

FLUXO DE CARBONO E COBERTURA DA TERRA EM UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO COSTEIRA

Denise Santos Saldanha¹
Yuri Gomes de Souza²
Anderson Álefe Rodrigues de Oliveira³
Deise Santos Saldanha⁴
Francisco Josenildo Ribeiro de Souza⁵
Diógenes Félix da Silva Costa⁶

INTRODUÇÃO

As Unidades de Conservação (UCs) são espaços territoriais com características naturais relevantes, legalmente instituídas pelo poder público, criadas com o objetivo de preservar seus sistemas naturais e culturais (BRASIL, 2000). Considerando a existência de 1.600 UCs no Brasil, essas protegem apenas 16% do território terrestre e 0,5% das áreas marinhas, o qual equivale a cerca de 1.479.286 km² quadrados (UNESCO, 2024).

No Rio Grande do Norte são encontradas 11 UCs, correspondendo somente a 2.530 km² (2,41%) da sua extensão total (IDEMA, 2024), o que demonstra números ainda incipientes no estado quanto à conservação das paisagens locais. Esse cenário fica mais complexo quando se observa os altos índices de degradação nos ecossistemas, como é o caso da Caatinga, que de acordo com Araújo *et al.* (2023), 89% da sua vegetação foi modificada pelas atividades antrópicas, com maior intensidade nos últimos anos. Os manguezais também enfrentam degradação significativa, que segundo a Avaliação Ecosistêmica do Milênio, entre 1980 e 2000, cerca de 35% da sua cobertura vegetal (hoje com 54% da área total) foi perdida devido ao uso e ocupação do solo (MA, 2005).

Nessa perspectiva, acredita-se que muito se tem a fazer sobre a elucidação do papel dessas UCs em escala regional, sobretudo em áreas com diferentes ecossistemas influenciados pela semiaridez, como o caso da RDS Ponta do Tubarão, instituída no Rio Grande do Norte pela Lei nº 8.349, de 18 de julho de 2003. Essa reserva busca além de

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, denisesaldanha.lama@gmail.com;

² Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, yurigomes.s28@gmail.com;

³ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, anderson_alefi@hotmail.com;

⁴ Mestra em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, deiseesaldanha@gmail.com;

⁵ Graduando do curso de Educação Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, josenildoribeiro73@gmail.com;

⁶ Orientador do primeiro autor; Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, diogenesfscosta@gmail.com.

garantir a conservação dos recursos naturais, contribuir de forma sustentável para o desenvolvimento socioeconômico das comunidades locais (IDEMA, 2024).

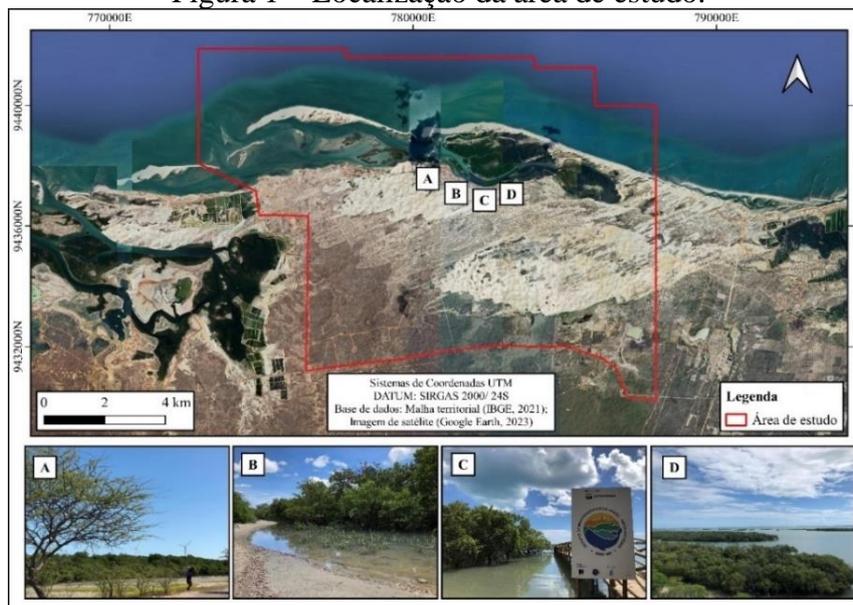
Dessa forma, a realização de monitoramentos da cobertura da terra e do potencial do fluxo de carbono revelam alternativas essenciais para o diagnóstico dos ecossistemas e sua influência positiva na mitigação das mudanças climáticas (Bezerra *et al.*, 2014; Oberherr *et al.*, 2023). Com isso, essa pesquisa objetiva analisar multitemporalmente a paisagem da RDS Ponta de Tubarão e entender o CO₂FLUX das suas unidades.

METODOLOGIA

Área de estudo

A RDSEPT está localizada entre os municípios de Macau e Guamaré, na costa norte do Estado do Rio Grande do Norte. Com área territorial de aproximadamente 129,6 km², abrange as comunidades de Barreiras, Diogo Lopes, Lagoa Doce, Mangue Seco I e II e Sertãozinho (IDEMA, 2024) (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



Fonte: acervo da pesquisa (2024).

Inserida sob o clima semiárido, a área registra temperatura média anual de 27,2°C e umidade relativa do ar de 68%. Do ponto de vista geológico, possui características sedimentares influenciadas pela Bacia Potiguar, com predominância das formações Jandaíra (calcário) e Açú (arenito). Quanto ao relevo, apresenta cotas abaixo de 100 m, com morfologia de planície de maré, campo de dunas e tabuleiro costeiro. Por fim, a vegetação é representada pela influência do bioma caatinga e com expressivas áreas de manguezal e restinga (Gê *et al.*, 2022).

Para a análise multitemporal deste estudo, foram empregados os dados disponibilizados no catálogo de coleções de Uso e Cobertura da Terra do MapBiomas Brasil, bem como seus códigos de legenda e a respectiva paleta de cores.

Considerando o interesse de investigar a configuração das unidades de paisagem da RDSEPT ao longo dos últimos 37 anos, foi analisado um intervalo amostral nos anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2022. Este período permite examinar a área desde antes mesmo de sua designação como RDS até os dias atuais, fornecendo uma visão geral das mudanças no recorte espacial estudado. Os dados foram obtidos no formato *raster* (GeoTIFF) por meio da Coleção 7.0 e passaram por um processo de reclassificação para compor suas classes. Posteriormente, foram submetidas a etapas de organização, tabulação, quantificação e produção cartográfica, sob auxílio do *software* QGIS. O processamento dos dados seguintes se deu em ambiente deste programa.

Quatro índices foram empregados para aferir as características da área de estudo (Quadro 1): o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (sigla em inglês: NDVI) (Rouse *et al.*, 1973), o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI), o Índice de Refletância Fotoquímica Melhorado (sPRI) e o Índice de Fluxo de Carbono (CO₂Flux) (Gamon *et al.*, 1997; Rahman *et al.*, 2001; Silva; Baptista, 2015). Esses foram utilizados a partir de uma cena do satélite Sentinel-2B, disponibilizada no catálogo virtual da Copernicus®.

Quadro 1 – Equações para os cálculos do NDVI e o CO₂Flux.

Parâmetro	Equação
NDVI	$\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$
PRI	$\frac{R_{Blue} - R_{Green}}{R_{Blue} + R_{Green}}$
sPRI	$\frac{(PRI + 1)}{2}$
Fluxo de Carbono (CO ₂ Flux)	CO ₂ flux = sPRI * NDVI

Fonte: Rouse *et al.* (1973); Gamon *et al.* (1997); Rahman *et al.* (2001); Silva e Baptista (2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados obtidos através do MapBiomas, verificou-se que a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta de Tubarão exibe, nos anos 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2022, quinze classes: formação florestal; formação savânica; mangue; formação campestre; pastagem; moisco de usos; praia, duna e areal; área urbanizada; outras áreas não vegetadas; aquicultura; apicum; rio, lagoa e oceano; outras lavouras; restinga arbórea; e restinga herbácea (Tabela 1).

Tabela 1 – Quantificação das classes identificadas na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta de Tubarão.

Classes	1985		1990		1995		2000		2005		2010		2015		2022	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Formação Florestal	135,54	1,05	14,04	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,52	0,02
Formação Savânica	1.302,93	10,05	860,76	6,64	1.499,22	11,57	1.128,60	8,71	946,71	7,30	1.442,07	11,13	1.170,27	9,03	1.096,38	8,46
Mangue	530,10	4,09	564,39	4,35	517,32	3,99	547,29	4,22	543,24	4,19	511,47	3,95	526,50	4,06	518,85	4,00
Formação Campestre	39,78	0,31	27,99	0,22	50,22	0,39	51,93	0,40	53,73	0,41	50,31	0,39	52,38	0,40	57,33	0,44
Pastagem	57,24	0,44	117,36	0,91	39,60	0,31	340,29	2,63	209,61	1,62	186,66	1,44	115,47	0,89	1.032,66	7,97
Mosaico de Usos	1.463,58	11,29	1.785,51	13,78	977,85	7,55	972,00	7,50	1.540,08	11,88	1.361,34	10,50	1.023,03	7,89	354,42	2,73
Praia, Duna e Areal	4.144,86	31,98	4.478,31	34,55	4.737,33	36,55	4.949,28	38,19	4.626,09	35,70	4.219,38	32,56	4.980,87	38,43	4.574,97	35,30
Área Urbanizada	5,40	0,04	12,78	0,10	8,37	0,06	12,87	0,10	12,69	0,10	17,82	0,14	33,12	0,26	43,56	0,34
Outras Áreas não Vegetadas	20,70	0,16	10,17	0,08	1,26	0,01	3,60	0,03	0,00	0,00	10,98	0,08	5,49	0,04	96,12	0,74
Aquicultura	5,58	0,04	38,25	0,30	45,72	0,35	52,20	0,40	52,83	0,41	57,69	0,45	57,06	0,44	53,01	0,41
Apicum	122,04	0,94	126,81	0,98	58,59	0,45	57,78	0,45	59,04	0,46	53,46	0,41	52,29	0,40	45,27	0,35
Rio, Lagoa e Oceano	5.132,25	39,60	4.923,63	37,99	5.024,07	38,77	4.844,16	37,38	4.913,73	37,91	5.044,50	38,92	4.935,15	38,08	5.066,82	39,10
Outras Lavouras	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,32	0,03	5,13	0,04	18,09	0,14
Restinga Arbórea	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	0,54	0,00	0,00	0,00	2,34	0,02	0,00	0,00
Restinga Herbácea	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	1,71	0,01	0,00	0,00	0,90	0,01	0,00	0,00
Total	12.960	100,0	12.960	100												

Fonte: acervo da pesquisa (2024).

Na década 1985, a classe com maior ocorrência foi representada por rio, lagoa e oceano, com 5.132,25 ha (39,60%), seguida da praia, duna e areal, com 4.144,86 ha (31,98%); mosaico de usos, com 1.463,58 ha (11,29%); formação savânica, com 1.302,93 ha (10,05%); mangue, com 530,10 ha (4,09%); formação florestal, com 135,54 ha (1,05%); apicum, com 122,04 ha (0,94%); pastagem, com 57,24 ha (0,44%); formação campestre, com 39,78 ha (0,31%); outras áreas não vegetadas, com 20,70 ha (0,16%), aquicultura, com 5,58 ha (0,04%); e área urbanizada, com 5,40 ha (0,04%), respectivamente. As classes outras lavras, restinga arbórea e restinga herbácea não foram identificadas entre os anos 1985 e 1990.

No ano 1990, as classes rio, lagoa e oceano e praia, duna e areal ocupam as maiores áreas, com 4.923,63 ha (37,99%) e 4.478,31 ha (34,55%). As demais, como mosaico de usos, formação savânica, mangue, apicum, pastagem, aquicultura, formação campestre, formação florestal, área urbanizada e outras áreas não vegetadas, tiveram 1.785,51 ha (13,78%), 860,76 ha (6,64%), 564,39 ha (4,35%), 126,81 ha (0,98%), 117,36 ha (0,91%), 38,25 ha (0,30%), 27,99 ha (0,22%), 14,04 ha (0,11%), 12,78 ha (0,10%); 10,17 ha (0,08%), nessa ordem.

Em 1995, a ocupação seguiu as classes rio, lagoa e oceano (5.024,07 ha/ 38,77%); praia, duna e areal (4.737,33 ha/36,55%); formação savânica (1.499,22 ha/11,57%); mosaico de uso (977,85 ha/7,55%); mangue (517,32 ha/3,99%); apicum (58,59 ha/0,45%); formação campestre (50,22 ha/0,39%); aquicultura (45,72 ha/0,35%); pastagem (39,60 ha/0,31%); área urbanizada (8,37 ha/0,06%); e outras áreas não vegetadas (1,26 ha/0,01%). Neste ano, embora a classe formação vegetal esteja ausente, a classe restinga arbórea, sem área nos anos supracitados, cobriu um total de 0,45 ha. Formação florestal, outras lavras e restinga herbácea não estiveram presentes nesse ano.

Quanto ao ano 2000, a classe com maior extensão foi praia, duna e areal, com 4.949,28 ha (38,19%), depois, rio, lagoa e oceano, com 4.844,16 ha (37,38%); formação savânica, com 1.128,60 ha (8,71%); mosaicos de uso, com 972,00 ha (7,50%); mangue, com 547,29 ha (4,22%); pastagem, com 340,29 ha (2,63%); apicum, com 57,78 ha (0,45%); aquicultura, com 52,20 ha (0,40%); formação campestre, com 51,93 ha (0,40%); área urbanizada, com 12,87ha (0,10%); outras áreas não vegetadas, com 3,60 ha (0,03%); e restinga herbácea com 0,10 ha. A formação florestal, a restinga arbórea e outras lavras não teve ocupação nesse ano.

No que tange ao ano de 2005, a classe com maior expressão foi rio, lagoa e oceano, com um total de 4.913,73 ha (37,91%), seguido por praia, duna e areal, com 4.626,09 ha

(35,70%); mosaico de usos, com 1.540,08 ha (11,88%); formação savânica, com 946,71 ha (7,30%); mangue, com 543,24 ha (4,19%); pastagem, com 209,61 ha (1,62%); apicum, com 59,04 ha (0,46%); formação campestre, com 53,73 ha (0,41%); aquicultura, com 52,83 ha (0,41%); área urbanizada, com 12,69 ha (0,10%); restinga herbácea, com 1,71 ha (0,01%); e, com apenas 0,54 ha (0%), restinga arbórea. Nesse ano não foram identificadas as classes formação florestal, lavouras e outras áreas não vegetadas.

Em 2010, as classes predominantes apresentaram dimensões semelhantes ao ano anterior, a saber: rio, lagoa e oceano, com 5.044,50 ha (38,92%); praia, duna e areal, com 4.219,38 ha (32,56%); formação savânica, com 1.442,07 ha (11,13%); mosaico de usos, com 1.361,34 ha (10,50%); mangue, com 511,47 ha (3,95%); pastagem, com 186,66 ha (1,44%); aquicultura, com 57,69 ha (0,45%); apicum, com 53,46 ha (0,41%); formação campestre, com 50,31 ha (0,39%); área urbanizada, com 17,82 ha (0,14%); outras áreas não vegetadas, com 10,98 ha (0,08%); e lavouras, com 4,32 ha (0,03%). Não houve identificação das classes de formação florestal, restinga arbórea e restinga herbácea.

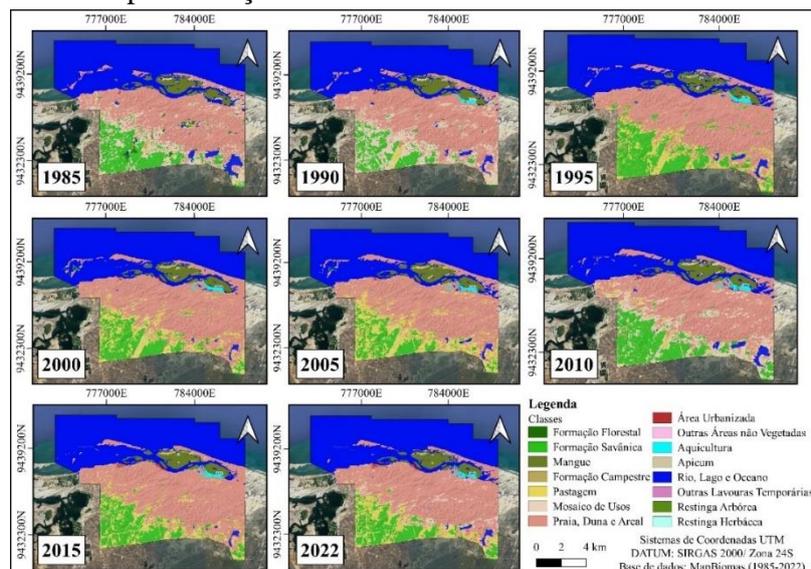
Em relação ao ano de 2015, a ordem de ocupação das classes se deu da seguinte maneira: praia, duna e areal, com 4.980,87 ha (38,43%); rio, lagoa e oceano, com 4.935,15 ha (38,08%); formação savânica, com 1.170,27 ha (9,03%); mosaico de usos, com 1.023,03 ha (7,89%); mangue, com 526,50 ha (4,06%); pastagem, com 115,47 ha (0,89%); aquicultura, com 57,06 ha (0,44%); formação campestre, com 52,38 ha (0,40%); apicum, com 52,29 ha (0,40%); área urbanizada, com 33,12 ha (0,26%); outras áreas não vegetadas, com 5,49 ha (0,04%); lavouras, com 5,13 ha (0,04%); restinga arbórea, com 2,34 ha (0,02%); e restinga herbácea, com 0,90 ha (0,01%). No ano em questão, a única classe que não apresentou dados de uso e ocupação foi a formação florestal.

Em 2022, a classe relacionada à rio, lagoa e oceano ocupa 5.066,82 ha (39,10%); enquanto que a praia, duna e areal apresenta 4.574,97 ha (35,30%); seguida das classes formação savânica, com 1.096,38 ha (8,46%); pastagem, com 1.032,66 ha (7,97%); mangue, com 518,85 ha (4,00%); mosaico de usos, com 354,42 ha (2,73%); outras áreas não vegetadas, com 96,12 ha (0,74%); formação campestre, com 57,33 ha (0,44%); aquicultura, com 53,01 ha (0,41%); apicum, com 45,27 ha (0,35%); área urbanizada, com 43,56 ha (0,34%); lavouras, com 18,09 ha (0,14%); e formação florestal, com 2,52 ha (0,02%). No ano em análise, as classes que não registraram dados de uso e ocupação foram a restinga arbórea e a restinga herbácea.

Considerando a dinâmica de diminuição e aumento em todas as classes supracitadas, evidenciou-se que os dados predominantes corresponderam a Rio, Lagoa e

Oceano e Praia, Duna e Areal. Essas apresentaram maior ocupação na área e pouca variação na sua cobertura ao longo dos 37 anos analisados. Por outro lado, apesar de se tratar de uma reserva de desenvolvimento sustentável, notou-se que as áreas de pastagens aumentaram 7,53%, enquanto a formação savânica teve uma redução de 1,59% entre os anos estudados. As demais classes demonstraram pouca mudança nesse mesmo período. Tais resultados foram espacializados e podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 – Espacialização da cobertura terra na RDS Ponta de Tubarão.



Fonte: acervo da pesquisa (2024).

Buscando aprofundar a identificação espectral desses alvos em 2020, observou-se que o NDVI exibiu valores entre -0,63 - 0,81. O intervalo de -0,16 a 0,18 indicou uma maior ocupação de áreas correspondentes a água e solo exposto, com 3.663,0 ha (28,3%); já a variação de 0,45 a 0,81, com extensão de 2.851,0 ha (22,0%), representou feições de vegetação densa e com maior conservação. Em contrapartida, a classe entre 0,19 e 0,44, com 2.485,0 ha (19,2%) indicou áreas com cobertura esparsa a arbustiva. Por fim, as duas últimas, entre -0,44 e -0,15, com 2.393,0 ha (18,5%), e -0,63 e -0,43, com 1.568,0 ha (12,1%), apontam a ocorrência de ambientes úmidos a aquáticos.

No caso do CO₂FLUX, percebeu-se áreas desde alto a baixo potencial de fluxo do carbono, cuja resposta ficou compreendida a partir do intervalo entre -0,29 e 0,32. Os valores com maior extensão variaram entre -0,29 a -0,14, com 3.752,0 ha (29,0%), equivalentes aos locais com baixo fluxo de CO₂. Por outro lado, no intervalo de 0,18 a 0,32, com uma ocupação de 2.872,0 ha (22,2%), verificou-se as áreas com maior capacidade fotossintética de fluxo de carbono. Posteriormente, aparecem os intervalos -

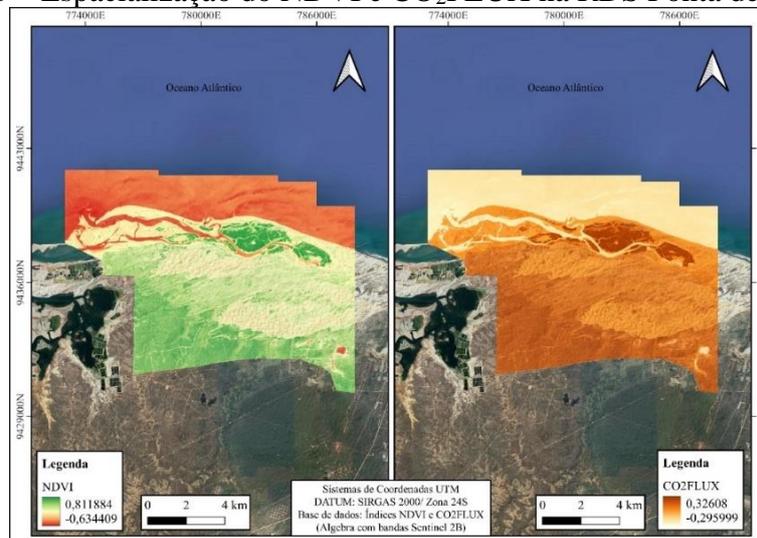
0,04 e -0,07, com 3.531,0 ha (27,2%); 0,08 e 0,17, com 2.540,0 ha (19,6%); e -0,15 e -0,03, com 265,0 ha (2,0%), suscitando os trechos com relevância intermediária em virtude da baixa presença de vegetação (Tabela 2; Figura 3).

Tabela 2 – Quantificação do NDVI e do CO₂FLUX.

NDVI	Área		CO ₂ FLUX	Área	
	h	%		h	%
-0,63 - -0,43	1.568,0	12,1	-0,29 - -0,14	3.752,0	29,0
-0,44 - -0,15	2.393,0	18,5	-0,15 - -0,03	265,0	2,0
-0,16 - 0,18	3.663,0	28,3	-0,04 - 0,07	3.531,0	27,2
0,19 - 0,44	2.485,0	19,2	0,08 - 0,17	2.540,0	19,6
0,45 - 0,81	2.851,0	22,0	0,18 - 0,32	2.872,0	22,2
Total	12.960,0	100	Total	12.960,0	100

Fonte: acervo da pesquisa (2024).

Figura 3 – Espacialização do NDVI e CO₂FLUX na RDS Ponta de Tubarão.



Fonte: acervo da pesquisa (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento do uso e cobertura da terra ao longo dos 37 anos permitiu analisar as mudanças na paisagem Ponta do Tubarão. Por meio da identificação de quinze classes, constatou-se que as principais variações ocorreram nas áreas de pastagem, com um aumento de 7,53%, e na formação savânica, reduzindo em 1,59%. Por se tratar de uma RDS, os usos são determinados pela capacidade de suporte dos ecossistemas e pela renovação dos recursos naturais. A utilização dos índices possibilitou aferir as áreas potenciais aos fluxos de carbono, destacando especialmente as extensões com presença de vegetação conservada, responsáveis por uma maior capacidade fotossintética.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, H. F. P.; CANASSA, N. F.; MACHADO, C. C. C.; TABARELLI, M. Human disturbance is the major driver of vegetation changes in the Caatinga dry forest region. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, p. 1-11, 2023.

BEZERRA, J.M.; MOURA, G.B.A.; SILVA, B.B; LOPES, P.M.O.; SILVA, Ê.F.F. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 73-84, 2014.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. **Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza**. 2024.

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.

GÊ, D. R. F.; CARVALHO, R. G. de.; BRANNSTROM, C.; GORAYEB, A.; SILVA, M. G. F. da. Análise socioambiental do processo de implantação/operação de usinas eólicas na Reserva de Desenvolvimento Sustentável Estadual Ponta do Tubarão, Macau/Guamaré, Rio Grande do Norte – Brasil. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 23, n. 85, p. 115-136, 2022.

IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. **Unidades de Conservação da Natureza Estaduais do RN**. 2024.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MA). **Ecosystem and Human WellBeing: A framework for assessment**. Washington, D.C: Island Press. 2005.

OBERHERR, A. D.; SILVA, J. D. da.; WEBER, M. A.; MARTINS, P. R.; QUEVEDO, D. M. de.; WEYERMÜLLER, A. R. A influência da flexibilização da lei das apps sobre a captação de carbono na ação mitigatória e compensatória para as mudanças climáticas – estudo de caso no município de Ivoti, RS. **Revista do Ministério Público do RS**, n. 94, p. 77-100, 2023.

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, 2001.

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.

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.

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **Patrimônio Mundial Natural e Reservas da Biosfera no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2024.