

ESTUDO ESPAÇO-TEMPORAL COMPARATIVO DA RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO DA APA DO ESTUÁRIO DO RIO CURU E ENTORNO COM USO DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

COMPARATIVE SPACE-TEMPORAL STUDY OF THE SPECTRAL RESPONSE OF THE VEGETATION OF THE APA OF THE CURU RIVER ESTUARY AND SURROUDINGS USING MULTIESPECTRATIVE IMAGES

ESTUDIO ESPACIO-TEMPORAL COMPARATIVO DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE LA VEGETACIÓN DEL APA DEL ESTERO DEL RÍO CURU Y ALREDEDORES UTILIZANDO IMÁGENES MULTIESPECTRATIVAS

<https://doi.org/10.26895/geosaberes.v14i0.1318>

JORGEANA DE ALMEIDA JORGE BENEVIDES ^{1*}

ANDERSON DA CRUZ SILVA ²

DANIEL JORGE ALMEIDA BENEVIDES ³

LUIS ERNESTO ARRUDA BEZERRA ⁴

¹ Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará (UFC), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará, Av. Abolição 3207, CEP: 60165-081, Fortaleza (CE), Brasil, Tel.: (+55 85) 3366-7000, jorgeana.benevides@ifce.edu.br, <http://orcid.org/0000-0003-0997-8331>

*Autor correspondente

² Mestre em Geografia, Universidade Estadual do Ceará (UECE), *campus* Itaperi, CEP: 60714-903, Fortaleza (CE), Brasil, Tel.: (+55 85) 3101-9601, cruz.silva1326@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6690-8199>

³ Bacharel em Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, *campus* Sobral, CEP: 62010-560, Sobral (CE), Brasil, Tel.: (+55 88) 3695-4601, danieljorge17@hotmail.com, <http://orcid.org/0009-0009-2701-123X>

⁴ Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará, Av. Abolição 3207, CEP: 60165-081, Fortaleza (CE), Brasil, Tel.: (+55 85) 3366-7000, luis.ernesto@ufc.br, <http://orcid.org/0000-0003-1544-7297>

Histórico do Artigo:

Recebido em 27 de Abril de 2023.

Aceito em 03 de Outubro de 2023.

Publicado em 10 de Outubro de 2023.

RESUMO

A necessidade de equilibrar a preservação das zonas costeiras, não obstante a promoção de seu desenvolvimento, é um entendimento emergente. O uso do Sensoriamento Remoto vem se consolidando no acompanhamento das condições e alterações de áreas costeiras. Deste modo, avaliou-se o comportamento da atividade da vegetação de uma área estuarina e seu entorno próximo por meio da análise multitemporal de imagens Landsat entre os anos 2000 a 2020 baseando-se em três índices de vegetação: NDVI, SAVI e IAF. Conclui-se que a flora passou por mudanças expressivas quanto a distribuição, a densidade e a saúde em duas décadas. A complementariedade nas respostas observadas pelos índices e os dados de campo se apresentaram como uma eficiente ferramenta de avaliação das condições da flora frente aos principais impactos ambientais na área, de modo a ser aplicado no planejamento e gestão costeira local.

Palavras-chave: NDVI. SAVI. IAF. Landsat. Zona Costeira.

ABSTRACT

The need to balance the preservation of coastal zones, notwithstanding the promotion of their development, is an emerging understanding. The use of Remote Sensing has been consolidated in the monitoring of conditions and changes in

coastal areas. Thus, the behavior of the vegetation activity of an estuarine area and its immediate surroundings was evaluated through the multitemporal analysis of Landsat images between the years 2000 to 2020 based on three vegetation indices: NDVI, SAVI and IAF. It is concluded that the flora underwent significant changes in terms of distribution, density and health in two decades. The complementarity in the responses observed by the Indexes and the field data proved to be an efficient tool for assessing the conditions of the flora in the face of the main environmental impacts in the area, in order to be applied in local coastal planning and management.

Keywords: NDVI. SAVI. LAI. Landsat. Coastal Zone.

RESUMEN

La necesidad de equilibrar la preservación de las zonas costeras, sin perjuicio de la promoción de su desarrollo, es una comprensión emergente. El uso de la Teledetección se ha consolidado en el seguimiento de condiciones y cambios en las zonas costeras. Así, se evaluó el comportamiento de la actividad vegetal de un área estuarina y su entorno inmediato mediante el análisis multitemporal de imágenes Landsat entre los años 2000 a 2020 en base a tres índices de vegetación: NDVI, SAVI e IAF. Se concluye que la flora sufrió cambios significativos en cuanto a distribución, densidad y sanidad en dos décadas. La complementariedad en las respuestas observadas por los índices y los datos de campo demostraron ser una herramienta eficiente para evaluar las condiciones de la flora ante los principales impactos ambientales en el área, para ser aplicada en la planificación y gestión costera local.

Palabras clave: NDVI. SAVI. FAI. Landsat. Zona Costera.

INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará possui 626,89 km de área de costa (SEMA, 2021), onde podem ser encontrados 22 estuários (MAIA *et al.*, 2006) e seis deles, inclusive o da APA do Estuário do Rio Curu, na divisa dos municípios de Paracuru/Paraipaba, estão sob o aparo legal do Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), Lei Nº 9985/2000 (BRASIL, 2000).

Embora a conservação e a restauração de ecossistemas úmidos tenham se tornado uma das prioridades das políticas públicas ambientais em diversos países (Convenção de Washington – 1940; Convenção de Zonas Úmidas - RAMSAR - 1971, Convenção da Biodiversidade – 1992; Declaração do Rio – 1992; Metas de Aichi – 2010; PAN Manguezal – 2015; Portaria MMA Nº 463/2018), os atores envolvidos nesse processo têm esbarrado no limitado conhecimento sobre quais são, de fato, os fatores que mais afetam o funcionamento e intensificam a degradação destas áreas.

A interface terra-mar paracuruense perfaz 17 km desse litoral, onde podem ser encontradas riquezas naturais como recifes de arenito, dunas, praias e uma área estuarina na sua porção mais a oeste, onde se encontra um dos ecossistemas mais produtivos e vulneráveis do planeta, o manguezal (MMA, 2010). O Complexo Vegetacional de Zona Litorânea, com ocorrência de Manguezal e a Floresta Mista Dicótilo-palmácea são predominantes na área (ROCHA *et al.*, 2020).

Paracuru se destaca entre os municípios cearenses por apresentar a sede urbana defronte para o mar. Uma das várias implicações disso é a maior pressão sobre os diferentes ambientes presentes no seu território. Portanto, atividades e ocupações irregulares não são raras e até já se contam com registros e notificações do poder público pelo fato de serem desenvolvidas dentro de Unidades de Conservação - UC (*e.g.* Área de Proteção Ambiental – APA) e faixa praial. Rocha *et al.*, (2020) destacam como exemplo a instalação de tanques de carcinicultura sem licença ambiental.

Por conta da diversidade natural, observam-se distintas unidades ambientais ao longo do curso do Rio Curu. Mesmo sendo de pequeno porte, Paracuru, que está inserido na microrregião do Baixo Curu, apresenta importância econômica dada a sua proximidade à capital cearense (70 km), como também pelo potencial para o desenvolvimento de projetos de irrigação. Contudo, os investimentos em saneamento básico não acompanharam o desenvolvimento econômico e de urbanização da região e vem ao longo dos anos

comprometendo a qualidade das águas e a saúde das comunidades (GORAYEB *et al.*, 2006; ROCHA *et al.*, 2020).

Os diversos usuários comprometem a dinâmica natural alterando desta forma as condições do ambiente, refletindo numa série de conflitos das mais diversas ordens (ambiental, social, econômica) com amplitudes variadas. Como produto dessa exploração, tem-se observado problemas sérios relacionados a degradação desse ambiente (ANJOS, 2015). Áreas sensíveis como essa, carecem de métodos de investigação mais rápidos e precisos como os realizados por Sensoriamento Remoto.

A aplicação do Sensoriamento Remoto (SR) no monitoramento nos estudos ambientais tem ganhado força nos últimos anos. Dentre as técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI), o uso de Índices de Vegetação por SR é bastante utilizado nos estudos da flora (GLENN *et al.*, 2008) já que eles podem destacar a presença de uma determinada vegetação, bem como as respostas das mesmas às condições ambientais impostas (SINGGALEN, 2022). Podem, ainda, expressar como está a saúde da vegetação, valendo-se de dados espectrais multi-banda (em geral os da faixa do Vermelho – RED e do infravermelho próximo – NIR) (ALATORRE *et al.*, 2016).

A aplicabilidade destes Índices se dá pela estreita correlação entre a absorção da energia luminosa pela assembleia de plantas e a sua produtividade primária que repercute na robustez dessa comunidade (FONTANA *et al.*, 1998). Antunes *et al.*, (1993), Jensen (2009) e Viganó (2011) ressaltam que as medidas expressas pelos índices de vegetação apresentam, geralmente, uma relação direta com parâmetros como área foliar, biomassa, cobertura do solo e vigor da floresta.

Desde 1980, o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um dos índices de vegetação mais utilizados devido as suas inúmeras aplicabilidades e eficácia (SWANSON, 2021). Algumas das aplicações desse índice são as pesquisas de monitoramento de curto e longo prazo envolvendo a classificação e quantificação das diferenças no uso do solo, estimativas de biomassa e cobertura do dossel para levantamento de dados de densidade, da folhagem, do vigor, da fenologia, quanto da distribuição das vegetações paludosas em áreas costeiras e ilhas (CHAMBERLAIN; PHINN; POSSINGHAM, 2021; GLENN; TABB, 2019; GUHA; GOVIL; GILL, 2018; WEI *et al.*, 2020).

Em conjunto com o NDVI, utilizou-se o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) para auxiliar na interpretação dos resultados a respeito das condições da vegetação, uma vez que esse índice usa um fator de ajuste dependendo da cobertura do solo. Portanto, o SAVI acaba sendo mais utilizado em áreas onde a vegetação é mais esparsa e o solo mais visto através do dossel (SINGGALEN, 2022), características estas também encontradas na área de interesse. Vários estudos têm conciliado, com ótimos resultados, o uso desses dois índices para monitorar a distribuição, a saúde e a densidade da vegetação (KAWAMUNA; SUPRAYOGI; WIJAYA, 2017; SINAGA; SUPRAYOGI; HANIAH, 2018; RUZA; CORTE; PRUNZEL; 2019; ALJAHDALI; MUNAWAR; KHAN, 2021; SINGGALEN, 2022).

Já o IAF (Índice de Área Foliar) é utilizado para expressar a quantidade de área foliar do dossel por metro quadrado de solo, levando-se em conta apenas uma das faces da folha. Os valores oscilam dependendo de fatores externos como competição intra e inter-específica, precipitação, umidade, temperatura, etc, quanto aqueles típicos da arquitetura da planta (GAMEIRO *et al.*, 2016; CAVALCANTI-SILVA *et al.*, 2018). Deste modo, o IAF é expresso em resposta a características tanto ambientais quanto morfo-genéticas típicas de cada vegetação (CAVALCANTI-SILVA *et al.*, 2018). O IAF pode aumentar nos estágios iniciais do crescimento vegetal e declinar em virtude da senescência da folha (OLIVEIRA; RAKOCEVIC, 2003).

Diante do exposto, esta pesquisa objetivou compreender as mudanças na cobertura vegetal do estuário do Rio Curu em resposta às atividades antrópicas utilizando técnicas de

Sensoriamento Remoto entre os anos de 2000 a 2020 e avaliar variações na distribuição espacial, na densidade e estado da saúde desta flora usando imagens Landsat e técnicas de geoprocessamento. Pelo fato do mangue do estuário do Rio Curu apresentar uma distribuição complexa, dificultando assim a sua distinção, optou-se nesta pesquisa por avaliar a vegetação estuarina como um todo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

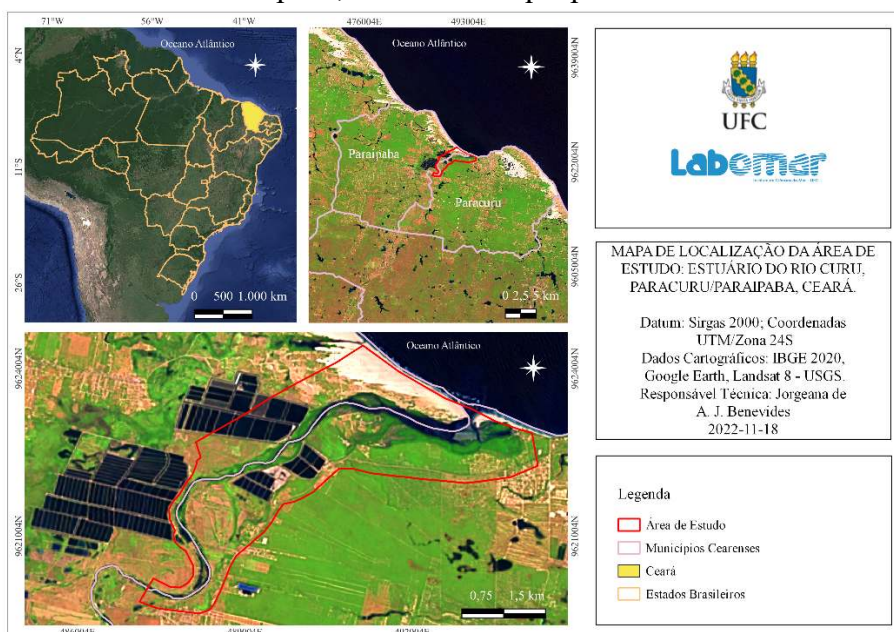
Dentro do perímetro da área de estudo se encontra uma das Unidades de Conservação de Uso Sustentável (APA do Estuário do Rio Curu) cearense.

Este perímetro está inserido na unidade geoambiental predominante em Paracuru, o tabuleiro pré-litorâneo, e numa pequena faixa de praia, onde foram realizadas cinco campanhas de campo para a delimitação deste. Observou-se, portanto, o limite de influência marinha através da presença de mangue. Logo, foi considerada esta variável como elemento limitante para se delimitar o trecho de interesse, perfazendo então um perímetro de 20,05 km e 12,44 km², aproximadamente, de área total.

Apresenta temperatura média anual de 26,3°C, com máxima de 35°C e mínima de 18°C e sujeita aos efeitos das flutuações nas taxas de chuva do semiárido e aos baixos índices de balanços hídricos ao longo do ano (BRASIL, 2010; ANJOS, 2015). Contudo, por influência da maritimidade, a intensidade e os índices de precipitação podem ser maiores do que a média do Estado (800 mm) – 1200 mm anuais (CAITANO *et al.*, 2011).

Esta área é caracterizada por apresentar baixas cotas altimétricas, um sistema estuarino sob a influência de perímetros irrigados, barragens ao longo do rio e carcinicultura nos limites do estuário (Figura 1).

Figura 1 – Visão geral da área de amostragem localizada na divisa dos municípios de Paracuru e Paraipaba, Ceará. Destaque para a área de estudo.



Fonte: Benevides (2022).

A diversidade da paisagem da APA, que é composta por uma porção estuarina, envolta por terraços marinhos e glaciais de acumulação advindos da Formação Barreiras, possibilitou o

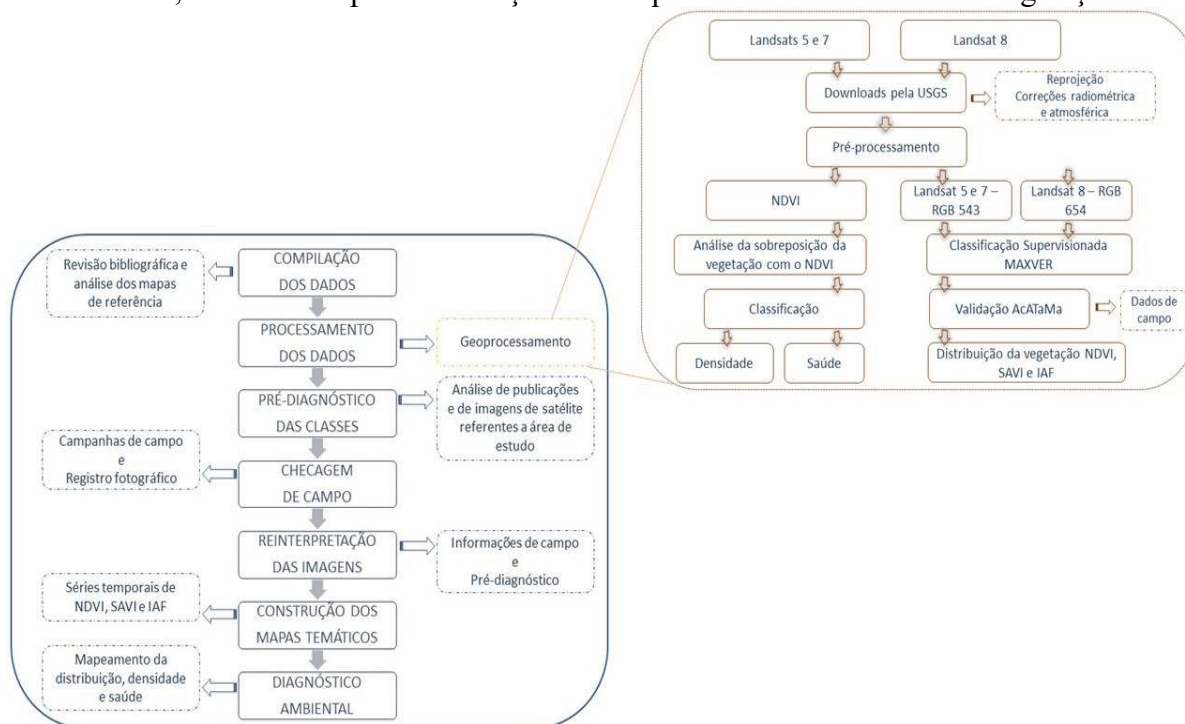
estabelecimento de diferentes fitofisnomias como as de campo praiano e praia com vegetação incipiente, floresta/arbustal de tabuleiro, carnaubal e mapa ciliar bordejando alguns trechos do Rio Curu, mangue e apicum (ROCHA, 2020; GREENTEC, 2021).

Base de dados, pré-processamento e Índices de Vegetação

Os mapeamentos realizados neste estudo foram baseados nos produtos do programa Landsat 5 (sensor *Thematic Mapper* - TM), Landsat 7 (sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* - ETM+) e 8 (sensor *Operational Land Imager* - OLI). Para se analisar o comportamento espectral das imagens orbitais foram realizados os *downloads* das imagens orbitais obtidas gratuitamente do site Earth Explorer da USGS (*United States Geological Survey*) da coleção dois, nível 2. Foram utilizadas quatro imagens dos satélites Landsat 7 ETM+ (2000-06-03), Landsat 5 (2007-10-05) e Landsat 8 OLI (2014-06-18 e 2020-09-06) para levantamento destes dados. As imagens dos anos 2000 e 2014 registram dados do final período chuvoso na região. Já as dos anos 2007 e 2021 são registros do período seco. As composições RGB da figura 5 para os anos 2000 e 2001 foram “cor natural”. Já para o ano 2020 foi usada a “falsa cor análise de vegetação”. Para o ano 1969 foi utilizada a composição RGB com as bandas 123.

A figura 2 abaixo apresenta um fluxograma das etapas seguidas neste estudo para elaboração dos produtos a partir do SR e técnicas de geoprocessamento.

Figura 2 – Resumo metodológico do processamento de dados usando os Índices de Vegetação NDVI, SAVI e IAF para construção dos mapas temáticos e análise da vegetação.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

Nesse estudo foi realizada a classificação digital supervisionada aplicando o algoritmo classificador de Distância Mínima e Máxima Verossimilhança (MAXVER). Já para avaliar a qualidade da classificação das imagens Landsat 5, 7 e 8, assim também a precisão dos mapas gerados, foi utilizado no pós-processamento o complemento AcAtaMa. No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados três índices de vegetação. O NDVI proposto por Rouse *et al.*, (1973) foi computado através da razão entre a diferença da reflectância das bandas do

infravermelho próximo (ρIV) e do vermelho (ρV) e pela soma destas reflectividades (Equação 1). Ele aponta as condições da vegetação em relação a quantidade e a condição desta: $NDVI = (\rho IV - \rho V) / (\rho IV + \rho V)$.

Outro índice utilizado foi o SAVI que objetiva minimizar os efeitos do “background”, do solo exposto nas imagens analisadas, com base na equação 2: $SAVI = (1 + L) * (\rho IV - \rho V) / L + \rho IV + \rho V$. O fator de ajuste ao solo (L) utilizado foi 0,5.

O Índice de Área Foliar (IAF) também foi avaliado. Essa variável biofísica é calculada através da razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área onde esta vegetação está estabelecida. Ele é um indicador de biomassa obtido de cada pixel da imagem a partir da seguinte equação (3) proposta por Allen *et al.*, (2002): $IAF = - \ln (0,69 - SAVI/0,59) / 0,91$.

Mapeamento da distribuição, densidade e saúde da vegetação

Para mapear a distribuição das classes de interesse (Tabela 1), densidade e saúde (Tabela 2) presentes na vegetação do estuário e entorno do Rio Curu tomou-se como base o proposto por Lamchin *et al.*, (2016), Singgalen *et al.*, (2021) e Silva (2022) referentes a distribuição e densidade.

Tabela 1 - Distribuição das classes de vegetação nos anos 2000, 2007, 2014 e 2020 na APA e entorno do Estuário do Rio Curu com base no NDVI, SAVI e IAF.

Classes/ Tipologia	NDVI	SAVI	IAF - Intervalos				Características
			2000	2007	2014	2020	
1/Corpos hídricos	≤ 0	$\geq -1,0$ - 0	$\leq 0,17$	$\leq -0,07$	$\leq -0,03$	$\leq -0,01$	Corpos d'água, tanques de carcinicultura
2/Área não vegetada	0.1 - 0.15	0.1 - 0.15	0,17 – 0,74	-0,07 – 0,11	-0,03 – 0,48	-0,01 – 0,41	Solos expostos, apicum, praia
3/Vegetação muito esparsa	0.16 - 0.30	0.16 - 0.25	0,74 – 1,09	0,11 – 0,31	0,48 – 0,97	0,41 – 0,67	Subarbustiva, arbustiva muito rala. Transição entre solo exposto e vegetação. Pastagens, cultivos recentes. Núcleos urbanos.
4/ Vegetação esparsa	0.31 - 0.45	0.26 - 0.35	1,09 – 1,46	$>0,31$	0,97 – 1,40	0,67 – 1,08	Arbustiva densa a subarbórea. Culturas em estágio de crescimento e vegetação de pequeno porte.
5/ Vegetação média	0.46 - 0.60	0.36 - 0.45	1,46 – 1,87	-	1,40 – 1,95	$>1,08$	Arbustiva densa a arbórea rala. Flora razoavelmente bem desenvolvida ou bem desenvolvida com espaçamento. Carnaubal.
6/ Vegetação densa à muito densa	> 0.60	0.46 – 1,00	$> 1,87$	-	$>1,95$	$>1,08$	Arbórea média a densa. Vegetação de mangue ou vegetação bem desenvolvida.

Fonte: Adaptado de Lamchin *et al.* (2016) e Silva (2022).

Devido as peculiaridades da área de estudo, algumas adaptações foram realizadas, especialmente nas características de cada classe que foram categorizadas de acordo com a realidade local. Optou-se por se utilizar dos índices NDVI, SAVI E IAF no mapeamento da distribuição. No entanto, para fins da avaliação da densidade, optou-se por usar apenas o NDVI. Os valores de NDVI gerados serviram de base para avaliação da saúde da vegetação como proposto por Vito (2009) e adaptado, como visto na tabela 2.

Tabela 2– Valores de referência para fins de cálculo da densidade (critérios de cobertura) da vegetação e para saúde da vegetação da APA e entorno do estuário do Rio Curu nos anos 2000, 2007, 2014 e 2020.

Critério	Cobertura %	NDVI	Saúde da Vegetação	NDVI
Denso	≤ 75%	0.42 < - ≤ 1.0	Muito boa	0.73 – 1
Moderado	≤ 50% - < 75%	0.32 < - ≤ 0.42	Boa	0.43 – 0.72
Raro	< 50%	0.16 < - ≤ 0.32	Normal	0.23 – 0.42
Ausente	-	-1 ≤ - ≤ 0.16	Pobre	0.13 – 0.22
-	-	-	Muito pobre	- 1.0 – 0.12

Fonte: Adaptado de Singgalen *et al.*, (2021) e de Vito (2009).

Como resultado final da classificação do NDVI foram gerados mapas mostrando os valores entre -1.0 e 1.0 que implicam numa vegetação saudável a não saudável entre os anos de amostragem.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mapeamento da distribuição da vegetação do estuário do Rio Curu

O recorte da vegetação deste estudo está inserido no bioma Caatinga na zona de influência do sinuoso estuário do Rio Curu, o qual faz parte de uma Área de Proteção Ambiental há mais de 20 anos. As comunidades de Santa Rita, Trapiá, Torrões, Crôa dos Pinhões, Curuzinho e Capim-Açu estão inseridas nos limites da APA e usufruem diretamente dos seus recursos naturais (ARRUDA, 2013). A gestão ambiental costeira é compartilhada entre o Estado (SEMA – Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Mudança do Clima) e o município (Secretaria de Cultura, Turismo e Meio Ambiente), que é o órgão licenciador e fiscalizador, exceto das Unidades de Conservação (UC) que recai a responsabilidade sobre a SEMACE (ROCHA *et al.*, 2020).

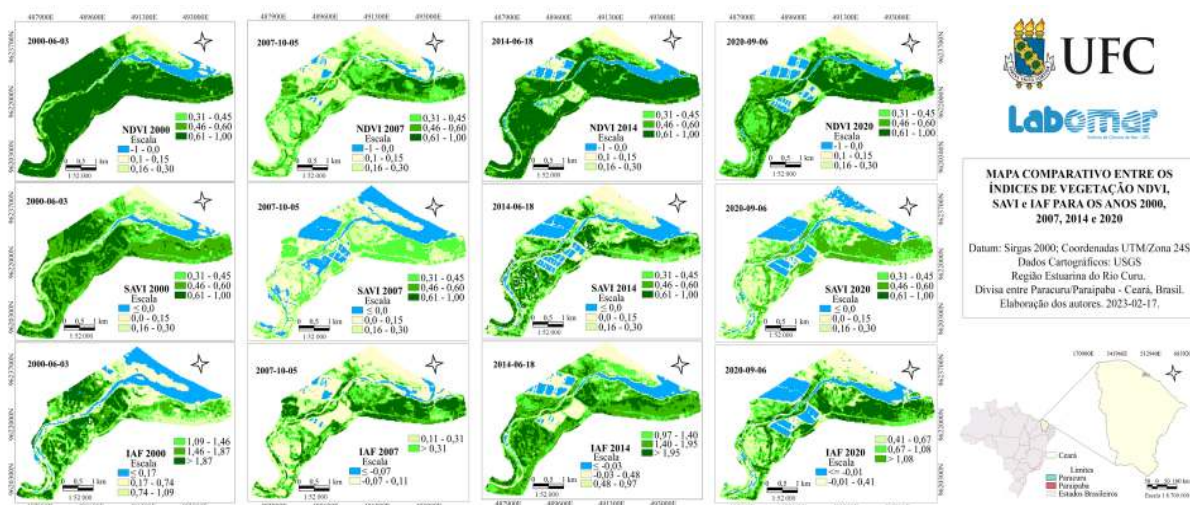
Esta UC busca resistir aos tensores antrópicos que disputam com a biota residente os espaços e recursos oferecidos nesse ambiente. A paisagem abriga um ecossistema de Manguezal, ecológica e economicamente importante no desenvolvimento de atividades baseadas na mariscagem, no turismo e na pesca.

Em trabalho recentemente publicado relativo à flora local foram registradas 129 espécies de 46 famílias (GREENTEC, 2021). Destas, 70% eram típicas da floresta/arbustal de tabuleiro, classificada por Mendes (2016) como Vegetação Subcaducifólia de Tabuleiro, por perderem suas folhas no período de estiagem, onde a presença do cajueiro é marcante. Essa fitofisionomia apresenta espécies associadas aos biomas da Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica e está fortemente degradada na área (MENDES, 2016; GREENTEC, 2021) em substituição à vegetação natural, predominam então espécies secundárias (NETO *et al.*, 2013) com exploração intensa da agropecuária e da aquicultura. Um dos alertas deste estudo foi a constatação de alterações expressivas na Mata ciliar e no Carnaubal por conta das pressões antrópicas (GREENTEC, 2021). Um importante produto do extrativismo na região, a *Copernicia prunifera* (carnaúba), foi observada com mais predomínio (GREENTEC, 2021) e os Índices de Vegetação auxiliaram no mapeamento desta supressão vegetal como um todo.

A vegetação predominante por esse índice foi a “vegetação densa à muito densa”. Isso pode ser percebido pela extensão significativa de cobertura entre a escala 0,61 e 1,0 no ano 2000 (Figura 3 - 2000).

As áreas de Apicum e do Salgado não ficaram bem diferenciadas pelo NDVI já que este saturou bem essas feições uniformizando a resposta. Entretanto, Liang (2004) explica que o NDVI é uma ferramenta interessante nos estudos de superfície, mas que responde de modo diferenciado dependendo das características do dossel. Assim, se as copas forem muito densas ou apresentarem espaçamentos, as propriedades do solo poderão influenciar no produto do NDVI. Contudo, se o dossel for muito denso, a reflectância no vermelho não será tão alterada, diferentemente do NIR, que continua a aumentar, o que irá saturar este índice.

Figura 3 – Tendência espacial de distribuição dos Índices de Vegetação para os anos 2000, 2007, 2014 e 2020 para as seis classes categorizadas na APA do Estuário do Rio Curu e entorno.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

As espécies presentes sobre a Planície fluvial e flúvio-marinha foram captadas e apresentaram valores que variaram entre 0,31 a 0,94 exibindo assim vegetações das classes 3, 4, 5 e 6 (Tabela 1).

No ano 2000 (Figura 3 - 2000), os núcleos urbanos e a intervenção antrópica direta eram bem pontuais e, aparentemente, seu impacto não comprometia a resiliência da biota residente. As tipologias “vegetação muito esparsa” e “vegetação esparsa” apresentaram seus menores resultados nestas duas décadas avaliadas. O mesmo se deu em relação ao “solo exposto”.

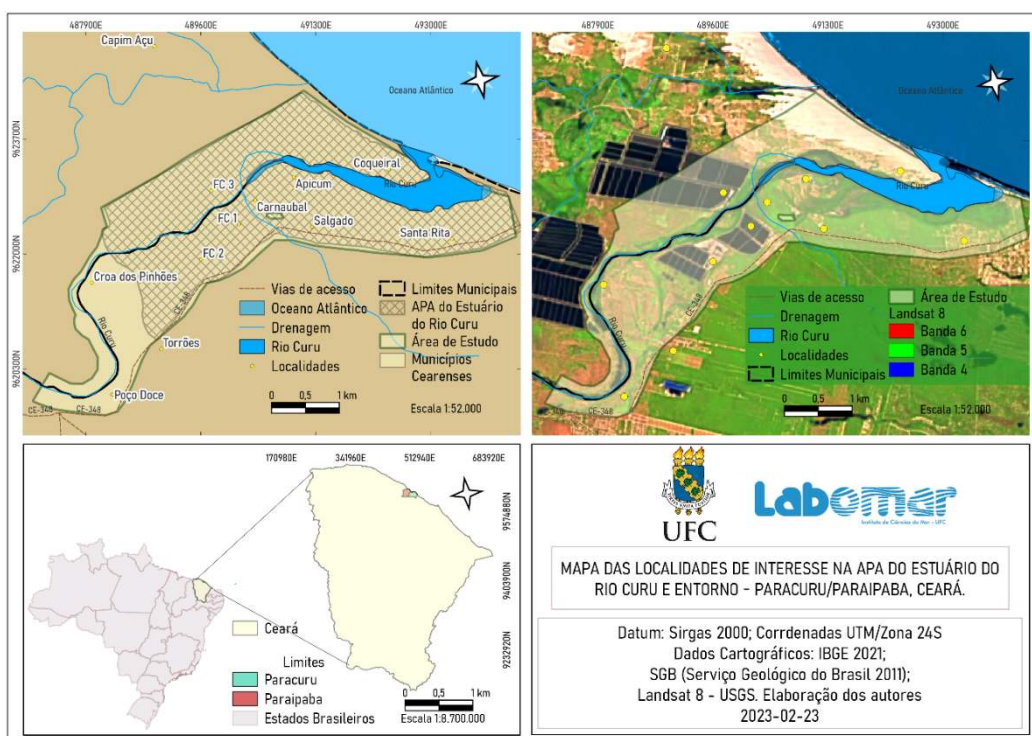
Pelo SAVI, os realces no ano 2000 entre os tipos de cobertura saturaram menos que o NDVI para essa mesma cena, o que aproximou mais os resultados da realidade de campo e dos dados bibliográficos levantados (GORAYEB *et al.*, 2005). É interessante que estudos que se utilizem de produtos do SR agreguem levantamentos bibliográficos e documentais sobre a região, além de se realizar um bom trabalho de campo a fim de se abster de regras genéricas e extrapolações. As classes 5 e 6 predominaram de acordo com o SAVI, diferentemente do apresentado pelo NDVI que classificou praticamente quase toda a área na classe 6 (vegetação densa). Esta tipologia ficou mais presente nas áreas a noroeste da localidade do Salgado.

Como o IAF, em termos biofísicos, dá mais uma noção estrutural da vegetação, por este índice, percebe-se o quanto fisicamente uma área vegetada é diferente da outra. Uma resposta complementar ao oferecido pelo NDVI que é um indicador do *green up*, verdor, tendo forte correlação com a biomassa verde, que em termos fisiológicos refere-se ao grau de atividade fotossintética e crescimento vegetal. Assim, acaba sendo bem interessante em

estudos de comunidades já que eles apresentam esta complementariedade na leitura do ambiente.

Portanto, pelos resultados apresentados, para o ano 2000, tem-se que a vegetação mais densa e de porte mais elevado estava distribuída, principalmente, sobre o Tabuleiro Pré-litorâneo, onde em poucos anos foi suprimida para a instalação de áreas de cultivos agropecuário (GORAYEB *et al.*, 2005). As áreas de Apicum e Salgado (Figura 4) ficaram mais evidentes do que com o NDVI e SAVI. Já as vegetações de pós praia e dunas fixas no território da Paraipaba não foram bem representadas no mapeamento. A tipologia “corpo hídrico” também não foi bem dimensionada, pois sua área foi superestimada por este índice.

Figura 4 - Mapa das localidades de interesse na APA do Estuário do Rio Curu e entorno, Paracuru e Paraipaba, Ceará, Brasil.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

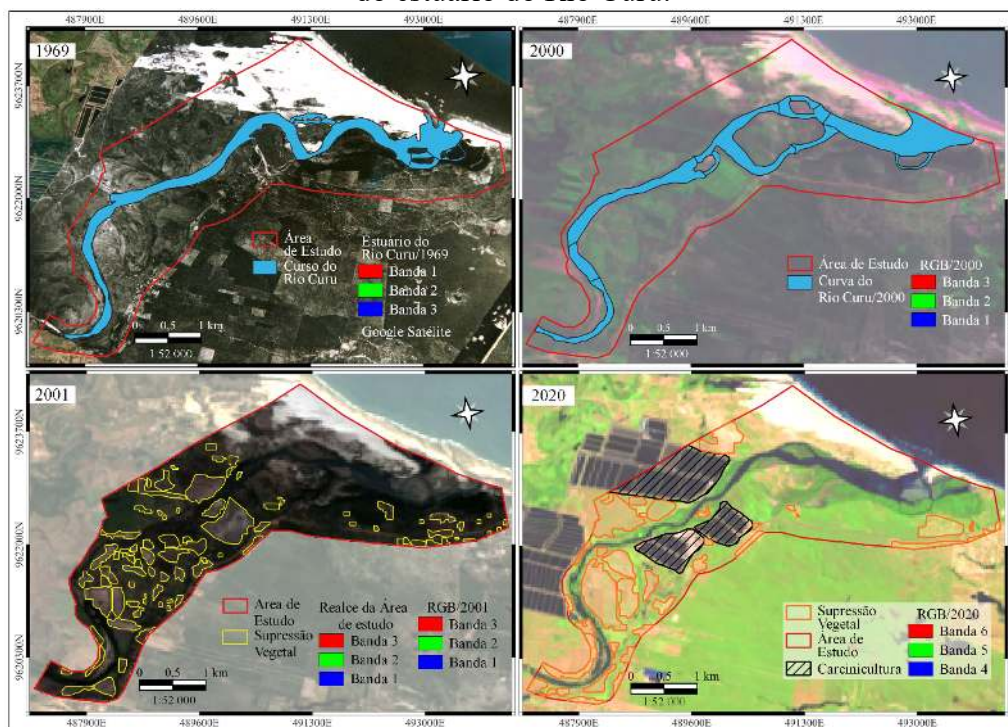
No ano 2007, o imageamento se deu no período seco na região. Pelo NDVI, as tipologias “vegetação muito esparsa” e “vegetação esparsa”, predominaram na paisagem. A supressão acentuada de grandes áreas vegetadas foi evidente. A “vegetação densa” reduziu-se a uma área mais próxima à foz do rio. O mangue apresentou valores, em sua maioria, acima de 0,61 (Figura 3 - 2007).

Uma expressiva área na comunidade Santa Rita que no ano 2000 exibia valores em torno de 0,61 a 1, está em 2007 classificada como “vegetação esparsa” com índice NDVI entre 0,31 e 0,45, expressando um déficit significativo no vigor desta vegetação. Outra área de destaque de perda do *green up* foi na área entre Torrões e Croa dos Pinhões. Nessa área se encontra um dos perímetros irrigados importantes da Bacia do Curu (Curu-Paraipaba), onde era forte a fruticultura, as culturas de subsistência, e, expressivamente, os cultivos de cana-de-açúcar e coco-da-baía (GORAYEB *et al.*, 2005; GORAYEB *et al.*, 2007).

A implementação dos primeiros tanques de cultivo de camarão no sinuoso estuário do Rio Curu começou a surgir ainda no ano 2000 (Figura 5), onde os desmatamentos para este

fim já foram captados pelas imagens de satélite, se intensificando a partir de então e, consequentemente, exibindo maiores porções de solo nu ao longo dos anos subsequentes.

Figura 5 – Alterações na dinâmica hídrica e de cobertura do solo da área de estudo e entorno do estuário do Rio Curu.



Fonte: Elaboração dos autores (2023).

No ano de 2003, as imagens já captam os tanques cheios tanto do lado do Paracuru, quanto da Paraipaba, onde o avanço da carcinicultura se mostrou mais acentuado (USGS, 2023). Outra problemática apontada foi a presença de barragens dispostas à montante que interferiam na energia das águas, o que provocava constantes processos de assoreamento e mudanças no curso do rio (Figura 5) e no local de desagüe no mar (GORAYEB *et al.*, 2005).

Pelo fato de no ano 2007 haver mais áreas fragmentadas e com solos mais expostos, o SAVI representou melhor as tipologias. Em especial, as áreas que sofreram com o desmatamento para a expansão dos assentamentos urbanos (Poço Doce), cultivo agropecuário (Torrões, Croa dos Pinhões, engenho na Santa Rita) e a carcinicultura (GREENTEC, 2021).

Analisando então a área a partir do IAF, a tipologia “corpo hídrico” foi superestimada em vários pontos do mapeamento. Em consequência do processo de perda e fragmentação do habitat, a vegetação respondeu exibindo estratos inferiores, onde se observou uma vegetação com menos investimento em estrutura. Os valores menos robustos exibidos por esse índice para o ano 2007, fundamenta essa observação.

Para o IAF, assim como aos outros índices, foram determinadas 6 classes, mas para o ano 2007, a escala de valores se limitou a apenas 4 classes e foi o que exibiu os resultados mais discretos entre os anos analisados. Em algumas situações, a presença de ruídos, a influência atmosférica e a difícil distinção entre os alvos podem promover respostas distintas na classificação (RUZA; CORTE; PRUNZEL, 2019). Como também as alterações, devido as mudanças na cobertura do solo, afetará a produtividade primária bruta e isso será refletido na escala do IAF (KANNIAH *et al.*, 2021).

Alguns estudos se utilizam destes índices para monitorar a distribuição dos manguezais (KAWAMUNA; SUPRAYOGI; WIJAYA, 2017; ALJAHDALI; MUNAWAR;

KHAN, 2021; SINGGALEN, 2022). Entretanto, no trabalho de Silva *et al.*, (2009) na microrregião de Itamaracá, Pernambuco, as tipologias de mangue, vegetação esparsa e agricultura exibiram respostas espectrais semelhantes, assim como na presente pesquisa, onde o NDVI e SAVI, o IAF não diferenciou com precisão a feição mangue dentre as outras assembleias de plantas. A resposta do NDVI para o ano 2014 mostrou uma retomada do *green up* da vegetação na maior parte da área de estudo. Os períodos de chuva são marcados pela intensificação nos cultivos agrícolas e, potencialmente, aumenta também o uso de fertilizantes que percolam para áreas vizinhas se espalhando pela região. Isso pode também explicar o verdor observado na imagem (Figura 3 - 2014).

Pelo SAVI, as tipologias “vegetação média” e “vegetação esparsa” em 2014 se destacaram mais do que “vegetação densa”, como apontado pelo NDVI. Mais uma vez as áreas de Apicum e Salgado ficaram melhor evidenciadas já que apresentam mais porções de solo exposto. Mas para a região da pós praia, o NDVI destacou melhor o mangue de franja que cresce, em alguns trechos da margem, bem próximo ao Lagamar no Capim Açú. Em relação aos “corpos hídricos”, as respostas muito se assemelharam entre o NDVI e o SAVI.

O IAF auxiliou mais na fotointerpretação do ano 2014, pois conseguiu contrastar melhor as tipologias que estavam bem saturadas no NDVI e SAVI. Com base nele, áreas com vegetação mais alta e/ou com densidade foliar maior como o Carnaubal e mata associada ficaram mais bem definidas. Por conseguinte, a Mata de Tabuleiro e o mangue também fizeram parte das feições que exibiram os maiores valores de IAF. A tipologia “corpos hídricos” foi a que teve sua mais próxima identificação com o observado em campo. Entretanto, os pixels mistos geraram certa confusão na classificação.

Num comparativo entre os três índices, a vegetação da pós praia é melhor evidenciada usando-se o NDVI e o SAVI já que são compostas por espécies, em sua maioria, de porte baixo com algumas manchas arbustivas. Nos períodos de estiagem, as respostas para o IAF foram inferiores quando comparadas aos chuvosos (2000 e 2014). Isto pode ser uma resposta a diminuição da disponibilidade de água que repercutiu no investimento em área foliar e, consequentemente, afetou a produtividade.

Este índice também diferenciou melhor os estratos vegetais quando comparados ao NDVI e SAVI, já que a abordagem do IAF permite avaliar a biomassa com base na área. Assim, acaba destacando nuances não captadas pelos primeiros índices analisados, expressando assim a importância de se trabalhar conjuntamente com os três índices de forma concomitante. Ademais, as informações do IAF são essenciais em predição microclimática e de processos biofísicos dentro e abaixo do dossel (FAN *et al.*, 2008).

De acordo com o NDVI para o ano 2020, a tipologia “vegetação densa” cedeu espaço para a “vegetação média” e “vegetação esparsa” em algumas áreas. A vegetação da pós praia exibiu menor vigor, talvez pelo fato de que as plantas de menor porte sejam mais sensíveis a ausência de chuvas já que a imagem reflete o estado vegetacional no período da estiagem (Figura 3 - 2020).

A maior proporção de áreas com solo nu, vegetação de pequeno porte e muito esparsa apresentou melhor destaque com o SAVI. Só a tipologia “corpos hídricos” que foi superestimada em alguns pontos no mapeamento. Destaque também para as áreas ocupadas pelo mangue que foram mais bem discretizadas nessa imagem.

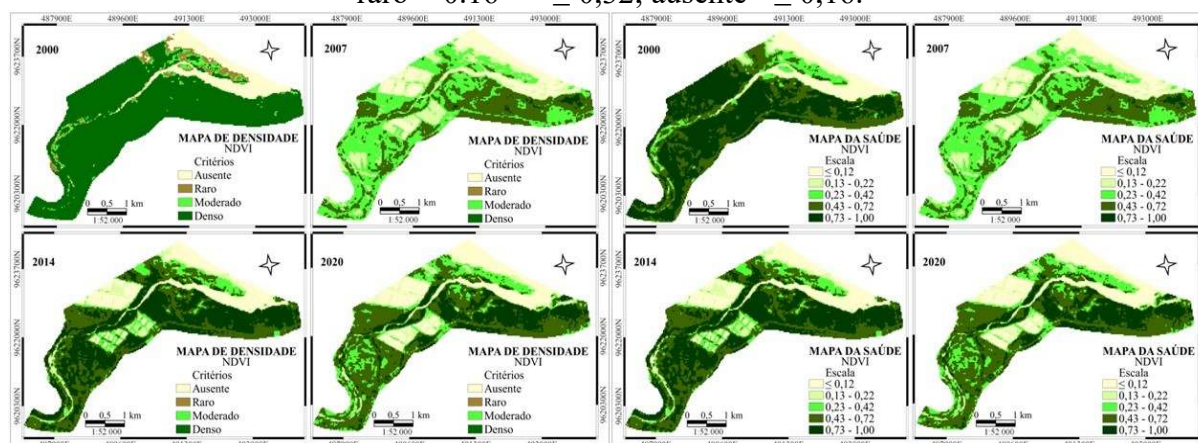
Mais uma vez a tipologia “corpo hídrico” foi superestimada ao se utilizar o IAF. Os valores do IAF em 2020 foram mais discretos, sendo que a tipologia “vegetação densa” não apareceu na classificação como aconteceu com o NDVI. Esse índice não consegue dar uma noção de como está estruturalmente uma comunidade como o IAF faz. Então, pelo IAF, tem-se que em 2020 a área de estudo exibiu, no geral, uma vegetação estruturalmente inferior ao se comparar com o ano 2000.

Em suma, IAF sozinho não foi suficiente para caracterizar a cobertura vegetal que compõem o Estuário do Rio Curu. O NDVI foi mais relacionado com o SAVI. Eles variaram entre si e exibiram dados complementares que favoreceram a leitura do ambiente. Nestes anos analisados, tanto em relação a biomassa verde quanto ao nível estrutural e de densidade foliar, a vegetação do Estuário do Rio Curu sofreu perdas expressivas podendo assim comprometer o equilíbrio ambiental dentro e na zona de influência desta Unidade de Conservação.

Mapeamento da densidade e da saúde da vegetação da APA do estuário do Rio Curu e entorno

Na figura 6 tem-se o mapeamento da densidade e da saúde da vegetação ao longo de 20 anos realizado com base no NDVI. Este índice de vegetação é muito utilizado no monitoramento de manguezais e outros ecossistemas (TAO *et al.*, 2019; SINGGALEN *et al.*, 2021)

Figura 6 – Mapeamento de densidade da vegetação da APA e entorno do estuário do Rio Curu nos anos 2000, 2007, 2014 e 2020. Critérios: denso - $0,42 < \text{NDVI} \leq 1,0$; moderado - $0,32 < \text{NDVI} \leq 0,42$; raro - $0,16 < \text{NDVI} \leq 0,32$; ausente - $\text{NDVI} \leq 0,16$.



Fonte: Elaboração dos autores, 2023.

As respostas espectrais observadas na figura acima seguiram a proposta de Singgalen *et al.*, (2021) para a análise da densidade, mas devido as características desta área de estudo, foi necessário fazer alguns ajustes e tomar alguns cuidados na fotointerpretação da imagem.

As respostas observadas aqui reforçam o que já foi explanado anteriormente, de que área passou por grandes alterações, especialmente, devido ao desmatamento para implantação e expansão da agricultura e aquicultura. Queiroz (2003) ressaltou que o corte de *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn. de diâmetros diversos foi observado na planície do Rio Curu. O autor conjecturou também que este desbaste deve ter ocorrido em diferentes épocas para fins como construção, abastecer fogo, dentre outros.

Essa intervenção na área favoreceu o estabelecimento de plantas alóctones ao ambiente, tomando o espaço que antes era ocupado por espécies típicas de Manguezal. Foram observadas também na época, indivíduos da flora herbácea (pioneiras), assim como as de Manguezal e de Mata de Tabuleiro nas áreas sob influência da preamar (QUEIROZ, 2003).

Áreas no mapa onde a escala compreende respostas espectrais iguais ou inferiores a $\leq 0,16$ se referem a regiões desprovidas de vegetação, sejam elas naturais ou não. O Índice NDVI não distinguiu os corpos hídricos (rio e tanques de carcinicultura) das áreas de solo nu (como a faixa praial), por exemplo. Devido a resolução espacial, a ferramenta não refletiu de maneira fidedigna todas as características das tipologias da área.

Constata-se que até o ano 2000 a área da APA e entorno estava com uma alta taxa de cobertura (densidade acima de 75%), onde apresentava uma boa resposta da vegetação as condições ambientais. Isso foi visivelmente sendo modificado ao longo do tempo (Figura 6), onde significativas porções da vegetação foram sendo suprimidas e o solo ficou mais exposto apresentando desta forma mais áreas dentro da faixa de cobertura inferior a 50%.

No estudo de Rocha (2020), onde aborda a relação da vulnerabilidade dos subsistemas ambientais em Paracuru, a planície flúvio-marinha apresentou alta vulnerabilidade. A ocupação, seja ela de forma regular ou irregular dos cultivos, o desmatamento para construção de moradias e uso da madeira são problemas também reportados (MEIRELES; SILVA, 2002; NETO *et al.*, 2013; ROCHA, 2020). Ainda, ressalta-se a preocupação dos gestores frente a este avanço em face a fiscalização deficitária (ROCHA, 2020).

Mesmo que quase toda a porção da área de estudo esteja amparada legalmente (Lei Federal nº 4771/1965; SNUC nº 9985/2000; Medida Provisória nº 2166-67/2001; Decreto Estadual 25.416/1999) observa-se que a degradação ambiental avançou dentro da APA e na zona de entorno comprometendo, desta forma, os objetivos de conservação de seus recursos naturais. Pelas imagens é possível apontar áreas críticas (e.g. área entre os Torrões e a Croa do Pinhões) que podem receber mais atenção tanto dos órgãos gestores para otimização e atualização do Plano de Manejo, quanto dos órgãos fiscalizadores e parceiros se mostrando assim uma ferramenta eficaz para estudos ambientais.

Outro aspecto analisado neste trabalho foi a saúde da cobertura da vegetação da APA. A tabela 3 apresenta as flutuações no comportamento da resposta espectral da flora local e suas respectivas taxas de cobertura no transcurso das duas décadas.

Tabela 3 - Saúde da vegetação da APA e entorno do estuário do Rio Curu nos anos 2000, 2007, 2014 e 2020.

Saúde da Vegetação	NDVI	2000	2000	2007	2007	2014	2014	2020	2020
		Área Km²	%	Área Km²	%	Área Km²	%	Área Km²	%
Muito boa	0.72 – 0.92	5,8176	46,80	0,0936	0,75	4,3182	34,74	2,1636	17,40
Boa	0.42 – 0.72	3,789	30,48	3,7341	30,04	4,1337	33,25	4,8978	39,40
Normal	0.22 – 0.42	0,9693	7,80	4,7538	38,24	1,233	9,92	2,1465	17,27
Pobre	0.12 – 0.22	0,3141	2,53	1,7568	14,13	0,5895	4,74	0,576	4,63
Muito Pobre	- 1.0 – 0.12	1,5417	12,40	2,0934	16,84	2,1573	17,35	2,6478	21,30
	Total	12,4317	100	12,4317	100	12,4317	100	12,4317	100

Fonte: Elaborado pelos autores, 2023.

No ano 2000, 46,80% da cobertura da vegetação apresentava uma saúde “muito boa”. Este percentual teve uma significativa queda no ano 2007, onde apenas 0,75% da vegetação agora estava classificada neste patamar.

Desmatamento, infrações relativas ao não cumprimento da legislação que ordenam as APP's e APA, descarte irregular de resíduos sólidos (LANDIM NETO *et al.*, 2013), lançamento de efluentes de matadouros públicos, de viveiros de carcinicultura e drenagem dos perímetros irrigados foram algumas das problemáticas levantadas num estudo realizado na Bacia do Curu e que podem auxiliar no entendimento dessa perda de vigor e cobertura da vegetação local (GORAYEB *et al.*, 2007).

Os *status* “boa” e “normal” foram dominantes no ano 2007 chegando a 68% da área de cobertura. Mas no balanço geral foi o ano com menor resultado entre os analisados.

O Decreto de criação da APA (Nº 25.416/1999) reforça os cuidados sobre os ecossistemas do estuário do Rio Curu tanto da perspectiva ambiental quanto social onde visa “II - proporcionar à população regional métodos e técnicas apropriadas ao uso do solo (...)

assegurando a sustentabilidade dos recursos naturais (...)” os de “III – ordenar (...) atividades econômicas compatíveis com a conservação ambiental” como também “IV - desenvolver, na população regional, uma consciência ecológica e conservacionista”. Objetivos estes que não foram respeitados como mostra um dos estudos realizados na região (GORAYEB *et al.*, 2007).

A figura 6 (Mapa da Saúde) apresenta melhor como se deu essa distribuição ao longo dos anos e por toda a área de interesse. O NDVI que compreende a faixa espectral entre -1 e 0,12 são áreas, no presente estudo, referentes a faixas de areia de praia e corpos hídricos, não devendo, portanto, ser interpretada como área vegetada.

No ano 2014 a saúde da vegetação apresentou sua mais significativa resposta desde o início da intensificação das pressões antrópicas na área. Os status “boa” e “muito boa” representaram neste ano mais de 8,4 km² de área.

O ano de 2020 apresentou uma distribuição quase igual para os status “normal” e “muito boa”. O destaque ficou para a vegetação que exibiu saúde “normal” perfazendo assim mais de 4,8 km² da cobertura da área de estudo. Resposta alinhada ao trabalho de Rocha (2020) que aponta a baixa vulnerabilidade da vegetação arbóreo arbustiva do Tabuleiro Pré-litorâneo na área de interesse. Esse estudo também reconheceu o potencial que esta região, sob a influência da maritimidade, tem de preservar o vigor da vegetação por quase todo o ano dado o volume de chuvas que é geralmente maior do que em outras partes do estado.

Contudo, outros fatores para além do natural talvez expliquem o vigor observado para o ano 2014. A época preferencial para plantio na região se dá no primeiro semestre por conta das chuvas que ocorrem justamente nesse período. Deste modo, é mais comum a intensificação do uso de fertilizantes agrícolas para suprir as demandas nutricionais das safras de interesse. Sabe-se que o NDVI responde fortemente à disponibilidade de nitrogênio para planta e, conseqüentemente, há elevação nos teores de clorofila foliar (SINGGALEN *et al.*, 2021). Esse *green up* é melhor percebido pelos sensores, o que reflete diretamente nas taxas de NDVI como pode ser percebido, especialmente, na área entre os Torrões e Croa do Pinhões.

De acordo com Rocha (2020), aproximadamente 25,01% das áreas do município apresenta alta vulnerabilidade ambiental, sendo que parte da poligonal referente a APA do Estuário do Rio Curu está incluída nesta parcela, revelando a suscetibilidade deste ambiente a formas de uso não compatíveis com os objetivos de conservação da área.

Mesmo que esse percentual seja o menor entre os outros valores (média e baixa vulnerabilidade) observados na referida pesquisa, deve-se levar em conta que é justamente próximo a seus limites que se observa o aumento da pressão pela ocupação inclusive em áreas protegidas pela legislação (MEIRELES; SILVA, 2002; ROCHA, 2020). Ambientes vulneráveis como o estuarino estão em constante modificação e, uma vez modificados, poderão não retornar ao *status* anterior, ou seja, às condições naturais (ROCHA, 2020).

Num levantamento a respeito de quem seriam os principais responsáveis pelos problemas encontrados no município, 69% dos entrevistados responderam que seria a própria população local. Mas para 48% a responsabilidade recaía sobre o poder público (ROCHA, 2020).

Landim Neto *et al.*, (2013) já alertavam para a necessidade urgente de interferência no gerenciamento deste espaço bem como o ajuste da legislação com vistas a promoção da conservação dos recursos naturais da região estuarina do Rio Curu. Os autores apontam para a carência de uma consciência ambiental por parte da comunidade residente, assim como a ineficiência de políticas públicas. Mesmo a área sendo uma UC há mais de 20 anos, isso não impediu a existência de impactos ambientais negativos.

Nos últimos dois anos se observa um incentivo no ecoturismo de base comunitária, sobretudo, após a publicação do plano de manejo da APA do Estuário do Rio Curu. Esse

diálogo entre os povos do mar, a comunidade científica e a gestão pública é importante, pois se apresenta como uma abordagem apropriada que efetivamente busca a preservação da sustentabilidade dos ecossistemas presentes.

CONCLUSÃO

Com base no exposto, conclui-se que a zona do Estuário do Rio Curu passou por mudanças expressivas em relação a distribuição, a densidade e a saúde em duas décadas e os Índices de Vegetação auxiliaram neste diagnóstico.

Embora boa parte da área de estudo esteja numa Unidade de Conservação observa-se que a degradação ambiental avançou dentro e na Zona de Entorno comprometendo desta forma os objetivos de conservação de seus recursos naturais. Foi possível identificar a conversão de áreas com cobertura vegetal para a instalação de assentamentos urbanos, cultivos agrícolas e aquícolas. Foram também registradas a introdução de espécies alóctones de interesse comercial tanto para os cultivos em pequena, quanto em macro escala.

A baixa resolução do satélite Landsat dificultou algumas análises devido ao tamanho relativamente pequeno da área e a características particulares da vegetação presente (flora mista).

As diferenças entre as respostas do NDVI e do SAVI foram complementares e se evidenciaram mais nos dois períodos de ausência de chuvas na região (2007- out; 2020 – set), onde as áreas com solos mais expostos se destacaram melhor nos mapas. Entretanto, dadas as características da área em estudo, o SAVI se mostrou mais efetivo que o NDVI já que este saturou em muitos pontos. Já o IAF superestimou a classe 1 (corpos hídricos e carcinicultura), mas trouxe uma resposta complementar aos dois primeiros índices analisados, uma vez que apresentou um panorama de como se comportou estruturalmente a assembleia de plantas da área. Este índice se mostrou mais sensível às mudanças pluviométricas da região não saturando tanto nos períodos de estiagem.

No tocante a distribuição, constatou-se que a comunidade de mangue se expandiu longitudinalmente neste íterim no sentido foz-montante até chegar na comunidade de Poço Doce. Mesmo com esse incremento nos seus domínios, a estrutura e a densidade são mais significativas próxima ao mar.

Constatou-se também que a mata nativa foi substituída progressivamente por espécies de interesse comercial como cana-de-açúcar, capim elefante, coco da baía e culturas de subsistência. Assim como para implantação da aquicultura, diminuindo expressivamente a área de cobertura e alterando a estratificação (altura) da comunidade e sua densidade. Isso deixou o solo mais exposto, o que foi bem captado pelos Índices de Vegetação.

Referente a saúde da vegetação, o ano de 2007 foi o mais crítico, pois foi o que apresentou o menor vigor geral. As áreas ao redor dos cultivos de agricultura e aquicultura foram as mais afetadas pela pressão antrópica exibindo NDVI mais baixo. Os resultados também mostraram a capacidade de resiliência da flora frente aos desafios impostos a ela como foi observado no crescente vigor exibido entre 2007/2014.

A aplicação dos IV's talvez seja mais eficaz quando usado como instrumento para o diagnóstico de dados observacionais do solo, ao invés de simplesmente servirem para detalhar a paisagem através de seus produtos. O conhecimento de campo, assim, se mostra indispensável para uma leitura ambiental mais assertiva.

Contudo, as respostas apresentadas pelos índices podem auxiliar na formulação ou reformulação de políticas de reabilitação da vegetação envolvendo as comunidades locais, uma vez que a análise da distribuição e da condição da flora se utilizando destes índices é contextual. Deste modo, a estrutura e a composição da comunidade vegetal de cada zona ou

região irão exibir diferenças significativas, sendo de extrema importância o monitoramento constante destas áreas.

REFERÊNCIAS

ALATORRE, L. C. *et al.* Temporal changes of NDVI for qualitative environmental assessment of mangroves: Shrimp farming impact on the health decline of the arid Mangroves in the Gulf of California (1990–2010), **Journal of Arid Environments**, v.125, p. 98-109, 2016. ISSN 0140-1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.10.010>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

ALJAHDAI, M. O.; MUNAWAR, S.; KHAN, W. R. Monitoring mangrove forest degradation and regeneration: Landsat time series analysis of moisture and vegetation indices at Rabigh Lagoon, red sea, **Forests**, v. 12, n. 1, p. 1-19, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f12010052>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

ALLEN, R. *et al.* **Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL):** Advanced training and users manual – Idaho Implementation. University of Idaho, version 1.0, aug/2002.

ANJOS, D. C. **Diversidade microbiana e de teores de metais pesados em solos e nas águas superficiais ao longo do Rio Curu.** 2015. 108 f.: il. color. Tese - Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza, 2015.

ANTUNES, M. A. H.; ASSAD, E. D.; BATISTA, G. T. Variação das medidas espectrais ao longo do ciclo da soja (*Glicine max* (L.) Merril.). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. **Anais[...]**. Curitiba: INPE, 1993. p. 1-9.

ARRUDA, A. G. F. **Análise do uso e ocupação do solo e seus impactos em Zonas Costeiras:** Paracuru – CE. 2013. 130 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico ou Profissional em 2013) - Universidade Estadual do Ceará, 2013. Disponível em: <http://siduece.uece.br/siduece/trabalhoAcademicoPublico.jsf?id=84726> Acesso em: 18 de mar. 2023

BRASIL. **Lei nº 9985 de 18 de julho de 2000.** Institui o Sistema Nacional das Unidades de Conservação e dá outras providências; regulamenta o art 225, § 1º, incisos I, II, III e VI da Constituição Federal. Brasília, DF: Casa Civil, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm . Acesso em: 16 mar. 2023.

BRASIL. **Lei nº 4771 de 15 de setembro de 1965.** Institui o novo Código Florestal. Revogada pela Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012. Brasília, DF: Casa Civil, 1965. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771.htm. Acesso em: 16 mar. 2023.

BRASIL. **Medida Provisória nº 2166-67 de agosto de 2001.** Revogada pela Lei nº 12 651 de 25 de maio de 2012 e instituiu o Código Florestal. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/MPV/2166-67.htm. Acesso em: 18 de mar. 2023.

CAITANO, R. F.; LOPES, F. B.; TEICEIRA, A. S. Estimativa de Aridez no Estado do Ceará usando o Sistema de Informação Geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais [...]**. São José dos Campos: IMPE, 2011.

CAVALCANTI-SILVA, E. R. A. *et al.* Análise espaço-temporal das características do mangue urbano no estuário do Pina (Pernambuco). **Revista Brasileira do Meio Ambiente**, n.1, v.1. p. 030-038, 2018.

CHAMBERLAIN, D.A.; PHINN, S.R.; POSSINGHAM, H.P. Mangrove Forest cover and phenology with landsat dense time series in Central Queensland, Australia. **Remote Sensing**, v. 13, nº 15, p. 3032, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13153032>. 2021.

CEARÁ. Decreto nº 25.416 29 de março de 1999. Declara a APA do Estuário do Rio Curu como Área de Proteção Ambiental e dá outras providências. Publicado no **Diário Oficial do Estado – CE**, poder Executivo, Fortaleza, CE, 31 de março de 1999.

FAN, L. *et al.* Investigating the relationship between NDVI and LAI in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, nº 1-2, p. 151–156, 2008. doi:10.1007/s00704-007-0369-2.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, A. Relação entre índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.33, n.8, p. 1399-1405, 1998. ISSN: 1678-3921.

GAMEIRO, S. *et al.* Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terræ**, v. 13(1-2), p. 15-22, 2016. ISSN: 1679-2297.

GLENN, D.M.; TABB, A. Evaluation of five methods to measure Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in apple and citrus. **International Journal of Fruit Science**, v. 19, nº. 2, p.191–210, 2019. <https://doi.org/10.1080/15538362.2018.1502720>.

GLENN, E. P. *et al.* Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. **Sensors**, v. 8, p. 2136-2160, 2008. ISSN: 1424-8220.

GORAYEB, A. *et al.* Aspectos ambientais e qualidade das águas superficiais na Bacia Hidrográfica do Rio Curu – Ceará – Brasil. **Holos Environment**, v. 7, n. 2, p. 105, 2007. ISSN: 1519-8634.

GORAYEB, A. *et al.* Aspectos geoambientais, condições de uso e ocupação do solo e níveis de desmatamento da Bacia Hidrográfica do Rio Curu, Ceará – Brasil. In: **Geografia (Revista Eletrônica)**. Londrina, v. 7, n. 2, p. 85-106, 2005.

GORAYEB, A. *et al.* Saneamento básico e impactos ambientais na bacia hidrográfica do Rio Curu – Estado do Ceará – Nordeste do Brasil. **Scripta Nova**, v. 10, n. 208, 2006.

GREENTEC CONSULTORIA E PLANEJAMENTO LTDA. **Plano de manejo da Área de Proteção Ambiental do Estuário do Rio Curu**: Diagnóstico socioambiental. Vol 1. Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/wp->

content/uploads/sites/36/2022/01/Vol-1-Diagnostico-Socioambiental-APA-do-Estuario-do-Rio-Curu.pdf. Acesso em: 18 de mar. 2023.

GUHA, S., H.; GOVIL, A. D.; GILL, N. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples City, Italy. **European Journal of Remote Sensing**, v. 51, n. 1, p. 67–78, 2018. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1474494>.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução da 2ª edição por (pesquisadores do INPE): Epiphany, J.C.N.; Formaggio, A.R.; Santos, A.R.; Rudorff, B.F.T.; Almeida, C.M.; Galvão, L.S. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 672 p.

KANNIAH, K. D. *et al.* A. Remote Sensing to study mangrove fragmentation and its impacts on Leaf Area Index and gross primary productivity in the south of Peninsular Malaysia. **Remote Sensing**, v. 13, p. 1427, 2021. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13081427>. 2021.

KAWAMUNA, A.; SUPRAYOGI, A.; WIJAYA, A. P. Analysis of Mangrove forest health based on NDVI classification method on Sentinel 2 images (Case study: Teluk Pangpang, Banyuwangi Regency), **Undip Geodesy Journal**, v. 6, n. 1, p. 277–284, 2017.

LAMCHIN, M. *et al.* Assessment of Land Cover change and Desertification using Remote Sensing Technology in a local region of Mongolia, **Advances in Space Research**. 2016.

LANDIM NETO, F. O. *et al.* Diagnóstico ambiental e zoneamento funcional do estuário do Rio Curu: subsídios para a gestão local e regional. **Revista Eletrônica Geoaraguaia**, Mato Grosso, v. 3, n.1, p. 97-113. jan/jun, 2013.

LIANG, S. **Quantitative remote sensing of land surfaces**, New Jersey, USA, ed. Wiley Interscience, 2004. 534 p. Online ISBN: 9780471723721.

MAIA, L.P. *et al.* **Atlas dos Manguezais do Nordeste do Brasil**: Avaliação das áreas de Manguezais dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. SEMACE: Fortaleza, 2006.

MEIRELES, A. J. A.; SILVA, E. V. Abordagem geomorfológica para a realização de estudos integrados para o planejamento e gestão em ambientes fluviomarinhos. **Scripta Nova**, Universidad de Barcelona – Espanha: v. 6, n. 118, p.25, 2002. ISSN: 1138-9788.

MENDES, L. S. Relações Fitogeomorfológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Curu, Ceará-Brasil: Uma abordagem preliminar. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 2, p. 12–21, 2016. DOI: 10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10419. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10419>. Acesso em: 18 mar. 2023.

OLIVEIRA, F.C.; RAKOCEVIC, M. Adaptação de um método para medir o Índice de Área Foliar (IAF) e sua aplicação para a braquiária (*Brachiaria brizantha* Hochst ex A. Rich) em um sistema silvopastoril no nordeste do Paraná. In: II EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA FLORESTAS. Colombo, 09 a 11 de dezembro de 2003. 048A. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/100833/1/2003-RAC-AdaptacaoMetodo.pdf>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

QUEIROZ, M. A. **Determinação do índice de sensibilidade do litoral do trecho Pecém-Mundaú/CE**. 2003. 243 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) - Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2003.

ROCHA, C. S. *et al.* Vulnerabilidade socioambiental como base para a gestão costeira no município de Paracuru – Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n.06, p. 2820-2839, 2020.

ROCHA, C. S. **Análise socioambiental como subsídio à gestão integrada da zona costeira em Paracuru – CE**. 2020. 219f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geografia) – Universidade Estadual do Ceará. Programa de Pós-graduação em Geografia do Centro de Ciências e Tecnologia, 2020.

RUZA, M. S.; CORTE, A. P. D.; PRUNZEL, J. Mangue no Paraná: análise multitemporal do uso do solo no litoral paranaense para o período de 2000 a 2017. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14 a 17 de Abril, 2019, INPE – Santos – SP. **Anais [...]**. 2019. p 2486-2498. 2019. ISBN: 978-85-17-00097-3.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA NO CLIMA – **SEMA**. Volume 3: diagnóstico do meio físico: setores ambientais estratégicos. Demanda 19 – Zoneamento Ambiental da Planície Litorânea. Tomo IV: Diagnóstico consolidado dos setores ambientais estratégicos escala 1:10.000. 287 p, 2021.

SILVA, A. C. **Alterações ambientais de ecossistemas Manguezais e apicuns no Estuário do Rio Acaraú – Ceará**. 2022. 159 f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geografia (Centro de Ciências e Tecnologia), Universidade Estadual do Ceará. Fortaleza, 2022.

SINAGA, S. H.; SUPRAYOGI, A.; HANIAH, H. Analysis of availability of green open space with Normalized Difference Vegetation Index and Soil Adjusted Vegetation Index methods using Sentinel 2a satellite image (Case Study: Kabupaten Demak), **Undip Geodesy Journal**, v. 7, n. 1, p. 202–211, 2018.

SINGGALEN, Y. A. Tourism infrastructure development and transformation of vegetation index in Dodola island of Morotai island regency. **Journal of Information Systems and Informatics**, v. 4, n. 1, mar. 2022. e-ISSN: 2656-4882.

SINGGALEN, Y. A. *et al.* Mangrove monitoring using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): case study in north Halmahera, Indonesia. **Journal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis**, v.13, n. 2, p. 219-239. 2021.

SWANSON, D. K. Start of the Green Season and Normalized Difference Vegetation Index in Alaska's Arctic National Parks, **Remote Sensing**, vol. 13, n. 2, p. 1–12, 2021.

TAO, H. *et al.* Genetic algorithm-based method for forest type classification using multi-temporal NDVI from Landsat TM imagery. **Annals of GIS**, v. 25, n. 1, p. 33–43, 2019. <https://doi.org/10.1080/19475683.2018.1552621>.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Agência científica dos Estados Unidos, 2023. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

VIGANÓ, H.A.; BORGES, E.F.; FRANÇA-ROCHA, W.J.S. Análise do desempenho dos índices de vegetação NDVI e SAVI a partir de imagens Aster. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais [...]* Curitiba, p. 1828-1834, 2011.

VITO, L. **NDVI**. Vegetation health & density. 2009.

WEI, C., J. *et al.* Evaluating relationships of standing stock, LAI and NDVI at a subtropical reforestation site in southern Taiwan using field and satellite data. **J. of Forest Research**, v. 25, n. 4, p. 250–259, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13416979.2020.1783752>. Acesso em: 18 de mar. 2023.

ZAITUNAH, A. *et al.* Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) analysis for land cover types using Landsat 8 OLI in besitang watershed, Indonesia. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, v. 126, Friendly City 4, Medan, Indonésia, 2018. doi:10.1088/1755-1315/126/1/012112.