



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DETECÇÃO DAS MUDANÇAS COSTEIRAS NA MARGEM  
LESTE DO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ: UMA ANÁLISE  
MULTITEMPORAL (1987-2019) UTILIZANDO  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**Dissertação apresentada por:**

**DIANDRA KARINA MARTINS GUIMARÃES**

**Orientador: Renan Peixoto Rosário (UFPA)**

**Coorientador: Maâmar El-Robrini (UFPA)**

**Belém - Pará  
2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DETECÇÃO DAS MUDANÇAS COSTEIRAS NA MARGEM  
LESTE DO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ: UMA ANÁLISE  
MULTITEMPORAL (1987-2019) UTILIZANDO  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**Dissertação apresentada por:**

**DIANDRA KARINA MARTINS GUIMARÃES**

**Orientador: Renan Peixoto Rosário (UFPA)**

**Coorientador: Maâmar El-Robrini (UFPA)**

**Belém - Pará  
2022**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

G963d Guimarães, Diandra Karina Martins.  
Detecção das mudanças costeiras na margem leste do estuário do rio  
Pará: uma análise multitemporal (1987-2019) utilizando sensoriamento  
remoto / Diandra Karina Martins Guimarães. — 2022.  
126 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário  
Coorientador(a): Prof. Dr. Maâmar El-robrini  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em  
Oceanografia, Belém, 2022.

1. Dinâmica costeira. 2. DSAS. 3. Linha de costa. I. Título.

CDD 551.462

---



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

**DETECÇÃO DAS MUDANÇAS COSTEIRAS NA MARGEM  
LESTE DO ESTUÁRIO DO RIO PARÁ: UMA ANÁLISE  
MULTITEMPORAL (1987-2019) UTILIZANDO  
SENSORIAMENTO REMOTO**

**Dissertação apresentada por:**

**DIANDRA KARINA MARTINS GUIMARÃES**

Como requisito parcial para à obtenção de Grau de Mestre em OCEANOGRAFIA e  
Linha de Pesquisa em Processos em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

**Data da Aprovação: 24/05/2022**

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Renan Peixoto Rosário  
(Orientador – UFPA)

---

Prof. Dr. George Satander Sá Freire  
(Membro – UFC)

---

Valdir do Amaral Vaz Manso  
(Membro – UFPE)

---

Profa. Dra. Surya de Moura Monteiro  
(Membro – UFPA)

Dedico esta dissertação ao meu pai (*in memoriam*) que se preocupou comigo e com o meu futuro até em seus últimos dias.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado força, sabedoria e saúde para percorrer essa jornada em meio a uma pandemia, a perda do meu pai e outras atribulações que ocorreram nesses longos dois anos, somente Ele sabe o quanto foi difícil e sou muito grata por Ele me permitir chegar até o fim.

A minha família e minhas irmãs de coração Dudah e Nara, pelo amor, apoio (emocional e financeiro) e carinho. Somente de estarem por perto vocês fazem meu dia ser melhor, nenhuma palavra pode resumir toda minha gratidão e amor. É tudo por vocês e para vocês!

Ao meu amigo Rafael Menezes pela colaboração na produção dos dados estatísticos do DSAS, pela paciência e tempo dedicado em me explicar e resolver os problemas que apareciam. Obrigada também por ouvir as minhas lamúrias, por me incentivar a continuar e por discordar de mim diversas vezes me irritando e me fazendo pensar de formas diferentes sobre a pesquisa e sobre a vida. Obrigada por sempre me fazer acreditar que tudo vai dá certo no final!

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia (PPGOC) pela oportunidade de desenvolver a minha pesquisa e poder obter a titulação de Mestra em Oceanografia.

Aos meus orientadores Maâmar El-Robrini e Renan Rosário muito obrigada por aceitarem estar comigo na produção desta pesquisa. Obrigada pela paciência e por entender o momento complicado que passamos durante essa pandemia. A orientação de vocês neste trabalho foi indispensável para que tudo que eu escrevia ganhasse coesão e coerência, serei eternamente grata.

Aos colegas de turma que dividiram comigo as angústias desses anos de pós-graduação, apenas nós sabemos o quanto foi tenso e quão resilientes encerramos esse ciclo. Que todo o aprendizado e conhecimento valham a pena e que novos ciclos se iniciem mais leves e em paz.

“Seja forte e corajoso! Não tenha medo, nem fique assustado, porque o SENHOR, seu Deus, estará com você por onde quer que você andar”

**JOSUÉ 1:9**

## RESUMO

A Zona Costeira e Estuarina Paraense (ZCEP) apresenta uma complexa dinâmica influenciada por forçantes meteorológicas (pluviosidade, ventos, eventos extremos), fluviais (vazão) e marinhas (marés, correntes, ondas). Estas forçantes afetam a linha de costa (LC) das margens dos estuários ocasionando mudanças que dependem do grau de exposição da área e intensidade destas. Com isso, a identificação dos locais que sofrem com os processos de erosão e/ou acreção da LC se torna interessante para observar as mudanças no entorno das ilhas e municípios da margem leste do Estuário do Rio Pará. A área de trabalho situa-se à margem leste do Estuário do Rio Pará, no trecho: ilha de Mosqueiro, Santo Antônio do Tauá, ilha de Colares (às margens do estuário médio), Vigia e São Caetano de Odivelas (às margens do estuário inferior). Para alcançar os resultados foi realizada a aquisição de imagens de satélite LANDSAT (1987; 1993; 1999; 2004; 2008; 2013 e 2019) e foi utilizado o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) para identificar e calcular com maior precisão as taxas de variação das mudanças das áreas de erosão e acreção na LC. Foram aplicados os parâmetros NSM, LRR e EPR na margem leste do estuário do rio Pará (117 km) no período de 32 anos de análise, com a geração de um total de 1130 transectos. No estuário médio a tendência à erosão foi maior, predominando na Ilha de Mosqueiro com taxa média de erosão de -38m e taxa média de acreção de 22,97m, relacionados às taxas médias de variação de -0,58m/ano (EPR) e -0,54m/ano (LRR) e em Santo Antônio do Tauá com parâmetros LRR e EPR identificando taxas médias de variação de -1,67m/ano (LRR) e -1,55m/ano (EPR). Apenas na ilha de Colares houve tendência a acreção com taxa média de erosão de -96,29m (máxima de 396,87m) e taxa média de acreção de 116,49m (máxima de 405,61m). Enquanto, no estuário inferior houve maior tendência a acreção, onde em Vigia ocorreu taxa média de variação de 1,26m/ano e taxa máxima de acreção de 10,06m/ano no EPR, e taxa média de variação de 0,64m/ano e taxa máxima de acreção de 7,22 no LRR. Em São Caetano de Odivelas a taxa média de variação no parâmetro EPR foi de 0,40m/ano e no parâmetro LRR foi de 0,25m/ano e no NSM de 13,09m. Comparando as margens do Estuário, a margem leste está sob influência de uma baixa hidrodinâmica, enquanto a margem oeste está sobre uma alta hidrodinâmica onde predomina a erosão, demonstrando que no mesmo estuário os processos ocorrem de maneira distinta, onde as áreas de alta erosão estão relacionadas à morfologia do local e localização da área estando mais expostas as forçantes.

**Palavras-chave:** Estuário do rio Pará; Amazonia Oriental; dinâmica costeira; linha de costa; DSAS

## ABSTRACT

In the Coastal and Estuarine Zone of Pará (ZCEP) occurs a complex dynamics influenced by meteorological forces (rainfall, winds, extreme events), fluvial (flow) and marine (tides, currents, waves). The forcings affect the coastline (CL) of the estuaries margins causing changes that depend on the degree of exposure of the area and the intensity of the forcings. Therefore, the detection of the places that happen the processes of erosion and/or accretion of the coastline becomes interesting to observe the changes in the surroundings of the islands and municipalities of the eastern margin of the Pará River Estuary. The work area is located on the eastern margin of the Pará river estuary, in the section: Mosqueiro island, Santo Antônio do Tauá, Colares island (edge of the middle estuary), Vigia and São Caetano de Odivelas (edge of the lower estuary). To achieve the results, LANDSAT satellite images were acquired (1987; 1993; 1999; 2004; 2008; 2013 and 2019) and the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) was used to more accurately identify and calculate the rates of variation of changes in erosion and accretion areas in the LC. NSM, LRR and EPR parameters were applied on the east margin of the Pará river estuary (117 km) in the 32-year period of analysis, with a total of 1130 transects generated. In the middle estuary, the tendency to erosion was higher, predominating in Mosqueiro Island with an average erosion rate of -38m and an average accretion rate of 22.97m, related to the average rates of variation of -0.58m/year (EPR) and -0.54m/year (LRR) and in Santo Antônio do Tauá with LRR and EPR parameters identifying average rates of change of -1.67m/year (LRR) and -1.55m/year (EPR). Only on the Colares island there was a tendency to accretion, with an average erosion rate of -96.29m and an average accretion rate of 116.49m, where the maximum accretion and erosion rates are 405.61m and -396.87m, respectively. While in the lower estuary there was a greater tendency to accretion, where in Vigia there was an average rate of change of 1.26 m/year and a maximum rate of accretion of 10.06 m/year in the EPR, and an average rate of change of 0.64 m/year and maximum accretion rate of 7.22 in the LRR. In São Caetano de Odivelas, the average rate of change in the EPR parameter was 0.40 m/year and in the LRR parameter it was 0.25 m/year and in the NSM it was 13.09 m. Comparing the margins of the Estuary, the east margin is under the influence of a low hydrodynamics, while the west margin is under a high hydrodynamics where erosion predominates, demonstrating that in the same estuary the processes occur in a different way, where the areas of high erosion are related to the morphology of the site and location of the area being more exposed to forcing.

**Key-words:** Estuary of the Pará River; Eastern Amazon; coastal dynamics; shoreline; DSAS

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Principais tipos geomorfológicos de estuários.....  | 6  |
| Figura 2 - Divisão do estuário por setores proposta por Dionne (1963): (a) estuário marinho ou inferior; (b) estuário médio e (c) estuário fluvial ou superior .....   | 7  |
| Figura 3 - Esboço da relação espacial entre muitos dos indicadores de linha de costa comumente usados.....   | 8  |
| Figura 4 - Tendência de publicações e citações por anos na análise de mudanças na LC entre 1994 e 2019 usando DSAS.....  | 10 |
| Figura 5 - Software mais comum usado na análise de linha de costa. O software ArcMap tem esses ótimos índices principalmente por causa da ferramenta complementar DSAS que é muito comum entre os pesquisadores.....   | 11 |
| Figura 6 - Índices mais comuns da ferramenta DSAS: End Point Rate (EPR), Net Shoreline Movement (NSM), Linear Regression Rate (LRR), Shoreline Change Envelope (SCE), Standard Error of Linear Regression (LSE), Confidence Interval of Linear Regression (LCI), Required of Linear Regression (LR2), and Weighted Linear Regression (WLR) ..... | 11 |
| Figura 7 - Localização dos municípios da margem leste do Estuário do Rio Pará .....  | 14 |
| Figura 8 - Divisão dos setores da zona costeira paraense.....  | 15 |
| Figura 9 - Posição média da ZCIT nos meses de julho (vermelho) e janeiro (azul) .....  | 16 |
| Figura 10 - Comparativo de temperatura média da cidade de Belém .....  | 17 |
| Figura 11 – Comparativo de precipitação acumulada da cidade de Belém.....  | 17 |
| Figura 12 - Direção do vento a 10 m na costa norte. Na imagem à esquerda estão os resultados referentes às 06 UTC e à direita referentes às 18 UTC .....   | 18 |
| Figura 13 - Vento horizontal (m/s) no nível de 24,4 m e taxa de precipitação (mm/h) na grade 2 (1km) .....   | 19 |
| Figura 14 - Efeitos globais do El Niño. ....   | 20 |
| Figura 15 - Efeitos globais do La Niña. ....   | 20 |
| Figura 16 - Unidades geológicas da margem leste do estuário do rio Pará.....   | 21 |
| Figura 17 - Unidades geomorfológicas da margem leste do estuário do rio Pará.....  | 22 |
| Figura 18 - Mapa batimétrico do estuário do rio Pará (isóbatas em metros).....   | 24 |
| Figura 19 - Localização do estuário do rio Pará no Golfão Marajoará. ....  | 25 |
| Figura 20 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário do rio Pará é o ponto de referência para distâncias.  | 28 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21 - Divisão do estuário do rio Pará de acordo com a estrada de salinidade. Acima a visão geral do estuário e em seguida as divisões em estuário inferior ou de Marajó (I), estuário médio ou de Guajará (II) e estuário superior ou de Marapatá (III). .....   | 29 |
| Figura 22 - Classificação da vegetação da margem leste do estuário do rio Pará.....  | 31 |
| Figura 23 - Manguezais da margem leste do estuário do rio Pará.....  | 32 |
| Figura 24 - Reserva Extrativista Marinha Mocapajuba em São Caetano de Odivelas, margem leste do estuário do rio Pará.....  | 34 |
| Figura 25 - Fluxograma da metodologia .....  | 35 |
| Figura 26 - Ilustração da relação entre as estatísticas de mudança da linha costeira: Net Shoreline Movement (NSM) e End Point Rate (EPR). NSM é a distância ao longo do transecto em metros (m) entre o litoral mais antigo (1936, vermelho) e o litoral mais recente (2005, magenta). O EPR é a distância NSM dividida pelo tempo entre as linhas costeiras mais antigas (1936, vermelho) e mais recentes (2005, magenta) (69 anos neste exemplo). ..... | 38 |
| Figura 27 - A taxa de regressão linear (LRR) foi determinada traçando as posições de interseção da linha de costa (distância da linha de base) em relação ao tempo (anos) e calculando a equação de regressão linear de $y = 1,34x - 2587,4$ . A inclinação da equação que descreve a linha é a taxa (1,34 m/ano).....   | 38 |
| Figura 28 - Recorte do posicionamento dos transectos obtidos com o DSAS e linhas de costa vetorizadas para cada ano de análise. ....   | 39 |

## ARTIGO 1

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Localização da Margem Leste (Ilhas de Mosqueiro e Colares, município de Santo Antonio do Tauá) do estuário médio do rio Pará.....   | 53 |
| Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. ....  | 56 |
| Figura 3 - Disposição das linhas de costa dos anos de análise (1987, 1993, 1999, 2004, 2008, 2013, 2019).....  | 57 |
| Figura 4 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC da ilha de Mosqueiro. ....  | 60 |
| Figura 5 - Setores A, B, C, D da ilha de Mosqueiro. Praias presentes em cada setor: Setor A - Areião, Bispo, Praia Grande, Prainha, Farol, Chapéu Virado, Porto Arthur, Murubira, Ariramba e São Francisco; Setor B – Carananduba; Setor C - Marahú, Caruara, Paraíso; Setor D - Baía do Sol. .... | 61 |
| Figura 6 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC e destaque do setor A de Santo Antônio do Tauá. ....  | 63 |
| Figura 7 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC da ilha de Colares.....   | 65 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 8 - Setores A, B C e D da LC da ilha de Colares. .... | 66 |
|--|----|

## ARTIGO 2

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Localização dos municípios (Vigia, São Caetano de Odivelas) na margem leste do estuário inferior do rio Pará. .... | 76 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário do rio Pará é o ponto de referência para distâncias. .... | 78 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 3 - Disposição das linhas de costa dos anos de 1987 (azul), 1993 (amarela), 1997 (verde), 2004 (vermelha), 2008 (laranja), 2013 (marrom), 2019 (azul claro) e linha de base (roxa). .... | 80 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 4 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC de Vigia. .... | 83 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 5 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC de São Caetano de Odivelas. .... | 85 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 6 - Localização dos setores A e B em São Caetano de Odivelas. .... | 86 |
|---|----|

## ARTIGO 3

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Localização dos municípios da margem Leste e Oeste do estuário inferior do rio Pará. .... | 96 |
|--|----|

|   |    |
|---|----|
| Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. .... | 98 |
|---|----|

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3 - Transectos com as taxas de LRR da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. .... | 102 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Figura 4 - Transectos com as taxas de EPR da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. .... | 102 |
|---|-----|

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5 - Transectos com as taxas de NSM da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. .... | 103 |
|---|-----|

## **LISTA DE TABELA**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados das imagens adquiridas ..... | 36 |
|---|----|

### **ARTIGO 1**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Dados das imagens de satélites adquiridas..... | 56 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para o município da ilha de Mosqueiro ..... | 58 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para o município de Santo Antônio do Tauá ..... | 62 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para o município da ilha de Colares ..... | 64 |
|---|----|

### **ARTIGO 2**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Dados das imagens de satélites adquiridas..... | 79 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR e LRR para o município de Vigia. Fonte: Autora. .... | 82 |
|--|----|

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR e LRR para o município de São Caetano de Odivelas. Fonte: Autora. .... | 84 |
|--|----|

### **ARTIGO 3**

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1- Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR e LRR para a margem leste do estuário inferior do rio Pará. .... | 101 |
|---|-----|

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Setorização da zona costeira paraense. .... **Erro! Indicador não definido.**

Quadro 2 - Parâmetros quantitativos disponíveis no DSAS..... **Erro! Indicador não definido.**

## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>DEDICATÓRIA .....</b>                                     | <b>i</b>   |
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>                                  | <b>ii</b>  |
| <b>EPIÍGRAFE .....</b>                                       | <b>iii</b> |
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>v</b>   |
| <b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....</b>                            | <b>vi</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS .....</b>                                | <b>ix</b>  |
| <b>LISTA DE QUADROS.....</b>                                 | <b>x</b>   |
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>1</b>   |
| <b>2 CONHECIMENTO TEÓRICO .....</b>                          | <b>4</b>   |
| 2.1 ESTUÁRIO .....   | 4          |
| 2.2 LINHA DE COSTA (LC).....                                 | 7          |
| 2.3 DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS) .....           | 9          |
| <b>3 OBJETIVOS .....</b>                                     | <b>13</b>  |
| 3.1 GERAL.....   | 13         |
| 3.2 ESPECÍFICOS .....  | 13         |
| <b>4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>                 | <b>14</b>  |
| <b>5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>              | <b>15</b>  |
| 5.1 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS .....                  | 15         |
| <b>5.1.1 Eventos Extremos .....</b>                          | <b>19</b>  |
| 5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS.....                                 | 21         |
| 5.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS .....                           | 22         |
| 5.4 CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS .....                             | 25         |
| 5.5 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS .....                           | 26         |
| <b>5.5.1 Marés .....</b>                                     | <b>26</b>  |
| <b>5.5.2 Correntes costeiras .....</b>                       | <b>26</b>  |
| <b>5.5.3 Salinidade .....</b>                                | <b>27</b>  |
| 5.6 COBERTURA VEGETAL.....                                   | 30         |
| <b>5.6.1 Unidade de Conservação.....</b>                     | <b>33</b>  |
| <b>6 METODOLOGIA.....</b>                                    | <b>34</b>  |
| 6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....                             | 34         |
| 6.2 PROCESSAMENTO DE DADOS.....                              | 35         |
| <b>6.2.1 Aquisição das imagens de satélite LANDSAT .....</b> | <b>35</b>  |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.2.2 Processamento e interpretação das imagens de satélite LANDSAT .....   | 35        |
| 6.2.3 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) .....  | 36        |
| <b>7 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO .....</b>   | <b>39</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>ARTIGO 1 - Tendências da linha de costa na margem leste do estuário médio do rio Pará entre 1987-2019 .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>RESUMO .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>51</b> |
| Localização da área de estudo .....   | 52        |
| Caracterização da área de estudo .....  | 53        |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>56</b> |
| Aquisição das imagens de satélite .....   | 56        |
| Digital Shoreline Analysis System (DSAS) .....  | 57        |
| <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>58</b> |
| Tendências da LC da Ilha de Mosqueiro .....   | 58        |
| Tendências da LC de Santo Antônio do Tauá .....   | 61        |
| Tendências da LC da Ilha de Colares .....   | 64        |
| <b>DISCUSSÃO .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>CONCLUSÃO .....</b>  | <b>67</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>68</b> |
| <b>ARTIGO 2 – Evolução multitemporal (1987-2019) da margem adjacente à foz do rio Pará dominado por macromaré (Pará - Amazônia oriental/ Brasil).....</b> | <b>72</b> |
| <b>RESUMO.....</b>  | <b>72</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>   | <b>72</b> |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>73</b> |
| Localização da área de estudo .....   | 75        |
| Caracterização da área de estudo .....  | 76        |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>79</b> |
| Aquisição das imagens de satélite .....   | 79        |
| Processamento Digital das Imagens .....   | 79        |
| Digital Shoreline Analysis System (DSAS) .....  | 80        |
| <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>81</b> |
| Evolução da LC de Vigia .....   | 82        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Evolução da LC de São Caetano de Odivelas .....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>DISCUSSÃO .....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>88</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>88</b>  |
| <b>ARTIGO 3 - Dinâmica das margens (leste e oeste) do estuário inferior do Rio Pará<br/>(Amazônia Oriental/Brasil) .....</b> | <b>94</b>  |
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>94</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>94</b>  |
| <b>Localização da área de estudo .....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>Caracterização da área de estudo .....</b>  | <b>96</b>  |
| <b>Parâmetros climáticos e meteorológicos.....</b>   | <b>96</b>  |
| <b>Condições Hidrológicas.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>Forçantes oceanográficas .....</b>  | <b>97</b>  |
| <b>A margem leste do estuário inferior do rio Pará .....</b>   | <b>98</b>  |
| <b>A margem oeste do estuário inferior do rio Pará .....</b>   | <b>99</b>  |
| <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>   | <b>99</b>  |
| <b>RESULTADOS .....</b>  | <b>100</b> |
| <b>Margem oeste .....</b>  | <b>100</b> |
| <b>Margem leste.....</b>   | <b>100</b> |
| <b>DISCUSSÃO .....</b>   | <b>103</b> |
| <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>105</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>105</b> |
| <b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>109</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A zona costeira (ZC) é definida como o espaço de interação do mar e da terra (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021; Vasconcelos *et al.* 2020). No Brasil, a ZC abrange uma faixa marítima (12 milhas náuticas) e uma faixa terrestre (limite dos municípios costeiros), incluindo seus recursos renováveis (Brasil, 2002). Esta faixa de delimitação compreende as cidades litorâneas, a Zona Econômica Exclusiva (ZEE), ilhas oceânicas, a zona contígua e a plataforma continental, e é onde o país atua economicamente extraindo os recursos naturais (Brasil, 2002; Viana *et al.* 2021).

Com toda a importância e recursos naturais disponíveis na ZC, estudos estimam que cerca de 10% da população mundial (cerca de 600 milhões de pessoas) vivem em áreas costeiras e a tendência é aumentar. (Rizzo e Anfuso, 2020). As projeções para o crescimento da população na ZC, em diferentes cenários econômicos mostram que em 2030 e 2060 a população passaria para 949 e 1,388 milhões de pessoas, respectivamente. No Brasil cerca de 1/3 da população (70 milhões) habita a ZC, onde quase a metade reside a menos de 200 km da costa (Neumann *et al.* 2015; Pará, 2020).

A ZC é influenciada entre fatores aerodinâmicos (ventos, chuvas, eventos extremos), hidrológicos (descarga fluvial) e hidrodinâmicas (marés, correntes, ondas), em um longo, médio ou curto período. (Baía *et al.* 2021; Rizzo e Anfuso, 2020). Ainda, as atividades humanas, como lazer, transporte, habitação, indústria, produção de energia, podem representar impactos potenciais. (Ranieri e El-Robrini, 2015).

Na Amazônia, a ZC tem particularidades geomorfológicas, meteorológicas e hidrológicas quando comparadas a outras regiões costeiras do país por apresentar elevada precipitação (até 3.300 mm/ano), altas temperaturas do ar (>20°C), com baixa variação térmica anual, ampla plataforma continental (~330km), regime de meso (2 a 4 m) a macro (4 a 6 m) e hipermaré (> a 6 m), além de estar sob a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que faz com que a região esteja sob a ação dos ventos alísios (Rollnic *et al.* 2020).

A zona costeira e estuarina paraense (ZCEP) começou a ser estudada nos anos 1980, com o mapeamento de diversos trechos da ZC e a morfoestratigrafia das planícies costeiras através de técnicas de monitoramento de perfis praias, ecobatimétricos e de análise multitemporal das praias oceânicas e estuarinas (El-Robrini *et al.* 2018a). Todos esses estudos sobre a dinâmica costeira da ZCEP são relevantes para entender a formação geológica, a dinâmica de marés e das correntes e a ocorrência dos processos de erosão e/ou acreção na ZC do estado.

Atualmente a delimitação da ZC paraense está de acordo com a Lei Estadual nº 9604/2020 que institui a Política Estadual de Gerenciamento Costeiro (PEGC) do Pará (Pará, 2020). A zona costeira paraense é constituída por 5 setores (Quadro 1) com características fisiográficas distintas.

| SETORES                           | MUNICÍPIOS   |
|-----------------------------------|--|
| Setor 1: Marajó Ocidental         | Afuá; Breves; Anajás; Chaves; São Sebastião da Boa Vista; Curralinho; Melgaço; Portel; Bagre; Oeiras do Pará e Gurupá  |
| Setor 2: Marajó Oriental          | Santa Cruz do Arari; Soure; Salvaterra; Cachoeira do Arari; Ponta de Pedras e Muaná  |
| Setor 3: Continental Estuarino    | Considerando a Região Metropolitana de Belém: Abaetetuba; Barcarena; Belém; Ananindeua; Marituba; Benevides; Santa Bárbara do Pará; Santa Isabel do Pará; Inhangapi; e Castanhal |
| Setor 4: Flúvio-Marítimo          | Colares; Vigia; Santo Antônio do Tauá; São Caetano de Odivelas; São João da Ponta; Curuçá; Terra Alta; Marapanim; Magalhães Barata e Maracanã                                    |
| Setor 5: Costa Atlântica Paraense | Santarém Novo; Salinópolis; São João de Pirabas; Primavera; Quatipuru; Capanema; Tracuateua; Bragança; Augusto Correa e Viseu  |

Quadro 1- Setorização da zona costeira paraense. Fonte: Pará, 2020

A margem leste do estuário do rio Pará, objeto de estudo desta dissertação de mestrado, está localizada nos setores 4 e 3 da zona costeira paraense e caracteriza-se por uma costa rebaixada, ocupada por manguezais e exposta às forçantes hidrológicas e hidrodinâmicas do estuário do rio Pará (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018a; Rollnic *et al.* 2020). Para Prestes *et al.* (2020) o rio Pará não é considerado um rio no sentido estrito do termo uma vez que não possui nascente própria e fluxo unidirecional em suas cabeceiras, sendo assim considerado um sistema estuarino.

O estuário do rio Pará é formado pela entrada de outros três sistemas fluviais, o rio Amazonas (através da Região dos Estreitos), rio Tocantins e rio Guamá/Guajará (Prestes *et al.* 2020). O Estuário do rio Pará flui para o oceano Atlântico pela parte leste da ilha de Marajó e deságua na Plataforma Continental Amazônica. Este estuário é influenciado por forçantes (correntes, marés, descarga fluvial, ventos), sendo a principal, a maré diária e mensal, com altura de 4,7m na foz (Estuário Inferior) e 1,5m no estuário superior e as correntes de maré semidiurnas (Barbosa, 2007; Prestes *et al.* 2017; Rosário, 2016).

Os estuários amazônicos têm sua dinâmica influenciada por fortes ventos, ondas, correntes e marés. Atualmente para se avaliar as mudanças que ocorrem, devido essas forçantes utiliza-se a linha de costa (LC) como um importante geoindicador das

transformações costeiras. O impacto das forçantes na LC depende da localização da área, pois está relacionada à sua maior ou menor exposição às forçantes costeiras (marés, ondas, correntes, descarga fluvial), podendo em um mesmo município apresentar trechos mais protegidos (acrecção) e mais expostos (erosão).

Os processos de erosão e/ou acreção decorrem principalmente pelas forçantes costeiras, mas podem ser influenciados pela ação antrópica, com ocupações mal planejadas associadas ao desconhecimento do comportamento das ZC's, falta de fiscalização, obras de engenharia na LC e atualmente o aumento do nível do mar causado pelas mudanças climáticas é um fator relevante (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Santos, 2006).

Com o desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto aumentou a fonte de dados de alta qualidade para a delimitação da LC com alta precisão. Com a frequência de captura de conjunto de dados, aumentou a resolução espacial e temporal de cobertura. Portanto, as avaliações mais recentes de mudanças na LC são globais em escala e vem utilizando imagens Landsat para focar em pontos críticos de mudança na LC (acrecção e erosão) nos últimos 30 anos (Brooks *et al.* 2020; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020).

Na margem leste do estuário do rio Pará, o manguezal e as várzeas são extremamente ricos para a região, com importância econômica. As áreas ocupadas pelas populações urbanas e tradicionais locais são afetadas principalmente pela erosão, que atinge e destrói casas e comércios causando prejuízo, logo se torna interessante compreender como a erosão e/ou acreção podem afetar essa região.

Diante disso, foram construídos os seguintes questionamentos: Quais as áreas em acreção e/ou erosão na região de estudo? Quais as forçantes costeiras mais atuantes nessa área e que podem influenciar na mobilidade da linha de costa? Qual a diferença na resposta dinâmica local em comparação com a margem oeste? Questões relevantes que direcionaram o tema dessa dissertação de mestrado.

Esta dissertação de mestrado realizada na margem leste do estuário rio Pará se enquadra no conjunto de medidas para obtenção de um oceano saudável, resiliente e seguro, objetivos presentes na Década das Nações Unidas da Ciência do Oceano para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030), criada pela Organização das Nações Unidas (ONU). Assim foi iniciada uma oportunidade única para todas as partes interessadas reverterem o ciclo de declínio na saúde dos oceanos para garantir que a Ciência dos Oceanos possa apoiar totalmente os países a alcançar o desenvolvimento sustentável deste (UNESCO, 2019).

Essa construção para o oceano que queremos está em consonância com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), assim esta dissertação de mestrado apresenta relação com os objetivos: 09 - indústria, inovação infraestrutura; 11 - cidades e comunidades sustentáveis; 13 - ação contra a mudança global do clima e 17 - parcerias e meios de implementação (ONU, 2021). Em suma esses objetivos buscam incentivar as pesquisas e ações para conscientização e redução dos efeitos das mudanças ambientais nas ZC's.

Esses objetivos também vão de encontro com a proposta do Projeto de Gestão Integrada da Orla Marítima – Projeto Orla, que busca contribuir em escala nacional para a aplicação de diretrizes gerais de disciplinamento de uso e ocupação desse espaço que constitui a sustentação natural e econômica da ZC. Nas estratégias do projeto estão à atuação e articulação e diferentes atores do setor público e privado, mobilização social para a gestão da orla e estimular atividades socioeconômicas compatíveis com o desenvolvimento sustentável da orla (Brasil, 2002).

Esta dissertação de mestrado busca contribuir para uma melhor e mais detalhada interpretação da dinâmica costeira da margem leste do estuário do rio Pará, utilizando a análise multitemporal para identificar os locais onde está ocorrendo erosão e/ou acreção no período de 1987 - 2019. Ainda, auxilia na construção de informações para gerar medidas de preservação ambiental e de gerenciamento costeiro, pois nesta região, há áreas ocupadas por manguezais protegidas legalmente e áreas ocupadas desordenadamente que necessitam de uma melhor gestão.

## **2 CONHECIMENTO TEÓRICO**

### **2.1 ESTUÁRIO**

Flemming (2011) relata que o termo estuário é derivado da palavra em latim “aestuarium”, usada pelos romanos para designar a parte de um rio influenciado pela maré. De acordo com a definição moderna do termo o estuário é mais comumente restrito ao curso inferior de um rio, onde os processos fluviais e marinhos interagem, mas há outras definições que ainda são utilizadas, como de Elliot e Mclusky (2002) que utilizam como critério de definição termos da biologia, física, química, natureza geográfica e unidades socioeconômicas dos estuários. Pritchard (1967) define o estuário como um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce proveniente da drenagem continental.

Considerando um estuário amazônico uma das definições que se encaixam seria a de Perillo (1995) que define um estuário como um corpo de água costeiro semifechado que

estende seu limite até a influência da maré, dentro do qual a água marinha, que entra por uma ou mais conexões com o mar aberto, ou qualquer outro corpo de água salina, é significativamente diluída com água doce proveniente da drenagem do continente.

Tão complexo quanto definir um estuário é classifica-lo, alguns autores os classificam pela sua origem geológica, outros a partir do limite da intrusão salina, ou seja, até o ponto em que a água do rio é diluída pela água do mar, outros pelo limite superior da penetração da maré como o critério principal (Elliott e Mclusky, 2002; Perillo, 1995; Pritchard, 1967; Silva *et al.* 2011; Valle-Levinson, 2011).

Uma das classificações geomorfológicas de estuário é de Pritchard (1967), onde um estuário pode ser do tipo: Planície costeira (vale inundado); Fiorde (altas latitudes); formado por barras e por movimentos tectônicos/neotectônicos (Figura 1). Essa classificação considera os eventos geológicos e geomorfológicos que deram origem a estes estuários. A área de estudo desta dissertação de mestrado se enquadra em um estuário de Planície costeira em forma de funil, comum em regiões tropicais ou subtropicais (Silva *et al.* 2011).

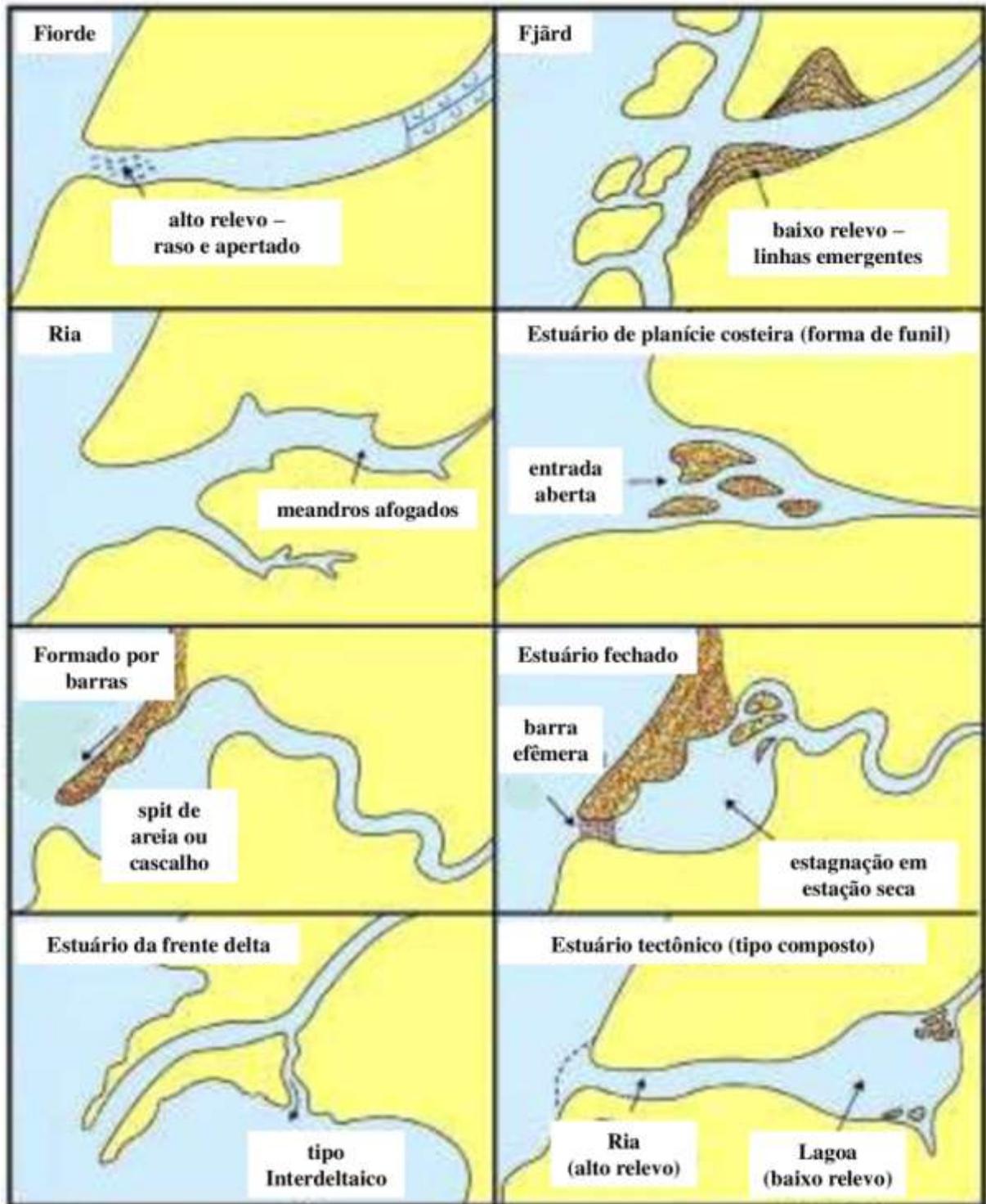


Figura 1 - Principais tipos geomorfológicos de estuários. Fonte: Flemming (2011).

A classificação hidrológica leva em consideração a estrutura vertical da salinidade no estuário, de acordo com os padrões particulares de circulação, produzidos pela interação entre a água do mar impulsionada pela maré e a água doce pela descarga. Assim, haveria três tipos de estuários: bem estratificado ou cunha salina, parcialmente misturada, e verticalmente bem misturada (Perillo, 1995; Pritchard, 1967; Rosário, 2016; Silva *et al.* 2011).

Nos estuários, onde a descarga fluvial é grande e a energia da maré é fraca, estes serão bem estratificados, entretanto, durante o período de enchente da maré, estes serão mais estratificados, quando a intrusão do oceano gera um formato de cunha. Quando a energia da maré e da descarga é moderada, tem-se um estuário parcialmente misturado e por último em um estuário verticalmente bem misturado, a energia da descarga fluvial é fraca e a energia da maré é grande (Rosário, 2016).

Os estuários também podem ser subdivididos internamente, como Dionne, (1963) sugere uma divisão em três setores: a) estuário marinho ou inferior, em livre conexão com o mar aberto; b) estuário médio, sujeito a forte mistura de água salina com a água doce; e c) estuário fluvial ou superior, caracterizado por água doce, mas sujeito à ação das marés diárias (Figura 2).

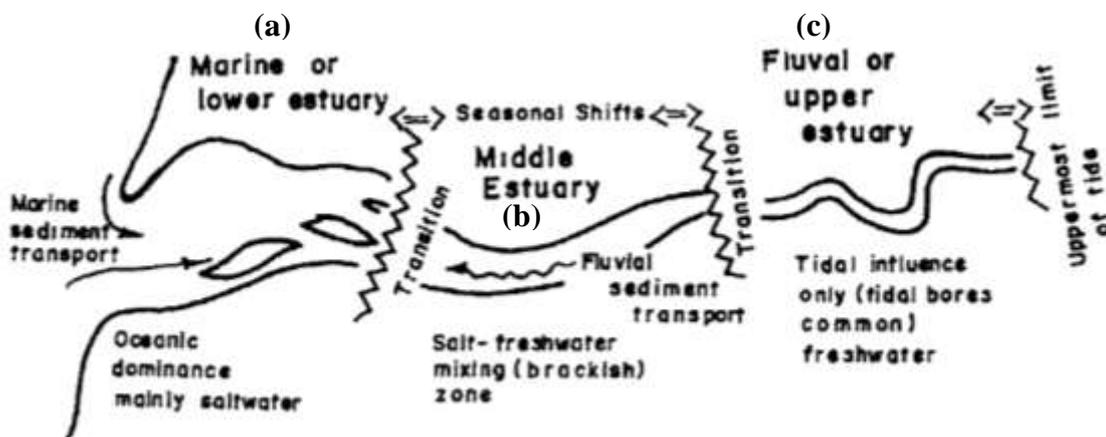


Figura 2 - Divisão do estuário por setores proposta por Dionne (1963): (a) estuário marinho ou inferior; (b) estuário médio e (c) estuário fluvial ou superior. Fonte: Perillo (1995).

Esta classificação de estuário é importante, pois traz a percepção de como é complexo a compreensão de todos os fatores (climáticos, geológicos, hidrológicos e oceanográficos) que influenciam esse ambiente.

## 2.2 LINHA DE COSTA (LC)

A LC é definida como a linha de contato entre o continente e a superfície da água. A detecção e monitoramento da LC são de grande importância econômica e social, especialmente quando as áreas costeiras são as mais prejudicadas com as mudanças climáticas. Para uma melhor gestão costeira é necessário conhecer a evolução da LC em uma escala de tempo para analisar as mudanças que possam ter ocorrido (Toure *et al.* 2019).

A definição da posição da LC na ZC é desafiadora devido aos vários indicadores que podem ser utilizados como base. Toure *et al.* (2019) trazem uma compilação de indicadores

da LC organizados em sete tipos (Figura 3): linhas de referência geomorfológicas (dunas; falésias; orla protegida); limites de vegetação (vegetação permanente); níveis de maré instantâneos e limites de molhamento (linhas de maré alta ou baixa; linhas de maré na areia); dados de marés (nível médio do mar; linha d'água média da nascente); Linhas de referência virtuais (linha costeira extraída da distinção de cor e luz em imagens); contorno de praia (largura da praia) e linhas de tempestade (linha de penetração de onda de tempestade). A escolha do indicador depende da área de estudo e do que for mais relevante ao pesquisador.

- A** Topo de falésia / topo de penhasco
- B** Base do falésia/ penhasco
- C** Borda terrestre de uma estrutura de revestimento
- D** Linha de vegetação de dunas estável em direção ao mar
- E** Linha de vegetação de dunas em direção ao mar
- F** Escarpa de erosão
- G** Linha de tempestade/ detritos
- H** Um antigo nível de água de maré alta
- I** Nível da maré alta anterior ao mais recente
- J** Nível médio
- K** Linha úmida/seca ou máximos de aceleração
- L** Ponto de saída de águas subterrâneas
- M** Linha de água instantânea
- N** Intensidade máxima da rebentação
- O** Linha de água de baixa vazão média
- P** Crista do degrau da praia

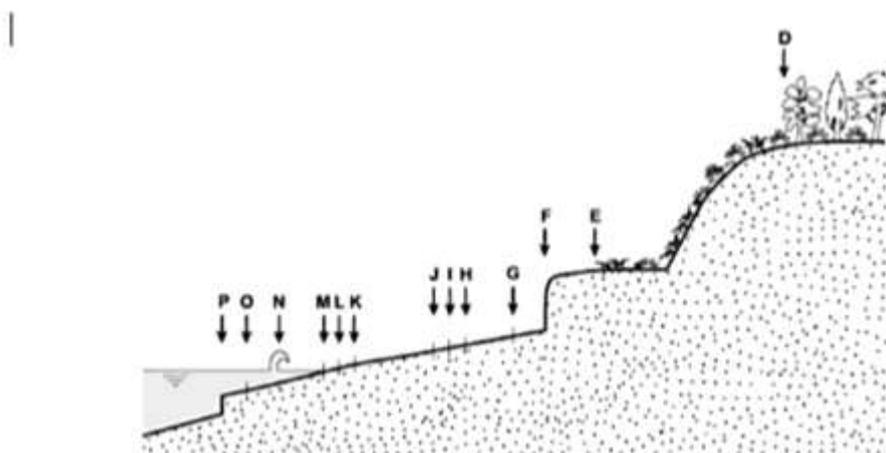
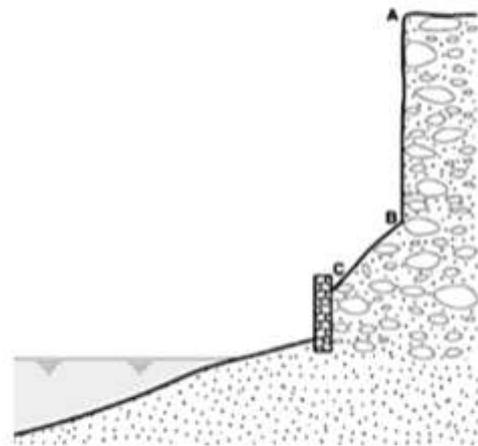


Figura 3 - Esboço da relação espacial entre muitos dos indicadores de linha de costa comumente usados. Fonte: Toure *et al.*, (2019)

Autores como Mishra *et al.* (2020), Santos (2021) e Vasconcelos *et al.* (2020) afirmam que a definição da posição da LC também é complexa por estar em constante mudança em função dos movimentos dos sedimentos costeiros, relacionados à dinâmica natural e a ação

antrópica. A dinâmica natural está relacionada à ação de ondas, marés, correntes, ventos e chuvas que contribuem para configurar as feições presentes na LC ao longo do tempo (França e Souza Filho, 2003).

Considerando as ações antrópicas, estas são relacionadas a construções de portos e vilas nas ZC's, que em geral, desconsideram as forçantes naturais, permitindo assim a construção de uma infraestrutura e o estabelecimento de populações muito próximas a LC e dos problemas derivados dessas ações (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Szlafsztein *et al.* 2006).

Exemplos dessa interferência antrópica são obras de engenharia, tais como, construção de quebra-mares, diques, espigões, e principalmente a urbanização sem planejamento na borda das falésias e praias, alteram a circulação hídrica e o trânsito sedimentar, consequentemente, os processos de erosão e de acreção (Santos *et al.* 2021).

Assim, a posição da LC é variável no tempo e no espaço e é utilizada como indicador de mudanças morfológicas. Sua movimentação na direção da parte interna do continente, ao longo de anos e décadas, reflete um período de recuo, ou seja, erosão. Ao contrário, seu deslocamento temporal em direção contrária, representa uma fase de acreção. Por fim, a ausência de registro de deslocamento sugere estabilidade morfológica da LC (França e Souza Filho, 2003).

As mudanças que ocorrem na LC são determinadas pelos processos de erosão e/ou de acreção, que mantém as ZC's em constante transformação, seja em um curto, médio ou longo período. Sendo um curto período as flutuações cíclicas, que ocorrem dentro de uma escala de tempo de dias a um ano, conforme a sazonalidade e as mudanças de médio a longo período são entendidas como mudanças progressivas, que correspondem a tendências acumulativas, envolvendo períodos de dezenas a milhares de anos (França, 2003; França e Souza Filho, 2003; Neves *et al.* 2019).

O uso do sensoriamento remoto contribui na determinação das mudanças na LC, tornando-se mais eficiente com essa fonte de alta qualidade, mesmo em um longo período. Assim, o uso de geotecnologias e imagens de satélite para monitorar as mudanças nas LC é essencial devido ao mapeamento de alta precisão, custo-benefício e redução do erro manual (Santos *et al.* 2021; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020).

### 2.3 DIGITAL SHORELINE ANALYSIS SYSTEM (DSAS)

O Digital Shoreline Analysis System (DSAS) é um complemento do ArcGIS do Environmental System Research Institute (ESRI) para quantificar as estatísticas de mudança

da linha de costa a partir de imagens de satélite óptico de várias posições cronológicas. A combinação da ferramenta ESRI ArcGIS e DSAS contribui na extração da linha de costa, criação da linha de base, geração de transecções, cálculo da distância entre a linha de base e cada transecção, usando uma interface amigável para analisar estatisticamente as mudanças da linha de costa (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021; Mishra *et al.* 2020).

O surgimento do DSAS revolucionou as pesquisas sobre mudança da LC em todo o mundo devido à necessidade cada vez maior de se obter taxas de variação da LC confiáveis para o planejamento costeiro, gestão sustentável da orla e mitigação do aumento do nível do mar. Portanto o uso das versões de 1 a 5 do DSAS tem contribuído não só para quantificar as taxas de mudança, mas também permite avaliar as forças costeiras e a morfologia que contribuem para as mudanças na LC (Mishra *et al.* 2020).

Mishra *et al.* (2020) fizeram uma análise sobre os estudos que utilizaram a ferramenta DSAS na base de dados Web of Science, foi encontrado 99 documentos de 1994 a 2019, sendo 98% artigos e 2% anais de artigos de revisão. Metade das publicações (53%) foi publicada nos últimos quatro anos (2014 a 2016) e a maioria das publicações aconteceram entre 2018 e 2019.

De 1995 a 2009 não foi encontrada nenhuma publicação, aparecendo artigos apenas em 2010 seguindo por um aumento até 2015 (Figura 4), uma motivação possível para esse aumento pode ser os novos direcionamentos dados por esses artigos aos pesquisadores (Mishra *et al.* 2020).

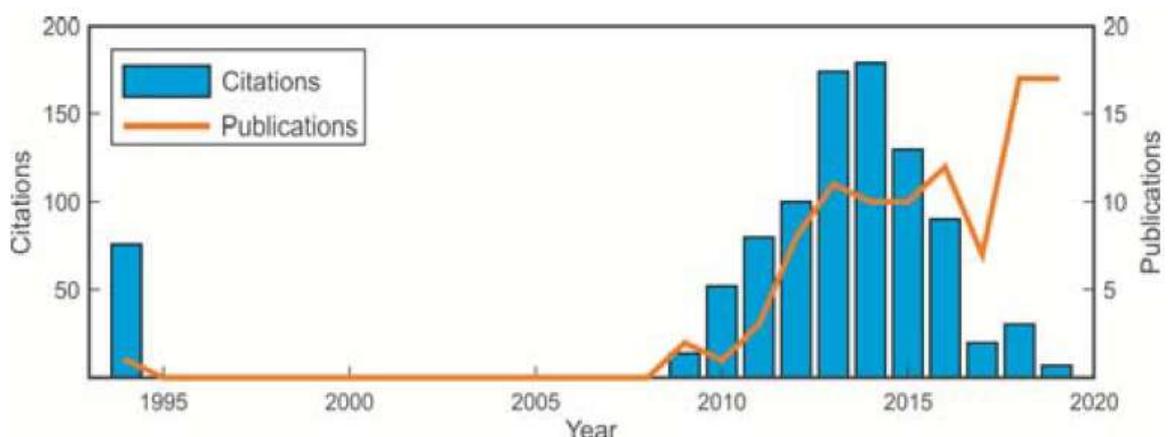


Figura 4 - Tendência de publicações e citações por anos na análise de mudanças na LC entre 1994 e 2019 usando o DSAS. Fonte: MISHRA *et al.* (2020)

É possível notar uma tendência crescente no uso do DSAS (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021) realizaram uma revisão sobre ferramentas e outros tópicos usados para monitorar a evolução do litoral nos últimos vinte anos (2000 a 2019) concluíram que o DSAS

tem uma posição dominante entre as ferramentas que os pesquisadores usaram para fazer a análise da variação da LC (Figura 5) e os parâmetros de análise mais utilizados foram o EPR, NSM e LRR (Figura 6).

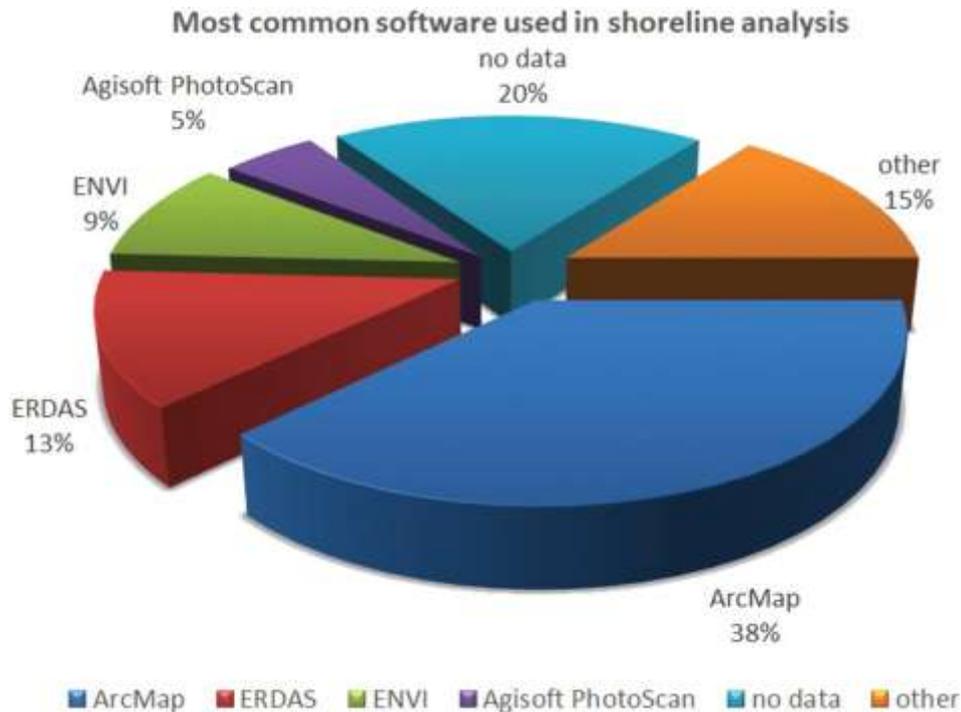


Figura 5 - O software mais comum usado na análise de linha de costa. O software ArcMap tem esses ótimos índices principalmente por causa da ferramenta complementar DSAS que é muito comum entre os pesquisadores. Fonte: apostolopoulos e Nikolakopoulos (2021)

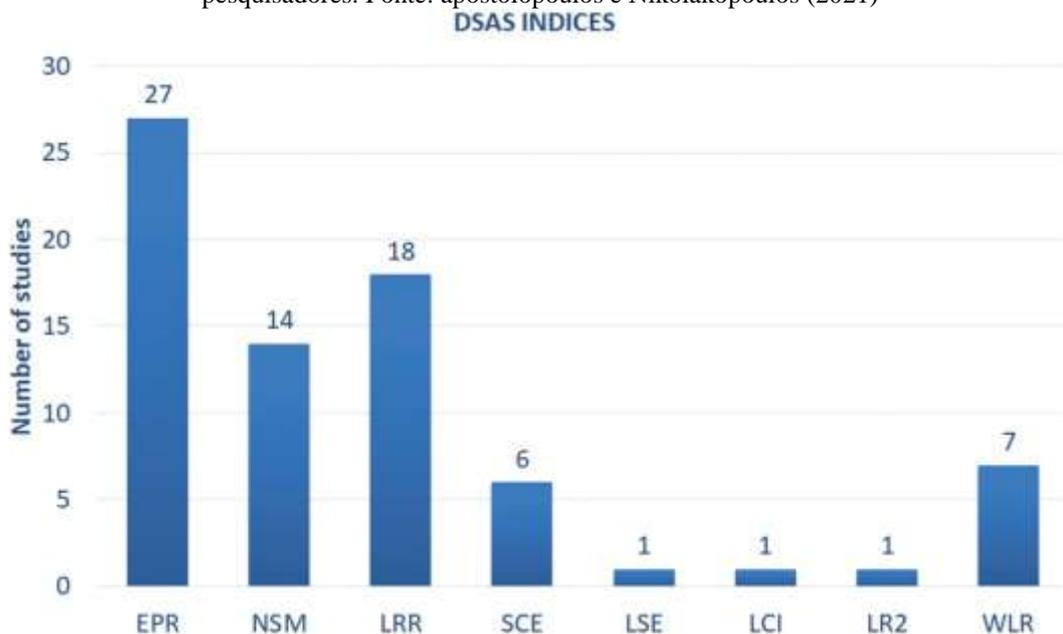


Figura 6 - Índices mais comuns da ferramenta DSAS: End Point Rate (EPR), Net Shoreline Movement (NSM), Linear Regression Rate (LRR), Shoreline Change Envelope (SCE), Standard Error of Linear Regression (LSE), Confidence Interval of Linear Regression (LCI), Required of Linear Regression (LR2), and Weighted Linear Regression (WLR). Fonte: apostolopoulos e Nikolakopoulos (2021)

Desta forma com o aprimoramento da técnica de análise da LC obteve-se uma maior precisão e rapidez nos resultados, contribuindo com dados quantitativos importantes para a interpretação dos processos costeiros e auxilia na compreensão das forçantes físicas que atuam em diferentes ZC's de todo mundo.

Diretamente ligado ao DSAS está o sensoriamento remoto, esta técnica de obtenção de informação sobre objetos ou áreas a distância, normalmente de aeronaves ou satélites, atualmente muito utilizado para monitoramento costeiro por permitir a extração manual ou automática da LC por processamento de imagens de satélites (Toure *et al.* 2019).

O programa Landsat começa em 1972 e ao longo dos anos houve uma sucessão de missões Landsat, equipadas com novos sensores com melhor resolução de imagem até o mais recente, Landsat 9, lançado em 2021. Com o passar do tempo e a evolução da tecnologia, paralelamente a série de satélites Landsat muitos outros satélites vieram para o primeiro plano que podem ser distinguidos em três categorias principais: alta, média e baixa resolução de imagens (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021). Imagens de satélites com alta resolução espacial começam a ser utilizadas, mas devido serem mais recentes não permitem uma análise mais longa no tempo, para esse tipo de análises geralmente são utilizadas fotografias antigas ou imagens de radar.

No litoral amazônico brasileiro essas técnicas permitiram que alguns trabalhos sobre a dinâmica costeira fossem realizados, podem ser citados como exemplo, no Amapá: Monitoramento da linha de costa do Parque Nacional do Cabo Orange através de análise multitemporal de imagens de sensores remotos (Batista *et al.* 2007); Análise Multitemporal de Mudanças nas Ilhas Costeiras do Estado do Amapá aplicando Dados de Sensores Remotos (Silva *et al.* 2011); Panorama da erosão costeira, Amapá, Brasil (Torres *et al.* 2018).

No Pará, encontraram-se mais trabalhos: Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagens Landsat (França e Souza Filho, 2003); Análise da variação da linha de costa a noroeste do Estado do Pará (baía de Curuçá) através de imagens Landsat TM e ETM+ e CBERS 2B (Rodrigues e Souza Filho, 2011); Variação da Linha de Costa na Região da Ilha dos Guarás – PA através de Análise de Série Temporal de Imagens de Satélites (Conti e Rodrigues, 2011); Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil (Ranieri e El-Robrini, 2015); Panorama da erosão costeira, Pará, Brasil (El-Robrini *et al.*, 2018a); Morfologia e dinâmica da orla costeira do Maraú, ilha de Mosqueiro, Belém, Pará (Neves *et al.* 2019); Análise multitemporal da linha de costa de suas praias, como no estudo da erosão da orla costeira Grande-Bispo, ilha de Mosqueiro, Belém-PA, através da análise de indicadores (França *et al.*, 2020); Geotecnologias

na análise da dinâmica costeira do estuário do Rio Caeté – Pará (Rabelo *et al.* 2021) e Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia Oriental (Baía *et al.* 2021).

No Maranhão obteve-se os seguintes trabalhos: Análise multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando sensoriamento remoto orbital (Araujo e Fonseca, 2016); Panorama da erosão costeira, Maranhão, Brasil (El-Robrini *et al.*, 2018b) e Alterações costeiras perto do Complexo Portuário do Maranhão - Ponta da Madeira, Brasil (Conti, 2019).

Por fim no Piauí tem-se: Análise multitemporal da linha de costa da praia de Macapá no litoral do Piauí a partir de imagens Landsat (Gomes e Araújo, 2017); Panorama da erosão costeira, Piauí, Pará (Paula *et al.*, 2018) e estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil (Araújo *et al.*, 2019).

Nas margens do estuário do rio Pará, os estudos sobre a variação da posição da LC estão em sua maioria concentrados nas ilhas de Mosqueiro e do Marajó (Soure). Na ilha de Mosqueiro (margem leste) tem-se um número maior de estudos, apresentando a análise multitemporal da LC das praias (Braga, 2019; França *et al.*, 2020; Neves *et al.* 2019). Na ilha do Marajó (margem oeste), há poucos trabalhos sobre a dinâmica multitemporal da LC os encontrados são o artigo de França e Souza Filho (2003) que analisam as mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagem Landsat e a dissertação de Menezes (2021) com Evolução Multitemporal da Linha de Costa (1972-2040) do Município de Soure, Ilha do Marajó (Amazônia - Brasil).

Esses trabalhos refletem a importância de compreender a dinâmica de cada local e gerar um conhecimento científico importante para a região. Assim, realizar a análise da variação da LC nunca foi tão relevante quanto atualmente em um período de grandes mudanças climáticas que afetam diretamente a ZC.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 GERAL**

Analisar as mudanças da posição da LC (erosão e acreção) na margem leste do estuário do rio Pará no período de 1987 a 2019.

#### **3.2 ESPECÍFICOS**

- (a) Identificar as áreas de erosão e de acreção da LC na margem leste do estuário do rio Pará em 32 anos utilizando imagens de satélite de 1987, 1993, 1999, 2004, 2008, 2013 e 2019;

- (b) Quantificar as taxas de variação da LC em metros e metros/ano das áreas de erosão e de acreção na margem leste do estuário do rio Pará;
- (c) Avaliar as áreas que apresentam maiores tendências à erosão e acreção na margem leste do estuário do rio Pará;
- (d) Comparar as mudanças na mobilidade da LC das margens Leste e Oeste do estuário do rio Pará;

#### 4 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Na margem Leste do estuário do rio Pará, localizam-se as ilhas de Mosqueiro e de Colares, e os municípios de Santo Antônio do Tauá, Vigia e São Caetano de Odivelas (Figura 7). O acesso aos municípios e ilhas ocorre partindo da capital Belém através da BR-316, em seguida as PA's (PA-391; PA-140) que tem acesso a cada localidade. O tempo estimado de chegada saindo de Belém é de aproximadamente 1h15min à 2h11min, do município mais próximo ao mais distante, respectivamente.

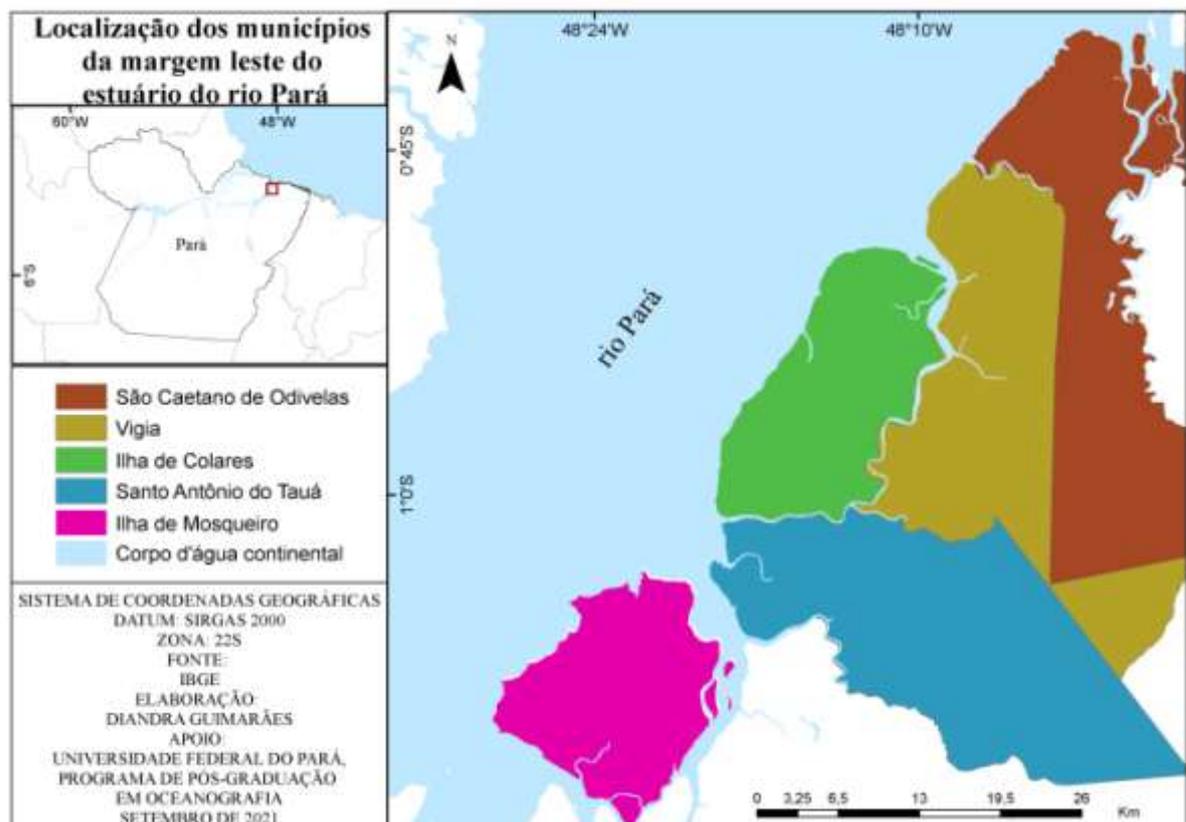


Figura 7 - Localização dos municípios da margem leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora.

De acordo com a PEGC do Pará, a maior parte da área de estudo está localizada no Setor 4: Flúvio-Marítimo (Colares; Vigia; Santo Antônio do Tauá; São Caetano de Odivelas),

apenas a ilha de Mosqueiro se encontra no Setor 3: Continental Estuarino (Figura 8) (Pará, 2020).

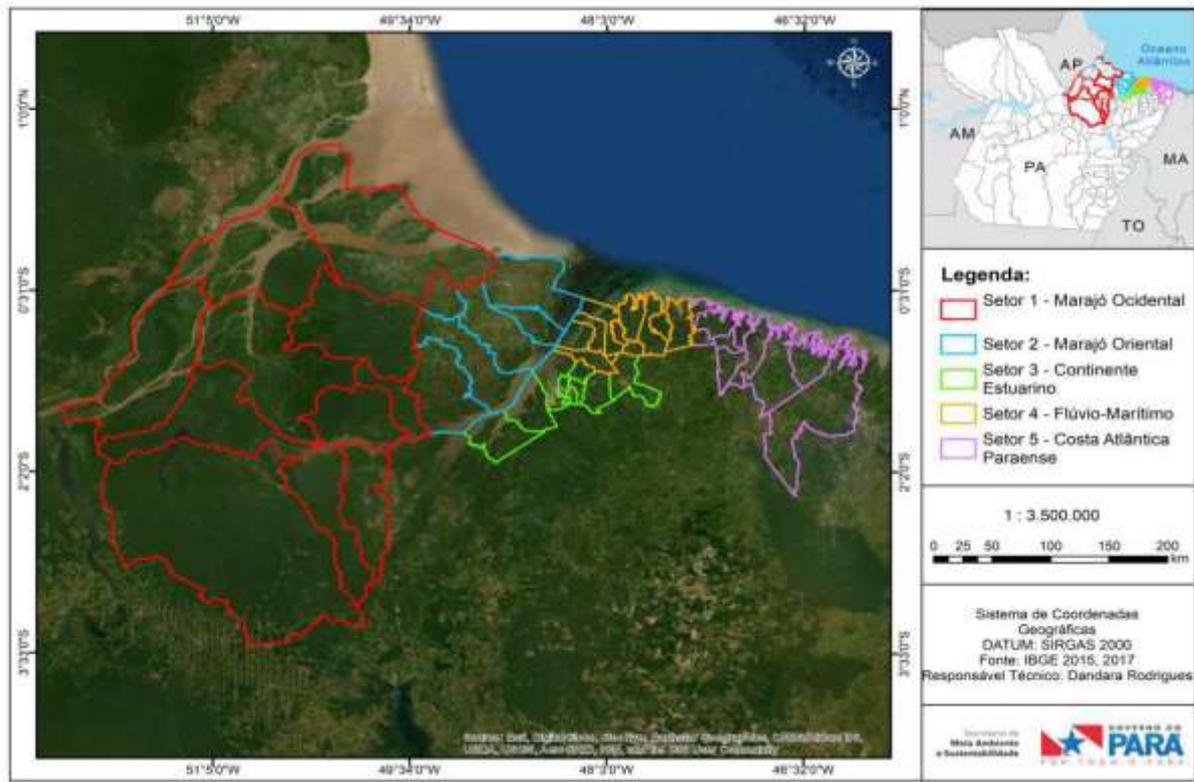


Figura 8 - Divisão dos setores da zona costeira paraense. Fonte: PARÁ, 2020

## 5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 5.1 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

O principal fenômeno que contribui para o clima da região é a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), um sistema sinótico que ocorre nas proximidades da linha do equador onde ocorrem diversas interações atmosféricas e oceânicas que juntamente com sistemas convectivos forçados localmente provocam alternâncias de estações climáticas, a direção dos ventos e a temperatura da região norte e nordeste do Brasil (Amanajás e Braga, 2012; Carvalho e Oyama, 2013; Matos e Cohen, 2016).

A localização da ZCIT está ao norte do Equador, porém apresenta variações sazonais e longitudinais, sobre o Oceano Atlântico se desloca em média 14°N a 2°S (Figura 9) (Carvalho e Oyama, 2013). No sul do Equador nos meses de dezembro a fevereiro a ZCIT influencia nas altas precipitações e forte nebulosidade da região (Rollnic *et al.* 2020; Rosa e Silva, 2016).

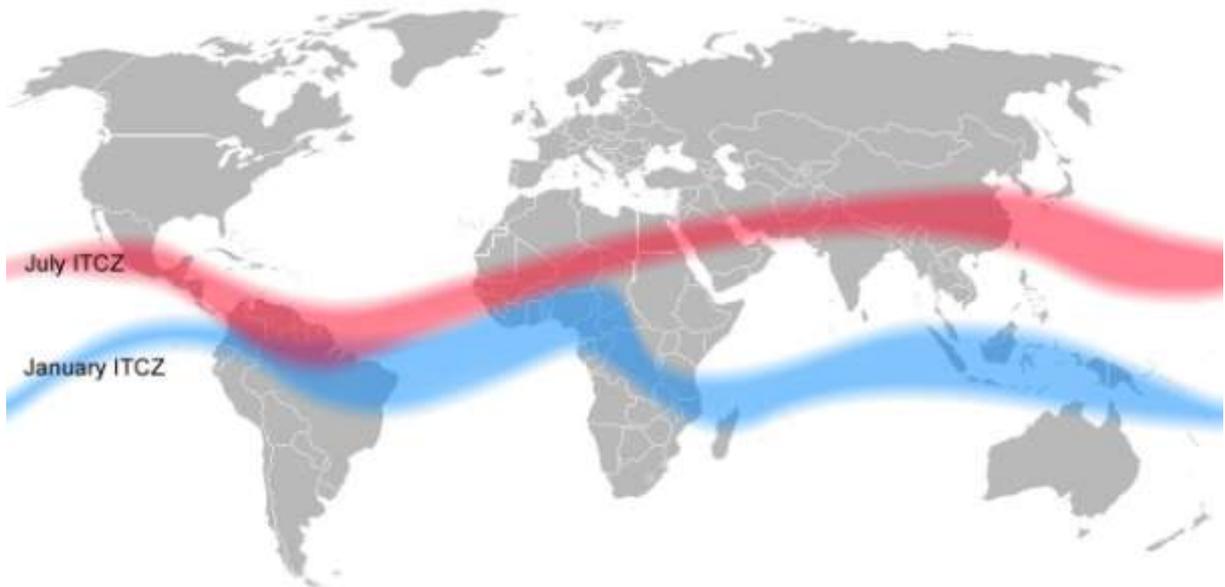


Figura 9 - Posição média da ZCIT nos meses de julho (vermelho) e janeiro (azul). Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2021/01/22/zcit-e-os-principais-sistemas-meteorologicos-no-nordeste-7545>. Acesso: 01/10/2021

O clima do nordeste paraense é caracterizado como equatorial úmido com temperatura média anual entre 25°C e 27°C (Figura 10), aonde as maiores temperaturas que chegam a 33 °C ocorrem durante a estação seca entre junho e novembro (INMET, 2021a). A precipitação anual é entre 2.000 e 3.000 mm (Figura 11), com 70% dessa precipitação ocorrendo durante a estação chuvosa, entre dezembro e maio, com temperaturas mínimas que chegam a 22°C (INMET, 2021a), sendo este diretamente influenciado pela migração sazonal da ZCIT na direção meridional (Amanajás e Braga, 2012; Dos Santos *et al.* 2019; Matos e Cohen, 2016).

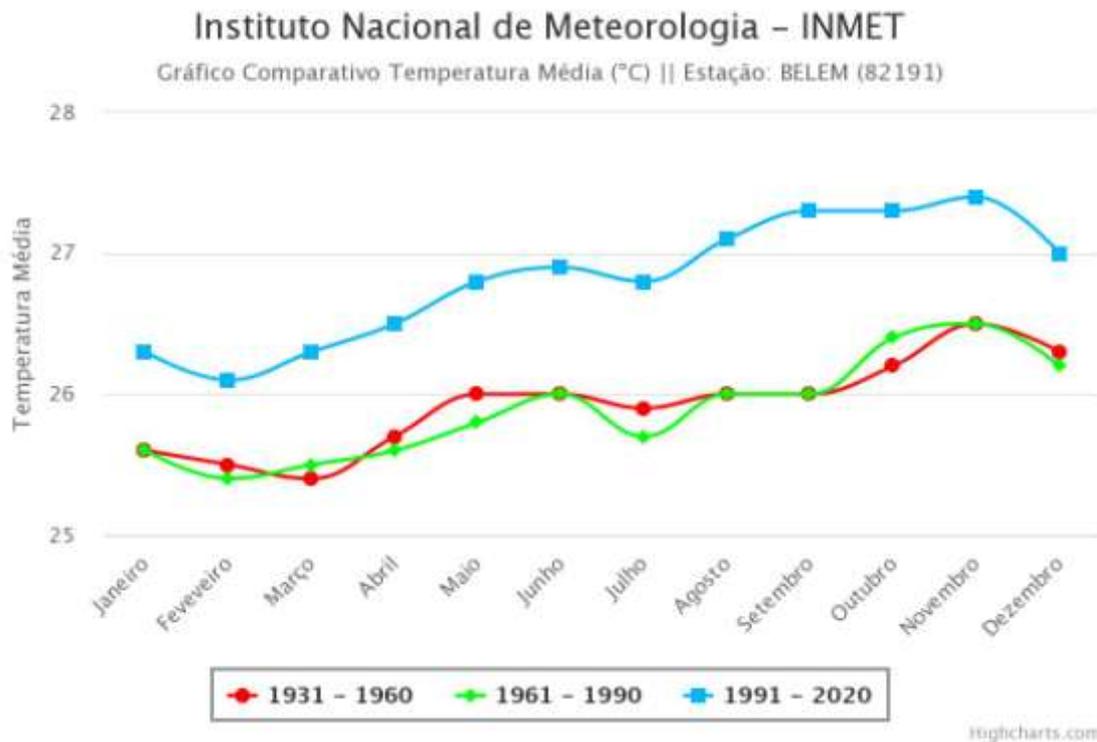


Figura 10 - Comparativo de temperatura média da cidade de Belém. Disponível em: [https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao\\_acumulada\\_mensal\\_anual](https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual). Acesso: 31/10/2021

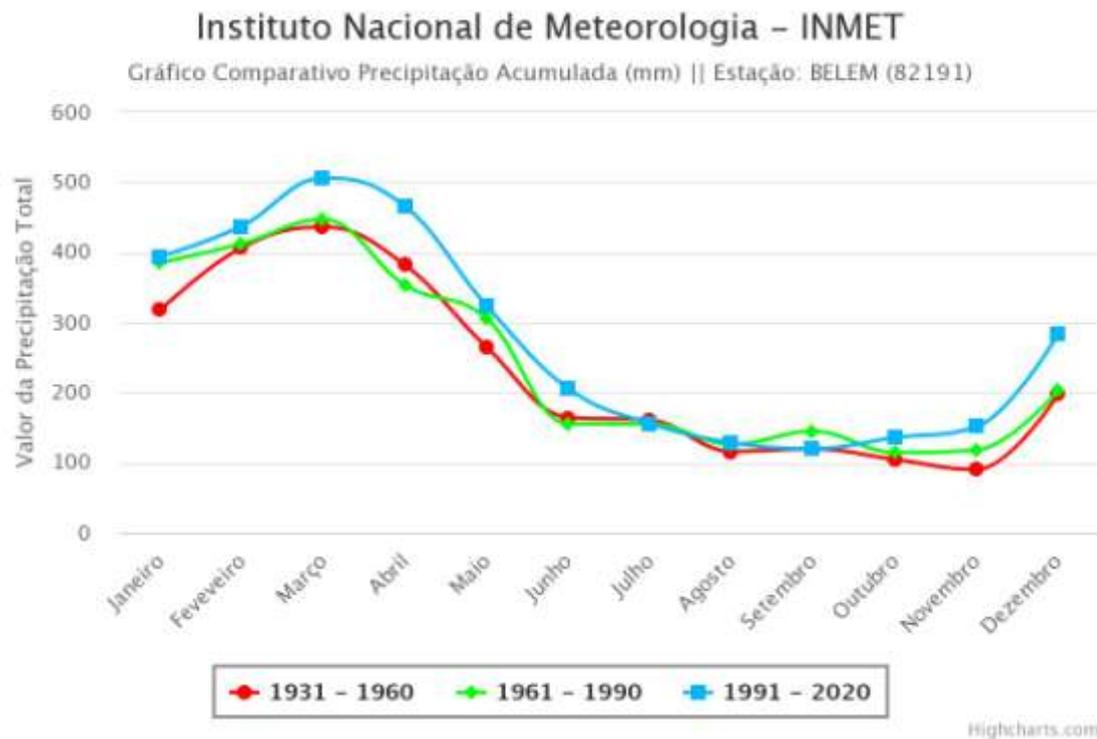


Figura 11 – Comparativo de precipitação acumulada da cidade de Belém. Disponível em: [https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao\\_acumulada\\_mensal\\_anual](https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual). Acesso: 31/10/2021

Os ventos alísios são o padrão imposto pela circulação em grande escala na costa norte do Brasil. Dragaud *et al.* (2020) constataram que nessa área os ventos têm predomínio de direção do quadrante leste, com variação diurna evidente próxima a costa (Figura 12). A ZCIT também interfere na direção dos ventos na região, onde no verão e na primavera ocorrem ventos alísios de nordeste persistentes e fortes, enquanto no outono e inverno ocorrem ventos mais fracos no hemisfério sul (Dragaud *et al.* 2020; Molinas *et al.* 2014).

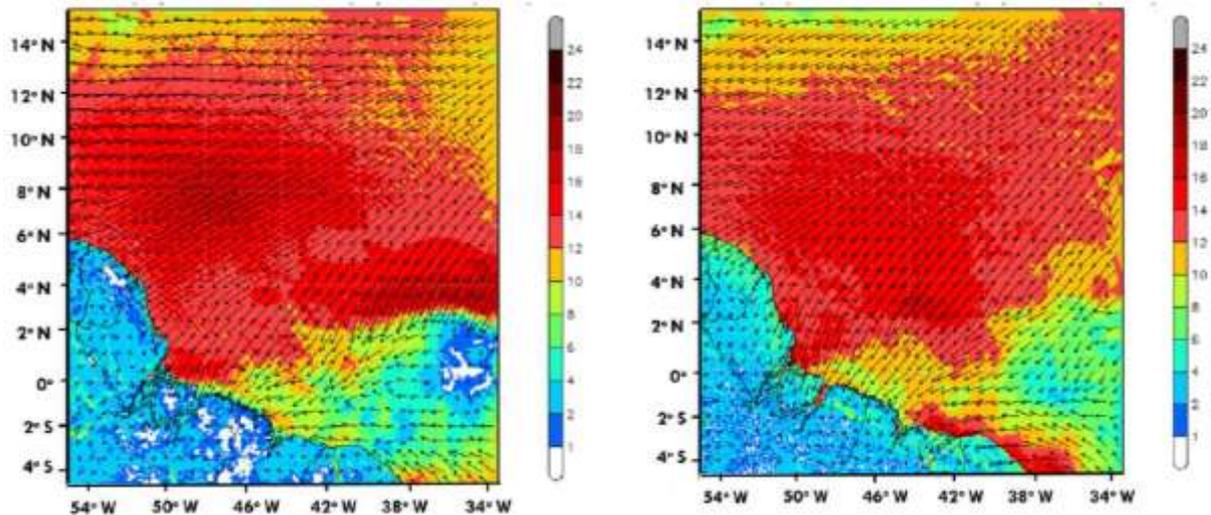


Figura 12 - Direção do vento a 10 m na costa norte. Na imagem à esquerda estão os resultados referentes às 06 UTC e à direita referentes às 18 UTC. Fonte: Dragaud *et al.* (2020)

Os ventos alísios de nordeste apresentam uma maior velocidade na estação seca, variando entre  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (CPTEC/INPE, 2021; INMET, 2021b; Rollnic *et al.* 2020). Matos e Cohen (2016) sobre a canalização do vento no estuário do rio Pará, observaram que este vento penetra no continente através da margem Leste do estuário e converge com um escoamento de Leste sobre o continente, podendo chegar a  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figura 13).

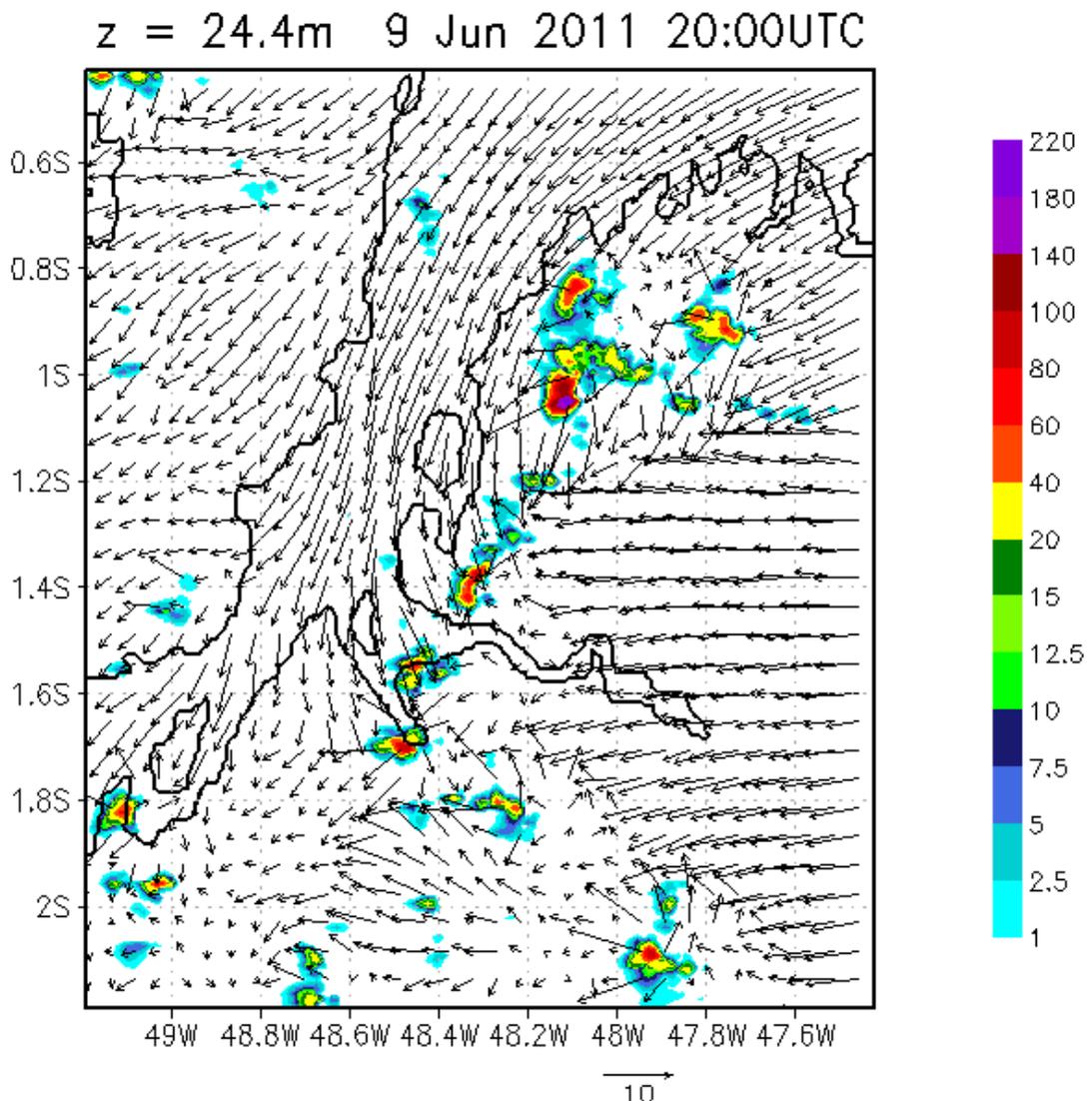


Figura 13 - Vento horizontal (m/s) no nível de 24,4 m e taxa de precipitação (mm/h) na grade 2 (1km). Fonte: Matos e Cohen (2016)

### 5.1.1 Eventos Extremos

Partes de um fenômeno atmosférico-oceânico denominado El Niño Oscilação Sul (ENOS), o El Niño (EN) e La Niña (LN) afetam a climatologia de todo o mundo (Figuras 14 e 15). Denotam condições de temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial mais quentes ou mais frias que a média. No EN o oceano Pacífico Equatorial está mais quente e no LN mais frio do que a média normal histórica. A mudança na temperatura de superfície do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais nos padrões de ventos, nebulosidade, temperatura e precipitação. Esses fenômenos ocorrem a cada 2 a 5 anos em média, e podem durar de 9 a 12 meses, havendo casos de 4 anos (Cai *et al.* 2020; CPTEC/INPE, 2021; Moura *et al.* 2019; Santos, 2006).

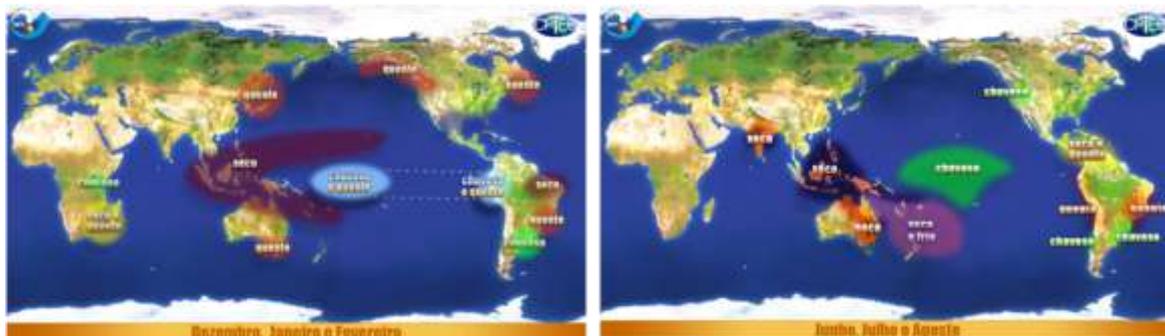


Figura 14 - Efeitos globais do El Niño. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/#>. Acesso: 28/09/2021



Figura 15 - Efeitos globais do La Niña. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/#>. Acesso: 28/09/2021

O EN pode também causar alterações nas posições e intensidades de duas zonas de convergência, a do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão e, a intertropical (ZCIT) durante o outono. Quanto a LN, os padrões anômalos de circulação atmosférica e climáticos são inversos aos descritos para o EN (Cai *et al.*, 2020; CPTEC/INPE, 2021).

Estudos sobre a influência do EN e LN na bacia amazônica indicaram que os maiores impactos desses fenômenos estão relacionados às mudanças no regime pluviométrico e fluviométrico. Durante a ocorrência de um EN moderado, a precipitação tende a ser menor que a normal e durante a ocorrência de um evento LN moderado, a precipitação tende a ser maior que a normal. Essas mudanças na precipitação irão influenciar na descarga dos rios (refletindo nos processos hidrodinâmicos de transporte e deposição da região), na cobertura da vegetação, nas atividades econômicas e principalmente no clima da região (Moreira *et al.* 2018; Moura *et al.* 2019; Santos, 2006).

Moreira *et al.* (2018) apontam que em 2015 durante um evento de EN a precipitação na cidade de Belém chegou a reduzir cerca de 50% da média, não ocorrendo às chuvas vespertinas que são tradicionais na capital. Esses fenômenos não se repetem exatamente iguais, devido a outros sistemas atmosféricos que também influenciam as condições de tempo local, como a umidade relativa do ar e a nebulosidade, no entanto uma das principais influências desses fenômenos na região será na redução ou elevação dos níveis dos rios.

## 5.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS

A área de estudo é sustentada pelos sedimentos Pós-Barreiras e pela Formação Barreiras, onde acima destes ocorrem os Depósitos Aluvionares e Depósitos litorâneos (El-Robrini *et al.* 2018b; Rollnic *et al.* 2020) (Figura 16). Os sedimentos da Formação Barreiras são compostos por depósitos siliciclásticos variados e não fossilíferos (conglomerados, arenitos e argilosos) e suas camadas exibem estratificações laminadas ou maciças, com predomínio de arenitos finos a siltitos (5 a 10 m de espessura) e ocorrem na parte central da ilha de Mosqueiro e no interior do município de São Caetano de Odivelas (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018a; Picanço, 2013).

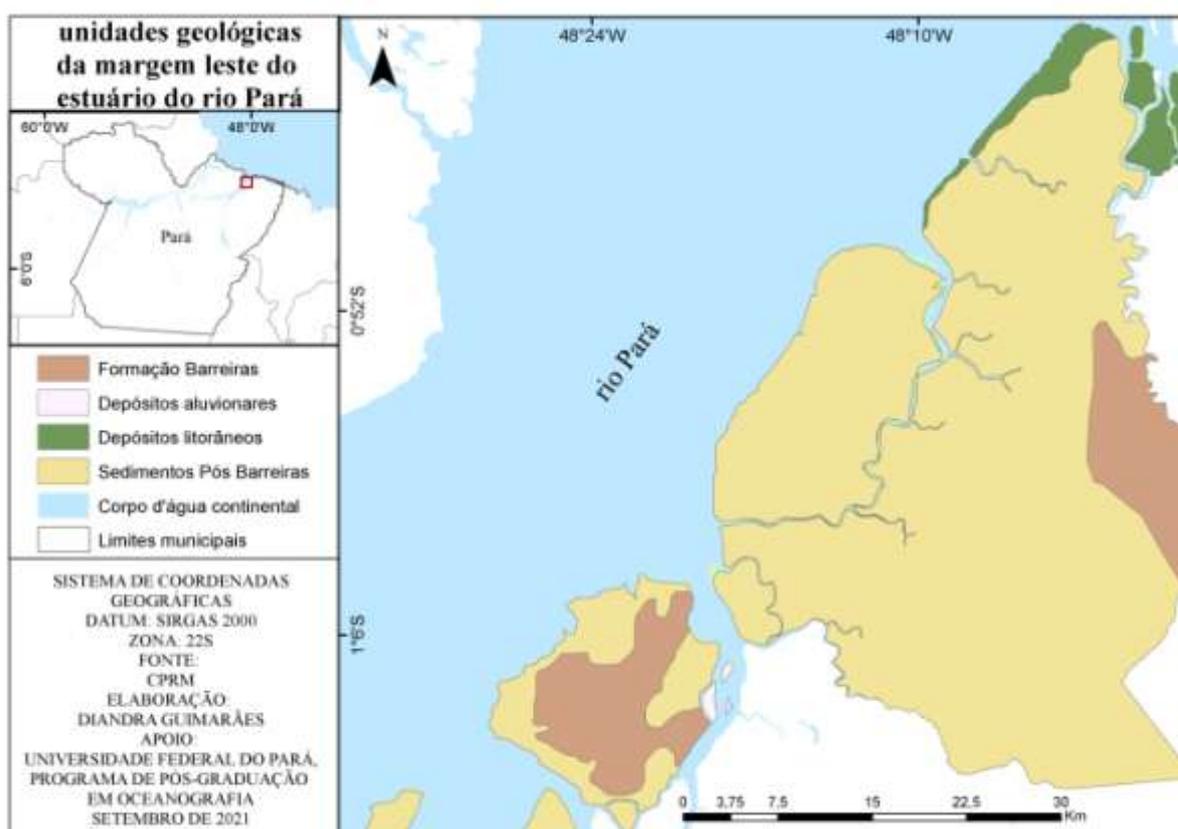


Figura 16 - Unidades geológicas da margem leste do estuário do rio Pará. Elaboração: autora

Os sedimentos do Pós-Barreiras são encontrados na maior parte da área de estudo, e repousam sobre a Formação Barreiras (discordância erosiva), e são constituídos por sedimentos areno-argilosos (Pleistocênio). Estes incorporam pelo menos dois diferentes episódios de sedimentação referenciados informalmente de sedimentos Pós-Barreiras I e II, sendo o primeiro, com até 10 m de espessura e o segundo, com 2 a 5m de espessura (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018a; Picanço, 2013; Ribeiro e Valadão, 2021).

Os Depósitos Aluvionares ocorrem apenas a sudeste da ilha de Mosqueiro, no Furo das Marinhas, e são constituídos por sedimentos argilosos e arenosos inconsolidados,

relacionados às planícies aluvionares atuais dos principais cursos d'água, que constituem depósitos de canais (barras em pontal e barras de canais) e de planícies de inundação (CPRM, 2008; El-Robrini *et al.* 2018a).

Por fim, os Depósitos Litorâneos são encontrados na LC de Vigia e de São Caetano de Odivelas e são agrupados conjuntamente aos depósitos sedimentares de praias, dunas costeiras, manguezais e pântanos salinos, que constituem a planície costeira dos municípios. São constituídos por sedimentos arenosos (praias e dunas) e lamosos (manguezais e pântanos salinos) (CPRM, 2008; El-Robrini *et al.* 2018a).

### 5.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Na área de estudo estão presentes duas unidades geomorfológicas segundo IBGE (2008) (Figura 17): *Litoral de mangues e “falsas rias”* formados pelos Depósitos Sedimentares Quaternários e os *Tabuleiros Paraenses* que são amplamente representados. As “falsas rias” como utilizadas por El-Robrini *et al.* (2018a) são constituídas por um conjunto de reentrâncias presentes principalmente na Costa Atlântica do Salgado Paraense da ZCEP.

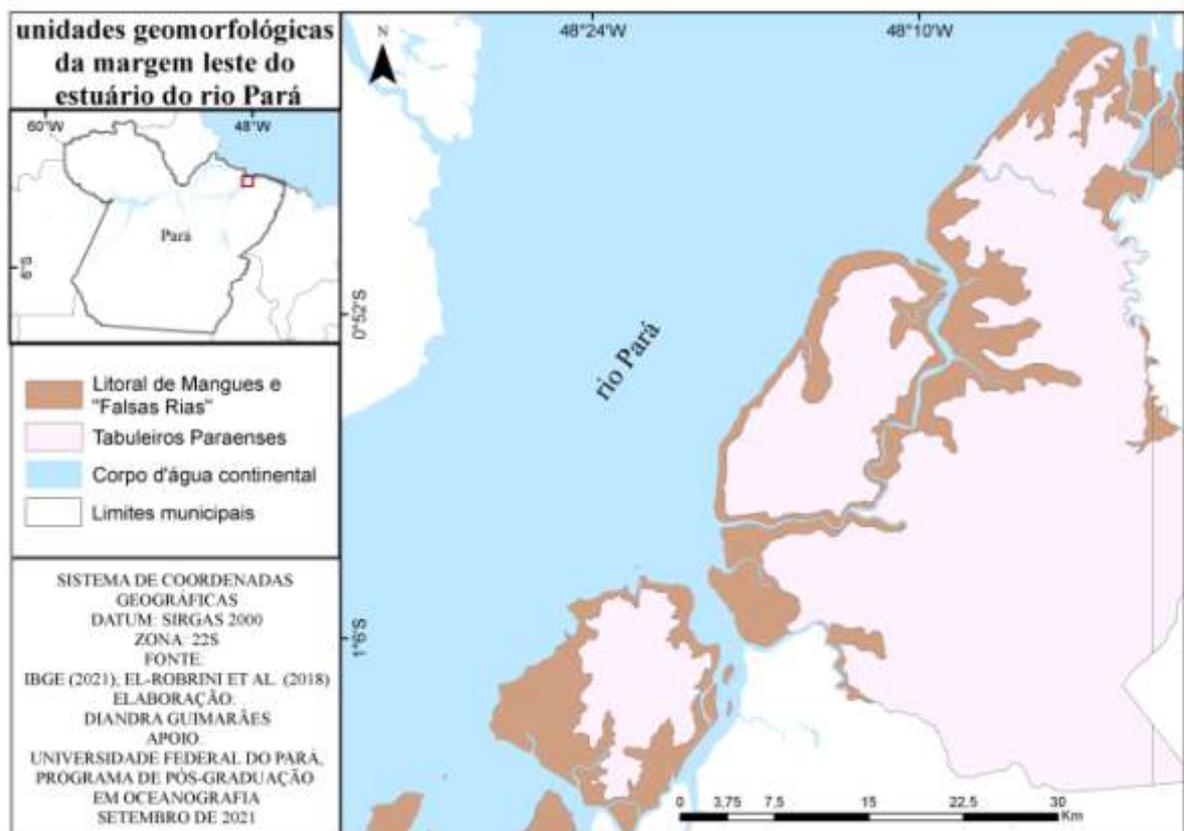


Figura 17 - Unidades geomorfológicas da margem leste do estuário do Rio Pará. Elaboração: autora

O Litoral de mangues está presente em toda a LC de todas as ilhas e municípios da área de estudo e os Tabuleiros paraenses formam a parte interna dessa área. O litoral norte e nordeste paraense são fortemente influenciados por marés, apresentando um conjunto de feições deposicionais de origem fluvial e marinha, caracterizando-as como uma unidade de Planícies Fluviomarinha. Na compartimentação geomorfológica dessas unidades se encontram planícies aluviais, estuarinas e costeiras. Esses domínios ocupam um vasto território de terras baixas (0-5° de declividade; topografia <30m) e inundáveis, na interface de domínios continental marinho, recoberto por faixas de manguezais (El-Robrini *et al.* 2018a; Rollnic *et al.* 2020).

Segundo Corrêa (2005) a morfologia de fundo do estuário do Rio Pará apresenta canais com direção predominante de SSW/NNE, se suavizando em direção a plataforma continental interna para a orientação SW/NE, intercalados por bancos arenosos, podendo alguns destes aflorar durante períodos de maré baixa (Figura 18).

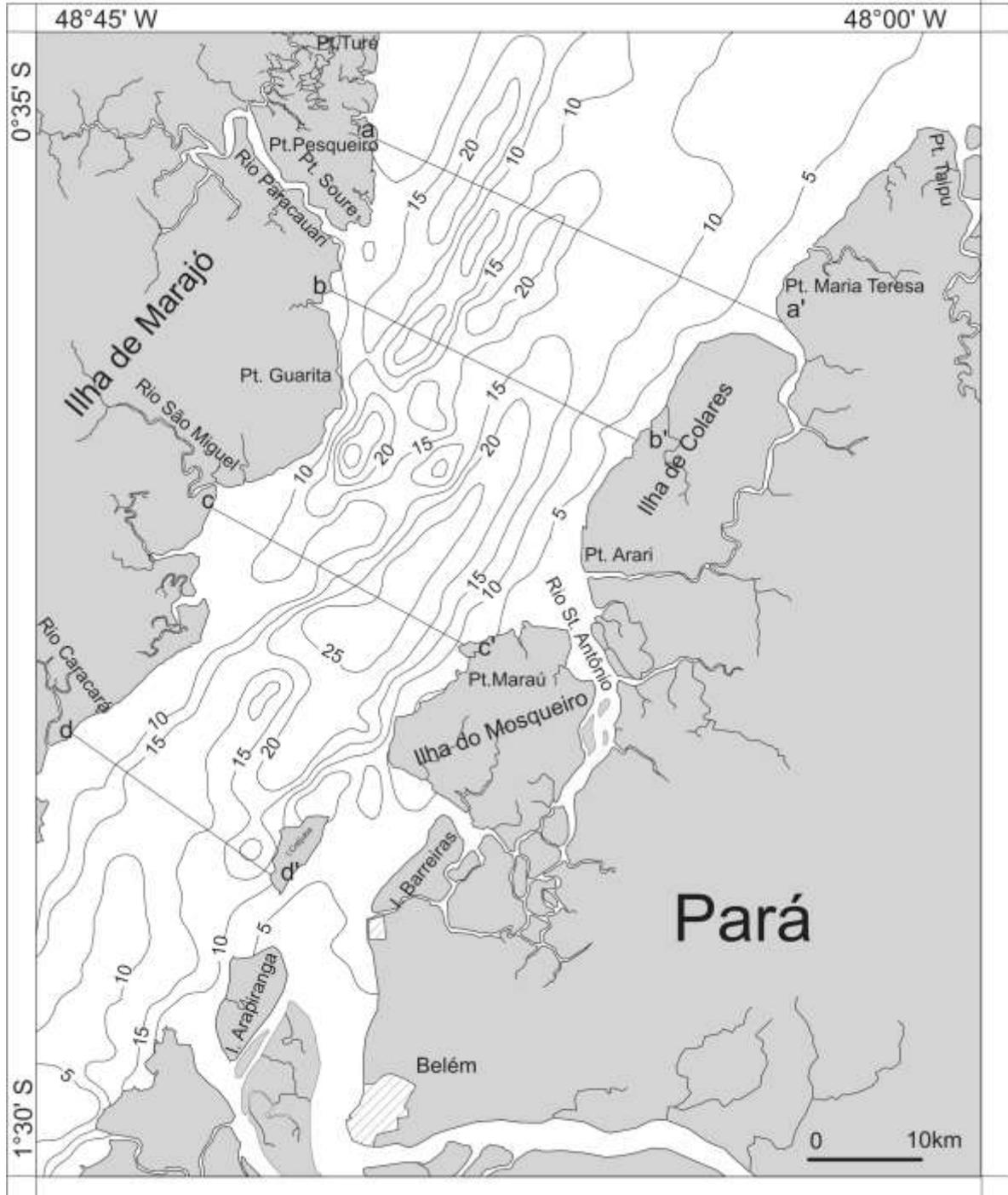


Figura 18 - Mapa batimétrico do estuário do Estuário do Rio Pará (isóbatas em metros). Fonte: Corrêa (2005)

No Estuário do Rio Pará o material em suspensão provém da ressuspensão dos sedimentos finos do fundo de fonte externas (Carneiro *et al.* 2020). Na margem leste do estuário os sedimentos são mais finos, formada por silte grosso e muito fino e em algumas áreas, sedimentos argilosos, depositados por decantação, evidenciando uma margem influenciada por baixa hidrodinâmica (Corrêa, 2005).

A foz de um estuário é uma zona de transição onde várias forças influenciam nas mudanças costeiras mais profundas, principalmente relacionadas às condições deposicionais. A descarga fluvial, marés e correntes são exemplos de forças que movimentam os sedimentos, sendo a foz uma zona potencialmente de captura de sedimentos fluviais e marinho. O depósito dos sedimentos em suspensão na foz de um rio está relacionada à morfologia e as forças dominantes no estuário (Gardel *et al.* 2021).

#### 5.4 CONDIÇÕES HIDROLÓGICAS

O Estuário do rio Pará é localizado na margem sudoeste da ilha do Marajó (Figura 19). Este é classificado como um grande sistema estuarino tropical, com mais de 300 km de extensão longitudinal e foz de 60 km de largura, sendo um dos maiores estuários do Brasil. (Prestes *et al.* 2017).

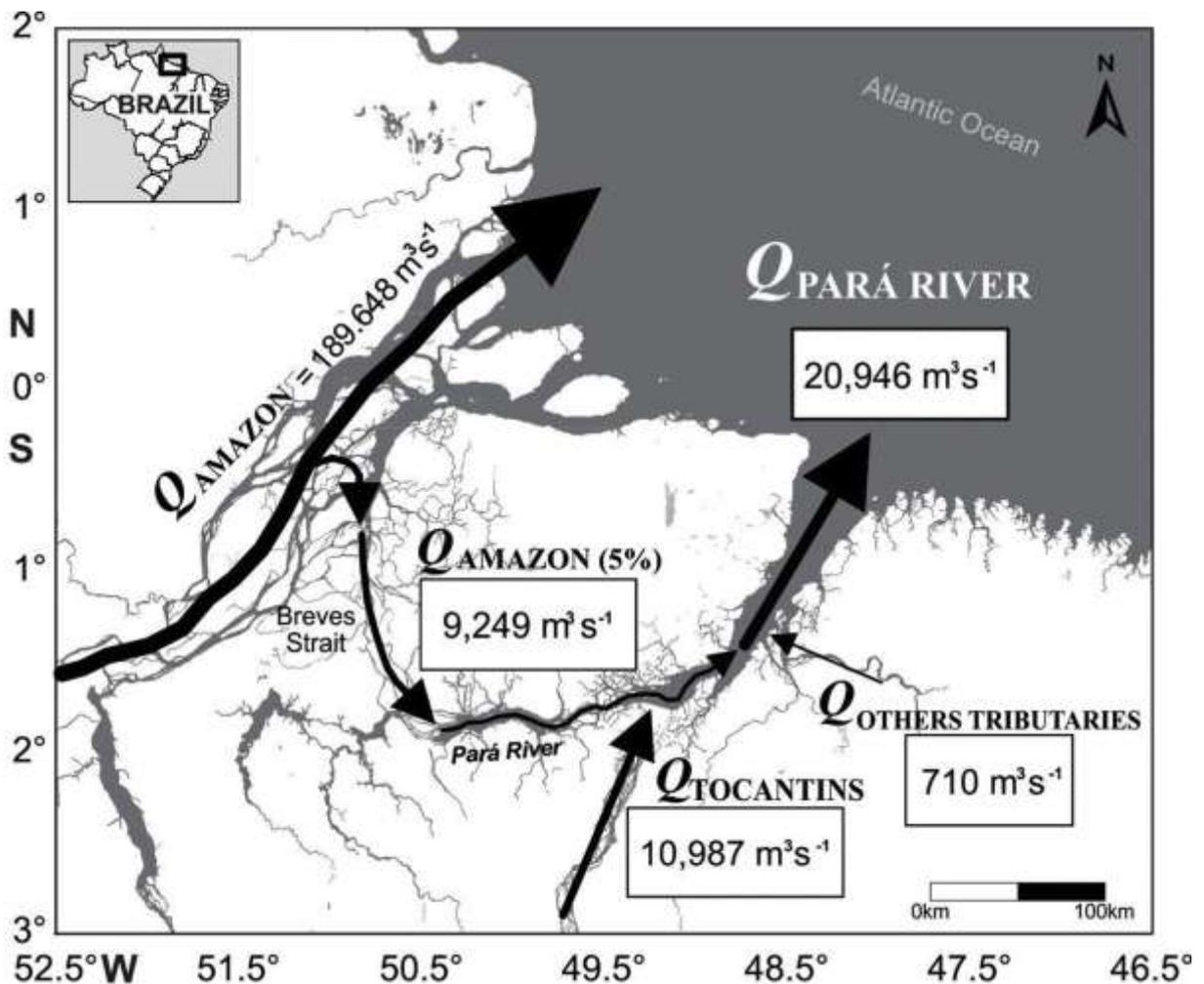


Figura 19 – Valores da descarga fluvial do Rio Pará em direção ao Oceano Atlântico e valores das contribuições de seus afluentes principais (Rio Amazonas; Rio Tocantins e outros tributários). Fonte: Prestes *et al.* (2020)

Prestes *et al.* (2020) registraram que a descarga líquida do rio Pará é de  $20.946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (em condições estacionárias) em direção ao Oceano Atlântico. O valor da descarga líquida do rio Pará é a soma das contribuições fluviais de seus afluentes principais (rio Amazonas, rio Tocantins e outros rios tributários). Este valor pode variar em condições não estacionárias, com a influência de fenômenos como o El-Niño e La-Niña, mudanças geomorfológicas, mudanças climáticas, chuvas e ações antrópicas (Prestes *et al.* 2020).

## 5.5 CONDIÇÕES OCEANOGRÁFICAS

O estuário do rio Pará é característico de Planície costeira, dominada por marés, correntes e ondas que se formam no interior do próprio estuário, gerando um ambiente fluviomarinho peculiar (França e Pimentel, 2012; Prestes *et al.* 2017; Ribeiro e Valadão, 2021).

### 5.5.1 Marés

As marés semidiurnas são predominantes no Oceano Atlântico Equatorial, onde os componentes  $M_2$ ,  $S_2$  e  $N_2$ , componentes: lunar principal, solar principal e lunar elíptica maior, respectivamente, são muito fortes. As variações entre o alinhamento do Sol e da Lua geram as marés astronômicas de sizígia (luas nova e cheia) e de quadratura (quartos de Lua). As marés de sizígia são cerca de 20% mais altas (maré alta) e mais baixas (maré baixa) do que as marés de quadratura. As marés também podem ser classificadas em três tipos: micromaré (altura de maré de sizígia é  $< 2\text{m}$ ), mesomaré (entre 2 e 4 m) e macromaré ( $> 4\text{m}$ ) (Souza *et al.* 2005).

O estuário inferior do rio Pará é dominado por macromaré que pode alcançar 5,7m durante a sizígia. No estuário médio, ocorrem os regimes de mesomaré (3,4m) próximo à transição para o estuário superior e de macromaré próximo a Belém com 4,3m durante a sizígia e no estuário superior ocorrem micro (1,5m) e mesomaré (3,4m) semidiurna (Prestes *et al.* 2017; Ribeiro e Valadão, 2021). A subida e descida do nível de água vão expor e inundar grandes áreas da planície costeira, esse movimento influencia diretamente nas mudanças da LC, com deposição (acrecção) e/ou retirada de sedimentos (erosão).

### 5.5.2 Correntes costeiras

As correntes costeiras estão associadas à ação das ondas e marés ao longo da costa e possuem um papel de transporte de sedimentos e de erosão, em especial quando a velocidade do fluxo é alta como o ocorrido em estuários que tem maré semidiurna com alto intervalo

(Picanço, 2013). Esse sistema de circulação pode ser subdividido em quatro partes: o transporte de massa de água costa-adentro, os fluxos de retorno costa-afora, o movimento ao longo da costa das cabeças das correntes de retorno e as correntes de deriva litorânea (Souza *et al.* 2005).

Na costa paraense as correntes induzidas pelos ventos alísios na direção NE e E transportam grandes quantidades de sedimentos pelíticos e arenosos da plataforma continental interna em direção à costa. Essa forçante é responsável pela orientação das ondas, que atingem a LC com um ângulo de 45°, estabelecendo um fluxo paralelo à LC, gerando as correntes de deriva litorânea, que transportam sedimentos no sentido E-W (Corrêa, 2005; El-Robrini *et al.* 2018a).

No estuário do rio Pará o que predomina são as correntes de maré semidiurna e as correntes fluviais induzidas pelos fluxos de descarga fluvial. As velocidades de corrente no estuário do rio Pará são superiores a 2,0 m.s<sup>-1</sup> com descargas instantâneas dentro do estuário atingindo 4,0 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Prestes *et al.* 2020).

### 5.5.3 Salinidade

A salinidade no estuário do rio Pará alterna o seu gradiente, considerando três períodos: baixa vazão, transição e alta descarga. A maior intrusão salina ocorre durante o período de baixa vazão, percorrendo cerca de 130 km (contados a partir da foz do estuário), (alcançando os municípios de São Caetano de Odivelas e Vigia (Figura 20c), no período de transição entre a baixa e alta descarga a intrusão salina ocorre até aproximadamente 110 km, alcançando apenas o município de São Caetano de Odivelas (Figura 20b) e na alta descarga ocorre a intrusão salina em aproximadamente 70 km a partir da foz do estuário, não alcançando nenhuma ilha ou município da área de estudo (Figura 20a) (Rosário *et al.* 2016).

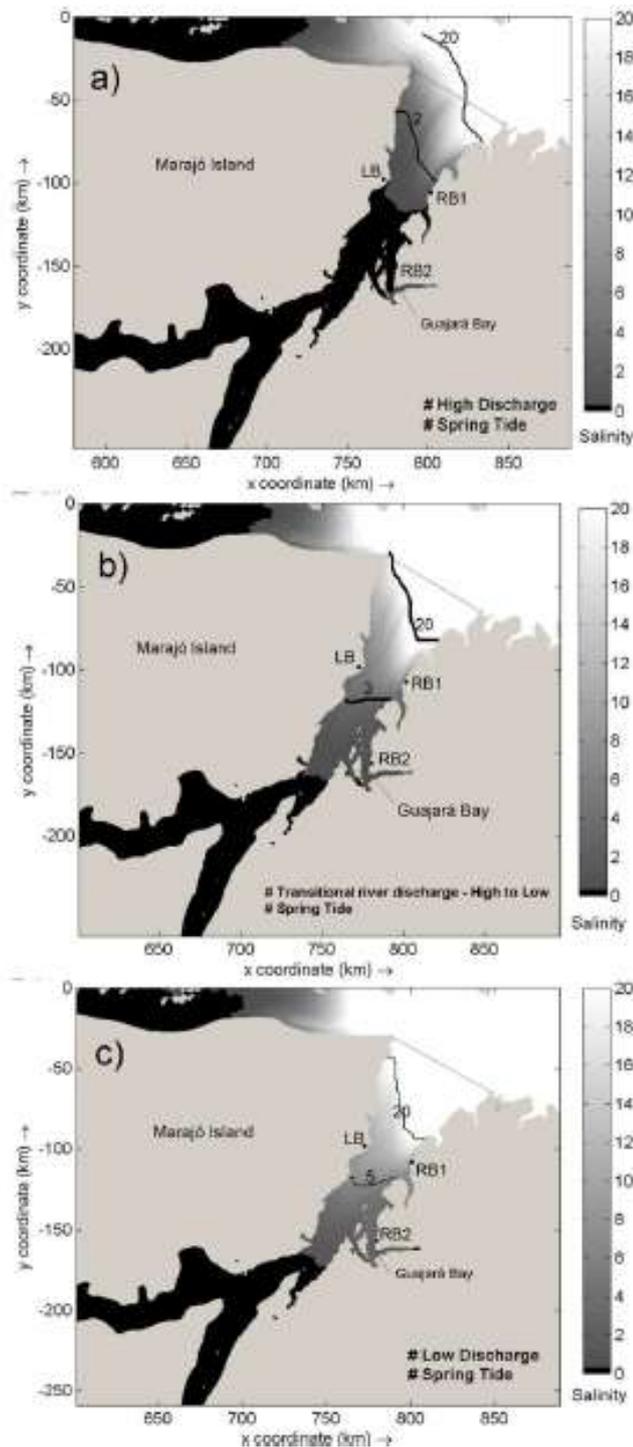


Figura 20 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do Estuário do Rio Pará é o ponto de referência para distâncias. Fonte: Rosário *et al.* (2016).

Relacionado ao gradiente superficial de salinidade, Ribeiro e Valadão (2021) apresentam uma divisão interna para o Estuário do Rio Pará, de acordo com Dionne (1963) com três zonas: I) estuário inferior ou de Marajó; II) estuário médio ou de Guajará e III) estuário superior ou de Marapatá (Figura 21).

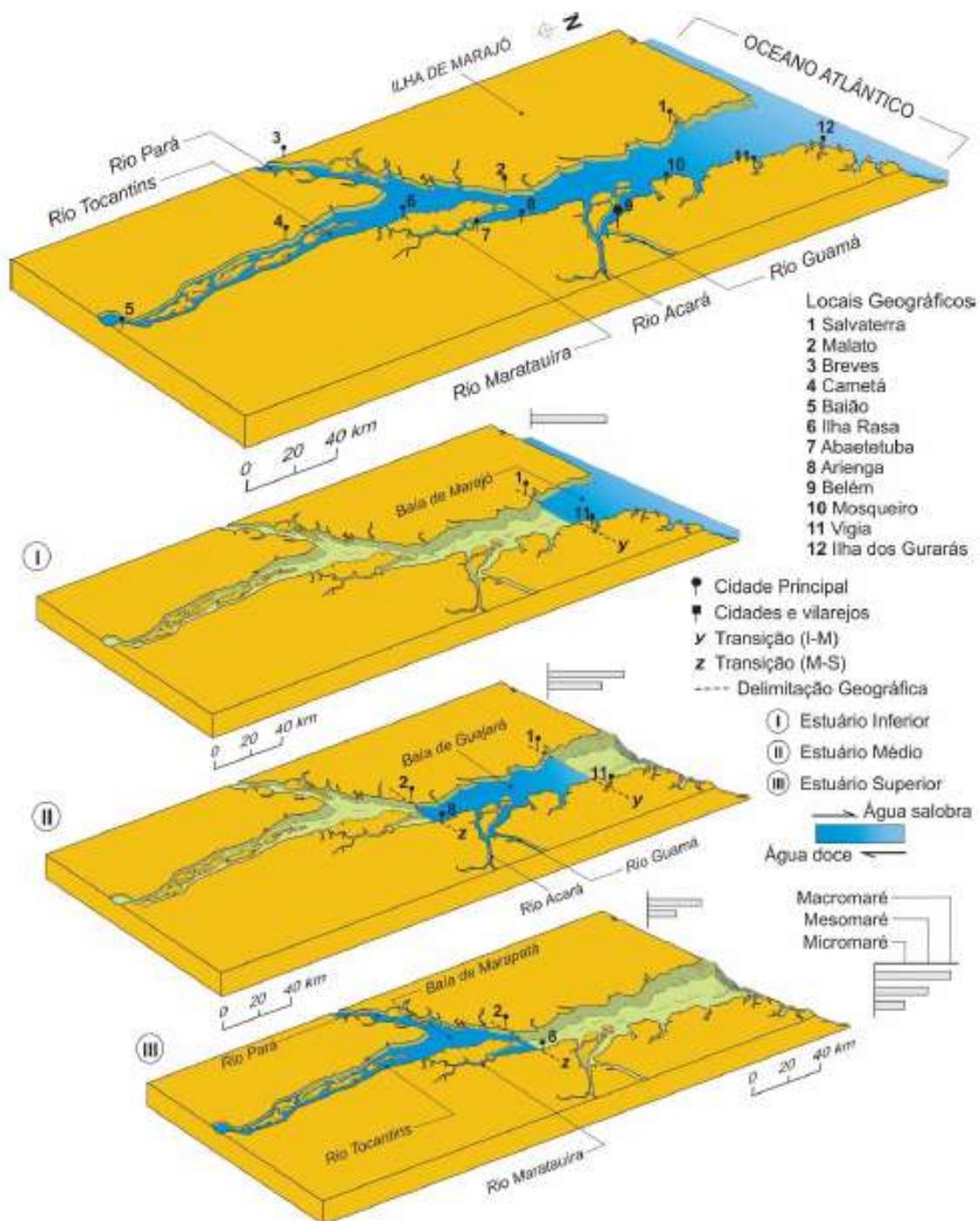


Figura 21 - Divisão do estuário do rio Pará de acordo com a estrada de salinidade. Acima a visão geral do estuário e em seguida as divisões em estuário inferior ou de Marajó (I), estuário médio ou de Guajará (II) e estuário superior ou de Marapatá (III). Fonte: Ribeiro e Valadão (2021)

O estuário inferior corresponde ao encontro da foz do rio Pará com o oceano Atlântico, com aproximadamente 50km de extensão, delimitada geograficamente com as cidades de Salvaterra a oeste e de Vigia a leste. O estuário superior tem delimitação geográfica com Malato a oeste e Arienga a leste. No sentido montante o estuário superior incorpora a foz do Maratauíra e depois se bifurca em dois grandes corpos hídricos, o primeiro

é a continuidade do rio Pará (sentido ENE-WSW) e se estende até o Estreito de Breves e o segundo tem orientação NNE-SSW e corresponde ao rio Tocantins. Por fim, o estuário médio limita-se a jusante com o limite do estuário inferior e a montante com o limite do estuário superior, somando aproximadamente 90km de extensão (Ribeiro e Valadão, 2021).

Segundo Barbosa (2007) os manguezais e várzeas são elementos que servem para identificar as porções média e superior do estuário do rio Pará, pois a cobertura vegetal está relacionada à diferença de salinidade. No estuário inferior e médio, onde predominam a deposição lamosa, formam-se as planícies de maré com cobertura de mangues. No estuário superior, à medida que diminui a salinidade, na direção do interior do estuário, os mangues coexistem com as várzeas ou são substituídos por várzeas influenciadas por maré (França e Pimentel, 2012).

O estuário do rio Pará tem um valor socioeconômico (pesca artesanal e industrial), de tráfego fluvial (transporte de passageiros e cargas) e ecológico (carrega grandes quantidades de nutrientes e minerais). Suas margens são recobertas por grandes manguezais preservados que também são influenciados pelo transporte de material particulado e dissolvido e pelos padrões associados de deposição e erosão (Carneiro *et al.* 2020).

## 5.6 COBERTURA VEGETAL

A cobertura vegetal da área de estudo é formada pela Floresta Ombrófila Densa, Formação Pioneira e Campinarana (Figura 22). Assim, nessa área, ocorre a vegetação de floresta mais alta na LC e a vegetação arbustiva como os campos em regiões mais ao interior da área de estudo (IBGE, 2012).

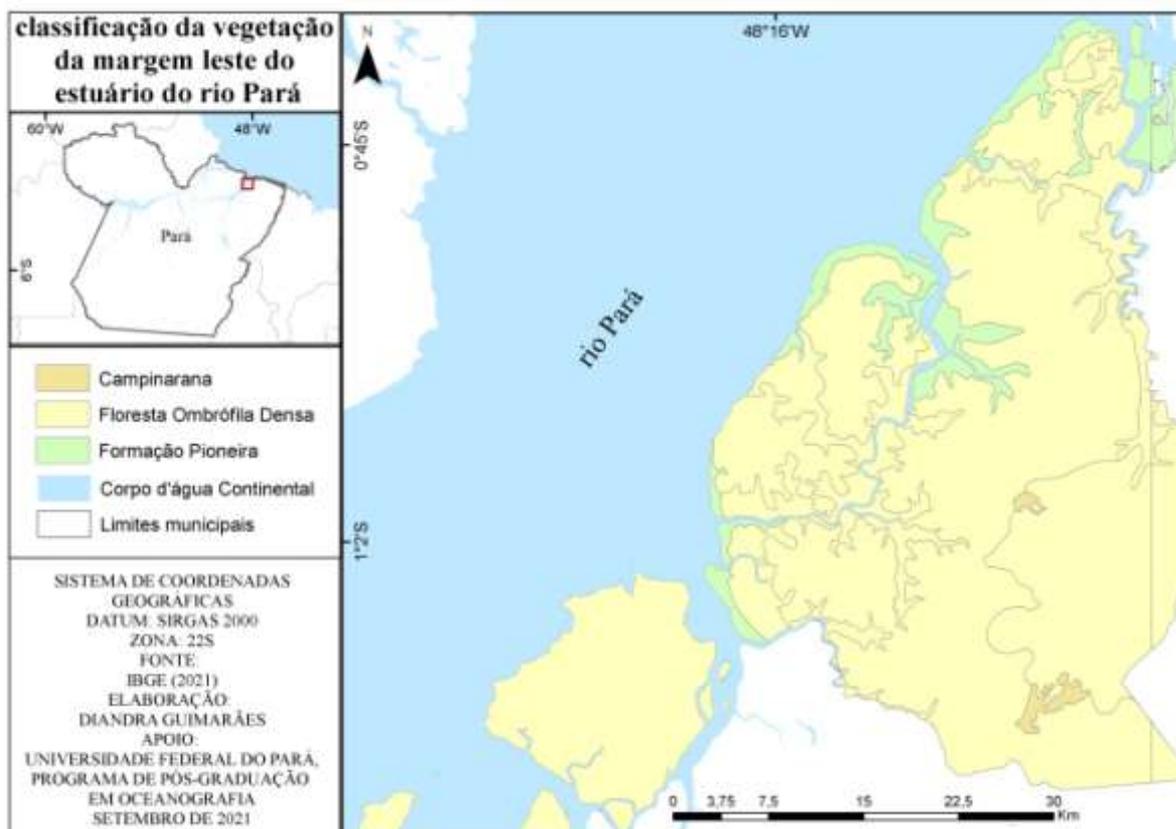


Figura 22 - Classificação da vegetação da margem leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora

A Floresta Ombrófila Densa está presente em toda a ilha de Mosqueiro e na maior parte interna dos outros municípios na área de estudo e tem como sua principal característica suportar elevadas temperaturas (média de 25° C) e alta precipitação em um período e após um período seco. O desenvolvimento de uma exuberante floresta, sob um clima com médio/longo período seco, só pode ser explicado com a análise de outros fatores do ambiente, pois a umidade é sempre mantida, mesmo no período desfavorável, evidenciando que o clima não é o fator determinante para a manutenção desta umidade, o fato de estarem próximas a corpos d'água pode ser determinante (IBGE, 2012).

O IBGE (2012) denomina as Campinaranas da região amazônica como Caatinga da Amazônia, Caatinga Guapó e Campina da Amazônia. É uma formação que ocorre em duas situações distintas: nos pediplanos tabulares das acumulações arenosas periodicamente inundáveis ou dominadas por microfanerófitos finos, como se fosse uma mata jovem ou ripária. Encontram-se no interior dos municípios de Santo Antônio do Tauá e de São Caetano de Odivelas.

As áreas das Formações Pioneiras estão presentes ao longo da LC de Santo Antônio do Tauá, ilha de Colares, Vigia e São Caetano de Odivelas, trata-se de uma vegetação de primeira ocupação de caráter edáfico, que ocupa terrenos rejuvenescidos pelas seguidas

deposições de areias. Nessa área a vegetação está sofre influência fluviomarinha, por essa razão o Manguezal que é um tipo de Formação Pioneira, é encontrado na LC da maior parte dos municípios (Figura 23).

O Manguezal é a comunidade microfanerófitica de ambiente salobro, situada na desembocadura de rios e regatos no mar, onde, nos solos limosos (mangitos), cresce uma vegetação especializada, adaptada à salinidade das águas. Na margem Leste do estuário do rio Pará os manguezais são constituídos de espécies arbóreas e arbustivas dos gêneros *Rhizophora* e *Avicennia* (IBGE, 2012; ICMBIO, 2018; Lima *et al.* 2001).

Esta vegetação faz parte de uma linha contínua de manguezais presente na ZC do Brasil, onde o Pará é o segundo maior estado em área de manguezal com 226.959ha (23%). No geral os manguezais são predominantemente estáveis, entretanto localmente dinâmicos nos últimos 20 anos o Brasil obteve apenas 9% de perdas, 7% de ganho e permaneceram 84% estável (IBGE, 2012; MAPBIOMAS, 2021; Souza Filho, 2005).

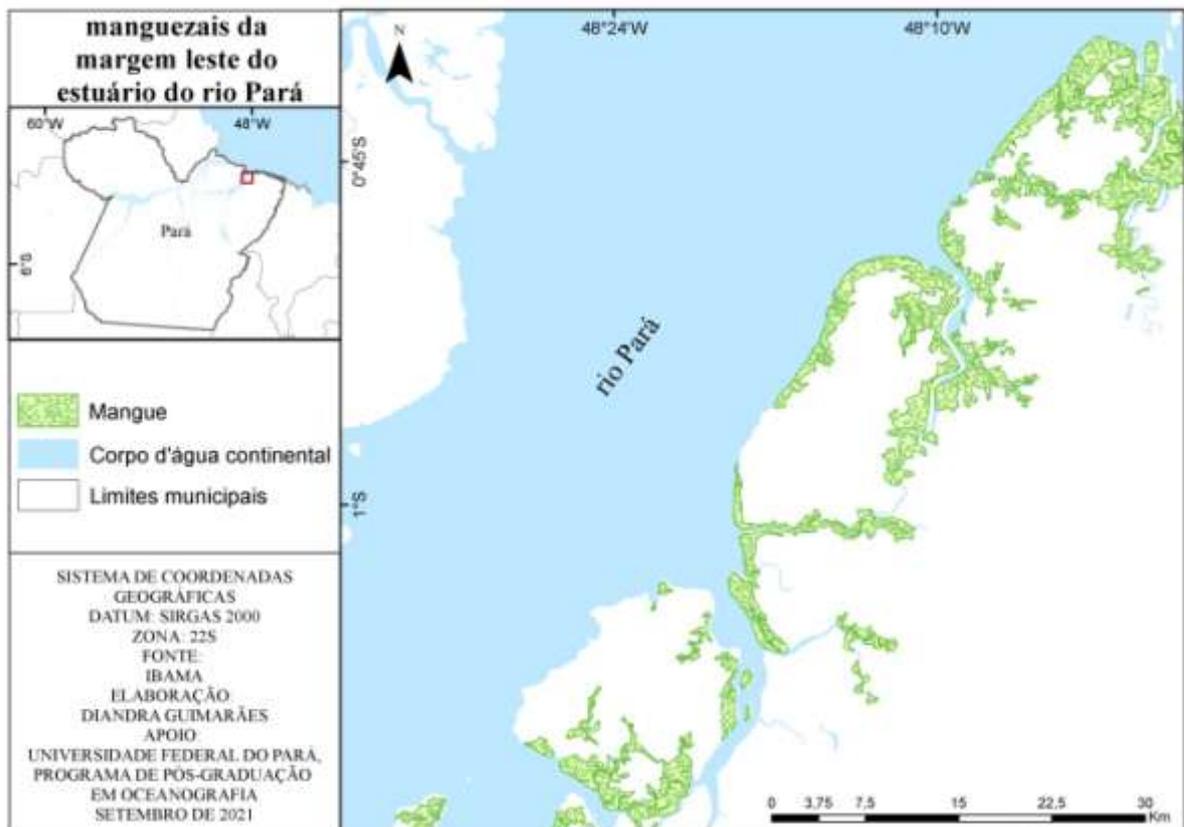


Figura 23 - Manguezais da margem leste do Estuário do rio Pará. Elaboração: autora.

Souza Filho (2005) afirma que a expansão dos manguezais é determinada pela topografia da superfície pré-holocênica, bem como pelas condições de energia de ondas e de correntes de marés. Além de condições meteorológicas e oceanográficas favoráveis, com

precipitação superior a 2.000 mm/ano, temperatura média superior a 25°C e variação de maré entre 4 e 8 m.

Na área de estudo há poucas áreas com ocupação urbana adensada. A floresta Ombrófila Densa e os Manguezais possuem uma ação importante na redução à vulnerabilidade das margens de rios contra a erosão, eventos extremos, tempestades, inundações e promovem a retenção de sedimentos que contribui para compensar parcialmente a elevação do nível do mar. (Das, 2020). São fundamentais para o equilíbrio hídrico e sedimentológico e possuem uma importância econômica para a população que vive ao seu redor e tira a sua subsistência do local onde vivem (ICMBIO, 2018).

### **5.6.1 Unidade de Conservação**

As unidades de conservação (UC) são espaços territoriais, incluindo seus recursos ambientais, com características naturais relevantes, que têm a função de manter a representatividade de diferentes amostras de populações, habitats e ecossistemas do território nacional e das águas jurisdicionais, preservando o patrimônio biológico existente (Medeiros *et al.* 2011).

As UCs asseguram o uso sustentável dos recursos naturais realizado pelas populações tradicionais, pois essas áreas são sujeitas a normas e regras especiais de uso. O Brasil com a criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) em 2000 promoveu uma significativa expansão da superfície coberta por UC, especialmente na Amazônia (Medeiros *et al.* 2011).

Na região de estudo, a Reserva Extrativista Marinha Mocapajuba foi criada por meio do decreto S/N, de 10 de outubro de 2014, localizada no município de São Caetano de Odivelas, com aproximadamente 21.029ha de área (Figura 24). A solicitação para a criação de uma UC no município ocorre desde 1993, por se tratar de uma população tradicional que vive da pesca e da mariscagem, e pela ameaça ao manguezal devido à ação antrópica sem regulamentação (Barros, 2017; ICMBIO, 2014).

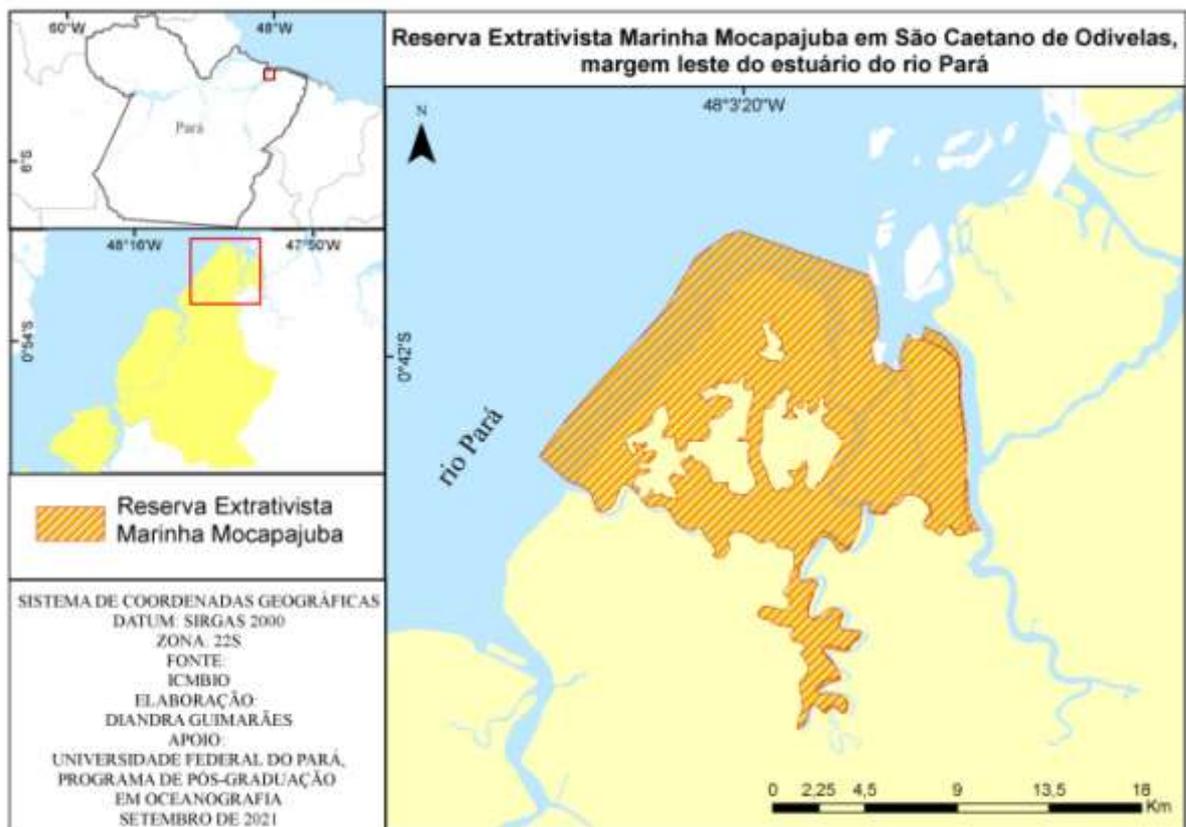


Figura 24 - Reserva Extrativista Marinha Mocapajuba em São Caetano de Odivelas, margem leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora.

A Reserva Extrativista Marinha de Mocapajuba tem como objetivos garantir a conservação da biodiversidade dos ecossistemas de manguezais, restingas, dunas, várzeas, campos alagados, rios, estuários e ilhas; e assegurar o uso sustentável dos recursos, além de proteger os meios de vida e a cultura das populações tradicionais extrativistas desta região (Barros, 2017; ICMBIO, 2014).

## 6 METODOLOGIA

### 6.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica foi realizada com a intenção de coletar informações relevantes para a construção dos objetivos propostos dessa dissertação de mestrado e compreensão da área de estudo. Utilizou-se de artigos, dissertações e teses com temática relacionada a aspectos importantes que necessitavam ser abordados (estuário, LC) e que abarcavam características da área de estudo (clima, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal, hidrodinâmica).

Outro ponto importante foi à leitura de trabalhos com uso da extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS) em outras regiões do litoral Amazônico e no mundo. Com

isso busca-se compreender como a ferramenta vem sendo utilizada e resultados relevantes para a discussão desta dissertação de mestrado.

## 6.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

A análise da variação da posição da LC nesta dissertação tem como base o uso de sensoriamento remoto, a pesquisa utilizou os materiais e métodos (Figura 25).

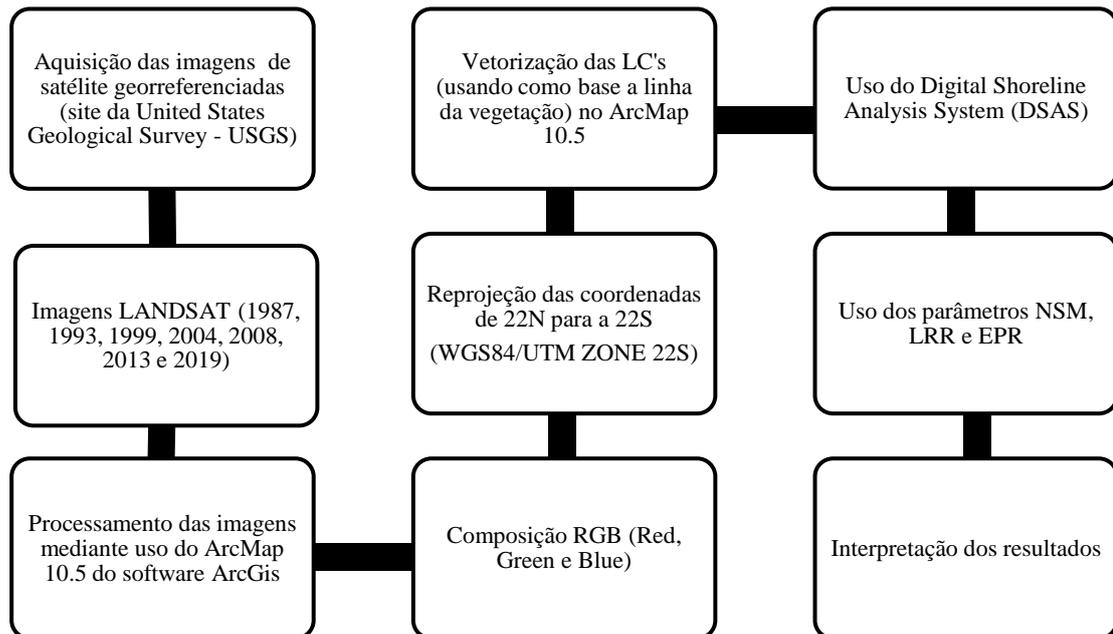


Figura 25 - Fluxograma da metodologia. Organização: autora

### 6.2.1 Aquisição das imagens de satélite LANDSAT

Foram adquiridas imagens de satélite de média resolução LANDSAT 5 TM dos anos de 1987, 1993, 1999, 2004, 2008, e LANDSAT 8 OLI/TIRS de 2013 e 2019, com resolução espacial de 30m, através do site da USGS (United States Geological Survey), obtidas já georreferenciadas (Tabela 1), acessado em junho de 2020. A escolha das imagens nessa região possui algumas limitações, pois na estação chuvosa a cobertura de nuvem na área de estudo pode chegar a 99%, assim a escolha dos anos das imagens foi feita devido estas estarem com uma menor porcentagem de nuvens (de 0 a 30%), para melhor visualização da LC.

### 6.2.2 Processamento e interpretação das imagens de satélite LANDSAT

Primeiramente foi realizada a composição RGB das imagens (Tabela 1) e feita uma reprojeção das coordenadas para WGS84/UTM ZONE 22S, visto que as imagens da USGS originalmente estão na WGS84/UTM ZONE 23N. Em seguida, foi realizada a vetorização da

LC através da interpretação visual das imagens tendo como base o contato da vegetação com a água. Estes procedimentos foram realizados no programa ArcMap 10.5 do software ArcGis.

Após a vetorização das LC's dos anos (1987, 1993, 1999, 2004, 2008, 2013 e 2019) foi feita a sobreposição dos vetores, para posteriormente se utilizar a técnica do DSAS (Digital Shoreline Analysis System) e gerar os dados quantitativos de medidas lineares e taxas da variabilidade da LC e os produtos cartográficos.

Tabela 1 - Dados das imagens adquiridas. Fonte: Adaptado de imagens Landsat (dados USGS); Instituto Nacional de Meteorologia (2020); Kayano et al. (2016) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2021).

| <b>Ano</b>  | <b>Satélite</b> | <b>Sensor</b> | <b>Órbita/ponto</b> | <b>Resolução espacial</b> | <b>Bandas</b> | <b>Data adquirida</b> | <b>Eventos extremos</b> |
|-------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| <b>1987</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 17/05                 | El niño                 |
| <b>1993</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 20/07                 | El Niño                 |
| <b>1999</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 13/07                 | La niña                 |
| <b>2004</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 19/08                 | El niño                 |
| <b>2008</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 14/08                 | La niña                 |
| <b>2013</b> | Landsat-8       | OLI/TIRS      | 223-061             | 30m                       | 6,5,4         | 27/07                 | S/ocorrência            |
| <b>2019</b> | Landsat-8       | OLI/TIRS      | 223-061             | 30m                       | 6,5,4         | 26/06                 | El niño                 |

As ocorrências de El Niño (EN) e La Niña (LN) são eventos que interferem principalmente na quantidade de precipitação na região. Nos anos de análise foram registrados 4 eventos de EN, 2 de LN e 1 sem evento. Em 1987 e 2019 foi registrado EN de intensidade moderada, em 1993 e 2004 EN de intensidade fraca, em 1999 e 2008 tiveram LN de intensidade moderada e 2013 não ocorreu nenhum dos eventos. Esses eventos podem afetar o balanço sedimentar da região em um curto período dependendo da sua intensidade (CPTEC/INPE, 2021; Fernandez e Muehe, 2006; Kayano *et al.* 2016).

### 6.2.3 Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

O Digital Shoreline Analysis System (DSAS) é uma extensão que funciona com o software ArcGIS do Environmental System Research Institute (ESRI). O DSAS calcula estatísticas de taxa de mudança para uma série temporal de dados vetoriais da linha de costa (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018; TOURE *et al.*, 2019). Este software é de grande valor para o gerenciamento costeiro e os estudos da dinâmica costeira (Ranieri e El-Robrini, 2015). Foi

utilizada a versão mais recente do aplicativo (v5.0) lançada em dezembro de 2018 compatível com as versões do ArcGis 10.4 e 10.5.

A partir da vetorização das LC's de todos os anos utilizados na pesquisa se inicia o DSAS que irá se basear na criação de parâmetros quantitativos da variação de LC a partir da geração de transectos ortogonais a uma linha de base determinada pelo usuário (*baseline*) com um espaçamento (Conti e Rodrigues, 2011). Após esta etapa são gerados taxa e medidas estatísticas aplicadas que serão exibidos em tabela nos metadados posterior a análise. Há uma série de parâmetros quantitativos que expressam a variação horizontal da LC determinada ao longo do tempo, sendo estes:

| <b>PARÂMETROS DO DSAS</b>                       | <b>DESCRIÇÃO</b>  |
|---|---|
| SCE ( <i>Shoreline Change Envelope</i> )        | Descreve a distância (m) entre os extremos das linhas de costa (recoo e avanço). Representa o movimento total da costa, não leva em consideração as datas. (SCE+ leva em consideração a imprecisão da linha). |
| NSM ( <i>Net Shoreline Movement</i> )           | Mostra a distância (m) entre as LC's mais recentes e mais antigas (NSM+ leva em consideração a imprecisão da linha).  |
| EPR ( <i>End Point Rate</i> )                   | Determina a taxa de variação da costa por simples razão de distância (m) por tempo das datas das linhas pela distância referida.  |
| LRR ( <i>Linear Regression Rate-of-Change</i> ) | Mostra uma regressão linear da taxa de variação entre a primeira e última LC.   |
| JKR ou método <i>Jackknife</i>                  | Calcula uma regressão linear entre todas as possíveis variações da LC.  |
| WRL ( <i>Weighted Linear Regression</i> )       | Calcula uma regressão entre as LC com peso associado às imprecisões de posição.   |

Quadro 2 - Parâmetros quantitativos disponíveis no DSAS. Fonte: Conti e Rodrigues (2011)

Nesta dissertação de mestrado foram utilizados os parâmetros NSM, EPR e LRR (Figuras 26 e 27) por se adequarem a análise necessária da mudança da posição da LC, tendo como resultados as variações em metros nos 32 anos de análise (NSM) e taxas médias de variação por ano (EPR e LRR). Mesmo os parâmetros EPR e LRR possuindo os mesmos resultados (taxas médias por ano) foram utilizados para fim de comparação, sendo que o LRR utiliza todas as LC criadas e o EPR apenas a primeira e a última LC.

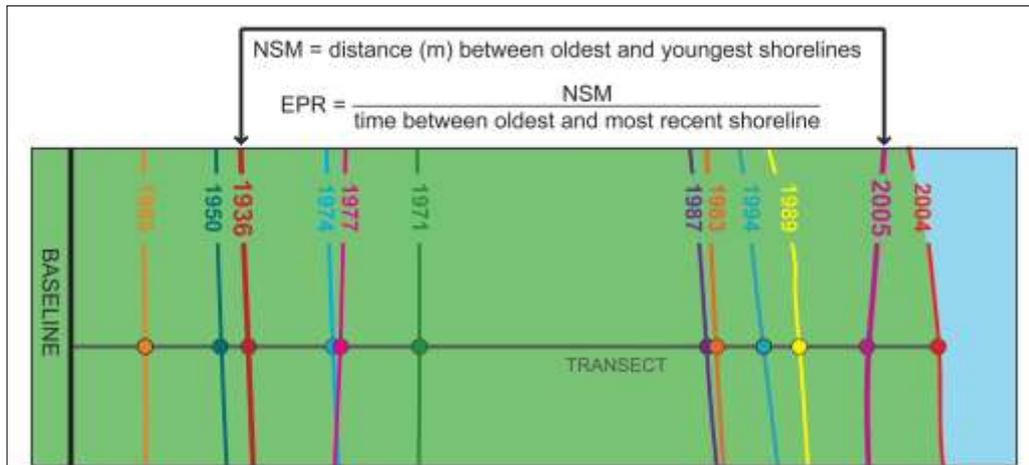


Figura 26 - Ilustração da relação entre as estatísticas de mudança da linha costeira: Net Shoreline Movement (NSM) e End Point Rate (EPR). NSM é à distância ao longo do transecto em metros (m) entre o litoral mais antigo (1936, vermelho) e o litoral mais recente (2005, magenta). O EPR é à distância NSM dividida pelo tempo entre as linhas costeiras mais antigas (1936, vermelho) e mais recentes (2005, magenta) (69 anos neste exemplo).  
Fonte: Himmelstoss *et al.* (2018)

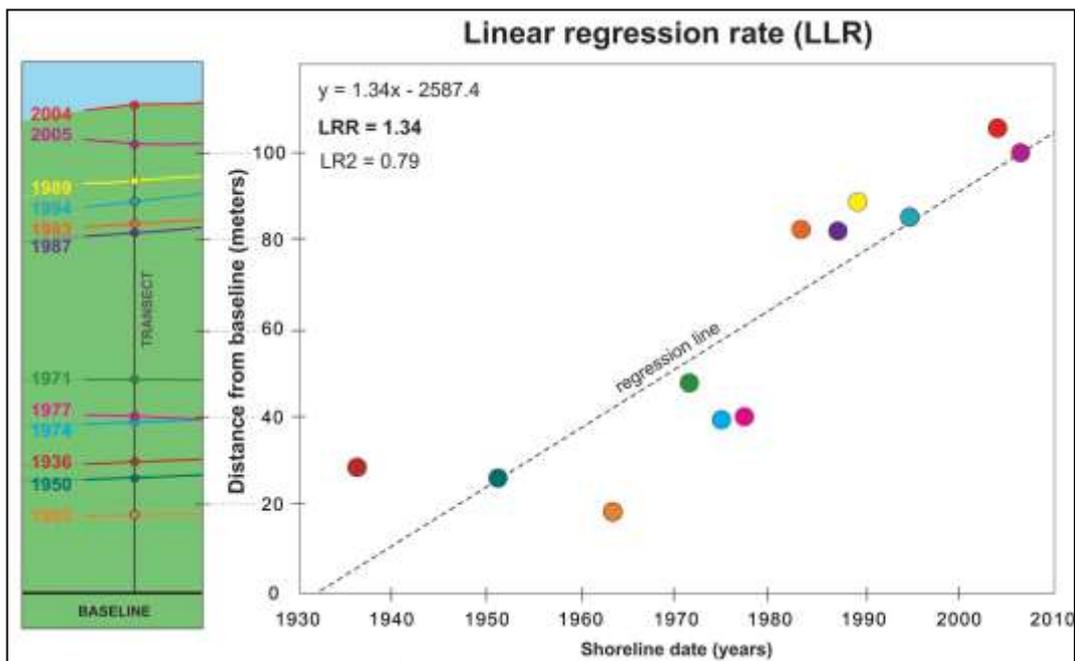


Figura 27 - A taxa de regressão linear (LRR) foi determinada traçando as posições de interseção da linha de costa (distância da linha de base) em relação ao tempo (anos) e calculando a equação de regressão linear de  $y = 1,34x - 2587,4$ . A inclinação da equação que descreve a linha é a taxa (1,34 m/ano). Fonte: Himmelstoss *et al.* (2018)

Os resultados das estatísticas de taxa de mudanças obtidos foram gerados a partir das interseções entre os transectos e as LC's (Figura 28). Tendo como referência a linha de base, os valores positivos indicam um deslocamento da linha em direção ao Estuário do Rio Pará ao longo do transecto e os valores negativos indicam um deslocamento em direção a terra

(Himmelstoss *et al.* 2018), ou seja, taxas positivas significam acreção e taxas negativas significam erosão.

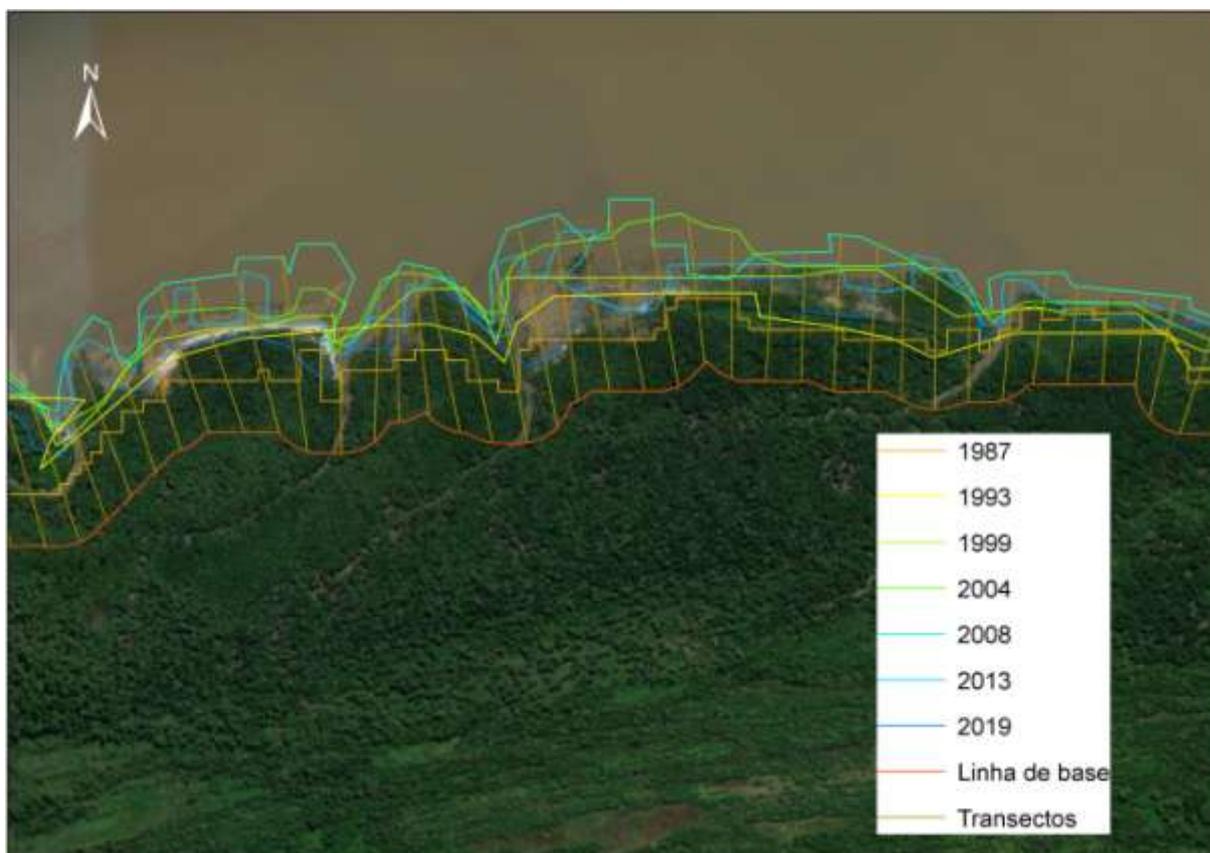


Figura 28 - Recorte do posicionamento dos transectos obtidos com o DSAS e linhas de costa vetorizadas para cada ano de análise. Fonte: Autora.

Na margem leste do estuário do rio Pará com 117 km de extensão foram gerados 1130 transectos, tendo como linha de base a parte terrestre com relação à LC mais antiga e os transectos alinhados a cada 100m para obter um resultado mais detalhado da área de estudo.

## 7 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação de mestrado esta apresentada da seguinte forma: 1 introdução; 2 Conhecimento Teórico; 3 objetivos; 4 Localização da Área de Estudo; 5 Caracterização da área de estudo e 6 metodologia. Em seguida os resultados foram divididos em artigos para publicação: Artigo 1- Avaliação das tendências da linha de costa no estuário médio do rio Pará entre 1987-2019; Artigo 2 - Processos de erosão e de acreção na foz do estuário inferior do rio Pará dominado por macromaré (Pará, Brasil) e Artigo 3 - Dinâmica das margens (leste e oeste) do estuário inferior do Rio Pará (Amazônia Oriental/Brasil).

Com isso os artigos 1 (estuário médio) e 2 (estuário inferior) expõem os resultados referentes as mudanças costeiras na Margem Leste do Estuário do rio Pará, com o auxílio de

sensoriamento remoto e o artigo 3 busca comparar a dinâmica das margens leste e oeste do estuário do rio Pará a fim de compreender as mudanças ocorridas e a sua relação com a hidrodinâmica.

## REFERÊNCIAS

ALMONACID-CABALLER, J. *et al.* Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. **Marine Geology**, [S. l.], v. 372, p. 79–88, fev. 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025322715300864>. Acesso em: 12 jan. 2022.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 423–434, 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862012000400006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862012000400006&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 10 dez. 2021.

ANTHONY, E. J. Overview of the Monsoon-influenced Ayeyarwady River delta, and delta shoreline mobility in response to changing fluvial sediment supply. **Marine Geology**, [S. l.], p. 14, 2019.

APOSTOLOPOULOS, D.; NIKOLAKOPOULOS, K. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. **European Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 240–265, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2021.1904293>. Acesso em: 11 jan. 2022.

ARAÚJO, I. *et al.* Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 20, n. 1, 2 jan. 2019. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1260>. Acesso em: 3 dez. 2021.

ARAUJO, T. D.; FONSECA, E. L. da. Spatio-temporal analysis of Lençóis Maranhenses between 1984 and 2014 using orbital remote sensing. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 280–295, 2016. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1984-2295.20160019>. Acesso em: 29 nov. 2021.

BAÍA, L. B.; RANIERI, L. A.; ROSÁRIO, R. P. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia oriental. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 231–244, 2021.

BARBOSA, E. J. S. **Unidades de relevo em zona costeira estuarina: municípios de Colares e Santo Antonio do Tauá (PA)**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

BARBOSA, E. J. S.; FRANÇA, C. F. D. Compartimentação morfológica dos municípios costeiros de Colares e Santo Antônio do Tauá, Pará. **Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Goiânia, n. VI, p. 11, 2006.

BARROS, D. **Experiências em rios e mangues: lugar, paisagem, e percepção ambiental dos usuários da Reserva Extrativista Marinha de Mocajuba (PA)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

BATISTA, E.; SOUZA FILHO, P. W.; SILVEIRA, O. F. Monitoramento da linha de costa do Parque Nacional do Cabo Orange através da análise multi-temporal de imagens de sensores remotos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, n. XIII, p. 6621–6628, 2007.

BRAGA, C. A. O. **Análise das variações da linha de costa na Ilha de Mosqueiro - PA ao longo de 17 anos**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de risco e desastre na Amazônia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

BRAGA, T. G. M. *et al.* Caracterização e análise dos fragmentos florestais e uso do solo no município de Colares, nordeste do Pará, Brasil Characterization and analysis of forest fragments and land use in the municipality of Colares, northeastern Pará, Brazil. [*S. l.*], v. 13, n. 3, p. 26, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Projeto Orla: fundamentos para gestão integrada**. 2002. 78 f. Brasília, 2002.

BROOKS, S.; POLLARD, J.; SPENCER, T. Contemporary challenges for Shoreline Change Analysis. ADS Bibcode: 2020EGUGA..22.8153B, , p. 8153, 1 maio 2020b. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.8153B>. Acesso em: 5 jun. 2020.

CAI, W. *et al.* Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, [*S. l.*], v. 1, n. 4, p. 215–231, abr. 2020. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s43017-020-0040-3>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CANESTRELLI, A.; LANZONI, S.; FAGHERAZZI, S. One-dimensional numerical modeling of the long-term morphodynamic evolution of a tidally-dominated estuary: The Lower Fly River (Papua New Guinea). **Sedimentary Geology**, [*S. l.*], v. 301, p. 107–119, mar. 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0037073813001334>. Acesso em: 8 fev. 2022.

CARNEIRO, A. G.; PRESTES, Y. O.; ROLLNIC, M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. **Ocean and Coastal Research**, [*S. l.*], v. 68, 2020. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2675-28242020000100206&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2675-28242020000100206&tlng=en). Acesso em: 29 nov. 2021.

CARVALHO, M. Â. V. de; OYAMA, M. D. Variabilidade da largura e intensidade da Zona de Convergência Intertropical atlântica: aspectos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [*S. l.*], v. 28, n. 3, p. 305–316, set. 2013. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862013000300007&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862013000300007&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 18 dez. 2021.

CASSIANO, G. F.; SIEGLE, E. Migração lateral da desembocadura do Rio Itapocú, SC, Brasil: evolução morfológica e condicionantes físicas. **Revista Brasileira de Geofísica**, [*S. l.*], v. 28, n. 4, p. 537–549, dez. 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2010000400001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2010000400001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 11 jan. 2022.

CPTEC/INPE. Centro De Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niña. 2021. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

CONTI, Luis Americo. Coastline changes near the “Maranhão - Ponta da Madeira” Port Complex, Brazil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 71–84, jul. 2019. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/rgci-n175.html>. Acesso em: 29 nov. 2021.

CONTI, Luis Américo; RODRIGUES, M. Variação da Linha de Costa na Região da Ilha dos Guarás – PA Através de Análise de Série Temporal de Imagens de Satélites. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], , p. 922–937, 2011.

CORRÊA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 109–118, 2005. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19551>. Acesso em: 29 nov. 2020.

COSTA, G. R. de S.; ANDRADE, M. M. N. de. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra em Santo Antônio do Tauá/Pará. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, [S. l.], v. 13, n. 37, seq. DELOS: Desarrollo Local Sostenible, p. 18, 2020. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7794703>. Acesso em: 20 jan. 2022.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará : Sistema de Informações Geográficas – SIG : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará**. 2008. Belém, 2008.

DAS, S. Does mangrove plantation reduce coastal erosion? Assessment from the west coast of India. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 58, 10 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01637-2>. Acesso em: 3 jan. 2022.

DIN HASHMI, S. G. M.; AHMAD, S. R. GIS-Based Analysis and Modeling of Coastline Erosion and Accretion along the Coast of Sindh Pakistan. **Journal of Coastal Zone Management**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.omicsonline.org/open-access/gisbased-analysis-and-modeling-of-coastline-erosion-and-accretion-along-the-coast-of-sindh-pakistan-2473-3350-1000455-99392.html>. Acesso em: 12 jan. 2022.

DIONNE, J. C. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. **Zeitschrift für Geomorphologie**, [S. l.], v. 7, p. 36–44, 1963.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 6 jan. 2022.

DOS SANTOS, J. S. *et al.* Climatologia da Amazônia Oriental: Uso de prognósticos climáticos como ferramenta de prevenção de ameaças naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1853–1871, 6 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/view/238440>. Acesso em: 28 nov. 2021.

DRAGAUD, I. C. D. V. *et al.* Modelagem Atmosférica. **Projeto Costa Norte – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 2, p. 322–356.

ELLIOTT, M.; MCLUSKY, D. S. The Need for Definitions in Understanding Estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S. l.], v. 55, n. 6, p. 815–827, 2002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771402910310>. Acesso em: 29 nov. 2021.

EL-ROBRINI, M. *et al.* Panorama da erosão costeira, Maranhão, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018b. p. 167–240.

EL-ROBRINI, M. *et al.* Panorama da erosão costeira, Pará, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018a. p. 65–166.

FERNANDEZ, G. B.; MUEHE, D. Algumas considerações sobre o efeito do fenômeno El Niño sobre feições costeiras ao longo da costa brasileira. **GEOgraphia**, [S. l.], v. 8, n. 15, 2006. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/geographia/article/view/13513>. Acesso em: 19 dez. 2021.

FLEMMING, B. W. Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. **Treatise on Estuarine and Coastal Science**. [S. l.]: Elsevier, 2011. p. 7–38. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747112003028>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C. *et al.* Erosão da orla costeira grande-bispo, ilha de Mosqueiro, Belém - PA, através da análise de indicadores. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [S. l.], v. 24, p. 20, 9 jul. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/33940>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C. **Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó (PA)**. 2003. 144 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

FRANÇA, C. F. D.; SOUZA FILHO, P. W. M. E. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagens Landsat. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 127–136, 1 jun. 2003b. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9877/9166>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C.; PIMENTEL, M. Diversidade paisagística das margens oeste e leste da baía de Marajó, Pará, norte do Brasil. **REVISTA GEONORTE**, [S. l.], v. 3, n. 4, p. 900–910, 2012.

GARDEL, A. *et al.* Fluvial sand, Amazon mud, and sediment accommodation in the tropical Maroni River estuary: Controls on the transition from estuary to delta and chenier plain. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], v. 41, p. 101548, jan. 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352485520306769>. Acesso em: 5 jan. 2022.

GOMES, É. R.; ARAÚJO, I. R. G. de. Análise multitemporal da linha de costa da praia de Macapá no litoral do Piauí a partir de imagens Landsat / Multitemporal analysis of the coastline of Macapá beach on the coast of Piauí from Landsat images. **Caderno de Geografia**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 189, 23 nov. 2017. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27nesp1p189>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HIMMELSTOSS, E. A. *et al.* **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. U.S. Geological Survey Open-File Report, n. 1179. [S. l.: s. n.], 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. 2022. **idades e estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/colares.html>. Acesso em: 13 fev. 2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2012. Rio de Janeiro, 2012b. Disponível em: <https://www.terrabilis.org.br/ecotecadigital/pdf/manual-tecnico-da-vegetacao-brasileira.pdf>. Acesso em: 25 out. 2021.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Atlas dos Manguezais do Brasil**. 2018. 176 f. Brasília, 2018.

ICMBIO, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Estudo socioambiental referente à proposta de criação de reserva extrativista marinha no município de São Caetano de Odivelas, estado do Pará. [S. l.], , p. 102, 2014. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/o-que-fazemos/consultas\\_publicas/Estudo\\_Socioambiental\\_Cria%C3%A7%C3%A3o\\_de\\_Resex\\_e\\_m\\_S%C3%A3o\\_Caetano\\_de\\_Odivelas\\_PA\\_2.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/o-que-fazemos/consultas_publicas/Estudo_Socioambiental_Cria%C3%A7%C3%A3o_de_Resex_e_m_S%C3%A3o_Caetano_de_Odivelas_PA_2.pdf). Acesso em: 14 jul. 2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Normais climatológicas do Brasil (1981-2010). 2021b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 18 dez. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Tempo: Gráficos anuais. 2021a. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/GraficosAnuais/A201>. Acesso em: 22 jun. 2020.

KABIR, Md. A. *et al.* Assessing the shoreline dynamics of Hatiya Island of Meghna estuary in Bangladesh using multiband satellite imageries and hydro-meteorological data. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], v. 35, p. 101167, mar. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352485518304109>. Acesso em: 12 jan. 2022.

KAYANO, M. T. *et al.* El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise: Edição Comemorativa de 30 anos do Climanalise**, [S. l.], , p. 7, 2016. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/Kayanoetal.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2021.

LEMKE, N. *et al.* Morfodinâmica da foz do Arroio Carahá em laguna costeira micromaré (Lagoa dos Patos, sul do Brasil). **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 48, n. 3, 30 set. 2021. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/111039>. Acesso em: 11 jan. 2022.

LEMO, A. L.; SOPCHAKI, C. Contribuição da ferramenta digital shoreline analysis system nos estudos de dinâmica costeira no estado do Ceará, Brasil. **Revista Equador**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 61–81, 2020.

LIMA, M. W. *et al.* Análise temporal da composição granulométrica de um estuário amazônico, Pará, Brasil. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 11, n. 01, p. 11, 2015.

LIMA, R. R.; TOURINHO, M. M.; COSTA, J. P. C. da. **Várzeas Flúvio-marinhas da Amazônia brasileira; características e possibilidades agropecuárias**. Belém: FCAP. Serviço de Documentação e informação, 2001.

MAPBIOMAS. Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil - Coleção 6. 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/destaques-1>. Acesso em: 22 dez. 2021.

MARTINS, L. R.; TABAJARA, L. L.; FERREIRA, E. R. Linha de Costa: problemas e estudos. **GRAVEL** [S. l.], v 2, p. 17, 2004.

MATOS, A. P. de; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa fluvial e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 38, p. 21, 20 jul. 2016. Disponível em: <http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/19814>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MATOS, M. D. F. A. de *et al.* Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 23, n. 1, 13 jan. 2022. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1953>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MEDEIROS, R. *et al.* Contribuição das unidades de conservação brasileiras para a economia nacional: Sumário Executivo. **UNEP-WCMC**, Brasília, , p. 44, 2011.

MENEZES, M. O. B. *et al.* Estuarine processes in macro-tides of Amazon estuaries: A Study of Hydrodynamics and Hydrometeorology in the Marajó Bay (Pará-Brazil). **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 165, p. 1176–1181, 3 jan. 2013. Disponível em: <http://www.bioone.org/doi/10.2112/SI65-199.1>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MISHRA, M. *et al.* Response of long- to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 11, p. 338, jun. 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-019-8336-7>. Acesso em: 12 jan. 2022.

MISHRA, M. *et al.* The development and research trend of using dsas tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 69–77, 7 jun. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/juee/article/view/53166>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MOLINAS, E. *et al.* Structure and position of the bottom salinity front in the Amazon Estuary. **Ocean Dynamics**, [S. l.], v. 64, n. 11, p. 1583–1599, nov. 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10236-014-0763-0>. Acesso em: 18 dez. 2021.

MOREIRA, S. de F. *et al.* A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, [S. l.], v. 1, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://malque.pub/ojs/index.php/mr/article/view/78>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MOURA, A. G. A. F. *et al.* Geoprocessamento: Utilização da técnica de classificação supervisionada para cálculo de remanescente florestal / Geoprocessing: Use of the supervised classification technique for calculating forest remnants. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 51722–51737, 7 jun. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30283>. Acesso em: 20 jan. 2022.

MOURA, M. M. *et al.* Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total**

**Environment**, [S. l.], v. 651, p. 1639–1651, fev. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718336866>. Acesso em: 18 dez. 2021.

MUEHE, D.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praial. **Quaternary and Environmental Geosciences**, [S. l.], v. 5, n. 2, 31 dez. 2014. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/35884>. Acesso em: 3 dez. 2021.

MUSKANANFOLA, M. R. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], , p. 9, 2020.

NEUMANN, B. *et al.* Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. **PLOS ONE**, [S. l.], v. 10, n. 3, 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0118571>. Acesso em: 3 dez. 2021.

NEVES, S. C. R.; FRANÇA, C. F. de; SILVA, R. R. P. e. Morfologia e dinâmica da orla costeira do Maraú, ilha de Mosqueiro, Belém, Pará. **Geosul**, [S. l.], v. 34, n. 73, p. 107–125, 6 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/1982-5153.2019v34n73p107>. Acesso em: 29 nov. 2021.

OLABARRIETA, M. *et al.* Effects of Density-Driven Flows on the Long-Term Morphodynamic Evolution of Funnel-Shaped Estuaries. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, [S. l.], v. 123, n. 11, p. 2901–2924, nov. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2017JF004527>. Acesso em: 8 fev. 2022.

ONU. Organizações das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 3 maio 2020.

PARÁ. Secretaria de estado do meio ambiente e sustentabilidade (SEMA/PA). **Gerenciamento costeiro no estado do Pará: orientações para o ordenamento ambiental**. 2020. 30 f. Belém, 2020.

PAULA, J. E. de A. *et al.* Panorama da erosão costeira, Piauí, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 241–260.

PERILLO, G. M. E. Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. **Developments in Sedimentology**. [S. l.]: Elsevier, 1995. v. 53, p. 17–47. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0070457105800226>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PICANÇO, S. M. **Formas de relevo e dinâmica costeira em São Caetano de Odivelas (PA)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

PRESTES, Y. O. *et al.* A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 28, abr. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581819301004>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PRESTES, Y. O. *et al.* The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. **Tropical Oceanography**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 26–37, 7 maio 2017. Disponível em:

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/TROPICALOCEANOGRAPHY/article/view/15198>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PRITCHARD, D. W. What is an Estuary: Physical View Point. **Estuaries**. Washington, American Association for Advance of Science, [S. l.], , p. 3–5, 1967.

QUADRADO, G. P. Historical and geological assessment of shoreline changes at an urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], , p. 19, 2021.

RABELO, F. D. B.; SILVA, E. V. da; GORAYEB, A. Geotecnologias na análise da dinâmica costeira do estuário do Rio Caeté – Pará I (Edição 530). **Papers do NAEA**, [S. l.], v. 30, n. 1, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/pnaea/article/view/11592>. Acesso em: 3 jan. 2022.

RAMOS, C. C.; RANIERI, L. A. Morfologia e Sedimentação de uma Praia Estuarina Amazônica (Marahú/PA) Durante Amplitudes de Marés Distintas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 2916–2930, 30 set. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245181>. Acesso em: 21 jan. 2022.

RANIERI, L. A.; EL-ROBRINI, M. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 207–226, 27 fev. 2015. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/78121>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RIBEIRO, E. dos S. *et al.* Fitofisionomia da cobertura vegetal na ilha de Colares no Nordeste Paraense. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 14, p. e12101421178, 23 out. 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21178>. Acesso em: 23 jan. 2022.

RIBEIRO, S.; VALADÃO, R. Efeitos marinho e fluvial na dinâmica dos ambientes inundáveis do Estuário Superior do Rio Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 22, n. 4, 15 set. 2021. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/2017>. Acesso em: 3 dez. 2021.

RIZZO, A.; ANFUSO, G. Coastal Dynamic and Evolution: Case Studies from Different Sites around the World. **Water**, [S. l.], v. 12, n. 10, p. 2829, 12 out. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2829>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RODRIGUES, S.; SOUZA FILHO, P. W. M. Análise da variação da linha de costa a noroeste do Estado do Pará (Baía de Curuçá) através das imagens Landsat TM e ETM+ e CBERS 2B. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, n. XV, p. 5061, 2011.

RODRIGUES, T. *et al.* Caracterização e classificação de solos do município e Santo Antônio do Tauá, Estado do Pará. **Embrapa Amazônia Oriental**, Belém, n. Documentos 181, p. 49, 2004.

ROLLNIC, M. *et al.* Áreas de estudo. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 1, p. 26–45.

ROSA, M. B.; SILVA, L. T. Alguns Aspectos Climatológicos da ZCIT sobre o Atlântico. **Climanálise Edição Comemorativa de 30 anos**, São Paulo, , p. 6, 2016.

ROSÁRIO, R. P. **Análise de processos oceanográficos no estuário do rio Pará**. 2016. 139 f. Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

ROSÁRIO, R. P. *et al.* Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 75 (10075), p. 128–132, 1 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/SI75-026.1>. Acesso em: 24 dez. 2021.

SANTOS, C. *et al.* Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 769, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720384229>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SANTOS, E. C.; BONETTI, J. Análise da taxa de variação da linha de costa da Enseada de Tijucas (SC) em diferentes escalas temporais como indicadora de suscetibilidade costeira. **Quaternary and Environmental Geosciences**, [S. l.], v. 9, n. 2, 13 ago. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/53650>. Acesso em: 12 jan. 2022.

SANTOS, V. **Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto**. 2006. 306 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

SILVA, J. *et al.* Geomorphologic Classification of Estuaries of the State of Pernambuco (Brazil) Based on Landsat 5 TM Images. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 4, n. 1, p. 118–133, 2011. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1984-2295.20110001>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SILVA, M. V.; SANTOS, V.; SILVEIRA, O. M. Análise Multitemporal de Mudanças nas Ilhas Costeiras do Estado do Amapá Aplicando Dados de Sensores Remotos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, n. XV, p. 8614, 2011.

SOUZA, C. R. G. *et al.* Praias arenosas e erosão costeira. **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, Editora, 2005. p. 114–129.

SOUZA FILHO, P. W. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. **Revista Brasileira de Geofísica**, [S. l.], v. 23, p. 427–435, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbg/a/548fTgMXRHTmSTYBXNhfxbc/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H.; LARA, R. Estratégias y medidas de protección contra desastres naturales en la zona costera de la región Amazónica, Brasil. **Terra Livre**, Goiânia, v. 1, n. 26, p. 109–125, 2006.

TEIXEIRA, S. G.; NASCIMENTO BANDEIRA, Í. C.; DANTAS, M. E. Shoreline Variation and Identification of Local Erosion Ge indicators on the Brazilian Amazon Coast. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 37, n. 6, 17 ago. 2021. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-37/issue-6/JCOASTRES-D-20-00164.1/Shoreline-Variation-and-Identification-of-Local-Erosion-Ge indicators-on-the/10.2112/JCOASTRES-D-20-00164.1.full>. Acesso em: 31 dez. 2021.

TORRES, A. M.; EL-ROBRINI, M.; COSTA, W. J. P. Panorama da erosão costeira, Amapá, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018. p. 19–64.

TOURE, S. *et al.* Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 75, 5 fev. 2019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2220-9964/8/2/75>. Acesso em: 2 dez. 2021.

UNESCO. United Nations Education, Scientific and Cultural Organization. **Summary Report of the Regional Planning Workshop for the South Atlantic**. 2019. 2019. Disponível em: [https://oceandecade.org/assets/uploads/documents/FINAL-Summary-Report-of-the-SA-Regional-Planning-Workshop-20abr2020-CAM-FASN\\_1587381909.pdf](https://oceandecade.org/assets/uploads/documents/FINAL-Summary-Report-of-the-SA-Regional-Planning-Workshop-20abr2020-CAM-FASN_1587381909.pdf). Acesso em: 30 out. 2020.

VALE, J. R. B. *et al.* Análise espacial das unidades de paisagem da reserva extrativista marinha Mocapajuba, zona costeira do nordeste paraense. **Revista Cerrados**, [S. l.], v. 16, n. 02, p. 153–173, 9 mar. 2018. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/1259>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VALLE-LEVINSON, A. Classification of Estuarine Circulation. **Treatise on Estuarine and Coastal Science**. [S. l.]: Elsevier, 2011. p. 75–86. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747112001066>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VASCONCELOS, A. O. *et al.* Caracterização do Uso e Cobertura do Solo e da Linha de Costa. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 2, p. 911–1029.

VIANA, D. *et al.* **Ciências do mar : dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil**. 1. ed. Olinda: Via Design Publicações, 2021. v. 1, . Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br.secirm/files/publicacoes/ppgmar/CienciasdoMarVol1.pdf>.

WANG, C. *et al.* Deriving Natural Coastlines Using Multiple Satellite Remote Sensing Images. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 102, n. sp1, p. 296–302, 14 dez. 2020. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-102/issue-sp1/SI102-036.1/Deriving-Natural-Coastlines-Using-Multiple-Satellite-Remote-Sensing-Images/10.2112/SI102-036.1.full>. Acesso em: 2 dez. 2021.

WRIGHT, L. D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. **Geological Society of America Bulletin**, [S. l.], v. 88, n. 6, p. 857, 1977. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/88/6/857-868/202170>. Acesso em: 8 fev. 2022.

## ARTIGO 1

### TENDÊNCIAS DA LINHA DE COSTA NA MARGEM LESTE DO ESTUÁRIO MÉDIO DO RIO PARÁ ENTRE 1987-2019

O primeiro artigo científico desta dissertação será submetido para a revista *Mercator*

#### RESUMO

O estuário médio do rio Pará está sob forte influência da descarga fluvial sazonal ( $20.946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), macromaré (altura de 4,7m), correntes de maré ( $2 \text{ m s}^{-1}$ ) e alta intrusão salina no período de baixa vazão do estuário (110km). Na margem leste do estuário médio do rio Pará, a linha de costa (LC) das ilhas de Mosqueiro e de Colares e do município de Santo Antônio do Tauá é influenciada pelas forçantes hidrodinâmicas. Este artigo objetiva analisar a variação multitemporal (1987 a 2019) da LC, através da aquisição de imagens de satélite LANDSAT do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), com o auxílio do Digital Shoreline Analysis System (DSAS), para calcular com maior precisão as taxas de mudanças da LC. Foram aplicados os parâmetros NSM (*Net Shoreline Envelope*), LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) e EPR (*End Point Rate*). No estuário médio a tendência à erosão foi maior, predominando na Ilha de Mosqueiro com taxa média de erosão de -38m e taxa média de acreção de 22,97m, relacionados às taxas médias de variação de -0,58m/ano (EPR) e -0,54m/ano (LRR) e em Santo Antônio do Tauá com parâmetros LRR e EPR identificando taxas médias de variação de -1,67m/ano (LRR) e -1,55m/ano (EPR). Apenas na ilha de Colares houve tendência a acreção, com taxa média de erosão de -96,29m e taxa média de acreção de 116,49m, onde a taxa máxima de acreção e de erosão, são de 405,61m e -396,87m, respectivamente.

**Palavras-chave:** Amazônia oriental, dinâmica costeira, ambiente estuarino, sensoriamento remoto

#### ABSTRACT

The medium estuary of the Pará River is under strong seasonal fluvial influence, with fluvial discharge ( $20,946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), macrotidal (4.7m), tidal currents ( $2 \text{ m s}^{-1}$ ) and a high saline intrusion in the low period estuary flow (110km). On the east margin of the middle estuary of the Pará River are the islands of Mosqueiro and Colares and the municipality of Santo Antônio do Tauá, being directly influenced by hydrodynamic forcing. This article aims to analyze the multitemporal (1987 to 2019) variation of the coastline, through the acquisition of LANDSAT satellite images from the United States Geological Survey (USGS), with the aid of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), to more accurately calculate coastline rates of change. The parameters NSM (*Net Shoreline Envelope*), LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) and EPR (*End Point Rate*) were applied. In the middle estuary the tendency to erosion was higher, predominating in Mosqueiro Island with an average erosion rate of -38m and an average accretion rate of 22.97m, related to the average rates of variation of -0.58m/year (EPR) and -0.54m/year (LRR) and in Santo Antônio do Tauá with LRR and EPR parameters identifying average rates of change of -1.67m/year (LRR) and -1.55m/year (EPR). Only on the Colares island there was a tendency to accretion, with an average erosion rate of -96.29m and an average accretion rate of 116.49m, where the maximum accretion and erosion rates are 405.61m and -396.87m, respectively.

**Keywords:** eastern amazon, coastal dynamics, estuarine environment, remote sensing

## INTRODUÇÃO

Os estuários são definidos comumente como o curso inferior de um rio, onde os processos fluviais e marinhos interagem. São ambientes de transição dinâmicos, influenciados pelos parâmetros hidrológicos (descarga fluvial, salinidade) e hidrodinâmicos (marés e correntes) que interagem e são os grandes responsáveis por moldarem o tipo e a forma desse ambiente (Elliott e Mclusky, 2002; Flemming, 2011; Lima *et al.*, 2015; Valle-Levinson, 2011).

Os estuários podem ser subdivididos em três setores: estuário inferior, estuário médio e estuário superior (Perillo, 1995). O estuário médio onde é uma zona de mistura de água salina com a água doce, dominados por sedimentos lamacentos (mistura de lama e areia), com deposição preferencial da lama resultado de floculação, coagulação e agregação de matéria em suspensão (Flemming, 2011).

O Estuário do Rio Pará, se comunica com o rio Amazonas, através da Região dos Estreitos, e recebe ainda contribuições fluviais dos rios Tocantins e Guamá/Guajará. Os estuários amazônicos têm sua dinâmica influenciada por condições aerodinâmicas (chuvas, ventos) hidrodinâmicas (correntes, macromaré, ondas). O estuário médio do Rio Pará é dominado pelo regime de meso e macromaré, onde a mesomaré predomina pouco antes da transição com o estuário superior e a macromaré nas proximidades do estuário inferior, onde a altura da maré de sizígia é de 5,7 m (Ribeiro e Valadão, 2021).

A descarga fluvial é um dos principais fatores determinantes da salinidade, o estuário definido como tipo bem misturado com regime salino variando entre limnético e mesohalino. Durante a baixa descarga a intrusão salina é maior, ocorrendo o contrário na alta descarga onde a intrusão salina será menor. Outro fator que influencia na salinidade é a precipitação, onde na estação chuvosa o estuário médio recebe maior quantidade de água doce e na estação seca a água permanece mais salgada (Menezes *et al.* 2013; Ribeiro e Valadão, 2021; Rosário *et al.* 2016).

As margens dos estuários sofrem transformações temporais de curto, médio e longo período relacionadas aos fatores geológicos, climáticos, oceanográficos, e antrópicos que ocorrem na linha de costa (LC) (França e Souza Filho, 2003). A interpretação mais utilizada da LC é como a interseção entre a água e a terra, sendo que sua delimitação pode ser feita pelos limites geomorfológicos, de vegetação, de nível de maré, de contorno da praia ou outra delimitação, dependendo da área de estudo (Martins *et al.* 2004; Toure *et al.* 2019; Vasconcelos *et al.* 2020).

Uma das técnicas que auxiliam na detecção das mudanças na LC é o sensoriamento remoto que possibilita a extração manual ou semi-automática da LC a partir do processamento digital de imagens de satélite com alta qualidade, custo-benefício e redução do erro manual (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020). Para auxiliar e tornar essa análise mais precisa foi criado o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) uma extensão de software disponível que é compatível com o software Esri Geographic Information System (ArcGIS), que gera cálculos estatísticos de taxas de mudanças para uma série temporal de dados vetoriais da linha costeira (Himmelstoss *et al.* 2018; Mishra *et al.* 2020; Toure *et al.* 2019).

No Pará, alguns trabalhos foram realizados na zona costeira paraense com o auxílio do sensoriamento remoto e o DSAS, e foram realizados principalmente no setor estuarino (Baía *et al.* 2021; Conti e Rodrigues, 2011; Neves *et al.* 2019; Rodrigues e Souza Filho, 2011) e no setor da Costa Atlântica Paraense. (Rabelo e Silva; Gorayeb, 2021; Ranieri e El-Robrini, 2015).

A detecção de áreas de erosão e/ou de acreção da LC se torna interessante para observar as mudanças nos entornos das ilhas e municípios da margem leste do estuário médio do rio Pará. A compreensão do comportamento da LC e das forças que contribuem para o processo de erosão é fundamental para gestão da zona costeira, no sentido de auxiliar na busca de soluções adaptativas e mitigadoras (Matos *et al.* 2022).

Este artigo objetiva a análise multitemporal (1987-2019) da margem Leste (ilhas de Mosqueiro e Colares e município de Santo Antônio do Tauá) do Estuário Médio do Pará e quantificar as áreas de erosão e/ou acreção.

### **Localização da área de estudo**

A área de trabalho situa-se à margem leste do Estuário do Rio Pará, no trecho: ilha de Mosqueiro, município de Santo Antônio do Tauá e ilha de Colares que são banhados pelo estuário médio (Figura 1). O acesso a essas localidades partindo da capital Belém pode ser feito por via rodoviária e fluvial.



Figura 1 - Localização da Margem Leste (Ilhas de Mosqueiro e Colares, município de Santo Antônio do Tauá) do Estuário médio do Rio Pará. Elaboração: autora

### Caracterização da área de estudo

A ilha de Mosqueiro localiza-se na parte norte do município de Belém, com área de 212 km<sup>2</sup> e conta com 27 mil habitantes, é a que apresenta a área mais urbanizada na LC da área de estudo. O acesso à ilha pode ser feito pela BR-316, PA-391 e a Ponte Sebastião Raimundo de Oliveira, sobre o Furo das Marinhas, integrando a Ilha de Mosqueiro com os municípios da Região Metropolitana de Belém (IBGE, 2022).

A localização de Santo Antônio do Tauá é mais abrigada, comparada às duas ilhas. Não há população na parte às margens do Estuário do Rio Pará, e é ocupada por manguezal. A sede municipal se localiza mais na parte interna com área de 537,618 km<sup>2</sup> e 26.674 habitantes (IBGE, 2022). Para chegar à Ilha de Colares partindo de Belém, se acessa a BR-316 e entrar na PA-140, passando por Santo Antônio de Tauá e em seguida na PA-241 até chegar à ilha de Colares. São 101.6 km e uma média de 1h e 35m de viagem. A ilha de Colares ocupa uma área de 384,068 km<sup>2</sup>, com 11.381 habitantes (IBGE, 2022).

O clima é caracterizado como equatorial úmido com temperatura média anual entre 25°C e 27°C, e precipitação entre 2.000 e 3.000 mm/ano, sendo este diretamente influenciada

pela migração sazonal da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) na direção meridional. Apresenta uma estação chuvosa entre os meses de dezembro e maio e uma estação seca entre junho e novembro (INMET, 2021).

A área de estudo foi influenciada pelos eventos extremos durante os anos de 1987, 1993, 2004 e 2019 (El Niño - EN) e 1999 e 2008 (La Niña - LN), a mudança na temperatura de superfície do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais nos padrões de ventos, nebulosidade, temperatura e precipitação (Cai *et al.* 2020; CPTEC/INPE, 2021; Moura *et al.* 2019). Estudos sobre a influência do EN e LN na bacia amazônica indicaram que os maiores impactos desses fenômenos estão relacionados às mudanças no regime pluviométrico e fluviométrico.

Durante a ocorrência de um EN moderado, a precipitação tende a ser menor que a normal e durante a ocorrência de um evento LN moderado, a precipitação tende a ser maior que a normal. Essas mudanças na precipitação irão influenciar na descarga dos rios (refletindo nos processos hidrodinâmicos de transporte e deposição da região), na cobertura da vegetação, nas atividades econômicas e principalmente no clima da região. (Moreira *et al.* 2018; Moura *et al.* 2019).

A área de estudo é sustentada pelos Sedimentos da Formação Barreiras e do Pós-Barreiras onde acima destes ocorrem os Depósitos Aluvionares e Depósitos litorâneos (El-Robrini *et al.* 2018b; Rollnic *et al.* 2020). Os sedimentos da Formação Barreiras são compostos por depósitos siliciclásticos variados e não fossilíferos (conglomerados, arenitos e argilosos) e suas camadas exibem estratificações laminadas ou maciças, com predomínio de arenitos finos a siltitos (5 a 10 m de espessura) e ocorrem na parte central da ilha de Mosqueiro e no interior do município de São Caetano de Odivelas (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018a; Picanço, 2013).

Os sedimentos do Pós-Barreiras são encontrados na maior parte da área de estudo, e repousam sobre a Formação Barreiras (discordância erosiva), e são constituídos por sedimentos areno-argilosos (Pleistocênio). Estes incorporam pelo menos dois diferentes episódios de sedimentação referenciados informalmente de sedimentos Pós-Barreiras I e II, sendo o primeiro, com até 10 m de espessura e o segundo, com 2 a 5m de espessura (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018a; Picanço, 2013; Ribeiro e Valadão, 2021).

Os Depósitos Aluvionares ocorrem apenas a sudeste da ilha de Mosqueiro, no Furo das Marinhas, e são constituídos por sedimentos argilosos e arenosos inconsolidados, relacionados às planícies aluvionares atuais dos principais cursos d'água, que constituem

depósitos de canais (barras em pontal e barras de canais) e de planícies de inundação (CPRM, 2008; El-Robrini *et al.* 2018a).

Por fim, os Depósitos Litorâneos de praias, dunas, manguezais e pântanos salinos são encontrados na LC de Vigia e de São Caetano de Odivelas e constituem a planície costeira dos municípios. São constituídos por sedimentos arenosos (praias e dunas) e lamosos (manguezais e pântanos salinos) (CPRM, 2008; El-Robrini *et al.* 2018a).

A morfologia do fundo no trecho próximo a ilha de Colares é bastante irregular com a presença de canais (18m de profundidade), recobertos por areias médias a silte grosso gradando a silte muito fino e até argila. No trecho da ilha de Mosqueiro, nota-se a presença de um canal com -27m de profundidade, recoberto por areias médias a silte grosso. De acordo com Corrêa (2005), os sedimentos da margem leste são depositados por decantação, evidenciando baixa hidrodinâmica.

A descarga líquida do rio Pará é de  $20.946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A alta e baixa descarga fluvial ocorrem respectivamente nas estações chuvosa e seca (Prestes *et al.*, 2020). A maré é semidiurna, com regime de mesomaré, com 3,4m nas proximidades da ilha de Mosqueiro e macromaré, com 4,7 m nas proximidades da ilha de Colares. (DHN, 2022; Ribeiro e Valadão, 2021; Rosário *et al.* 2016). As correntes fluviais são induzidas pelos fluxos de descarga fluvial, onde as correntes de maré são da ordem de  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Prestes *et al.*, 2020).

A salinidade no Estuário do Rio Pará alterna o seu gradiente, considerando três períodos: baixa vazão, transição e alta descarga (Figura 2). A maior intrusão salina ocorre durante o período de baixa vazão cerca de 130 km, no período de transição entre a baixa e alta descarga a intrusão salina ocorre até aproximadamente 110 km e na alta descarga ocorre à intrusão salina em aproximadamente 70 km a partir da foz do estuário (Rosário *et al.* 2016).

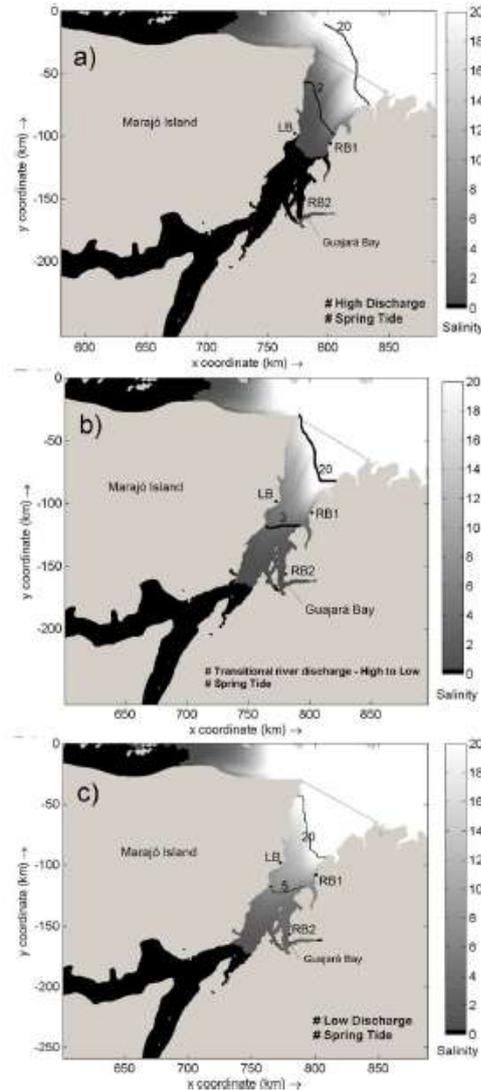


Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do Estuário do Rio Pará é o ponto de referência para distâncias. Fonte: Rosário *et al.* (2016).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Aquisição das imagens de satélite

Para alcançar os resultados foi realizada a aquisição de imagens de satélite Landsat TM (1987; 1993; 1999; 2004; 2008) e Landsat OLI (2013 e 2019) do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS), já adquiridas georreferenciadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Dados das imagens adquiridas. Fonte: Adaptado de imagens Landsat (dados USGS); Instituto Nacional de Meteorologia (2020); Kayano *et al.* (2016) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2021).

| Ano  | Satélite   | Sensor | Órbita/ponto | Resolução espacial | Data adquirida |
|------|------------|--------|--------------|--------------------|----------------|
| 1987 | Landsat -5 | TM     | 223-061      | 30m                | 17/05          |
| 1993 | Landsat -5 | TM     | 223-061      | 30m                | 20/07          |
| 1999 | Landsat -5 | TM     | 223-061      | 30m                | 13/07          |
| 2004 | Landsat -5 | TM     | 223-061      | 30m                | 19/08          |

|             |            |          |         |     |       |
|-------------|------------|----------|---------|-----|-------|
| <b>2008</b> | Landsat -5 | TM       | 223-061 | 30m | 14/08 |
| <b>2013</b> | Landsat-8  | OLI/TIRS | 223-061 | 30m | 27/07 |
| <b>2019</b> | Landsat-8  | OLI/TIRS | 223-061 | 30m | 26/06 |

A escolha das imagens Landsat nessa região possui algumas limitações, pois na estação chuvosa a cobertura de nuvem na área de estudo pode chegar a 99%, assim a seleção dos anos analisados levou em consideração a menor porcentagem de nuvens. O intervalo temporal é de 4, 5 e 6 anos e foram selecionadas imagens com base na cobertura de nuvens mais baixa, correspondentes aos meses da estação seca onde a porcentagem de nuvens são de 0% a 30%, para melhor visualização da LC. As cenas da órbita/ponto 223-061 recobrem toda a área de estudo.

### Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

Para iniciar o processo de interpretação da mudança na LC foi realizada a vetorização da LC e foram criados shapefiles para a extração da LC a partir das imagens correspondentes (Figura 3), através da interpretação visual das imagens tendo como base o contato da vegetação com a água. Foi criada ainda uma linha de base para todas as imagens que serve de auxílio para análise da variação da LC. Estes procedimentos foram realizados no programa ArcMap 10.5 do software ArcGis.

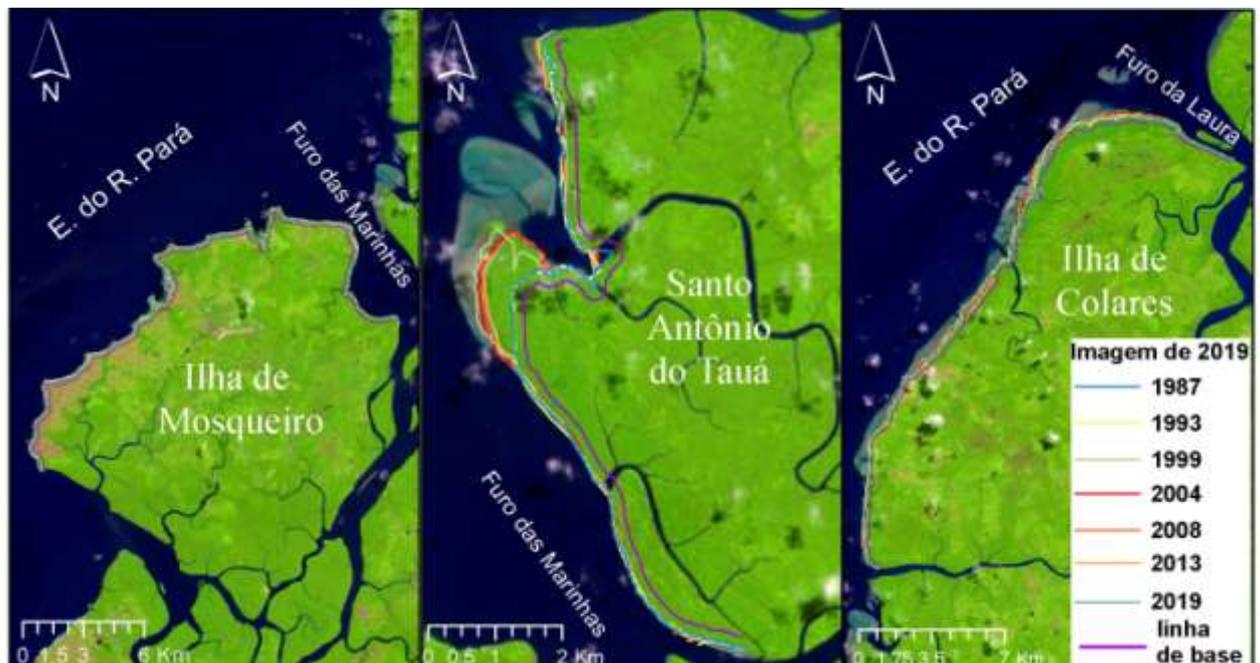


Figura 3 - Disposição das linhas de costa dos anos de análise (1987, 1993, 1999, 2004, 2008, 2013, 2019).  
Elaboração: autora.

Em seguida foi utilizado o Digital Shoreline Analysis System (DSAS), para calcular com maior precisão as taxas de mudanças da LC. Na margem leste do estuário médio do rio Pará foram aplicados os parâmetros NSM (*Net Shoreline Envelope*), LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) e EPR (*End Point Rate*) por se adequarem a análise necessária tendo como linha de base a parte continental e os transectos alinhados a cada 100m.

Os resultados das variações em metros nos 32 anos de análise (NSM) e taxas médias de variação por ano (LRR) se enquadram em valores positivos indicando um deslocamento da linha em direção ao mar ao longo do transecto e valores negativos indicam um deslocamento em direção a terra.

## RESULTADOS

### Tendências da LC da Ilha de Mosqueiro

A borda da ilha de Mosqueiro exposta ao estuário Médio do rio Pará é formada por Terraços Pleistocênicos e Planícies Aluviais, onde ocorrem falésias e restingas. A hidrodinâmica exerce influência direta em toda a parte ocidental da ilha, o que implica na formação e ampla distribuição de praias (Neves *et al.* 2019).

A cobertura da vegetação é composta por mata de terra firme, várzeas e manguezal (MOURA *et al.*, 2021). Por outro lado, a parte ocidental é a mais urbanizada, dotada de melhor infraestrutura e oferta de serviços. (França *et al.* 2020; Neves *et al.* 2019).

Na ilha de Mosqueiro (37 km) dos 350 transectos gerados (2-365) 70% representam erosão e 30% acreção apontando uma tendência maior à erosão, com taxa média de erosão é de -38m e a taxa média de acreção é de 22,97m. As taxas médias de variação de -0,58m/ano (EPR) e -0,54m/ano (LRR) confirmam a tendência à erosão (Tabela 2).

Tabela 2 – Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para a ilha de Mosqueiro. Fonte: Autora.

| <b>Ilha de Mosqueiro</b> |         |             |             |
|--------------------------|---------|-------------|-------------|
|                          | NSM (m) | EPR (m/ano) | LRR (m/ano) |
| Taxa máxima de acreção   | 518,22  | 16,14       | 10,35       |
| Taxa máxima de erosão    | -219,03 | -6,82       | -5,35       |
| Taxa média de acreção    | 22,97   | 0,67        | 0,61        |
| Taxa média de erosão     | -38     | -1,21       | -1,03       |
| Taxa média de variação   | -18,67  | -0,58       | -0,54       |

As taxas máximas de erosão não ultrapassam -6,82 m/ano no EPR e -5,35 m/ano no LRR, enquanto as taxas máximas de acreção chegam a atingir 16,14 m/ano no EPR e -5,35 m/ano no LRR (Figura 4a). Os gráficos mostram taxas de média de erosão e de acreção com alguns picos de alta erosão e acreção (Figura 4b e 4c).

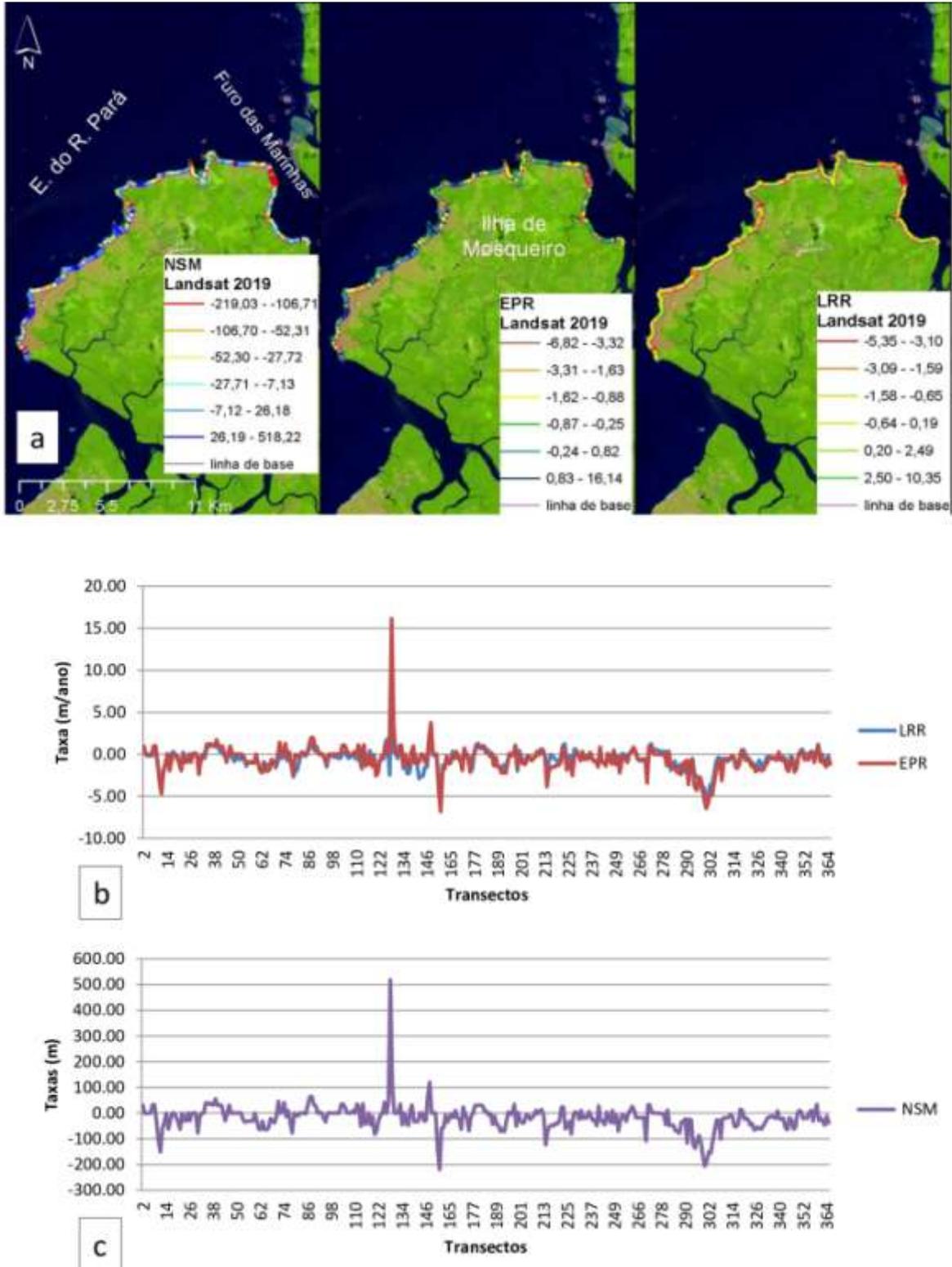


Figura 4 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC da ilha de Mosqueiro. Elaboração: autora.

A ilha de Mosqueiro apresenta quatro diferentes setores. O setor A (Sudoeste da ilha) mostra taxas de variação média entre -0,25 a -1,11 m/ano. A taxa máxima de acreção do NSM encontra-se no setor B (Norooeste da ilha) (transecto 128), com 518,22m e taxas LRR e EPR,

respectivamente de 10,35m/ano e 16,14m/ano. No Setor C (Norte da ilha) a maior taxa de erosão é de -123,62m (transecto 214), com taxa EPR e LRR, respectivamente de -3,85 m/ano e -3,10 m/ano. O Setor D (Nordeste da ilha) taxas de alta erosão (transectos vermelhos) à margem do Furo das Marinhas (transectos 294 ao 304). O transecto 300 aponta a maior taxa de erosão nessa área, com -206,71m (Figura 5).

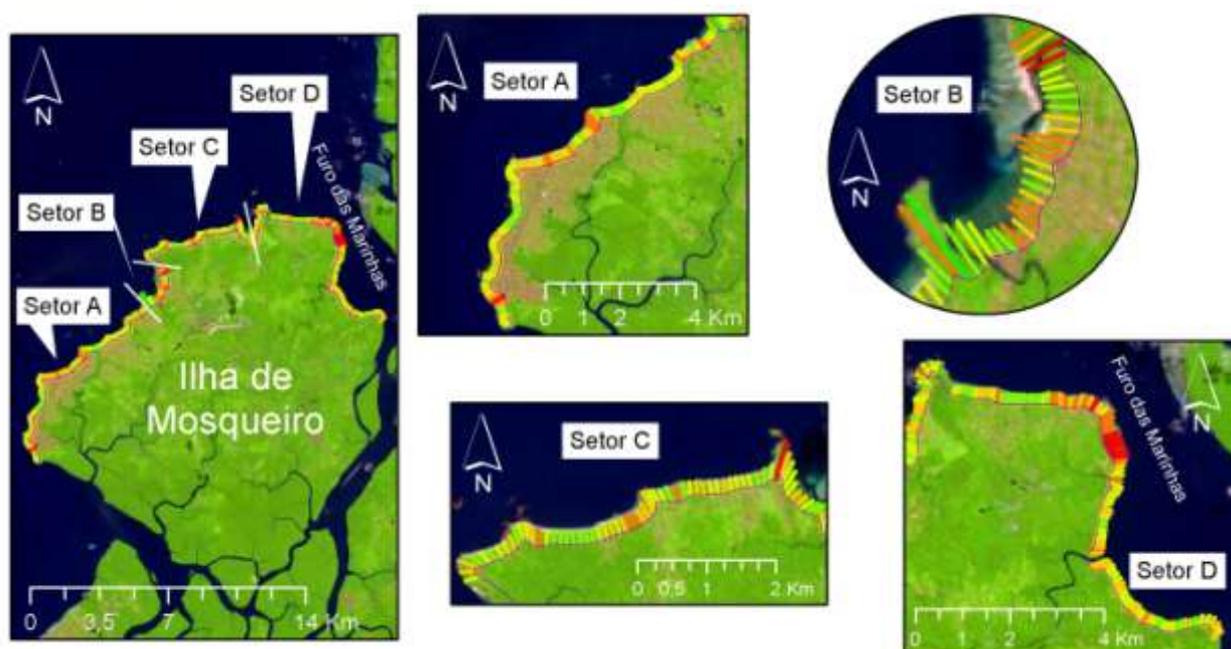


Figura 5 - Setores A, B, C, D da ilha de Mosqueiro. Praias presentes em cada setor: Setor A - Areião, Bispo, Praia Grande, Prainha, Farol, Chapéu Virado, Porto Arthur, Murubira, Ariramba e São Francisco; Setor B – Carananduba; Setor C - Marahú, Caruara, Paraíso; Setor D - Baía do Sol. Elaboração: autora.

### Tendências da LC de Santo Antônio do Tauá

A LC de Santo Antônio do Tauá ocupa uma área mais abrigada na Margem Leste do Estuário do Rio Pará, se comparado às ilhas de Mosqueiro e de Colares. Nesta área, ocorrem planícies aluviais constituídos por cascalhos, areias e argilas inconsolidadas, recobertas por manguezais bem preservados. A LC é recortada por canais de maré de pequeno porte e é delimitado pelo Furo das Marinhas (Sudoeste) e do Furo da Laura (Norte) (Barbosa e França, 2006; Costa e Andrade, 2020; Rodrigues *et al.* 2004).

Neste trecho foram gerados 111 transectos (406-537) nos 13 km de LC. A porcentagem de transectos em acreção é maior (59,46%), porém a erosão apresenta taxa máxima de erosão de -694,23m no Setor A (transecto 480), com taxa média superior a da taxa média de acreção, com -157,09m e 38,41m, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 – Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para Santo Antônio do Tauá. Fonte: Autora.

| <b>Santo Antônio do Tauá</b> |         |             |             |
|------------------------------|---------|-------------|-------------|
|                              | NSM (m) | EPR (m/ano) | LRR (m/ano) |
| Taxa máxima de acreção       | 111,40  | 3,47        | 3,39        |
| Taxa máxima de erosão        | -694,23 | -21,62      | -25,43      |
| Taxa média de acreção        | 38,41   | 1,19        | 1,27        |
| Taxa média de erosão         | -157,09 | -4,89       | -5,98       |
| Taxa média de variação       | -49,65  | -1,55       | -1,67       |

As áreas ao sul e ao norte de Santo Antônio do Tauá apresentam em sua maioria taxas de média e alta acreção (transectos de coloração azul claro e escuro, respectivamente) e algumas áreas pontuais com taxas de média erosão (transectos de coloração amarela), onde ocorre a taxa máxima de acreção de 111,40m (transecto 514), com taxa LRR de 3,26 m/ano e taxa EPR de 3,47m/ano na parte norte (Figura 6a).

A partir dos parâmetros LRR e EPR foram identificadas taxas médias de variação de -1,67m/ano (LRR) e de -1,55m/ano (EPR). As taxas de alta erosão ocorrem na região central da LC do município de Santo Antônio do Tauá devido à forte influência das águas na foz do Furo das Marinhas, as taxas máximas de erosão são de -21,62 m/ano (EPR) e de -25,43 m/ano (LRR), um valor bem acima das taxas máximas de acreção com 3,47m/ano (EPR) e 3,39m/ano (LRR). Entretanto, a taxa média de variação foi de -49,65m (Figura 6b e 6c).

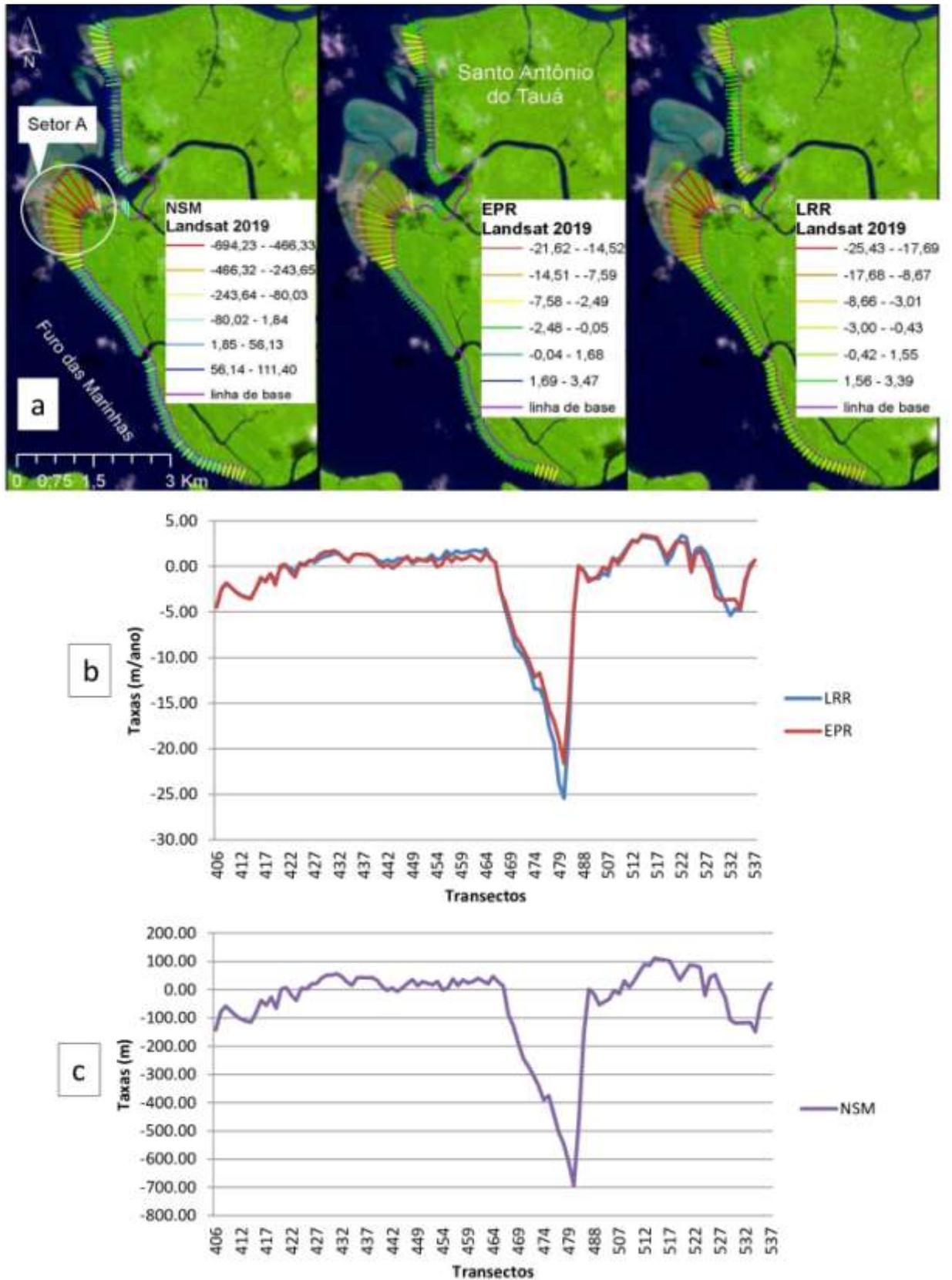


Figura 6 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC e destaque do setor A de Santo Antônio do Tauá. Elaboração: autora

### Tendências da LC da Ilha de Colares

A Ilha de Colares ocupa uma área de 384,068 km<sup>2</sup>, e é separada do continente pelo Furo da Laura. Esta ilha é formada principalmente por planícies aluviais com manguezal. Apenas a sudoeste da ilha ocorre o Tabuleiro Costeiro, exposto na forma de falésias, na sede do município (Braga *et al.* 2018; Ribeiro *et al.* 2021).

Com 36 km de LC, a ilha de Colares, com base nos 352 transectos gerados (554-909), apresenta uma tendência a acreção, com taxa média de 3,57 m/ano (LRR) e 3,62m/ano (EPR) e taxa média de erosão de -3,35m/ano (LRR) e -3,01m/ano (EPR) (Tabela 4).

Tabela 4 – Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para a ilha de Colares. Fonte: Autora.

|                        | <b>Ilha de Colares</b> |             |             |
|------------------------|------------------------|-------------|-------------|
|                        | NSM (m)                | EPR (m/ano) | LRR (m/ano) |
| Taxa máxima de acreção | 405,61                 | 12,63       | 13,35       |
| Taxa máxima de erosão  | -396,37                | -15,13      | -9,23       |
| Taxa média de acreção  | 116,49                 | 3,62        | 3,57        |
| Taxa média de erosão   | -96,29                 | -3,01       | -3,35       |
| Taxa média de variação | 3,45                   | 0,10        | 0,11        |

As taxas estatísticas do NSM apresentam uma taxa média de variação de 3,45 m (Figura 7a). Com os métodos EPR e LRR foi registrada uma taxa média de variação do EPR de 0,10m/ano e do LRR de 0,11m/ano (Figura 7b). A taxa média de erosão é de -96,29m e a taxa média de acreção é de 116,49m, com máxima, respectivamente de 405,61m (transecto 715) e de -396,87m (transecto 909) (Figura 7c).

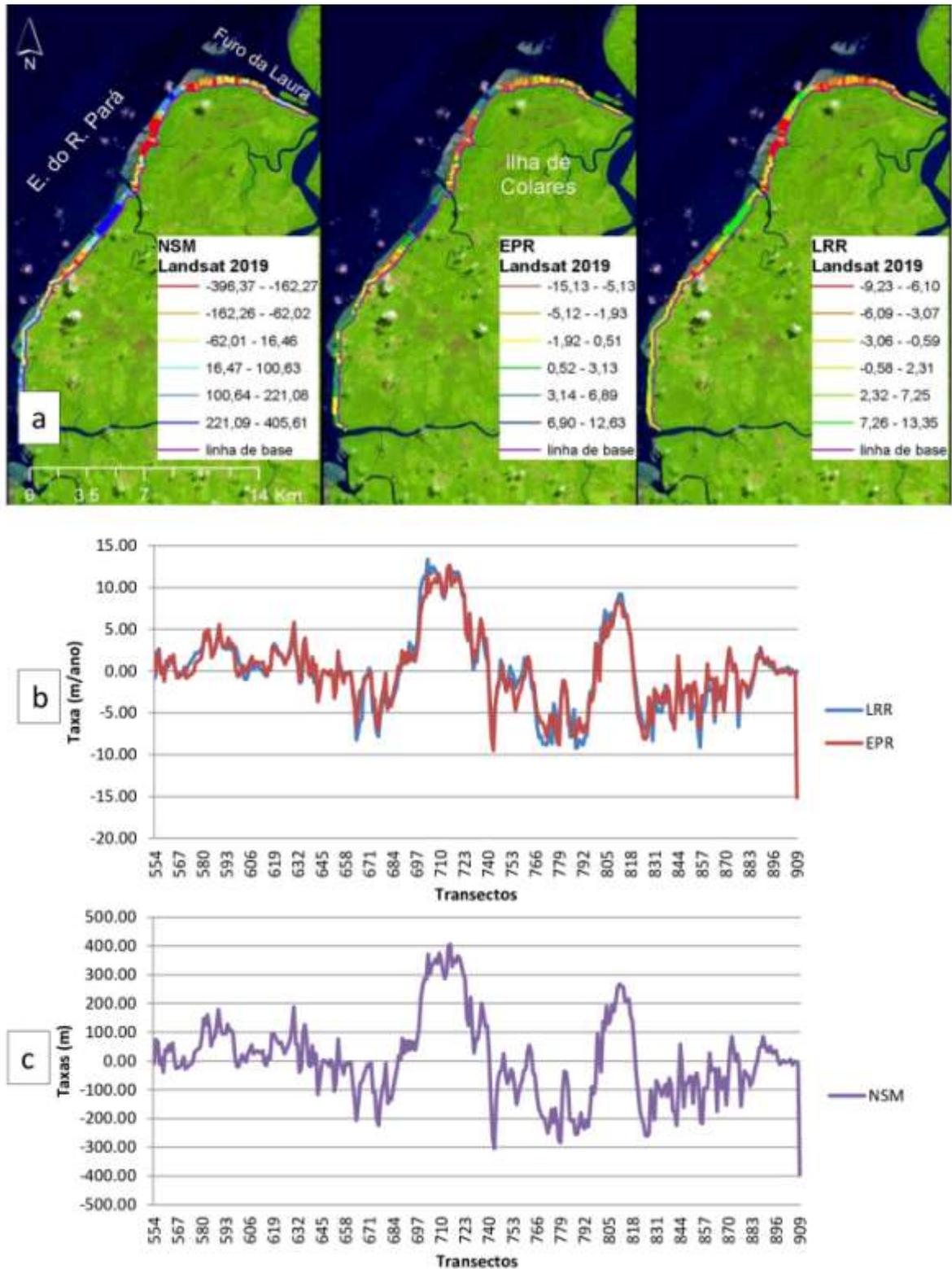


Figura 7 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC da ilha de Colares. Elaboração: autora.

O transecto com a taxa máxima de erosão ocorre no Setor D às margens do Furo da Laura e o transecto de taxa máxima de acreção no Setor A. Observam-se que as taxas de média de erosão (transectos amarelos) e de média de acreção (transectos verdes) são

predominantes. Há duas áreas (Setores A e C) que se destacam por apresentar taxas de alta acreção (transectos 700 a 723; transectos 799 a 818) (transectos verdes). Ainda, têm-se duas áreas (Setores B e D) com taxas de alta erosão (transectos 741 a 798, transectos 821 a 877) (Figura 8).

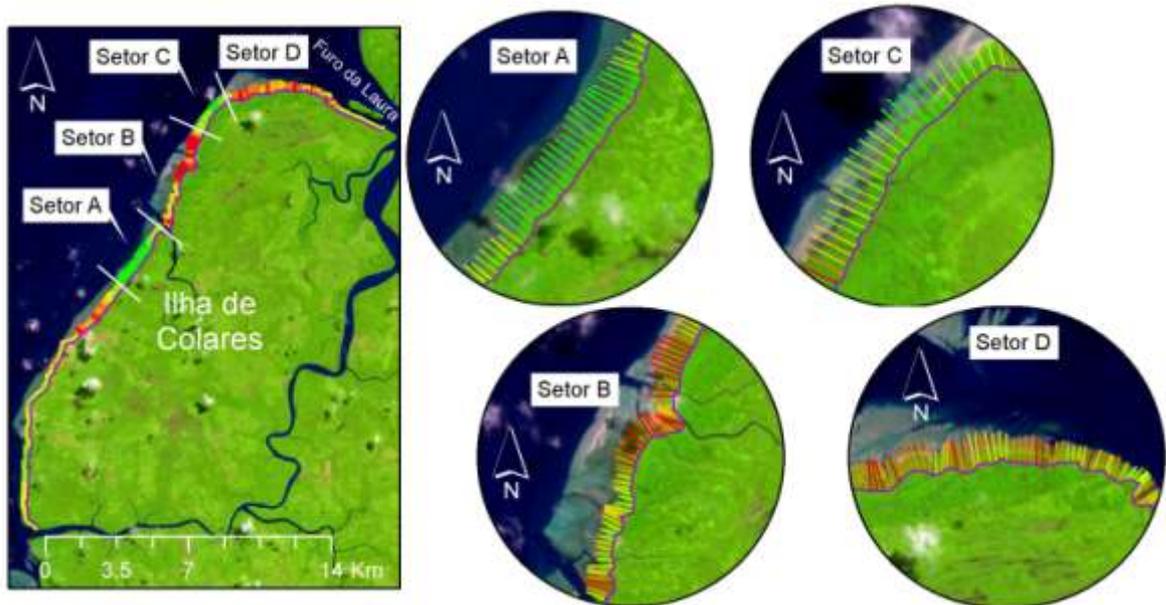


Figura 8 - Setores A, B C e D da LC da ilha de Colares. Elaboração: autora.

## DISCUSSÃO

A localização de cada setor de erosão e/ou acreção está relacionada à sua exposição e intensidade das forçantes no Estuário médio do rio Pará. As principais forçantes que atuam na zona de mistura são as marés, correntes e a descarga fluvial e contribuem para os processos de erosão e/ou acreção na área.

A margem leste do Estuário médio do Rio Pará apresenta uma alternância de áreas sucessivas de erosão e de acreção. Na ilha de Mosqueiro, a LC com 17 km de comprimento é caracterizada por uma sucessão de promontórios e enseadas, totalizando 15 praias (Ramos e Ranieri, 2021). As praias mais expostas apresentam maior tendência à erosão e aquelas abrigadas maior tendência a acreção.

No setor A da ilha de Mosqueiro (Figura 5), onde se encontram as praias do Areião, Bispo, Praia Grande, Prainha, Farol, Chapéu Virado, Porto Arthur, Murubira, Ariramba, São Francisco as taxas de acreção são maiores com alguns pontos de erosão principalmente na praia do Porto Arthur. França *et al.* (2020) apontam que nas praias de Praia Grande e Bispo a tendência a erosão se explica pelas correntes de maré, influência das ondas de NE-SW e escoamento das águas pluviais pelo rebordo das falésias.

O setor B é constituído pela praia de Carananduba, mais protegida e sofre influência das águas do estuário do rio Pará e de dois canais paralelos a LC, com menos intensidade (Figura 5). No setor C, as praias de Marahú, Caruara e Paraíso sofrem com erosão (maior taxa de -123,62m). Este setor é exposto, onde as correntes de maré, ventos e ondas tem intensificado a erosão, principalmente no trecho da LC, com ocupação antrópica. As áreas em acreção ocorrem às margens das enseadas protegidas por promontórios e na área central do Marahú em uma zona de restinga (Neves *et al.* 2019; Ramos e Ranieri, 2021). Por último, o setor D compreende a praia de Baía do Sol, onde observou-se a maior área de erosão no Furo das Marinhas. No entanto, a área de alta acreção ocorre na parte central desta praia, com baixa ocupação antrópica.

Em Santo Antônio do Tauá, a mudança da LC é controlada pelas águas estuarinas do rio Pará e dos Furos da Marinha e da Laura. A sua forma e morfologia (planície aluvial) a torna mais susceptível à erosão (taxa com 2m/ano na parte central) (Figura 6). As correntes de maré que no Furo das Marinhas podem ser uma das principais causas.

Na ilha de Colares ocorrem áreas sucessivas de erosão e de acreção. O setor A na parte central da LC é o ponto com maior quantidade de transectos de alta acreção, em seguida tem-se uma área com maior quantidade transectos de alta erosão, próximo à um canal de maré (Figura 8). O setor C também é de acreção alta, recebendo grandes volumes de sedimentos oriundos de fontes externas ao Estuário do rio Pará (Corrêa, 2005). Os setores B e D (Figura 8) são característicos de alta erosão, onde a hidrodinâmica é forte (Estuário do rio Pará e Furo da Laura) (Lima *et al.*, 2015).

Os processos de erosão e de acreção na LC do Estuário médio do Rio Pará estão diretamente ligados ao alcance das correntes de maré semidiurna ( $2m.s^{-1}$ ) e correntes fluviais. Os ventos (2m/s) e ondas (1m) que ocorrem no estuário também contribuem no processo de variação da LC (Neves *et al.*, 2019; Ramos; Ranieri, 2021). Os aspectos geomorfológicos da área de estudo, a ocupação antrópica em alguns trechos da LC principalmente na ilha de Mosqueiro, são outros fatores relevantes e responsáveis na variação da LC da margem leste do Estuário médio do Rio Pará.

## CONCLUSÃO

O principal objetivo desse artigo é quantificar as taxas de erosão e de acreção na margem leste do Estuário médio do Rio Pará no decorrer de 32 anos (1987; 1993; 1999; 2004; 2008; 2013 e 2019) com utilização do sensoriamento remoto e da extensão DSAS. Esses procedimentos metodológicos se mostraram eficazes na busca dos resultados pretendidos.

A análise mostrou uma combinação de forçantes naturais e agentes antrópicos influenciando na mudança da LC da margem Leste do Estuário médio do Rio Pará. As áreas em erosão e em acreção sucessivas mostram que a posição de cada trecho no estuário é outro fator determinante nas mudanças da LC, estando mais expostas ou abrigadas das forçantes naturais. As tendências de erosão e de acreção contribuem para uma compreensão das mudanças que ocorrem nesse trecho e auxilia na construção de medidas que busquem soluções para os efeitos da erosão.

## REFERÊNCIAS

APOSTOLOPOULOS, D.; NIKOLAKOPOULOS, K. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. **European Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 240–265, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2021.1904293>. Acesso em: 11 jan. 2022.

BAÍA, L. B.; RANIERI, L. A.; ROSÁRIO, R. P. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia oriental. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 231–244, 2021.

BARBOSA, E. J. S.; FRANÇA, C. F. D. Compartimentação morfológica dos municípios costeiros de Colares e Santo Antônio do Tauá, Pará. **Simpósio Nacional de Geomorfologia**, Goiânia, n. VI, p. 11, 2006.

BRAGA, T. G. M. *et al.* Characterization and analysis of forest fragments and land use in the municipality of Colares, northeastern Pará, Brazil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, Belém, v. 13, n. 3, p. 383–407, 2018.

CAI, W. *et al.* Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 215–231, abr. 2020. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s43017-020-0040-3>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niña. 2021. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

CONTI, L. A.; RODRIGUES, M. Variação da Linha de Costa na Região da Ilha dos Guarás – PA Através de Análise de Série Temporal de Imagens de Satélites. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], , p. 922–937, 2011.

CORRÊA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 109\_118, 2005. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19551>. Acesso em: 29 nov. 2020.

COSTA, G. R. de S.; ANDRADE, M. M. N. de. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra em Santo Antônio do Tauá/Pará. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, [S. l.], v. 13, n. 37, seç. DELOS: Desarrollo Local Sostenible, p. 18, 2020. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7794703>. Acesso em: 20 jan. 2022.

DHN. DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 6 jan. 2022.

ELLIOTT, M.; MCLUSKY, D. S. The Need for Definitions in Understanding Estuaries. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S. l.], v. 55, n. 6, p. 815–827, 2002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771402910310>. Acesso em: 29 nov. 2021.

EL-ROBRINI, M. *et al.* Panorama da erosão costeira, Pará, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018a. p. 65–166.

FLEMMING, B. W. Geology, Morphology, and Sedimentology of Estuaries and Coasts. **Treatise on Estuarine and Coastal Science**. [S. l.]: Elsevier, 2011. p. 7–38. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747112003028>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C. *et al.* Erosão da orla costeira grande-bispo, ilha de Mosqueiro, Belém - PA, através da análise de indicadores. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [S. l.], v. 24, p. 20, 9 jul. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/33940>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C. F. D.; SOUZA FILHO, P. W. M. E. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagem Landsat. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 127–136, 1 jun. 2003. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9877/9166>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HIMMELSTOSS, E. A. *et al.* **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. U.S. Geological Survey Open-File Report, n. 1179. [S. l.: s. n.], 2018.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. 2022. **cidade s e estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/colares.html>. Acesso em: 13 fev. 2022.

INMET. Instituto Nacional De Meteorologia Do Brasil. Normais climatológicas do Brasil (1981-2010). 2021b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 18 dez. 2021.

LIMA, M. W. *et al.* Análise temporal da composição granulométrica de um estuário amazônico, Pará, Brasil. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 11, n. 01, p. 11, 2015.

MARTINS, L. R.; TABAJARA, L. L.; FERREIRA, E. R. Linha de Costa: problemas e estudos. **GRAVEL**, Porto Alegre, v. 2, p. 40–56, 2004.

MATOS, M. D. F. A. de *et al.* Estimativas das alterações de longo prazo na linha de praia do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 23, n. 1, 13 jan. 2022. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1953>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MENEZES, M. O. B. *et al.* Estuarine processes in macro-tides of Amazon estuaries: A Study of Hydrodynamics and Hydrometeorology in the Marajó Bay (Pará-Brazil). **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 165, p. 1176–1181, 3 jan. 2013. Disponível em: <http://www.bioone.org/doi/10.2112/SI65-199.1>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MISHRA, M. *et al.* The development and research trend of using dsas tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 69–77, 7 jun. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/juee/article/view/53166>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MOREIRA, S. de F. *et al.* A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, [S. l.], v. 1, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://malque.pub/ojs/index.php/mr/article/view/78>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MOURA, A. G. A. F. *et al.* Geoprocessamento: Utilização da técnica de classificação supervisionada para cálculo de remanescente florestal / Geoprocessing: Use of the supervised classification technique for calculating forest remnants. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 51722–51737, 7 jun. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/30283>. Acesso em: 20 jan. 2022.

MOURA, M. M. *et al.* Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 651, p. 1639–1651, fev. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718336866>. Acesso em: 18 dez. 2021.

NEVES, S. C. R.; FRANÇA, C. F. de; SILVA, R. R. P. e. Morfologia e dinâmica da orla costeira do Marauá, ilha de Mosqueiro, Belém, Pará. **Geosul**, [S. l.], v. 34, n. 73, p. 107–125, 6 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/1982-5153.2019v34n73p107>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PERILLO, G. M. E. Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. **Developments in Sedimentology**. [S. l.]: Elsevier, 1995. v. 53, p. 17–47. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0070457105800226>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PICANÇO, S. M. **Formas de relevo e dinâmica costeira em São Caetano de Odivelas (PA)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.

PRESTES, Y. O. *et al.* A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 28, abr. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581819301004>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RABELO, F. D. B.; SILVA, E. V. da; GORAYEB, A. Geotecnologias na análise da dinâmica costeira do estuário do Rio Caeté – Pará I (Edição 530). **Papers do NAEA**, [S. l.], v. 30, n. 1, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/pnaea/article/view/11592>. Acesso em: 3 jan. 2022.

RAMOS, C. C.; RANIERI, L. A. Morfologia e Sedimentação de uma Praia Estuarina Amazônica (Marahú/PA) Durante Amplitudes de Marés Distintas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 2916–2930, 30 set. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245181>. Acesso em: 21 jan. 2022.

RANIERI, L. A.; EL-ROBRINI, M. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 207–226, 27 fev. 2015.

Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/78121>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RIBEIRO, E. dos S. *et al.* Fitofisionomia da cobertura vegetal na ilha de Colares no Nordeste Paraense. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 14, p. e12101421178, 23 out. 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/21178>. Acesso em: 23 jan. 2022.

RIBEIRO, S.; VALADÃO, R. Efeitos marinho e fluvial na dinâmica dos ambientes inundáveis do Estuário Superior do Rio Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 22, n. 4, 15 set. 2021. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/2017>. Acesso em: 3 dez. 2021.

RODRIGUES, S.; SOUZA FILHO, P. W. M. Análise da variação da linha de costa a noroeste do Estado do Pará (Baía de Curuçá) através das imagens Landsat TM e ETM+ e CBERS 2B. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, n. XV, p. 5061, 2011.

RODRIGUES, T. *et al.* Caracterização e classificação de solos do município e Santo Antônio do Tauá, Estado do Pará. **Embrapa Amazônia Oriental**, Belém, n. Documentos 181, p. 49, 2004.

ROLLNIC, M. *et al.* Áreas de estudo. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 1, p. 26–45.

ROSÁRIO, R. P. *et al.* Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 75 (10075), p. 128–132, 1 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/SI75-026.1>. Acesso em: 24 dez. 2021.

TOURE, S. *et al.* Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 75, 5 fev. 2019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2220-9964/8/2/75>. Acesso em: 2 dez. 2021.

VALLE-LEVINSON, A. Classification of Estuarine Circulation. **Treatise on Estuarine and Coastal Science**. [S. l.]: Elsevier, 2011. p. 75–86. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747112001066>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VASCONCELOS, A. O. *et al.* Caracterização do Uso e Cobertura do Solo e da Linha de Costa. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 2, p. 911–1029.

WANG, C. *et al.* Deriving Natural Coastlines Using Multiple Satellite Remote Sensing Images. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 102, n. sp1, p. 296–302, 14 dez. 2020. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-102/issue-sp1/SI102-036.1/Deriving-Natural-Coastlines-Using-Multiple-Satellite-Remote-Sensing-Images/10.2112/SI102-036.1.full>. Acesso em: 2 dez. 2021.

## ARTIGO 2

### EVOLUÇÃO MULTITEMPORAL (1987-2019) DA MARGEM ADJACENTE À FOZ DO RIO PARÁ DOMINADO POR MACROMARÉ (PARÁ - AMAZÔNIA ORIENTAL/ BRASIL)

#### RESUMO

No Golfão Marajoará, o Estuário do Rio Pará, se comunica com o rio Amazonas, através da Região dos Estreitos, e recebe ainda contribuições fluviais dos rios Tocantins e Guamá/Guajará. A área de estudo situa-se à margem Leste (trecho: Vigia e São Caetano de Odivelas) adjacente à Foz do Estuário do rio Pará. Essa região é caracterizada como equatorial úmido com temperatura média anual entre 25°C e 27°C, e precipitação entre 2.000 e 3.000 mm/ano, sendo este diretamente influenciada pela migração sazonal da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) na direção meridional. Na área um cinturão de manguezal sofre forte influência fluvial sazonal, com alta descarga fluvial (dezembro a maio/estação chuvosa), e baixa descarga (junho a novembro/estação seca) e de maré diária, com regime de macromaré (máxima de 4,7 m). Este artigo objetiva a detecção dos trechos da linha de costa (LC) em erosão e/ou acreção, através de imagens de satélite Landsat TM (1987; 1993; 1999; 2004; 2008) e Landsat OLI (2013 e 2019) do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), como auxílio do Digital Shoreline Analysis System (DSAS), para calcular com maior precisão as taxas de mudanças da LC. Na área de trabalho, foram aplicados os parâmetros NSM (*Net Shoreline Envelope*), LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) e EPR (*End Point Rate*). A maior tendência de acreção ocorreu em Vigia, com taxa média de 1,26m/ano e taxa máxima de 10,06m/ano no EPR, e taxa média de 0,64m/ano e taxa máxima de 7,22 no LRR. Em São Caetano de Odivelas a taxa média de variação no parâmetro EPR foi de 0,40m/ano e no parâmetro LRR foi de 0,25m/ano e no NSM de 13,09m, sendo assim predominante a acreção no trecho.

**Palavras-chave:** Foz, Estuário, dinâmica costeira, linha de costa, DSAS

#### ABSTRACT

In Golfão Marajoará, the estuary of the Pará River, communicates with the Amazon River, through the Estreitos Region, and receives fluvial contributions from the Tocantins and Guamá/Guajará rivers. The study area is located on the eastern margin of the lower Estuary of the Pará River, in the section: Vigia and São Caetano de Odivelas. This region is characterized as humid equatorial with annual average temperature between 25°C and 27°C, and precipitation between 2,000 and 3,000 mm/year, which is directly influenced by the seasonal migration of the ITCZ (Intertropical Convergence Zone) in the southern direction. In the area, a mangrove belt suffers strong seasonal fluvial influence, with high fluvial discharge (December to May/rainy season), and low discharge (June to November/dry season) and daily tide, with a macrotidal regime (maximum of 4,7 m). This article aims to detect stretches of the coastline (CL) in erosion and/or accretion, through satellite images Landsat TM (1987; 1993; 1999; 2004; 2008) and Landsat OLI (2013 and 2019) from the Geological Survey of the United States (USGS), with the aid of the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), to more accurately calculate CL rates of change. On the eastern margin of the lower Estuary of the Pará River, the parameters NSM (Net Shoreline Envelope), LRR (Linear Regression Rate-of-Change) and EPR (End Point Rate) were applied. The greatest accretion trend occurred in Vigia, with an average rate of 1.26 m/year and maximum rate of 10.06 m/year in the EPR, and an average rate of 0.64 m/year and maximum rate of 7.22 in the LRR. In São Caetano de Odivelas, the average rate of variation in the EPR parameter was 0.40 m/year and in the LRR

parameter it was 0.25 m/year and in the NSM it was 13.09 m, thus the accretion was predominant in the stretch.

**Keywords:** mouth, estuary, coastal dynamics, shoreline, DSAS

## INTRODUÇÃO

A Zona Costeira (ZC) é o resultado da interação entre fatores aerodinâmicos, hidrológicos e marinhos. Esta área é influenciada por forçantes climáticas (ventos, chuvas, eventos extremos), hidrológicos (descarga fluvial) e hidrodinâmicas (marés, correntes, ondas), em um longo, médio ou curto período (séculos, décadas e anos, respectivamente) (Baía *et al.* 2021; França e Souza Filho, 2003; Rizzo e Anfuso, 2020). Ainda são desenvolvidas atividades sócioeconômicas, como lazer, transporte, habitação, indústria e produção de energia, que alteram a morfologia e hidrodinâmica local (Ranieri e El-Robrini, 2015).

Abordagens atuais sobre as mudanças nas ZC's adotam a linha de costa (LC) como um importante geoindicador das transformações costeiras. Desta forma, definir a localização da LC é um desafio por suas mudanças constantes em função da dinâmica do nível do mar ou do rio, das forçantes costeiras e eventos extremos que podem mudar a sua posição (Muehe e Klumb-Oliveira, 2014; Vasconcelos *et al.* 2020).

Em geral, a LC pode ser definida como a interseção entre a água e a terra, sendo que sua delimitação pode ser identificada pelos limites geomorfológicos, de vegetação, da altura da maré, de contorno da praia ou outro indicador, que seja mais favorável ao pesquisador dependendo da sua área de estudo para obter o resultado mais preciso (Martins *et al.* 2004; Toure *et al.* 2019; Vasconcelos *et l.* 2020).

A definição da posição da LC é complexa por estar em constante mudança em função dos movimentos dos sedimentos, relacionados à dinâmica natural e a ação antrópica (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Vasconcelos *et al.* 2020). A dinâmica natural está relacionada à ação de ventos, chuvas, marés, ondas, correntes, que contribuem a configurar as feições na LC ao longo do tempo. Considerando as ações antrópicas, estas são relacionadas a construções de portos e centros urbanos nas ZC's, que em geral, desconsideram a ação das forçantes costeiras, permitindo assim a construção de uma infraestrutura e o estabelecimento de populações muito próximo a LC (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.*, 2021; Szlafsztein *et al.* 2006; Teixeira *et al.* 2021).

A área de investigação é característica de região de foz (estuário inferior), diante disso, os estuários dominados por marés ajustam-se a uma morfologia em forma de funil em resposta à dissipação da energia das marés offshore (Wright, 1977). Além dos efeitos da maré

offshore, a descarga fluvial e o suprimento de sedimentos na cabeceira do estuário geram deposição na foz do estuário que podem reduzir a erosão induzida pelas marés (Canestrelli *et al.* 2014). Os fluxos impulsionados pela densidade e o transporte de sedimentos promovem fluxos de sedimentos em direção à terra (Olabarrieta *et al.* 2018). A maré pode afetar o fluxo estuarino e a dinâmica dos sedimentos em frente à foz dos rios, influenciando assim a morfologia estuarina específica.

Com o desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto, possibilitou o aumento das fontes de dados de alta qualidade para a delimitação da LC com alta precisão (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021). O sensoriamento remoto utiliza em sua vertente técnicas de obtenção de informação sobre objetos ou áreas com relativa distância, sobre o objeto ponto, sendo normalmente usados aeronaves ou satélites e, atualmente muitos utilizados para o monitoramento costeiro por permitir a extração manual ou semi-automática da LC a partir do processamento digital de imagens de satélite (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020).

Com a frequência de captura de conjunto de dados (5 a 10 dias), aumentou a resolução espacial e temporal de cobertura. Portanto, as avaliações mais recentes de mudanças na LC configuram um cenário global e, desta forma, as imagens Landsat obtém um papel importante nesta perspectiva, pois é possível analisar e focar em pontos críticos de mudança na LC (acrecção e erosão) nos últimos tempos, especialmente a partir da segunda metade do século XX, a partir do sensor MSS (Brooks *et al.* 2020; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020).

O Programa Landsat que iniciou em 1972 com sucessivas missões e foi uma revolução da tecnologia, paralelamente a outros satélites que vieram e podem ser distinguidos em três categorias: alta (0,5-5m), média (5-20m) e baixa (>20m); de acordo com a sua resolução. As imagens de satélite com alta resolução espacial (IKONOS-2; RapidEye; Worldview-2) começaram a ser utilizadas, mas devido serem mais recentes não permitem uma análise mais longa em escala temporal. Pois, para esse tipo de análise são utilizadas fotografias antigas, imagens de radar ou imagens de satélite de média resolução (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021).

O uso do sensoriamento remoto contribui na determinação das mudanças na LC, tornando-se mais eficiente com essa fonte de alta qualidade, mesmo em um longo período. Assim, o uso de geotecnologias e de imagens de satélite para monitorar as mudanças nas LC torna-se essencial devido ao mapeamento de alta precisão, custo-benefício e redução do erro manual (Santos *et al.* 2021; Toure *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020).

A análise costeira é complexa e para automatizar a compreensão deste cenário, o uso do Digital Shoreline Analysis System (DSAS) torna-se uma ferramenta de suma importância, ao permitir que o pesquisador calcule com maior confiabilidade as taxas de mudanças da LC a partir de uma série de linhas representadas por *polylines* devidamente posicionadas, tendo como base fotografias aéreas e/ou imagens de satélite, em qualquer que seja a delimitação da LC escolhida, desde que seja identificável nas imagens (Mishra *et al.* 2020; Muehe e Klumb-Oliveira, 2014; Ranieri e El-Robrini, 2015; Santos *et al.* 2021).

No estado do Pará, alguns trabalhos veem sendo realizados com o intuito de avaliar a dinâmica costeira e estuarina da região, influenciada por macromaré (altura de 4,7m), correntes de maré ( $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), e ventos ( $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  -  $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) que modificam a LC ao longo do cenário temporal adjacentes a essas forçantes (Baía *et al.* 2021; Conti e Rodrigues, 2011; França *et al.* 2020; França e Souza Filho, 2003; Neves *et al.* 2019; Ranieri e El-Robrini, 2015; Teixeira *et al.* 2021). Esses trabalhos refletem a importância de compreender a dinâmica de cada local e gerar um conhecimento científico importante para a região. Diante disso, a análise da variação da LC se torna relevante em um período de grandes mudanças climáticas que afetam diretamente a ZC. Este artigo busca identificar e quantificar as áreas em erosão e/ou em acreção para contribuir para uma melhor interpretação da dinâmica da LC dos municípios de Vigia e de São Caetano de Odivelas (margem leste) no estuário inferior do rio Pará, utilizando uma análise multitemporal (1987-2019).

### **Localização da área de estudo**

Na margem adjacente a foz do estuário inferior do rio Pará (50 km de extensão) localizam-se as cidades de Vigia e de São Caetano de Odivelas (Figura 1). O acesso da capital Belém pode ser feito por via rodoviária e fluvial. Por via rodoviária o tempo estimado de chegada saindo de Belém é de aproximadamente 1h58min à 2h11min, do município mais próximo (Vigia) ao mais distante (São Caetano de Odivelas), respectivamente.



Figura 1 - Localização dos municípios (Vigia, São Caetano de Odivelas) na margem leste do estuário inferior do rio Pará. Elaboração: autora

### Caracterização da área de estudo

O clima dessa região é caracterizado como equatorial úmido com temperatura média anual entre 25° e 27°C, com máximas de 33°C e mínimas de 22°C (INMET, 2022), onde as maiores temperaturas ocorrem durante a estação seca entre junho e novembro. O volume da precipitação anual é entre 2.000 e 3.000 mm, sendo que 70% ocorrem durante a estação chuvosa, entre dezembro e maio, e está diretamente influenciado pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na direção meridional (Amanajás e Braga, 2012; Dos Santos *et al.* 2019; INMET, 2021; Matos e Cohen, 2016). Os ventos predominantes na região são os alísios de nordeste que apresentam uma maior velocidade na estação seca, variando entre  $2\text{m.s}^{-1}$  e  $7\text{m.s}^{-1}$  (CPTEC/INPE, 2021; INMET, 2022).

A área de estudo foi influenciada pelos eventos extremos durante os anos de 1987, 1993, 2004 e 2019 (El Niño - EN) e 1999 e 2008 (La Niña - LN), a mudança na temperatura de superfície do oceano Pacífico Equatorial acarreta efeitos globais nos padrões de ventos, nebulosidade, temperatura e precipitação (Cai *et al.* 2020; CPTEC/INPE, 2021; Moura *et al.* 2019). Estudos sobre a influência do EN e LN na bacia amazônica indicaram que os maiores

impactos desses fenômenos estão relacionados às mudanças no regime pluviométrico e fluviométrico. Esses fenômenos ocorrem a cada 2 a 5 anos em média, e podem durar de 9 a 12 meses, havendo casos de 4 anos (Cai *et al.* 2020; CPTEC/INPE, 2021; Moura *et al.* 2019).

Durante a ocorrência de um EN moderado, a precipitação tende a ser menor que a normal e durante a ocorrência de um evento LN moderado, a precipitação tende a ser maior que a normal. Essas mudanças na precipitação irão influenciar na descarga dos rios (refletindo nos processos hidrodinâmicos de transporte e deposição da região), na cobertura da vegetação, nas atividades econômicas e principalmente no clima da região (Moreira *et al.* 2018; Moura *et al.* 2019; Santos, 2006).

A margem leste do estuário está localizada no setor flúvio-marítimo da zona costeira paraense e caracteriza-se por uma costa rebaixada, ocupada por manguezais e exposta a forças hidrodinâmicas e hidrológicas do rio Pará (El-Robrini *et al.* 2018; Rollnic *et al.* 2020). O estuário inferior do rio Pará é influenciado por forças (correntes, marés, descarga fluvial, ventos), sendo a principal a macromaré (altura de 4,7m) (DHN, 2022). As correntes predominantes são de marés semidiurnas e as correntes fluviais induzidas pelos fluxos de descarga fluvial. A velocidade de corrente no estuário do rio Pará é superior a  $2,0 \text{ m.s}^{-1}$  com descarga instantânea no estuário, atingindo  $4,0 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Prestes *et al.* 2020, 2017; Rosário *et al.* 2016).

O Estuário do rio Pará é classificado como um grande sistema estuarino tropical com mais de 300 km de extensão longitudinal e foz de 60 km de largura, sendo um dos maiores estuários do Brasil (Prestes *et al.* 2020). A descarga líquida do estuário do rio Pará é de  $20.946 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  e correntes de maré da ordem de  $2 \text{ m.s}^{-1}$ , sendo um estuário característico de Planície costeira, bem estratificado, dominado por marés, com ventos e ondas que se formam no interior do próprio estuário, gerando um ambiente flúvio-marinho peculiar (Prestes *et al.* 2020; Ribeiro e Valadão, 2021; Rosário *et al.* 2016).

No estuário do rio Pará os sedimentos em suspensão tem origem na ressuspensão do material presente no fundo e de fonte externas, sendo seus principais afluentes os rios Tocantins, Amazonas e Guamá (Carneiro *et al.* 2020; Prestes *et al.* 2020). Na margem leste do estuário os sedimentos são mais finos, formada por silte grosso e muito fino e em algumas áreas sedimentos argilosos, depositados por decantação, evidenciando uma margem de baixa hidrodinâmica (Corrêa, 2005).

A salinidade no estuário do rio Pará alterna o seu gradiente, considerando três períodos: baixa vazão, transição e alta descarga (Figura 2). A maior intrusão salina ocorre durante o período de baixa vazão, percorrendo cerca de 130 km (contados a partir da foz do

estuário), alcançando os municípios de São Caetano de Odivelas e Vigia, no período de transição entre a baixa e alta descarga a intrusão salina ocorre até aproximadamente 110 km, alcançando apenas o município de São Caetano de Odivelas e na alta descarga ocorre à intrusão salina em aproximadamente 70 km a partir da foz do estuário (Rosário *et al.* 2016).

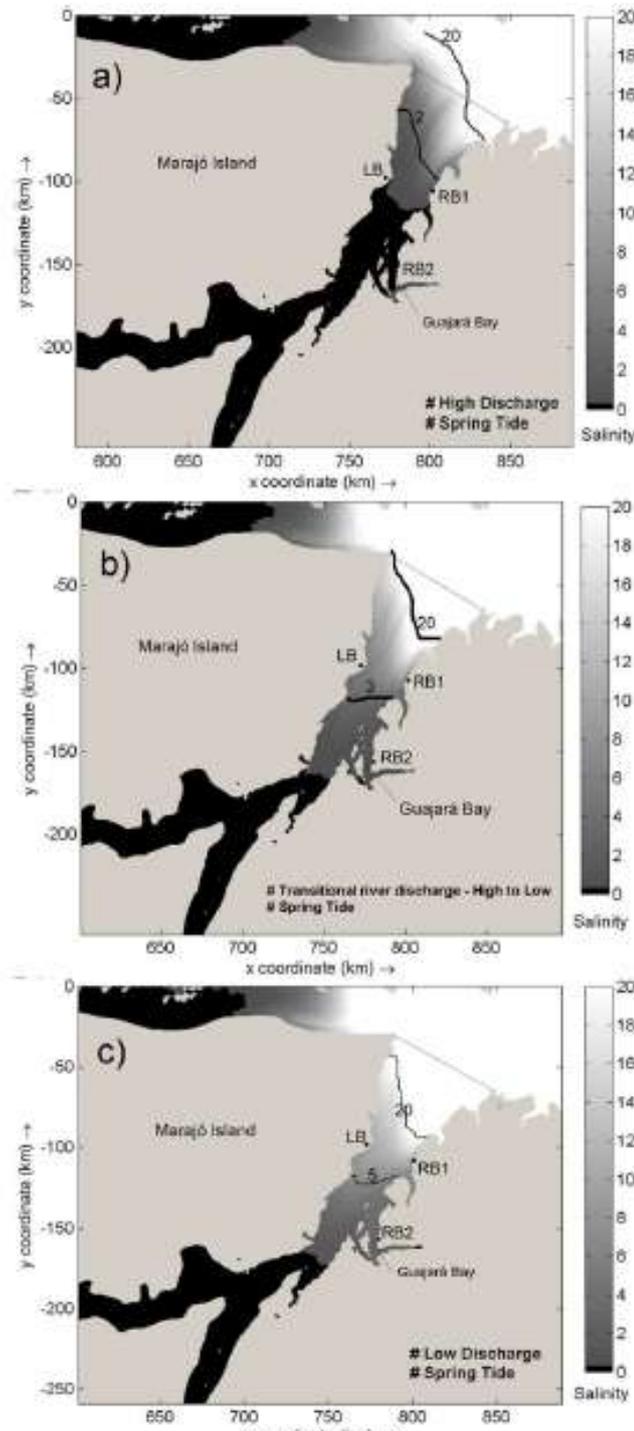


Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. Fonte: Rosário *et al.* (2016).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Aquisição das imagens de satélite

Foram adquiridas imagens de satélite como arquivos GeoTIFF através do site da United States Geological Survey (USGS) já georreferenciadas, acessado em junho de 2020. As imagens são de média resolução espacial, foram selecionadas imagens Landsat 5 do sensor TM dos anos de 1987, 1993, 1999, 2004, 2008, e Landsat 8 do sensor OLI/TIRS de 2013 e 2019, com resolução espacial de 30m (Tabela 1).

A escolha das imagens nessa região possui algumas limitações, pois na estação chuvosa a cobertura de nuvem na área de estudo pode chegar a 99%, assim a seleção dos anos analisados levou em consideração a menor porcentagem de nuvens. O intervalo temporal é de 4, 5 e 6 anos e foram selecionadas imagens com base na cobertura de nuvens mais baixa, correspondentes aos meses da estação seca onde a porcentagem de nuvens são de 0% a 30%, para melhor visualização da LC. As cenas da órbita/ponto 223-061 recobrem toda a área de estudo.

Tabela 1- Dados das imagens adquiridas. Fonte: Adaptado de imagens Landsat (dados USGS); Instituto Nacional de Meteorologia (2020); Kayano et al. (2016) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (2021).

| <b>Ano</b>  | <b>Satélite</b> | <b>Sensor</b> | <b>Órbita/ponto</b> | <b>Resolução espacial</b> | <b>Bandas</b> | <b>Data adquirida</b> |
|-------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------------|---------------|-----------------------|
| <b>1987</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 17/05                 |
| <b>1993</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 20/07                 |
| <b>1999</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 13/07                 |
| <b>2004</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 19/08                 |
| <b>2008</b> | Landsat -5      | TM            | 223-061             | 30m                       | 5,4,3         | 14/08                 |
| <b>2013</b> | Landsat-8       | OLI/TIRS      | 223-061             | 30m                       | 6,5,4         | 27/07                 |
| <b>2019</b> | Landsat-8       | OLI/TIRS      | 223-061             | 30m                       | 6,5,4         | 26/06                 |

### Processamento Digital das Imagens

Nesta etapa foi realizada a composição RGB (Red, Green e Blue) com as bandas 5, 4, 3 (Landsat-5) e 6, 5, 4 (Landsat-8), a composição colorida ou falsa-cor dessas três bandas espectrais permite que as imagens tenham cores naturais simuladas para melhor visualização da LC. Em seguida, foi realizada uma reprojeção das imagens para WGS84/UTM ZONE 22S, visto que as imagens da USGS originalmente estão na WGS84/UTM ZONE 23N.

Para a vetorização da LC foram criados shapefiles para a extração da LC a partir das imagens correspondentes a um ano selecionado, através da interpretação visual das imagens tendo como base o contato da vegetação com a água. Também foi criada uma linha de base

para todas as imagens que serve de auxílio para análise da variação da LC. Estes procedimentos foram realizados no programa ArcMap 10.5 do software ArcGis (Figura 3).

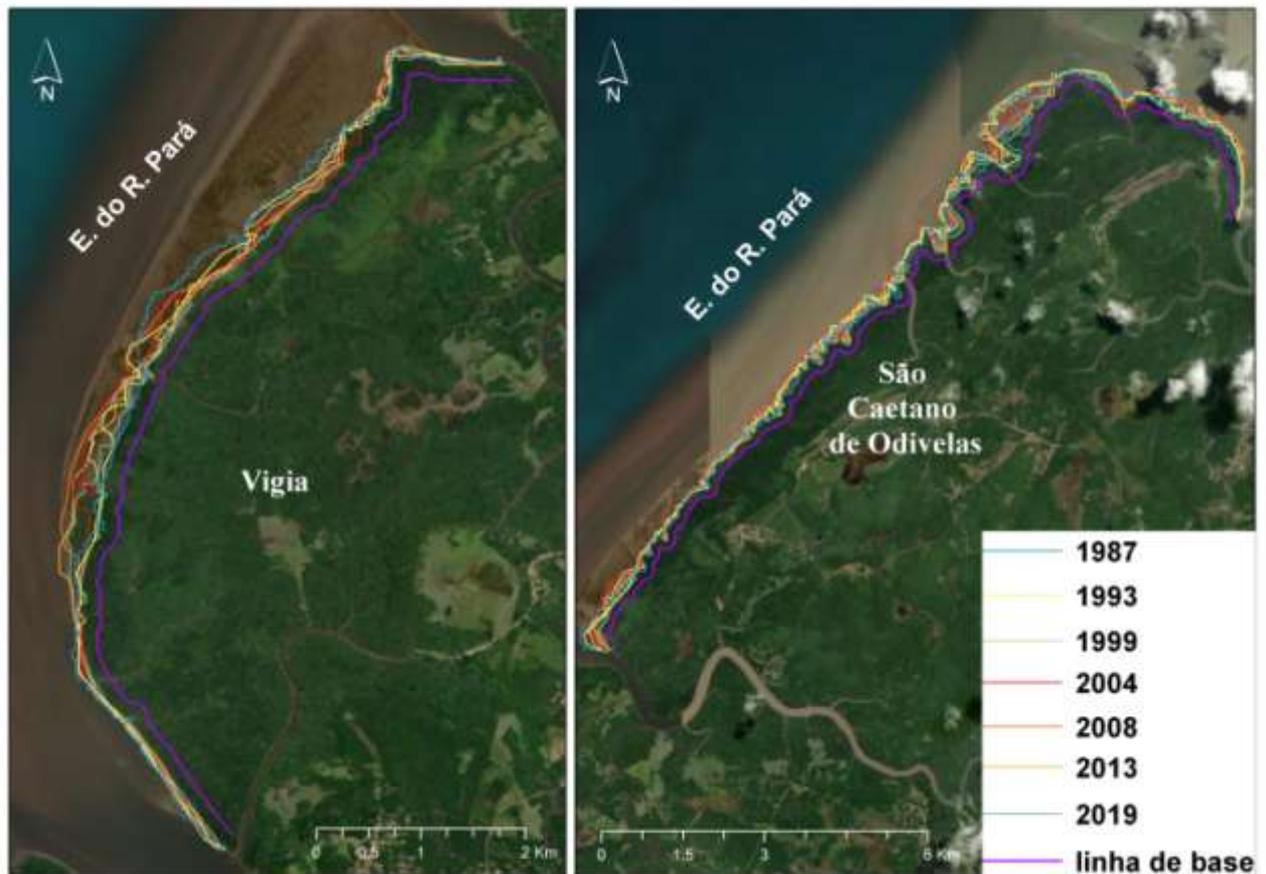


Figura 3 - Disposição das linhas de costa dos anos de 1987 (azul), 1993 (amarela), 1997 (verde), 2004 (vermelha), 2008 (laranja), 2013 (marrom), 2019 (azul claro) e linha de base (roxa). Elaboração: autora.

Após a vetorização das LC's dos anos de 1987, 1993, 1999, 2004, 2008, 2013 e 2019, foi realizada a sobreposição dos vetores, para posterior utilização da técnica do DSAS (Digital Shoreline Analysis System) e geração de dados quantitativos de medidas lineares e taxas da variabilidade da LC e os produtos cartográficos.

### Digital Shoreline Analysis System (DSAS)

O Digital Shoreline Analysis System (DSAS) é uma extensão de software disponível que é compatível com o software Esri Geographic Information System (ArcGIS). O DSAS calcula estatísticas de taxa de mudança para uma série temporal de dados vetoriais da linha costeira (Himmelstoss *et al.* 2018; Mishra *et al.* 2020; Toure *et al.* 2019). Esta extensão é de grande importância para o gerenciamento costeiro e os estudos da dinâmica costeira, principalmente quando se trata de médios e longos períodos onde a análise não pode ser realizada em trabalho de campo (Mishra *et al.* 2020; Ranieri e El-Robrini, 2015). Foi utilizada

a versão mais recente do aplicativo (v5.0) lançada em dezembro de 2018 compatível com as versões do ArcGis 10.4 e 10.5.

A partir da vetorização das LC's de todos os anos utilizados na pesquisa se iniciou a utilização do DSAS que se baseou na criação de parâmetros quantitativos da variação de LC a partir da geração de transectos ortogonais a uma linha de base (Conti e Rodrigues, 2011). Neste artigo a linha de base foi delimitada na parte terrestre da ZC com relação à LC mais antiga e os transectos alinhados a cada 100m para obter um resultado mais detalhado da área de estudo.

Há uma série de parâmetros quantitativos que expressam a variação horizontal da LC determinada ao longo do tempo que geram taxas e medidas estatísticas, sendo estes: SCE (*Shoreline Change Envelope*); NSM (*Net Shoreline Movement*); EPR (*End Point Rate*); LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*); JKR ou método *Jackknife* e WRL (*Weighted Linear Regression*) (Himmelstoss *et al.* 2018).

Neste artigo, foram utilizados os parâmetros NSM, EPR e LRR por se adequarem a análise necessária da mudança da posição da LC. O NSM mostra a distância (m) total entre as LC's mais recentes e mais antigas, o EPR é a taxa do parâmetro NSM dividida pelo tempo decorrido e o LRR determina uma estatística de taxa de mudança ajustando uma regressão linear de mínimos quadrados entre a primeira e última LC em um transecto específico (Himmelstoss *et al.* 2018).

Assim, tendo como resultados as variações em metros nos 32 anos de análise (NSM) e taxas médias de variação por ano (EPR e LRR). Mesmo os parâmetros EPR e LRR possuindo os mesmos resultados (taxas médias por ano) foram utilizados para fim de comparação, sendo que o LRR utiliza todas as LC criadas e o EPR apenas a primeira e a última LC.

Obtendo como referência a linha de base, os valores positivos indicam um deslocamento da linha em direção ao mar ao longo do transecto e os valores negativos indicam um deslocamento em direção a terra (Himmelstoss *et al.* 2018), ou seja, taxas positivas significam acreção e taxas negativas erosão.

## **RESULTADOS**

A foz de um estuário é considerada uma zona de alta complexidade devido aos processos que nela atuam. As marés, ondas, correntes, descarga fluvial, transporte de sedimentos contribuem para que as mudanças morfológicas ocorram nesse ambiente. A dinâmica de fluidos induzida pela energia de ondas, correntes e marés é influenciada pela topografia e interagem com o transporte de sedimentos ao longo do tempo. Gradientes no

transporte de sedimentos dão origem a áreas de erosão e acreção alterando a morfologia (Cassiano e Siegle, 2010; Lemke *et al.* 2021).

### **Evolução da LC de Vigia**

A morfologia da LC do município de Vigia é constituída por baixo platôs pediplanados ou rebaixados, terraços e várzeas (El-Robrini *et al.* 2018). A cobertura vegetal predominante é representada pelos manguezais com área de 842.81 km<sup>2</sup>, em uma planície costeira e restrita (< largura 2km) (ICMBIO, 2018). Ao Sul de Vigia, o Furo da Laura recebe contribuições de pequenos canais de maré e tem influenciado este setor durante as enchentes e vazantes (Figura 1).

Na LC do município de Vigia (10 km), foram gerados 102 transectos, que apresentaram tendência de acreção (65,69% de transectos de), com taxa média de variação de 1,26m/ano, taxa máxima de acreção de 10,06m/ano no EPR e taxa média de variação de 0,64m/ano, e taxa máxima de acreção de 7,22 no LRR (Tabela 2). Entretanto, os transectos de erosão representam 34,31% do total.

Tabela 2 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para o município de Vigia. Fonte: Autora.

|                        | <b>Vigia</b> |             |             |
|------------------------|--------------|-------------|-------------|
|                        | NSM (m)      | EPR (m/ano) | LRR (m/ano) |
| Taxa máxima de acreção | 323,03       | 10,06       | 7,22        |
| Taxa máxima de erosão  | -302,24      | -9,41       | -11,45      |
| Taxa média de acreção  | 114,28       | 3,55        | 3,09        |
| Taxa média de erosão   | -88,83       | -2,76       | -4,07       |
| Taxa média de variação | 40,61        | 1,26        | 0,64        |

As taxas oriundas do NSM mostram uma média de variação de 40,61m, com acreção máxima de 323,03m em contraste a taxa máxima de erosão é de -302,24m. As taxas médias de acreção e de erosão ficaram respectivamente de 114,28m e -88,83m. Mesmo a diferença das médias não sendo tão significativas (apenas 25,45m de diferença) pode-se perceber que a acreção prevaleceu nesses 32 anos.

Os dados quantificados do EPR apontam taxa média de acreção de 3,55m/ano e taxa média de erosão de -2,76m/ano, entretanto o parâmetro LRR mostra taxa média de acreção e de erosão, respectivamente de 3,09m/ano e -4,07m/ano (Figuras 4b e 4c). É evidente a presença de dois setores distintos subsequentes na LC de Vigia. Um setor A com taxas de média a alta erosão (transectos de coloração laranja e vermelha, respectivamente) e um setor

B com taxas de alta acreção (transectos de coloração azul escuro) (Figura 4a). Nas proximidades do Furo da Laura os transectos são de média acreção (transectos de coloração azul claro).

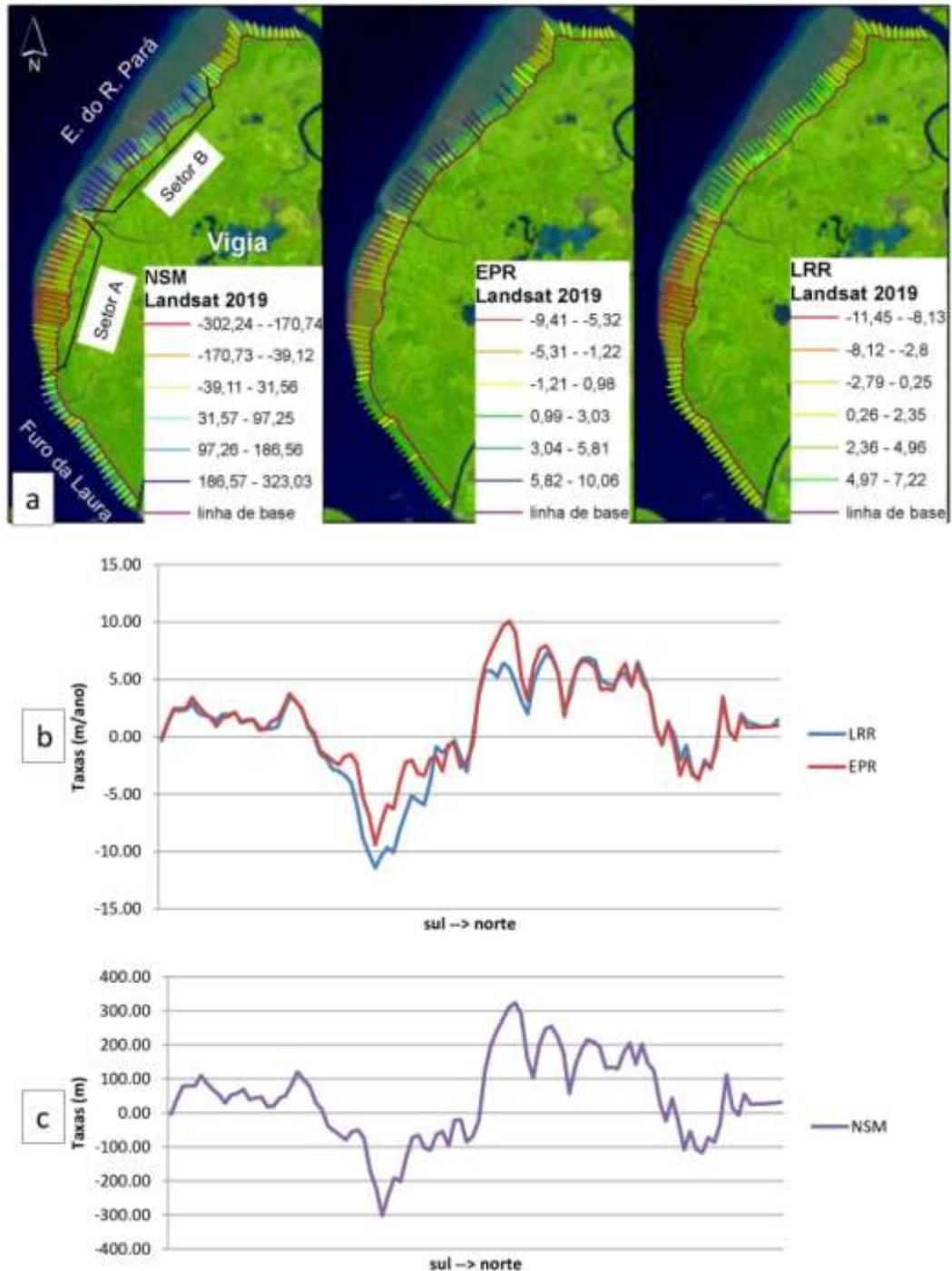


Figura 4 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC de Vigia. Elaboração: autora

### Evolução da LC de São Caetano de Odivelas

O município de São Caetano de Odivelas é sustentado pelos sedimentos do Quaternário (argilo-arenosos/Pleistoceno e argilo-siltosos/Holoceno). Os Tabuleiros são

representados por baixos platôs com rampas suavemente inclinadas, bordejados por Planícies costeiras estreitas, resultante de processos de acumulação estuarina (El-Robrini *et al.* 2018). Na planície lamosa, os manguezais se distribuem ao longo das margens da foz dos canais de maré e das reentrâncias costeiras (Vale *et al.* 2018).

Na LC (21 km) de São Caetano de Odivelas, foram gerados 215 transectos, com taxa média de variação no parâmetro EPR de 0,40m/ano, no parâmetro LRR 0,25m/ano e no NSM de 13,09m (Tabela 3), sendo assim, os dados mostraram que nesta região predomina a tendência a acreção de acordo com a variação em m/ano. Os transectos em erosão e em acreção representam, respectivamente 54,88% e 45,12% do total.

Tabela 3 - Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para o município de São Caetano de Odivelas. Fonte: Autora.

| <b>São Caetano de Odivelas</b> |         |             |             |
|--------------------------------|---------|-------------|-------------|
|                                | NSM (m) | EPR (m/ano) | LRR (m/ano) |
| Taxa máxima de acreção         | 405,85  | 12,64       | 16,21       |
| Taxa máxima de erosão          | -396,26 | -12,34      | -18,79      |
| Taxa média de acreção          | 118,12  | 3,67        | 3,90        |
| Taxa média de erosão           | -85,32  | -2,66       | -2,75       |
| Taxa média de variação         | 13,09   | 0,40        | 0,25        |

Com relação ao parâmetro NSM, as áreas, com taxa de média de acreção são predominantes (transectos azul claro), entretanto, ocorrem algumas com taxa de alta acreção (transectos azul escuro), sendo que a taxa máxima positiva é de 405,85m (Figura 5a). A taxa média positiva e a taxa média negativa foram respectivamente de 118,12m e -85,32m (Figura 5c).

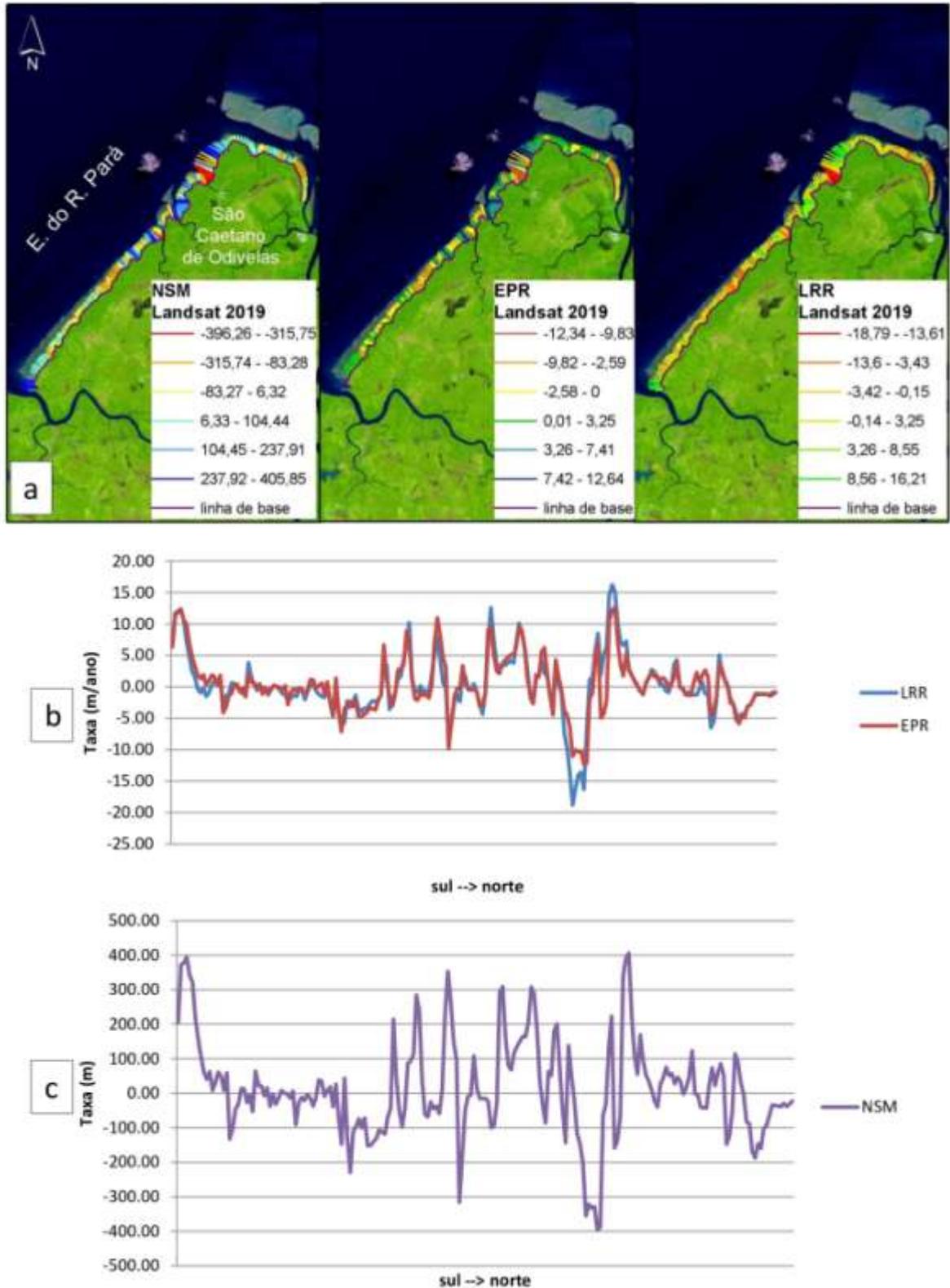


Figura 5 - Transectos com as taxas NSM, EPR e LRR da LC (a) e gráficos com as taxas de variação do LRR e EPR (b) e NSM (c) da LC de São Caetano de Odivelas. Elaboração: autora

O único trecho com taxas de alta erosão (transectos vermelhos) está localizado no setor A da LC da região, com máxima de erosão do EPR de -12,34m/ano e do LRR de -

18,79m/ano e um ponto com alta acreção (transectos verdes) está no setor B, uma reentrância com influencia de um afluente do estuário do rio Pará (Figuras 6). As taxas médias de erosão são menores (-2,66 m/ano EPR; -2,75 m/ano LRR), se comparadas as taxas médias de acreção (3,67m/ano EPR; 3,90 m/ano LRR).

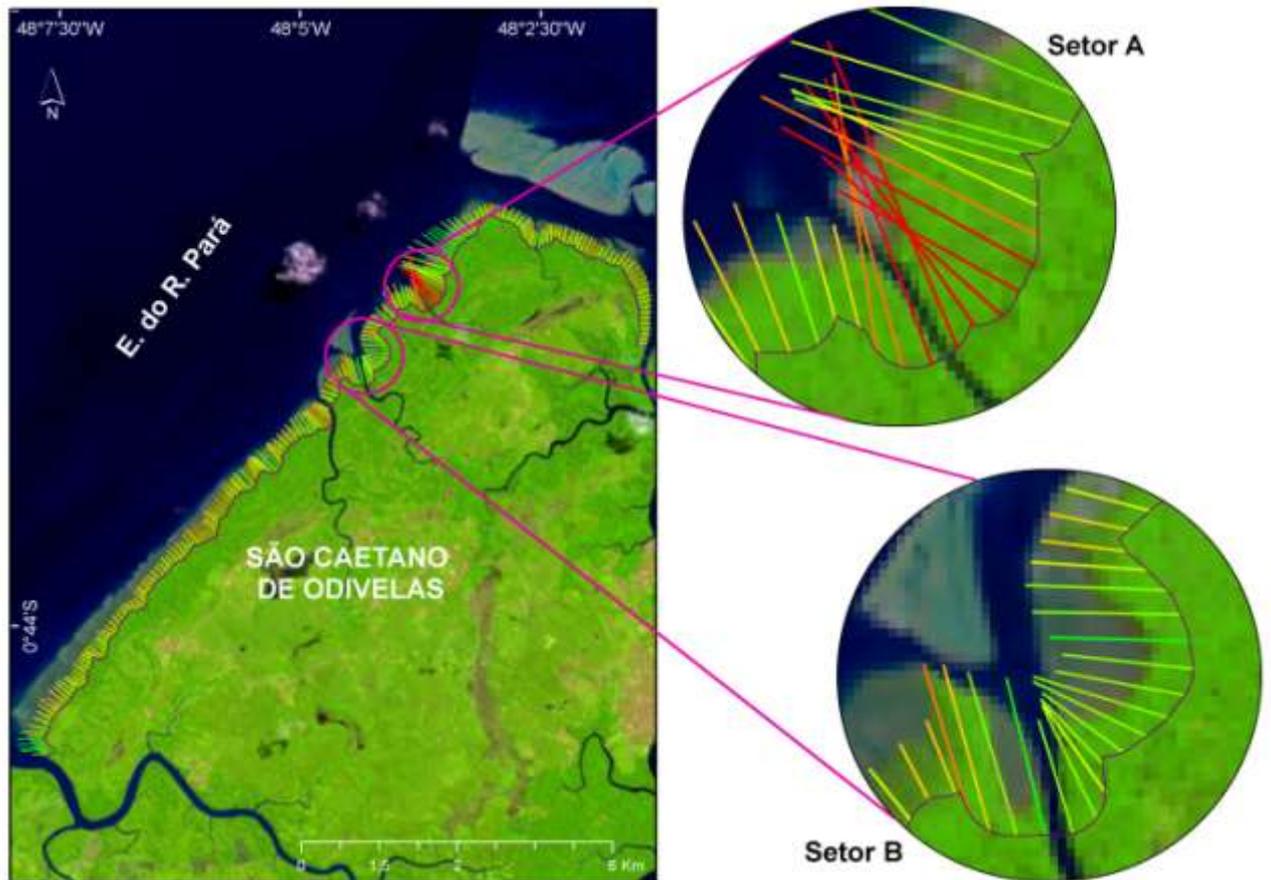


Figura 6 - Localização dos setores A e B em São Caetano de Odivelas. Elaboração: autora

## DISCUSSÃO

O DSAS é um complemento do ArcGIS do Environmental System Research Institute (ESRI) criado em 1992, juntamente com os parâmetros EPR, NSM e LRR tem sido muito utilizado em vários países (Almonacid-Caballer *et al.* 2016; Anthony, 2019; Din Hashmi e Ahmad, 2018; Kabir *et al.* 2020; Mishra *et al.* 2019; Muskananfola, 2020) inclusive no Brasil (Lemos e Sopchaki, 2020; Quadrado, 2021; Rabelo *et al.* 2021; Santos *et al.* 2021; Santos e Bonetti, 2018). Essa ferramenta tem cumprido com a sua função de obter excelentes resultados, mais rápidos e precisos das mudanças da LC em regiões tropicais.

Nos últimos 20 anos o interesse em avaliar as mudanças na LC aumentou devido à percepção da comunidade científica em relação a crescente erosão e a maior capacidade de utilizar instrumentos e dados de maior precisão nas pesquisas. O avanço tecnológico permitiu

o uso de imagens de satélite como o Landsat e ferramentas como o DSAS na observação das mudanças costeiras para fins de uma gestão sustentável e mitigação das mudanças climáticas (Apostolopoulos e Nikolakopoulos, 2021; MISHRA *et al.* 2020).

Na margem leste do estuário inferior do rio Pará a tendência é de acreção. Os dois municípios apresentam taxas médias de variação positiva, ou seja, apesar de ainda existirem áreas pontuais de erosão, a acreção predomina na maior parte das LC's com taxas de até 2m/ano. Neste trecho de estuário da margem leste, as condições hidrodinâmicas são baixas e a descarga fluvial ( $20,946 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) permite a deposição maior de sedimentos. A alta intrusão salina (110 km) no período de baixa vazão do estuário contribui com a instalação de manguezais. De acordo com Luz e Teixeira (2019), os estuários tropicais possuem mata ciliar composta, em grande parte, por mangue, que desempenha função considerável na hidrologia de uma bacia hidrográfica, na manutenção da qualidade da água, estabilidade dos solos para a contenção da erosão e retenção dos sedimentos.

Em Vigia, as áreas em acreção predominam, porém a forma convexa da LC permite a formação de dois setores distintos subsequentes. O setor A com forma mais projetada ao estuário permite alta erosão, ou seja, diminuição de áreas de manguezal e retirada de sedimentos e o setor B de alta acreção, com maior acumulação de sedimentos oriundos.

Em Vigia, a maré e descarga fluvial contribuem para o fluxo de sedimentos na LC. Na margem a leste do Furo da Laura a média de acreção da LC ocorre em condições de forte hidrodinâmica, tendo em vista a velocidade e intensidade das correntes de maré no estuário do rio Pará e no Furo da Laura (Lima *et al.* 2015).

A LC em São Caetano de Odivelas apresenta áreas em erosão e em acreção sucessivos, porém as taxas médias de variação não chegam a 1m/ano o que indica uma estabilidade da LC. A presença de manguezais pode explicar a pouca variação da LC, pois os ecossistemas de manguezal funcionam como uma barreira natural às ondas, correntes de maré e ventos (Das, 2020).

No estuário do rio Pará, as principais forçantes são as marés semidiurnas e correntes de maré que influenciam na erosão e acreção na LC (Carneiro *et al.* 2020; Corrêa, 2005). Nos municípios as áreas de erosão são pontuais (setor A de Vigia; setor A de São Caetano de Odivelas), relacionadas à morfologia local e a presença de canais de maré que tornam essas áreas mais expostas às correntes de marés. A hidrodinâmica atua com maior intensidade nas áreas de erosão, contribuindo com a diminuição dos mangues nas margens.

As estações chuvosa e seca influenciadas pela ZCIT também são relevantes na vazão do estuário. Processos semelhantes acontecem em trechos do setor Flúvio-Marítimo paraense,

onde as forçantes como as marés e correntes são os maiores modificadores da LC (Baía *et al.* 2021; Conti e Rodrigues, 2011; Ramos e Ranieri, 2021; Rodrigues e Souza Filho, 2011).

## CONCLUSÃO

O sensoriamento remoto combinado com ferramentas como o DSAS é uma excelente opção para a análise das mudanças costeiras em um médio período. Essa metodologia indireta, apesar de suas limitações (média resolução, períodos com alta porcentagem de nuvens) permite o diagnóstico das áreas de erosão e de acreção e a evolução da LC em uma maior escala temporal.

A margem adjacente à foz Estuário do rio Pará dispõe de uma dinâmica relacionada à sua morfologia e sua hidrodinâmica. A baixa hidrodinâmica na margem contribui para uma maior acreção da LC, os canais de maré que recortam esta margem contribuem para chegada desses sedimentos assim como a dinâmica na foz do estuário. Em contraponto áreas mais expostas às correntes de maré sofrem com uma maior erosão, sendo estes setores também relacionados à morfologia da LC do município como é o caso de Vigia.

Esses resultados corroboram para a interpretação da dinâmica da LC na foz de estuários e contribuem com dados relevantes para programas como o projeto Orla, Procosta e GERCO (Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro) que buscam um gerenciamento costeiro mais eficaz.

## REFERÊNCIAS

ALMONACID-CABALLER, J. *et al.* Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. **Marine Geology**, [S. l.], v. 372, p. 79\_88, fev. 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025322715300864>. Acesso em: 12 jan. 2022.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 423\_434, 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862012000400006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862012000400006&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 10 dez. 2021.

ANTHONY, E. J. Overview of the Monsoon-influenced Ayeyarwady River delta, and delta shoreline mobility in response to changing fluvial sediment supply. **Marine Geology**, [S. l.] p. 14, 2019.

APOSTOLOPOULOS, D.; NIKOLAKOPOULOS, K. A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years. **European Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 240–265, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/22797254.2021.1904293>. Acesso em: 11 jan. 2022.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Atlas dos manguezais do Brasil. [S. l.: s. n.], 2018.

BAÍA, L. B.; RANIERI, L. A.; ROSÁRIO, R. P. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia oriental. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 1, p. 231–244, 2021.

BROOKS, S.; POLLARD, J.; SPENCER, T. Contemporary challenges for Shoreline Change Analysis. ADS Bibcode: 2020EGUGA..22.8153B, , p. 8153, 1 maio 2020. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020EGUGA..22.8153B>. Acesso em: 5 jun. 2020.

CAI, W. *et al.* Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, [S. l.], v. 1, n. 4, p. 215–231, abr. 2020. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/s43017-020-0040-3>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CANESTRELLI, A.; LANZONI, S.; FAGHERAZZI, S. One-dimensional numerical modeling of the long-term morphodynamic evolution of a tidally-dominated estuary: The Lower Fly River (Papua New Guinea). **Sedimentary Geology**, [S. l.], v. 301, p. 107–119, mar. 2014. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0037073813001334>. Acesso em: 8 fev. 2022.

CARNEIRO, A. G.; PRESTES, Y. O.; ROLLNIC, M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. **Ocean and Coastal Research**, [S. l.], v. 68, 2020. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2675-28242020000100206&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2675-28242020000100206&tlng=en). Acesso em: 29 nov. 2021.

CASSIANO, G. F.; SIEGLE, E. Migração lateral da desembocadura do Rio Itapocú, SC, Brasil: evolução morfológica e condicionantes físicas. **Revista Brasileira de Geofísica**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 537–549, dez. 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2010000400001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2010000400001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en). Acesso em: 11 jan. 2022.

CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niña. 2021. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 2 fev. 2021.

CONTI, L. A.; RODRIGUES, M. Variação da Linha de Costa na Região da Ilha dos Guarás – PA Através de Análise de Série Temporal de Imagens de Satélites. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], , p. 922–937, 2011.

CORRÊA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 32, n. 2, p. 109–118, 2005. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/19551>. Acesso em: 29 nov. 2020.

DAS, S. Does mangrove plantation reduce coastal erosion? Assessment from the west coast of India. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 58, 10 maio 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01637-2>. Acesso em: 3 jan. 2022.

DIN HASHMI, S. G. M.; AHMAD, S. R. GIS-Based Analysis and Modeling of Coastline Erosion and Accretion along the Coast of Sindh Pakistan. **Journal of Coastal Zone Management**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2018. Disponível em: <https://www.omicsonline.org/open->

access/gisbased-analysis-and-modeling-of-coastline-erosion-and-accretion-along-the-coast-of-sindh-pakistan-2473-3350-1000455-99392.html. Acesso em: 12 jan. 2022.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 6 jan. 2022.

DOS SANTOS, J. S. *et al.* Climatologia da Amazônia Oriental: Uso de prognósticos climáticos como ferramenta de prevenção de ameaças naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1853–1871, 6 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge/article/view/238440>. Acesso em: 28 nov. 2021.

EL-ROBRINI, M. *et al.* Panorama da erosão costeira, Pará, Brasil. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018a. p. 65–166.

FRANÇA, C. *et al.* Erosão da orla costeira grande-bispo, ilha de Mosqueiro, Belém - PA, através da análise de indicadores. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [S. l.], v. 24, p. 20, 9 jul. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/geografia/article/view/33940>. Acesso em: 29 nov. 2021.

FRANÇA, C. F. D.; SOUZA FILHO, P. W. M. E. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagens Landsat. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 127–136, 1 jun. 2003. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9877/9166>. Acesso em: 29 nov. 2021.

HIMMELSTOSS, E. A. *et al.* **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. U.S. Geological Survey Open-File Report, n. 1179. [S. l.: s. n.], 2018.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Normais climatológicas do Brasil (1981-2010). 2021b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 18 dez. 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. Tempo: Gráficos anuais. 2021a. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/GraficosAnuais/A201>. Acesso em: 22 jun. 2020.

KABIR, Md. A. *et al.* Assessing the shoreline dynamics of Hatiya Island of Meghna estuary in Bangladesh using multiband satellite imageries and hydro-meteorological data. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], v. 35, p. 101167, mar. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352485518304109>. Acesso em: 12 jan. 2022.

LEMKE, N. *et al.* Morfodinâmica da foz do Arroio Carahá em laguna costeira micromaré (Lagoa dos Patos, sul do Brasil). **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 48, n. 3, 30 set. 2021. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/111039>. Acesso em: 11 jan. 2022.

LEMO, A. L.; SOPCHAKI, C. Contribuição da ferramenta digital shoreline analysis system nos estudos de dinâmica costeira no estado do Ceará, Brasil. **Revista Equador**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 61–81, 2020.

LIMA, M. W. *et al.* Análise temporal da composição granulométrica de um estuário amazônico, Pará, Brasil. **Scientia Plena**, [S. l.], v. 11, n. 01, p. 11, 2015.

LUZ, G.C.B. da; TEIXEIRA, S.F. Importância do Manguezal e das Barreiras Físicas na Contenção de Resíduos Sólidos nas Margens de um Estuário Urbano. *Ciência Geográfica*. Vol. XXIII - (2), p. 790-803, 2019

MARTINS, L. R.; TABAJARA, L. L.; FERREIRA, E. R. Linha de Costa: problemas e estudos. **GRAVEL**, Porto Alegre, v. 2, p. 40–56, 2004.

MATOS, A. P. de; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa fluvial e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, [S. l.], v. 38, p. 21, 20 jul. 2016. Disponível em: <http://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/19814>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MISHRA, M. *et al.* Response of long- to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 78, n. 11, p. 338, jun. 2019. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-019-8336-7>. Acesso em: 12 jan. 2022.

MISHRA, M. *et al.* The development and research trend of using dsas tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 69–77, 7 jun. 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/juee/article/view/53166>. Acesso em: 2 dez. 2021.

MOREIRA, S. de F. *et al.* A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, [S. l.], v. 1, p. 1–7, 2018. Disponível em: <https://malque.pub/ojs/index.php/mr/article/view/78>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MOURA, M. M. *et al.* Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 651, p. 1639–1651, fev. 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718336866>. Acesso em: 18 dez. 2021.

MUEHE, D.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praias. **Quaternary and Environmental Geosciences**, [S. l.], v. 5, n. 2, 31 dez. 2014. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/35884>. Acesso em: 3 dez. 2021.

MUSKANANFOLA, M. R. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], , p. 9, 2020.

NEVES, S. C. R.; FRANÇA, C. F. de; SILVA, R. R. P. e. Morfologia e dinâmica da orla costeira do Marauá, ilha de Mosqueiro, Belém, Pará. **Geosul**, [S. l.], v. 34, n. 73, p. 107–125, 6 dez. 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/view/1982-5153.2019v34n73p107>. Acesso em: 29 nov. 2021.

OLABARRIETA, M. *et al.* Effects of Density-Driven Flows on the Long-Term Morphodynamic Evolution of Funnel-Shaped Estuaries. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, [S. l.], v. 123, n. 11, p. 2901–2924, nov. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2017JF004527>. Acesso em: 8 fev. 2022.

PRESTES, Y. O. *et al.* A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [S. l.], v. 28, abr. 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581819301004>. Acesso em: 29 nov. 2021.

PRESTES, Y. O. *et al.* The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. **Tropical Oceanography**, [S. l.], v. 45, n. 1, p. 26–37, 7 maio 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/TROPICALOCEANOGRAPHY/article/view/15198>. Acesso em: 29 nov. 2021.

QUADRADO, G. P. Historical and geological assessment of shoreline changes at an urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, [S. l.], , p. 19, 2021.

RABELO, F. D. B.; SILVA, E. V. da; GORAYEB, A. Geotecnologias na análise da dinâmica costeira do estuário do Rio Caeté – Pará I (Edição 530). **Papers do NAEA**, [S. l.], v. 30, n. 1, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpa.br/index.php/pnaea/article/view/11592>. Acesso em: 3 jan. 2022.

RAMOS, C. C.; RANIERI, L. A. Morfologia e Sedimentação de uma Praia Estuarina Amazônica (Marahú/PA) Durante Amplitudes de Marés Distintas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 2916–2930, 30 set. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245181>. Acesso em: 21 jan. 2022.

RANIERI, L. A.; EL-ROBRINI, M. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 207–226, 27 fev. 2015. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/78121>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RIBEIRO, S.; VALADÃO, R. Efeitos marinho e fluvial na dinâmica dos ambientes inundáveis do Estuário Superior do Rio Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 22, n. 4, 15 set. 2021. Disponível em: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/2017>. Acesso em: 3 dez. 2021.

RIZZO, A.; ANFUSO, G. Coastal Dynamic and Evolution: Case Studies from Different Sites around the World. **Water**, [S. l.], v. 12, n. 10, p. 2829, 12 out. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2829>. Acesso em: 29 nov. 2021.

RODRIGUES, S.; SOUZA FILHO, P. W. M. Análise da variação da linha de costa a noroeste do Estado do Pará (Baía de Curuçá) através das imagens Landsat TM e ETM+ e CBERS 2B. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba, n. XV, p. 5061, 2011.

ROLLNIC, M. *et al.* Áreas de estudo. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 1, p. 26–45.

ROSÁRIO, R. P. *et al.* Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 75 (10075), p. 128–132, 1 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/SI75-026.1>. Acesso em: 24 dez. 2021.

SANTOS, C. *et al.* Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. **Science of The Total Environment**, [S. l.], v. 769, 2021.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720384229>. Acesso em: 29 nov. 2021.

SANTOS, E. C.; BONETTI, J. Análise da taxa de variação da linha de costa da Enseada de Tijucas (SC) em diferentes escalas temporais como indicadora de suscetibilidade costeira. **Quaternary and Environmental Geosciences**, [S. l.], v. 9, n. 2, 13 ago. 2018. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/abequa/article/view/53650>. Acesso em: 12 jan. 2022.

SANTOS, V. **Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto**. 2006. 306 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H.; LARA, R. Estratégias y medidas de protección contra desastres naturales en la zona costera de la región Amazónica, Brasil. **Terra Livre**, Goiânia, v. 1, n. 26, p. 109–125, 2006.

TEIXEIRA, S. G.; NASCIMENTO BANDEIRA, Í. C.; DANTAS, M. E. Shoreline Variation and Identification of Local Erosion Ge indicators on the Brazilian Amazon Coast. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 37, n. 6, 17 ago. 2021. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-37/issue-6/JCOASTRES-D-20-00164.1/Shoreline-Variation-and-Identification-of-Local-Erosion-Ge indicators-on-the/10.2112/JCOASTRES-D-20-00164.1.full>. Acesso em: 31 dez. 2021.

TOURE, S. *et al.* Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 75, 5 fev. 2019. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2220-9964/8/2/75>. Acesso em: 2 dez. 2021.

VALE, J. R. B. *et al.* Análise espacial das unidades de paisagem da reserva extrativista marinha Mocapajuba, zona costeira do nordeste paraense. **Revista Cerrados**, [S. l.], v. 16, n. 02, p. 153–173, 9 mar. 2018. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/1259>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VASCONCELOS, A. O. *et al.* Caracterização do Uso e Cobertura do Solo e da Linha de Costa. **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020. v. 2, p. 911–1029.

WANG, C. *et al.* Deriving Natural Coastlines Using Multiple Satellite Remote Sensing Images. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 102, n. sp1, p. 296–302, 14 dez. 2020. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-102/issue-sp1/SI102-036.1/Deriving-Natural-Coastlines-Using-Multiple-Satellite-Remote-Sensing-Images/10.2112/SI102-036.1.full>. Acesso em: 2 dez. 2021.

WRIGHT, L. D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. **Geological Society of America Bulletin**, [S. l.], v. 88, n. 6, p. 857, 1977. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/88/6/857-868/202170>. Acesso em: 8 fev. 2022.

### ARTIGO 3

## DINÂMICA DAS MARGENS (LESTE E OESTE) DO ESTUÁRIO INFERIOR DO RIO PARÁ (AMAZÔNIA ORIENTAL/BRASIL)

### RESUMO

A Linha de Costa (LC) é atualmente um dos indicadores mais utilizados para analisar as mudanças costeiras. Nela pode ser verificado como as forçantes meteorológicas (pluviosidade, ventos, eventos extremos), fluviais (vazão) e marinhas (marés, correntes, ondas) afetam a dinâmica da zona costeira de uma área. A identificação dos locais que sofrem com os processos de erosão e/ou acreção da LC nas margens do Estuário do Rio Pará se torna interessante, pois observam-se que os processos ocorrem de maneira distinta, onde as áreas de alta erosão estão relacionadas à morfologia do local e localização da área estando mais expostas as forçantes. Utilizando o Digital Shoreline Analysis System (DSAS), para calcular com maior precisão as taxas de mudanças da LC, verificou-se que na margem oeste a taxa máxima de erosão é de -1247,46 m e a taxa máxima de acreção é de 1.012,72 m, enquanto na margem leste as taxas máximas de acreção e de erosão são de 405,85 m e -396,26 m, respectivamente. Evidenciando assim que a margem oeste possui uma tendência à erosão e a margem leste uma tendência a acreção.

**Palavras-chaves:** linha de costa, DSAS, sensoriamento remoto

### ABSTRACT

The shoreline (SL) is currently one of the most used indicators when analyzing coastal changes. It can be seen how meteorological forcing (rainfall, winds, extreme events), fluvial (flow) and marine (tides, currents, waves) affecting the dynamics of the coastal zone of an area. The identification of sites that suffer from the erosion and/or accretion processes of the SL on the margin of the Pará River Estuary becomes interesting, as we can observe that the processes occur in a different way, where areas of high erosion are related to the morphology of the location and location of the area being more exposed to forcings. Using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS), to more accurately calculate the rates of shoreline change, we found that on the west margin the maximum erosion rate is -1247.46 m and the maximum accretion rate is 1012.72 m, while on the east bank the maximum accretion and erosion rates are 405.85 m and -396.26 m, respectively. This shows that the west margin has a tendency to erosion and the east margin has a tendency to accretion.

**Key-words:** Shoreline, DAS, Remote sensing

### INTRODUÇÃO

A Linha de Costa (LC) é definida como a linha de contato entre o continente e a superfície da água. A detecção e monitoramento da LC são de grande importância econômica e social, especialmente quando as áreas costeiras são as mais prejudicadas com as mudanças climáticas (Toure *et al.* 2019). Para uma melhor gestão costeira é necessário conhecer a evolução da LC em uma escala de tempo para analisar as mudanças que possam ter ocorrido relacionados à dinâmica natural e a ação antrópica.

Com relação à dinâmica natural e ação antrópica na LC, a dinâmica natural está relacionada às ondas, marés, correntes, ventos e chuvas, que contribuem a configurar as feições presentes na LC ao longo do tempo (França e Souza Filho, 2003; Guimarães, 2019; Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Vasconcelos *et al.* 2020).

Considerando as ações antrópicas, estas são relacionadas a construções de portos e vilas nas ZC's, que em geral, desconsideram as forças naturais, permitindo assim a construção de uma infraestrutura e o estabelecimento de populações muito próximas a LC e dos problemas derivados dessas ações. (Mishra *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021; Szlafsztein *et al.* 2006).

A posição da LC é variável no tempo e no espaço e é utilizada como indicador de mudanças geomorfológicas. Sua movimentação na direção da parte interna do continente, ao longo de anos e décadas, reflete um período de recuo, ou seja, de erosão. Ao contrário, seu deslocamento temporal em direção contrária, representa uma fase de acreção. Por fim, a ausência de registro de deslocamento sugere estabilidade morfológica da LC (França e Souza Filho, 2003). As mudanças que ocorrem na LC são determinadas pelos processos de erosão e/ou de acreção, que mantém as ZC's em constante transformação, seja em um curto, médio ou longo período.

Às margens do Estuário inferior do rio Pará, a Oeste, localizam-se Soure e a Leste São Caetano de Odivelas e Vigia (Figura 1). O estuário do rio Pará é um dos estuários mais importantes da região amazônica flui para o oceano Atlântico e deságua na Plataforma Continental do Amazonas. As forças (correntes, marés, descarga fluvial, ventos) neste estuário vêm contribuindo na evolução (erosão e/ou acreção) das suas margens (Barbosa, 2007; Prestes *et al.* 2017; Rosário *et al.* 2016).

Para a análise da dinâmica das margens do estuário inferior do rio Pará foi utilizado como base os dados de Menezes (2021) (Evolução Multitemporal da Linha de Costa (1972-2040) do município de Soure, Ilha do Marajó (Amazônia - Brasil)) e os dados de Guimarães (2022) (Detecção das mudanças costeiras na margem leste do estuário do rio Pará: uma análise multitemporal (1987-2019) utilizando sensoriamento remoto), ambos utilizam a extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS). O DSAS é uma extensão de software disponível que é compatível com o software Esri Geographic Information System (ArcGIS), que gera cálculos estatísticos de taxas de mudanças para uma série temporal de dados vetoriais da linha costeira (Himmelstoss *et al.* 2018; Mishra *et al.* 2020; Toure *et al.* 2019).

O objetivo deste artigo é de comparar as mudanças na LC das margens Leste e Oeste do Estuário do rio Pará.

### Localização da área de estudo

Às margens do estuário inferior do rio Pará estão assentados os seguintes municípios: A Oeste Soure e a Leste São Caetano de Odivelas e Vigia (Figura 1). A LC dessas margens recorta trechos altos (Tabuleiro Costeiro) e rebaixados (planície costeira), com manguezais e onde alguns canais de maré (exemplo Furo da Laura) recortam os municípios.

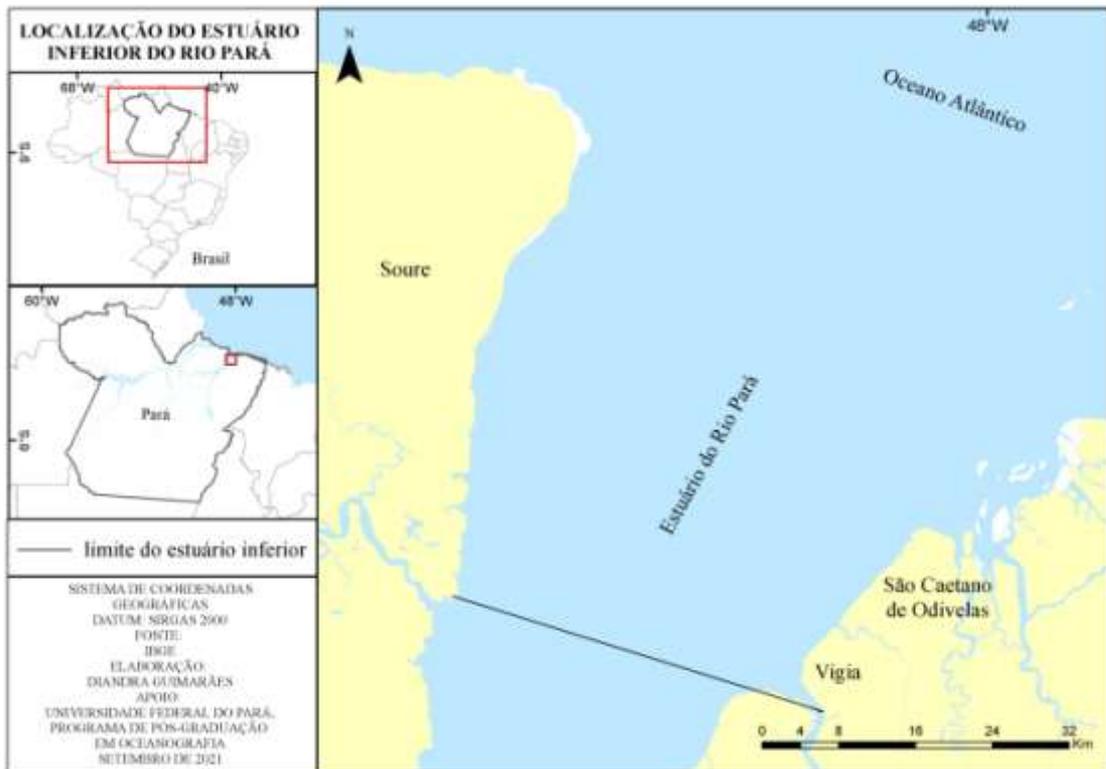


Figura 1 - Localização dos municípios da margem Leste e Oeste do estuário inferior do rio Pará. Elaboração: autora

### Caracterização da área de estudo

#### Parâmetros climáticos e meteorológicos

O clima dessa região é do tipo Af (equatorial úmido) segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Peel *et al.* 2007), com temperatura média anual entre 24°C e 32°C, onde as maiores temperaturas ocorrem durante a estação seca entre junho e novembro. O volume da precipitação anual é entre 2.000 e 3.000 mm, sendo que 70% ocorrem durante a estação chuvosa, entre dezembro e maio, e está diretamente influenciado pela migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na direção meridional (Amanajás e Braga, 2012; Dos Santos *et al.* 2019; INMET, 2021; Matos e Cohen, 2016; Ribeiro e Valadão, 2021).

Os ventos predominantes na região são os alísios de nordeste que apresentam uma maior velocidade na estação seca, variando entre 2m.s<sup>-1</sup> e 7m.s<sup>-1</sup> (CPTEC/INPE, 2021; DHN,

2022; INMET, 2021; Rollnic *et al.* 2020). A área de estudo foi influenciada pelos eventos extremos durante os anos de 1987, 1993, 2004 e 2019 (El Niño - EN) e 1999 e 2008 (La Niña - LN).

Estudos sobre a influência do EN e LN na bacia amazônica indicaram que os maiores impactos desses fenômenos estão relacionados às mudanças no regime pluviométrico e fluviométrico (Cai *et al.* 2020; CPTEC/INPE, 2021; Moura *et al.* 2019; Santos, 2006). Durante a ocorrência de um EN moderado, a precipitação tende a ser menor que a normal e durante a ocorrência de um evento LN moderado, a precipitação tende a ser maior que a normal. Essas mudanças na precipitação irão influenciar na descarga dos rios (refletindo nos processos hidrodinâmicos de transporte e deposição da região), na cobertura da vegetação, nas atividades econômicas e principalmente no clima da região (Moreira *et al.* 2018; Moura *et al.* 2019; Santos, 2006).

### **Condições Hidrológicas**

O Estuário do rio Pará é classificado como um grande sistema estuarino tropical com mais de 300 km de extensão longitudinal e foz de 60 km de largura. A descarga líquida do rio Pará é de  $20,946\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  com descarga instantânea no estuário, com  $4,0 \times 10^5 \text{m}^3 \text{s}^{-1}$  (Prestes *et al.* 2017).

### **Forçantes oceanográficas**

O estuário do rio Pará é característico de planície costeira, dominado por marés, ventos e ondas que se formam no interior do próprio estuário, gerando um ambiente flúvio-marinho peculiar (França e Pimentel, 2012; Prestes *et al.* 2017; Ribeiro e Valadão, 2021; Rosário *et al.* 2016). A maré apresenta altura de 5m (macro) na foz e 1,5m (meso) na parte superior do estuário do rio Pará (DHN, 2022).

As correntes predominantes são de maré semidiurna e as correntes fluviais são induzidas pelo fluxo da descarga fluvial. A velocidade da corrente de maré no estuário do rio Pará é superior a  $2,0 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Prestes *et al.* 2017, 2020; Rosário *et al.* 2016).

No estuário do rio Pará, os sedimentos em suspensão tem origem na ressuspensão do material presente no fundo e de fonte externas, sendo seu principal afluente o rio Tocantins e o rio Amazonas pelo Estreito de Breves (Carneiro *et al.* 2020). Na margem Leste do estuário os sedimentos são mais finos, formada por silte grosso e muito finos e em algumas áreas sedimentos argilosos, depositados por decantação, evidenciando uma margem com baixa hidrodinâmica (Corrêa, 2005).

A salinidade no estuário do rio Pará alterna o seu gradiente, considerando três períodos: baixa vazão, transição e alta descarga. A maior intrusão salina ocorre durante o período de baixa vazão, percorrendo cerca de 130 km (a partir da foz do estuário), no período de transição entre a baixa e alta descarga a intrusão salina ocorre até aproximadamente 110 km e na alta descarga ocorre à intrusão salina em aproximadamente 70 km a partir da foz do estuário (Figura 2) (Rosário *et al.* 2016).

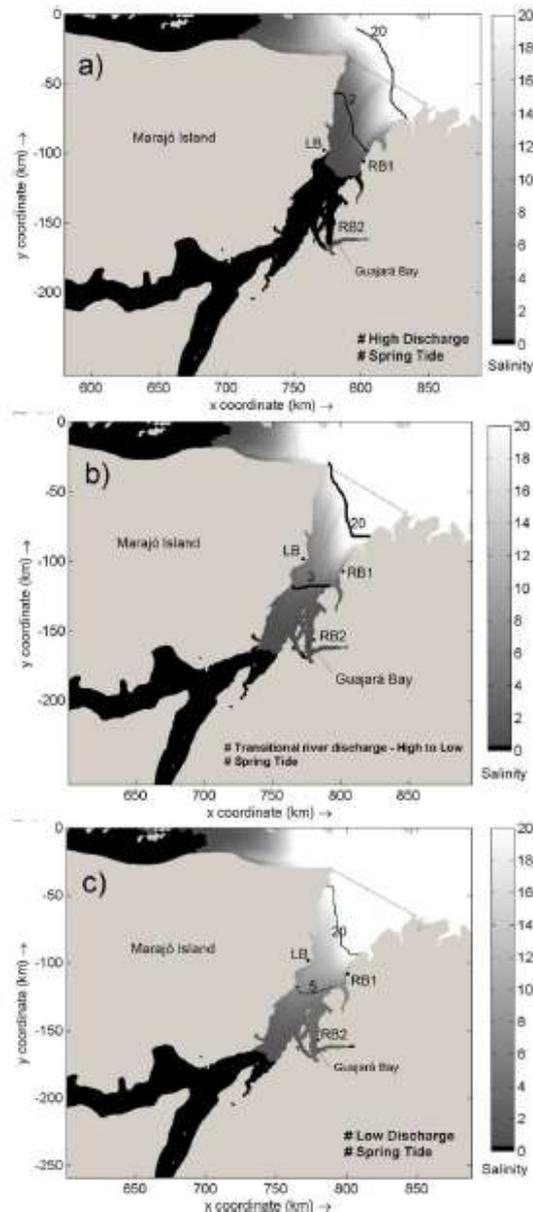


Figura 2 - Resultado da salinidade na: a) alta descarga; b) período de transição e c) baixa descarga. A linha reta na foz do estuário é o ponto de referência para distâncias. Fonte: Rosário *et al.* (2016).

### A margem leste do estuário inferior do rio Pará

Na margem leste a área de estudo constitui os municípios de São Caetano de Odivelas e Vigia. A área de estudo é constituída pelos sedimentos Pós-Barreiras, formados por sedimentos areno-argilosos (Pleistocênio) do Pós-Barreiras I (10 m de espessura) e II (2 a 5m

de espessura) (Barbosa e França, 2006; El-Robrini *et al.* 2018; Picanço, 2013; Ribeiro e Valadão, 2021), separados por uma discordância erosiva.

O Litoral de mangues constitui a LC da área de estudo, e faz parte dos Depósitos Sedimentares Quaternários. Esta é fortemente influenciada por marés, apresentando um conjunto de feições deposicionais de origem fluvial e marinha, caracterizando-as como uma unidade de Planícies Fluviomarina.

Nesta área ocorrem planícies aluviais, estuarinas e costeiras. Esses domínios ocupam um vasto território de terras baixas (0-5° de declividade; topografia <30m) e inundáveis, na interface de domínios continental marinho, recoberto por faixas de manguezais (El-Robrini *et al.* 2018; Rollnic *et al.* 2020).

### **A margem oeste do estuário inferior do rio Pará**

Na margem oeste do estuário a área de estudo se encontra no sudeste do município de Soure, localiza-se na ilha de Marajó, a maior ilha do arquipélago marajoara e a maior ilha estuarina do mundo, é distante a 86 km de capital Belém. O acesso a essa localidade é realizado por via fluvial, aérea e rodoviária (Santana, 2012; França, 2003).

A margem oeste do estuário é formada por tabuleiro costeiro e planície costeira. O tabuleiro costeiro é constituído por sedimentos da Formação Barreiras e do Pós-Barreiras que dão origem às falésias de até 6m de altura. A planície tem cotas topográficas abaixo de 5m, sendo alcançada pela maré, onde surge o desenvolvimento de manguezais e cordões de praia.

É formada por sedimentos lamosos e arenosos de origem fluviomarina (França, 2003; França e Souza Filho, 2003). Ocorrem vários canais de maré, que recortam a ilha e deságuam no estuário do rio Pará, com segmentos retilíneos e meandantes, um dos principais é o Paracauari que separa as cidades de Soure e Salvaterra (França, 2003).

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A pesquisa realizada na margem leste do estuário foi baseada na aquisição de imagens de satélite Landsat TM (1987; 1993; 1999; 2004; 2008) e Landsat OLI (2013 e 2019), e na margem oeste foram utilizadas imagens Landsat MSS (1972; 1994), Landsat TM (1985; 2004; 2009) e Landsat OLI (2020) do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS), adquiridas georreferenciadas.

Após a vetorização direta da LC sobre as imagens, houve a sobreposição dos vetores dos anos analisados no ArcMap 10.5 do software ArcGis. A partir da técnica do DSAS (Digital Shoreline Analysis System) foram aplicados os parâmetros NSM (*Net Shoreline*

*Envelope*), LRR (*Linear Regression Rate-of-Change*) e EPR (*End Point Rate*) por se adequarem a análise necessária da linha de costa, tendo como linha de base a parte continental e os transectos alinhados a cada 100m.

O NSM é a distância entre as linhas costeiras mais antigas e mais novas para cada transecto, o EPR é calculado a partir da divisão da LC a partir do tempo decorrido entre a linha mais antiga e a mais recente no componente de análise e o LRR determinada a taxa de mudança ajustando uma regressão linear a todos os pontos da costa para um transecto gerado no processamento (Himmelstoss *et al.* 2018).

Os resultados das variações em metros nos anos totais de análise (NSM) e taxas médias de variação por ano (LRR) se enquadram em valores positivos indicando um deslocamento da linha em direção ao mar ao longo do transecto e valores negativos indicam um deslocamento em direção a terra.

## **RESULTADOS**

### **Margem oeste**

A análise no sudoeste de Soure foi baseada num total de 160 transectos, onde foram identificados 46 transectos com tendência a acreção (29%) e 114 transectos com tendência a erosão (71%) e taxa média da LC de -2,1 m/ano. No parâmetro NSM a taxa média é de -113,81 m, onde a taxa máxima é de -1247,46 m, com média de -193,5 m. A acreção da LC se configura com taxa máxima de 1012,72 m, média inferior a de erosão, com 110,07 m (Menezes, 2021).

A partir dos métodos do EPR e LRR, configura-se um vetor de ampla erosão neste seguimento. Os dados quantificados identificam uma taxa média de variação de -2,38 m/ano e -2,13 m/ano, no EPR e LRR, respectivamente. A erosão máxima atinge a de -26,6 m/ano, variando em média -3,53 m/ano, entre os valores negativos do EPR e, em contraste, o LRR apresenta -29,41 m/ano com média de -3,94 m/ano dentre os valores de caráter erosivo. Os valores de acreção da LC mostram que a taxa máxima é de 21,59 m/ano, com média de 3,82 m/ano e 2,34 m/ano, para os métodos subjacentes evidenciados (Tabela 1) (Menezes, 2021).

### **Margem leste**

Na margem leste somaram-se um total de 317 transectos, 148 transectos com tendência a erosão (47%) e 169 transectos com tendência a acreção (53%), obteve uma taxa média de variação de 21,94 m/ano, com taxa média de acreção e de erosão em 116,65 m e -86,20 m, respectivamente.

No estuário inferior houve maior tendência a acreção, onde ocorreu taxa média de variação de 0,68 m/ano e máxima de 12,64 m/ano no EPR e média de variação de 0,37 m/ano e máxima de 3,57 m/ano no LRR. As taxas máximas de acreção e de erosão são de 405,85 m e -396,26 m, respectivamente, evidenciando a tendência a acreção (Tabela 1).

Tabela 1- Taxas de mudanças da linha de costa calculadas pelos parâmetros NSM, EPR E LRR para a margem leste do estuário inferior do rio Pará. Fonte: Autora.

**Comparação das margens leste e oeste do estuário inferior do rio Pará**

|                               | NSM (m) |          | EPR (m/ano) |       | LRR (m/ano) |        |
|-------------------------------|---------|----------|-------------|-------|-------------|--------|
|                               | leste   | oeste    | leste       | oeste | leste       | oeste  |
| <b>Taxa máxima de acreção</b> | 405,85  | 1012,72  | 12,64       | 21,59 | 16,21       | 5,83   |
| <b>Taxa máxima de erosão</b>  | -396,26 | -1247,46 | -12,34      | -26,6 | -18,79      | -29,41 |
| <b>Taxa média de acreção</b>  | 116,65  | 110,07   | 3,65        | 3,82  | 3,57        | 2,34   |
| <b>Taxa média de erosão</b>   | -86,20  | -193,5   | -2,69       | -3,53 | -3,05       | -3,94  |
| <b>Taxa média de variação</b> | 21,94   | -113,81  | 0,68        | -2,38 | 0,37        | -2,13  |

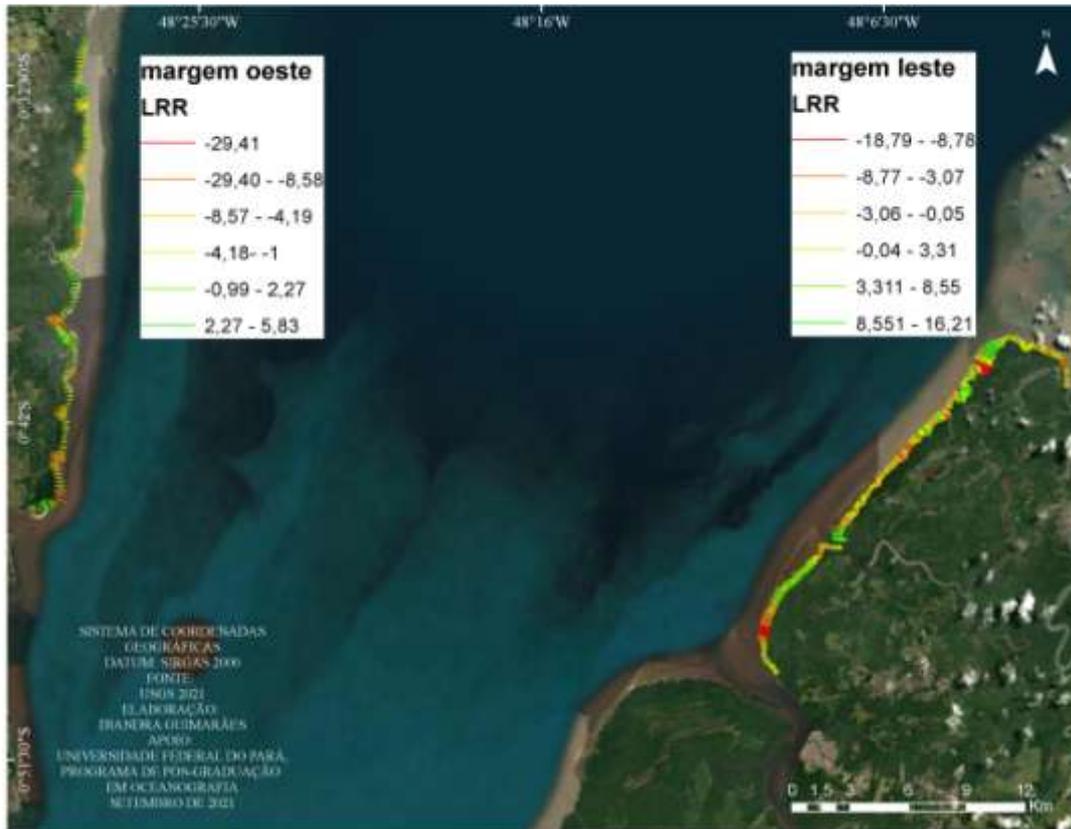


Figura 3 - Transectos com as taxas de LRR da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora.

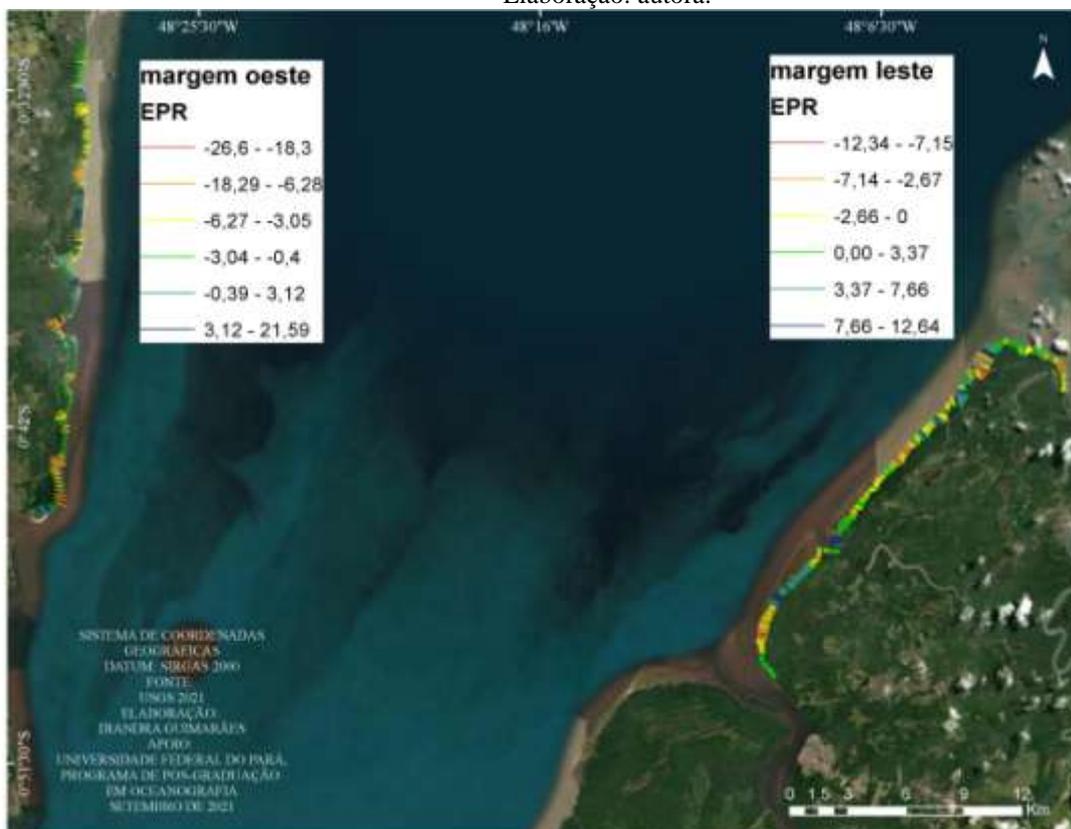


Figura 4 - Transectos com as taxas de EPR da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora.

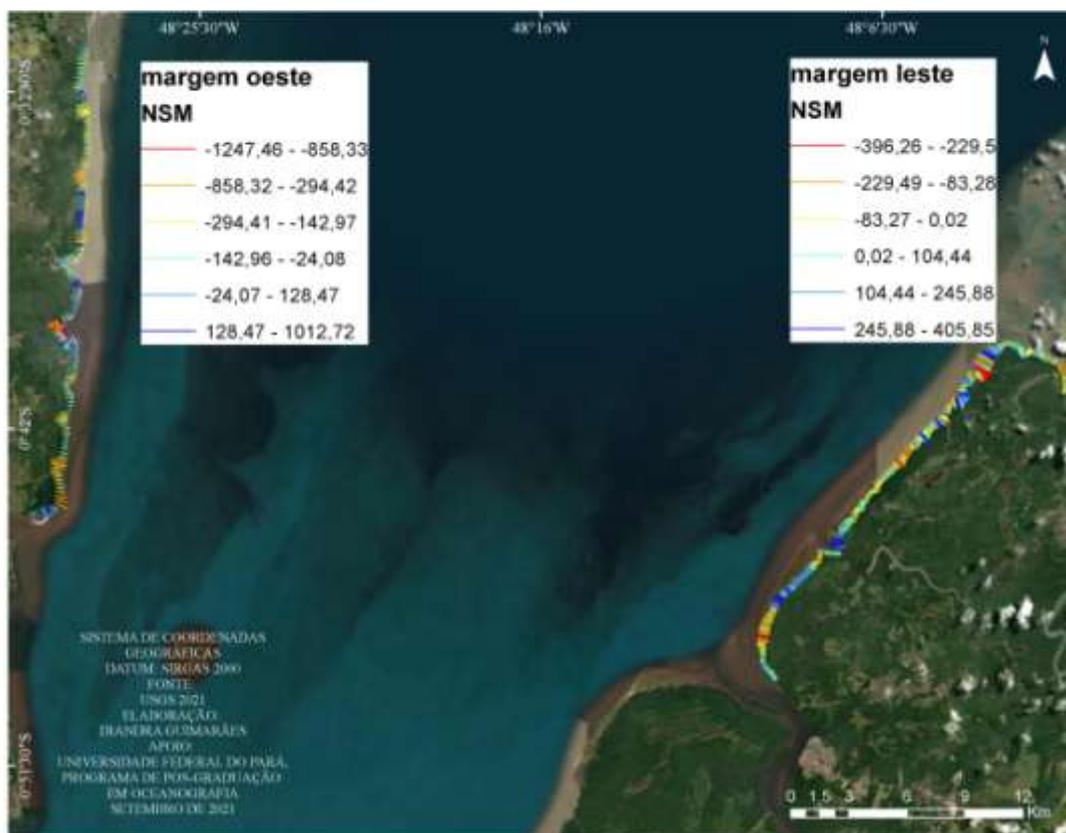


Figura 5 - Transectos com as taxas de NSM da LC das margens oeste e leste do Estuário do Rio Pará. Elaboração: autora.

## DISCUSSÃO

A utilização do DSAS permitiu uma maior confiabilidade na análise da mudança da LC das margens Leste e Oeste do Estuário do rio Pará. Esta extensão criada em 1992 vem sendo utilizada por pesquisadores de vários países (Almonacid-Caballer *et al.* 2016; Anthony, 2019; Din Hashmi e Ahmad, 2018; Dutta *et al.* 2022; Kabir *et al.* 2020; Mishra *et al.* 2019; Muskananfola, 2020), inclusive Do Brasil (Estevam *et al.* 2021; Lemos e Sopchaki, 2020; Quadrado, 2021; Rabelo *et al.* 2021; Santos *et al.* 2021; Santos e Bonetti, 2018). Essa ferramenta tem cumprido com a sua função de obter excelentes resultados, mais rápidos e precisos das mudanças da LC em regiões tropicais.

O estuário do rio Pará em seu trecho inferior é dominado por macromarés que alcançam 5m, correntes de maré de  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  e uma alta descarga fluvial na estação chuvosa com  $300.000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , possibilitam que a LC das margens Leste e Oeste passem por mudanças significativas.

A posição das margens é outro fator levado em consideração nas mudanças, pois a margem Oeste é mais exposta às forçantes, que contribuem para uma maior erosão e possui uma morfologia do estuário nesse trecho com uma profundidade de -23m (Corrêa, 2005),

enquanto a margem Leste é mais protegida, contribuindo na retenção de sedimentos e consequentemente na acreção deste trecho.

No geral, a margem Oeste apresenta uma tendência à erosão devido à hidrodinâmica forte na região, relacionada à presença de bancos arenosos e canais, onde ocorrem correntes de maré e ondas (Corrêa, 2005). Enquanto a margem Leste apresenta uma tendência a acreção devido estar sobre influência de hidrodinâmica baixa, que contribua na deposição dos sedimentos (Corrêa, 2005). As planícies formadas por manguezais auxiliam na retenção dos sedimentos finos e na proteção da LC.

Na margem oeste observa-se a tendência à erosão como consequência da hidrodinâmica alta, os sedimentos da margem são constituídos principalmente por areia média a fina (Corrêa, 2005). As maiores áreas são de média erosão (-1,0 m/ano a -16,98 m/ano), com uma única área de alta erosão (-29,41 m/ano).

Na margem leste as forças atuam com menos intensidade auxiliando assim na tendência a acreção da região, os sedimentos dessa área são formados principalmente por silte grosso e muito fino e algumas áreas com sedimentos argilosos (Corrêa, 2005). As maiores áreas são de média acreção (3,26 m/ano a 8,55 m/ano) com alguns trechos com alta acreção (8,56 a 16,21). A área de maior erosão está principalmente em São Caetano de Odivelas com -18,79 m/ano. A presença de canais nessa margem também contribui para acreção ou erosão em determinados pontos, no caso de Vigia o Furo da Laura influenciada pela velocidade e intensidade das correntes de maré (Lima *et al.* 2015).

Processos semelhantes ocorrem em trechos do setor Flúvio-Marítimo paraense. Baía *et al.* (2021) no estuário de Marapanim constataram que na margem oeste a variação da LC entre 1988 e 2016 depende do grau de exposição das praias de Santa Maria, Crispim e Marudá. Crispim é a que possui mais taxas de erosão (-9,82 m/ano) devido a sua maior exposição ao oceano aberto, enquanto Santa Maria é mais abrigada e sofreu uma menor influência oceânica.

No estuário do rio Curuçá, Rodrigues e Souza Filho (2011) observaram a maioria de áreas progradacionais em ambas as margens entre 1984 e 2008. No geral, foram 4,29km<sup>2</sup> de erosão, principalmente em frente ao município de Abade. As áreas com erosão dos manguezais apresentam migração de desembocaduras e de bancos arenosos causados por correntes de maré.

## CONCLUSÃO

O uso de imagens de satélite Landsat, associados ao ArcMap 10.5 do software ArcGis e a extensão Digital Shoreline Analysis System permitiu que esta pesquisa identifica-se áreas em processo de erosão e de acreção e taxas de variação da LC nas margens Leste e Oeste do estuário inferior do rio Pará. Provando serem excelentes ferramentas para a análise das mudanças costeiras.

Estes resultados são importantes para a interpretação das mudanças costeiras em diferentes margens, sendo estas distintas e sujeitas a processos relacionados à sua exposição às forçantes. Todos os dados contribuem para que programas como o projeto Orla, Procosta e GERCO (Programa Nacional de Gerenciamento Costeiro) que buscam um gerenciamento costeiro mais eficaz.

## REFERÊNCIAS

- ALMONACID-CABALLER, J. et al. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. **Marine Geology**, v. 372, p. 79–88, fev. 2016.
- AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 4, p. 423–434, 2012.
- ANTHONY, E. J. Overview of the Monsoon-influenced Ayeyarwady River delta, and delta shoreline mobility in response to changing fluvial sediment supply. **Marine Geology**, p. 14, 2019.
- BAÍA, L. B.; RANIERI, L. A.; ROSÁRIO, R. P. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia oriental. **Geociências**, v. 40, n. 1, p. 231–244, 2021.
- BARBOSA, E. J. S. **Unidades de relevo em zona costeira estuarina: municípios de Colares e Santo Antonio do Tauá (PA)**. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Belém: Universidade Federal do Pará, 2007.
- BARBOSA, E. J. S.; FRANÇA, C. F. D. Compartimentação morfológica dos municípios costeiros de Colares e Santo Antônio do Tauá, Pará. **Simpósio Nacional de Geomorfologia**, n. VI, p. 11, 2006.
- CAI, W. et al. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, abr. 2020.
- CARNEIRO, A. G.; PRESTES, Y. O.; ROLLNIC, M. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. **Ocean and Coastal Research**, v. 68, 2020.
- CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **El Niño e La Niña**. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 2 fev. 2021.

CORRÊA, I. C. S. Aplicação do Diagrama de Pejrup na Interpretação da Sedimentação e da Dinâmica do Estuário da Baía de Marajó-PA. **Pesquisas em Geociências**, v. 32, n. 2, p. 109–118, 2005.

DIN HASHMI, S. G. M.; AHMAD, S. R. GIS-Based Analysis and Modeling of Coastline Erosion and Accretion along the Coast of Sindh Pakistan. **Journal of Coastal Zone Management**, v. 21, n. 1, 2018.

DHN. Diretoria de Hidrografia e Navegação. **Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. Acesso em: 6 jan. 2022.

DOS SANTOS, J. S. et al. Climatologia da Amazônia Oriental: Uso de prognósticos climáticos como ferramenta de prevenção de ameaças naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, p. 1853–1871, 6 dez. 2019.

DUTTA, D. et al. Shoreline Change Analysis of Hooghly Estuary Using Multi-Temporal Landsat Data and Digital Shoreline Analysis System. Em: **Geographic Information System [Working Title]**. [s.l.] IntechOpen, 2022.

EL-ROBRINI, M. et al. Panorama da erosão costeira, Pará, Brasil. Em: **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018a. p. 65–166.

ESTEVAM, C. N.; OSAKO, L. S.; FRANCISCO, J. A. A. Análise multitemporal da variação da linha de costa no setor centro-sul da Ilha de Santa Catarina, Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, v. 21, n. 4, p. 73–90, 14 dez. 2021.

FRANÇA, C. F. D.; SOUZA FILHO, P. W. M. E. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da ilha de Marajó (PA) em imagem Landsat. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 127–136, 1 jun. 2003.

FRANÇA, C.; PIMENTEL, M. Diversidade paisagística das margens oeste e leste da baía de Marajó, Pará, norte do Brasil. **REVISTA GEONORTE**, v. 3, n. 4, p. 900–910, 2012.

GUIMARÃES, D. **Análise de indicadores de dinâmica costeira da orla do Paraíso, Caruara e Maraú entre 1984 e 2017, ilha de Mosqueiro, Belém-PA**. Monografia (Graduação em Geografia)—Belém: Universidade Federal do Pará, 2019.

GUIMARÃES, D. K. M. **Deteção das mudanças costeiras na margem leste do estuário do rio Pará: uma análise multitemporal (1987-2019) utilizando sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia)—Belém: Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2022.

HIMMELSTOSS, E. A. et al. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**: Open-File Report. [s.l.: s.n.].

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Tempo: Gráficos anuais**. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/GraficosAnuais/A201>>. Acesso em: 22 jun. 2020.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil. **Normais climatológicas do Brasil (1981-2010)**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/normais>>. Acesso em: 18 dez. 2021.

KABIR, MD. A. et al. Assessing the shoreline dynamics of Hatiya Island of Meghna estuary in Bangladesh using multiband satellite imageries and hydro-meteorological data. **Regional Studies in Marine Science**, v. 35, p. 101167, mar. 2020.

LEMOS, A. L.; SOPCHAKI, C. Contribuição da ferramenta digital shoreline analysis system nos estudos de dinâmica costeira no estado do Ceará, Brasil. **Revista Equador**, v. 9, n. 3, p. 61–81, 2020.

LIMA, M. W. et al. Análise temporal da composição granulométrica de um estuário amazônico, Pará, Brasil. **Scientia Plena**, v. 11, n. 01, p. 11, 2015.

MATOS, A. P. DE; COHEN, J. C. P. Circulação de brisa fluvial e a banda de precipitação na margem leste da baía de Marajó. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 21, 20 jul. 2016.

MENEZES, R. A. A. **Evolução Multitemporal da Linha de Costa (1972-2040) do Município de Soure, Ilha do Marajó (Amazônia - Brasil)**. Dissertação (Mestrado)—Belém: Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, 2021.

MISHRA, M. et al. Response of long- to short-term changes of the Puri coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 11, p. 338, jun. 2019.

MISHRA, M. et al. The development and research trend of using dsas tool for shoreline change analysis: a scientometric analysis. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 14, n. 1, p. 69–77, 7 jun. 2020.

MOREIRA, S. DE F. et al. A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, v. 1, p. 1–7, 2018.

MOURA, M. M. et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1639–1651, fev. 2019.

MUSKANANFOLA, M. R. Spatio-temporal analysis of shoreline change along the coast of Sayung Demak, Indonesia using Digital Shoreline Analysis System. **Regional Studies in Marine Science**, p. 9, 2020.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, p. 12, 2007.

PICANÇO, S. M. **Formas de relevo e dinâmica costeira em São Caetano de Odivelas (PA)**. Dissertação (Mestrado em Geografia)—Belém: Universidade Federal do Pará, 2013.

PRESTES, Y. O. et al. The M2 and M4 tides in the Pará river estuary. **Tropical Oceanography**, v. 45, n. 1, p. 26–37, 7 maio 2017.

PRESTES, Y. O. et al. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, abr. 2020.

QUADRADO, G. P. Historical and geological assessment of shoreline changes at an urbanized embayed sandy system in Garopaba, Southern Brazil. **Regional Studies in Marine Science**, p. 19, 2021.

RABELO, F. D. B.; SILVA, E. V. DA; GORAYEB, A. Geotecnologias na análise da dinâmica costeira do estuário do Rio Caeté – Pará I (Edição 530). **Papers do NAEA**, v. 30, n. 1, 9 dez. 2021.

RIBEIRO, S.; VALADÃO, R. Efeitos marinho e fluvial na dinâmica dos ambientes inundáveis do Estuário Superior do Rio Pará, Norte do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 4, 15 set. 2021.

RODRIGUES, S.; SOUZA FILHO, P. W. M. Análise da variação da linha de costa a noroeste do Estado do Pará (Baía de Curuçá) através das imagens Landsat TM e ETM+ e CBERS 2B. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n. XV, p. 5061, 2011.

ROLLNIC, M. et al. Áreas de estudo. Em: **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 1p. 26–45.

ROSÁRIO, R. P. et al. Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. **Journal of Coastal Research**, n. 75 (10075), p. 128–132, 1 mar. 2016.

SANTOS, C. et al. Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 769, 2021.

SANTOS, E. C.; BONETTI, J. Análise da taxa de variação da linha de costa da Enseada de Tijucas (SC) em diferentes escalas temporais como indicadora de suscetibilidade costeira. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 9, n. 2, 13 ago. 2018.

SANTOS, V. **Ambientes costeiros amazônicos: avaliação de modificações por sensoriamento remoto**. Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha)—Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2006.

SZLAFSZTEIN, C.; STERR, H.; LARA, R. Estratégias y medidas de protección contra desastres naturales en la zona costera de la región Amazónica, Brasil. **Terra Livre**, v. 1, n. 26, p. 109–125, 2006.

TOURE, S. et al. Shoreline Detection using Optical Remote Sensing: A Review. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 2, p. 75, 5 fev. 2019.

VASCONCELOS, A. O. et al. Caracterização do Uso e Cobertura do Solo e da Linha de Costa. Em: **Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 2p. 911–1029.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- No geral a taxa média de variação da margem leste no médio período estudado (32 anos) foi de -0,19 m/ano, apresentando assim uma tendência à erosão da área total. As taxas médias de acreção e erosão ficaram em 86,61m e -76,49m, respectivamente.

- As áreas de erosão e acreção identificadas na margem leste do estuário do rio Pará mostram como a margem é dinâmica, apresentando setores com altas taxas de erosão e acreção em áreas pontuais e em sua maior extensão setores com médias taxas de erosão e acreção.

- As áreas que apresentam altas taxas de erosão estão mais expostas as forçantes (correntes, ondas e marés) e onde a ação antrópica também atua, principalmente no caso da ilha de Mosqueiro. As áreas de altas taxas de acreção são mais abrigadas onde as forçantes chegam com menos intensidade.

- Com todos os dados quantitativos gerados e comparando as dinâmicas das margens leste e oeste podemos compreender como as ações naturais e antrópicas podem modificar a LC de um mesmo estuário de forma distinta, sendo importante detectarmos as áreas mais prejudicadas e quais forçantes mais atuantes, para assim conter ou evitar prejuízos a população local e a perda de áreas de manguezais.

- Por fim, sugere-se para trabalhos futuros dados da hidrodinâmica mais específicos principalmente das áreas com maiores variações.