

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS PESQUEIROS E
ENGENHARIA DE PESCA

GABRIELA APARECIDA MACHADO MENDES

EVIDÊNCIAS DO EFEITO DO AQUECIMENTO GLOBAL SOBRE A
RESERVA EXTRATIVISTA MARINHA (RESEX) DO DELTA DO
PARNAÍBA (PI)

Toledo

2022

GABRIELA APARECIDA MACHADO MENDES

EVIDÊNCIAS DO EFEITO DO AQUECIMENTO GLOBAL SOBRE A
RESERVA EXTRATIVISTA MARINHA (RESEX) DO DELTA DO
PARNAÍBA (PI)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Nível de Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Área de concentração: Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Guilherme Gentil de Farias

Toledo

2022

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Mendes, Gabriela Aparecida

Evidências do efeito do aquecimento global sobre a reserva extrativista marinha (RESEX) do delta do Parnaíba, PI / Gabriela Aparecida Mendes; orientador Eduardo Gentil. -- Toledo, 2022.
35 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Toledo) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, 2022.

1. Mudanças climáticas. 2. Sensoriamento remoto. 3. Ambientes costeiros. I. Gentil, Eduardo, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIELA APARECIDA MACHADO MENDES

EVIDÊNCIAS DO EFEITO DO AQUECIMENTO GLOBAL SOBRE A RESERVA EXTRATIVISTA (RESEX) DO DELTA DO PARNAÍBA (PI)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca – Nível de Mestrado, do Centro de Engenharias e Ciências Exatas, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

Prof. Dr. Eduardo Guilherme Gentil de Farias
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Presidente)

Prof.^a Dr.^a Maristela Cavicchioli Makrakis
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)

Prof. Dr. David Valença Dantas
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

Aprovada em: 14 abril de 2022.
Local de defesa: Plataforma Teams.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe

“Acesse os seus desejos, compreenda as suas vontades, aprimore-se tanto quanto conseguir, mas seja gentil durante todo o processo. Conheça-se o suficiente para melhorar e ame-se o suficiente para que seja o amor a motivação para o aprimoramento. Melhore por se amar muito, não por se amar pouco.”

Gabriela Prioli

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter iluminado o meu caminho, me dando força e paciência para chegar até aqui.

Quero agradecer a minha família: e em particular a minha mãe Cristina Mendes pela compreensão, apoio e por me ajudar a realizar um mestrado em uma época de crise.

Ao meu namorado e melhor amigo, Vitor Neves que eu não tenho nem palavras para agradecer a importância dele em minha vida. Te amo.

Aos meus amigos: Isabel Monteiro, Leone Medina, Sofia Ribeiro, Luiza Novaes, vocês sempre me deram os melhores conselhos, me encorajando e dando forças para que eu pudesse me tornar a pessoa que sou hoje.

Ao Grupo de Gestão, Ecologia e Tecnologia Marinha – GTMar e todos aqueles que tem a felicidade de participarem dele.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Gentil.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca, representado por professores e colaboradores, por todo aprendizado passado durante todo mestrado.

E a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e oportunidade de desenvolvimento deste projeto.

Dissertação elaborada e formatada
de acordo com as normas da revista
científica *Remote Sensing*. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/journal/remotesensing>

EVIDÊNCIAS DO EFEITO DO AQUECIMENTO GLOBAL SOBRE A RESERVA EXTRATIVISTA MARINHA (RESEX) DO DELTA DO PARNAÍBA (PI)

O aquecimento global é um dos efeitos das mudanças climáticas, responsável pelo aumento da temperatura média da atmosfera e dos oceanos, acidificação dos mares e mudanças na paisagem costeira. Considerando a lacuna de informações acerca desta temática na região nordeste do Brasil, foram utilizados 30 anos (1990 até 2020) de imagens dos satélites Landsat 5 (TM) e Landsat 8 (OLI), radar interferométrico SRTM e dados altimétricos, para avaliar os possíveis efeitos do aquecimento global sobre a região da Reserva Extrativista Marinha (RESEX) do Delta do Parnaíba. Os resultados apontam que a área de estudo está vivenciando um aumento das áreas de mangue acompanhado por uma expansão do espelho d'água, ocasionada por fatores ambientais. A topografia da área de estudo corrobora com os mapeamentos realizados, indicando uma tendência de incremento das áreas de mangue na porção leste da RESEX. O mapa de sensibilidade para expansão dos manguezais indica que áreas próximas dos cursos d'água possuem alto nível de vulnerabilidade para expansão dos manguezais. Possivelmente, a região está sendo submetida a uma crescente intrusão salina, dado que a porção adjacente ao delta vem experimentando um aumento do nível médio do mar da ordem de 2,82 mm/ano, o que poderá implicar em severos impactos sobre a biodiversidade e a economia local.

Palavras-chave: mudanças climáticas, sensoriamento remoto e ambientes costeiros.

EVIDENCE OF THE EFFECT OF GLOBAL WARMING ON THE MARINE EXTRACTIVE RESERVE (RESEX) OF THE PARNAÍBA DELTA (PI)

Global warming is one of the effects of climate change, responsible for the increase in the average temperature of the atmosphere and oceans, acidification of the seas and changes in the coastal landscape. Considering the lack of information about this theme in the northeastern region of Brazil, 30 years (1990 to 2020) of images from Landsat 5 (TM) and Landsat 8 (OLI) satellites, SRTM interferometric radar and altimetric data were used to evaluate the possible effects of global warming on the Marine Extractive Reserve (RESEX) region of the Parnaíba Delta. The results indicate that the study area is experiencing an increase in mangrove areas accompanied by an expansion of the water surface, caused by environmental factors. The SRTM data of the study area corroborates with the mappings carried out, indicating a tendency of increase of the mangrove areas in the eastern portion of the RESEX. The thematic sensitivity map for mangrove expansion points out that areas close to water courses have a high level of vulnerability to mangrove expansion. Possibly the region is being subjected to an increasing saline intrusion, given that the portion adjacent to the delta is experiencing an increase in mean sea level of about 2.82 mm/year, which could imply severe impacts on biodiversity and the local economy.

Keywords: climate change, remote sensing, and coastal environments.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1. <i>Área de estudo</i>	13
2.2. <i>Sensoriamento Remoto</i>	15
2.2.1. <i>Dados orbitais no espectro visível</i>	15
2.2.2. <i>Dados de radar</i>	16
2.2.3. <i>Dados de Condutividade elétrica do solo e obtenção dos produtos de sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal</i>	17
3.RESULTADOS	19
3.1. <i>Dados orbitais no espectro visível</i>	13
3.2. <i>Dados oriundos de radar</i>	23
3.3. <i>Dados de Condutividade elétrica do solo e sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal</i>	24
4. DISCUSSÃO	26
5. CONCLUSÃO	28
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

EVIDÊNCIAS DO EFEITO DO AQUECIMENTO GLOBAL SOBRE A RESERVA EXTRATIVISTA (RESEX) DO DELTA DO PARNAÍBA (PI)

Mendes, G.^{1,2}; Gentil, E.²

¹ Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Engenharia de Pesca (PREP), Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE Campus Toledo), Paraná, Brasil

² Laboratório de Gestão, Ecologia e Tecnologia Marinha (GTMar), Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC Laguna), Santa Catarina, Brasil

RESUMO

O aquecimento global é um dos efeitos das mudanças climáticas, responsável pelo aumento da temperatura média da atmosfera e dos oceanos, acidificação dos mares e mudanças na paisagem costeira. Considerando a lacuna de informações acerca desta temática na região nordeste do Brasil, foram utilizados 30 anos (1990 até 2020) de imagens dos satélites Landsat 5 (TM) e Landsat 8 (OLI), radar interferométrico SRTM e dados altimétricos, para avaliar os possíveis efeitos do aquecimento global sobre a região da Reserva Extrativista Marinha (RESEX) do Delta do Parnaíba. Os resultados apontam que a área de estudo está vivenciando um aumento das áreas de mangue acompanhado por uma expansão do espelho d'água, ocasionada por fatores ambientais. A topografia da área de estudo corrobora com os mapeamentos realizados, indicando uma tendência de incremento das áreas de mangue na porção leste da RESEX. Possivelmente a região está sendo submetida a uma crescente intrusão salina, dado que a porção adjacente ao delta vem experimentando um aumento do nível médio do mar da ordem de 2.82 mm/ano, o que poderá implicar em severos impactos sobre a biodiversidade e a economia local.

Palavras-chave: mudanças climáticas, sensoriamento remoto e ambientes costeiros.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas referem-se a toda variação climática que vem ocorrendo durante décadas em escala global. Essas variações se mostram em forma de fenômenos climáticos (temporais, furacões, acidificação do oceano e entre outros) que estão afetando o equilíbrio de diversos ecossistemas (1, 2, 3). O aquecimento global é um dos efeitos das mudanças climáticas, sendo este responsável pelo aumento da temperatura média da atmosfera e dos oceanos, provocada principalmente pelas emissões de gases que intensificam o efeito estufa (4, 5).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) o aquecimento global tem sido responsável por promover um incremento da ordem de $0,2^{\circ}$ na temperatura da atmosfera por década desde a revolução industrial, promovendo assim, alterações no funcionamento da biosfera. Artigos recentes apontam que, o aquecimento global poderá desencadear um incremento de até $1,5^{\circ}\text{C}$ na atmosfera entre os anos de 2030 e 2050, futuro relativamente próximo, caso as emissões de gases de efeito estufa persistam numa crescente (6; 7).

As áreas costeiras são particularmente sensíveis aos impactos decorrentes do aquecimento global, visto que, eventos como elevação do nível médio do mar, acidificação e anomalias positivas da temperatura da superfície do mar, poderão ser catalisados por estes vetores exógenos (8). Em regiões de deltas costeiros, os impactos decorrentes do aquecimento global poderão promover a expansão das áreas de espelho d'água, salinizando o solo e os lençóis freáticos, bem como, promovendo alterações na paisagem (9; 10; 11).

Os deltas são tipicamente caracterizados pela presença de vários canais fluviais que desembocam no mar, a partir de uma formação morfológica singular (12; 13,14). As regiões deltaicas apresentam acúmulo de sedimentos com diferentes granulometrias (ex: areia e cascalho), sendo estes depositados nos deltas após serem carregados pelas correntes dos rios, formando assim, diferentes canais (15). A formação dos deltas é o resultado de cotas topográficas mais baixas associadas a presença de rios (16; 17; 13)

Um dos principais fatores que afetam o funcionamento dos deltas costeiros é a presença dos manguezais, ambientes apesar de serem demasiadamente produtivos acabam sofrendo modificações, uma vez que, normalmente ocupam a região mais afetada pelas atividades antrópicas: a interface continente-oceano (18; 19). Os ecossistemas compostos por manguezais são constituídos por vegetações tropicais que possuem elevada resistências as variações de temperatura e salinidade (20; 21 22). Devido a formação morfológica dos deltas, os manguezais atuam como um dos principais fatores de proteção litorânea contra processos erosivos e de inundação, além de fornecerem diferentes serviços ecossistêmicos para toda uma diversidade de organismos da flora e fauna terrestre e aquática (23). Embora resistentes as alterações

ambientais, os manguezais também estão sendo afetados pelo aquecimento global (24; 25; 26; 27).

No Brasil, o Delta do Parnaíba (PI), localizado na região nordeste merece especial destaque, dado que, está entre os maiores deltas do mundo (28). Dotado por extensas áreas de manguezais, este ambiente desempenha a função de berçário, abrigo e zona de alimentação para diversas espécies de pescado (29), razão pela qual, no decorrer da história diferentes comunidades de pescadores artesanais se desenvolveram nas adjacências do Delta do Parnaíba (30).

Por conta das comunidades de pescadores artesanais que vivem próximas as margens do Delta do Parnaíba, foi realizada a implementação de uma Reserva Extrativista Marinha (RESEX) local no ano de 2000. Sabidamente, as RESEX visam assegurar o uso de uma determinada área por comunidades tradicionais que tem na extração de recursos naturais (ex: pesca) e/ou criação de organismos de pequeno porte (ex: aquicultura), a sua fonte principal fonte de subsistência e geração de renda (31; 32). Deste modo, as famílias locais podem proteger sua cultura e meio de vida, a partir do uso racional dos recursos naturais locais.

Na RESEX do Delta do Parnaíba, o principal recurso pesqueiro explorado é o caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), sendo esta a principal fonte de renda para os pescadores locais. A área de ocorrência do caranguejo-uçá está atrelada com a presença de manguezais, estando estas localidades potencialmente suscetíveis às mudanças climáticas (33).

Frente aos potenciais danos advindos do aquecimento global sobre os ambientes costeiros, considerando a importância ecológica e socioeconômica do Delta do Parnaíba e a carência de estudos que abordem esta temática na região, o presente estudo visa identificar evidências dos efeitos do aquecimento global sobre a reserva extrativista (RESEX) do Delta do Parnaíba. Deste modo, se pretende gerar informações que possam identificar os possíveis impactos de um fenômeno de larga escala num contexto regional, visando subsidiar futuras estratégias de manejo que contemplem a conservação dos recursos naturais num cenário de anomalia climática.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O Delta do Rio Parnaíba é o único ambiente geomorfológico desta natureza encontrado nas Américas, localizado na região nordeste do Brasil (Figura 1), entre os Estados do Maranhão e Piauí. Este ecossistema é formado por mais de 70 ilhas e dotado por cinco desembocaduras distintas (Igaraçu, Canárias, Caju, Carrapato e Tutóia).

Entre os elementos que compõem a paisagem do delta, estão os espelhos d'água, manguezais e dunas, além de biomas como o cerrado e caatinga (34; 35; 28). Este ambiente apresenta grande importância ecológica e econômica para a região, com destaque para a atividade pesqueira artesanal que é responsável pela manutenção das comunidades tradicionais que residem nas adjacências do delta (36; 37).

A região sofre influências climáticas do semiárido (quente e seco) e do clima tropical (quente e úmido). Em geral, o local se caracteriza por duas estações definidas, sendo essas, a estação de seca (junho até novembro) e uma estação chuvosa (dezembro até maio). Esta localidade é diretamente influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que gera grande nebulosidade sobre as áreas que estão próximas a linha do Equador (38; 39).

O delta é composto por duas unidades de conservação que se sobrepõem: a Área de Proteção Ambiental do Delta do Parnaíba (que abrange os estados Maranhão, Piauí e Ceará) e a Reserva Extrativista Marinha do Delta do Parnaíba (RESEX do Delta do Parnaíba), centrada apenas do delta (40). A implementação da RESEX do Delta do Parnaíba foi criada pelo Decreto s/n de 16 de novembro de 2000 e está localizada na Mesorregião Leste Maranhense e na Microrregião do Baixo Parnaíba. São objetivos da RESEX: garantir conservação do ambiente deltaico, manguezais e exploração sustentável dos recursos naturais pelas comunidades pesqueiras tradicionais que residem na região (41).

As áreas de manguezais compõem a principal paisagem local e atuam na proteção da costa por meio da minimização dos impactos dos ventos, ondas e também na mitigação de processos erosivos (42; 43). Além disso, os manguezais atuam como área de abrigo e reprodução de diversas espécies terrestres e marinhas (44; 45). As comunidades tradicionais locais são fortemente dependentes da pesca do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), já que os manguezais são o seu principal habitat. Sabidamente, a região da RESEX apresenta os principais pontos de pesca do caranguejo-uçá (Figura 1) (31; 46; 33).

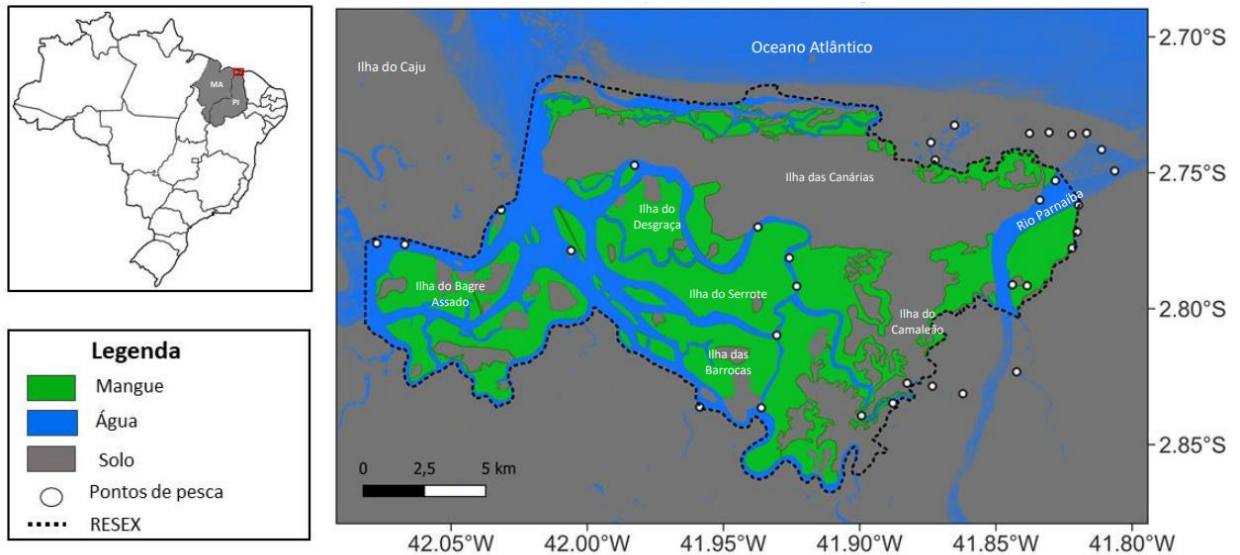


Figura 1. Mapa de localização do Delta do Parnaíba (PI). Círculos em branco representam as principais áreas de exploração do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*). A linha pontilhada indica a área da RESEX. Os mangues estão representados em verde e o ecossistema aquático está representado em azul.

2.2 Sensoriamento Remoto

2.2.1. Dados orbitais no espectro visível

Três décadas de dados orbitais foram utilizados para avaliar possíveis evidências dos impactos do aquecimento global sobre as áreas de manguezal do Delta do Parnaíba (PI). Dados de satélites oriundos dos sensores de moderada resolução espacial (30 m) TM (LANDSAT 5) e OLI (LANDSAT 8) foram empregados para este fim. Foram selecionadas imagens de 20% de cobertura de nuvens entre os anos de 1990 e 2020. Todas as cenas tratadas correspondem a estação de estiagem (seca) em razão da menor nebulosidade deste período, fator que pode auxiliar na identificação de possíveis mudanças espaço-temporais nas áreas de manguezal e espelho d'água. Todos os produtos foram obtidos gratuitamente através do *websites* do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (www.inpe.br).

O banco de dados orbitais gerado foi submetido a correção atmosférica através do *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) (47), visando corrigir os níveis de cinza/pixel e, posteriormente recortado para a área correspondente a RESEX do Delta do Parnaíba. Por fim, as cenas foram vetorizadas e ordenadas a partir de três feições básicas: espelho d'água, solo e mangue, as quais geraram tabelas e gráficos que apontam a cobertura de área de mangue e espelho d'água do local.

2.2.2 Análise booleana e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

A lógica booleana consiste em uma análise de dois critérios (sim/não), os quais permitem demonstrar um cenário ou hipótese (49). Neste estudo foram obtidos mapas booleanos a partir da subtração dos *shapes* anteriormente vetorizados que correspondem as áreas de mangue dos anos de 1990 e 2020. Deste modo, foi possível identificar áreas de redução, estabilidade e acréscimo de manguezal dentro do intervalo de 30 anos.

Adicionalmente, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para as áreas de manguezais visando identificar a sanidade dos bosques locais. Este índice fornece a estimativa sobre a condição da cobertura vegetal, medindo a quantidade de reflectância das folhas (50). O NDVI é definido pela operação matemática dada através das bandas espectrais 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo), do sensor TM, e bandas espectrais 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo), do sensor OLI. Dessa forma, Jensen (1996) descreve para o cálculo do NDVI a seguinte equação:

Equação 1.

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

Onde temos:

NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR: Infravermelho Próximo (0,76 a 0,90 μm);

R: Vermelho (0,63 a 0,69 μm).

O resultado do cálculo do NDVI oscila entre -1 a +1. Quanto mais próximo de 1, maior a densidade da cobertura vegetal e maior a taxa fotossintética ativa, ou seja, temos uma vegetação mais saudável. Valores entre 0,33 e 0,66 representam vegetação moderadamente sadia, e por fim, quando o cálculo apresenta mais baixos, temos uma área de vegetação sem nenhuma atividade fotossintética e/ou com pouca ou nenhuma cobertura vegetal. Deste modo, o uso do NDVI para a região da RESEX do Delta do Parnaíba surge como alternativa para monitorar a sanidade dos manguezais eventualmente expostos ao aquecimento global.

2.2.3 Dados de radar

Foram utilizados dados do radar interferométrico *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) contendo valores referentes às cotas topográficas da região e produtos contendo valores da anomalia da altura do nível médio do mar derivados de um produto de altímetro orbital obtido a partir da análise conjunta de diferentes missões espaciais TOPEX, Jason-1 e Jason-2. Ambos foram obtidos gratuitamente através dos *websites* da EMBRAPA Territorial e da NOAA *Sea Level Rise*, respectivamente.

Os dados SRTM foram processados visando identificar áreas de baixo e alto relevo para a região correspondente a RESEX. Esta abordagem visa avaliar regiões mais susceptíveis a inundação em eventuais cenários de perpétuo aumento do nível médio do mar. Adicionalmente, produtos de altimetria foram empregados para avaliar se a região marinha adjacente à região do Delta do Parnaíba já está sendo sofrendo com o aumento do nível do mar. Para tanto, foram processados dados para aproximadamente trinta anos (1992-2020), estando estes ordenados em aumento médio do nível médio do mar em milímetro por ano.

2.2.4 Dados de Condutividade elétrica do solo e obtenção dos produtos de sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal

A estimativa de salinidade foi a partir do banco de dados orbitais, utilizando como principal dado de entrada a espectroscopia de refletância no infravermelho próximo (NIR). Método visa caracterizar e identificar a propriedade do solo a partir da banda do NIR, uma vez que, muitos autores sugerem as bandas do infravermelho para o monitoramento de características do solo (umidade e salinidade) (51;52).

A condutividade elétrica do solo foi utilizada como parâmetro análogo a salinidade e a equação para sua estimativa por Tran et al. (2018), para o delta do rio Mekong.

Equação 2

$$EC = 30.314 * e^{-13.29*NIR}$$

Onde:

EC é a condutividade elétrica do solo (dS/m);

NIR Infravermelho Próximo (0,76 a 0,90 μm).

Para o cálculo da condutividade elétrica do solo foram aplicados os 30 anos de dados visando identificar as variações de salinidade que ocorreram no período. Os resultados obtidos serviram como um dos *inputs* para o modelo de sensibilidade da RESEX para a expansão dos manguezais.

Para determinar o quão sensível a área de estudo está para expansão dos manguezais, foi utilizada a metodologia de soma ponderada, que neste estudo serviu como um indicador potencial. A metodologia foi aplicada para toda a área da RESEX visando estimar áreas de solo que estarão mais susceptíveis a se tornarem manguezal nos próximos anos. Os dados de entrada do modelo foram: condutividade elétrica do solo (a partir da equação 2), declividade (SRTM) e a distância da água (calculada a partir da distância euclidiana de um pixel qualquer até o pixel referente ao corpo d'água mais próximo). O modelo de sensibilidade foi aplicado sobre a cena de 2020, por ser esta a mais recente de todo o banco de dados avaliado. Segue a equação que descreve a sensibilidade das áreas de solo da RESEX se tornarem manguezal:

Equação 3

$$\text{Sensibilidade} = 3.5 * D - EC - 3.5 * Dist$$

Onde:

Sensibilidade: Possibilidade das áreas de solo se tornarem mangue;

D: Declividade do terreno;

EC: Condutividade elétrica do solo (dS/m);

Dist: Distância de um ponto qualquer no terreno até a água.

Os coeficientes da soma foram ajustados empiricamente de modo a prever quais áreas poderão se tornar mangue após o ano de 2020 na RESEX do delta do Parnaíba. Para identificação da proporção de áreas de risco baixo, médio e alto, foi feita a normalização do raster de sensibilidade por Z-score, de modo a tornar a distribuição dos dados de sensibilidade centrada em 0 (média = 0, desvio-padrão = 1). A classificação das áreas (chance baixa, média e alta) foi feita dividindo os valores numéricos em três partes, referentes as três classes.

3. RESULTADOS

3.1. Dados orbitais no espectro visível

A vetorização dos manguezais em ambiente SIG a partir dos produtos orbitais tratados evidenciou um incremento das áreas de bosque de mangue, a saber: 1990 (78,7 km²), 2000 (87,7 km²), 2010 (102,3 km²) e 2020 (112 km²), sugerindo um aumento médio de área da ordem de 11km² por década. Os valores de área para cada década em km² e hectares podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores referentes às áreas em km² e hectares. Destaque para o crescimento gradual das áreas conforme as décadas.

Anos	Área (km ²)	Área (HA)
1990	78,8	7879,3
2000	87,7	8771,7
2010	102,3	10238,4
2020	112	11207,5

Após a vetorização das áreas de manguezal, os produtos foram submetidos à análise booleana, tendo por critério a subtração das áreas de manguezal do ano de 2020 pela área correspondente ao ano de 1990. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos: Observe que as áreas em verde apresentam as áreas de persistências de manguezais entre 1990 e 2020, em contrapartida, as porções em vermelho demonstram as regiões onde houve acréscimo dos manguezais na porção interna da RESEX. As áreas em azul e cinza denotam água e a terra, respectivamente, e a linha pontilhada é a delimitação da área da RESEX (Figura 2). A partir da análise booleana, verificou-se um acréscimo de 42,24% na área de manguezais entre os anos de 1990 e 2020.

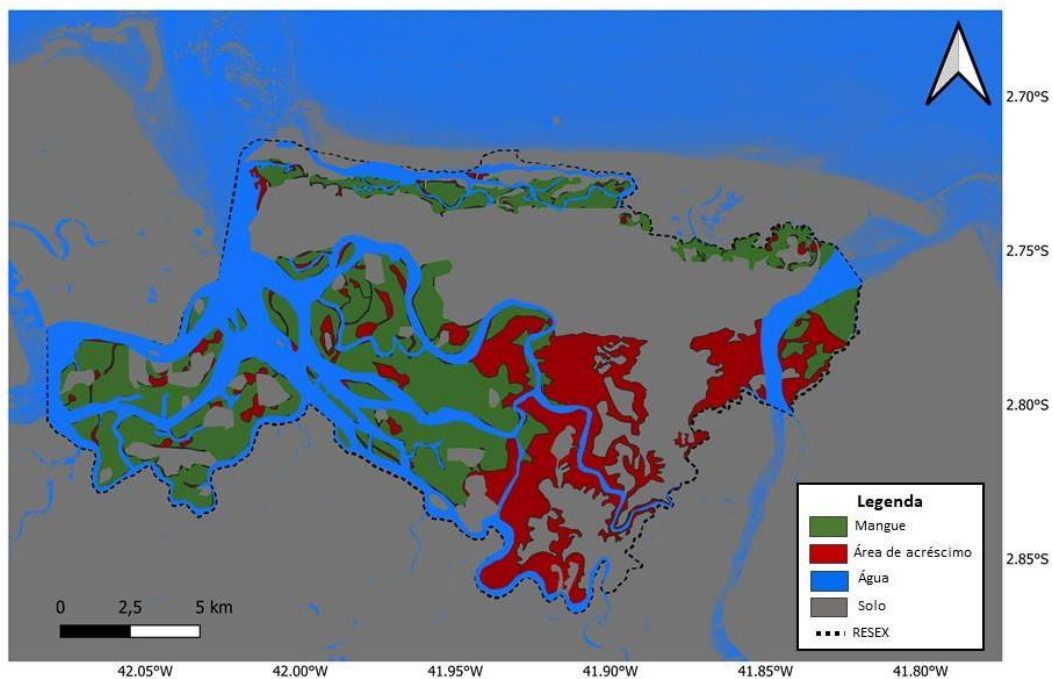


Figura 2. Mapa temático da subtração da vetorização dos mangues dos anos de 1990 e 2020. Note as sobreposições dos vetores, com isso em verde temos as áreas de 1990 e 2020. Em vermelho temos o aumento dos mangues em estado atual (2020) e em azul e cinza temos a água e o solo, respectivamente.

Os resultados do NDVI para as regiões de manguezal demonstraram que no ano de 1990 houve valores em torno de 0,5 e 0,6; sugerindo que as áreas de mangue estavam em um estado de sanidade razoável. Nos anos 2000 foi evidenciado uma persistência dos valores de NDVI em torno de 0,6. Já em 2010, ocorreu um incremento dos valores de NDVI para intervalos entre 0,6 e 0,7, sugerindo que essas áreas estavam moderadamente saudias. Em 2020 um novo incremento dos valores do NDVI (entre 0,7 e 0,8) indica que a sanidade dos bosques se aproximou de uma condição ótima de sanidade (Figura 3). A figura 4 permite analisar o incremento das áreas de manguezal em consonância com os valores de NDVI obtidos. Percebe-se que o crescimento dessas áreas ocorreu principalmente na região sudeste da RESEX.

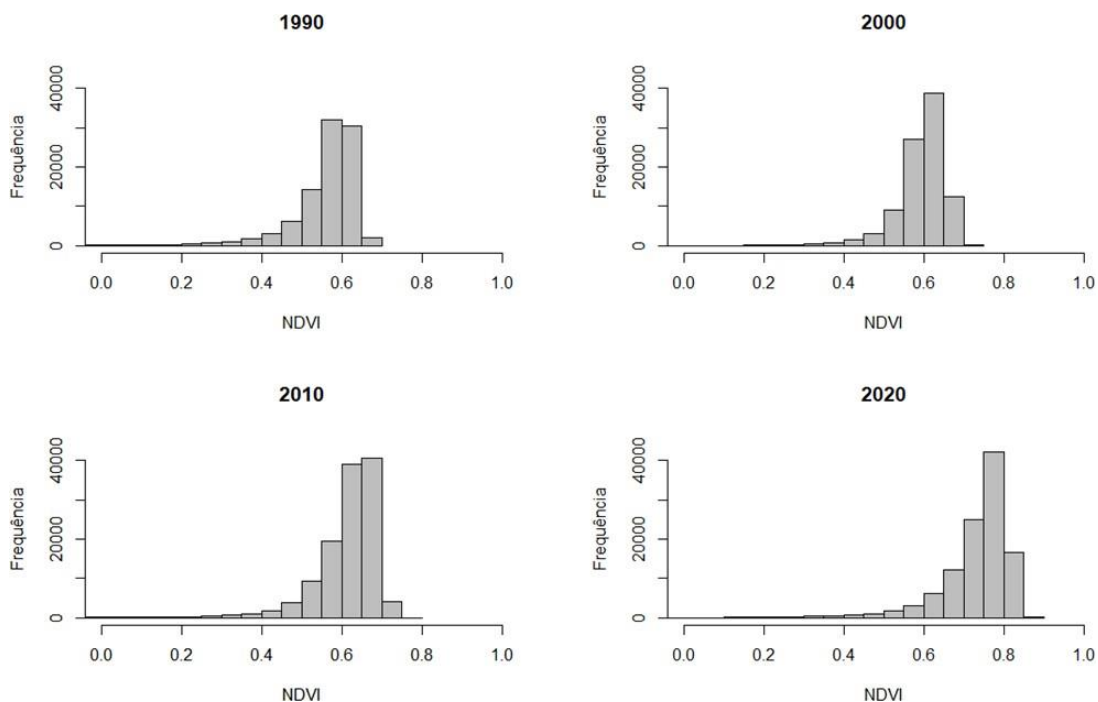


Figura 3. Valores referentes ao cálculo do NDVI para os manguezais do Delta do Parnaíba para cada década estudada.

Paralelamente ao crescimento gradual das áreas de mangue, ocorreu também um incremento relativo das áreas de espelho d'água na RESEX. Após o processamento dos dados orbitais, obtivemos as seguintes porções de espelho d'água: 1990 (52,4 km²), 2000 (56 km²), 2010 (57,3 km²) e 2020 (60,2 km²), exibindo assim, um incremento médio de 2,6 km² por década. A figura 5 combina os valores de acréscimo das áreas de mangue e espelho d'água em km² através de um gráfico de barras, demonstrando o incremento de ambas as feições na RESEX.

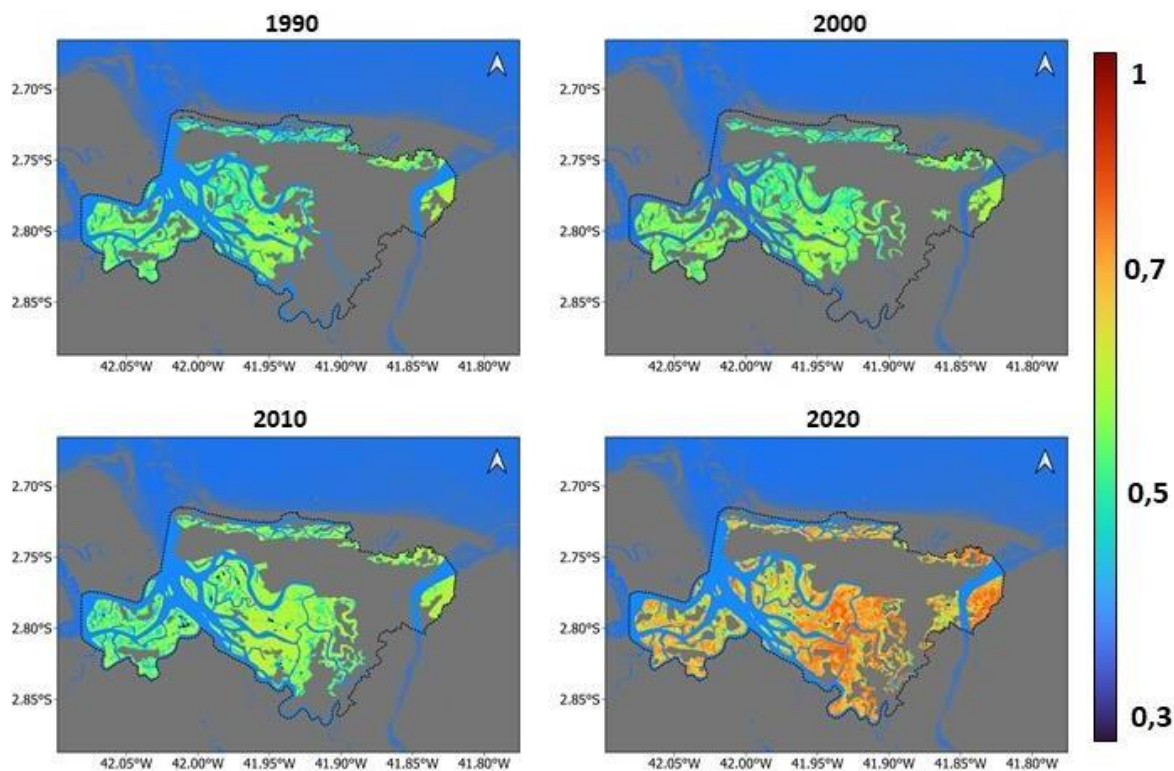


Figura 4. Valores de NDVI sobrepostos as áreas de manguezal para os anos 1990, 2000, 2010 e 2020 para a região correspondente a RESEX do Delta do Parnaíba. A escala de 1 até 0,3 aponta os valores da sanidade dos bosques e o incremento das áreas de manguezal.

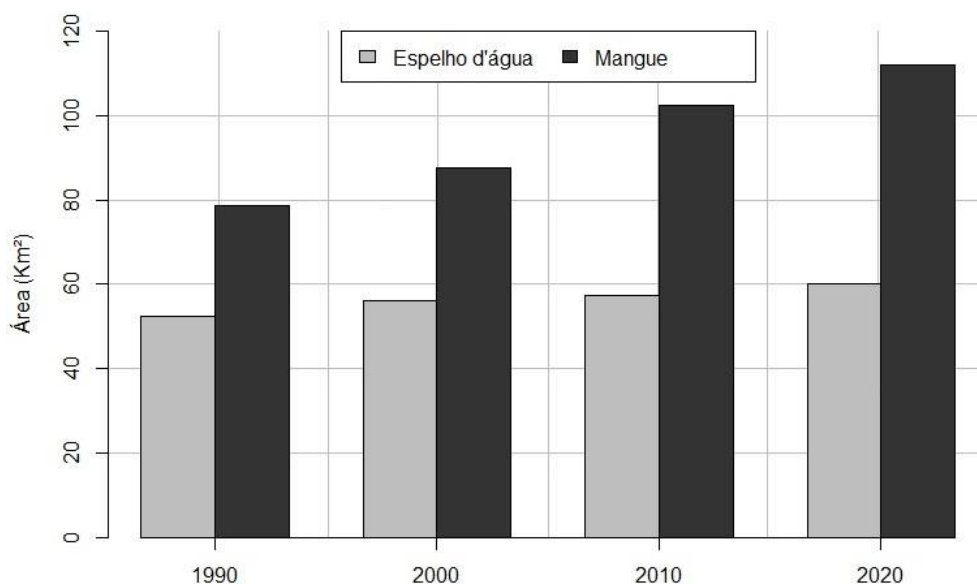


Figura 5. Representação gráfica das áreas de mangue e espelho d'água em km² para as três décadas estudadas na RESEX do Delta do Parnaíba.

3.2. Dados oriundos de radar

A topografia permite entender a dinâmica de ocupação dos manguezais no entorno dos corpos hídricos, dado que, esta vegetação carece de ambientes topograficamente mais baixos e portanto, mais susceptíveis a inundação pelas marés e correntes de marés. Assim, a caracterização do relevo da região da RESEX é fundamental para avaliar potenciais correlações entre as porções preferenciais de aumento das áreas de manguezal. Na figura 6, temos em vermelho as zonas com cotas baixas (< 4 m) e em tons de verde as cotas mais altas. Os dados permitem afirmar que as cotas mais próximas da região entre as marés encontram-se na porção leste da RESEX, coincidindo com a zona de acréscimo dos manguezais locais.

Paralelamente, o processamento dos dados altimétricos para os anos de 1992 até 2020 entre as latitudes -1.75° S até -2.75° S e longitudes de -42.75° W até -40.25° W, revelaram um aumento do nível médio do mar entre 2,74 até 2,91 mm/ano (Figura 7). Podemos evidenciar que toda a região adjacente ao delta do Parnaíba está sendo submetida ao aumento do nível médio do mar.

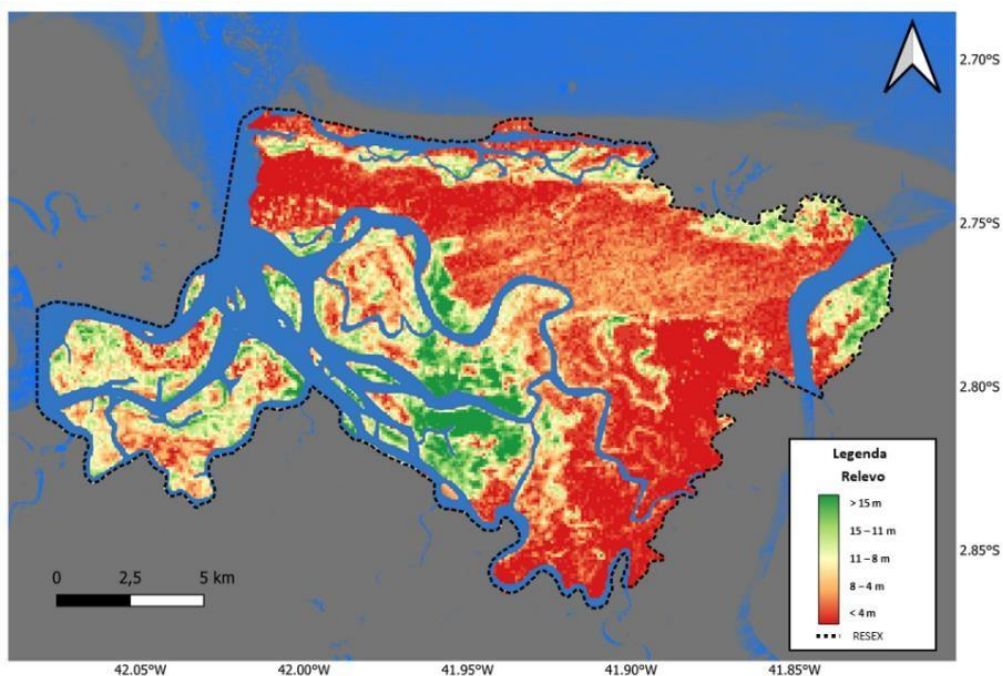


Figura 6. Mapa topográfico sobre o relevo da área da RESEX do Delta do Parnaíba. Em vermelho temos todas as áreas de cotas baixas com valores < 4 m e em verde temos as áreas de cotas altas com valores > 15 m.

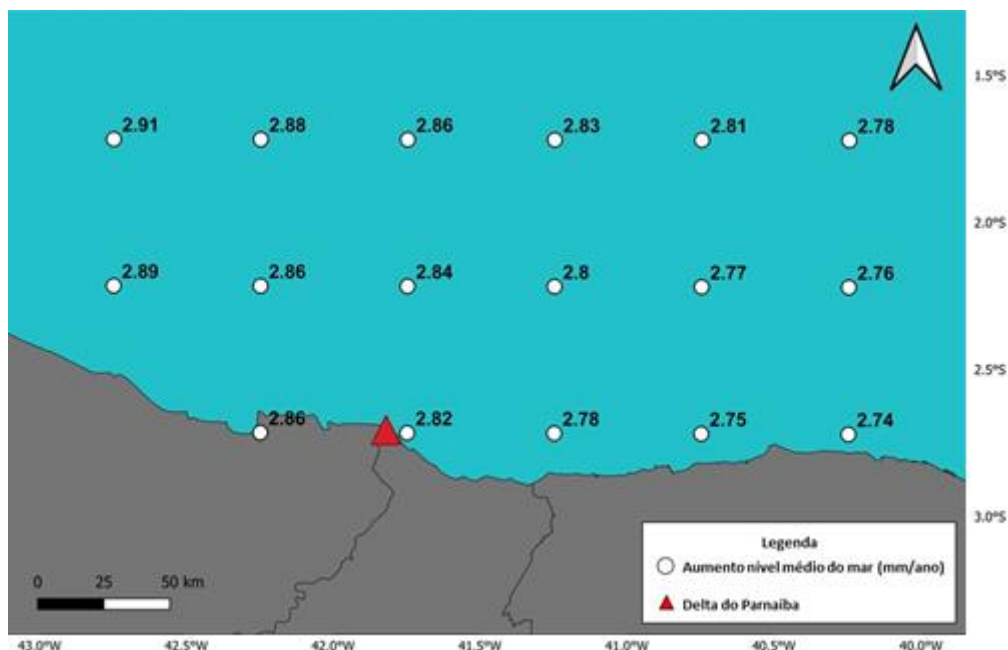


Figura 7. Mapa temático sobre o aumento do nível médio do mar entre os anos de 1992 até 2020 em mm/ano. O triângulo vermelho identifica o Delta do Parnaíba (PI).

3.3. Dados de Condutividade elétrica do solo e sensibilidade ao incremento das áreas de manguezal

A condutividade elétrica do solo variou moderadamente durante as décadas estudadas (Figura 8). As variações médias da condutividade elétrica (dS/m) do solo corresponderam a 1.70, 1.43, 1.55 e 1.88, para 1990, 2000, 2010 e 2020, respectivamente.

O mapa temático de sensibilidade relativa (condutividade elétrica do solo e declividade) para o surgimento de manguezais (Figura 9), mostra níveis altos (vermelho), médios (branco) e baixos (azul) de áreas sensíveis para expansão de bosques de manguezais. Os dados indicam que 46,92% da área está em alto índice de sensibilidade (Figura 9), sugerindo que as áreas próximas aos cursos d'água acabam se tornando mais sensíveis quando comparadas com áreas distantes dos rios, apontando que essas áreas possuem os valores de declividade, condutividade e a distância semelhantes as áreas que já possuem manguezais, e assim indicando índices de vulnerabilidade, como podemos ver na área nordeste da Figura 9.

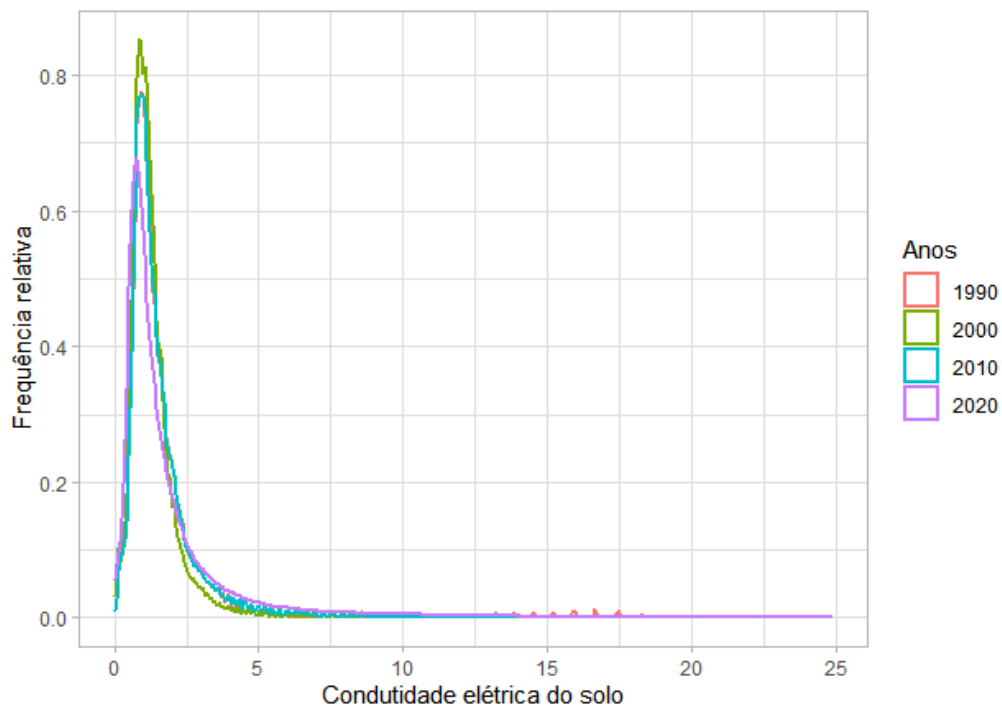


Figura 8. Gráfico de frequência relativa para condutividade elétrica do solo (dS/m) para as diferentes décadas (1990, 2000,2010 e 2020)

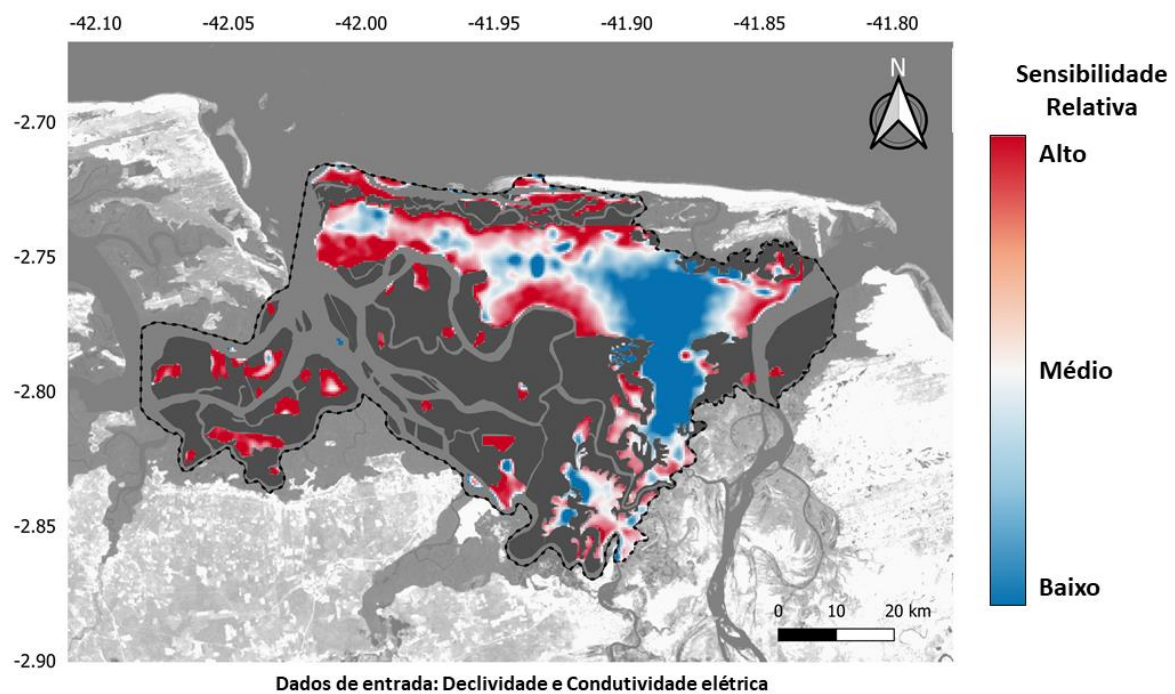


Figura 9. Mapa temático de sensibilidade para o surgimento de manguezais. A sensibilidade é relativa aos dados de entrada (declividade e condutividade elétrica do solo) e é classificada em alto, médio e baixo índice de sensibilidade.

4. DISCUSSÃO

Diversas projeções apontam que os ambientes costeiros têm sido afetados pelo aquecimento global, gerando impactos adaptativos positivos (expansão dos manguezais, aporte sedimentar e precipitações anômalas) e negativos (inundações, perda de biodiversidade e salinização do solo) frente as condições locais (53; 54; 55). Para a região do Delta do Parnaíba, os resultados apontam evidências do aquecimento global internalizadas no crescimento médio significativo das áreas de manguezal e aumento do nível médio do mar.

De fato, diferentes áreas do Nordeste do Brasil estão vivenciando um processo de crescimento dos manguezais em decorrência de múltiplos fatores, dentre eles, o aquecimento global (56;57;58). A expansão dos manguezais na região do Delta do Parnaíba, principalmente nas porções leste, está substituindo a paisagem que outrora era originalmente composta por apicuns, pântanos e banhados. Alguns estudos indicam que a expansão dos manguezais na região estaria atrelada as interferências do aquecimento global, uma vez que, os ambientes estão sofrendo com a presença de ações naturais que potencializam o seu surgimento (59; 60; 61). Em contraponto, Mokievsky et al. (2020), realizaram um estudo no Delta do Mekong e observaram que em um período de 30 anos houve um decréscimo de 68% das áreas de mangue, os quais foram substituídos por vegetação secundária ou paisagens antropogênicas (aquicultura e urbanização).

Em relação a sanidade dos bosques de manguezais, os valores de NDVI observados no presente estudo corroboram com a literatura, que já discutia previamente a sanidade dos manguezais da costa setentrional brasileira para o período (20; 62). Entretanto, a partir do ano de 2000 com a implementação da RESEX, foi possível verificar a tendência de maiores valores de NDVI. Estes resultados não encontram amparo em trabalhos prévios realizados para regiões distintas (63; 64; 65), que apontam reduções do NDVI associadas a anomalias positivas mais severas do nível do mar, bem como, intensa atividade antrópica, realidade distinta da nossa região de estudo.

A expansão das área de manguezal na RESEX pode ser o reflexo de ações naturais conjuntas, com destaque para a redução das chuvas anuais e a elevação do nível do mar que, comprometem a oferta de água doce na bacia e a dinâmica dos sedimentos, resultando numa maior intrusão salina (58;66). Haque & Reza (2021), identificaram o efeito da intrusão salina nos manguezais em Bangladesh, a partir da

substituição de espécies de água doce por espécies marinhas, servindo estas como bioindicadoras deste impacto ambiental.

A intrusão salina corresponde a salinização da água doce do ecossistema costeiro, causada pelo avanço da água marinha que se direciona ao continente (67; 68). A salinização de áreas úmidas está ocorrendo em escala global, como é visto por estudos anteriores (69; 52; 70; 71), que relacionam a salinização como produto do aquecimento global. Os resultados da equação de condutividade elétrica do solo apontam pouca variação, embora estudos apontam que mesmo poucas mudanças das propriedades do solo (salinidade e outros nutrientes) podem refletir diretamente no mecanismo de resposta dos manguezais (72; 73).

Na RESEX do Deltado Parnaíba, durante o período de estiagem, existe maior influência da entrada de água marinha, incrementando o potencial de salinização do solo e culminando na potencial expansão dos manguezais (74). De fato, o aumento do nível do mar direciona a entrada de água salgada para o continente, principalmente por conta da declividade local, inundando áreas e espalhando água salgada pelos rios e tributários do delta (75 ; 76; 58).

Devido toda a dinâmica que ocorre em ambientes costeiros, os manguezais podem ser considerados ideais para monitorar os impactos do aquecimento global, uma vez que, são muito sensíveis a várias condições ambientais globais (77; 78). É possível observar que o crescimento dos manguezais foi acompanhando por uma expansão do espelho d'água na RESEX. Ambientes deltaicos possuem uma dinâmica própria quando se trata de variações ambientais, já que frequentemente sofrem com flutuações das marés, variações de salinidade, deposição de sedimentos fluviais ao longo dos canais, fatores que indicam a sensibilidade dos manguezais sobre o sistema (79; 80).

O principal fator que ocasiona a sensibilidade da área para expansão dos manguezais é que as espécies de manguezais são constituídos por espécies hidrocoricas e, assim, possuem um potencial de dispersão de suas sementes pelos cursos d'água, trasportando para novas localidades, favorecendo sua expansão de forma natural (81).

A topografia da área de estudo sugere uma relação íntima entre a dinâmica do corpo hídrico e a expansão dos manguezais, já que o escoamento da água oriunda do mar é direcionado para as áreas com cotas mais baixas, inundando áreas de planícies e ambientes de várzea (82). Conseqüentemente, esses ambientes se tornam favoráveis para o desenvolvimento de manguezais, como é visto na região sudeste. O oposto pode ser visto na região nordeste, que não possui o estímulo direto de cursos d'água (Figura

9), apontando um baixo nível de sensibilidade para a expansão dos manguezais da RESEX do Delta do Parnaíba.

De modo geral, as áreas de mangue prosperam e se expandem em linhas costeiras dinâmicas, que são controladas por forças físicas (rios, marés e ondas) e se adaptam conforme processos evolutivos e geomorfológicos (incremento de sedimentos e aumento do nível médio do mar) (83; 82). O principal fator para evidenciar o efeito do aquecimento global sobre a área de estudo está centrado no fato que os manguezais se desenvolvem em regiões tropicais/subtropicais entre marés, locais que são considerados os primeiros a serem impactados pelos efeitos do aquecimento global na zona costeira (84; 85)

Os dados do aumento do nível médio do mar sugerem que a área de estudo pode estar sendo afetada por efeitos do aquecimento global. Geralmente, a topografia de um delta é composta por uma área de baixo relevo, ocasionando a sua pronunciada vulnerabilidade à elevação do nível médio do mar (86; 87; 88). Diversos trabalhos expõem que áreas deltaicas estão cada vez mais expostas aos riscos de inundações decorrentes de extremos climáticos resultando em ameaças às comunidades pesqueiras tradicionais que vivem e sobrevivem em áreas de conservação ambiental (89; 90).

O efeito do aumento do nível médio do mar sobre a área de estudo causa o aumento dos manguezais locais, podendo ocasionar perda/aumento da biodiversidade, bem como, habitats para espécies de água doce (91; 92; 93). Alguns estudos, indicam que a combinação desses fenômenos (aumento do nível médio do mar e expansão dos manguezais) podem influenciar na sobrevivência, eficiência alimentar e preferência de habitat para diversas espécies (94; 95; 96). Entendendo que o caranguejo-uçá é um estoque pesqueiro de grande importância econômica para as comunidades tradicionais da RESEX, este pode ser um bom bioindicador acerca da eventual perda de habitat, dado que, incrementos futuros nas taxas de captura para um esforço de pesca constante, poderão sugerir perda de biodiversidade local. Estudos futuros que avaliem a correlação entre a expansão dos manguezais e o possível aumento populacional do caranguejo-uçá serão essenciais para auxiliar nas estratégias de conservação e manutenção deste importante recurso pesqueiro

5. CONCLUSÃO

A região da RESEX do Delta do Parnaíba vem vivenciando um crescimento médio significativo das suas áreas de manguezais, estando este possivelmente atrelado ao aquecimento global. Os dados do aumento do nível médio do mar junto com as características topográficas do local e as observações realizadas nesse estudo sugerem que os mangues da região da RESEX do delta do Parnaíba vem sofrendo os efeitos das mudanças climáticas, que já ocorrem em escala global. Tais efeitos não só promovem a expansão das áreas de mangue, mas também a supressão da biodiversidade vegetal local e subsequente dominância ecológica por espécies vegetais comuns em mangue; bem como altera significativamente o ambiente, afetando a fauna local e subsequentemente as comunidades que dependem dela. Nesse contexto, a população de carangueijo-uça (*Ucides cordatus*) pode vir a ser afetada por tais mudanças, ocasionando assim perda de biodiversidade e serviços ecológicos associados ao animal, bem como perdas econômicas e sociais advindas da importância cultural e pesqueira do carangueijo-uça para a comunidade local.

6. REFERENCIAS

1. Loarie, S.R.; Duffy, P.B.; Hamilton, H.; Asner, G.P.; Field, C.B.; Ackerly, D.D. The Velocity of Climate Change. *Nature* **2009**, *462*, 1052–1055, doi:10.1038/nature08649.
2. Goldberg, M.H.; van der Linden, S.; Maibach, E.; Leiserowitz, A. Discussing Global Warming Leads to Greater Acceptance of Climate Science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2019**, *116*, 14804–14805, doi:10.1073/pnas.1906589116.
3. Soutter, A.R.B.; Möttus, R. “Global Warming” versus “Climate Change”: A Replication on the Association between Political Self-Identification, Question Wording, and Environmental Beliefs. *Journal of Environmental Psychology* **2020**, *69*, doi:10.1016/j.jenvp.2020.101413.
4. Watterson, I.G.; Dix, M.R.; Colman, R.A. A Comparison of Present and Doubled CO₂ Climates and Feedbacks Simulated by Three General Circulation Models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **1999**, *104*, 1943–1956, doi:10.1029/1998JD200049.
5. Renard, S.; Corbett, B.; Swei, O. Minimizing the Global Warming Impact of Pavement Infrastructure through Reinforcement Learning. *Resources, Conservation and Recycling* **2021**, *167*, doi:10.1016/j.resconrec.2020.105240.
6. Ogunbode, C.A.; Doran, R.; Böhm, G. Exposure to the IPCC Special Report on 1.5 °C Global Warming Is Linked to Perceived Threat and Increased Concern about Climate Change. *Climatic Change* **2020**, *158*, 361–375, doi:10.1007/s10584-019-02609-0.
7. Lahn, B. Changing Climate Change : The Carbon Budget and the Modifying-Work of the IPCC. **2021**, doi:10.1177/0306312720941933.

8. Guo, Y.; Wu, W.; Du, M.; Liu, X.; Wang, J.; Bryant, C.R. Modeling Climate Change Impacts on Rice Growth and Yield under Global Warming of 1.5 and 2.0 °C in the Pearl River Delta, China. *Atmosphere* **2019**, *10*, doi:10.3390/atmos10100567.
9. Ho, T.T.; Shimada, K. The Effects of Multiple Climate Change Responses on Economic Performance of Rice Farms: Evidence from the Mekong Delta of Vietnam. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *315*, doi:10.1016/j.jclepro.2021.128129.
10. Loc, H.H.; van Binh, D.; Park, E.; Shrestha, S.; Dung, T.D.; Son, V.H.; Truc, N.H.T.; Mai, N.P.; Seijger, C. Intensifying Saline Water Intrusion and Drought in the Mekong Delta: From Physical Evidence to Policy Outlooks. *Science of the Total Environment* **2021**, *757*, 143919, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143919.
11. Lv, Y.; Li, W.; Wen, J.; Xu, H.; Du, S. Population Pattern and Exposure under Sea Level Rise: Low Elevation Coastal Zone in the Yangtze River Delta, 1990–2100. *Climate Risk Management* **2021**, *33*, doi:10.1016/j.crm.2021.100348.
12. Giosan, L.; Syvitski, J.; Constantinescu, S.; Day, J. Climate Change: Protect the World's Deltas. *Nature* **2014**, *516*, 31–33.
13. Anderson, A.M.; Allen, D.M. Geostatistical Characterization of Aquifer Heterogeneity in Large Coastal Deltas: Implications for Geophysical Data Collection.; Society of Exploration Geophysicists, September 1 2021; pp. 3101–3104.
14. Anderson, C.C.; Renaud, F.G.; Hagenlocher, M.; Day, J.W. Assessing Multi-Hazard Vulnerability and Dynamic Coastal Flood Risk in the Mississippi Delta: The Global Delta Risk Index as a Social-Ecological Systems Approach. *Water (Switzerland)* **2021**, *13*, doi:10.3390/w13040577.
15. Syvitski, J.P.M.; Kettner, A.J.; Overeem, I.; Hutton, E.W.H.; Hannon, M.T.; Brakenridge, G.R.; Day, J.; Vörösmarty, C.; Saito, Y.; Giosan, L.; et al. Sinking Deltas Due to Human Activities. *Nature Geoscience* **2009**, *2*, 681–686, doi:10.1038/ngeo629.
16. Feist, S.E.; Hoque, M.A.; Islam, M.A.; Ahmed, K.M.; Fowler, M. Recent Trends in Inland Water Level Change in Coastal Bangladesh—Implications of Sea Level Rise in Low-Lying Deltas. *Global and Planetary Change* **2021**, *206*, doi:10.1016/j.gloplacha.2021.103639.
17. Olson, K.R.; Suski, C.D. Mississippi River Delta: Land Subsidence and Coastal Erosion. *Open Journal of Soil Science* **2021**, *11*, 139–163, doi:10.4236/ojss.2021.113008.
18. Kirwan, M.L.; Temmerman, S.; Skeehan, E.E.; Guntenspergen, G.R.; Fagherazzi, S. Overestimation of Marsh Vulnerability to Sea Level Rise. *Nature Climate Change* **2016**, *6*, 253–260.
19. Ferreira, A.C.; Lacerda, L.D. Degradation and Conservation of Brazilian Mangroves, Status and Perspectives. *Ocean and Coastal Management* **2016**, *125*, 38–46, doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.03.011.
20. Schaeffer-Novelli, Y.; Cintron-Molero, G.; Rothleder, R.; ~nia, A.T.; de Camargo, M. *Variability of Mangrove Brazilian Coast Ecosystems Along The*; 1990; Vol. 13;.
21. Primavera, J.H.; Friess, D.A.; van Lavieren, H.; Lee, S.Y. The Mangrove Ecosystem. In *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts*; Elsevier, 2018; pp. 1–34 ISBN 9780128050521.
22. Friess, D.A.; Yando, E.S.; Abuchahla, G.M.O.; Adams, J.B.; Cannicci, S.; Cauty, S.W.J.; Cavanaugh, K.C.; Connolly, R.M.; Cormier, N.; Dahdouh-Guebas, F.; et al. Mangroves Give Cause for Conservation Optimism, for Now. *Current Biology* **2020**, *30*, R153–R154, doi:10.1016/j.cub.2019.12.054.
23. Menéndez, P.; Losada, I.J.; Torres-Ortega, S.; Narayan, S.; Beck, M.W. The Global Flood Protection Benefits of Mangroves. *Scientific Reports* **2020**, *10*, doi:10.1038/s41598-020-61136-6.

24. Gilman, E.L.; Ellison, J.; Duke, N.C.; Field, C. Threats to Mangroves from Climate Change and Adaptation Options: A Review. *Aquatic Botany* 2008, 89, 237–250.
25. Srivastava, J.; Prasad, V. Effect of Global Warming on Diversity Pattern in *Nypa* Mangroves across Paleocene-Eocene Transition in the Paleo-Equatorial Region of the Indian Sub-Continent. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **2015**, 429, 1–12, doi:10.1016/j.palaeo.2015.03.026.
27. Arnaud, M.; Baird, A.J.; Morris, P.J.; Dang, T.H.; Nguyen, T.T. Sensitivity of Mangrove Soil Organic Matter Decay to Warming and Sea Level Change. *Global Change Biology* **2020**, 26, 1899–1907, doi:10.1111/gcb.14931.
28. Guimarães-Costa, A.J.; Machado, F.S.; Oliveira, R.R.S.; Silva-Costa, V.; Andrade, M.C.; Giarrizzo, T.; Saint-Paul, U.; Sampaio, I.; Schneider, H. Fish Diversity of the Largest Deltaic Formation in the Americas - a Description of the Fish Fauna of the Parnaíba Delta Using DNA Barcoding. *Scientific Reports* **2019**, 9, doi:10.1038/s41598-019-43930-z.
29. Szczygielski, A.; Stattegger, K.; Schwarzer, K.; da Silva, A.G.A.; Vital, H.; Koenig, J. Evolution of the Parnaíba Delta (NE Brazil) during the Late Holocene. *Geo-Marine Letters* **2015**, 35, 105–117, doi:10.1007/s00367-014-0395-x.
31. Lopes Araújo, G.; Araújo Maciel, S.; Gomes de Assis Silva, e. análise da paisagem da reserva extrativa marinha delta do parnaíba na perspectiva geossistêmica landscape analysis of the delta marine extractive reserve of parnaíba from a geosystemic perspective análisis del paisaje de la reserva extrativa marinha delta do parnaíba desde la perspectiva geossistêmica;
32. Vieira Crespo, M. de F.; Gomes, J.M.A.; Oliveira da Silva, R. Value Chain of the Mangrove Crab (*Ucides Cordatus*): A Case Study of the Parnaíba Delta, Northeast Brazil. *Marine Policy* **2021**, 131, doi:10.1016/j.marpol.2021.104642.
33. Fogaça, F.H. dos S.; Fernandes-Góes, L.C.; Souza, L.O.; Silva, K.P. da; Góes, J.M. de; Pereira, A.M.L.; Mai, M.G.; Magalhães, J.A. Monitoring Mangrove Crab *Ucides Cordatus* Linnaeus, 1763 (Crustacea: Ucididae) Landing in the Parnaíba River Delta: Fishing Characteristics, Social and Economic Aspects. *Nauplius* **2018**, 26, doi:10.1590/2358-2936e2018020.
34. Melo, R.S.; Braga, S. de S.; Lins, R.P.M. Contribuição Dos Meios de Hospedagem Para as Emissões Diretas de Dióxido de Carbono (CO₂) Na Cidade de Parnaíba (Piauí, Brasil). *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo* **2021**, 15, 1968, doi:10.7784/rbtur.v15i2.1968.
36. Legat, J.F. a; Mota, R.I.; Puchnick, a; Bittencourt, C.; Santana, W.S. Considerations about *Ucides Cordatus* *Ucides Cordatus* Fishing in the Parnaíba River Delta Region, Brazil. *Journal of Coastal Research* **2006**, 2004, 1281–1283.
37. Pedro, T.; Ramos, A.; Tamar Da Costa Ramos, R.; Almeida, S.; Ramos, Q.A.; Ramos, T.P.A.; Ramos, R.T.C.; Ramos, S.A.Q.A. Inventory Ichthyofauna of the Parnaíba River Basin, Northeastern Brazil., doi:10.1590/S1676-06032014003913.
38. Lugo, A.E.; Tierra, D.; Rico, P.; Snedaker, S.C. *The Ecology of Mangroves*; 1974;
39. Nascimento, M.G.P.; Mayo, S.J.; de Andrade, I.M. Distinguishing the Brazilian Mangrove Species *Avicennia Germinans* and *A. Schaueriana* (Acanthaceae) by Elliptic Fourier Analysis of Leaf Shape. *Feddes Repertorium* **2021**, 132, 77–107, doi:10.1002/fedr.202000025.
40. de Jesus, V.; Meireles, S.; Pessôa, M.; Meireles, A.; Fábio, ; Vieira, J.; João, ; Campos, B.; Farias, R.; Barros, M. de *Conhecimento Botânico Tradicional e Conservação de Espécies Na RESEX Delta Do Parnaíba, Nordeste Do Brasil Traditional Botanical Knowledge and Species Conservation in the RESEX Delta Do Parnaíba, Northeast Brazil*; Vol. 39;.

41. Ottoni, F.P.; Hughes, R.M.; Katz, A.M.; Rangel-Pereira, F. da S.; de Bragança, P.H.N.; Fernandes, R.; Palmeira-Nunes, A.R.O.; Nunes, J.L.S.; dos Santos, R.R.; Piorski, N.M.; et al. Brazilian Mangroves at Risk. *Biota Neotropica* **2021**, *21*, doi:10.1590/1676-0611-bn-2020-1172.
42. Mcivor, A.; Spencer, T.; Möller, I.; Spalding, M. *Storm Surge Reduction by Mangroves Natural Coastal Protection Series: Report 2*;
43. Thampanya, U.; Vermaat, J.E.; Sinsakul, S.; Panapitukkul, N. Coastal Erosion and Mangrove Progradation of Southern Thailand. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2006**, *68*, 75–85, doi:10.1016/j.ecss.2006.01.011.
44. Spalding, M.; Kainuma, M.; Collins, L. *World Atlas of Mangroves*; ISBN 9781844076574.
45. McKee, K.L. Biophysical Controls on Accretion and Elevation Change in Caribbean Mangrove Ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2011**, *91*, 475–483, doi:10.1016/j.ecss.2010.05.001.
46. Farias Capistrano, J.; Fabiana Macedo Lopes, P. Crab Gatherers Perceive Concrete Changes in the Life History Traits of *Ucides Cordatus* (Linnaeus, 1763), but Overestimate Their Past and Current Catches. *Ethnobiology and Conservation* **2012**, doi:10.15451/ec2012-8-1.7-1-21.
47. Luca Congedo Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Release 7.9.5.1. **2021**, 231.
48. Mahoney, B.Y.J.J. The Use of Boolean Algebra Partition Analysis in Pollution Ecology Author (s): Joseph J . Mahoney Source : Journal of Applied Ecology , Apr ., 1970 , Vol . 7 , No . 1 (Apr ., 1970), Pp . 169-176 Published by : British Ecological Society Stable URL : H. **1970**, 7, 169–176.
49. Mahoney, J.J. *The Use of Boolean Algebra Partition Analysis in Pollution Ecology*; 1970; Vol. 7;.
50. Paul Seevers, B.M.; Jones, B.K.; Qiu, Z.; Liu, Y. *A Comparison of Change Detection Methods Using Multispectral Scanner Data*; 1989; Vol. 12;.
51. Shi, T.; Chen, Y.; Liu, Y.; Wu, G. Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy- An Alternative for Monitoring Soil Contamination by Heavy Metals. *Journal of Hazardous Materials* **2014**, *265*, 166–176, doi:10.1016/j.jhazmat.2013.11.059.
52. Liu, J.; Zhang, Y.; Wang, H.; Du, Y. Study on the Prediction of Soil Heavy Metal Elements Content Based on Visible Near-Infrared Spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **2018**, *199*, 43–49, doi:10.1016/j.saa.2018.03.040.
54. Lucena, A.F.P.; Hejazi, M.; Vasquez-Arroyo, E.; Turner, S.; Köberle, A.C.; Daenzer, K.; Rochedo, P.R.R.; Kober, T.; Cai, Y.; Beach, R.H.; et al. Interactions between Climate Change Mitigation and Adaptation: The Case of Hydropower in Brazil. *Energy* **2018**, *164*, 1161–1177, doi:10.1016/j.energy.2018.09.005.
55. Ellwanger, J.H.; Kulmann-Leal, B.; Kaminski, V.L.; Valverde-Villegas, J.M.; da VEIGA, A.B.G.; Spilki, F.R.; Fearnside, P.M.; Caesar, L.; Giatti, L.L.; Wallau, G.L.; et al. Beyond Diversity Loss and Climate Change: Impacts of Amazon Deforestation on Infectious Diseases and Public Health. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **2020**, *92*, doi:10.1590/0001-3765202020191375.
56. Maia, A.; Nascimento, R.; Silva, Y.; Nascimento, C.; Mendes, W. de S.; Veras, G.; Araújo, J.; Tiecher, T.; Silva, Y. Near-Infrared Spectroscopy for Prediction of Potentially Toxic Elements in Soil and Sediments from a Semiarid and Coastal Humid Tropical Transitional River Basin. *SSRN Electronic Journal* **2022**, doi:10.2139/ssrn.4031424.
57. Nascimento, M.G.P.; Mayo, S.J.; de Andrade, I.M. Distinguishing the Brazilian Mangrove Species *Avicennia Germinans* and *A. Schaueriana* (Acanthaceae) by Elliptic

- Fourier Analysis of Leaf Shape. *Feddes Repertorium* **2021**, *132*, 77–107, doi:10.1002/fedr.202000025.
58. Godoy, M.D.P.; de Lacerda, L.D. Mangroves Response to Climate Change: A Review of Recent Findings on Mangrove Extension and Distribution. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **2015**, *87*, 651–667, doi:10.1590/0001-3765201520150055.
 59. Ferreira, A.C.; Lacerda, L.D. Degradation and Conservation of Brazilian Mangroves, Status and Perspectives. *Ocean and Coastal Management* **2016**, *125*, 38–46, doi:10.1016/j.ocecoaman.2016.03.011.
 60. dos Reis-Neto, A.S.; Meireles, A.J. de A.; Cunha-Lignon, M. Natural Regeneration of the Mangrove Vegetation on Abandoned Salt Ponds in Ceará, in the Semi-Arid Region of Northeastern Brazil. *Diversity* **2019**, *11*, doi:10.3390/d11020027.
 61. Pelage, L.; Domalain, G.; Lira, A.S.; Travassos, P.; Frédou, T. Coastal Land Use in Northeast Brazil: Mangrove Coverage Evolution Over Three Decades. *Tropical Conservation Science* **2019**, *12*, doi:10.1177/1940082918822411.
 62. Muehe, D.; Neves, C.F. *SPECIAL ISSUE NO. 14. Potential Impacts of Accelerated Sea-Level Rise on Developing Countries*; 1995;
 63. Romero-Uribe, H.M.; López-Portillo, J.; Reverchon, F.; Hernández, M.E. Effect of Degradation of a Black Mangrove Forest on Seasonal Greenhouse Gas Emissions. *Environmental Science and Pollution Research* **2021**, doi:10.1007/s11356-021-16597-1.
 64. Alatorre, L.C.; Sánchez-Carrillo, S.; Miramontes-Beltrán, S.; Medina, R.J.; Torres-Olave, M.E.; Bravo, L.C.; Wiebe, L.C.; Granados, A.; Adams, D.K.; Sánchez, E.; 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* **2016**, *125*, 98–109, doi:10.1016/j.jaridenv.2015.10.010.
 65. Bullock, E.L.; Fagherazzi, S.; Nardin, W.; Vo-Luong, P.; Nguyen, P.; Woodcock, C.E. Temporal Patterns in Species Zonation in a Mangrove Forest in the Mekong Delta, Vietnam, Using a Time Series of Landsat Imagery. *Continental Shelf Research* **2017**, *147*, 144–154, doi:10.1016/j.csr.2017.07.007.
 66. Drude De Lacerda, L. *ISME/GLOMIS Electronic Journal An Electronic Journal Dedicated to Enhance Public Awareness on the Importance of Mangrove Ecosystems Burial of Mangroves by Mobile Dunes: A Climate Change Threat in Semiarid Coasts*; 2018; Vol. 16;.
 67. Fagherazzi, S.; Bryan, K.R. Buried Alive or Washed Away: The Challenging Life of Mangroves in the Mekong Delta. *Nardin Source: Oceanography* **2017**, *30*, 48–59, doi:10.2307/26201897.
 68. Nguyen 2016.
 69. Bakshi, A.; Panigrahi, A.K. Studies on the Impact of Climate Changes on Biodiversity of Mangrove Forest of Sundarban Delta Region Sustainable Management of Aquatic Resources in India Involving Fishermen Cooperative Societies View Project Impact of Pollution on Fish View Project STUD. *J. Environ & Sociobiol* **2015**, *12*, 7–14.
 70. Sakai, T.; Omori, K.; Oo, A.N.; Zaw, Y.N. Monitoring Saline Intrusion in the Ayeyarwady Delta, Myanmar, Using Data from the Sentinel-2 Satellite Mission. *Paddy and Water Environment* **2021**, *19*, 283–294, doi:10.1007/s10333-020-00837-0.
 71. Bellafiore, D.; Ferrarin, C.; Maicu, F.; Manfè, G.; Lorenzetti, G.; Umgiesser, G.; Zaggia, L.; Levinson, A.V. Saltwater Intrusion in a Mediterranean Delta Under a Changing Climate. *Journal of Geophysical Research: Oceans* **2021**, *126*, doi:10.1029/2020JC016437.

72. Parida, A.K.; Das, A.B.; Sanada, Y.; Mohanty, P. Effects of Salinity on Biochemical Components of the Mangrove, *Aegiceras Corniculatum*. *Aquatic Botany* **2004**, *80*, 77–87, doi:10.1016/j.aquabot.2004.07.005.
73. Wang, J.; Xu, Y.; Wu, G. The Integration of Species Information and Soil Properties for Hyperspectral Estimation of Leaf Biochemical Parameters in Mangrove Forest. *Ecological Indicators* **2020**, *115*, doi:10.1016/j.ecolind.2020.106467.
74. White, E.; Kaplan, D. Identifying the Effects of Chronic Saltwater Intrusion in Coastal Floodplain Swamps Using Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment* **2021**, *258*, doi:10.1016/j.rse.2021.112385.
75. Soares Santos-Filho, F.; Bezerra De Almeida, E.; Jefiter, C.; Reis, D.; Soares, S.; Zickel, C.S. *Revista Brasileira de Geografia Física Fisionomias Das Restingas Do Delta Do Parnaíba, Nordeste, Brasil*; 2010; Vol. 03;
76. Vogt, N.; Pinedo-Vasquez, M.; Brondízio, E.S.; Rabelo, F.G.; Fernandes, K.; Almeida, O.; Riveiro, S.; Deadman, P.J.; Dou, Y. Local Ecological Knowledge and Incremental Adaptation to Changing Flood Patterns in the Amazon Delta. *Sustainability Science* **2016**, *11*, 611–623, doi:10.1007/s11625-015-0352-2.
77. Saintilan, N.; Wilson, N.C.; Rogers, K.; Rajkaran, A.; Krauss, K.W. Mangrove Expansion and Salt Marsh Decline at Mangrove Poleward Limits. *Global Change Biology* **2014**, *20*, 147–157, doi:10.1111/gcb.12341.
78. Rodrigues, E.; Cohen, M.C.L.; Liu, K. biu; Pessenda, L.C.R.; Yao, Q.; Ryu, J.; Rossetti, D.; de Souza, A.; Dietz, M. The Effect of Global Warming on the Establishment of Mangroves in Coastal Louisiana during the Holocene. *Geomorphology* **2021**, *381*, 107648, doi:10.1016/j.geomorph.2021.107648.
79. Besset, M.; Anthony, E.J.; Bouchette, F. Multi-Decadal Variations in Delta Shorelines and Their Relationship to River Sediment Supply: An Assessment and Review. *Earth-Science Reviews* 2019, *193*, 199–219.
80. Grases, A.; Gracia, V.; García-León, M.; Lin-Ye, J.; Sierra, J.P. Coastal Flooding and Erosion under a Changing Climate: Implications at a Low-Lying Coast (Ebro Delta). *Water (Switzerland)* **2020**, *12*, doi:10.3390/w12020346.
81. Cavanaugh, K.C.; Kellner, J.R.; Forde, A.J.; Gruner, D.S.; Parker, J.D.; Rodriguez, W.; Feller, I.C. Poleward Expansion of Mangroves Is a Threshold Response to Decreased Frequency of Extreme Cold Events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2014**, *111*, 723–727, doi:10.1073/pnas.1315800111.
82. Bozi, B.S.; Figueiredo, B.L.; Rodrigues, E.; Cohen, M.C.L.; Pessenda, L.C.R.; Alves, E.E.N.; de Souza, A. v.; Bendassolli, J.A.; Macario, K.; Azevedo, P.; et al. Impacts of Sea-Level Changes on Mangroves from Southeastern Brazil during the Holocene and Anthropocene Using a Multi-Proxy Approach. *Geomorphology* **2021**, *390*, doi:10.1016/j.geomorph.2021.107860.
83. Saintilan, N.; Rogers, K.; Kelleway, J.J.; Ens, E.; Sloane, D.R. Climate Change Impacts on the Coastal Wetlands of Australia. *Wetlands* 2019, *39*, 1145–1154.
84. Zhang, Q.; Gemmer, M.; Chen, J. Climate Changes and Flood/Drought Risk in the Yangtze Delta, China, during the Past Millennium. *Quaternary International* **2008**, *176–177*, 62–69, doi:10.1016/j.quaint.2006.11.004.
85. Woodroffe, C.D.; Rogers, K.; McKee, K.L.; Lovelock, C.E.; Mendelssohn, I.A.; Saintilan, N. Mangrove Sedimentation and Response to Relative Sea-Level Rise. *Annual Review of Marine Science* **2016**, *8*, 243–266, doi:10.1146/annurev-marine-122414-034025.
86. Lovelock, C.E.; Cahoon, D.R.; Friess, D.A.; Guntenspergen, G.R.; Krauss, K.W.; Reef, R.; Rogers, K.; Saunders, M.L.; Sidik, F.; Swales, A.; et al. The Vulnerability of Indo-

- Pacific Mangrove Forests to Sea-Level Rise. *Nature* **2015**, *526*, 559–563, doi:10.1038/nature15538.
87. Tessler, Z.D.; Vörösmarty, C.J.; Overeem, I.; Syvitski, J.P.M. A Model of Water and Sediment Balance as Determinants of Relative Sea Level Rise in Contemporary and Future Deltas. *Geomorphology* **2018**, *305*, 209–220, doi:10.1016/j.geomorph.2017.09.040.
 88. Ellison, J.C. Vulnerability Assessment of Mangroves to Climate Change and Sea-Level Rise Impacts. *Wetlands Ecology and Management* **2015**, *23*, 115–137, doi:10.1007/s11273-014-9397-8.
 89. Fusi, M.; Giomi, F.; Babbini, S.; Daffonchio, D.; Mcquaid, C.D.; Porri, F.; Cannicci, S. Thermal Specialization across Large Geographical Scales Predicts the Resilience of Mangrove Crab Populations to Global Warming. *Oikos* **2015**, *124*, 784–795, doi:10.1111/oik.01757.
 90. Abdrabo, M.A.; Hassaan, M.A. An Integrated Framework for Urban Resilience to Climate Change - Case Study: Sea Level Rise Impacts on the Nile Delta Coastal Urban Areas. *Urban Climate* **2015**, *14*, 554–565, doi:10.1016/j.uclim.2015.09.005.
 91. Belhabib, D.; Lam, V.W.Y.; Cheung, W.W.L. Overview of West African Fisheries under Climate Change: Impacts, Vulnerabilities and Adaptive Responses of the Artisanal and Industrial Sectors. *Marine Policy* **2016**, *71*, 15–28, doi:10.1016/j.marpol.2016.05.009.
 92. Zandalinas, S.I.; Fritschi, F.B.; Mittler, R.; Woodroffe, C.D.; Rogers, K.; McKee, K.L.; Lovelock, C.E.; Mendelsohn, I.A.; Saintilan, N.; White, E.; et al. Mangrove Expansion and Salt Marsh Decline at Mangrove Poleward Limits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **2021**, *26*, 147–157, doi:10.1111/gcb.14931.
 93. Ramírez, F.; Afán, I.; Davis, L.S.; Chiaradia, A. *Climate Impacts on Global Hot Spots of Marine Biodiversity*;
 94. Lam, V.W.Y.; Cheung, W.W.L.; Reygondeau, G.; Rashid Sumaila, U. Projected Change in Global Fisheries Revenues under Climate Change. *Scientific Reports* **2016**, *6*, doi:10.1038/srep32607.
 95. Ho, T.T.; Shimada, K.; Howe, P.D.; Marlon, J.R.; Mildenerberger, M.; Shield, B.S.; Guo, Y.; Wu, W.; Du, M.; Liu, X.; et al. How Will Climate Change Shape Climate Opinion? *Journal of Cleaner Production* **2019**, *14*, 128129, doi:10.1016/j.jclepro.2021.128129.
 107. Haque, M.; Z.; Reza, M.; I.; H. Salinity intrusion affecting the ecological integrity of sundarbans mangrove forests, Bangladesh. 2017. *8*, 131-144.
 108. Mokievskya, V. O.; Sonb T.; Dobryninc D. V. The Dynamics of Mangroves in the Mekong Delta (Vietnam): From Degradation to Restoration. 2020, *494*, 745–747