Artigo

Índice CO_2 *flux* para avaliar perdas de serviços ecossistêmicos em mangues impactados por tempestade de granizo no Sudeste do Brasil

Marco Antonio Saraiva da Silva
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, SP, Brasil.
E-mail: marco.saraiva@unesp.br
0000-0003-2897-8185

André Luiz Lopes de Faria
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.
E-mail: andre@ufv.br
0000-0003-0492-9725

e-200530

Como citar esse artigo:

SILVA, M. A. S.; FARIA, A. L. L. Índice CO_2 *flux* para avaliar perdas de serviços ecossistêmicos em mangues impactados por tempestade de granizo no Sudeste do Brasil. **Geousp**, v. 27, n. 3, e-200530, set./dez. 2023. ISSN 2179-0892. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/200530. doi: https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2023.200530.pt.

Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 License.

revista
geoUSP
espaço e tempo

Volume 27 • nº 3 (2023)

ISSN 2179-0892

Índice CO_2 *flux* para avaliar perdas de serviços ecossistêmicos em mangues impactados por tempestade de granizo no Sudeste do Brasil

Resumo

Manguezais são ecossistemas tropicais localizados no encontro de águas continentais e oceânicas. Fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos, esses ecossistemas são frágeis e sensíveis a perturbações. Diante disso, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar, utilizando o índice CO_2 *flux*, alterações das atividades fotossintéticas dos mangues frente ao impacto da tempestade de granizo ocorrida no dia 1 de junho de 2016, em Aracruz (ES). Para isso, foi utilizado imagens entre 2016 e 2020 do sensor MSI acoplado ao satélite Sentinel-2. Os mapas temáticos e gráficos estatísticos, gerados a partir de pontos amostrais, possibilitaram tanto a categorização das áreas de acordo com a intensidade do impacto quanto a identificação das áreas que se regeneraram naturalmente e quais precisarão de intervenção para se recuperarem. A validação de campo confirmou a eficiência do índice em registrar as consequências da tempestade nas atividades fotossintéticas dos mangues.

Palavras-chave: ecossistema costeiro; índices de vegetação; manguezal.

CO2 flux index to assess losses of ecosystem services in mangroves impacted by hailstorm in Southeast Brazil

Abstract

Mangroves are tropical ecosystems located at the meeting of continental and oceanic waters. Providers of diverse ecosystem services, these ecosystems are fragile and sensitive to disturbance. Therefore, the general objective of this research was to evaluate, using the CO_2 flux index, changes in the photosynthetic activities of mangroves in the face of the impact of the hail storm that occurred on June 1, 2016, in Aracruz (ES). For this, images between 2016 and 2020 from the MSI sensor coupled to the Sentinel-2 satellite were used. Thematic maps and statistical graphs,

generated from sampling points, made it possible to categorize areas according to the intensity of the impact, as well as identify areas that regenerated naturally, and which ones will need intervention to recover. Field validation confirmed the efficiency of the index in recording the consequences of the storm on the photosynthetic activities of the mangroves.

Keywords: coastal ecosystem, vegetation index, mangrove.

Índice de flujo de CO2 para evaluar pérdidas de servicios ecosistémicos en manglares afectados por granizada en el sureste de Brasil

Resumen

Los manglares son ecosistemas tropicales ubicados en el encuentro de aguas continentales y oceánicas. Proveedores de diversos servicios ecosistémicos, estos ecosistemas son frágiles y sensibles a las perturbaciones. Por lo tanto, el objetivo general de esta investigación fue evaluar, utilizando el índice de flujo de CO_2, cambios en las actividades fotosintéticas de los manglares ante el impacto de la granizada ocurrida el 1 de junio de 2016 en Aracruz (ES). Para ello se utilizaron imágenes entre 2016 y 2020 del sensor MSI acoplado al satélite Sentinel-2. Mapas temáticos y gráficos estadísticos, generados a partir de puntos de muestreo, permitieron categorizar áreas según la intensidad del impacto, así como identificar áreas que se regeneraron naturalmente y cuáles necesitarán intervención para recuperarse. La validación de campo confirmó la eficiencia del índice para registrar las consecuencias de la tormenta sobre las actividades fotosintéticas de los manglares.

Palabras clave: ecosistema costeiro, índices de vegetación, mangle.

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). No país, somente o Rio Grande do Sul não tem registro de vegetação típica de bosques de mangue (Schaeffer-Novelli, 2018).

Os manguezais são fornecedores de diversos serviços ecossistêmicos que podem ser sistematizados em quatro grupos distintos, sendo eles: serviços de produção ou abastecimento, serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais (Almeida; Júnior, 2018).

Nos serviços de produção e abastecimento, além de proverem alimentos às diversas espécies de animais marinhos e terrestres, através das sementes e flores, os mangues também são explorados para a retirada de madeira e fibras (Almeida; Júnior, 2018). Nos serviços de regulação, destacam-se a atuação no microclima, propiciando às espécies um ambiente térmico mais equilibrado, e a proteção da faixa costeira, de modo que as raízes entrelaçadas atenuam o impacto das ondas oceânicas.

Nos serviços de suporte, destacam-se a formação de solos halomórficos, a ciclagem de nutrientes e a fixação de CO_2. Ao se levar em consideração o sistema radicular de algumas espécies de mangues, as taxas de fixação de CO_2 superam, até mesmo, as das florestas da Mata Atlântica e Amazônica (Soavinski; Maretti, 2018). Por último, mas não menos importante, destaca-se os serviços culturais com a valorização da beleza estética, espiritual e outras relacionadas às subjetividades humanas como, por exemplo, a crença de que a fertilidade das espécies do manguezal está relacionada com a senhora da lama e das terras úmidas (Schaeffer-Novelli, 2018).

Frente ao exposto, tem-se que os manguezais são essenciais tanto em escala local quanto global e, portanto, carecem de acompanhamentos mais pontuais no que diz respeito às mudanças desencadeadas sejam por processos naturais, sejam por processos antrópicos, ou ambos.

Dentre as mudanças que impactam os manguezais e colocam em risco toda sua gama de serviços ecossistêmicos, faz-se um destaque para a elevação dos níveis dos mares. Tal elevação está intimamente relacionada com o derretimento das calotas polares, decorrente do processo de aquecimento global. Tal aquecimento possui relação direta com a quantidade de gases causadores de efeito estufa como, por exemplo o gás carbônico (CO_2) e do metano (CH_4).

Essas modificações, dentre tantas outras consequências, interferem nas dinâmicas atmosféricas, aumentando a incidência de tempestades (Ciavola; Coco, 2017; Oppenheimer *et al*., 2019). A depender do grau de impacto dessas manifestações da natureza, os danos podem ser irreversíveis quanto à recuperação natural, necessitando, portanto, de ações que busquem a aplicação de práticas de recuperação.

Dentre as metodologias capazes de apresentar resultados satisfatórios quanto às fitofisionomias desses ambientes, diminuindo as investidas ao campo e aumentando a capacidade de acompanhamento das condições fisiológicas dos mangues, o Sensoriamento Remoto se apresenta como um dos mais promissores. Todavia, existem desafios para tal de modo que o principal é padronização das datas das imagens em virtude da presença de nuvens.

O Sensoriamento Remoto (SR) 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 potencialidade importante do SR na análise de vegetações é a capacidade de se obter informações quanto a sanidade das plantas. Como o gás carbônico (CO_2) é utilizado no processo de respiração das plantas, quanto mais saudável estiver a vegetação maior será sua atividade fotossintética. Desse modo, um índice que pode contribuir significativamente para a

averiguação da capacidade de fixação do gás carbônico é o CO_2 *flux*, que tem como um de seus precursores Rahman *et al*. (2000). Esses, ao correlacionarem os dados provenientes de torres de fluxo de CO_2 com os do *Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS), conseguiram estabelecer relações entre dados do espectrômetro de imagem e a variação de CO_2 nos sensores terrestres.

Nesse sentido, com o intuito de avaliar os níveis de CO_2 atmosférico em locais com diferentes extratos de vegetação do Cerrado, Baptista (2003) utilizou duas cenas AVIRIS e uma cena do sensor *Hyperion*. Esse autor também fez correlações entre os dados e identificou que os locais onde os valores de CO_2 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.

Com a intenção de comparar os resultados entre os medidores de CO_2 de campo e as respostas espectrais de imagens de satélite, Gerhardt *et al*. (2011) e Rocha (2018) também utilizaram o sensor Hyperion, que está a bordo do satélite EO-1, para gerar o CO_2 *flux*. Em seus resultados, os autores conseguiram estabelecer relações entre os equipamentos e, portanto, validar a aplicabilidade do índice.

Quanto a utilização do índice CO_2 *flux* em manguezais, Souza (2021) constatou que as áreas com maior densidade de cobertura vegetal eram também as que possuíam maior potencial de sequestro do dióxido de carbono. Na mesma linha de raciocínio, todavia, analisando as respostas de fluxo de carbono de mangueais frente ao estresse de seca, Lu e Zhu (2021) se valeram do índice PRI. O índice em questão, que faz parte da estrutura do CO_2 *flux*, também foi capaz de registrar com eficiência os níveis de sequestro de CO_2 em manguezais.

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa foi avaliar, utilizando o índice CO_2 *flux*, alterações das atividades fotossintéticas dos mangues frente ao impacto da tempestade de granizo ocorrida no dia 1 de junho de 2016, em Aracruz (ES).

Materiais e Métodos

Para detalhar melhor os processos metodológicos desta pesquisa, dividiu-se este tópico do seguinte modo: caracterização da área de pesquisa; fonte e base de dados; etapas de desenvolvimento e procedimentos metodológicos.

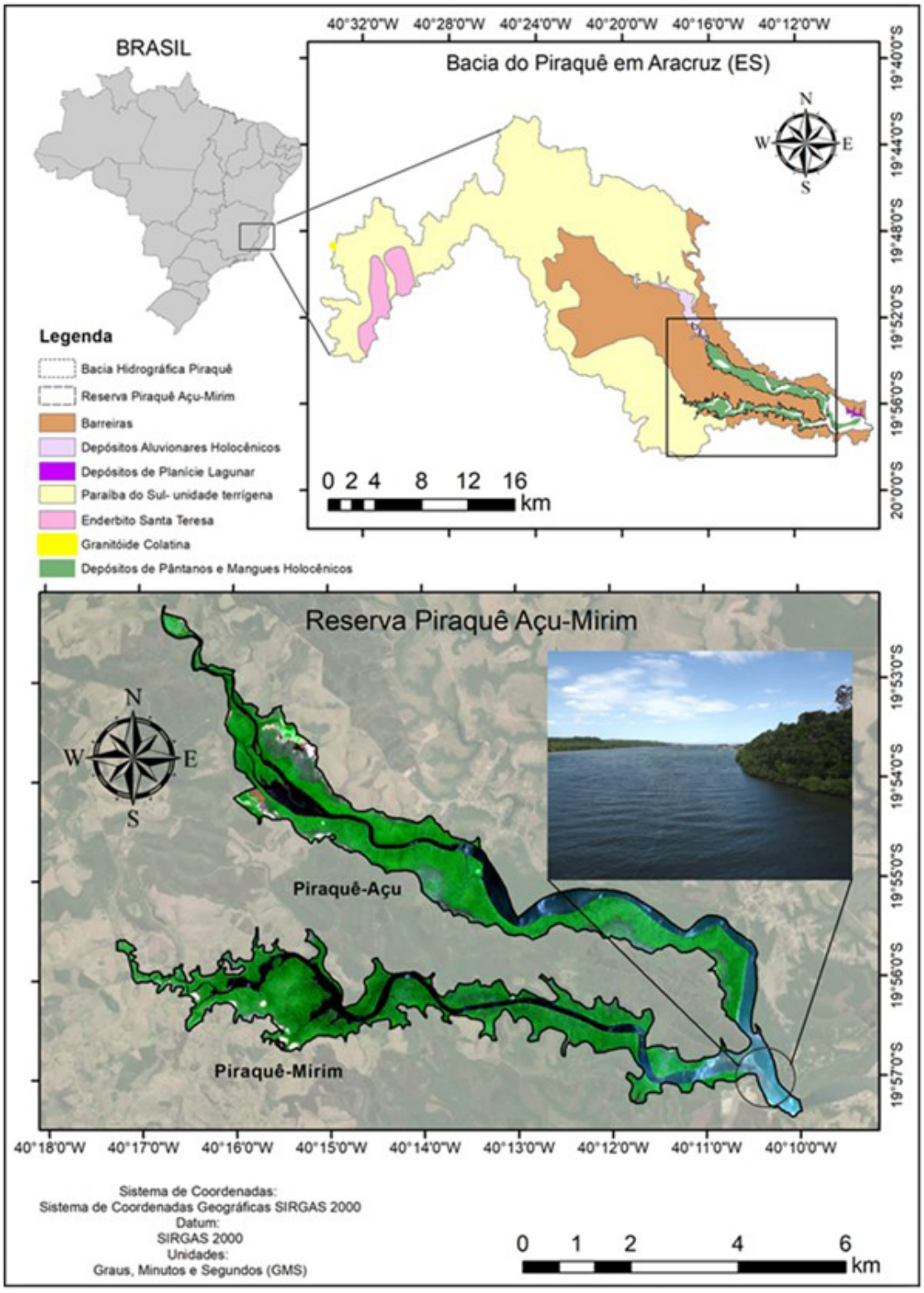
Caracterização da área de pesquisa

A área de pesquisa (mangue) localiza-se na Ecorregião Marítima do Brasil Oriental, sendo, portanto, banhada 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 1). A reserva em questão possui uma área de 2.079 ha 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; Gomes; Bernardino, 2018; Silva; Faria, 2022).

Figura 1 – Localização da área de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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, a aproximadamente 1.000 m 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 possuir menos de 50 % da extensão do Piraquê-Açu, ele 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 dominância, em área é a *Rhizophora mangle* (mangue vermelho) (Servino; Gomes; Bernardino, 2018). A espécie em questão encontra-se distribuída por todo o manguezal, inclusive nas franjas do Grupo Barreiras, onde divide espaço com vegetações de terra firme.

Fonte e base de dados

Obtidas de forma gratuita, as imagens do sensor MSI/*Sentinel-2* foram adquiridas no site oficial do programa Copernicus, vinculado a *European Space Agency* (ESA). Os arquivos vetoriais dos limites políticos administrativos do Brasil e a área da Reserva são provenientes, respectivamente, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Secretaria de Meio Ambiente do município de Aracruz (ES).

Etapas de desenvolvimento

Esta pesquisa foi desenvolvida seguindo sete etapas procedimentais, que estão organizadas na seguinte ordem: (I) definição do recorte temporal; (II) aquisição de dados; (III) geração do índice CO_2*flux*; (IV) delimitação da área de interesse e geração dos pontos amostrais; (V) geração de estatísticas; (VI) expedição de campo e (VII) sistematização dos resultados.

Procedimentos metodológicos

A etapa I desta pesquisa deu-se com a utilização da plataforma *Google Earth Pro*. Na plataforma em questão foi possível visualizar, entre 2016 e 2020, mudanças na cobertura vegetal da área de interesse como, por exemplo, desfolhamentos e quebras dos mangues.

Na etapa II, que se refere à aquisição dos dados, tem-se que a constante presença de nuvens sob a área reduziu a oferta de dados, dificultando, portanto, a padronização das datas. Diante disso, após uma busca criteriosa, optou-se por utilizar imagens do sensor *MultiSpectral Instrument* (MSI), acoplado ao satélite *Sentinel-2*. Este satélite entrega dados com um tempo de revisita de cinco dias, resolução radiométrica de 12 bits e resoluções espaciais de 10 m e 20 m, nas bandas utilizadas.

Posto isso, para gerar o CO_2*flux* foram baixados seis arquivos, datados 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 representa o local antes do impacto da tempestade de granizo, servindo, portanto, de base comparativa para as demais.

Com relação aos detalhes das 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, para imprimir maior qualidade aos 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).

A etapa III, que se refere à geração do índice, os procedimentos foram realizados utilizando o *software* ArcGis®, o CO_2*flux*, que é obtido a partir do produto matemático do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) pelo *Photosynthetic Reflectance Index* (PRI) e o NDVI, proposto por Rouse *et al*. (1973), que é um indicador gráfico que permite, a partir da resposta espectral, obter informações quanto ao vigor vegetativo das plantas.

Pensado por Gamon *et al*. (1992), ao estudar o comportamento espectral de plantas de Girassol na América do Norte, o PRI é um índice capaz de fornecer dados sobre a capacidade fotossintética das plantas no nível das folhas e dossel.

Como o CO_2*flux* envolve a realização de mais de um procedimento, fez-se primeiro a geração do NDVI (Equação 1). 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 sua soma.

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

O PRI, por sua vez, é 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 sua soma (Equação 2).

$$PRI = \frac{Blue - Green}{Blue + Green} \qquad (2)$$

Tanto nesse índice quanto no NDVI os valores variam entre -1 e 1. Desse modo, valores mais próximos de zero indicam maior 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). Porém, quando se obtém valores negativos, é necessário fazer sua adequação para torná-lo positivo (Equação 3).

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2} \qquad (3)$$

Após tal correção, fez-se a geração do CO_2 *flux* (Equação 4). Este índice expressa a taxa relativa da capacidade fotossintética da vegetação (Rahman *et al.*, 2000; Baptista, 2003). Tal capacidade possui correlação direta com os processos de captura/utilização e a fixação do carbono atmosférico nos mangues pesquisados.

$$CO_2\ flux = NDVI * sPRI \qquad (4)$$

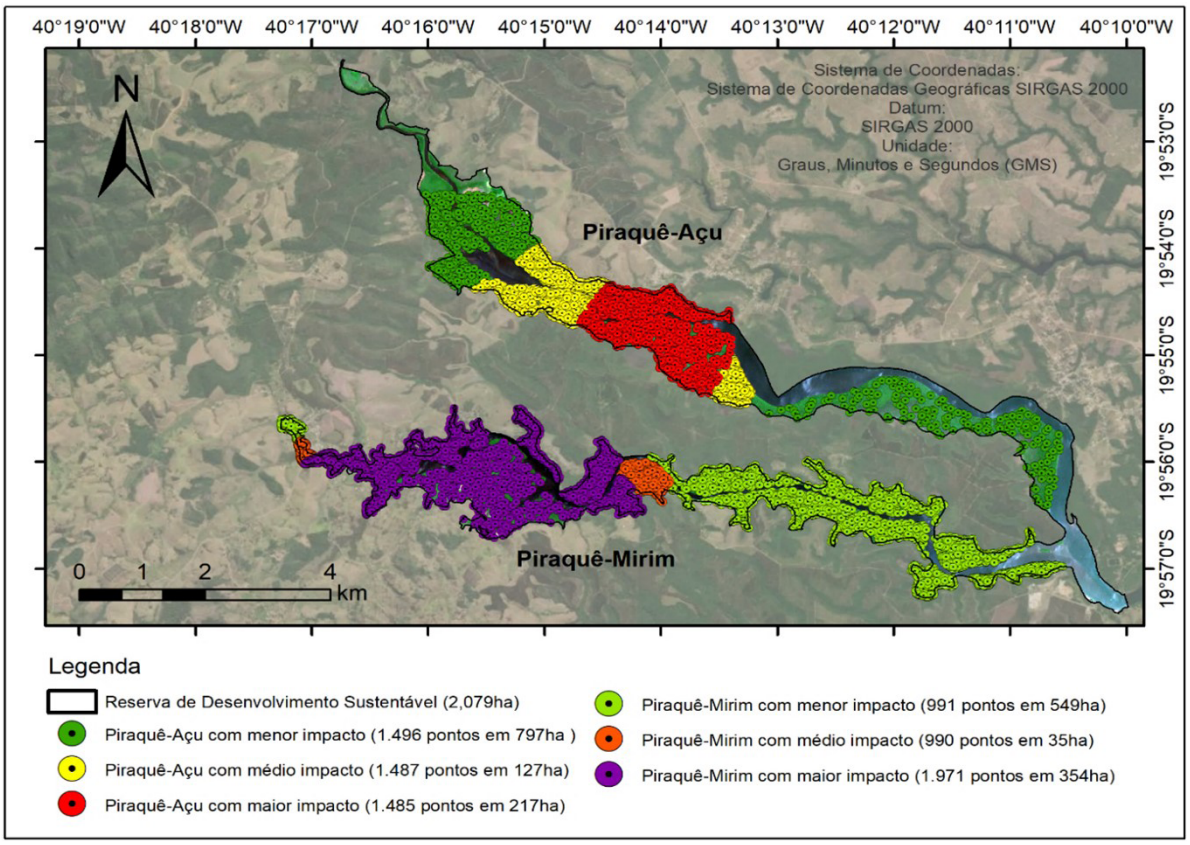
A etapa IV, que consistiu na delimitação da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim, foi realizada utilizando o arquivo vetorial, disponibilizado pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Aracruz (ES).

Como a Reserva foi atingida de forma desigual pela tempestade, as implicações também se deram de forma heterogênea. Desse modo, foi feita 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 do índice aplicado.

Como já dito, o impacto na Reserva se deu de forma desigual. Somando isso ao fato dela 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®. O critério para a definição da quantidade de pontos foi a dimensão de cada área juntamente com as variações espaciais dos valores representados pela escala de cores. 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 2.

Figura 2 – Distribuição dos pontos amostrais.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na etapa V foi efetuada a extração dos valores de cada ponto alocado. Após esse procedimento fez-se a geração gráficos que possibilitaram evidenciar, quantitativamente, a repercussão do impacto nos distintos locais.

Na etapa VI, que consistiu na expedição de campo, foi possível comparar os resultados obtidos remotamente com a realidade do local. Essa etapa foi fundamental para comprovar a capacidade dos índices utilizados em registrar as consequências do impacto da tempestade nos mangues.

Com mapas contendo a espacialização dos eventos e seus distintos graus de impacto (menor, médio e maior) e um aparelho de localização geográfica (GPS Garmin 60 Cxs), percorreu-se todas as áreas. Isso se deu tanto por vias terrestres, com carro, quanto marinhas, com barco.

Na etapa VII foi realizada a estruturação dos resultados em forma de figuras. Estas abarcam tanto aos mapas temáticos quanto gráficos estatísticos.

Resultados e Discussões

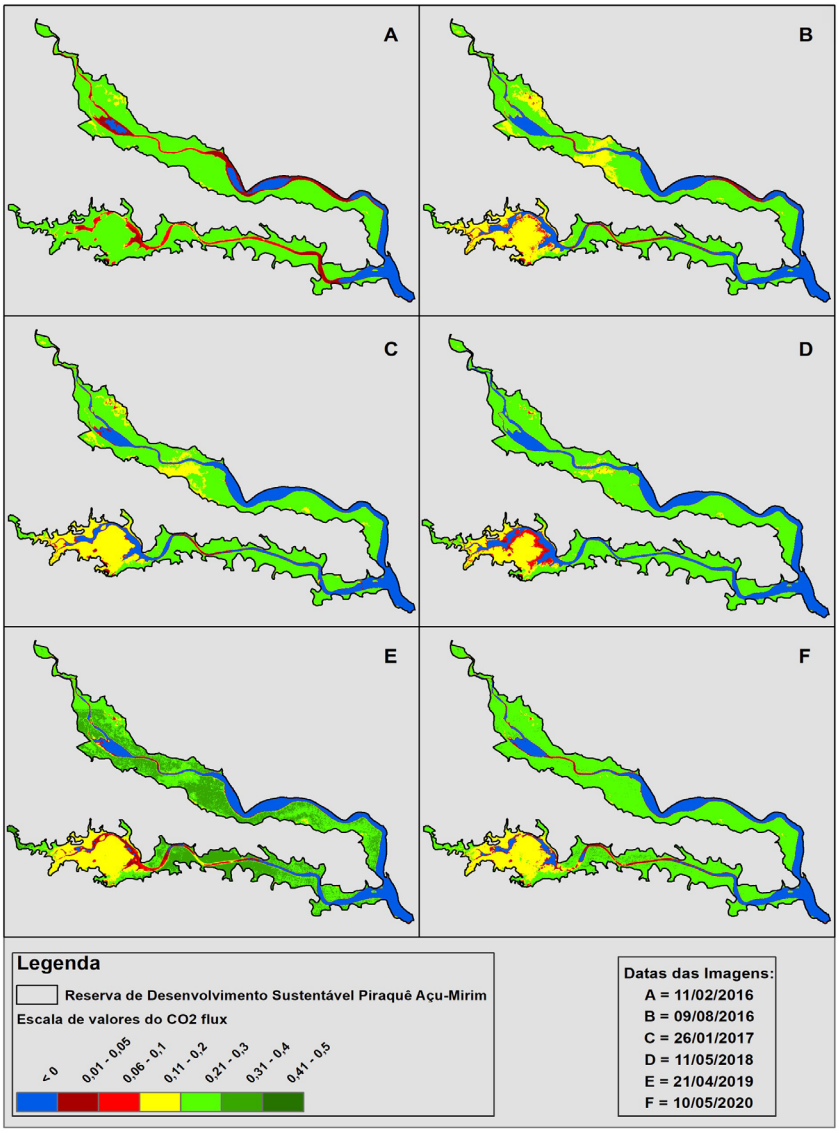
Apesar do CO_2 *flux* ser eficiente para entender a dinâmica de diferentes locais, até o momento não se tem visto aplicações para mensurar impactos advindos de eventos climáticos extremos. Essa lacuna se amplia consideravelmente nos ecossistemas de manguezais. É possível que um dos motivos para essa ausência esteja atrelado à escassez de torres medidoras de sequestro de dióxido de carbono pelas vegetações.

Apesar de não ser possível quantificar, em volumes, a quantidade de CO_2 utilizado pelas vegetações nesses lugares sem essas torres, a aplicação do índice em questão se mostra oportuna. Isso se dá a partir das respostas espectrais, que possuem relação direta com as atividades fisiológicas das plantas.

Frente ao exposto, esta pesquisa apresenta possibilidades da aplicação do CO_2 *flux* em ambientes específicos, como os manguezais, para avaliar suas respostas frente a perturbações que interferem no seu equilíbrio.

Nesse sentido, ao analisar as imagens referentes à aplicação do CO_2 *flux* entre fevereiro de 2016 (antes da tempestade) e maio de 2020 (Figura 3), é possível observar a redução dos valores desse índice. Além dessas reduções, também está evidente as diferenças na capacidade de recuperação entre o Piraquê-Açu e o Piraquê-Mirim. Uma ponderação importante sobre esta imagem é que os valores inferiores a 0,1 (cores em vermelho e azul) são referentes a superfícies sem cobertura vegetal.

Figura 3 – CO_2 *flux* gerado a partir de dados MSI/*Sentinel-2* para a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.

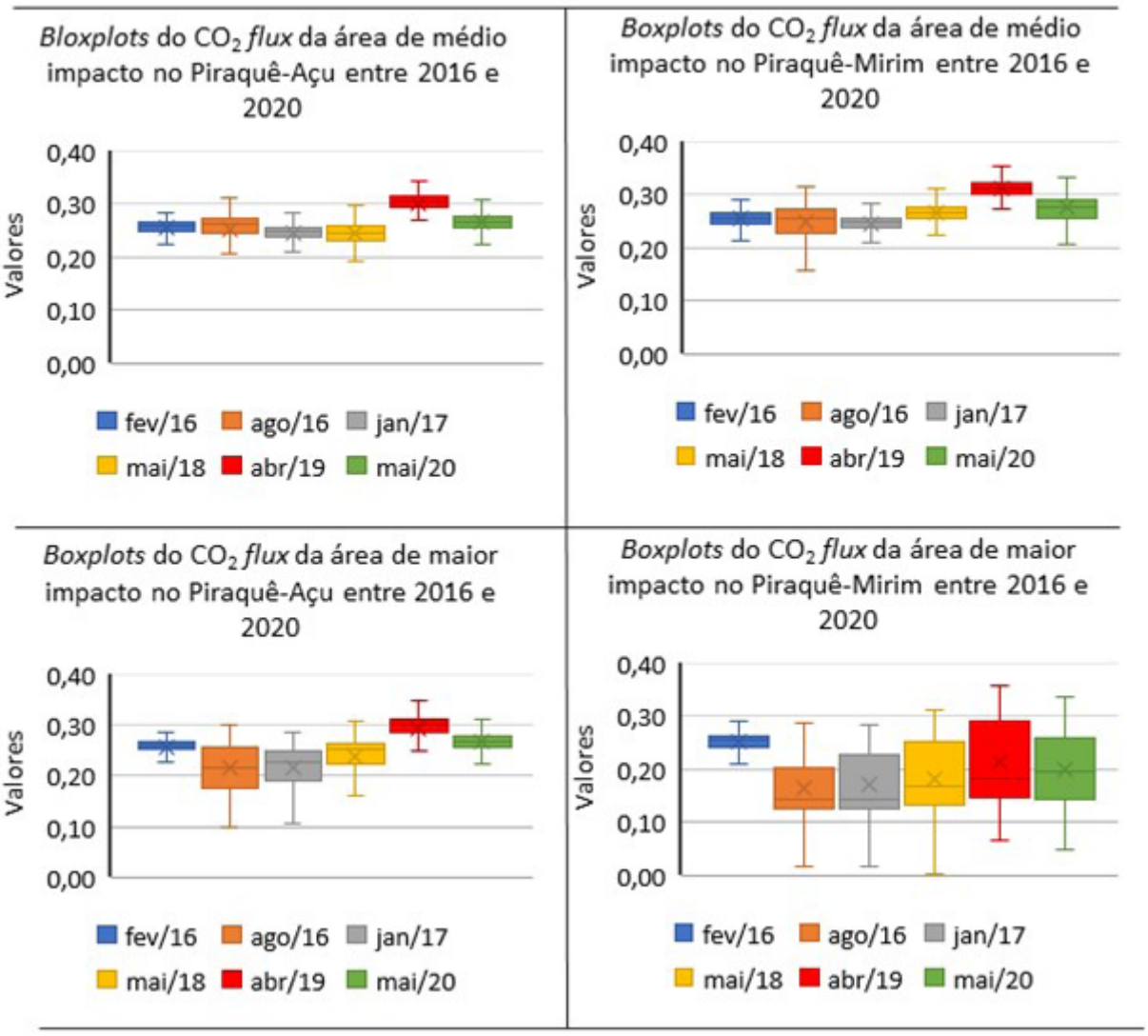


Fonte: Elaborado pelos autores.

No que diz respeito às diferenças entre os estuários, observa-se que, enquanto no Piraquê-Mirim a área classificada como de maior impacto permaneceu estagnada, no Piraquê-Açu todas as áreas impactadas iniciaram um processo de recuperação a parti de 2018. Além disso, a imagem também mostra que, salvo uma variação em 2019, em 2020, nas demais áreas de ambos os estuários, os valores do índice retornaram à faixa de ante do evento, ou seja, 0,21 a 0,3.

Um maior detalhamento da interferência do impacto da tempestade no processo de fotossíntese dos mangues está presente nos gráficos *boxplots* (Figura 4). Como nas áreas de menor impacto os valores não sofreram variações, na figura em questão estão presentes apenas os resultados das áreas de médio e maior impacto.

Figura 4 – Gráficos estatísticos do CO_2 *flux* da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.



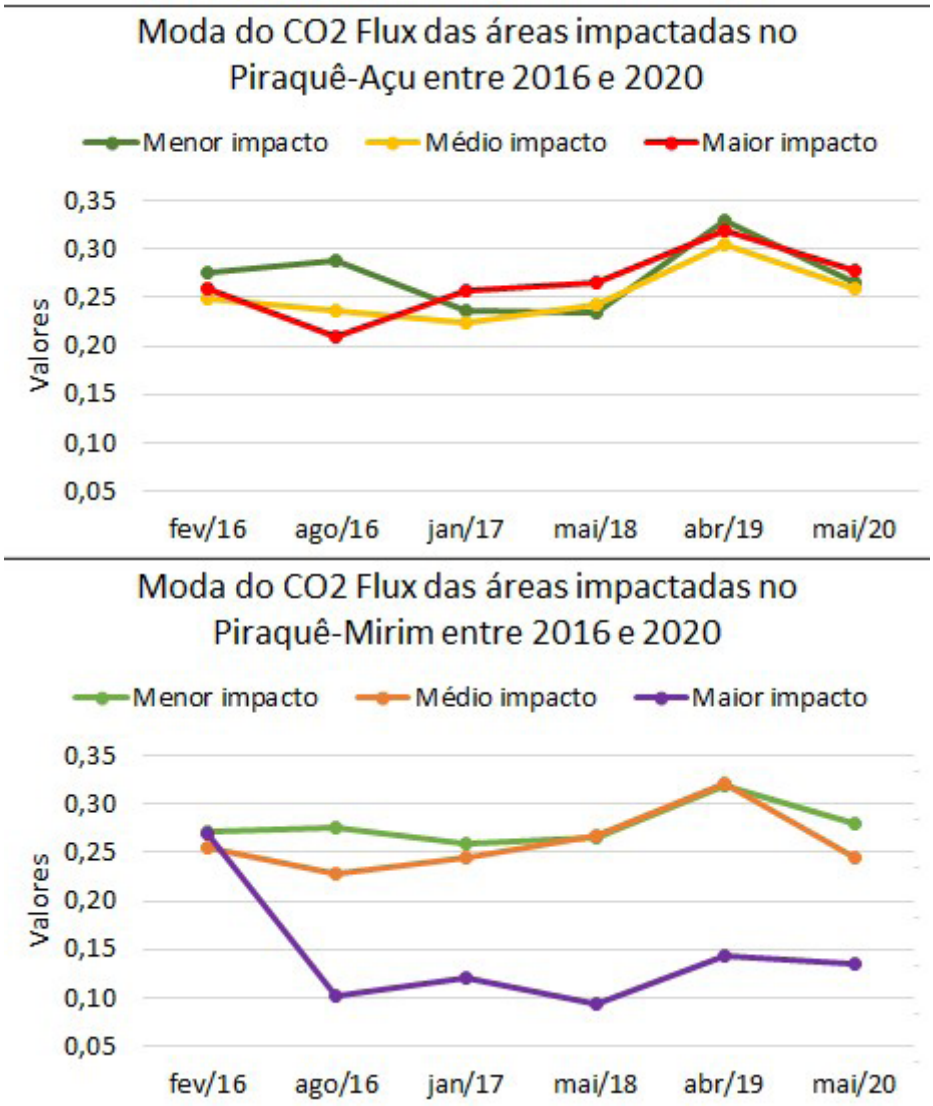
Fonte: Elaborado pelos autores.

Como já dito, na Figura 4 constam dados das áreas de médio e maior impacto, separadas entre o estuário Piraquê-Açu (PA) e Piraquê-Mirim (PM). Nos gráficos acima, tanto as consequências do impacto quanto as diferenças entre as áreas estão mais evidentes. Um exemplo

disso é que nas áreas de médio impacto de ambos os estuários os dados de agosto de 2016 já demostram as modificações. Tais modificações são mais evidentes no PM, onde os valores se mostram mais dispersos.

Nas áreas de maior impacto esses gráficos reforçam as diferenças já observadas na Figura 3. Tais diferenças podem serem melhor observadas nos gráficos de moda (Figura 5). O motivo para geração do gráfico em questão é que ele expõe os valores exatos de cada pixel, ou seja, nele é possível ver o quanto cada local sofreu com a tempestade.

Figura 5 – Gráficos estatísticos do CO_2 *flux* da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Piraquê Açu-Mirim entre 2016 e 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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. Neles, é possível perceber a redução dos valores referentes às atividades fotossintéticas das plantas. Novamente a área de maior impacto é a mais discrepante.

Ao se analisar as áreas de maior impacto de 2016, nota-se que, no Piraquê-Açu, o valor do CO_2 *flux* diminuiu 18 %, enquanto no Piraquê-Mirim a redução foi de 62 %. Nos *boxplots* é possível observar a redução nos valores médios e o aumento na amplitude das dispersões. Como já exposto, os dados apontam que, no Piraquê-Mirim, o impacto foi mais severo.

Retomando os gráficos de moda, mas para o ano de 2017, tem-se que em ambos os estuários as áreas de maior impacto registraram um aumento de valores de 24 % no PA e 20 % no PM. No ano seguinte, 2018, ao se analisar as áreas de médio impacto, tanto no PA quanto no PM, os índices demonstram que a vegetação conseguiu se recuperar, atingindo valores iguais ou próximos de antes do evento.

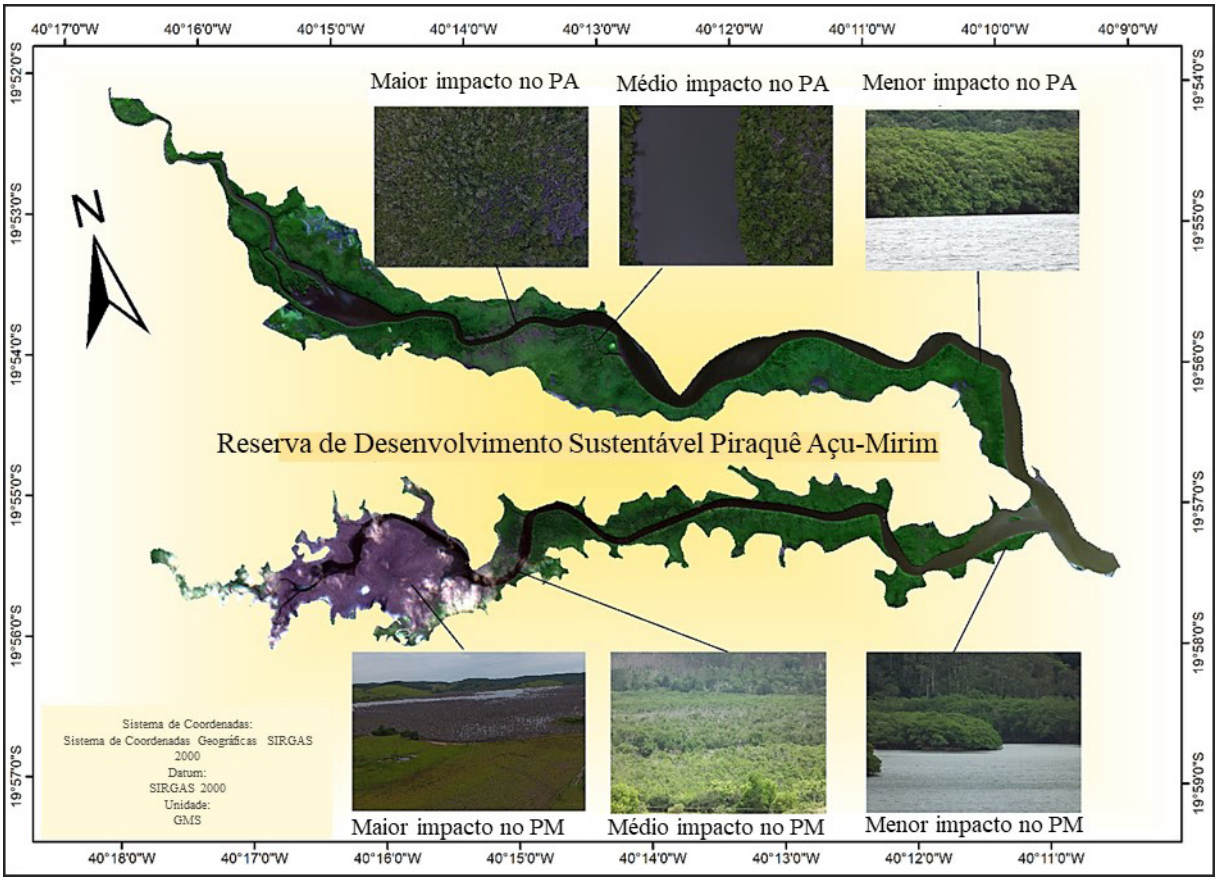
Nas áreas de maior impacto o que se tem é uma acentuação das diferenças entre os estuários pois, enquanto no Piraquê-Açu os valores chegam inclusive a superar os das áreas de menor e médio impacto, no Piraquê-Mirim ocorre um declínio desses valores. Tais resultados indicam que o PA continuou a se recuperar, enquanto o PM, apesar de ter esboçado uma melhora em 2017, continua em estado crítico.

Com relação a 2019, nota-se uma recuperação dos mangues inclusive na área mais impactada do Piraquê-Mirim. Nesta área o valor da moda registrou um aumento de 56 %. Vale destacar que esse aumento nos valores também foi registrado nas imagens do índice (Figura 3) e nos gráficos *boxplots* (Figura 4). Do ponto de vista ecológico, o acréscimo registrado foi de real importância pois mostrou a capacidade de regeneração das plantas diante das perdas causadas pela tempestade. Tal regeneração possui implicações diretas no ecossistema como um todo, repercutindo diretamente na disponibilidade de recursos para as pessoas como, por exemplo, pescadores e marisqueiros que os utilizam como fonte de renda, seja ela complementar ou principal.

No ano de 2020 é possível observar que, enquanto em todas as áreas do Piraquê-Açu os valores ficam próximos aos registrados em fevereiro de 2016, no Piraquê-Mirim isso só ocorre nas áreas de menor e médio impacto. Na área de maior impacto desse estuário o valor ficou 48 % inferior ao registrado antes do evento.

Diante dos resultados obtidos a partir da aplicação dos índices, fez-se, em 2020, uma expedição à campo para avaliar os níveis de correlação entre o que se obteve remotamente com a realidade do local. Para tal foi utilizado, além de mapas impressos, um aparelho de posicionamento global (modelo Garmin 60 Cxs) e uma aeronave remotamente pilotada (modelo Phantom 4). Essa etapa foi fundamental pois possibilitou comprovar a eficácia do CO_2 *flux* no registro do evento. Foi possível, inclusive, identificar com facilidade as áreas classificadas como de menor, médio e maior impacto em ambos os estuários (Figura 6).

Figura 6 – Imagens dos mangues de acordo com a intensidade do impacto.



Fonte: Os autores.

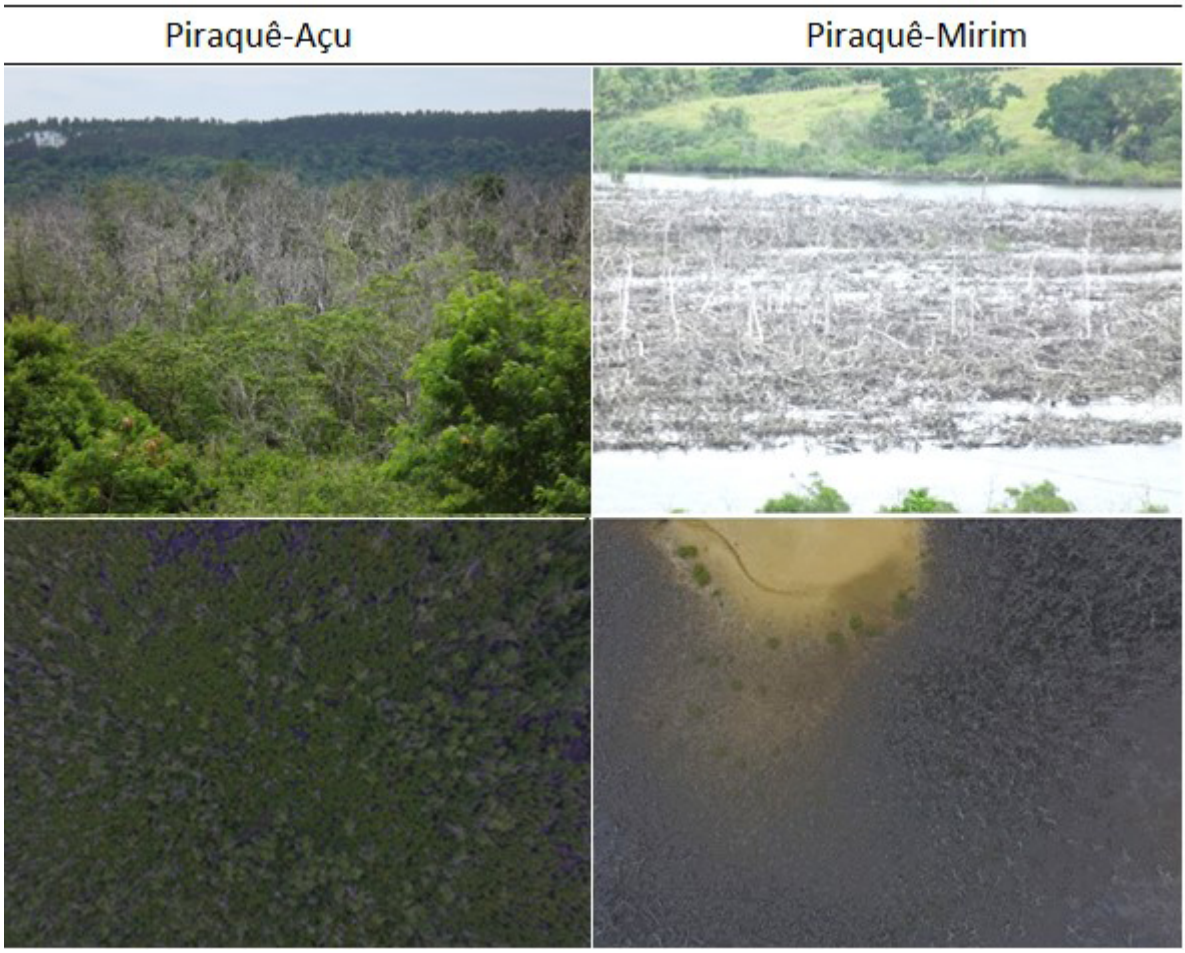
Ao confrontar os produtos com a realidade de campo percebeu-se que o CO_2 *flux* promoveu uma superestimação dos valores das áreas de maior impacto. Isso fica mais evidente ao se analisar as imagens dessa área no Piraquê-Mirim. (Figura 7).

A figura em questão apresenta registros feitos tanto por vias terrestres quanto aéreas. Como pode ser notado no registro de campo, que foi feito às bordas da floresta, na área de maior impacto do Piraquê-Açu existem vários troncos secos no meio das vegetações verdes. Na imagem aérea isso também se mantêm, mas, por abranger uma área maior, fica evidente a predominância da vegetação verde.

Por outro lado, ambas as imagens feitas no Piraquê-Mirim demonstram uma total destruição da vegetação. É justamente nesse local que o CO_2 *flux* promoveu uma superestimação dos valores pois, de acordo com o cenário encontrado, o esperado é que esses estivessem inferiores a 0,11. Uma das possíveis explicações pode estar relacionada aos efeitos de bordas das áreas de médio impacto que obtiveram recuperação.

Todavia, como nas demais áreas os resultados do índice se mostraram compatíveis com a realidade do local, afirma-se que o CO_2 *flux* pode em muito contribuir com análises ambientais que buscam avaliar as atividades fotossintéticas das vegetações de mangues.

Figura 7 – Imagens da área de maior impacto no Piraquê Açu-Mirim.



Fonte: Os autores.

Frente ao exposto, a utilização do CO_2 *flux* para avaliar as repercussões da tempestade de granizo no estuário Piraquê Açu-Mirim se mostrou eficiente. O índice em questão conseguiu estabelecer uma consonância com a realidade do campo. Assim como Souza (2021), nesta pesquisa constatou-se que os locais com maiores densidades florestais (áreas de menor impacto) foram as que apresentaram maio potencial de sequestro de carbono. Consequentemente, as áreas mais destruídas foram as que tiveram suas atividades fotossintéticas menos eficientes.

Essas correlações são similares às encontradas por Lu e Zhu (2021) ao analisarem, por meio do PRI, respostas de fluxo de carbono em mangues afetados por seca. Vale reforçar que esse índice faz parte das equações utilizadas para se calcular o CO_2 *flux*. Entende-se que o CO_2 *flux* é um índice mais completo pois, além das bandas do PRI, ele também se vale do NDVI, que é mundialmente consolidado, para indicar o vigor vegetativo das plantas.

Nesse sentido, o CO_2 *flux* gerado a partir de dados do sensor MSI, que está acoplado ao satélite *Sentinel-2*, se mostrou eficiente para registrar as variações nas taxas de fixação de dióxido de carbono pelas vegetações de mangues. Diante do exposto, ao se levar em consideração a eficiência dos mangues em sequestrar CO_2 atmosférico, sendo responsável por até 14 % de toda a absorção nas faixas entre terra-mar (Souza, 2021), é possível inferir que as perdas ecossistêmicas nas áreas atingidas pelo evento climático foram significativas.

Quanto a isso, sabe-se que, até o momento, não existe uma estimativa precisa de quanto um manguezal preservado pode gerar de renda pois a valoração depende das especificidades de cada lugar. Como tanto a sociedade quanto a natureza estão em constante transformação, atribuir um valor específico e constante, tomando como referência a escala regional, é praticamente impossível (Almeida; Júnior, 2018).

Entretanto, alguns pesquisadores como Costanza *et al*. (1997), Hernandéz *et al*. (2002), Meireles e Campos (2010) e Van-Bochove (2014) se esforçaram para valorar os serviços ecossistêmicos promovidos pelos mangues nas diferentes partes do mundo. Desses, Van-Bochove (2014), ao sistematizar um estudo a valoração dos manguezais para os países em desenvolvimento, chegou ao montante que varia entre US$ 33.000,00 e US$ 57.000,00 (dólares por ha/ano).

Ao analisar a área de maior impacto do Piraquê-Mirim, que possui aproximadamente 354 ha, e correlacionar com os valores estipulados acima, estima-se que prejuízo causado pela tempestade varia entre US$ 11.682.000,00 e US$ 20.178.000,00. Essa situação reforça a necessidade de implementação de projetos que tenham como objetivo a recuperação desses mangues. Isso se faz necessário pois, por se tratar de um ambiente muito dinâmico, as alterações podem desencadear reações em cadeia com repercussões que extrapolam a escala local.

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 adversidades desses locais é possível afirmar que essa metodologia apresenta um grande potencial para o entendimento desse ambiente.

Nesse sentido, o CO_2 *flux* foi eficaz em registrar a variação de fluxo de dióxido de carbono nos locais atingidos pela tempestade de granizo. A ausência de torre de medição de CO_2 atmosférico não permitiu quantificar o volume do *flux* desse gás, mas o índice, juntamente com as estatísticas, deixou evidente a correlação entre os valores registrados e a verdade de campo.

Frente ao exposto e diante da importância do manguezal pesquisado para as populações de pescadores, indígenas 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.

Espera-se que os dados gerados nesta pesquisa possam contribuir para outros pesquisadores seja na continuidade desta pesquisa, seja na aplicação em outros estudos. Vale pontuar que tanto as análises estatísticas utilizadas quanto a forma com que essas foram organizadas e apresentadas foram peças chaves para entender as dinâmicas da área de estudo.

Referências

ALMEIDA, R.; COELHO JUNIOR, C. Manguezal e serviços ecossistêmicos. *In*: SOAVINSKI, R.; MARETTI, C. (ed.). **Atlas dos Manguezais do Brasil.** Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018. p. 85-95.

ARACRUZ, Prefeitura Municipal de. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim**. Aracruz: Prefeitura Municipal de Aracruz, 2020. Disponível em: http://www.pma.es.gov.br/meio-ambiente/27. Acesso em: 15 abr. 2021.

ARACRUZ, Prefeitura Municipal de. Secretaria de Turismo e Cultura. **Rio Piraquê-Açu**. Aracruz: Prefeitura Municipal de Aracruz, 2021. Disponível em: http://www.aracruz.es.gov.br/turismo/atracoes-turisticas/14. Acesso em: 15 abr. 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*: **Anais**. XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1037-1044.

BERNARDINO, A. F. *et al*. Predicting ecological changes on benthic estuarine assemblages through decadal climate trends along Brazilian Marine Ecoregions. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.166, p. 74-82, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.05.021

CIAVOLA, P.; COCO, G. (ed.). **Coastal storms: processes and impacts**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; GROOT, R. *et al*. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253-260, 1997. https://doi.org/10.1038/387253a0

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.

GERHARDT, A. R.; RODRIGUES, C. P.; ALVES, G.; FONTANA, D. C. Mapeamento do fluxo de CO_2 em lavouras de soja usando imagens orbitais landsat TM5. **Anais**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011. p. 39-46.

HERNANDÉZ, E.; HAGLER, M.; LÓPEZ, E. Financiación del Banco Mundial a la camaronicultura en América Latina. **Greenpeace**, 2002. Disponível em: http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/financiaci-n-del-banco-mundial.pdf

LU, Y.; ZHU, X. Response of mangrove carbon fluxes to drought stress detected by photochemical reflectance index. **Remote Sensing**, v. 13, n. 20, p. 40-53, 2021. https://doi.org/10.3390/rs13204053

MEIRELES, A. J. A.; CAMPOS, A. A. Componentes geomorfológicos, funções e serviços ambientais de complexos estuarinos no nordeste do Brasil. **Revista da ANPEGE,** v. 6, n. 6, p. 89-107, 2010. https://doi.org/10.5418/RA2010.0606.0007

OPPENHEIMER, M.; GLAVOVIC, B.C.; HINKEL, J. *et al*. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. *In*: PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; MASSON-DELMOTTE, V. *et al*. (ed.). **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. 2019, p. 321-445. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/srocc_fullreport_final.pdf

RAHMAN, A. F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO_2 flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. **AVIRIS Workshop**. Pasadena: JPL/NASA, 2000.

ROCHA, L. R. **Modelagem para determinação do fluxo de CO_2 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. p. 309-317, 1973.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. A diversidade do ecossistema manguezal. *In*: SOAVINSKI, R.; MARETTI, C. (ed). **Atlas dos Manguezais do Brasil.** Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018. p. 23-36.

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

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

SOAVINSKI, R.; MARETTI, C. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Atlas dos Manguezais do Brasil.** Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2018.

SOUZA, Y. G. Estimativa preliminar da densidade de cobertura vegetal e do fluxo de CO_2 a partir de índices de vegetação: uma pesquisa no sistema estuarino do rio Piranhas-Açu (RN/Brasil). 2021. **Anais**, XIV ENANPEGE. Disponível em: https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/77869. Acesso em: 10 out. 2021.

VAN-BOCHOVE, J; SULLIVAN, E; NAKAMURA, T. **The Importance of Mangroves to People: A Call to Action**. Cambridge: United Nations Environment Programme World Conservation. 2014.

Declaração de financiamento:

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

Editor do artigo:

Fernando Villela

Recebido em: 08 set. 2022

Aprovado em: 10 out. 2023