



ESTIMATIVA PRELIMINAR DA DENSIDADE DE COBERTURA VEGETAL E DO FLUXO DE CO₂ A PARTIR DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO: UMA PESQUISA NO SISTEMA ESTUARINO DO RIO PIRANHAS-AÇU (RN/BRASIL)

Yuri Gomes de Souza ¹

RESUMO

A utilização de imagens de satélite e de índices de vegetação têm se mostrado eficientes na análise e avaliação da cobertura vegetal de mangue, especialmente no entendimento da biomassa e suas repercussões na mitigação das mudanças climáticas. Como objetivo, essa pesquisa busca identificar as áreas de mangue, analisar a sua densidade florestal e a capacidade no sequestro de carbono atmosférico. Em se tratando dos procedimentos metodológicos, fez-se uso de quatro etapas principais: 1) Levantamento bibliográfico; 2) Identificação dos fragmentos florestais com imagens de alta resolução, por meio do CBERS 4A; e 3) A partir de uma imagem Sentinel-2B, reuniu-se as bandas do azul (Blue), verde (Green), vermelho (Red) e infravermelho (NIR) para calcular os índices: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), o Índice sPRI (dados normalizados do PRI) e o Índice de fluxo de CO₂ (CO₂ flux). Como resultados, observou-se que a área de mangue ocupou 2.838,3 hectares, variando entre bosques esparsos, semidensos e densos. Sua densidade apresentou tendência proporcional aos valores dos demais índices, estimando que quanto mais alta fosse a densidade dos bosques maior seria a capacidade de realização de fotossíntese e de sequestro de CO₂.

Palavras-chave: Vegetação de mangue, Índices espectrais, Mudanças climáticas.

RESUMEN

Se ha demostrado que el uso de imágenes satelitales e índices de vegetación es eficiente en el análisis y evaluación de la cubierta vegetal de los manglares, especialmente en la comprensión de la biomasa y su impacto en la mitigación del cambio climático. Como objetivo, esta investigación busca identificar áreas de manglar, analizar su densidad forestal y capacidad para secuestrar carbono atmosférico. En términos de procedimientos metodológicos, se utilizaron cuatro pasos principales: 1) Encuesta bibliográfica; 2) Identificación de fragmentos de bosque con imágenes de alta resolución, utilizando CBERS 4A; y 3) A partir de una imagen Sentinel-2B, se recopilaron las bandas azul (Blue), verde (Green), roja (Red) e infrarroja (NIR) para calcular los índices: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), índice de reflectancia fotoquímica (PRI), el índice sPRI (datos PRI normalizados) y el índice de flujo de CO₂ (CO₂ flux). Como resultado, se observó que el área de manglar ocupaba 2.838,3 hectáreas, variando entre bosques dispersos, semidensos y densos. Su densidad tendió a ser proporcional a los valores de los otros índices, estimándose que cuanto mayor es la densidad de los bosques, mayor es la capacidad para realizar fotosíntesis y secuestro del bosque. CO₂.

Palabras clave: Vegetación de manglar, índices espectrales, cambio climático.

¹ Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - (PPGE/UFRN), yurigomes.s28@gmail.com;



INTRODUÇÃO

Segundo dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2018), as intervenções de cunho humano tem sido responsável por cerca de 1,0°C de aquecimento global no último século, e essa estimativa pode ser particularmente expandida a 1,5 °C entre os anos de 2030 e 2052, caso as emissões de dióxido de carbono (CO₂) continuem em tendência crescente. Outrossim, a conservação de ecossistemas que mitigam tamanho desequilíbrio tem se projetado com igual desafio.

Os manguezais, que têm sido pauta em muitas das pesquisas sobre mudanças climáticas, estão entre os ecossistemas mais benéficos das regiões costeiras, em especial no sequestro e estoque de CO₂ atmosférico. Embora as florestas de mangue contribuam em 14% de toda a absorção nas faixas entre terra-mar, as projeções das mudanças climáticas têm tornado vulnerável a sobrevivência dessas espécies até 2050 (ALONGUI, 2012; SAINTILAN, 2020).

Mudanças no uso da terra, flutuações do nível médio do mar e eventos de erosão costeira, têm sido alguns dos grandes responsáveis pelo comprometimento de vastas formações de mangue em escala global, reduzindo a retenção de CO₂ e favorecendo o lançamento dos gases de efeito estufa para a atmosfera. A subtração de mangue em seis regiões do planeta (sudeste e sul da Ásia, Caribe, oeste de Mianmar e norte do Brasil), tem sinalizado consequências ainda mais graves quando se pensa na mitigação das mudanças climáticas (ADAME et al., 2021).

Diversos estudos têm buscado identificar os remanescentes de mangue em todo o planeta por meio da utilização das geotecnologias. Com ampla contribuição na detecção desses ecossistemas, essas tecnologias permitem atestar desde a sua cobertura vegetal até a saúde e vigor dos indivíduos, por meio da sua capacidade fotossintética (SPALDING; KAINUMA; COLLINS, 2010; KUENZER et al., 2011; HAMILTON; CASEY, 2016).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que é considerado como um “indicador fenológico” da vegetação verde (ROUSE et al., 1973), o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), com atuação na medição da “eficiência do uso da luz” pelas plantas (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992) e o índice CO₂ flux, com capacidade de indicar o fluxo de carbono sequestrado na atmosfera (RAHMAN et al., 2000), são alguns dos exemplos possíveis para entender comportamentos vegetacionais e suas repercussões no meio ambiente.

No litoral semiárido do Brasil, especificamente na porção setentrional do Rio Grande do Norte, encontra-se o extenso complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu, que se apresenta sob a influência do clima semiárido e das condições extremas de salinidade. Essa área dispõe de

uma vasta formação de florestas de mangue, porém os históricos de conversões no uso da terra, as taxas de hipersalinidade, as secas prolongadas e os eventos de inundação, têm motivado a realização de pesquisas nesse setor (ARAÚJO et al., 2020; SALDANHA, 2020).

Considerando a demanda global por estudos em ecossistemas de manguezal, a análise por meio de índices de vegetação se caracteriza como instrumento balizador para auxiliar a promoção da conservação dessa vegetação e nas projeções de redução do carbono atmosférico. Com essa premissa, estudos com essa finalidade são cada vez mais necessários, principalmente nessa área de estudo, que ainda carece de pesquisas dessa natureza. Visando contribuir com a discussão acima, o objetivo dessa pesquisa é identificar as áreas de mangue, analisar a sua densidade florestal e entender a sua capacidade no sequestro de carbono atmosférico no estuário do Rio Piranhas-Açu (RN).

METODOLOGIA

- **Área de estudo**

Com extensão de aproximadamente 17.467 ha, a área de estudo consiste no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu, localizado entre os municípios de Porto do Mangue, Carnaubais, Macau e Pendências, região litorânea da porção setentrional do estado do Rio Grande do Norte do Brasil (Figura 01).

Figura 01: Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).



Alocada na zona climática do tipo BSh (tropical semiárido quente e seco), segundo a classificação climática de Köppen, essa área é marcada pela irregularidade de precipitação (média de 537,6 mm/ano), forte insolação e elevadas temperaturas (média de 26,7°C). Em virtude de tais características, esse setor litorâneo é apontado como o mais seco e quente de toda a costa brasileira, com formação majoritária de regiões hipersalinas devido ao acúmulo gradual de sódio (Na) no solo, os quais são oriundos da dinâmica das marés e da evaporação potencial (ALVARES et al., 2013; DINIZ; PEREIRA, 2015; COSTA et al., 2014; 2018).

- **Procedimentos metodológicos**

- a. **Mapeamento da vegetação de mangue**

Para o mapeamento de alta resolução da vegetação de mangue, foram utilizadas duas imagens do satélite CBERS 4A, sensor Câmera Multiespectral e Pancromática de Ampla Varredura (WPM), com 2,0 m de resolução e datas de imageamento: 07/09/2020 e 09/01/2021. As imagens foram adquiridas na plataforma do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo>).

As imagens foram corrigidas e submetidas ao tratamento de realce, ajustando o contraste e o histograma, onde buscou-se diminuir os ruídos e o melhoramento da qualidade de interpretação das imagens. Em seguida, fez-se a inserção das mesmas para a grade de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) o DATUM SIRGAS 2000/Zona 24S.

Buscando priorizar a identificação do mangue, optou-se pelo uso da vetorização seguindo o método de “interpretação de imagens”, conforme sugerem Panizza e Fonseca (2011). Assim como os procedimentos supracitados, os seguintes também foram realizados em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfico) do QGIS (QGIS Development Team, 2018), versão 3.4.15 Madeira (GNU - *General Public License*®).

- b. **Aplicação dos Índices de Vegetação nos fragmentos de mangue**

Para o cálculo dos índices de vegetação foi utilizada uma imagem do Sentinel-2B (MultiSpectral Instrument Sensor - MSI) da grade 24MYV, com resolução espacial de 10m e data referente a 08/03/2020, adquirida na plataforma do Serviço Geológico dos Estados Unidos - USGS (<https://glovis.usgs.gov/app>).

O Processamento Digital da Imagem foi realizada a partir da conversão da Reflectância no Topo da Atmosfera (Top Of Atmosphere – TOA) em Reflectância na Base da Atmosfera



(Bottom Of Atmosphere Reflectance ou BOA), haja vista da necessidade de correção de eventuais distorções do sensor e de influências dos elementos atmosféricos. Esse procedimento foi realizado via plugin Semi-Automatic Classification Plugin – SCP do QGIS, para as seguintes bandas espectrais: Azul (Blue), Verde (Green), Vermelho (Red) e Infravermelho próximo (NIR) (CONGEDO, 2016; REZENDE; MARQUES; ROSA, 2017).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calculado utilizando a equação proposta por Rouse et al. (1973), a qual consiste na razão entre as reflectâncias (R_{λ}) das bandas RED e NIR (equação 1). Com intervalo que varia de -1 a 1, esse índice estima a densidade e o vigor da vegetação verde sobre a superfície, cuja resposta indica que quanto mais próximo de 1, maior densidade vegetacional (TRAN; FISCHER, 2017). Seguiu-se, com base nos valores para o NDVI, a classificação de mangue esparso, semidenso e denso, conforme sugerem Umroh; Adi e Sari (2016) e Tran e Fischer (2017) (Tabela 01).

$$NDVI = \frac{(R_{RED} - R_{NIR})}{(R_{RED} + R_{NIR})} \quad (\text{Equação 1})$$

Tabela 01: Valores de NDVI com base na densidade do bosque de mangue.

NDVI	Classes
< 0,42	Esparso
0,43 - 0,71	Semidenso
0,72 >	Denso

Fonte: Adaptado de Umroh, Adi e Sari (2016) e Tran e Fischer (2017).

Posteriormente, fez-se o cálculo do Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) a partir da razão entre as reflectâncias da banda 2 (Azul) e da banda 3 (Verde), segundo a equação proposta por Gamon, Peñuelas e Field (1992) (equação 2). Esse índice auxilia a identificação da capacidade fotossintética das plantas, de modo que ao variar entre -1 e 1, seus valores negativos indicam em sua maioria maior capacidade do uso da luz (GAMON; PEÑUELAS; FIELD, 1992; RAHMAN et al., 2000; GAMON et al., 2015).

$$PRI = \frac{(R_{BLUE} - R_{GREEN})}{(R_{BLUE} + R_{GREEN})} \quad (\text{Equação 2})$$



Em seguida, foi necessário o cálculo do índice sPRI, conforme a equação 3. Esse índice permite uma readequação dos valores negativos encontrados no PRI para valores positivos. O sPRI, que auxilia na “normalização dos dados de verdura” da planta, indica que quanto mais próximo de 1, maior a atividade fotossintética do bosque (RAHMAN et al., 2000; SILVA; BAPTISTA, 2015).

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \quad (\text{Equação 3})$$

Para determinar o índice CO₂flux, fez-se uso da equação 4, proposta por Rahman et al. (2000). Esse índice demonstra a estimativa da tendência à absorção do fluxo de CO₂ atmosférico, cuja resposta assinala que valores positivos acima de 0 representam as áreas com maior capacidade de fixação do CO₂ (RAHMAN et al., 2000; SILVA; BAPTISTA, 2015).

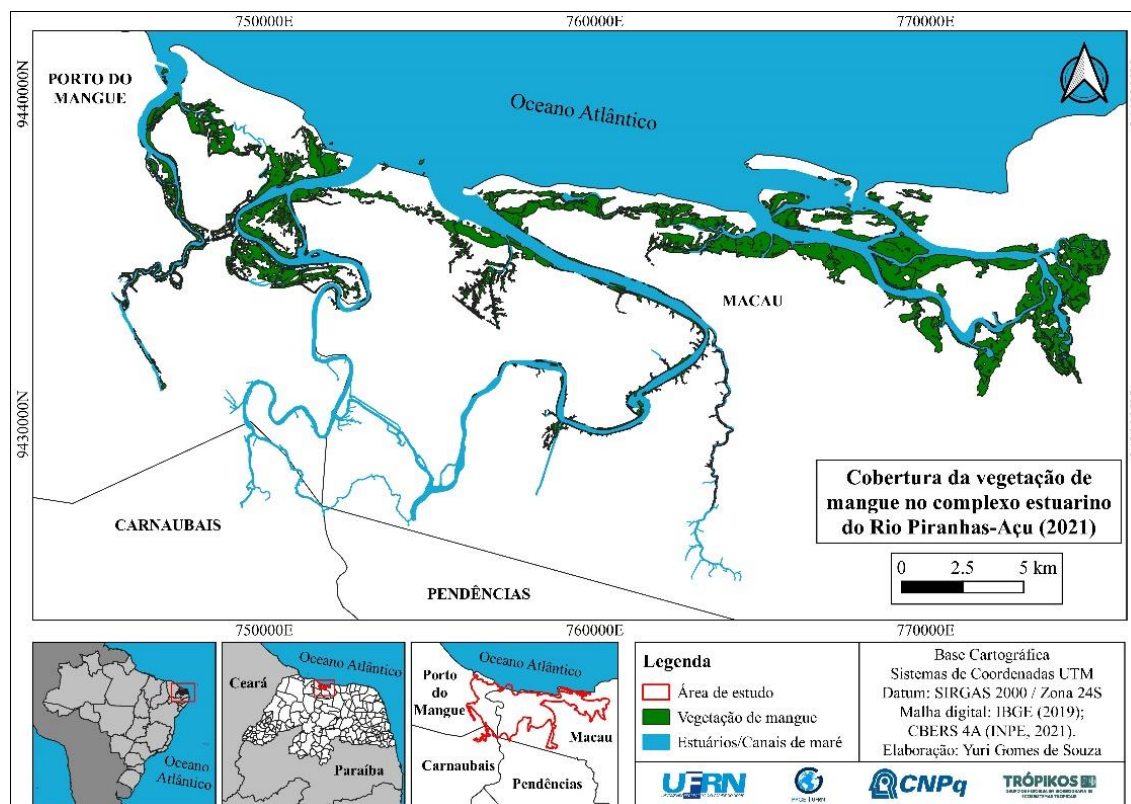
$$CO_2\text{flux} = sPRI * NDVI \quad (\text{Equação 4})$$

Por fim, foi feita a quantificação por meio do cálculo do algoritmo *r.report* do módulo GRASS 7.8.2, acoplado ao QGIS, bem como a análise do histograma, onde organizou-se as áreas totais de cada um deles.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento realizado com imagens de alta resolução permitiu a identificação de 2.838,3 hectares de vegetação de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu (Figura 02). A partir desse produto, pôde-se utilizar índices de vegetação para estimar os níveis de densidade florestal, de atividade fotossinteticamente ativa bem como dos fluxos de CO₂ associados a esses bosques florestais.

Figura 02: Cobertura de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu/RN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

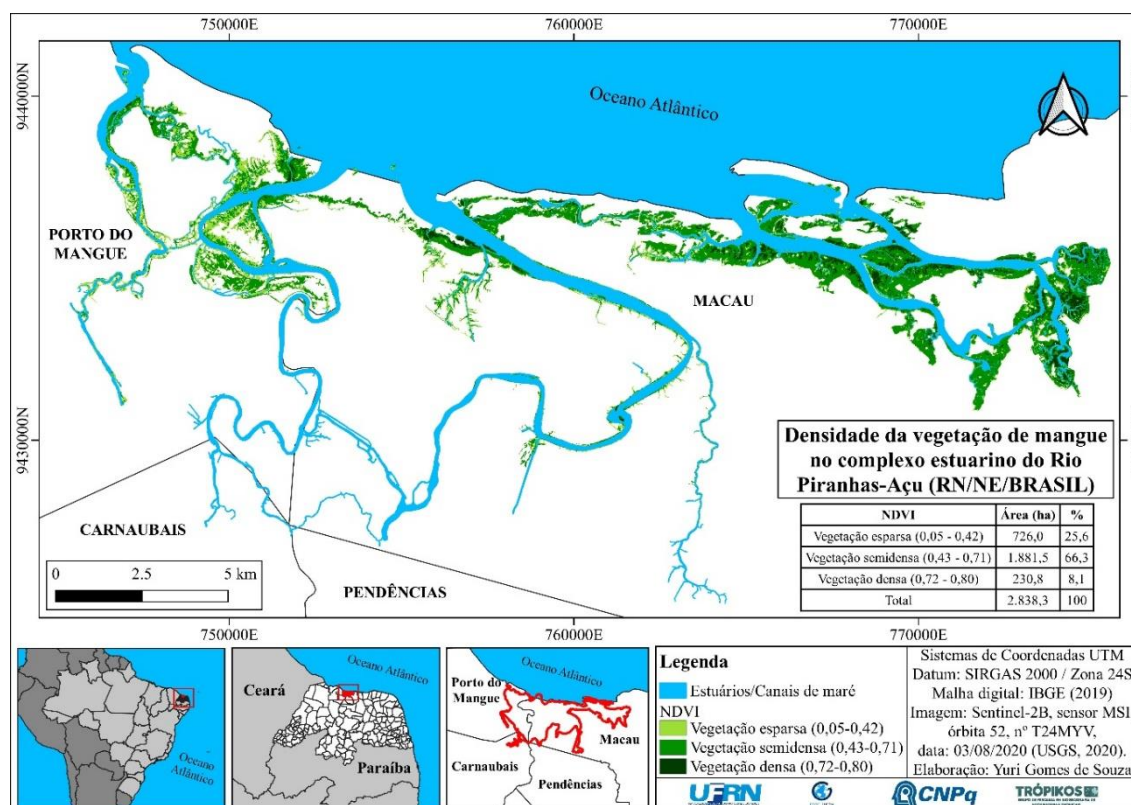
Em termos do NDVI, identificou-se que seus valores variaram entre 0,05 e 0,80. A densidade dos dosséis de mangue esteve entre esparso (0,05 - 0,42), semidenso (0,43 - 0,71) e denso (0,72 - 0,80), com média de 0,52 entre eles. A paleta de cores correspondente a essa segmentação indicou que em verde escuro corresponde os setores de maior densidade e conservação florestal, enquanto em verde claro conferem os bosques com densidade e vigor reduzidos. Notou-se que a vegetação de mangue semidensa apresentou predominância de ocupação na área, com 1881,5 ha, o equivalente a 66,3% do total; a vegetação esparsa aparece em segundo lugar, com 726,0 ha (25,6%); e a vegetação densa, em apenas 230,8 ha (8,1%) (Tabela 02; Figura 03).

Tabela 02: Distribuição dos valores do NDVI nos bosques de mangue.

Índice	Classes	Intervalos	Área (ha)	Percentual (%)
NDVI	Mangue esparso	0,05 – 0,42	726,0	25,6
	Mangue semidenso	0,43 – 0,71	1.881,5	66,3
	Mangue denso	0,72 – 0,80	230,8	8,1
Total			2.838,3	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 03: Densidade da cobertura vegetal de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu/RN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Inserido na classe de bosque esparso, os valores espectrais próximos a 0,05 indicam a pouca ou quase nenhuma ocorrência de espécimes no pixel. Contudo, é necessário ressaltar que tais valores foram influenciados pelas áreas contendo mangue em regeneração e indivíduos que se encontram em processo de degeneração, bem como pela influência de trechos de borda próximos à apícuas, suscitando no efeito de *background* do substrato e reduzindo a resposta do índice.



Diversos são as pesquisas que vinculam as classes de vegetação densa para valores de NDVI acima de 0,7, e para vegetação esparsa segmentam intervalos iguais e inferiores a 0,4. Considera-se que valores do NDVI acima de 0,1 indique presença de cobertura vegetal na superfície (TRAN; FISCHER, 2017; REVOLLO et al., 2019; AKBAR et al., 2020). Pesquisas recentes desenvolvidas por Yin et al. (2015) na bacia do rio Heihe, no noroeste da China, sugerem que, embora os valores entre 0 e 0,1 possam sinalizar quase inexistência de vegetação, sua resposta pode ser condicionada pela distribuição extremamente esparsa dos indivíduos na célula.

Importantes trabalhos têm ressaltado que os números positivos, com tendência crescente à 1,0, apontam aumento na cobertura verdejante (vegetação sadia e densa). Por outro lado, à medida em que decrescem, os valores indicam baixas reflectâncias, desencadeando áreas com menor presença de vegetação, ou estas sendo encontradas em processo de degradação ou sob estresse. É fundamental pontuar também que o NDVI é muito sensível às variações do substrato sob o dossel, principalmente em setores onde os solos são visíveis à copa, o que pode acarretar valores inferiores em sua resposta (JENSEN, 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010; HUETE, 2012).

Em se tratando do Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), foi possível observar que os valores variaram entre -0,07 e -0,52, com média de -0,24 entre eles. Com a predominância de valores negativos no intervalo, percebeu-se que a cobertura vegetal esteve em plena atividade fotossintética, embora apresentando variação de efetividade na fotossíntese entre os bosques esparsos, semidensos e densos. A maior ocupação foi entre -0,20 e -0,30, com 1.521,1 ha (53,6%); e entre -0,31 e -0,52 e -0,07 e -0,19, com extensão de 852,0 ha (30%) e 465,2 ha (16,4%), respectivamente (Tabela 03; Figura 04).

Tabela 03: Distribuição dos valores do PRI nos bosques de mangue.

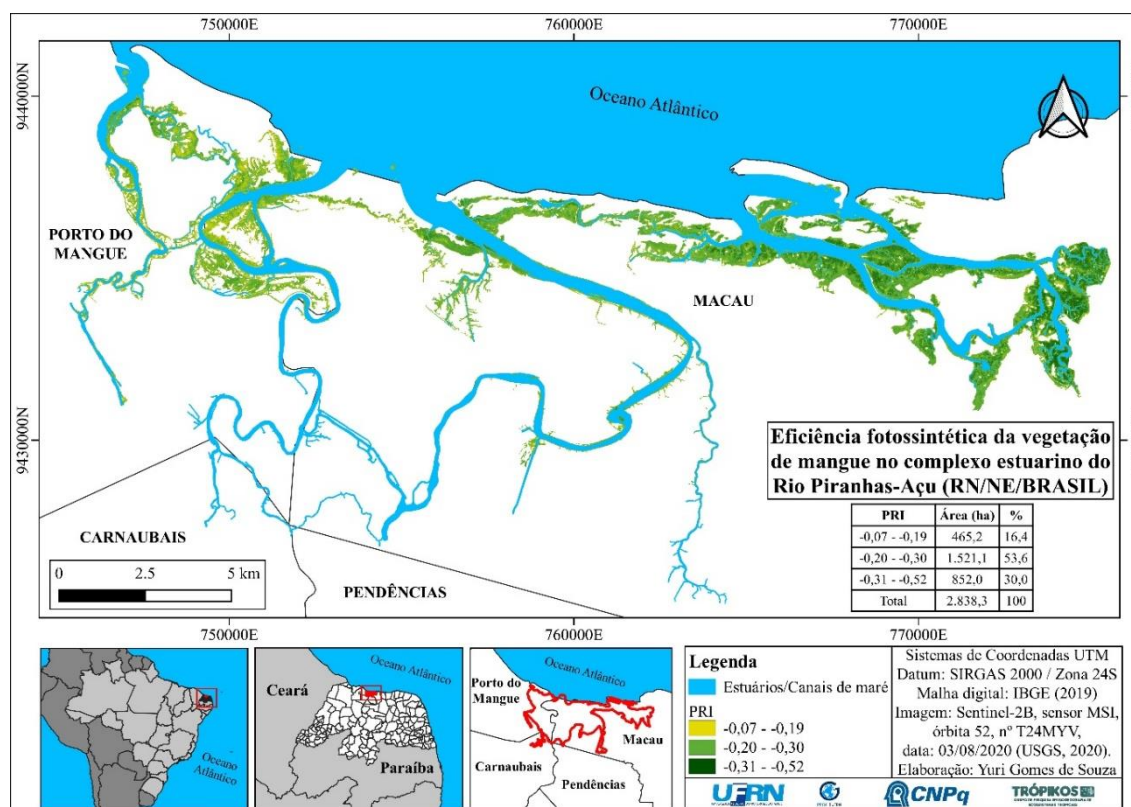
Índice	Intervalos	Área (ha)	Percentual (%)
PRI	-0,07 - -0,19	465,2	16,4
	-0,20 - -0,30	1.521,1	53,6
	-0,31 - -0,52	852,0	30,0
Total		2.838,3	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o PRI, os trechos com as menores taxas de eficiência fotossintética das plantas foram representados pela concentração dos valores próximos a -0,07, os quais indicaram a

maior presença de vegetação do tipo esparsa. Por outro lado, em relação aos adjacentes a -0,52, foi identificada uma maior eficiência fotossintética nos dosséis, cujas regiões se pautaram na maior ocorrência de bosques semidensos a densos.

Figura 04: Estimativa da eficiência fotossintética da vegetação de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu/RN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Destaca-se que os valores do PRI podem ser influenciados pela intensidade e tempo de exposição à luz, pelas altas e baixas temperaturas, salinidade, seca, estresse hídrico e nutricional, bem como do tipo da espécie estudada. Nesse caso, a saúde da planta se caracteriza como um grande indicador de estabilidade do processo fotossintético, pois o aproveitamento da radiação depende tanto do controle dos pigmentos da clorofila (folha sadia) como dos fotoprotetores das xantofilas (folha em estresse) (DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 1992; GAMON; SERRANO; SURFUS, 1997).

Em termos da salinidade, estudos desenvolvidos por Song, White e Heumann (2011) no sudeste de Ilha Isabela, nas Ilhas Galápagos, demonstram que a vegetação de mangue, quando submetidas a elevadas concentrações de solução salina, pode diminuir sua atividade fotossintética de forma significativa. Para os autores, os resultados indicaram uma correlação



negativa entre o PRI e a salinidade, especialmente por que o gradiente apresentado pelos autores esteve como um fator de estresse para as espécies estudadas, como foram os casos da *Rhizophora mangle* e da *Laguncularia racemosa*.

Os dados do PRI estão intrinsecamente ligados aos resultados do sPRI, os quais são oriundos da normalização do primeiro, isto é, readequados para valores positivos (RAHMAN et al., 2000; SILVA; BAPTISTA, 2015). Dessa forma, observou-se que os resultados do sPRI confirmou a atividade fotossintética dos indivíduos, ao apresentar a variação entre 0,22 e 0,46, com média de 0,38. A maior ocupação foi entre 0,30 e 0,38, com 1.862,6 ha (65,6%); seguido por 0,39 e 0,46, com 693,3 ha (24,5%) e 0,22 a 0,29, com 282,4 ha (9,9%) (Tabela 04).

Tabela 04: Distribuição dos valores do sPRI nos bosques de mangue.

Índice	Intervalos	Área (ha)	Percentual (%)
sPRI	0,22 - 0,29	282,4	9,9
	0,30 - 0,38	1.862,6	65,6
	0,39 - 0,46	693,3	24,5
Total		2.838,3	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na escala dos valores positivos (entre 0 e 1), o sPRI corresponde a demonstração da capacidade de realização da fotossíntese pelas plantas, de modo que, à medida em que o seu valor se eleva (próximo de 1), ocorre uma maior tendência ao aumento da fotossíntese na captação do CO₂. O inverso também ocorre, pois, quando se encontram próximo a 0, a capacidade da folha na utilização da radiação é reduzida, indicando por consequência a diminuição no sequestro de CO₂ (RAHMAN et al., 2000; SILVA; BAPTISTA, 2015).

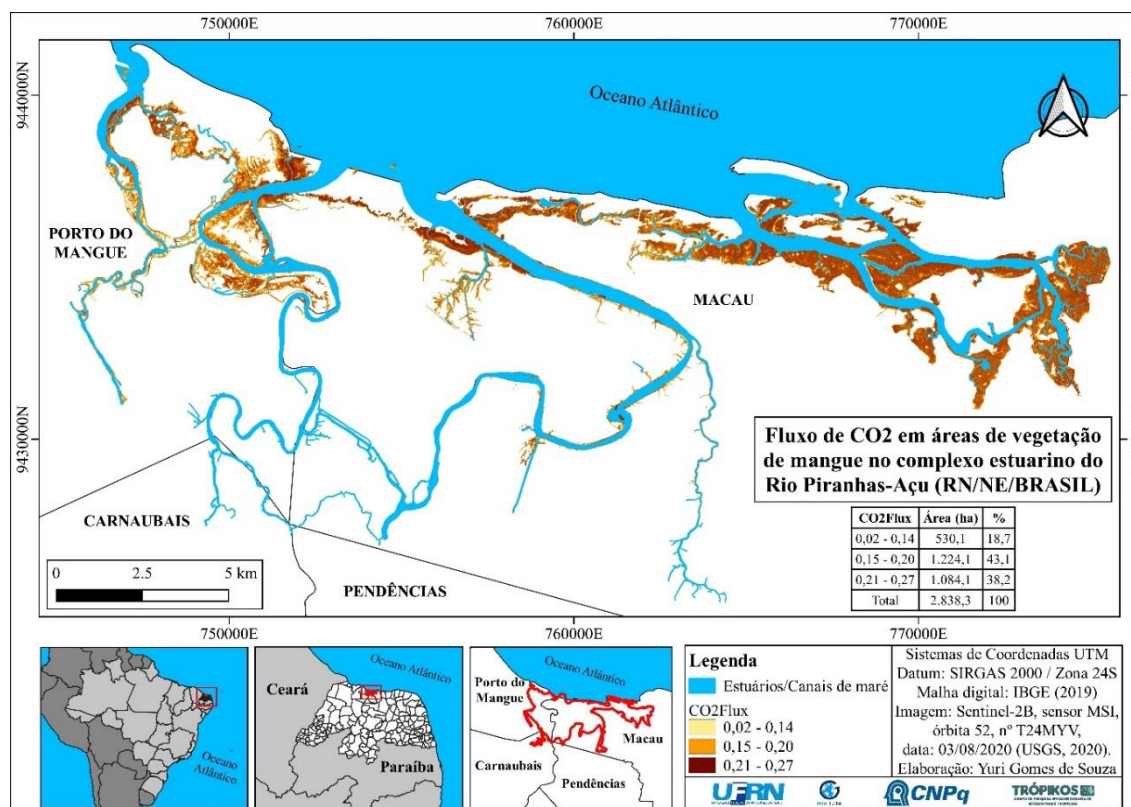
Em termos CO₂flux, o cálculo do produto entre o sPRI e o NDVI auxiliou a obtenção dessa estimativa. Verificou-se que os resultados variaram entre 0,02 e 0,27, com média de 0,18. A maior ocupação foi entre 0,15 e 0,20, com 1.224,1 ha (43,1%), seguido das variações de 0,21 e 0,27, com 1.084,1 ha (38,2%), e 0,02 e 0,14, com 530,1 ha (18,7%) (Tabela 05; Figura 05).

Tabela 05: Distribuição dos valores do CO₂flux nos bosques de mangue.

Índice	Intervalos	Área (ha)	Percentual (%)
CO ₂ Flux	0,02 - 0,14	530,1	18,7
	0,15 - 0,20	1.224,1	43,1
	0,21 - 0,27	1.084,1	38,2
Total		2.838,3	100

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 05: Estimativa do fluxo de CO₂ pela vegetação de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu/RN.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em termos dos valores próximos a 0,27 do CO₂flux, concentram-se as áreas com maior capacidade de fixação do CO₂ pelos dosséis, os quais se deram especialmente nos trechos de vegetação semidensa a densa, com alta capacidade fotossintética. Quanto às regiões de menor capacidade de captação do CO₂, essas foram as que possuíram os valores próximos a 0,02, principalmente nas regiões de dosséis do tipo esparsos.

Os estudos de Baptista (2003), em áreas do Cerrado brasileiro, ratificam que a relação entre a densidade florestal e a eficiência na captação de CO₂ pelas plantas são diretamente



proporcionais, e, por isso, sugere que a presença de dióxido de carbono na atmosfera terrestre seja inversamente proporcional.

Essa resposta é confirmada pelos estudos conduzidos por Silva e Baptista (2015), os quais, ao estudarem o potencial de fixação de CO₂ em dosséis amazônicos, verificaram que quanto maior foram os valores do CO₂flux, menor foi a concentração do CO₂ na atmosfera. Isso por que, os autores atestaram uma correlação negativa ($R^2 = -0,641$) entre as concentrações de CO₂ (ppm) em torres micrometeorológicas e os valores do CO₂flux. Nesse âmbito, pesquisas desenvolvidas por Rahman et al. (2000), na floresta boreal da região central do Canadá com o sensor AVIRIS, demonstraram uma forte correlação entre a capacidade fotossintética dos vegetais com o fluxo de CO₂ absorvido pelas plantas ($R^2 = 0,78$).

Os resultados encontrados contribuem para a discussão sobre a importância da vegetação de mangue na atenuação das mudanças climática, a partir da sua capacidade à absorção do CO₂. A conservação desse ecossistema reverbera diretamente na estabilidade tanto da fixação como do estoque do CO₂ nas estruturas florestais de mangue para as atuais e futuras gerações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao realizar o mapeamento da vegetação de mangue no complexo estuarino do Rio Piranhas-Açu, pôde-se identificar uma extensão importante de 2.838,3 ha. A partir desses fragmentos florestais, e considerando o uso de índices de vegetação, foi possível estimar os níveis de densidade florestal, de atividade fotossinteticamente ativa e também da capacidade de sequestro de CO₂ pelos bosques.

Em termos do NDVI, notou-se que a densidade dos dosséis variou entre esparso, semidenso e denso. Quanto ao PRI, foi possível observar a dominância de valores negativos, que indicou plena atividade fotossintética entre as plantas, embora com maior eficiência entre os dosséis semidensos e densos. Os resultados do sPRI ratificaram a eficiência da atividade fotossintética, principalmente nas regiões com bosques semidenso a denso. Em se tratando dos dados do CO₂flux, notou-se que as áreas com maior densidade e atividade fotossintética foram as de maior potencial ao sequestro de CO₂.

Entende-se que os índices utilizados permitiram a avaliação dos bosques de mangue, indicando desde as áreas em maior conservação (maiores densidade e atividade fotossintética) a setores com déficit de vigor (menores densidade e atividade fotossintética). Assim, percebeu-



se que os índices são ferramentas indispensáveis para guiar estudos dessa natureza e auxiliar tomadores de decisão na gestão, planejamento e conservação desses setores de manguezal.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações), pela concessão da Bolsa de Pesquisa/Mestrado (CNPq/UFRN/PPGE), e ao Grupo de Pesquisa de Biogeografia de Ecossistemas Tropicais (TRÓPIKOS), pelo apoio ao desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. **Carbon Management**, v. 3 n. 3, p. 313–322, 2012.

ADAME, M. F.; CONNOLLY, R. M.; TURSCHWELL, M. P.; LOVELOCK, C. E.; FATOYINBO, T.; LAGOMASINO, D.; GOLDBERG, L. A.; HOLDORF, J.; FRIESS, D. A.; SASMITO, S. D. Future carbon emissions from global mangrove forest loss. **Global Change Biology**, v. 27, n. 12, p. 2856-2866, 2021.

AKBAR, M R; A ARISANTO, P A; A SUKIRNO, B; MERDEKA, P H; PRIADHI, M M; ZALLESA, S. Mangrove vegetation health index analysis by implementing NDVI (normalized difference vegetation index) classification method on sentinel-2 image data case study: segara anakan, kabupaten cilacap. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 584, p. 012069, 2020.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, 2013, p. 711-728.

ARAÚJO, P. V. N.; AMARO, V. E.; AGUIAR, L. S.; LIMA, C. C.; LOPES, A. B. Tidal flood area mapping fronts the climate change scenarios: case study in a tropical estuary of Brazilian semiarid. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1-28, 2020.

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, Belo Horizonte, Brasil, 05- 10 abril de 2003. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 1037-1044, 2003.

CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Versão 5.1.0.1**. Tutorial. 2016. Disponível em: <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/_/downloads/ar/latest/pdf/> Acesso em: 01 jul. 2020.

COSTA, D. F. S.; GUEDES, D. R. C.; DE MEDEIROS ROCHA, R.; BARBOSA, J. E. L.; SOARES, A. M. V. M.; LILLEBØ, A. I. Influência de macroaspectos ambientais na produção



de sal marinho no litoral semiárido do Brasil. **Revista de Geografia (UFPE)** v. 31, n. 3, 28-42, 2014.

COSTA, D. F. S.; SILVA, D. E. M.; SOUZA, A. C. D.; SALDANHA, D. S.; BATISTA, A. I. L. Precipitação Geoquímica em Ambientes Evaporíticos/Hipersalinos – o caso das Salinas Solares do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**. v. 4, n. 1., p. 58-70, 2018.

DEMMIG-ADAMS, B; ADAMS, W. W. Photoprotection and Other Responses of Plants to High Light Stress. **Annual Review Of Plant Physiology And Plant Molecular Biology**, v. 43, n. 1, p. 599-626, 1992.

DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, H. C. V. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia (Online)**, v. 35, p. 488-506, 2015.

HAMILTON, S. E.; CASEY, D. Creation of a global high-resolution spatiotemporal database of continuous mangrove coverage for the 21st century (CGMFC-21). **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 6, p. 729-738, 2016.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de imagens: Cbers 4A**; INPE, 2020. Disponível em: < <http://www2.dgi.inpe.br/catalogo/explore> > Acesso em: 1 de fev. 2021.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.). Genebra, Suíça: Working Group / Technical Support Unit, 2018.

GAMON, J. A.; KOVALCHUCK, O.; WONG, C. Y. S.; HARRIS, A.; GARRITY, S. R. Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. **Biogeosciences**, v. 12, p. 4149–4159, 2015.

GAMON, J. A.; PENUELAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**, v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992.

GAMON, J. A.; SERRANO, L.; SURFUS, J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v. 112, n. 4, p. 492-501, 1997.

HAMILTON, S. E.; CASEY, D. Creation of a global high-resolution spatiotemporal database of continuous mangrove coverage for the 21st century (CGMFC-21). **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 6, p. 729-738, 2016.

HUETE, A. R. Vegetation Indices, Remote Sensing and Forest Monitoring. **Geography Compass**, v. 6, n. 9, p. 513–532, 2012.



IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Regiões Geográficas Estado do Rio Grande do Norte**. 2016. Disponível em: <geoftp.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 jun. 2020.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, p. 251-397, 2009.

KUENZER, C.; BLUEMEL, A.; GEBHARDT, S.; QUOC, T. V.; DECH, S. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. **Remote Sensing**, v. 3, n. 5, p. 878–928, 2011.

PANIZZA, A. C.; FONSECA, F. P. Técnicas de Interpretação Visual de Imagens. **Revista da GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 30, p. 30-43, 2011.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. São Paulo: Parêntese Editora, 2010, 119 p.

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**. Pasadena, Califórnia: AVIRIS Workshop, JPL/NASA, p. 1-8, 2000.

REVOLLO, N. V.; SARMIENTO, G. N. R.; CISNEROS, M. A. H.; DELRIEUX, C. A.; PICCOLO, M. C. Assessing the Evolution in Remotely Sensed Vegetation Index Using Image Processing Techniques. **Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj**, v. 42, n. 3, p. 27-41, 2019.

REZENDE, P. S.; MARQUES, V. D.; ROSA, R. Uso de dados do Sentinel-2 para cálculo de NDVI com base nos valores da refletância aparente e de superfície. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 28-31, 05, 2017, **Anais...** Santos/SP: INPE, p. 1-8, 2017.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, 1973, 63 p.

SAINTILAN, N.; KHAN, N. S.; ASHE, E.; KELLEWAY, J. J.; ROGERS, K.; WOODROFFE, C. D.; HORTON, B. P. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. **Science**, v. 368, n. 6495, p. 1118–1121, 2020.

SALDANHA, D. S. **Avaliação dos Serviços Ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas costeiras da zona estuarina no Rio Piranhas-Açu (RN/NE – Brasil)**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Geografia, Geografia, UFRN, Natal, 2020, 140 p.

SILVA, S. C. P.; BAPTISTA, G. M. M. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de co₂ em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 21, n. 2, p.354-370, 2015.

SONG, C.; WHITE, B. L.; HEUMANN, B. W. Hyperspectral remote sensing of salinity stress on red (*Rhizophora mangle*) and white (*Laguncularia racemosa*) mangroves on Galapagos Islands. **Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 3, p. 221–230, 2011.



SPALDING, M., KAINUMA, M. E COLLINS, L. **Mangrove World Atlas**. ITTO, ISME, FAO, PNUMA-WCMC, UNESCO-MAB e UNU-INWEH. London, Washington: Earthscan Publishers Ltd. Londres, p 47-57, 2010.

TRAN, L. X.; FISCHER, A. Spatio-temporal changes and fragmentation of mangroves and their effects on fish diversity in the province of Ca Mau (Vietnam). **Coastal Conservation Journal**, v. 21 n. 3, p. 355-368, 2017.

UMROH; ADI, W.; SARI, S. P. Detection of mangrove distribution on Pong Island. **Procedia Environmental Sciences**, v. 33, p. 253-257, 2016.

YIN, D.; LI, X.; HUANG, Y.; SI, Y.; BAI, R. Identifying Vegetation Dynamics and Sensitivities in Response to Water Resources Management in the Heihe River Basin in China. **Advances In Meteorology**, v. 2015, p. 1-12, 2015.