

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA COBERTURA DOS MANGUEZAIS CONSIDERANDO SEU POTENCIAL PARA O SEQUESTRO DE CO₂ NO LITORAL ORIENTAL AMAZÔNICO

Kely Silva dos SANTOS

Laboratório de Manguezais-LAMA

Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente -PRODEMA

Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil

Laboratório de Manguezais e Centro de Recuperação de Manguezais (LAMA/CERMANGUE)

E-mail: ks.santos@discente.ufma.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8956-1026>

Deuzanir da Conceição Amorim LIMA

Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente- PRODEMA

Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil

Laboratório de Manguezais e Centro de Recuperação de Manguezais (LAMA/CERMANGUE)

E-mail: deuzamiroceano@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8432-5016>

Denilson da Silva BEZERRA

Prof. Dr. Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil

Laboratório de Manguezais, LAMA

E-mail: denilson.bezerra@ufma.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9567-7828>

Prof. Dr. Bruno de Brito Gueiros SOUZA

Instituto Chico Mendes de Biodiversidade, ICMBio, Brasil

E-mail: bruno.gueiros@icmbio.gov.br

Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-2776-8245>

Edson Vicente da SILVA,

Prof. Dr. Universidade Federal do Ceará, Brasil Pesquisador PQ - CNPq

Laboratório de Geoecologia da Paisagem e Planejamento, LAGEPLAN

E-mail: cacauceara@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5688-750X>

Flávia Rebelo MOCHEL

Profa. Dra. Universidade Federal do Maranhão, UFMA, Brasil

Laboratório de Manguezais e Centro de Recuperação de Manguezais, LAMA/CERMANGUE

E-mail: flavia.mochel@ufma.br

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5911-3171>

*Recebido
Maio de 2026*

*Aceito
Junho de 2026*

*Publicado
Junho de 2026*

Resumo: Os manguezais são um dos maiores sequestradores de carbono do planeta, sendo um importante elemento de mitigação dos impactos das mudanças climáticas globais. Neste trabalho buscou-se analisar a dinâmica espaço temporal da cobertura de mangue como subsídio para estudos sobre o potencial de sequestro de carbono no litoral oriental amazônico e quantificar as áreas perdidas do manguezal entre 1986 e 2020. Os dados, do projeto MAPBIOMAS, foram classificados segundo seu estágio de sucessão, com base na idade registrada para cada pixel. Os manguezais primários, em 2020, totalizaram uma área de 4.599,98 km², que representa um estoque expressivo de carbono, para essa região. Os manguezais secundários, apresentaram uma área de 828,94 km. A avaliação mais detalhada, ano a ano, permitiu compreender melhor a dinâmica de ganho de áreas, onde observou-se um padrão decrescente na capacidade de ganho efetivo em área, existindo ao longo do tempo uma clara tendência de queda em seus valores.

Palavras-chave: manguezal; mudança da paisagem; estoque de carbono; emissão de carbono

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF MANGROVE COVER CONSIDERING ITS POTENTIAL FOR CO₂ SEQUESTRATION ON THE EASTERN AMAZON COAST

Abstract: Mangroves are one of the largest carbon sinks on the planet and an important element in mitigating the effects of global climate change. This study sought to analyse the spatio-temporal dynamics of mangrove cover to support studies on the potential of carbon sequestration on the eastern Amazon coast and to quantify the mangrove areas lost between 1986 and 2020. Data from the MAPBIOMAS project were classified by succession stage based on the age recorded for each pixel. In 2020, primary mangroves covered an area of 4,599.98 km², representing a significant carbon stock for this region. Secondary mangroves totaled 828.94 km². A more detailed evaluation, year by year, made it possible to better understand the dynamics of area increase. A decreasing pattern in the effective capacity of area increase was observed, with a clear downward trend in values over time.

Keywords: mangrove; landscape change; carbon stock; carbon footprint,

DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA COBERTURA DE LOS MANGLARES CONSIDERANDO SU POTENCIAL PARA EL SECUESTRO DE CO₂ EN EL LITORAL ORIENTAL AMAZÓNICO

Resumen: Los manglares son uno de los mayores secuestradores de carbono del planeta, constituyendo un importante elemento de mitigación de los impactos del cambio climático global. En este trabajo se buscó analizar la dinámica espacio-temporal de la cobertura de manglar como subsidio para estudios sobre el potencial de secuestro de carbono en el litoral oriental amazónico y cuantificar las áreas perdidas de manglar entre 1986 y 2020. Los datos, provenientes del proyecto MAPBIOMAS, fueron clasificados según su estadio de sucesión, con base en la edad registrada para cada píxel. Los manglares primarios, en 2020, totalizaron un área de 4.599,98 km², lo que representa un stock expresivo de carbono para esta región. Los manglares secundarios presentaron un área de 828,94 km. La evaluación más detallada, año tras año, permitió comprender mejor la dinámica de ganancia de áreas, en la que se observó un patrón decreciente en la capacidad de ganancia efectiva de superficie, existiendo a lo largo del tiempo una clara tendencia de disminución en sus valores.

Palabras clave: manglares; cambio de paisaje; stock de carbono; Emisiones de carbono

INTRODUÇÃO

Os manguezais, ecossistemas indispensáveis para a minimização do efeito estufa, ocupam cerca de 152.361 km² do litoral em todo o mundo, sendo encontrados em 123 países. O Brasil, com 13.000 km² (8,5% do total mundial), é o segundo país em área total de manguezais. Destaca-se que, no litoral da Amazônia brasileira, entre os estados do Maranhão e Pará, está a maior área contínua de manguezais do mundo, com uma área estimada de 7.433 km² (Nascimento *et al.*, 2013).

Com base em extenso levantamento florístico, a vegetação arbórea dos manguezais amazônicos é composta principalmente por três espécies de mangue vermelho (*Rhizophora mangle*, *R. racemosa* e *R. harrisonii*), duas espécies de Siriba (*Avicennia germinans* e *A. schaueriana*), pela tinteira (*Laguncularia racemosa*) e pelo mangue-de-botão (*Conocarpus erectus*) (Bonifácio *et al.*, 2011).

Para a zona costeira, os manguezais, provêm bens e serviços ecológicos, além da relevância social, como observado pela interação de diversos segmentos sociais com estes ecossistemas. Pesquisas que indicam sua importância econômica, dentre os bens e serviços seus valores anuais estimados estão entre US\$ 200.000,00 a 900.000,00 por km² (Wells *et al.*, 2006).

Para além do valor monetário advindo do extrativismo vegetal e animal, bem como outras formas de comércio de produtos deste ecossistema e do valor agregado dos serviços ambientais prestados, as extensas áreas de manguezais, possuem características paisagísticas únicas que cada vez mais vem atraindo pessoas que procuram o turismo ecológico como lazer. Isso fortalece a necessidade de um ambiente inteiramente sustentável, visto a crescente demanda de recursos naturais e sua escassez, além da degradação ambiental em detrimento da economia mundial.

O uso da terra, além das outras fontes de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), causam fluxos de gases pela exploração madeireira na floresta, pelo manejo das pastagens e pelas queimadas. Para além disso, a supressão vegetal reduz a evapotranspiração, diminuindo o suprimento de água para a atmosfera (Fearnside, 2020). Tais efeitos refletem diretamente nos índices de biodiversidade, alterando significativamente a riqueza e a uniformidade de determinado ecossistema.

A intensificação da interferência antrópica na natureza a partir do século XVIII com a revolução industrial resultou no aumento das concentrações dos gases causadores do efeito estufa, as crescentes concentrações de gases de efeito estufa, como H₂O, CH₄, N₂O e CO₂,

este último se destaca pela maior concentração na atmosfera, refletem diretamente nas alterações da temperatura global (Arruda; Reynaud; Schaefer, 2020).

Dentre as estratégias para controlar o aquecimento global, todas incluem a Remoção de Dióxido de Carbono (CDR), que, entre outras medidas, prevê o sequestro de carbono no solo, oferecendo benefícios como a melhoria da biodiversidade, qualidade do solo, e segurança alimentar local (IPCC, 2018).

Dentre os maiores sequestradores de carbono do planeta, com potencial de sequestro de carbono de 10 a 50 vezes maior que os ecossistemas terrestres (Copertino, 2011), os ecossistemas costeiros vegetados são essenciais na atenuação dos efeitos das mudanças climáticas. Estimativas indicam que no período de um ano, eles podem capturar e estocar mais carbono do que o total que é emitido pelos veículos automotores.

Além disso, após a estabilização da fotossíntese, suas taxas fotossintéticas não diminuem significativamente por quase um século (Alongi, 2009), análises comprovam que os manguezais alocam proporcionalmente mais carbono abaixo do solo do que as árvores terrestres (Lovelock, 2008). Isso evidencia o potencial do manguezal como verdadeiros sumidouros de carbono.

Walcker *et al* (2018) aponta que o tempo desde o último distúrbio é um parâmetro chave, que modula significativamente os estoques de carbono e determina a estrutura da floresta, tem sido negligenciado. Desta forma ele sugere que as projeções globais dos reservatórios acima e abaixo do solo do estoque de carbono precisam considerar as estruturas de idade dos manguezais, que resultam de mudanças históricas na morfologia costeira.

Apesar do destaque internacional que o Brasil apresenta em termos de área de manguezal, não existe nenhuma política pública brasileira de acompanhamento sistemático de perdas de áreas e de serviços/bens ambientais prestados pelos manguezais à zona costeira (Bezerra *et al.*, 2014). Desta forma, trabalhos, como este, que quantifiquem de forma segura tais taxas contribuirá nas discussões nacionais sobre o tema.

A legislação, que por vezes é um mecanismo eficaz para permitir a conservação ambiental, outras vezes Figura como vilã. Pesquisadores Brasileiros apontam para um regresso nas políticas ambientais de proteção de manguezais em detrimento ao benefício do desenvolvimento imobiliário. Felizmente, o judiciário considerou a polêmica política inconstitucional, permitindo a continuidade da proteção de seus manguezais (Bezerra *et al.*, 2022).

Cabe ressaltar, que apesar da grande área de ocorrência do manguezal no território brasileiro, não há compreensão consistente da dinâmica de alterações na área de manguezal no

Brasil, e nem como, eventuais cenários de perdas de sua área podem influenciar o fornecimento de bens e serviço do manguezal à zona costeira brasileira.

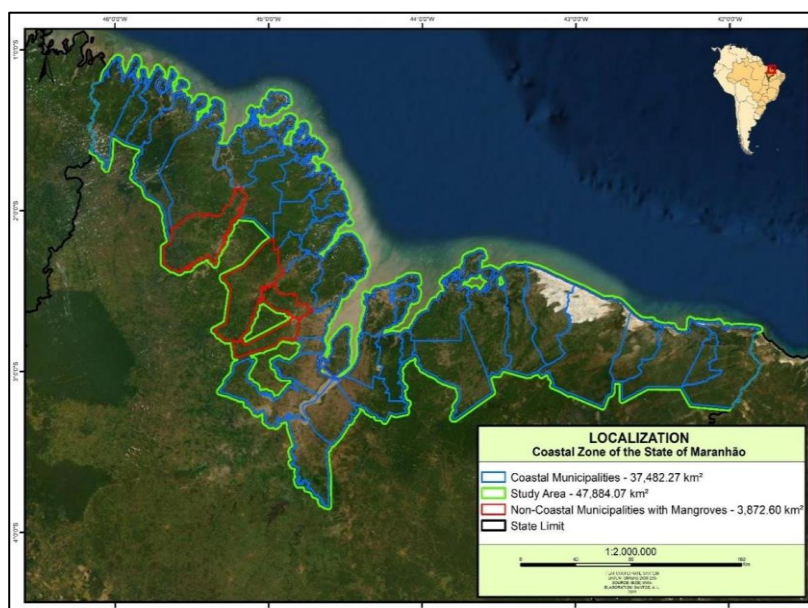
Com a temática do sequestro de carbono dos manguezais, a pesquisa propõe analisar a dinâmica espaço-temporal da cobertura de mangue como subsidio para, em trabalhos futuros, entender seu potencial de sequestro de carbono no litoral oriental amazônico. O objetivo do presente trabalho, busca quantificar as áreas perdidas do manguezal entre 1986 e 2020; quantificar os mangues de crescimento secundário, suas idades e perdas no período analisado; e validar a estimativa da idade dos bosques de mangue.

METODOLOGIA

Área de Estudo

A área em análise compõe toda a Zona Costeira do Maranhão (ZCEM), estando situada na região Norte do estado. Com uma extensão de 640km, entre a foz dos rios Gurupi e Parnaíba, o litoral do Maranhão é compartimentado em 5 setores com características fisiográficas bem diferenciadas, sendo o Golfão Maranhense, o Litoral Oriental, Litoral Ocidental, a Baixada Maranhense e o Parque Estadual Marinho do Parcel Manuel Luís (El-Robrini *et al.*, 2018) (Figura 1).

Figura 1 - Os polígonos com os limites de cor azul representam os municípios que estão legalmente inseridos na faixa terrestre da ZCEM; os polígonos com os limites de cor vermelha representam os municípios que não compõem a ZCEM, mas possuem alguma área com cobertura de manguezais; O polígono com os limites de cor verde representa a soma das duas áreas anteriores, acrescida de um raio de 2 km



Fonte: Autoria própria (2024).

Na pesquisa, a área calculada para a ZCEM, considerando apenas os limites administrativos (Portaria mma n. 34, de 2 de fevereiro de 2021 – portaria MMA n. 34, de 2 de fevereiro de 2021 - DOU - Imprensa Nacional, 2021), foi de 37.482,27 km², entretanto alguns municípios não inseridos na faixa terrestre da zona costeira apresentam cobertura de manguezais, desta forma tais municípios foram considerados na delimitação da área de estudo. Devido a algumas áreas desse ecossistema extrapolarem determinados pontos ao longo da delimitação municipal, foi gerado um buffer de 2 km a partir de seus limites defrontantes ao mar, totalizando 47.884,07 km². A área identificada para esse ecossistema totalizou uma extensão de 5.428,92 km².

De acordo com (Bonifácio *et al.*, 2011), os principais fatores ambientais desta área caracterizam-se pelas amplas variações na altura das marés, mudanças na salinidade, elevados aportes de água doce por rios e chuvas intensas, temperaturas quentes, e altas taxas de sedimentação e erosão.

De acordo com dados georreferenciados do banco de dados do MMA (Brasil, 2022) e do INCRA (2022), foi verificado que a ZCEM abrange cerca de 17 unidades de conservação e 24 áreas de Quilombolas. A área do Golfão Maranhense abrange um total de sete unidades de conservação, sendo elas a Área de Proteção Ambiental das Reentrâncias Maranhenses, a Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense, o Parque Estadual do Sítio do Rangedor, a Área de Proteção Ambiental do Itapiracó, o Parque Estadual do Bacanga, a Área de Proteção Ambiental da Região do Maracanã e a Reserva Extrativista da Baía do Tubarão; e duas comunidades Quilombolas, que são as de Alcântara e Jacaré dos Pretos.

Além da extensa área de manguezais, restingas e dunas, esta região dispõe de lagos e lagoas naturais, nascentes, veredas e uma grande densidade fluvial, sendo alguns rios com extensão que excede 600 metros de largura, atribuindo a este território extensa Área de Preservação Permanente.

Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi desenvolvida em três principais etapas, sendo elas: concepção, onde foram estabelecidos os principais objetivos, delimitada a área de estudo e variáveis ambientais intrínsecas ao objeto de estudo; posteriormente a de implementação, em que foram iniciados os trabalhos em ambiente computacional para a adaptação do script; por fim, após validação, na etapa de análise, foi executada modelagem para toda a área de estudo, com as análises estatísticas para embasar os resultados.

Idade, extensão, incremento, perda e saldo de incremento dos manguezais

Todos os dados matriciais e seus subprodutos são oriundos de séries anuais de uso e cobertura da terra produzidas pelo Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2021), disponível através do link <http://mapbiomas.org>. O produto possui uma resolução espacial de 30 m cobrindo o intervalo temporal de 1985 a 2021.

Os dados de cobertura dos manguezais da ZCEM, foram classificados segundo seu estágio de sucessão, com base na idade registrada para cada pixel. Para isso, consideramos para a classe de manguezais em estágio primários de sucessão, toda a cobertura detectada para o início da série temporal (1985) e todas as novas áreas de manguezais registradas a partir do ano seguinte foram consideradas como em estágio secundário de sucessão.

Nesta etapa da pesquisa foram gerados 4 conjuntos distintos dados de cobertura de manguezais que se complementam, sendo eles de extensão, incremento, perda e idade. Considera-se por: extensão, toda a cobertura de manguezais para determinado ano; incremento, a área que houve rebrota ou colonização de novos manguezais em relação ao ano anterior; perda, os locais que no ano anterior havia manguezais e no ano de referência foi detectado sua ausência; e, por fim, idade, sendo os anos consecutivos que o manguezal permaneceu desde sua última perda.

A metodologia usada para identificar áreas de manguezais secundários e determinar suas idades, seguimos uma metodologia bastante difundida por outros (Heinrich *et al.*, 2021; Silva Junior *et al.*, 2020). Foi realizada a reclassificação das áreas de manguezais e todas as outras feições para os valores 1 e 0, respectivamente, transformando-os em mapas binários. Em que o valor 1 representa a existência de manguezais e o valor 0 a sua ausência.

Para o mapeamento do incremento anual dos manguezais secundários, foi utilizado os dados gerados na etapa anterior, onde a condição para sua detecção é de que em cada pixel classificado como manguezal (valor 1) no ano de referência, no ano anterior estivesse classificado como ausência de manguezal (valor 0). Dessa forma foi possível detectar as áreas de manguezais secundários, bem como seu ganho em área. Devido a inexistência de dados de cobertura anteriores a 1985, os mapas de incremento iniciaram em 1986, época da primeira transição (1985 a 1986).

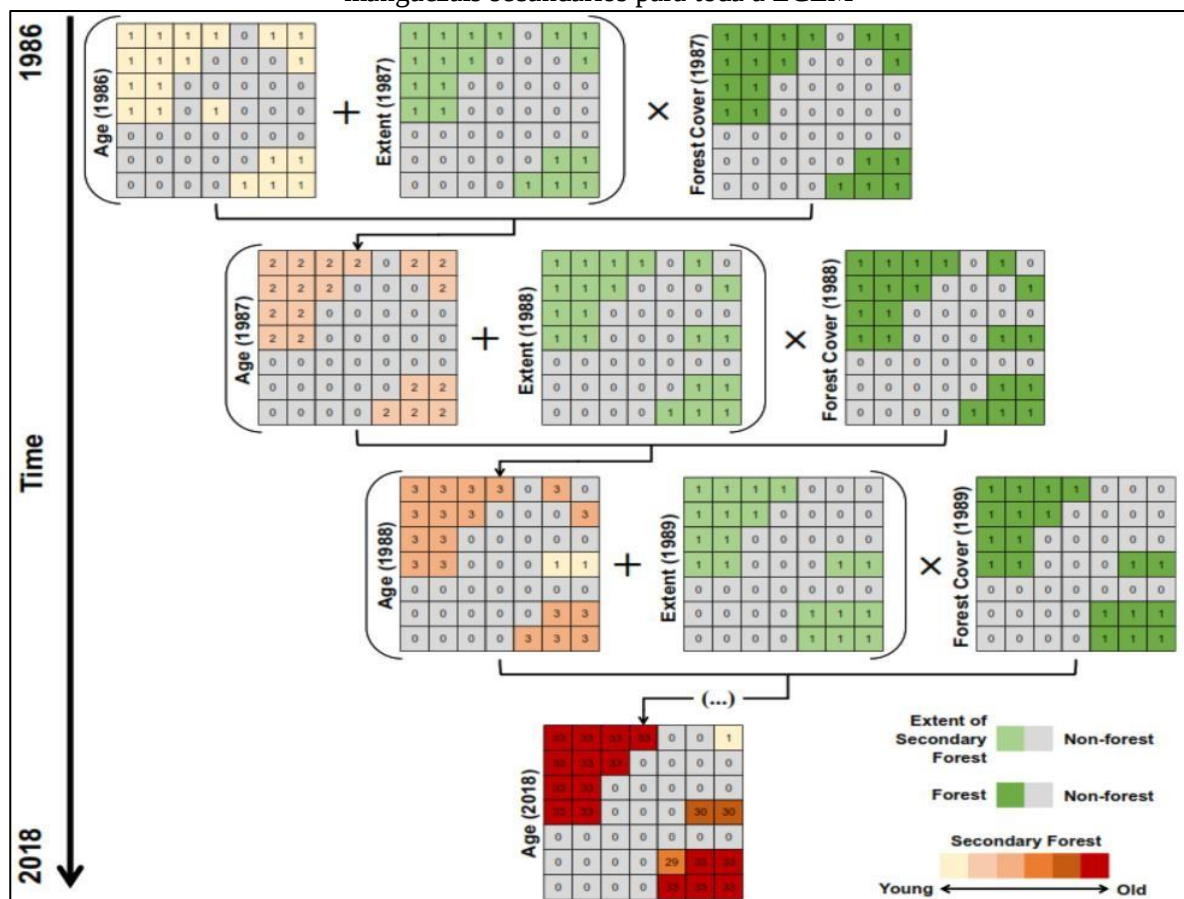
A extensão anual dos manguezais secundários foi resultado da soma do incremento do ano analisado com a extensão do ano anterior, exceto o de 1986, que equivale incremento e a idade para o mesmo período, para obter mapas binários, os pixels de valores maiores que 1

foram reclassificados para 1. O resultado desta soma não considera as áreas de manguezais secundários perdida no ano anterior ao analisado. Desta forma, para cada ano, o produto da soma foi multiplicado pelo mapa binário de cobertura total de manguezais do mesmo ano.

O dado de perda foi subproduto do cálculo da extensão, em que a remoção dos pixels que foram perdidos nos anos anteriores ao analisado é um produto da área anual perdida de manguezais secundários, compondo o conjunto de dados de perda.

O cálculo do conjunto de dados de idade foi semelhante ao de extensão, sendo produto da soma da idade do ano anterior com a extensão do ano analisado, e para remoção das áreas perdidas, foi feita a multiplicação pela extensão do ano corrente (Figura 2). O cálculo foi executado até o ano de 2020, sendo os valores dos pixels o resultado da idade daquela cobertura vegetal.

Figura 2 - Modelo conceitual utilizado para calcular a idade, extensão, incremento e perda dos manguezais secundários para toda a ZCEM



Fonte: Silva Junior (2024).

O saldo de incremento foi subproduto dos dados de incremento e de perda, a qual foi realizada a subtração da área das novas áreas de manguezais (incremento) pela área que havia sido detectado uma perda no mesmo ano, chegando ao valor efetivo de acreção de

manguezais.

Para avaliar as áreas de manguezais primários, utilizou-se uma abordagem semelhante a utilizada para manguezais secundários, no entanto considerou-se apenas a área classificada como manguezais para o ano de 1985, início da série temporal, como de sucessão primária e, nos anos posteriores, quantificou-se exclusivamente as perdas relativas a essa área em 1985. Mesmo que a série temporal seja considerada, relativamente, extensa, ela não é longa o suficiente para detectar novas áreas de manguezais primários, dessa forma não é possível chegar a dados de incremento para os manguezais secundários.

Para hierarquizar os estágios sucessionais da vegetação secundária mais recente, tomou-se por base a classificação utilizada por Walker (2018), com as devidas alterações. Dessa forma resultou nos estágios pioneiro (1 a 3 anos), secundário inicial (4 a 6 anos), secundário intermediário (7 a 20 anos), secundários tardios (21 a 35 anos) e de clímax (acima de 35 anos).

Idade, extensão, incremento, perda e saldo de incremento dos manguezais

A aplicação de equações alométricas, que utilizam o Diâmetro a Altura do Peito (DAP), altura, densidade da madeira e outras variáveis é a opção mais adequada para estimar biomassa florestal (VICTORIA HIGA *et al.*, 2014). Portanto, para a validação dos dados obtidos por sensoriamento remoto, utilizou-se informações de pesquisas na região, as quais derivam o volume da biomassa florestal para a densidade de carbono acima do solo utilizando equações alométrica para sistemas naturais, com fitofisionomia de mangue que usa as variáveis de DAP e densidade da madeira.

Para validar as estimativas obtidas a partir do modelo proposto, foram utilizados dados disponibilizados por pesquisadores do Instituto Federal do Maranhão, os quais avaliaram a AGB em parcelas instaladas nos municípios de Alcântara – MA e Raposa – MA (11 amostras em 9 locais). Observando as diferentes áreas amostradas, os valores foram extrapolados a unidade de um hectare.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Idade, incremento, extensão e perda de manguezais

Através do método proposto, adaptado e implementado na plataforma do Google Earth Engine para a feição de manguezais, foi possível obter as estimativas de idade e as áreas de incremento, extensão e de perda anual de toda a extensão de manguezais que cobrem a região

costeira do Maranhão.

Estimamos que a área de manguezal primário para o ano base (1985), bem como as áreas perdidas ano a ano de cobertura de mangue até o ano de 2020. Portanto, devido a série temporal dos manguezais secundários está limitada a idade de 35 anos, ainda não é possível contabilizar novas áreas de manguezais primários após sua sucessão, consideradas neste estudo coberturas vegetais com idade mínima de 100 anos, não sendo possível obter dados de idade e de incremento.

Vale ressaltar que, o método estima as áreas e idade com base nas informações existentes para os anos anteriores, devido a isso a série de dados de idade, extensão e incremento iniciam a partir do ano de 1986. Já as informações da área perdida de manguezal foram estabelecidas a partir de 1987, em razão do seu cálculo ponderar a extensão no ano anterior (1986) Tabela 1 e 2.

Tabela 1 - Extensão, incremento, incremento líquido e perda dos manguezais secundários 1986 - 2002

Ano	Incremento (km ²)	Perda (km ²)	Incremento - Perda (km ²)	Extensão Líquida (km ²)
1986	54,93	S/I	S/I	54,93
1987	4,00	2,63	1,37	56,40
1988	50,46	3,48	46,98	103,37
1989	139,05	8,51	130,54	233,94
1990	49,62	10,51	39,11	273,09
1991	70,12	22,62	47,50	320,63
1992	34,18	17,51	16,68	337,36
1993	91,85	27,51	64,34	401,72
1994	42,75	15,75	27,00	428,79
1995	57,33	22,88	34,44	463,29
1996	49,96	28,65	21,31	484,61
1997	32,25	28,56	3,69	488,30
1998	59,23	36,02	23,21	511,50
1999	83,95	42,51	41,44	552,90
2000	116,75	44,10	72,65	625,54
2001	68,68	40,68	28,00	653,52
2002	43,52	38,15	5,37	658,88
TOTAL	1 048,63	390,07	603,63	6 648,77

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Extensão, incremento, incremento líquido e perda dos manguezais secundários 2003 - 2020

<i>Ano</i>	Incremento (km²)	Perda (km²)	Incremento - Perda (km²)	Extensão Líquida (km²)
2003	46,37	36,60	9,77	668,68
2004	52,77	44,04	8,73	677,45
2005	51,05	40,54	10,51	688,00
2006	53,91	34,98	18,93	706,90
2007	47,69	37,51	10,18	717,12
2008	47,56	35,74	11,82	728,99
2009	56,20	35,41	20,79	749,82
2010	54,23	35,88	18,35	768,19
2011	51,79	38,65	13,14	781,37
2012	51,29	61,00	-9,72	771,68
2013	48,46	46,35	2,12	773,80
2014	72,92	38,33	34,59	808,41
2015	48,20	33,66	14,54	822,93
2016	42,73	46,19	-3,46	819,53
2017	47,85	47,67	0,18	819,72
2018	9,64	8,22	1,42	821,14
2019	16,36	9,70	6,66	827,81
2020	18,24	17,11	1,13	828,94
TOTAL	817,26	647,58	169,68	13 780,48

Fonte: Autoria própria.

Manguezais Primários

Os manguezais em estágio primário de sucessão apresentaram uma distribuição heterogênea nos setores da ZCEM, com uma grande concentração desse ecossistema ao longo do Litoral Ocidental (Reentrâncias Maranhenses) e Golfão Maranhense, com grande aporte de águas fluviais, em detrimento do Litoral Oriental, com predomínio de dunas e praias. Devido a limitada escala temporal nos dados, ainda não é possível obter dados de incremento, bem como o saldo de incremento.

Com uma perda total de 17 km² em área de manguezal maduro, ao longo de 35 anos houve uma perda média anual de 0,47 km². Chama a atenção a inexpressividade de tais valores,

visto que a área perdida em 35 anos chegou apenas a 0,37% da cobertura em 1985 (Tabela 3).

Tabela 3 - Extensão e perda dos manguezais primários 1985 - 2020

<i>Ano</i>	Extensão (km²)	Perda (km²)	Perda (%)
1985	4.616,98	S/I	S/I
1986	4.616,96	0,02	0,09
1987	4.616,96	0,01	0,04
1988	4.616,88	0,08	0,48
1989	4.615,97	0,90	5,31
1990	4.615,84	0,14	0,80
1991	4.613,86	1,97	11,62
1992	4.613,85	0,02	0,11
1993	4.613,29	0,56	3,29
1994	4.613,27	0,01	0,08
1995	4.613,26	0,01	0,06
1996	4.613,24	0,03	0,15
1997	4.613,22	0,02	0,11
1998	4.613,18	0,04	0,23
1999	4.613,14	0,04	0,23
2000	4.612,48	0,66	3,91
2001	4.611,83	0,64	3,78
2002	4.610,67	1,16	6,82
2003	4.610,11	0,57	3,33
2004	4.609,61	0,50	2,95
2005	4.608,84	0,77	4,52
2006	4.608,29	0,54	3,20
2007	4.607,40	0,89	5,23
2008	4.607,01	0,40	2,34
2009	4.606,52	0,49	2,88
2010	4.606,26	0,26	1,50
2011	4.605,70	0,56	3,30
2012	4.604,86	0,84	4,95
2013	4.603,67	1,18	6,96
2014	4.602,86	0,81	4,77
2015	4.602,08	0,78	4,61
2016	4.601,44	0,64	3,78
2017	4.600,85	0,58	3,42
2018	4.600,63	0,23	1,35
2019	4.600,40	0,23	1,36
2020	4.599,98	0,41	2,44
TOTAL		17,00	100,00

Fonte: Autoria própria.

O ano de 1991, com 11,62% da perda total, foi a época que apresentou o maior aumento nos valores de desmatamento, entretanto é estatisticamente considerado como um outliers ($>0,013 \text{ km}^2$), sendo um valor atípico que foge ao padrão observado. Apesar de apresentar o maior valor, em uma análise decadal, esse período foi o que totalizou a menor área desmatada ($\Sigma=2,83 \text{ km}^2$) e a menor média ($\bar{x}= 0,28 \text{ km}^2$). Esse valor inesperado pode ser explicado por

alguma atividade econômica ou fenômeno natural que acentuou excepcionalmente a supressão vegetal, mas foi uma perturbação pontual que se estabilizou no ano seguinte.

Já nas décadas seguintes, 2000 e 2010, totalizando 6,62 km² e 6,12 km², respectivamente, o desmatamento se intensificou, sendo a de 2000 a que mais se destacou, representando um aumento de 234%. Detectou-se um desmatamento médio anual de 0,66 km² e 0,61 km², respectivamente, para o período analisado.

Os dados apontam para uma consolidação das taxas de perda dos manguezais maduros, com uma tímida retração no desmatamento ao longo dos anos, mas ainda acentuado quando comparados aos dados do início da série temporal.

Manguezais Secundários

Os manguezais em estágio secundário de sucessão apresentaram um padrão similar aos de sucessão primária, com uma distribuição heterogênea ao longo dos setores da ZCEM, com maior concentração no Litoral Ocidental e no Golfão Maranhense em detrimento do Litoral Oriental. Entretanto, mais fragmentada por toda extensão da área de estudo, com regiões mais densas em áreas mais distantes da costa, próximas a corpos hídricos com alguma influência fluviomarinha.

Ao longo de todo o período observado, esse ecossistema demonstrou grande capacidade em ganho e perda de áreas, mas seus valores totais não representam a extensão de floresta naquele período. Devido a sua grande dinâmica, uma área possui vários ciclos de ascensão e desmatamento, podendo seu cálculo repetir-se mais de uma vez. Portanto, foi calculado o saldo de incremento, subtraindo o que foi perdido da área que houve incremento, obtendo seu aumento efetivo.

Foi observado um incremento de total de 1.982,12 km², chegando a um ganho anual médio de 56,63 km². Os aumentos mais expressivos se concentraram no período entre o final da década de 1980 e início da década de 2000, sendo o maior valor identificado para o ano de 1989, com 152,43 km², representando 7,69% de todo o incremento. Relativo ao mesmo período, a perda de manguezais foi desprezível, chegando a 8,57 km² (0,78%), refletindo no maior ganho líquido detectado para toda a série temporal, com 143,86 km² (17,31%).

Em contrapartida, coincidindo com o início da série dos dados de perda, o ano de 1987 foi o período que houve menor ganho em área de manguezais, com um aumento de apenas 4 km², retratando apenas 0,20% do total. Considerando o mesmo intervalo temporal, houve uma perda de 2,63 km² (0,24%), revelando um saldo de incremento de 1,37 km² (0,16%). Esse ano

se destaca pela menor perda do ecossistema.

Nesse estágio de sucessão os manguezais apresentaram uma perda de 1.095,61 km², com uma perda média de 32,22 km² ao ano. A maior perda detectada foi para o ano de 2012, totalizando 63,82 km², com 5,83% de toda área de perdida. Esse foi o ano mais alarmante quando se considera o ganho efetivo em áreas de manguezais, pois houve um incremento de apenas 55,02 km² (2,78%), refletindo em um déficit de ganho líquido de -8,80 km² (-1,06%).

Os manguezais secundários somaram as maiores perdas na década de 2000, seguido por 2010 e 1990, totalizando 413,81 km² (38,93%), 393,43 km² (37,02%) e 255,61 km² (24,05%), respectivamente. Seus valores médios anuais foram de 41,38 km², 39,34 km² e 25,56 km², na devida ordem.

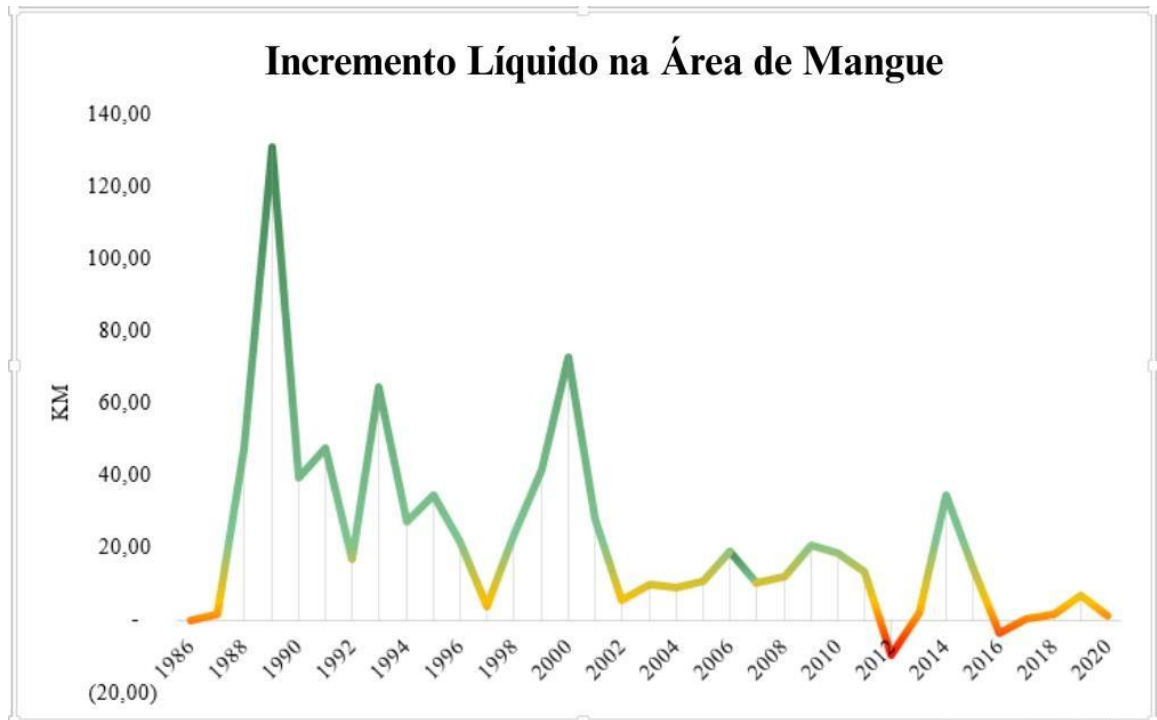
Os maiores ganhos de área foram detectados na década de 2000, seguido por 1990 e 2010, somando 625,35 km² (36,78%), 595,17 km² (35,00%) e 479,83 km² (28,22%) e com as médias anuais de 62,53 km², 59,52 km² e 47,98 km², ambos na mesma ordem.

Considerando o saldo de incremento, foi detectado um ganho efetivo total em área de manguezais de 831,29 km² ao longo de 34 anos (1987 a 2020), com um saldo de incremento anual médio de 24,45 km². Os aumentos mais substanciais se concentraram entre o final da década de 1980 e início da década de 2000, com a maior taxa para o ano de 1989, conforme citado anteriormente.

Durante 34 anos (1987 a 2020), os manguezais vêm demonstrando um padrão decrescente de ganho líquido (Figura 4). O maior ganho efetivo foi detectado para a década de 1990, seguido pelas décadas de 2000 e 2010, com seus valores totais chegando a 339,56 km², 211,53 km² e 86,40 km² e com suas médias anuais de 33,96 km², 21,15 km² e 8,64 km², ambos na mesma ordem.

Foram detectadas taxas negativas de saldo de incremento para os anos de 2012, 2017 e 2016, alcançando -8,80 km², -3,27 km² e -2,59 km². Nesses períodos, apesar de apresentarem um incremento total (55,02 km² para 2012, 50,27 km² para 2017 e 47,23 km² para 2016) próximo a média anual (56,63 km²), suas perdas (63,82 km² para 2012, 53,54 km² para 2017 e 49,81 km² para 2016) foram superiores à média de perda anual (32,22 km²).

Figura 3 - Modelo conceitual utilizado para calcular a idade, extensão, incremento e perda dos manguezais secundários para toda a ZCEM



Fonte: Autoria própria (2024).

Com base nas informações, os manguezais vêm perdendo a capacidade de incremento na sua extensão, existindo uma clara tendência de queda, com as médias anuais por décadas diminuindo ao longo do tempo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação mais detalhado ano a ano dos manguezais em estágio de sucessão secundária permitiram compreender melhor a dinâmica efetiva das alterações em sua área. Em que, apesar de ter sido detectado um grande incremento e um bom ganho efetivo total em área de manguezais de 773,28 km² ao longo de 34 anos, observou-se um padrão decrescente na capacidade de ganho efetivo em área desse ecossistema. Com base nas informações, os manguezais vêm perdendo a capacidade de incremento na sua extensão, existindo uma clara tendência de queda, com as médias anuais por décadas diminuindo ao longo do tempo.

O manguezal, quando em equilíbrio, permite a ciclagem de nutrientes, a qual possibilita o estabelecimento e o desenvolvimento da fauna e flora específica deste ambiente. O ciclo do carbono neste ambiente é bem dinâmico e permeia todas as etapas de fluxo e energia, sendo uma parte redistribuída ao ambiente e outra fica armazenada em seu substrato lamoso e na biomassa da cobertura vegetal.

Conforme observado, a região que compreende a maior área contínua de manguezais do mundo e que estão inseridas, ou não, em alguma localidade protegida por algum nível governamental de proteção ambiental apresentam imenso potencial para exploração sustentável. Dessa forma, o fomento a pesquisas e a regulamentação do mercado de carbono no Brasil permitirá o desenvolvimento regional.

REFERÊNCIAS

- ALONGI, D. M. **The energetics of mangrove forests**. 1. ed. Amsterdam: Springer Netherlands, 2009.
- ARRUDA, D. M.; REYNAUD-SCHAEFER, C. E. G. Dinâmica climática e biogeográfica do Brasil no Último Máximo Glacial: o estado da arte. **Estudos Avançados**, v. 34, n. 98, p. 187-198, maio 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portaria MMA nº 34, de 2 de fevereiro de 2021. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 23, p. 53, 4 fev. 2021.
- BEZERRA, D. *et al.* Simulating sea-level rise impacts on mangrove ecosystem adjacent to anthropic areas: The case of Maranhão Island, Brazilian Northeast. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 9, p. 188-198, 1 jan. 2014.
- BEZERRA, D. da S. *et al.* Brazil's mangroves: Natural carbon storage. **Science**, v. 375, n. 6586, p. 1239, 18 mar. 2022.
- BONIFÁCIO, M. *et al.* **Amazônia Maranhense**: diversidade e conservação. Belém: Editora do Museu Paraense Emílio Goeldi, 2011.
- COPERTINO, M. da S. Add coastal vegetation to the climate critical list. **Nature**, v. 473, n. 7347, p. 255, 18 maio 2011.
- L-ROBRINI, M. *et al.* Maranhão. In: MUEHE, Dieter (org.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. cap. 3, p. 167-240.
- FEARNSIDE, P. M. **Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais**. Manaus: Editora do INPA, 2020. v. 1, p. 21-38.
- HEINRICH, V. H. A. *et al.* Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 1785, 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais**. Suíça: IPCC, 2018. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for

policymakers. In: **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 1–27.

LOVELOCK, C. E. Soil respiration and belowground carbon allocation in mangrove forests. **Ecosystems**, p. 342–354, fev. 2008.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass**: Mapeamento anual de cobertura e uso da terra do Brasil - Coleção 6. São Paulo: MapBiomass, 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 14 jun. 2022.

SILVA JUNIOR, C. H. L. *et al.* Benchmark maps of 33 years of secondary forest age for Brazil. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 269, 2020.

VICTORIA HIGA, R. C. *et al.* Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2014. (Embrapa Florestas. Documentos, 266).

WALCKER, R. *et al.* Control of "blue carbon" storage by mangrove ageing: Evidence from a 66-year chronosequence in French Guiana. **Global Change Biology**, v. 24, n. 6, p. 2325–2338, 1 jun. 2018.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) que financiou a esta pesquisa através da bolsa de demanda social. Esta pesquisa foi apoiada financeiramente pelo Fundo Nacional de Biodiversidade (FUNBIO) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) através do projeto “Quantificação das Perdas de Estoques de Carbono Florestal Devido ao Desmatamento e Fragmentação Florestal para o Estado do Maranhão”, termo 000114/2021.