximos de zero ou negativos indicam que a vegetação está debilitada ou morta. Essas correlações, reforçam o motivo da escolha do NDWI para pesquisar a área, uma vez que a

umidade foliar e vigor vegetativo das plantas possuem relações.

Após a geração do NDWI, foi possível dar início ao processo de divisão da área de acordo com os diferentes graus de impacto (Etapa III). Como a tempestade atingiu a reserva de forma desigual e a mesma é composta por dois estuários (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim) optou-se por fazer divisões que permitisse discutir os resultados tanto em conjunto quanto separadamente.

As separações foram feitas observando as imagens provenientes da geração do NDWI. Dentre elas, a de 2017 foi a selecionada, pois foi nesse ano que houve uma maior variação na escala de cores que, dentre outras coisas, possibilitou identificar a amplitude do impacto. Dessa maneira, ambos os estuários foram subdivididos em locais de maior, médio e menor impacto.

Com as áreas separadas, partiu-se para a geração dos pontos amostrais (Etapa IV). Para isso, utilizou-se a ferramenta *Create Random Points* do software ArcGIS®. O critério utilizado para definir o número de pontos amostrais de cada área foi a relação proporcional entre a área atingida e a área total da reserva. Apesar do software utilizado realizar a geração dos pontos automaticamente, foi necessário fazer correções manuais como, por exemplo, a exclusão de pontos com ausência de valores.

Como a ferramenta utilizada gera pontos aleatórios no centro dos *pixels* selecionados, os valores extraídos de cada ponto foram submetidos a diferentes cálculos estatísticos. Esse procedimento foi fundamental para identificar quais operações seriam mais eficientes em expressar, quantitativamente, os resultados.

Finalizado os cálculos e a estruturação dos resultados, iniciou-se o processo de validação dos dados (Etapa V), que teve como objetivo principal comparar os resultados obtidos no laboratório com a realidade de campo. Desse modo, munidos de mapas e GPS (*Global Positioning System*) foi possível, ora via automóvel, ora via barco, acessar as áreas com seus variados graus de impacto.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um dos produtos gerados a partir dos dados do *Sentinel-2* foi a composição da imagem em

cores verdadeiras (Figura 02). Ao analisar as imagens dessa figura, percebe-se claramente as mudanças na paisagem provocadas pela tempestade de granizo. Além disso, também é possível observar que, para o ano de 2020, enquanto a vegetação atingida no Piraquê-Açú mostra-se quase totalmente recuperada, no Piraquê-Mirim ela manteve-se estagnada.

Apesar da figura em questão possibilitar essas considerações, ela não tem a mesma eficácia do NDWI (Figura 03) em evidenciar com detalhes as repercussões do impacto da tempestade na vegetação. Vale dizer que, em função do mangue

ser um sistema hidromórfico, solos encharcados durante os períodos de recargas também podem ser destacados pelo NDWI. Todavia, em nenhuma das cenas isso se fez presente.

Ao analisar a figura 03, é possível observar que na imagem do dia 11/02/2016, 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. De forma geral, esses valores indicam que as vegetações estão saudáveis. Enquanto os valores compreendidos entre 0 e 0,5 são referentes a áreas de solo exposto, bancos de areia e vegetação de

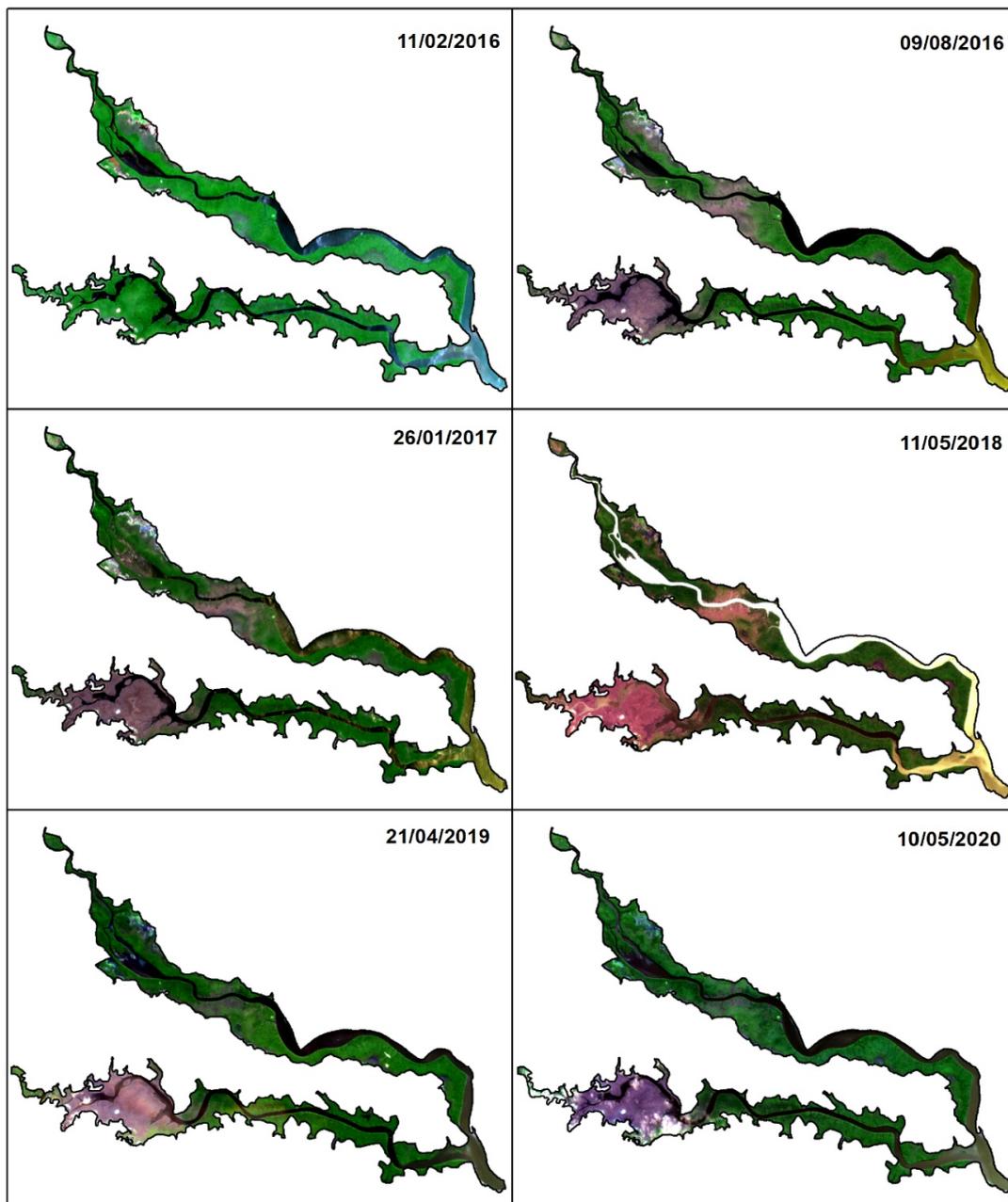


Figura 2. Composição em cores verdadeira da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim entre 2016 e 2020. Fonte: Elaborado pelos autores.

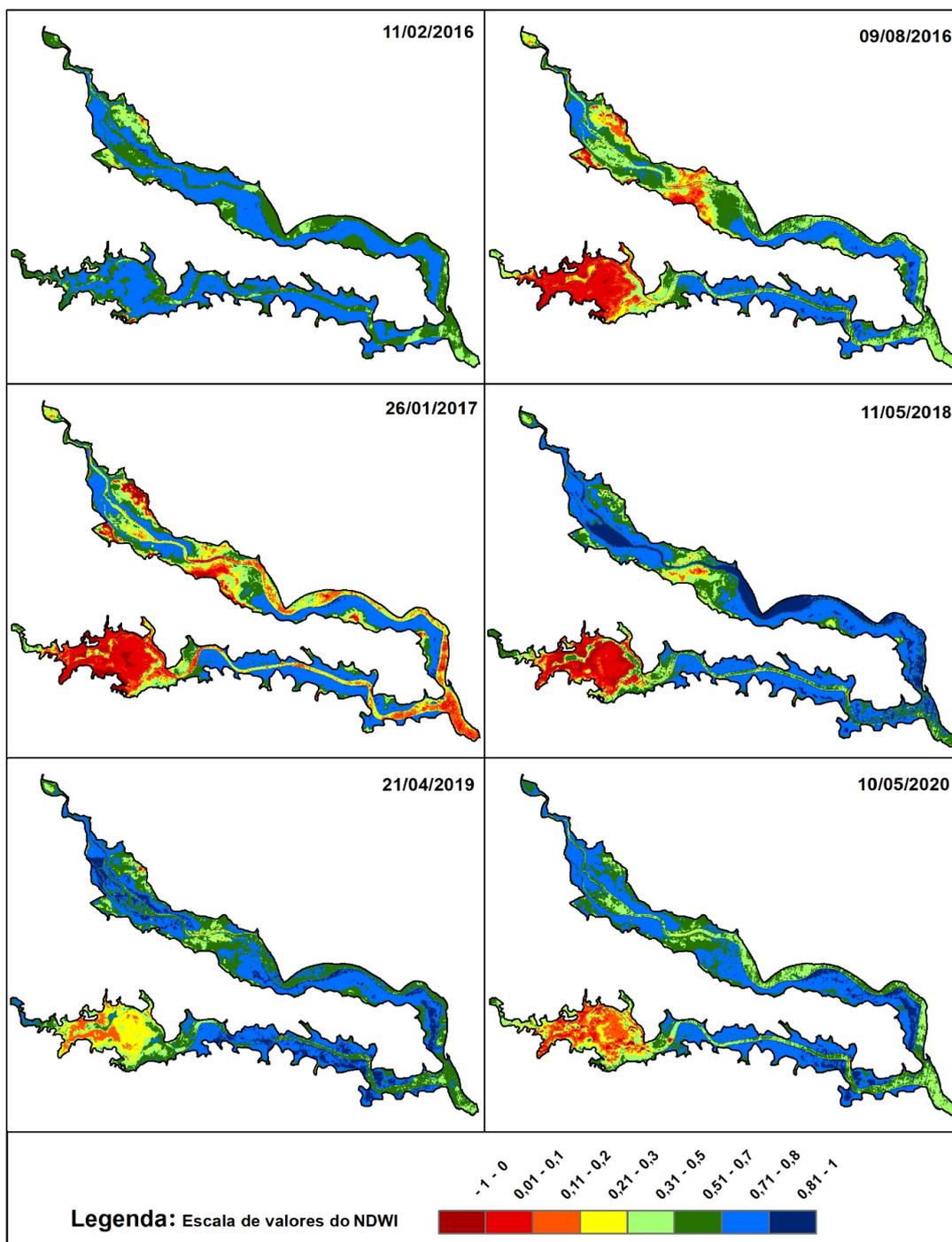


Figura 3. NDWI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraguê Açú-Mirim entre 2016 e 2020. Fonte: Elaborado pelos autores.

gramíneas, os contidos entre 0,51 e 0,71 representam os corpos d’água.

Na imagem do dia 09/08/2016, aproximadamente dois meses após a tempestade, já é possível identificar quais foram os locais atingidos pelo granizo. De forma similar, porém com maior detalhe, a imagem de 26/01/2017 possibilita avançar na análise, pois, quando comparada a anterior, apresenta uma maior variedade de cores.

Tais diferenças, dentre outras coisas, são

indicativas que houve variações espaciais dos estragos causados pela tempestade. Por isso, essa foi a imagem utilizada para dividir as áreas de acordo com o grau de impacto (Figura 04).

Ao prosseguir na análise, tem-se que a partir de 2018 as diferenças entre os dois estuários, no que diz respeito à recuperação da vegetação, ficam mais evidentes, pois enquanto no Piraguê-Açú os valores de umidade aumentaram constantemente em todos os locais impactados, no Piraguê-Mirim a área de maior impacto permaneceu estagnada.

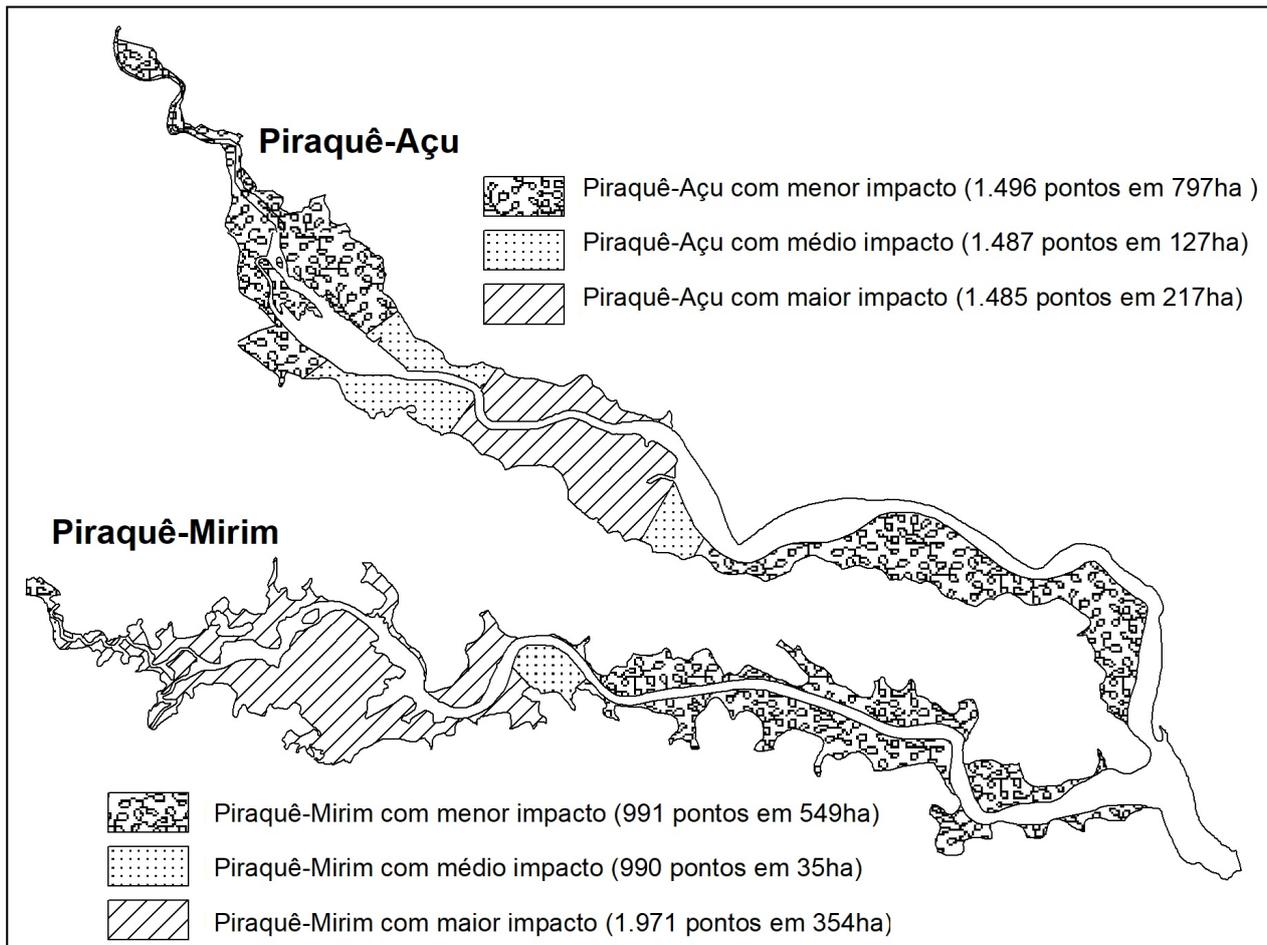


Figura 4. Distribuição dos pontos amostrais. Fonte: Elaborado pelos autores.

Por mais que as imagens apresentadas tenham sido capazes de evidenciar a repercussão do impacto, entende-se que a apresentação de dados estatísticos é fundamental, uma vez que possibilita análises mais detalhadas. A geração desses dados, é proveniente dos valores dos pontos amostrais, extraídos das áreas com seus diferentes graus de impacto.

Como houve entre os estuários diferenças nas recuperações das áreas impactadas, tomou-se a decisão de gerar produtos para cada uma dessas áreas separadamente. Diante disso, cada estuário foi dividido em áreas de menor, médio e maior impacto. Desse modo, para cada uma dessas áreas foram aplicados diferentes cálculos estatísticos como, por exemplo, a moda (Figura 05).

Os gráficos acima, que apresentam a estatística de moda de ambos os estuários, evidenciam o que já foi possível visualizar nas figuras temáticas do NDWI (Figura 03), ou seja, as consequências do impacto não foram as mesmas para toda a reserva. Dentre as informações contidas

nos gráficos, chama-se a atenção para as áreas classificadas como de menor impacto, pois, em ambos os estuários mantiveram os seus valores praticamente estáveis. Isso, permite inferir que se o impacto não tivesse atingido a reserva, toda a floresta de mangue estaria em condições fisiológicas parecidas.

Frente a essa observação e com o intuito de fornecer maiores informações dos dados extraídos do NDWI, optou-se por gerar também os gráficos de *boxplots* (Figura 06), que contêm informações complementares. Todavia, como as áreas de menor impacto não apresentaram oscilações, os *boxplots* referem-se apenas as áreas de médio e maior impacto.

Ao analisar as estatísticas referentes a agosto de 2016, é possível observar a diferença do impacto da tempestade entre os estuários. Isso fica evidente tanto nas áreas de médio quanto de maior impacto. Com relação a essa segunda, de acordo com os dados da moda, enquanto os valores de umidade diminuíram 66% no Piraquê-Açu (PA), no Piraquê-

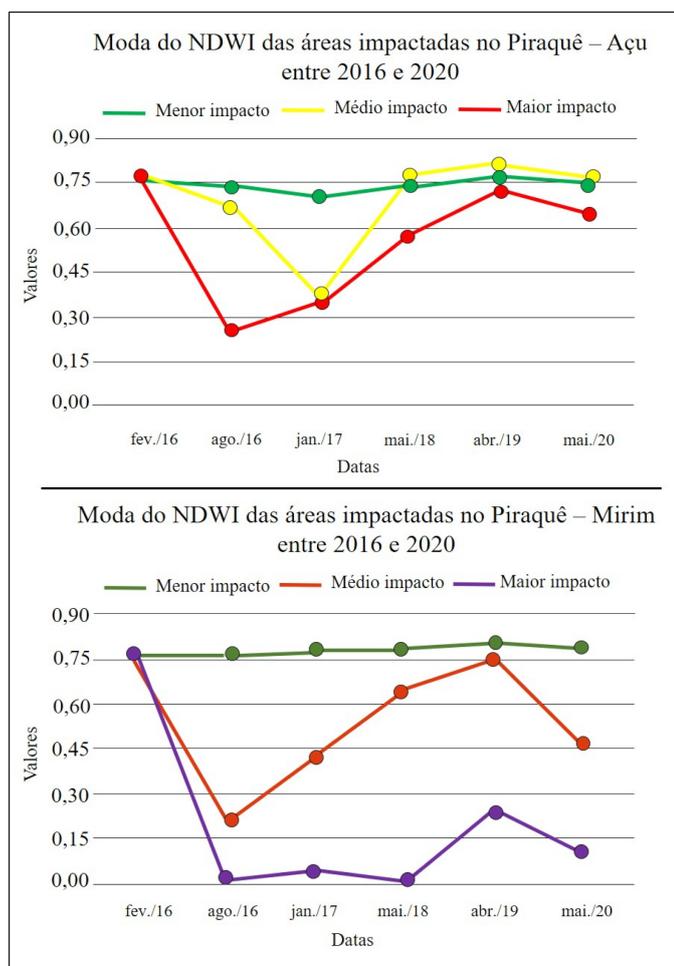


Figura 5. Moda do NDWI das áreas impactadas pela tempestade de granizo na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açú-Mirim. Fonte: Elaborado pelos autores.

Mirim (PM) a redução foi de 100%. Além disso, nos *boxplots* também é possível observar a redução nos valores médios e o aumento nas dispersões. Novamente os dados demonstram que no PM o impacto foi mais severo que no PA.

No ano seguinte (2017), o gráfico com os valores da moda registrou uma queda acentuada nos valores de umidade da área de médio impacto do Piraquê-Açu. Em contrapartida, no Piraquê-Mirim o que se viu foi uma ascendente, também acentuada. Todavia, nas áreas de maior impacto essa lógica não se manteve, pois enquanto o PA teve um acréscimo de 31% nos seus valores, no PM os registros acusam uma estagnação.

Conforme já exposto, a imagem do NDWI de 11/05/2018 (Figura 03) demonstra que as diferenças entre as áreas de maior impacto dos estuários tornaram-se mais agudas. Quanto a isso, tanto o gráfico da moda quanto os *boxplots* mostraram-se eficazes no registro. Nos *boxplots*,

por exemplo, enquanto a média dos valores de umidade do Piraquê-Açu é de 0,5, no Piraquê-Mirim a média não passa de 0,2. Já nas áreas de médio impacto, os dados indicam que a vegetação se manteve no processo de recuperação com valores próximos de antes do evento.

Com relação à 2019, tanto a imagem do NDWI quanto as estatísticas geradas foram capazes de registrar a recuperação dos mangues, até mesmo na área mais impactada do Piraquê-Mirim, que teve um aumento de 24% quando comparado ao ano anterior. No Piraquê-Açu, os valores da área de maior impacto estavam praticamente iguais aos do médio e menor impacto. Isso também se fez real na área de médio impacto do PM.

Por fim, ao analisar os dados de 2020 do Piraquê-Açu, o que se viu foi uma certa estabilidade nos valores indicando que a vegetação das áreas impactadas está quase totalmente regenerada. Quanto ao Piraquê-Mirim, apesar da vegetação da área de médio impacto ter esboçado uma melhora nos últimos anos, ela não se manteve constante, uma vez que os valores tornaram a reduzir.

Com proporções diferentes, a área de maior impacto desse mesmo estuário também apresentou melhoras em 2019, mas assim como ocorrido na área de médio impacto, ela reduziu novamente. Quanto a isso, tem-se que os valores registrados em 2020 estão 88% abaixo do que era antes da tempestade. Diante do exposto, as expedições de campo foram imprescindíveis para averiguar se os resultados obtidos a partir do NDWI eram fidedignos à realidade.

Desse modo, ao percorrer a área da reserva foi possível identificar, em ambos os estuários, as áreas classificadas como de menor, médio e maior impacto (Figura 07). Dessas, a que mais chamou atenção foram as de maior impacto, pois enquanto no Piraquê-Açu a vegetação regenerou quase completamente, no Piraquê-Mirim a paisagem era de destruição total.

Ao analisar as imagens dessa figura e compará-las com a do NDWI (Figura 03) e as dos cálculos estatísticos (Figura 04 e Figura 06), as correlações ficam evidentes. Com relação as áreas de maior impacto, tem-se que apesar das vegetações do Piraquê-Açu estarem verdes é

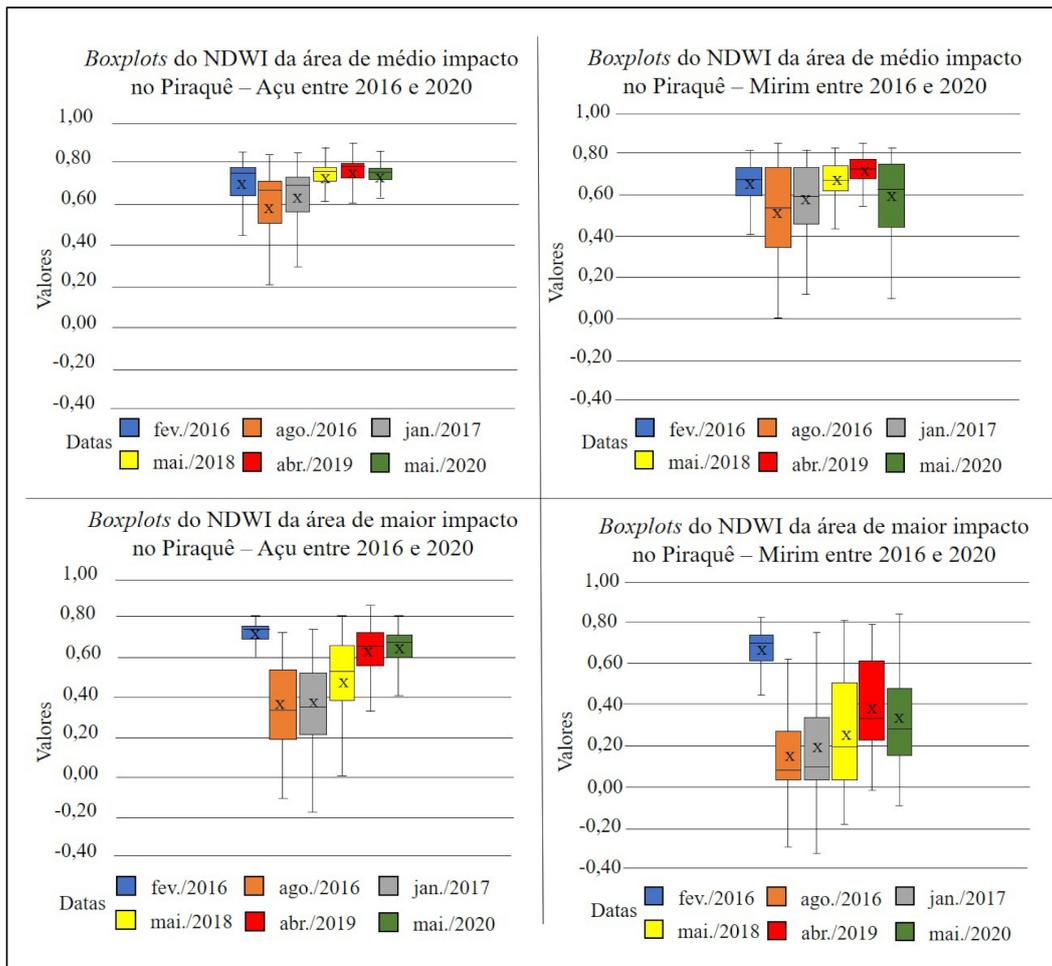


Figura 6. Boxplots do NDWI da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraguê Açu-Mirim entre 2016 e 2020. Fonte: Elaborado pelos autores.

possível visualizar uma grande quantidade de pontos claros entre ela. Esses, nada mais são que troncos de árvores mortas após o impacto da tempestade. Em situação oposta, na imagem da área de maior impacto do Piraguê-Mirim o que se vê é apenas água e troncos mortos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as vantagens de se utilizar imagens de sensores remotos na análise de mudanças na paisagem, destaca-se a possibilidade de obter informações detalhadas de quase toda a superfície da Terra, principalmente em locais de difícil acesso como, por exemplo, as áreas de manguezais. Essas questões possuem implicações diretas na análise ou monitoramento desses lugares, pois além de diminuir os custos com o campo, reduzem os riscos a ele inerente.

Dos diferentes métodos existentes para a análise da vegetação a geração de índices é, sem

dúvida uma das mais utilizadas. Dentre esses, o NDWI mostrou-se eficiente, pois, como já exposto, a combinação de suas bandas possibilitou estimar o teor de água no sistema das vegetações.

Além da aplicação do índice ter proporcionado resultados confiáveis, que foram inclusive validados em campo, os procedimentos e os cálculos estatísticos empregados foram fundamentais para a compreensão das repercussões da tempestade na vegetação. Dentre as informações obtidas, chama-se a atenção para a incapacidade de recuperação natural da área de maior impacto do Piraguê-Mirim.

Isso, dentre outras coisas, significa que intervenções humanas, como a aplicação de técnicas de reflorestamento, fazem-se necessárias, pois, como já exposto, os manguezais são ecossistemas com importância que ultrapassa a escala do local.

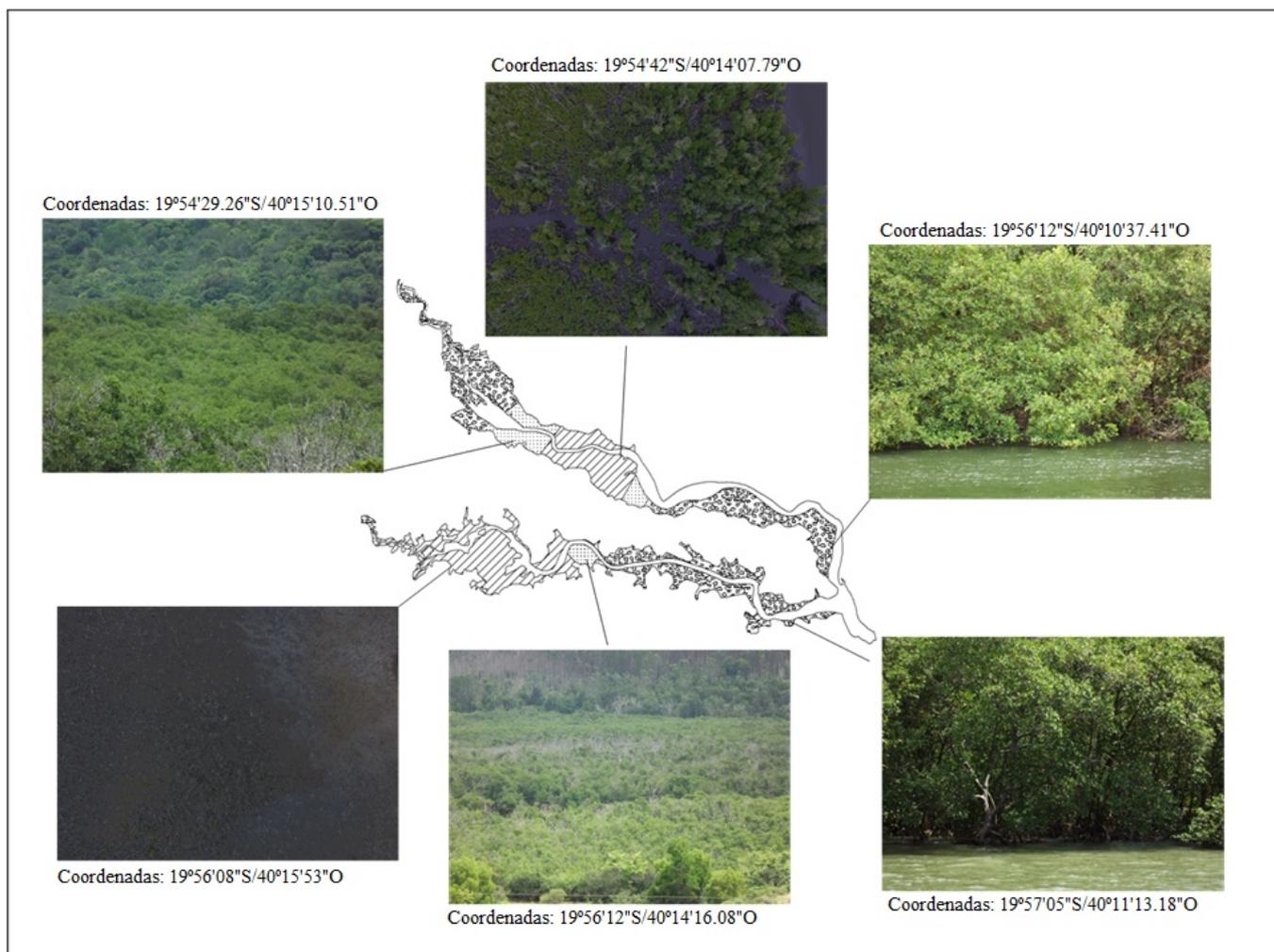


Figura 7. Imagens das áreas impactadas no Piraquê Açú-Mirim. Fonte: Elaborado pelos autores.

AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA ESPACIAL EUROPÉIA – ESA. Copernicus. Paris, França. (disponível em <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)
 ALMEIDA, R.; JUNIOR, C. C. 2018. Manguezal e serviços ecossistêmicos. In: FUMI, M. Atlas dos Manguezais do Brasil, pp. 85 – 95, ICMBio, DF, Brasil. (ISBN 978-85-61842-75-8)
 BERNARDINO, A.F.; Netto, S.A.; Pagliosa, P.R.; Barros, F., Christofoletti, R.A.; Rosa-Filho, J.S.; Colling, J.; Lana, P.C. 2015. Predicting ecological changes on benthic estuarine assemblages through decadal climate trends along Brazilian Marine

Ecoregions. *Estuar. Coast. Shelf Sci*, 166: 74–82. (doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.021)
 CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOND, S.; GREGOIRE, J.M. 2001. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22–33. (doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00191-2)
 FERREIRA, J. M. S; FERREIRA, P. S; MORAIS, Y. C. B; GOMES, V. P; FRANÇA, L. M. A; GALVÍNCIO, J. D. 2013. 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*, 06(03): 356-372. (doi.org/10.5935/1984-2295.20130043)
 GAO, B. C. 1996. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(03): 257-266. (doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Malhas Territoriais. Rio de Janeiro, Brasil. (disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>).

OLIVEIRA, J. S. S. 2013. 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. Dissertação (Mestrado em Ciências Geográficas). Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. 91p (disponível em <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10607>)

ROUSE, J. W; HAAS, R. H; SCHELL, J. A; DEERING, D. W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ETRS. In: Third ETRS Symposium, NASA Spec. Publ., Washington, DC, 351: 309-317. (disponível em <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>)

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 2018b. A diversidade do ecossistema manguezal. In: FUMI, M. Atlas dos Manguezais do Brasil, pp. 23 – 36, ICMBio, DF, Brasil. (ISBN 978-85-61842-75-8)

Secretaria Municipal de Meio Ambiente- SEMAM. Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim. Aracruz, Brasil. (disponível em <http://www.pma.es.gov.br/meio-ambiente/27>)

SERVINO, R. N; GOMES, L. E. O; BERNARDINO, A. F. 2018. Extreme weather impacts on tropical mangrove forests in the Eastern Brazil Marine Ecoregion. *Science of the Total Environment*, 628:233-240. (doi:10.1016/j.scitotenv. 2018.02.068)

SILVA, M. A. S.; FARIA, A. L. L. 2022. Impact evaluation of the extreme weather event in mangroves of the Brazilian Southeast Coast with remote sensing. *Sociedade & Natureza*, 34(1):1- 20. (doi: 10.14393/SN-v34-2022-64352)