

SIMULAÇÃO DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS E FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO

Hanlleth Agamenon Pessoa da Silva¹, Matheus da Silva Menezes² (orientador)

Resumo: Este trabalho contempla um estudo sobre o nível do mar e suas possíveis implicações em uma área costeira do litoral piauiense. Foi realizado um levantamento de dados históricos sobre a elevação média do nível do mar obtidos de medições realizadas pela NASA e disponibilizados em seu site. Partindo desses dados fizemos estudos de ajuste de funções via método dos Mínimos Quadrados buscando obter uma função que melhor represente o comportamento dos dados e também realizar previsões futuras sobre o nível do mar. Por fim, a partir dos resultados obtidos através do método numérico, efetuar uma simulação para apontamento das principais áreas do litoral piauiense suscetíveis a inundação devido o avanço do mar nos próximos 78 anos. O estudo considerou o ajuste dos dados para funções de comportamento linear logarítmica, exponencial, potencial e também polinomial de segundo grau (ou quadrática), onde algumas funções apresentaram bons ajustes, ficando dentro de faixas estimadas pelo Sexto Relatório de Avaliação do IPCC 2022, os casos linear e logarítmico num cenário mais otimista e o caso e quadrático em um cenário mais pessimista. A partir dos resultados encontrados, utilizando o software QGIS para simular o impacto desta variação no nível do mar na costa do litoral piauiense, foi verificado em ambos os cenários as áreas de preservação ambiental, aquicultura, salicultura além do Porto Internacional do Piauí serão afetados em decorrência desse problema.

Palavras-chave: IPCC; Impactos Ambientais; Método dos Mínimos Quadrados; Elevação do Nível do Mar; Geotecnologias;

1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1] a Terra sempre esteve em constantes mudanças climáticas, só que em ciclos espaçados com milhares de anos e provocados por fenômenos naturais. Mas a partir da Revolução Industrial as alterações provocadas pelas ações humanas começaram a acelerar esses ciclos, principalmente no que se refere a elevação da temperatura média no planeta, ocasionado pelo excessivo aumento na concentração de gases do efeito estufa provocando um desequilíbrio em todos os ecossistemas.

A partir da década de 80 as discussões sobre mudanças climáticas tornaram-se um assunto relevante e de interesse global, tendo como ponto de partida a criação do IPCC (Painel Internacional de Mudanças Climáticas). Os debates gerados a respeito do tema resultaram na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC) em 1992 e, posteriormente no Protocolo de Kyoto em 1997, além de outros eventos nacionais e internacionais com o desenvolvimento de pesquisas científicas a respeito do tema. [2]

De acordo com os observatórios e as pesquisas recentes, no último século o nível médio do mar vem subindo e invadindo as zonas costeiras, esse acontecimento é associado especialmente ao derretimento das geleiras e pela expansão térmica dos oceanos causados pelas mudanças climáticas associadas as atividades antropológicas [3].

Devido ao grande empenho dos pesquisadores e sobretudo ao desenvolvimento das tecnologias computacionais, tornou-se possível uma melhor modelagem, simulação e interpretação de dados, chegando a resultados que mais se aproximam da realidade. Portanto corroboramos com o pensamento de [4] pois é notório que o conhecimento sobre o funcionamento dos sistemas terrestres cresceu muito nas últimas décadas, acompanhando os avanços tecnológicos e a interdisciplinaridade de conhecimentos que tem sido aplicado aos novos modelos climáticos atuais, sendo esses muito mais realistas do que os projetados a cinco ou dez anos atrás.

Esse fato também é citado por [5] onde afirma que a partir do final da década de 1940, devido a vasta disponibilidade de recursos computacionais ocorreu uma expansão no uso e desenvolvimento de métodos numéricos. Isso nos possibilitou a resolver problemas que, trazem consigo soluções analíticas complexas ou até impossíveis de se obter.

Entre os vários métodos numéricos, existem aqueles que servem para ajustar curvas a partir de pares dados coletados ou simplificar funções complicadas de se trabalhar, como por exemplo o caso do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Baseado nesse método o presente trabalho objetiva avaliar a eficiência do mesmo numa estimativa da elevação média dos oceanos, a partir de dados do observatório da NASA (National Aeronautics And Space Administration) em comparação com as previsões divulgadas pelo Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Com o auxílio das ferramentas da geotecnologia fazer uma simulação dos possíveis impactos socioambientais devido à essa elevação do nível mar na costa do litoral piauiense.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Nível do mar / Monitoramento atual

A elevação do nível do mar é um problema que vem causando preocupações a todas as zonas costeiras ao redor do mundo, são várias as pesquisas e trabalhos científicos a respeito do tema. No seu trabalho [15] traz uma projeção da vulnerabilidade e suscetibilidade a intrusão marinha no município de João da Barra/RJ, a partir dos cenários previstos pelo IPCC 2014. Outro trabalho na mesma temática foi realizado por [16] comparando a variação do nível do mar a partir de altimetria por satélite e marégrafo em Fortaleza/CE.

Paralela a essas pesquisas existe também o monitoramento desse fenômeno pelos vários observatórios que se debruçam sobre o assunto como é o caso de [12] que desde 1993 vêm fazendo o acompanhamento da elevação média do mar e mostra uma tendência ascendente do mesmo como mostra a Figura 1.

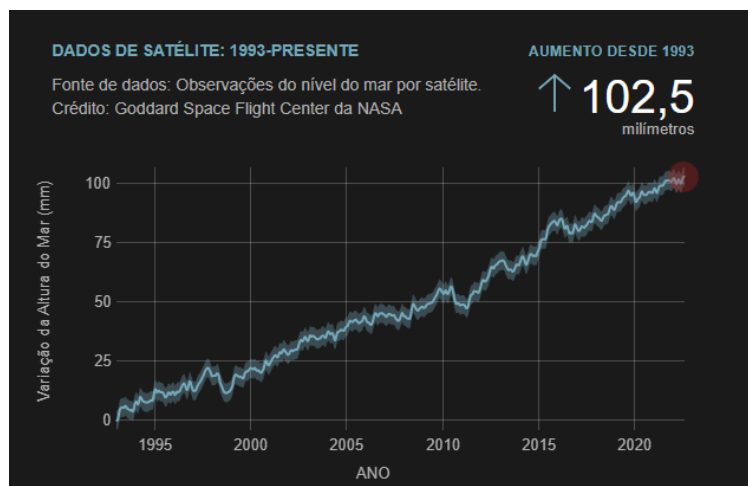


Figura 1 – Dados de Satélite: 1993 – 2022. Fonte [12]

2.2 Região de estudo

A área selecionada para o estudo foi o litoral piauiense banhada devido a possuir uma extensão e características que se adequa aos objetivos da pesquisa, sendo uma área de grande valor turístico devido as suas características geográficas, contar também com indústrias nos ramos salineiros e de pescado, além das atividades extrativistas executadas nas áreas de manguezais e toda a riqueza ambiental presente nesse ecossistema.

. Que segundo [14] trata-se do menor litoral brasileiro com cerca de 66 Km de extensão, contemplando quatro municípios: Cajueiro da Praia, Luís Correia, Parnaíba e Ilha Grande localizados entre as coordenadas geográficas de 2°42'35" e 3°05'02" de latitude sul e 41°14'53" e 41°52'46" de longitude oeste, fazendo fronteira com os estados do Maranhão e Ceará. Esses quatro municípios de acordo com os dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) abrangem uma área de 1.911,9 Km² com uma população estimada de 190 mil pessoas e um IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) que não ultrapassa 0,687 (Figura 2).

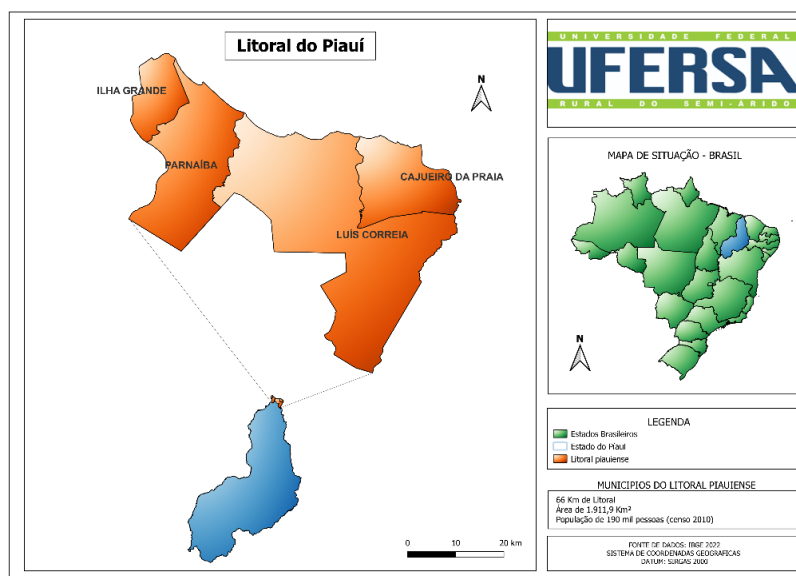


Figura 2 - Área de estudo (Autoria Própria)

A economia da região gira em torno de atividades ligadas ao mar, seja de forma direta ou indireta. O turismo é uma das principais atividades que movimentam a economia local. A rota das emoções é um circuito turístico que parte do Ceará, atravessa o Piauí até chegar aos lençóis Maranhenses. No percurso os visitantes disfrutam de dunas, mangues, belas praias além dos ventos favoráveis a prática de esportes aquáticos. Com isso a cidade de Parnaíba se tornou uma das principais portas de entrada para o turismo no Delta do Parnaíba [18].

Ainda segundo [18], em toda a região encontram-se uma população que desempenham atividades ligadas ao ecossistema marinho como os pescadores fluviais, pescadores marinhos, criadores de camarão, marisqueiras, catadores de caranguejos, artesãos, rendeiras, construção de pequenas embarcações turísticas, etc.

Outra atividade desenvolvida na região e que também deve sofrer as consequências da elevação média do nível do mar é a produção de sal, que apesar de ser pequena, tendo seu declínio a partir dos anos de 1970 segundo [19], ainda contribui para a geração de renda na região.

2.3 Método dos Mínimos Quadrados

Segundo [6] o Método dos Mínimos Quadrados consiste em aproximar uma função $y = f(x)$ (real e de variável real) por uma função $G(x)$ que seja a combinação linear de funções conhecidas, isto é:

$$f(x) \cong a_0 \cdot g_0(x) + a_1 \cdot g_1(x) + \dots + a_n \cdot g_n(x)$$

de tal modo que a distância entre $f(x)$ e $G(x)$ seja a menor possível.

Ainda de acordo com [6] a troca da função $f(x)$ por $G(x)$ é indicada quando o uso da função oferece alguns inconvenientes, tais como:

- $f(x)$ é definida através de processos não finitos como integrais, soma de séries, etc.
- $f(x)$ é conhecida através de pares de pontos, obtidos em experimentos, e desejamos substituí-la por uma função cujo gráfico se ajuste aos pontos observados.

2.3.1 Caso Linear

A função de ajuste para o caso linear será do tipo:

$$G(x) = a(x) + b \quad (A)$$

Onde o erro mínimo é dado pela equação:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2$$

No ponto mínimo, as derivadas parciais do erro mínimo em relação a a e b são nulas, logo

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0$$

Derivando em relação a a , temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= \frac{\partial \sum (y_i - ax_i - b)^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= (2 \cdot \sum (y_i - ax_i - b) \cdot x_i) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= \sum x_i y_i - a \sum x_i^2 - b \sum x_i = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= a \sum x_i^2 + b \sum x_i - \sum x_i y_i \end{aligned} \quad (1)$$

Derivando em relação a b , temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b} &= \frac{\partial \sum (y_i - ax_i - b)^2}{\partial b} \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= (2 \cdot \sum (y_i - ax_i - b) \cdot (-1)) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= \sum y_i - a \sum x_i - \sum b = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= \sum y_i - a \sum x_i - nb = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = a \sum xi + nb = \sum yi \quad (2)$$

Com as equações (1) e (2) formaremos o seguinte sistema linear:

$$\begin{cases} a \sum x^2 + b \sum x = \sum xy & (1) \\ \sum x + nb = \sum y & (2) \end{cases}$$

Se isolarmos b em (2), temos:

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) na equação (1), temos o valor de a da equação utilizando apenas os dados tabelados.

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4)$$

Se isolarmos a em (2), temos:

$$a = \frac{\sum y - nb}{\sum x} \quad (5)$$

Substituindo a equação (5) na equação (1), temos o valor de b da equação utilizando apenas os dados tabelados.

$$b = \frac{\sum x \sum xy - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad (6)$$

2.3.2 Casos Logarítmica

A função de ajuste para o caso logarítmica será:

$$G(x) = a \cdot LN(x) + b \quad (B)$$

Por ser similar a função (A), então o procedimento é igual, fazendo apenas a substituição de x por LN(x), então para determinar os coeficientes a e b foi feita apenas uma adaptação da equações (4) e (6) respectivamente, chegando as seguintes equações:

$$a = \frac{n \sum LN(x) \cdot y - \sum LN(x) \sum y}{n \sum LN(x)^2 - [\sum LN(x)]^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{\sum LN(x) \sum y - \sum y \sum LN(x)}{[\sum LN(x)]^2 - n \sum LN(x)^2} \quad (8)$$

2.3.3 Caso Exponencial

A função de ajuste para o caso linear será do tipo:

$$G(x) = b \cdot e^{ax} \quad (C)$$

Para deixarmos a função (C) no mesmo formato de (A), aplicamos logaritmo dos dois lados da equação, então temos:

$$\begin{aligned} y &= b \cdot e^{ax} \\ LN(y) &= LN(b \cdot e^{ax}) \\ LN(y) &= LN(b) + LN(e^{ax}) \\ LN(y) &= LN(b) + ax \cdot LN(e) \end{aligned}$$

Como $LN(e) = 1$, temos:

$$LN(y) = LN(b) + ax \quad (D)$$

Com função (D) similar a função (A) seguimos o mesmo raciocínio adotado mapa o item 2.3.1, substituindo y por LN(y), então para determinar o coeficiente a adequamos equação (4), temos:

$$a = \frac{n \sum x LN(y) - \sum x \sum LN(y)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (9)$$

Já para determinação do coeficiente **b** foi utilizado o mesmo raciocínio de adequação da equação (6), entretanto o valor obtido inicialmente representa $LN(b)$ sendo necessária calcular o exponencial dor valor encontrado.

$$LN(b) = \frac{\sum x \sum x \cdot LN(y) - \sum LN(y) \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \sum x^2} \quad (10)$$

$$b = e^{LN(b)} \quad (11)$$

2.3.4 Caso Potencial

A função de ajuste para o caso de potência será

$$G(x) = b \cdot x^a \quad (E)$$

Para linearizarmos a função (E) seguiremos o mesmo raciocínio empregado no item 2.5.2, aplicando logaritmo em ambos os lados da equação, temos:

$$\begin{aligned} LN(y) &= LN(b \cdot x^a) \\ LN(y) &= LN(b) + LN(x^a) \\ LN(y) &= LN(b) + a \cdot LN(x) \end{aligned} \quad (F)$$

Com a função (F) similar a função (A), seguimos o mesmo raciocínio do item anterior, substituímos **y** por $LN(y)$ e **x** por $LN(x)$, então para calcularmos o coeficiente **a** adequando a equação (4), temos:

$$a = \frac{n \sum LN(x) LN(y) - \sum LN(x) \sum LN(y)}{n \sum LN(x)^2 - [\sum LN(x)]^2} \quad (12)$$

Já para determinação do coeficiente **b** foi utilizado o mesmo raciocínio de adequação da equação (6), entretanto o valor obtido inicialmente representa $LN(b)$ sendo necessária calcular o exponencial dor valor encontrado como mostra a equação (11).

$$LN(b) = \frac{\sum LN(x) \sum LN(x) \cdot LN(y) - \sum LN(y) \sum LN(x)^2}{[\sum LN(x)]^2 - n \sum LN(x)^2} \quad (13)$$

2.3.5 . Caso Quadrática

A função de ajuste para o caso polinomial quadrática será:

$$G(x) = ax^2 + bx + c \quad (G)$$

Como visto no caso linear no ponto mínimo, as derivadas parciais do erro mínimo em relação a **a**, **b** e **c** também são nulas, logo:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0 \quad , \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial E}{\partial c} = 0$$

Derivando em relação a **a**, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial a} &= \frac{\partial \sum (yi - axi^2 - bxi - c)^2}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= 2 \sum [(yi - axi^2 - bxi - c) xi^2] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= \sum yixi^2 - a \sum xi^4 - b \sum xi^3 - c \sum xi^2 = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial a} &= a \sum xi^4 + b \sum xi^3 + c \sum xi^2 = \sum yixi^2 \end{aligned} \quad (14)$$

Derivando em relação a **b**, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial b} &= \frac{\partial \sum (yi - axi^2 - bxi - c)^2}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= 2 \sum [(yi - axi^2 - bxi - c) xi] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b} &= \sum yixi - a \sum xi^3 - b \sum xi^2 - c \sum xi = 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = a \sum xi^3 + b \sum xi^2 + c \sum xi = \sum yixi \quad (15)$$

Derivando em relação a c , temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial c} &= \frac{\partial \sum (yi - axi^2 - bxi - c)^2}{\partial c} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= 2 \sum [(yi - axi^2 - bxi - c) (-1)] = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= \sum yi - a \sum xi^2 - b \sum xi^1 - \sum c = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= \sum yi - a \sum xi^2 - b \sum xi^1 - \sum c = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= \sum yi - a \sum xi^2 - b \sum xi^1 - nb = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial c} &= a \sum xi^2 + b \sum xi + nb = \sum yi \end{aligned} \quad (16)$$

Assim as equações (14), (15) e (16) forma o seguinte sistema linear:

$$a \sum xi^4 + b \sum xi^3 + c \sum xi^2 = \sum yixi^2 \quad (14)$$

$$a \sum xi^3 + b \sum xi^2 + c \sum xi = \sum yixi \quad (15)$$

$$a \sum xi^2 + b \sum xi + nb = \sum yi \quad (16)$$

Para a resolução do sistema foi usado o Método da Eliminação de Gauss, que de acordo com [6] consiste em transformar a matriz em triangular equivalente através de uma sequência de operações elementares sobre as linhas do sistema original, e assim obter um sistema triangular superior equivalente, por fim é feita a substituição em sequência dos valores encontrados a partir do sistema equivalente e assim determinaremos os coeficientes a , b e c .

2.3.6 Coeficiente de Determinação

O coeficiente de determinação serve para mensurarmos a qualidade do ajuste, ou seja, para sabermos se ficou dentro dos limites aceitáveis é preciso fazer a determinação desse coeficiente, que é dado pela equação:

$$R^2 = \frac{SQ_{reg}}{SQ_{total}} \quad (17)$$

Onde a soma dos quadrados dos desvios em relação a regressão (SQ_{reg}), a soma dos quadrados dos desvios totais (SQ_{total}) e a soma dos quadrados dos desvios em relação a regressão (y') são dados respectivamente pelas seguinte equações:

$$SQ_{reg} = \sum (G(x) - y')^2 \quad (18)$$

$$SQ_{total} = \sum (y - y')^2 \quad (19)$$

$$y' = \frac{1}{n} \sum y \quad (20)$$

O valor encontrado estará entre o intervalo $0 \leq R^2 \leq 1$, sendo considerado ruins os ajustes onde o R^2 for mais próximo de 0, e considerados bons os ajustes onde o R^2 for mais próximo de 1.

2.4. Geotecnologias

As geotecnologias podem ser entendidas como um conjunto de tecnologias utilizadas na aquisição, armazenamento, processamento, análise e fornecimento de informações georreferenciadas, constituída de poderosas ferramentas que são essenciais para tomadas de decisões. Dentre as diversas geotecnologias se destacam os sistemas de informações geográficas, os sistemas de posicionamento global, a cartografia digital, o sensoriamento remoto e a topografia [7]

De forma similar aos métodos numéricos, as geotecnologias têm o seu desenvolvimento acompanhando os avanços tecnológicos, onde o computador foi incorporado como uma ferramenta de análise de dados. Os seus

primeiros passos foram dados durante a década de 70, com o lançamento dos primeiros Sistemas de Informação Geográfica (GIS) [8].

Um dos produtos advindos do sensoriamento remoto é o Modelo Digital de Elevação (MDE), que segundo [9] é um modelo matemático aproximado, que tem por objetivo criar modelos digitais para representar a variabilidade de elevação (altura) da superfície terrestre.

Ainda de acordo com [9], a tecnologia empregada nos satélites para a obtenção desses dados é o Radar. A partir do qual são emitidas radiações artificiais sobre a superfície do planeta, essas ondas eletromagnéticas são espalhadas em um intervalo de tempo programado e ao retornarem para o radar é possível determinar a distância entre a superfície terrestre e o satélite, com isso é possível mensurar a elevação da região. Essa modelagem utilizada pelo Radar é conhecida como SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), outra modelagem bastante conhecida e que usa princípios semelhantes é o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), com tudo, sua resolução é melhor se comparado ao ASTM.

É importante ressaltar que o MDE é um termo geral, e está dividido em outras duas categorias, o Modelo Digital de Superfície (MDS) e o Modelo Digital de Terreno (MDT). De acordo com [10], o MDS representa o limite inferior da atmosfera com as outras esferas (litosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera ou antroposfera) representando a superfície da terra, mas levando em consideração as árvores ou prédios, por exemplo. Já o MDT, representa o limite entre a litosfera e a atmosfera, representando a superfície da “terra nua”, ou seja, as árvores, prédios ou outra superfície que não seja o terreno natural são desconsiderados no modelo (Figura 3).

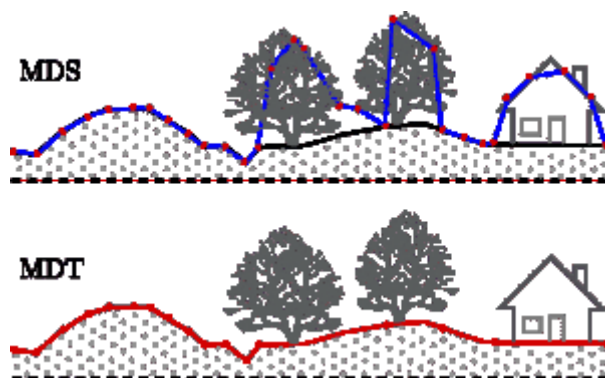


Figura 3 – MDS e MDT, Fonte [11]

Outra questão importante a ser abordada é com relação a diferença do tipo de armazenamento das informações de elevação no GeoTIF, que implica na representatividade da mesma. Pois, no caso de uma representação do pixel que está baseada em um modelo de área RasterPixellsArea, o valor de elevação representado para aquele pixel é a média de todos os valores dentro da área do pixel. Já no caso de uma representação baseada em ponto RasterPixellsPoint o valor representado para aquele pixel é o valor do ponto mais central do pixel (Figura 4). [10]

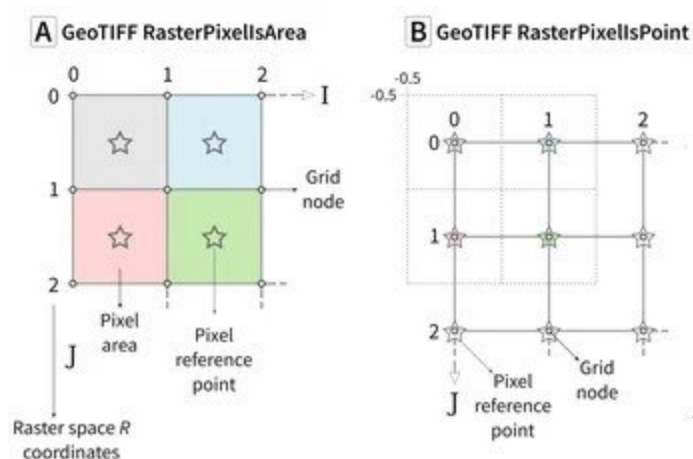


Figura 4 – RasterPixellsArea e RasterPixellsPoint. Fonte [10]

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho teve como seu ponto de partida uma revisão bibliográfica a respeito do tema, ferramentas e tecnologias empregadas para um bom desenvolvimento do artigo. A partir desse embasamento foi possível fazer estimativas futuras, simulações e apontamento de áreas que estarão susceptíveis aos efeitos

ocasionados pela elevação média do nível dos oceanos nas próximas décadas.

Em posse dos dados de elevação do nível do mar dos últimos 28 anos disponibilizados pela NASA, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados, será possível determinar as funções que representam essa elevação ao decorrer dos anos, fazer estimativas futuras, analisar quais dessas estimativas possuem um bom ajuste a partir dos coeficientes de determinação das funções encontradas, além compara-las com as estimativas feitas pelo IPCC 2020. Por fim, utilizando um software de geoprocessamento, será feita a simulação da elevação no nível do mar com os valores apontados pelas estimativas futuras, com isso obteremos indicativos de quais áreas serão atingidas em decorrência desse problema.

3.1 Origem dos dados

A coleta de dados de satélite foi feita pela NASA e disponibilizados em seu site, os valores da elevação média do mar referentes ao período de 1993 a 2022 estavam distribuídos em séries de 36 ou 37 observações espaçadas durante o ano. Para uma melhor análise dos mesmos foram feitas as médias dessas observações para cada ano, descartando as observações do ano de 2022 por não ter completado o ciclo de no mínimo 36 observações.

Por iniciar em valores médios negativos, os dados foram adaptados acrescentando a eles uma cota de 34,52811mm para que fosse possível trabalharmos com todos os métodos, e deixarmos no formato que represente a real elevação média para cada ano, já que as medições iniciaram em cotas negativas. Os dados adaptados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios anuais da elevação do nível do mar. Fonte: Adaptado de [12].

Ano	Nível do mar (mm)	Ano	Nível do mar (mm)	Ano	Nível do mar (mm)
1993	0,00001	2003	30,8178	2013	60,8749
1994	3,9762	2004	32,7789	2014	64,5295
1995	7,1448	2005	37,5722	2015	75,5149
1996	9,1751	2006	39,0359	2016	77,6813
1997	13,2565	2007	39,6327	2017	78,8267
1998	10,8795	2008	41,8112	2018	83,0535
1999	14,4922	2009	46,9146	2019	90,0395
2000	17,7413	2010	48,2181	2020	91,0759
2001	23,3157	2011	47,5654	2021	95,3927
2002	27,4520	2012	58,4540		

3.2 Aplicação do método

No presente artigo trabalharemos com o ajuste descrito pelo item **b** da seção 2.3, através dos pares de dados obtidos pelos observatórios da NASA, estabelecendo uma função $G(x)$ onde o gráfico se ajusta aos pontos observados utilizando o método para determinar os valores dos coeficientes das retas, estabelecer as funções de ajuste e seus coeficientes de determinação. Os cálculos foram executados utilizando o Software Excel 2020, com uma rotina de cálculo padronizada para cada caso. A máquina utilizada nesse processo foi um Notebook Dell Inspiron 15 3000, com um processador Intel Core i7 e o sistema operacional Windows 10 Pro.

Nesse mesmo processo foram feitas as estimativas para os cenários futuros dos próximos 78 anos, utilizando as funções de ajustes encontradas pelos métodos.

3.3 Simulação

Por último, com o auxílio das ferramentas de geoprocessamento, em especial o Software QGIS 3.26.3, foram efetuadas simulações das elevações marítimas, apontando as potenciais áreas que sofreram impactos socioambientais em decorrência dessa elevação. Para a qual foi utilizado o Modelo Digital de Superfície *Copernicus Global DSM 30m*, pois em análises preliminares esse foi o MDE que melhor se ajustou ao percurso dos rios que banham a área de estudo, esse modelo está disponibilizado de forma gratuita para os usuários. Os dados para construção desse modelo foram coletados em uma missão que durou de 2011 a 2015 utilizando radares de dois satélites, quando processados geraram um MDS com resolução de pixel de 30 metros e um Grid Storage do tipo RasterPixellsPoint [10].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Método dos Mínimos Quadrados

Feito o tabelamento no Excel 2020 e utilizando as equações correspondentes a cada método, mostrado no item 2 deste trabalho, chegamos aos resultados descritos a seguir.

4.1.1 Caso linear

A função de ajuste encontrada foi $G(x) = 3,3808(x) - 6741,4889$. Com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9833$ que representam um bom ajuste, mostrado no gráfico a seguir.

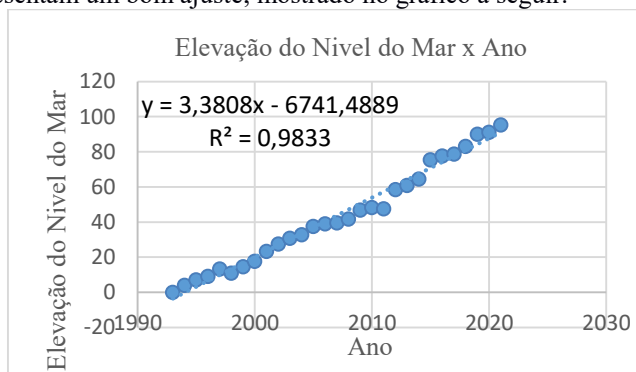


Figura 5 - Gráfico Elevação média do nível do mar x Ano, Caso Linear (Autoria própria)

4.1.2. Caso logarítmico

A função de ajuste encontrada foi $G(x) = 6783,8701\ln(x) - 51543,4810$. Com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9829$ que também representam um bom ajuste.

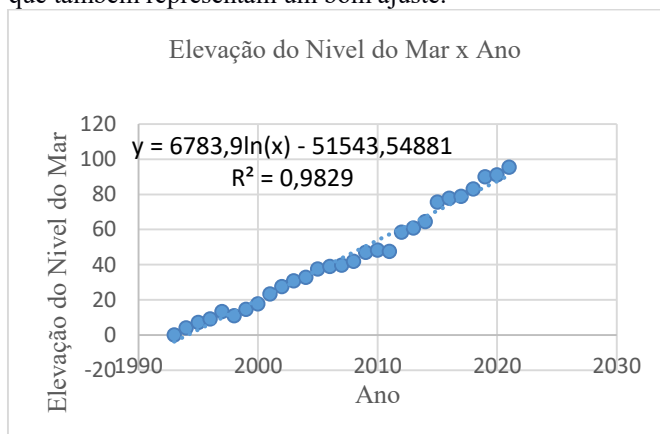


Figura 6 - Gráfico Elevação média do nível do mar x Ano Caso Logarítmico (Autoria própria)

4.1.3. Caso exponencial

A função de ajuste encontrada foi $G(x) = 2,3598 \times 10^{-177} \cdot e^{0,2411x}$. Com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,3188$ que não representa um bom ajuste, mostrado no gráfico a seguir.

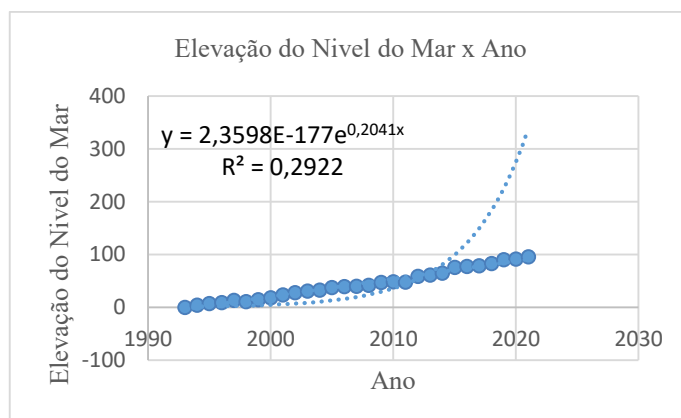


Figura 7 - Gráfico Elevação média do nível do mar x Ano, Caso Exponencial (Autoria própria)

4.1.4. Caso potencial

A função de ajuste encontrada foi $G(x) = 0 \cdot x^{410,2191}$. Com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,2930$ que não representa um bom ajuste, mostrado no gráfico a seguir.

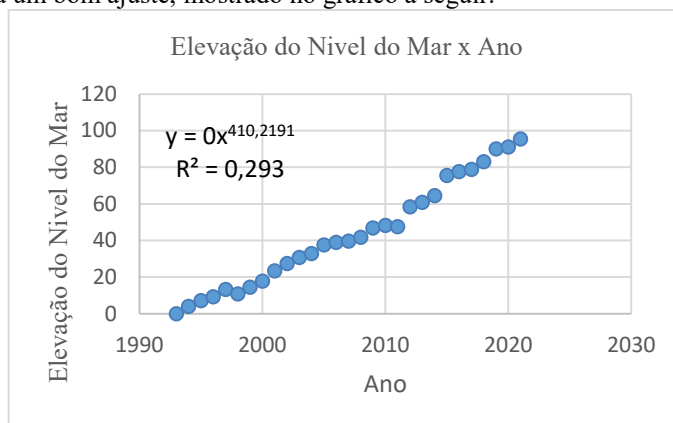


Figura 8 - Gráfico Elevação média do nível do mar x Ano para, Caso Logarítmico (Autoria Própria)

Nesse caso não foi possível encontrar um valor para b , pois seguindo o tabelamento chegamos a um $\ln(b) = -3071,7237$ e ao aplicarmos a exponencial para determinarmos b o valor encontrado foi 0 , possivelmente devido a um erro de underflow. Com isso, ficamos impossibilitados de fazer as previsões futuras utilizando a equação de aproximação encontrada pelo método.

4.1.5. Caso quadrático

A função de ajuste encontrada foi $G(x) = 0,0438x^2 - 172,4979x + 169749,6356$. Com um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9925$ que representa um bom ajuste, mostrado no gráfico a seguir.

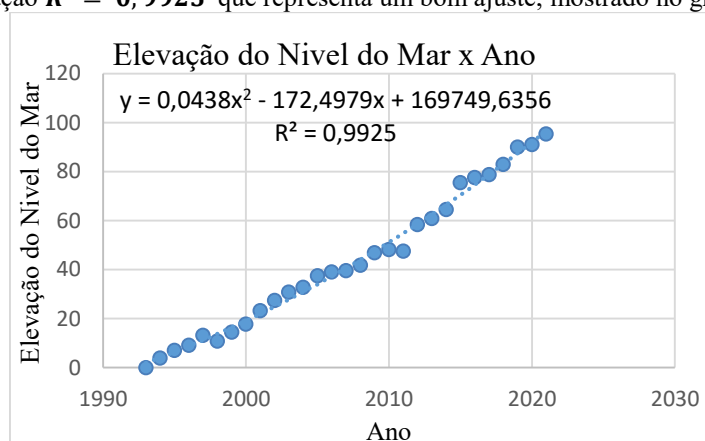


Figura 9- Gráfico Elevação média do nível do mar x Ano, Caso Quadrático (Autoria Própria)

4.1.6. Estimativas futuras

Para o presente trabalho foi adotado como aceitável os coeficientes de determinação $R^2 > 0,98$ os casos exponencial e potencial foram descartados por possuírem coeficiente de determinação inferiores ao estabelecido, além da impossibilidade gerada no caso potencial obtendo $b \cong 0$. Para os demais casos foram feitas as estimativas futuras a partir das equações obtidas, os resultados são mostrados no quadro a seguir:

Tabela 2 – Previsões futuras da elevação média do nível do mar pela aplicação dos métodos numéricos.

Fonte: Autores

Anos	Caso Linear $R^2 = 0,9833$	Caso Logarítmico $R^2 = 0,9829$	Caso Quadrática $R^2 = 0,9925$
2030	0,121 m	0,121 m	0,142 m
2040	0,155m	0,154 m	0,2 m
2060	0,223 m	0,22 m	0,343 m
2080	0,29 m	0,286 m	0,343 m
2100	0,358 m	0,351 m	0,734 m

Para uma melhor análise de nossas estimativas, foram feitas comparações com as estimativas do IPCC 2022 onde no seu **Capítulo 3 - Oceanos e Ecossistemas Costeiros e Seus Serviços** traz estimativas de qual será a elevação do nível do mar até 2100 como podemos ver no quadro abaixo:

Tabela 3 – Cenários previstos pelo IPCC quanto à elevação médio do nível do mar até 2100. Fonte [13]

Cenário	Aumento Médio Global do Nível do Mar
SSP1-1,9	0,28 – 0,55 m
SSP1-2,6	0,33 – 0,61 m
SSP2-4,5	0,44 – 0,76 m
SSP3-7,0	0,55–0,90 m
SSP5-8,5	0,63–1,02 m

Podemos observar que as estimativas feitas no presente trabalho estão dentro dos intervalos previstos pelo IPCC, tanto no cenário mais otimista SPP1-1,9 onde as estimativas do caso linear e logaritmo são representados, quanto no cenário mais pessimista SSP5-8,5 onde a estimativa quadrática é representada.

4.2. Geotecnologia: Simulação

Foram simuladas as estimativas mais otimistas e mais pessimistas com elevações de 0,55 m e 1,02 m, respectivamente, como pode ser visto no mapa geral a seguir (Figura 10):

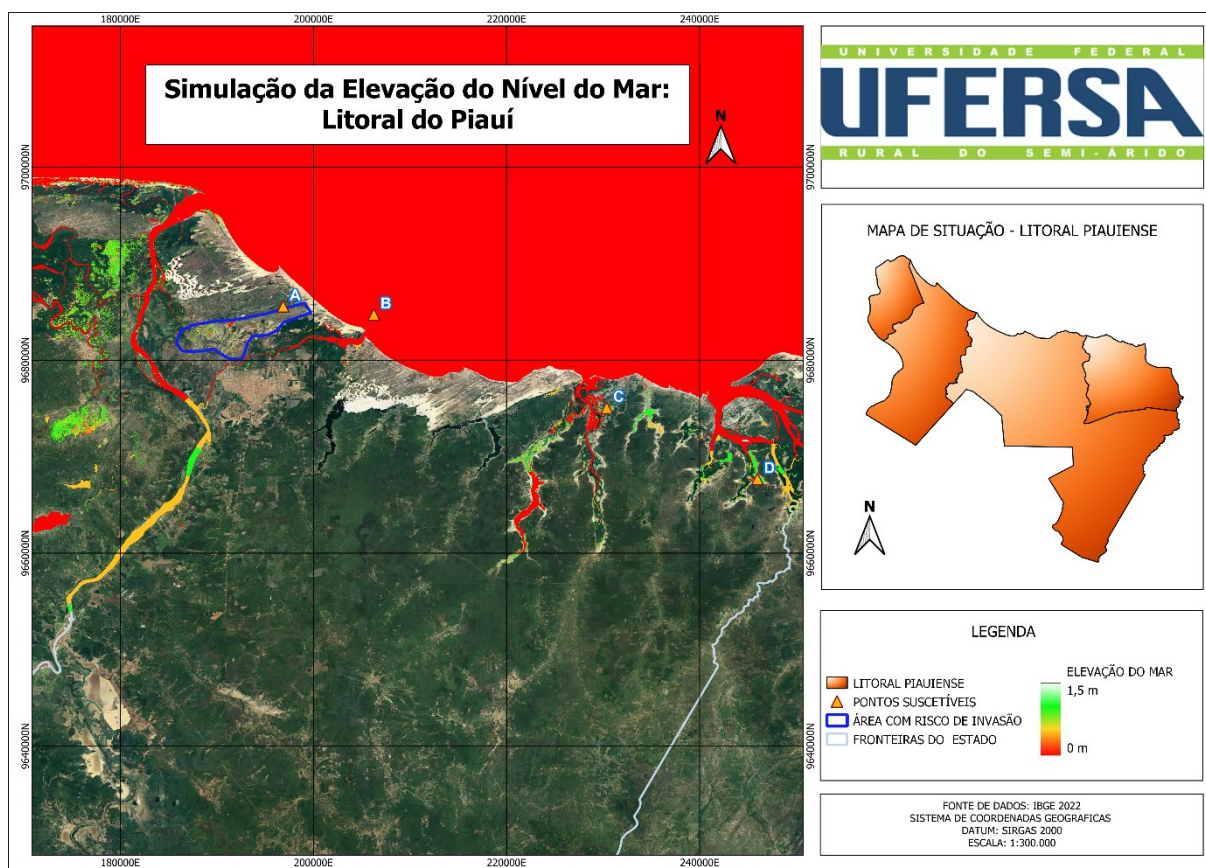


Figura 10 – Simulação da Elevação do Nível do Mar: Litoral do Piauí. Fonte: (Autoria Própria)

Os quatro municípios da zona costeira sofrerão as consequências dessa subida de nível do oceano, mesmo aqueles que não possuem suas sedes na praia, pois ficam as margens dos rios que também terão seus níveis elevados impactando não somente na vida humana, mas sobretudo no ecossistema dos manguezais.

Foram identificadas quatro áreas que sofreram os impactos dessa elevação do nível do mar, onde será necessária uma maior atenção na busca por medidas que amenizem esses impactos.

No ponto **A** existe o risco invasão do mar a uma área de proteção ambiental pela faixa em destaque devido a menor elevação do terreno na região somada a erosão marinha que deve ocorrer em virtude dessas mudanças, provocando um impacto ambiental irreversível Figura 11.

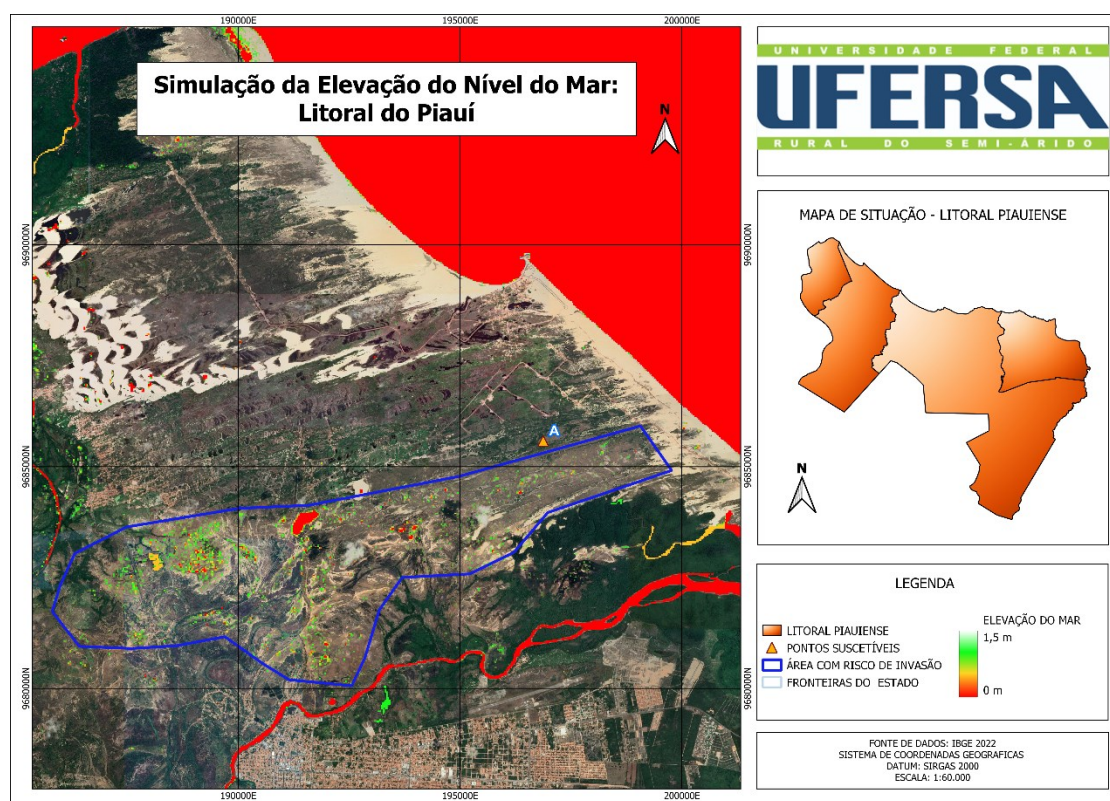


Figura 11 – Simulação da Elevação do Nível do Mar: Área de Preservação Ambiental. Fonte: (Autoria Própria)

No ponto **B** temos o Porto Internacional do Piauí que terá o seu funcionamento comprometido caso não seja tomada medidas para uma mitigação do problema.

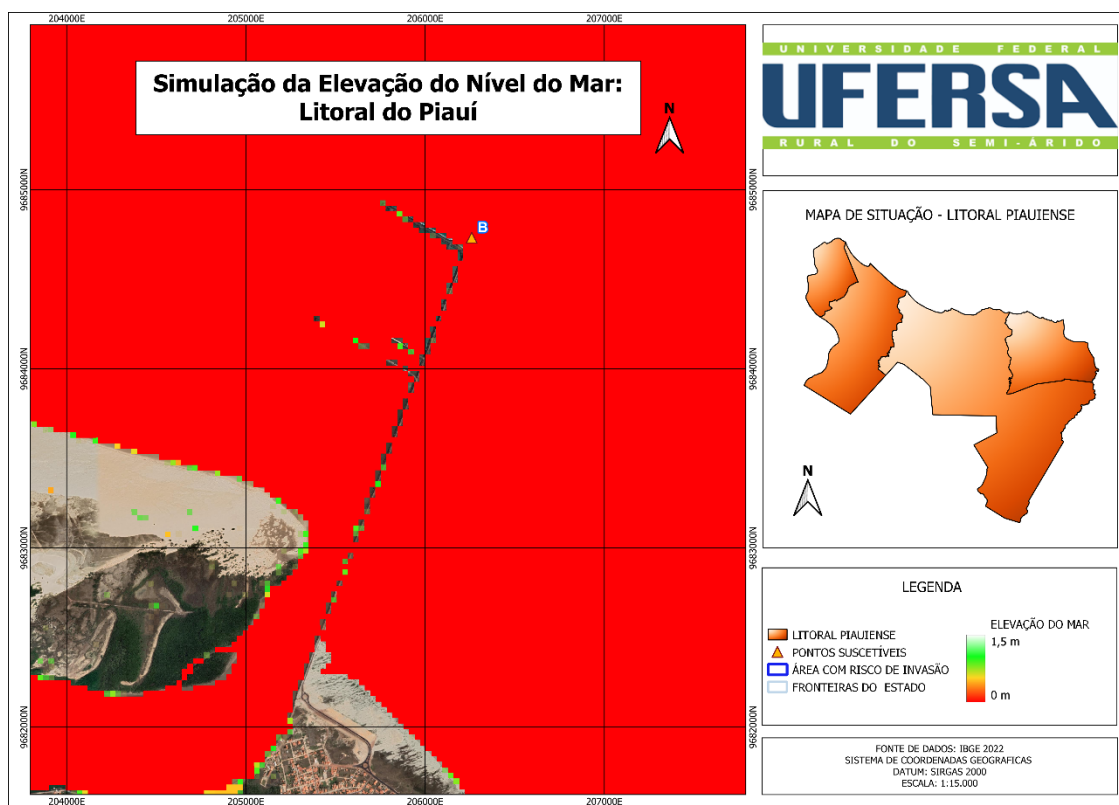


Figura 12 – Simulação da Elevação do Nível do Mar: Porto Internacional do Piauí. Fonte: (Autoria Própria)

No ponto **C** observamos a mancha de inundação que impactará as atividades de aquicultura presentes em toda a região e que sofreram com os desdobramentos desse problema.

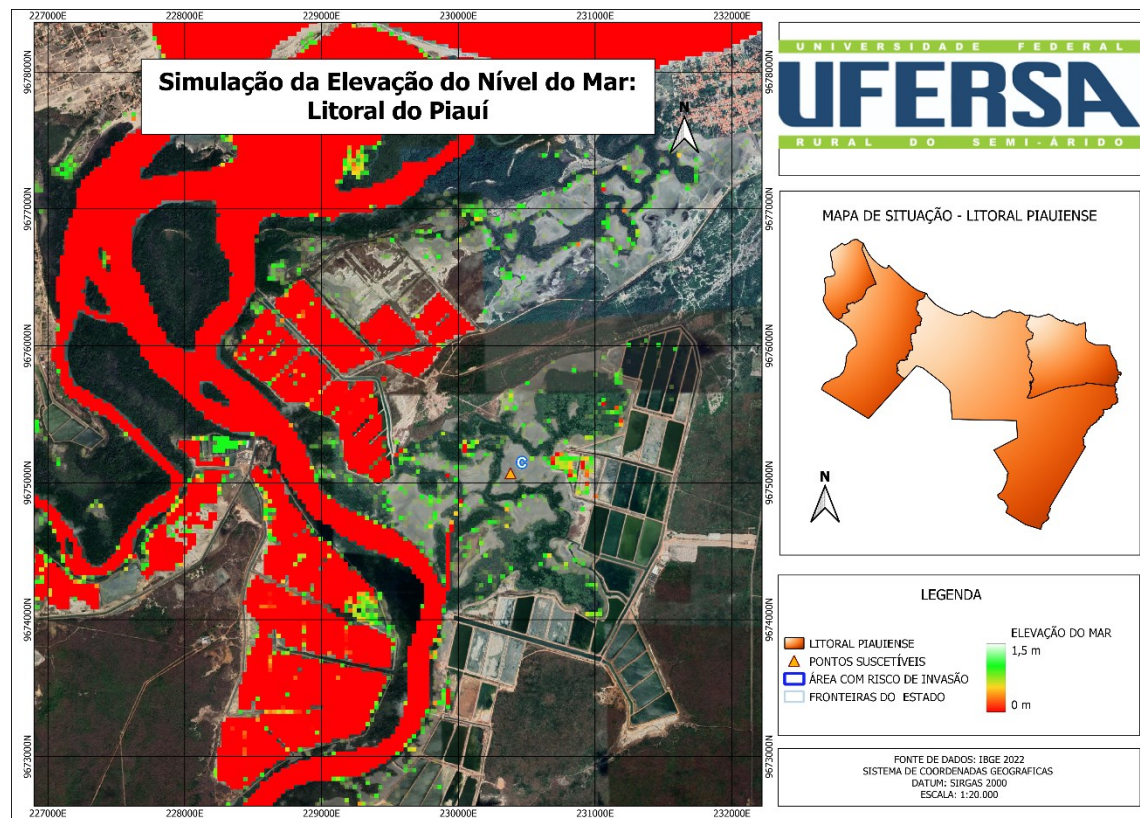


Figura 13 – Simulação da Elevação do Nível do Mar: Atividade de Aquicultura. Fonte: (Autoria Própria)

No ponto **D** observamos a mancha de inundação que impactará as atividades de salicultura que também tem sua importância para a região e será mais um setor atingido.

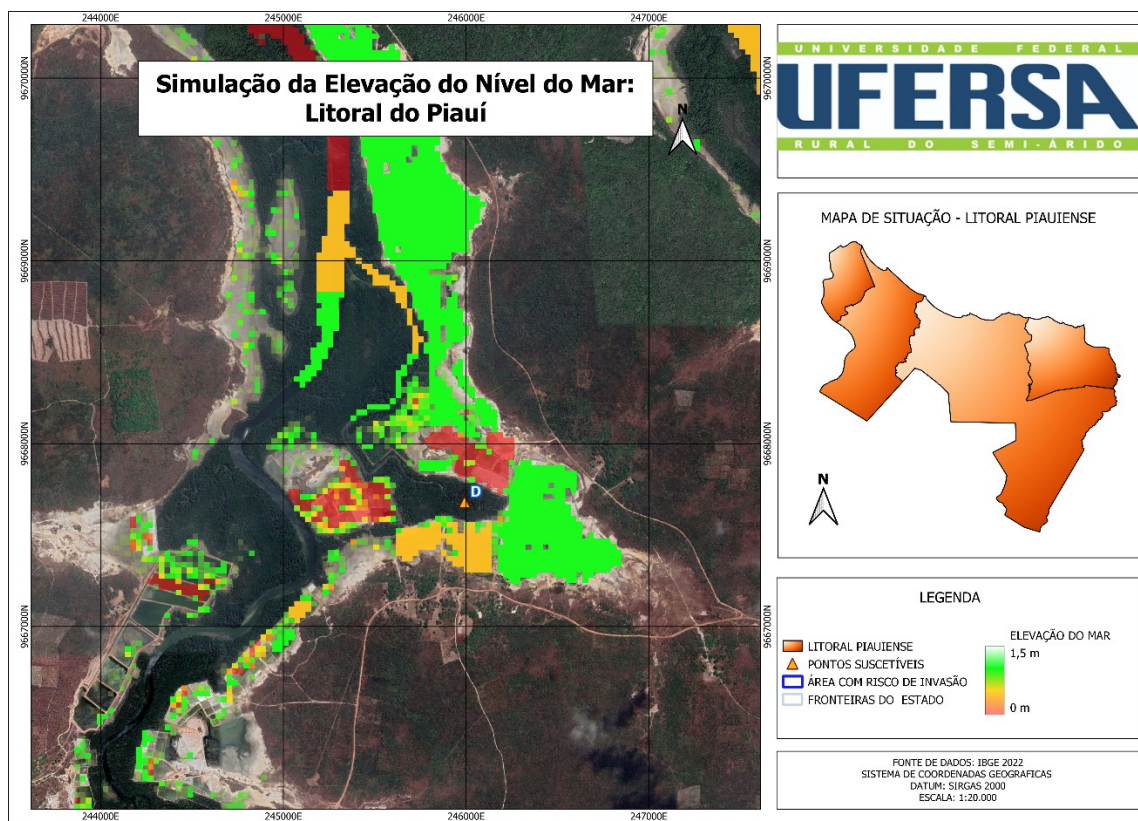


Figura 14 – Simulação da Elevação do Nível do Mar: Atividade de Salicultura. Fonte: (Autoria Própria)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudado o potencial efeito do aumento do nível do mar na região costeira do estado do Piauí. Com base nos resultados obtidos utilizando os métodos numéricos de ajuste de curvas para uma estimativa futura da elevação média do nível do mar, e os comparando as estimativas previstas pelo IPCC, chegamos a resultados satisfatórios nos casos Linear, Logaritmo e Quadrático. Observou-se também a inviabilidade de aplicação dos métodos Exponencial e Potencial, devido a possuírem coeficientes de ajustes muito baixo ($R^2 < 0,98$). Com isso podemos avaliar como viável a aplicação do método para estimativas futuras.

Já com relação as simulações utilizando as ferramentas de geoprocessamento, esse estudo preliminar nos mostra que na região existem áreas sensíveis à possíveis elevações do nível do mar, obtendo resultados satisfatórios, mas que pode ser melhorado com dados de altimetria mais precisos como por exemplo a aerofotogrametria com aeronaves convencionais ou com VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado).

Espera-se que com os resultados dessa pesquisa contribuam no desenvolvimento de novos estudos e no planejamento de soluções para o enfrentamento do impacto de mudanças climática no litoral piauiense.

REFERENCIAS

- [1] JANDREY, Samantha; AUMOND, Juarês José. Mudanças climáticas e planejamento urbano: cenários futuros de aumento do nível do oceano no município de Itapema/SC. *PerCursos*, Florianópolis, v. 21, n.46, p. 25 - 53, maio/ago. 2020.
- [2] MOREIRA, Helena Margarido. A Formação da Nova Geopolítica das Mudanças Climáticas. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 1, n. 4, p. 275-292, jan/jun. 2013.
- [3] CHURCH, J.; WHITE, N. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. **Surveys in Geophysics**, v. 32, n. 4/5, p. 585-602, set. 2011.
- [4] ARTAXO, Paulo. Mudanças climáticas e o Brasil. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 8-12, 2014.
- [5] CHAPRA, Steven C. Métodos Numéricos Para Engenharia. 5. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2008. 832 p.
- [6] FRANCO, Neide Bertoldi. Aproximação de Funções: Método dos Mínimos Quadrados. **Cálculo numérico**. São Paulo, 2006. Cap. 8. p. 234-268.
- [7] ROSA, Roberto. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005.
- [8] SOUZA FILHO, Carlos Roberto de; CRÓSTA, Alvaro Penteado. GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À GEOLOGIA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 01-04, 1 jun. 2003.
- [9] FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos *et al* (org.). **GEOPROCESSAMENTO E ESTUDOS URBANOS AUXILIADOS POR QGIS**. Mossoró: Livraria da Física, 2021. 247 p. Disponível em: <http://terraurbanizada.com/produtos/livros/livro-qgis/aulas/>. Acesso em: 8 out. 2022.
- [10] GUTH, Peter L. et al. Digital elevation models: terminology and definitions. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3581, 2021.
- [11] MDT e MDS. **CPE Tecnologia**, 25/09/2019. Disponível em: <https://blog.cpetecnologia.com.br/mdt-e-mds-voce-sabe-a-diferenca/mdt-e-mds/>. Acesso em: 12/11/2022
- [12] Sae Level, Global Climate Change. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/>. Acesso em: 17 de 07 de 2022.
- [13] Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2022): **CLIMATE CHANGE 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. The Working Group I to the IPCC Sixth Assessment Report assesses the impacts of climate change, looking at ecosystems, biodiversity, and human communities at global and regional levels. It also reviews vulnerabilities in the capacities and limits of the natural world and human societies to adapt to climate change. **CHAPTER 3 - Ocean and ecosystems and their services** [Coordinating lead authors: S.R. Cooley and D.S. Schoeman]
- [14] BAPTISTA, Marcus Pierre de Carvalho *et al* (org.). **DOS TEMPOS À VIRADA, DOS VENTOS À AMARRAÇÃO**: estudos histórico-geográficos sobre o litoral do piauí. Teresina: Edupfi, 2020. 302 p
- [15] DA SILVA JÚNIOR, José Luiz Pontes; PEDLOWSKI, Marcos Antonio. Simulação de inundação costeira em cenários de elevação do mar em São João da Barra, RJ, Brasil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 22, n. 1, p. 81-94, 2022.
- [16] MENEZES, Raiane Rintelle Vaz; SOUZA, Larissa Messias; FERREIRA, Ítalo Oliveira. Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza—CE. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.
- [17] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE | Panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pi/parnaiba.html>. Acesso em: 21 nov. 2022.
- [18] OLIVEIRA, Jonas Henrique; DOS SANTOS SILVA, Clodson. Antropologia e turismo: breves considerações sobre as praias do litoral do Piauí. **RITUR-Revista Iberoamericana de Turismo**, v. 11, p. 217-233, 2021.
- [19] DINIZ, Marco Túlio Mendonça; VASCONCELOS, Fábio Perdigão; MARTINS, Márcia Barbosa. Inovação tecnológica na produção brasileira de sal marinho e as alterações sócioterritoriais dela decorrentes: uma análise sob a ótica da teoria do empreendedorismo de Schumpeter. **Sociedade & Natureza**, v. 27, p. 421-437, 2015.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Centro de Ciências Exatas e Naturais – CCEN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 10:00 horas do dia vinte e nove de novembro de dois mil e vinte e dois, na sala virtual do Google Meet no endereço eletrônico meet.google.com/rqv-bqch-jgq, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de trabalho de conclusão de curso de autoria do aluno **HANLLETH AGAMENON PESSOA DA SILVA**, aluno do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia desta universidade, N° de matrícula **2018009500**, com o título **“SIMULAÇÃO DA ELEVAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR UTILIZANDO MÉTODOS NUMÉRICOS E FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO: ESTUDO DE CASO”**. A Banca Examinadora ficou assim constituída por três membros: Prof. Dr. Matheus da Silva Menezes, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso; Prof. Dr. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes e Me. Vanessa Elionara Souza Ferreira, como membros. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada, tendo o aluno sido considerado **APROVADO**. E para constar, eu, Matheus da Silva Menezes, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 29 de Novembro de 2022.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Matheus da Silva Menezes – UFERSA
Presidente e orientador

Prof. Dr. Rogério Taygra Vasconcelos Fernandes - UFERSA
Primeiro Membro

Me. Vanessa Elionara Souza Ferreira - UFERSA
Segundo Membro