

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

PEDRO HENRIQUE RAZZIA LIRA

**ANÁLISE DAS ANOMALIAS DO NÍVEL DO MAR DA REGIÃO SUL DO BRASIL
ENTRE 1993 E 2022:
Contribuições da Altimetria por Satélite e Software X-TRACK**

Porto Alegre

2024

PEDRO HENRIQUE RAZZIA LIRA

**ANÁLISE DAS ANOMALIAS DO NÍVEL DO MAR DA REGIÃO SUL DO BRASIL
ENTRE 1993 E 2022:
Contribuições da Altimetria por Satélite e Software X-TRACK**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Geógrafo.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino

Coorientadora: Dr^a. Venisse Schossler

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Lira, Pedro Henrique Razzia
ANÁLISE DAS ANOMALIAS DO NÍVEL DO MAR DA REGIÃO SUL
DO BRASIL ENTRE 1993 E 2022: Contribuições da
Altimetria por Satélite e Software X-TRACK / Pedro
Henrique Razzia Lira. -- 2024.

50 f.

Orientador: Franzisco Eliseu Aquino.

Coorientadora: Venisse Schossler.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Bacharelado em Geografia, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Topex-Poseidon. 2. Jasons-1/2/3. 3. AVISO+. 4.
SLA. 5. Costa Sul do Brasil. I. Aquino, Franzisco
Eliseu, orient. II. Schossler, Venisse, coorient.
III. Título.

PEDRO HENRIQUE RAZZIA LIRA

**ANÁLISE DAS ANOMALIAS DO NÍVEL DO MAR DA REGIÃO SUL DO BRASIL
ENTRE 1993 E 2022:
Contribuições da Altimetria por Satélite e Software X-TRACK**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Geógrafo.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino

Coorientadora: Dr^a. Venisse Schossler

Aprovado em 22/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dr^a. Venisse Schossler
Centro Polar e Climático - UFRGS

Prof^a Dr^o. Ulisses Franz Bremer
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a Dr^a. Patricia Andréia Paiola Scalco
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Mais uma vez, apresento minha gratidão aos que estão comigo nessa trajetória árdua que chamamos de vida. Nessa caminhada partilhamos alegrias, conquistas, tristezas, ansiedades e angústias. Partilhamos emoções, logo, compartilhamos vida. E que vida, meus amados!

Dessa vez, vou direto ao ponto. Não contarei histórias. Não emocionarei pessoas. Mas quero deixar registrado a alegria de findar mais uma etapa junto de vocês.

Primeiramente, me volto a minha mãe. Obrigado pelo amor incansável que sempre me dedicou. Reconheço que sua jornada não foi fácil, e peço perdão por não ser o filho perfeito, mas saiba que meu amor por você é imenso. Se algum mérito eu alcançar, saiba que é seu por direito.

À minha avó Nolva (*in memoriam*), agradeço o amor e apoio que sempre depositou em mim ao longo de sua vida. Ao meu avô Nadir (*in memoriam*), sou grato pelos ensinamentos e pelo carinho que foram fundamentais para moldar quem sou hoje. Que vocês desfrutem da vida eterna no céu e, para sempre, no meu coração.

A minha orientadora Venisse, gratidão pelos longos anos cheios de carinho e confiança que são expressos entre respeitosos tapas e beijos. Ao meu orientador Francisco, obrigado por ser quem és, a climatologia e a geografia brasileira não seriam as mesmas sem sua contribuição.

Aos meus amigos, Nicole, Amanda, Gianluca, e aos demais (que não mencionarei agora por falta de tempo e exaustão), obrigado pela parceria e afeto. Vocês fazem a diferença na minha vida!

Também, expresso minha profunda gratidão a todos os professores que, em conjunto com esta grandiosa instituição - a UFRGS -, foram responsáveis pelos estímulos de ensino e conhecimento ao longo desta jornada.

Um agradecimento especial ao CNPq e ao INCT da Criosfera por financiarem esta pesquisa. E, por fim, não posso deixar de mencionar minha segunda casa, o Centro Polar e Climático da UFRGS, que me acolheu calorosamente ao longo desses anos e demonstrou a verdadeira excelência da ciência brasileira.

Minhas experiências em Geografia não seriam as mesmas sem vocês.

A todos, minha mais sincera gratidão por fazerem a diferença em minha vida!

*Nas terras às margens do mar, o homem emerge,
abrigando o mar e suas veleidades sob a marca
de um corte, refletindo o mar em sua memória.
A "memória é o poder de efetividade contínua de
experiências" primordiais, de outrora*

*(FREUD, 1895/1995, p. 14
apud DELOUYA, 2021).*

RESUMO

Tendo em vista o atual cenário de mudanças climáticas (MC) e evidências de aumento do nível do médio do mar global (GMSLR), torna-se fundamental entender o comportamento do nível do mar (NM) costeiro para corroborar com medidas preventivas e mitigatórias diante das MC provocadas pela elevação da temperatura global e consecutiva resposta do oceano. Por isso, esta pesquisa se propõe a analisar as anomalias do nível do mar (SLA) na região costeira dos estados da Região Sul do Brasil – Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC) e Paraná (PR) – entre os anos de 1993 e 2022. Ademais, metodologicamente se utilizou bases altimétricas extraídos por satélites das missões orbitais Topex/Poseidon e Jason 1, 2 e 3. Os dados gerados foram pós-processados pelo software X-TRACK, desenvolvido pelo CTOH/LEGOS, que corrige distorções atmosféricas e ruídos característicos das zonas costeiras. Por conseguinte, por meio do site francês da AVISO+, foram coletadas 769.907 medições obtidas em 1073 ciclos de 7 trilhas orbitais entre 1993 e 2022. Destes, 499.801 foram obtidos em 487 pontos na costa do RS; 242.740 em 231 pontos próximos a SC; e 27.366 em 27 pontos ao longo da costa do PR. Os dados foram organizados em planilhas no Microsoft Excel e foram calculadas médias anuais, resultando em três gráficos, um para cada estado, além do cálculo do Coeficiente de Determinação (R^2) para cada série de SLA. A partir dos resultados encontrou-se tendência de elevação do NM para o RS, SC e PR, com R^2 de 0,7552, 0,7679 e 0,5429, respectivamente, indicando uma tendência linear mais robusta para RS e SC. No entanto, o comportamento diferenciado da costa do PR levanta questões adicionais. Concluimos que os dados de altimetria via satélite, processados pelo X-TRACK, representam uma ferramenta valiosa para estudos regionais e costeiros do NM em um contexto de MC e intensificação de eventos extremos.

Palavras-chave: Topex-Poseidon, Jasons-1/2/3, AVISO+, SLA, Costa Sul do Brasil.

ABSTRACT

In view of the current scenario of climate change (MC) and evidence of global mean sea level rise (GMSLR), it becomes essential to understand the behavior of coastal sea level (NM) to support preventive and mitigating measures against climate change induced by global temperature rise and consequent ocean response. Therefore, this research aims to analyze sea level anomalies (SLA) in the coastal region of the states in the Southern Region of Brazil - Rio Grande do Sul (RS), Santa Catarina (SC), and Paraná (PR) - between the years 1993 and 2022. Additionally, methodologically, altimetric data extracted from satellite missions Topex/Poseidon and Jason 1, 2, and 3 were used. The generated data were post-processed using the X-TRACK software, developed by CTOH/LEGOS, which corrects atmospheric distortions and characteristic noises from coastal areas. Subsequently, through the French AVISO+ website, 769,907 measurements were collected from 1073 cycles of 7 orbital tracks between 1993 and 2022. Of these, 499,801 were obtained at 487 points on the RS coast, 242,740 at 231 points near SC, and 27,366 at 27 points along the PR coast. The data were organized into spreadsheets in Microsoft Excel, and annual averages were calculated, resulting in three graphs, one for each state, in addition to the calculation of the Coefficient of Determination (R^2) for each SLA series. The results showed a trend of sea level rise for RS, SC, and PR, with R^2 values of 0.7552, 0.7679, and 0.5429, respectively, indicating a more robust linear trend for RS and SC. However, the differentiated behavior of the PR coast raises additional questions. We conclude that satellite altimetry data, processed by X-TRACK, represent a valuable tool for regional and coastal sea level studies in a context of climate change and intensification of extreme events.

Keywords: Topex-Poseidon, Jasons-1/2/3, AVISO+, SLA, Southern coast of Brazil.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR5	Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
AR6	Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
AMOC	Circulação Oceânica Meridional do Atlântico
AMR	Medição da Radiação Atmosférica
CTOH	Centro de Topografia do Oceano e Hidrosfera
DORIS	Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo
ESL	Nível eustático do mar
GFO	Acompanhamento Geosat
GIA	Ajuste isostático glacial
GNSS	Global Navigation Satellite System
GMSLR	Aumento médio global do nível do mar
GMSLR	Aumento do nível do médio do mar global
JMR	Jason Radiômetro de Micro-onda
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale
MC	Mudanças Climáticas
MSSH	Superfície Média do Mar
MSL	Nível médio do mar
MWR	Radiômetro de Microondas
NM	Nível do mar
NOAA	Administração Nacional Oceânica e Atmosférica
PR	Paraná
R ²	Coeficiente de Determinação
RS	Rio Grande do Sul
RSL	Nível relativo do mar
RSLC	Mudança relativa do nível do mar
SC	Santa Catarina
SLA	Anomalias do nível do mar
SNM	Subida do nível do mar
SROCC	Relatório Especial do IPCC/Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas sobre os Oceanos e a Criosfera
SSH	Altura da superfície do mar
SSP	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
VLM	Movimentos verticais da terra
WCRP	Sistema Global de Observação do Clima
WMO	Organização Meteorológica Mundial

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de medição baseada em altimetria nadir clássica por satélite da altura da superfície do mar	21
Figura 2 – Exemplo de procedimento de pós-processamento de dados de altimétricos	28
Figura 3 – Mapa das zonas fornecidas para os produtos costeiros do X-TRACK	32
Figura 4 – Zona X-TRACK ASA: Atlântico Sul da América.....	32
Figura 5 – Mapa dos pontos de coleta das SLAs da zona costeira da Região Sul do Brasil....	35
Figura 6 – Série temporal do nível médio do mar global a partir de altimetria de múltiplas missões orbitais (1993-2022).....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Série temporal de cada missão altimétrica.....	24
Tabela 2 – Correções usadas para missões seguindo a órbita Topex/Jason	25
Tabela 3 – Correções usadas para missões seguindo a órbita ERS	26
Tabela 4 – Correções usadas para missões com órbita própria	27
Tabela 5 – Nomenclatura das missões e zonas costeiras do X-TRACK.....	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – SLA – Estado do Rio Grande do Sul.....	38
Gráfico 2 – SLA – Estado de Santa Catarina	39
Gráfico 3 – SLA – Estado do Paraná.....	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVO GERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 NIVEL DO MAR: conceitos, medições e projeções	16
2.2 ALTIMETRIA POR SATÉLITE	20
2.3 X-TRACK: processador de dados altimétricos	23
3. METODOLOGIA	31
4. RESULTADOS	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

As áreas costeiras são, inegavelmente, as regiões mais densamente povoadas do planeta. Situadas no limite entre a terra e o mar, essas zonas são constantemente expostas a uma série de riscos naturais. Segundo Marti *et al.* (2021), eventos climáticos extremos, como ciclones, tempestades e inundações - associados com as mudanças no nível do mar - são apenas alguns dos desafios que as populações costeiras enfrentam. Consequentemente, as mudanças climáticas têm o potencial de intensificar muitos dos problemas já existentes nessas áreas, como erosão costeira, inundações, poluição e danos à biodiversidade (HARLEY *et al.*, 2006). Tendo isso em vista, o conhecimento da variabilidade do nível da água na costa é fundamental para a avaliação de inundações costeiras, tanto para o clima atual quanto para o futuro (IDIER *et al.*, 2018).

À vista disso, o nível médio do mar global tornou-se um aspecto muito debatido devido a mudança climática antropogênica, com consequências de longo alcance para a segurança e o bem-estar da população global (STAMMER *et al.*, 2013). Abordar as questões decorrentes do aumento do nível do mar, é um dos maiores desafios sociais do século atual pois, de acordo com o Relatório Especial do IPCC sobre Oceano e Criosfera em um Clima em Mudança (2019), o nível médio global do mar aumentou 17 cm ao longo do século XX, e esse fenômeno está se acelerando (DANGENDORF *et al.*, 2019; IPCC, 2019; SROCC, 2019). Além disso, conforme o 5º Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), a faixa provável de aumento futuro do nível médio global do mar para cenários de emissões elevadas é de +0,5 a +1 metro até 2100 (CHURCH *et al.*, 2013), o que não se exclui cenários mais extremos. Para cenários de emissões de CO₂ mais pessimista - como o RCP8,5 -, a projeção de acréscimo na temperatura média global é de 2,8° a 5,7°C (WUEBBLES *et al.*, 2017), por conseguinte, tal panorama projeta elevação do nível do mar de 0,45 a 0,98 metros para o final do século XXI, visando que a provável taxa de elevação é de 8 a 16 milímetros por ano, o que é até cerca de 10 vezes a taxa média de elevação durante o século XX (CHURCH *et al.*, 2013). É importante ressaltar que o nível do mar continuará a subir além de 2100 (CHURCH *et al.*, 2013) sendo assim, provável que atinja vários metros até 2200 (KOPP *et al.*, 2014).

Mudanças tão significativas no nível médio do mar terão impactos sociais significativos. Contudo, é crucial reconhecer que o aumento do nível do mar não é uniforme; sua variação depende de uma série de fatores além do clima, especialmente em escalas menores (IPCC, 2019). Logo, nos aproximando da realidade regional que é dada ao litoral sul do Brasil,

se fundamenta a questão que direciona essa pesquisa: **como se comportou o nível do mar no sul do Brasil nos últimos anos?** Tal pergunta nos direciona a uma série de fatores que devem ser avaliados para entender como a superfície do mar pode se comportar. Considera-se que os ventos e pressão atmosférica, trocas de calor entre a atmosfera e o oceano podem influenciar na variabilidade do nível do mar costeiro. Para realizar essa análise, é crucial gerar dados confiáveis, sendo os registros obtidos por marégrafos e altimetria por satélite métodos reconhecidos como fundamentais para o monitoramento do nível do mar. O conhecimento detalhado do comportamento da superfície do mar e da dinâmica atmosférica em uma região específica é essencial para compreender as necessidades da população local e desenvolver diretrizes eficazes para o gerenciamento costeiro.

Destarte, aprimorar os sistemas de observação e modelagem é essencial para uma melhor compreensão e previsão do comportamento do oceano costeiro (LIU *et al.*, 2015). Nesse sentido, melhorias na disponibilidade e na qualidade dos dados de altimetria em águas rasas desempenham um papel fundamental (VIGNUDELLI *et al.*, 2011). A altimetria por satélite tem sido uma ferramenta vital na monitorização das variações da superfície do mar por décadas, sendo uma fonte crucial de dados para o entendimento da dinâmica costeira. Atualmente, é uma das principais fontes de dados para sistemas operacionais de oceanografia, tais como monitoramento oceânico, modelos de previsão e gestão das mudanças climáticas (BIROL *et al.*, 2017).

Embora desde o final da década de 1990 seja possível medir a altura dos oceanos via sensores orbitais, os radares e os processos de coleta de dados estavam otimizados para ambientes oceânicos abertos. Isso levou a problemas na medição do nível do mar em áreas costeiras, prejudicando a precisão dos dados e sua interpretação (BIROL *et al.*, 2017). No entanto, nos últimos anos, ocorreu um avanço significativo em instrumentação de altimetria, algoritmos de processamento e correções (VIGNUDELLI *et al.*, 2011; PASSARO *et al.*, 2014; VERRON *et al.*, 2015; PASCUAL *et al.*, 2015; COTTON *et al.*, 2015).

Para superar esses desafios, várias iniciativas foram financiadas por agências espaciais com o objetivo de melhorar os produtos convencionais de altimetria para áreas costeiras e águas continentais. Além disso, um algoritmo de pós-processamento, adaptado especificamente para recuperar dados de altimetria em mares marginais, foi desenvolvido no LEGOS (*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale*). Este software, conhecido como X-TRACK, é rotineiramente operado no Centro de Topografia do Oceano e Hidrosfera (CTOH), um serviço

francês dedicado à observação por satélite, e grande parte dos dados de altimetria foi reanalisada (BIROL *et al.*, 2017).

Em resumo, o X-TRACK é dedicado ao processamento/reprocessamento de dados de altimetria por satélite para análise das variações do nível do mar ao longo das trilhas dos satélites. Ele visa melhorar a precisão e a resolução espacial dos dados altimétricos, especialmente em áreas costeiras, onde a complexidade das interações entre o radar e a topografia da costa apresenta desafios únicos. O software inclui algoritmos avançados de processamento de dados e técnicas para lidar com formas de onda costeiras complexas, além de implementar correções geofísicas e ambientais para obter medições mais precisas e confiáveis do nível do mar.

Para melhor desenvolver o trabalho, estruturou-se cinco capítulos: nesse primeiro, objetiva-se introduzir a temática ao leitor e apresentar os objetivos da nossa pesquisa. No segundo, apresentamos o referencial teórico, onde nos aprofundando na temática do nível do mar, explicando conceitos, medidas e projeções atuais e futuras do tema; abordamos, também, o método de medição satelital do nível do mar, exibindo sua historicidade e métodos de coleta, bem como abarcamos a apresentação do software de processamento X-TRACK, que foi utilizado no processamento dos dados desse trabalho. No terceiro capítulo, detalhamos a metodologia construída para atingir os resultados da pesquisa. No quarto, apresentamos os resultados da pesquisa, com a apresentação gráficos e análise das SLAs. E, por último, as considerações da pesquisa.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desse trabalho é obter as anomalias da superfície do mar (SLA) para a costa da Região Sul a partir de altimetria por satélites no período 1993 a 2022 com dados corrigidos pelo software X-TRACK.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Coletar junto ao site da AVISO+ os dados da altimetria da superfície do mar, pós-processados pelo software X-TRACK, para os três estados da Região Sul do Brasil;
- b) Organizar os dados em planilhas e calcular as médias anuais do nível do mar para os litorais dos três estados, Rio Grande do Sul (RS) Santa Catarina (SC) e Paraná (PR);
- c) Gerar gráficos da série histórica de SLA para as três áreas costeiras;
- d) Calcular o coeficiente de determinação (R^2) para as três séries;
- e) Analisar as três séries históricas de SLA e definir uma tendência.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 NÍVEL DO MAR: conceitos, medições e projeções

As mudanças no nível do mar resultam em alguns dos impactos mais severos das mudanças climáticas antropogênicas (IPCC, 2014). Conseqüentemente, elas são objeto de grande interesse tanto na pesquisa científica quanto nas políticas públicas. Como as mudanças no nível do mar são resultado de diversos fenômenos físicos, há muitos autores de uma variedade de áreas trabalhando nas questões da ciência do nível do mar. Levando isso em conta, não é surpreendente que as terminologias por trás do nível do mar sejam inconsistentes entre os ramos do conhecimento - por exemplo, "nível do mar dinâmico" tem significados diferentes na oceanografia e na geodinâmica -, bem como incerta ou ambígua até mesmo dentro de uma única esfera da ciência - por exemplo, "eustático" é ambíguo na literatura científica sobre clima. Às vezes, enfrentamos dificuldades para encontrar termos corretos e precisos ao escrever sobre tópicos relacionados ao nível do mar, ou para entender o que outros escreveram. Esses problemas de comunicação dificultam o progresso na pesquisa e podem até confundir discussões sobre planejamento costeiro e políticas (GREGORY *et al.*, 2019).

À vista disso, para balizar nosso trabalho, utilizaremos os seguintes conceitos atribuídos e explicados por Gregory *et al* (2019):

Superfície do mar é o limite superior do oceano, variável no tempo. *Altura da superfície do mar* é a altura geodésica da superfície do mar acima do elipsoide de referência. A superfície do mar varia periodicamente em todas as escalas de tempo devido a marés, as ondas superficiais do mar, a pressão atmosférica, a trocas de fluxo de superfície (com a atmosfera), a fluxos de rios, a variabilidade gerada internamente pela dinâmica oceânica, a movimentos do fundo do mar e a mudanças na distribuição de massa dentro do oceano e da Terra sólida. O *nível médio do mar* (MSL) é a média temporal da superfície do mar. O *nível dinâmico do mar* é a altura local da superfície do mar acima do geoide, com a correção do barômetro inverso aplicada. Já a *mudança relativa do nível do mar* (RSLC) é a mudança no nível médio local do mar em relação à superfície sólida local, ou seja, o fundo do mar. A mudança relativa do nível do mar também é chamada de *aumento relativo do nível do mar* (RSLR). Logo, o termo *nível relativo do mar* não é empregado em um sentido absoluto, mas apenas em conjunto com "mudança", porque é puramente a profundidade do leito marinho abaixo do MSL, igual à espessura média temporal do oceano. Portanto, *aumento médio global do nível do mar*

(GMSLR) é a média global da mudança relativa do nível do mar e é igual à média global da mudança na espessura (ou profundidade) do oceano.

As flutuações no *nível eustático do mar* (ESL) são impulsionadas por uma variedade de processos que influenciam o volume ou a massa dos oceanos globais (GORNITZ, 2005; MILLER, 2005), resultando em variações uniformes no nível médio do mar em escala global. Em períodos mais curtos, as mudanças registradas no ESL são principalmente atribuíveis a interações complexas entre o oceano e a atmosfera. De tal modo, a reconstrução do nível eustático do mar em diferentes escalas temporais é de interesse primordial para entender os efeitos do derretimento do gelo ou do aquecimento das massas de água, enquanto as mudanças relativas no nível do mar são frequentemente estudadas para investigar processos regionais e locais (ROVERE *et al.*, 2016). Assim, qualquer variação no nível do mar em relação a um ponto de referência baseado em terra é definida como uma mudança no nível relativo do mar (RSL) (KEMP *et al.*, 2015). Consequentemente, a interação entre processos eustáticos e outros desencadeia mudanças relativas no nível do mar. Embora a eustasia seja um fenômeno global por natureza, as mudanças relativas no nível do mar ocorrem em níveis regionais ou locais e são, portanto, de extrema importância para tomadores de decisão e cientistas que buscam entender os impactos das mudanças no nível do mar em regiões específicas (ROVERE *et al.*, 2016). De fato, em algumas áreas, as mudanças relativas no nível do mar podem até amplificar as taxas de aumento do nível eustático do mar (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010).

As variações do nível do mar espalham-se por um espectro muito amplo de escalas espaciais e temporais, como resultado de processos complexos que ocorrem no Sistema Terra em resposta à variabilidade natural do sistema climático, bem como a forças externas devido a fenômenos naturais e fatores antropogênicos. Para Gregory *et al.* (2019) o nível extremo do mar ao longo das costas é de grande importância prática devido aos enormes danos que pode causar às populações humanas e ao seu ambiente construído e aos ecossistemas. A ocorrência esperada de níveis extremos do mar em climas futuros é, portanto, relevante para a tomada de decisões numa série de horizontes temporais. Quando há um aumento relativo do nível do mar, é necessário aumentar as defesas costeiras para manter um nível constante de proteção contra eventos extremos. Portanto, as projeções do GMSLR são de grande interesse para políticas climáticas globais, considerando tanto a adaptação quanto a mitigação. A vista disso, o fator dominante nas mudanças de futuros extremos locais é a mudança relativa do nível do mar (RSLC), ou seja, a mudança no nível do mar em relação à terra (LOWE *et al.* 2010; CHURCH *et al.* 2013).

A atual subida do nível do mar e a sua aceleração, atualmente estimada por altimetria de satélite de alta precisão, são principalmente impulsionadas pelo aquecimento global antropogênico, ou seja, mais especificamente, pela expansão térmica induzida pelo aquecimento dos oceanos e pela perda de massa de gelo dos glaciares, Groenlândia e Antártica (CAZENAVE *et al.*, 2018; NEREM *et al.*, 2018).

Conforme recomendado pelo Sistema Global de Observação do Clima (WCRP, 2018), a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2021) começou a incluir o GMSL como um dos sete principais indicadores globais das mudanças climáticas atuais (CAZENAVE; MOREIRA, 2022). Avaliações regulares do estimativa do GMSL (ou seja, a comparação da mudança observada do GMSL com a soma dos componentes) têm sido realizadas recentemente pelo Grupo Global de Orçamento do Nível do Mar da WCRP (2018), pelo Relatório Especial do IPCC/Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas sobre os Oceanos e a Criosfera (SROCC, 2019) e o 6º Relatório de Avaliação/AR6 do IPCC (2021) mostrando que, para as últimas três décadas - ou seja, na era da altimetria por satélite -, o orçamento do GMSL está sendo quantificado com precisão, sem lacunas significativas no conhecimento ou problemas instrumentais importantes nos sistemas de observação usados para estimar o GMSL e seus componentes. A evolução contemporânea do GMSL e o orçamento do nível do mar agora são rotineiramente incluídos no relatório anual da WMO sobre o estado do clima global, nos relatórios climáticos e oceânicos anuais dos serviços *Copernicus* da União Europeia, bem como no estado do relatório climático publicado anualmente pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica - NOAA, EUA (BLUNDEN; BOYER, 2021).

De acordo com Cazenave e Moreira (2022), a altimetria por satélite revelou que, em escala regional, a subida do nível do mar pode desviar-se significativamente da média global. O monitoramento preciso das mudanças regionais no nível do mar e a compreensão das causas subjacentes (principalmente o aquecimento não uniforme dos oceanos e as mudanças na salinidade) são de fundamental importância para estudos de detecção/atribuição (ou seja, discriminar entre forçamento antropogênico e variabilidade climática natural/interna) e detecção de tempo de emergência do sinal forçado (antropogênico) dependendo de regiões.

Em escala local (costeira), o nível do mar em relação à superfície terrestre é de interesse prático para a compreensão dos impactos sociais das alterações do nível do mar. Woodworth *et al* (2019) dizem que é reconhecido que a mudança do nível do mar costeiro pode ser substancialmente diferente da subida do nível do mar em oceano aberto porque perto da costa, os processos de pequena escala sobrepõem-se à média global e aos componentes

regionais do nível do mar. Além disso, em muitas zonas costeiras, os movimentos verticais do solo causados pela subsidência do solo amplificam o aumento do nível do mar relacionado com o clima (WÖPPELMANN; MARCOS, 2016). Assim, aumento relativo do nível do mar costeiro é um dos principais impulsionadores do recuo e da erosão da linha costeira que atua em combinação com outros processos de origem natural - por exemplo, tempestades e ciclones - e antropogênica - extração de areia, urbanização, uso da terra (CAZENAVE; MOREIRA, 2022).

Com o aquecimento global em curso e futuro, o nível do mar continuará a subir. Nos últimos anos, várias projeções probabilísticas também foram publicadas, como por exemplo: Jackson e Jevrejeva (2016) e Jevrejeva *et al* (2019). Essa abordagem assume distribuições de probabilidade para cada componente do GMSL que levam em conta faixas de incerteza maiores em comparação com os modelos físicos convencionais (baseados em processos). Algumas dessas projeções probabilísticas levam a um aumento do nível do mar maior do que os modelos baseados em processos. Por exemplo, Kopp *et al.* (2017) sugerem um aumento do GMSL em 2100 de $\pm 1,46$ metros, um valor significativamente maior do que no AR6 (IPCC, 2021).

Outrossim, conforme Cazenave e Moreira (2022), sucessivos Relatórios do IPCC têm fornecido projeções baseadas em processos de mudanças futuras no nível do mar sob diferentes cenários de aquecimento global. Os cenários de aquecimento dos relatórios anteriores do IPCC (por exemplo, AR5) eram baseados em *Caminhos de Concentração Representativos* (RCPs; expressando o total de forçamento radiativo até 2100 em relação aos níveis pré-industriais, para diferentes cenários de concentrações de GEE). Em geral, três RCPs são considerados, de baixas a altas emissões: RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. No IPCC AR6, cenários de aquecimento mais realistas são considerados, os *Caminhos Socioeconômicos Compartilhados* (SSPs), classificados de SSP1 (sustentabilidade) a SSP5 (desenvolvimento de combustíveis fósseis), a fim de representar diferentes desenvolvimentos socioeconômicos e diferentes trajetórias de concentrações atmosféricas de GEE, onde o cenário SSP5 coincide aproximadamente com o RCP8.5.

Projeções regionais também foram fornecidas. As discrepâncias regionais em relação ao aumento médio global resultam de mudanças na circulação oceânica e expansão térmica, assim como impressões digitais do nível do mar devido a deformações gravitacionais e rotacionais em resposta a futuras redistribuições de massa e ajuste isostático glacial (GIA). Os padrões espaciais associados não mudaram significativamente desde o AR5. Eles consistem em uma amplificação do GMSL nos trópicos de 20 a 30%, um aumento regional no Atlântico

Noroeste - principalmente devido à GIA e diminuição da Circulação Oceânica Meridional do Atlântico (AMOC) - e no Oceano Austral (CAZENAVE; MOREIRA, 2022).

Mirando um horizonte mais longínquo, projeções de longo prazo também foram recentemente propostas, embora a faixa de incerteza seja grande devido as dinâmicas incertas das calotas de gelo em cenários de aquecimento. O AR6 (IPCC, 2021) relata um aumento do GMSL de 2,2 a 5,9m em 2300 em relação ao início dos anos 2000 para o cenário SSP5, o mais extremo.

2.2 ALTIMETRIA POR SATÉLITE

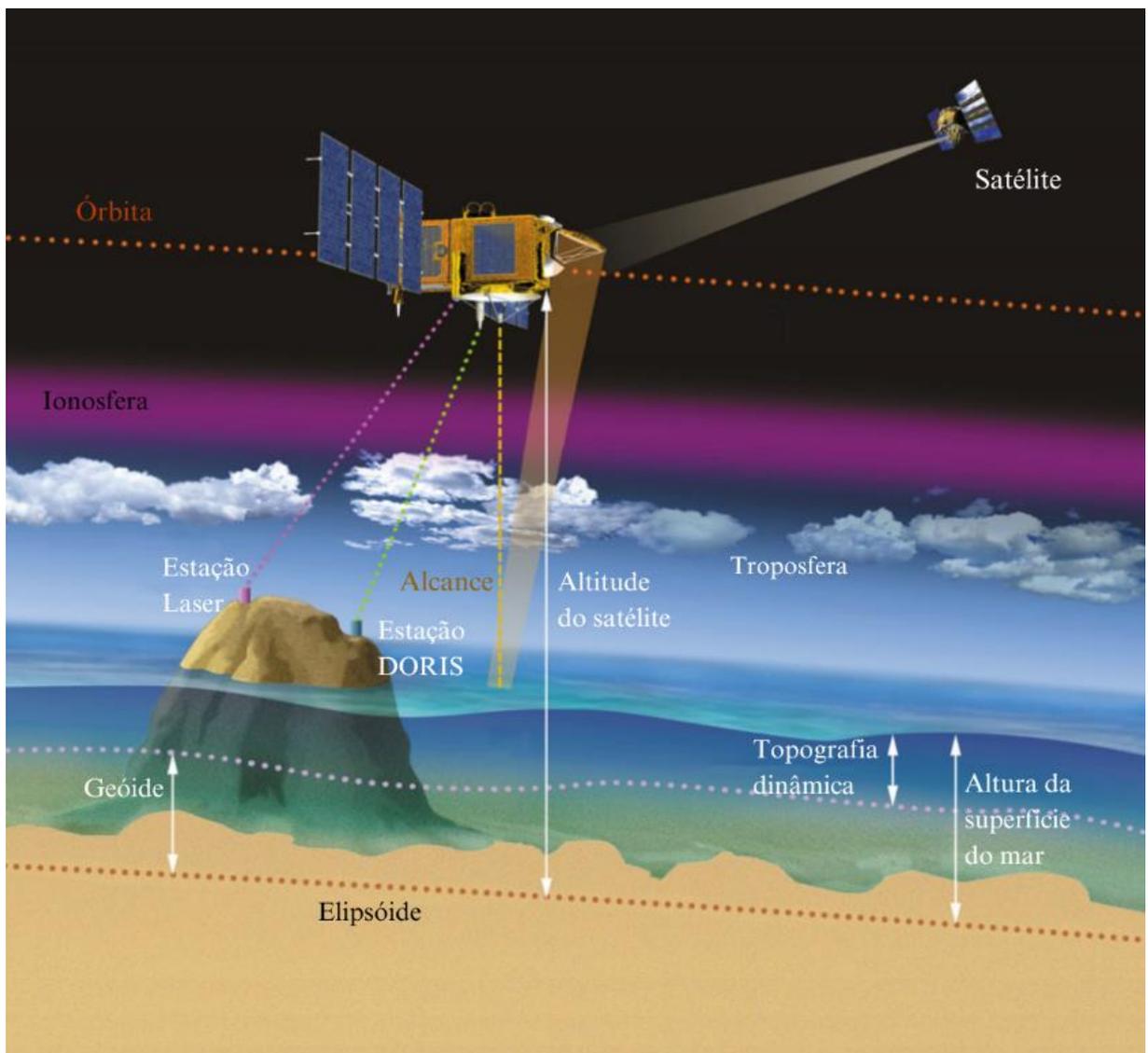
Desde o início do século XX, duas ferramentas são utilizadas para medir o nível do mar: marégrafos e altímetros de satélite. Os marégrafos medem o nível relativo do mar em relação à crosta terrestre na qual estão instalados, portanto não conseguem distinguir entre movimentos verticais da terra (VLMs) e variações de altura da coluna de água. Embora a distribuição espacial dos marégrafos seja limitada às costas continentais e ilhas, e a cobertura diminua drasticamente com o tempo, os registros do nível do mar baseados em marégrafos fornecem a referência histórica inestimável com a qual o atual aumento do nível do mar pode ser comparado (CAZENAVE; MOREIRA, 2022). Os altímetros de satélite medem o nível absoluto do mar num referencial geocêntrico no qual se refere a órbita do satélite. Os instrumentos de radar e o processamento de dados foram otimizados para oceanos abertos, mas as medições do nível do mar enfrentam muitos problemas em ambientes costeiros. Isso resulta em uma rápida degradação da precisão dos dados na região próxima da continente, ou seja, a uma distância de 30 a 50 km da costa (ANZENHOFER *et al.*, 1999; GOMMENGINGER *et al.*, 2011; ANDERSEN e SCHARROO, 2011; BIROL e DELEBECQUE, 2014).

Em conceito, a altimetria de radar está entre as técnicas de sensoriamento remoto mais simples. Duas medidas geométricas básicas estão envolvidas:

- 1) a distância entre o satélite e a superfície do mar (chamado ‘alcance’) é determinada a partir do tempo de viagem de ida e volta dos pulsos de micro-ondas emitidos para baixo pelo radar a bordo do satélite e refletidos de volta do oceano superfície; e
- 2) a posição tridimensional do satélite no espaço em um referencial geocêntrico usando diferentes sistemas de rastreamento, como alcance de laser de satélite, Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) e Global Navigation Satellite System (GNSS).

Cazenave e Moreira (2022) descrevem que a combinação da medição de alcance e da altitude do satélite acima de uma referência fixa (normalmente um elipsoide matematicamente definido que representa a forma média da Terra) permite mapear a topografia da superfície do mar ao longo da trajetória do satélite em relação ao elipsoide de referência. Por sua vez, o geóide é uma superfície equipotencial do campo gravitacional da Terra que coincide com o nível médio do mar em repouso, já a topografia dinâmica é a altura da superfície do mar acima do geóide (AVISO+, *s.d.*). A Figura 1 mostra uma representação esquemática da altimetria nadir clássica.

Figura 1 – Esquema de medição baseada em altimetria nadir clássica por satélite da altura da superfície do mar



Fonte: AVISO e CNES/DUCROS

A primeira missão de altimetria de alta precisão, Topex-Poseidon, foi lançada em agosto de 1992. Foi seguida por uma série de missões com características orbitais idênticas (escolhidas para otimizar as medições da altura da superfície do mar): Jason-1, 2, 3 e Missões Sentinel-6 Michael Freilich lançadas em 2001, 2008, 2016 e 2020, respectivamente. Estas representam as chamadas missões de referência para estudos do nível do mar devido à sua alta precisão e estabilidade a longo prazo. Eles cobrem o domínio 66° N– 66° S e são complementados por outras missões em diferentes órbitas em latitudes mais altas (até $98,5^{\circ}$ N/S) - por exemplo, ERS-1/2, GFO, Envisat, CryoSat-2, SARAL/AltiKa e Sentinel-3-A/B (CAZENAVE; MOREIRA, 2022).

Perto da costa, as observações altimétricas são frequentemente de menor precisão ou não interpretáveis devido a uma série de fatores, incluindo contaminações da pegada terrestre (altímetro e radiômetro), correções imprecisas das marés e remoção incorreta dos efeitos atmosféricos (vento e pressão) na superfície do mar (VIGNUDELLI, *et al.*, 2005). Birol *et al.* (2021) explica que na estreita faixa costeira, abrangendo apenas alguns quilômetros de largura (correspondente ao tamanho da pegada do altímetro), o eco do radar interage com a superfície terrestre adjacente, resultando em formas de onda complexas. Essas formas de onda são influenciadas por diversas características da costa, como direção, topografia, batimetria e natureza da superfície terrestre, além das peculiaridades do próprio instrumento altímetro. Tal complexidade torna a interpretação dessas formas de onda costeiras desafiadora (GOMMENGINGER *et al.*, 2011; XU *et al.*, 2018).

Outra dificuldade está relacionada às correções geofísicas e ambientais necessárias para ajustar as medidas do altímetro. Essas correções, como as relacionadas à troposfera úmida, ionosfera, viés do estado do mar, barômetro inverso, efeito do vento em alta frequência e marés, frequentemente tornam-se imprecisas nas proximidades da costa (ANDERSEN; SCHARROO, 2011). Além disso, o uso tradicional de dados de altimetria no oceano costeiro é complicado pelo fato de que sua distribuição espacial e temporal não abrange completamente as escalas dos processos oceânicos próximos à costa. Visto que a resolução espacial e temporal dos dados altimétricos (ciclo orbital de 10 a 35 dias, espaçamento entre pistas de 70 a 350 km no equador) não é suficiente para amostrar o amplo espectro de escalas de comprimento observadas no oceano costeiro (BIROL *et al.*, 2027). No entanto, a monitorização dos oceanos costeiros globais é extremamente importante: sendo uma área de produtividade biológica muito elevada e de importância econômica crítica, o oceano costeiro é diretamente afetado pela atividade humana.

Vignudelli *et al.* (2000) mostram que uma série de dados em produtos oficiais seriam sinalizados como “ruins”, mas possivelmente recuperáveis após uma triagem mais cuidadosa. Nos últimos anos, grandes progressos foram feitos em instrumentos altímetros, algoritmos de processamento e correções (VIGNUDELLI *et al.*, 2011; PASSARO *et al.*, 2014; VERRON *et al.*, 2015; PASCUAL *et al.*, 2015; COTTON *et al.*, 2015). Consequência de vários estudos que se têm dedicado à avaliação e melhoria de algumas correções altimétricas em zonas costeiras oceânicas (ANDERSEN; SCHARROO, 2011; OBLIGIS *et al.*, 2011; RAY *et al.*, 2011; FERNANDES *et al.*, 2015).

Para resolver todos os problemas técnicos e científicos acima mencionados (ou seja, desenvolvimento de estratégias de processamento de dados costeiros, compreensão das variações do nível do mar perto da costa, análise da utilidade e limitações dos dados altimétricos em aplicações oceânicas costeiras), a experiência adquirida com os registros de dados de altimetria é absolutamente importante. Segundo Birol *et al.*, (2017) vários projetos foram financiados por agências espaciais para melhorar os produtos convencionais de altimetria de radar por satélite em áreas costeiras e águas continentais (PISTACH e PEACHI para o Centro Nacional de Estudos Espaciais francês, COASTALT e *eSurge* para a Agência Espacial Europeia). Mas muito poucos incluíram uma análise dos diferentes termos corretivos como um todo, com o objetivo de maximizar o número de dados úteis sobre o nível do mar perto da costa finalmente disponíveis para o utilizador. Este é o objetivo que motivou o desenvolvimento do algoritmo XTRACK (ROBLOU *et al.*, 2011).

2.3 X-TRACK: processador de dados altimétricos

O X-TRACK é um algoritmo de pós-processamento especificamente adaptado para recuperar dados de altimetria sobre mares marginais foi desenvolvido no LEGOS (*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale*) há mais de dez anos e distribuído pelo centro operacional AVISO+. Este software é rotineiramente no Centro de Topografia do Oceano e da Hidrosfera (CTOH, Serviço Francês de Observação dedicado a estudos de altimetria por satélite) e assim, grande parte do arquivo de dados altimétricos foi reanalisado.

Segundo Birol *et al.* (2021), o X-TRACK é um produto de 1 Hz ao longo da trajetória, cobrindo todos os oceanos costeiros com uma resolução de 6-7 km na direção ao longo da trajetória. Esse produto resulta do reprocessamento de várias missões altimétricas, como Topex/Poseidon, Geosat Follow-on, Envisat, Jason-1, 2, 3, SARAL e Sentinel-3 (veja a Tabela

1 onde encontra-se descrito o tempo de atividade de cada missão). Ele se baseia em uma estratégia de edição e pós-processamento definida para otimizar a completude e a precisão da altura da superfície do mar (SSH) derivada da altimetria de satélite em áreas costeiras oceânicas.

Tabela 1 – Série temporal de cada missão altimétrica

Missão	Início	Fim
T/P + Jason-1 + Jason-2 + Jason-3	28/02/1993 (ciclo 17 do T/P)	07/04/2022 (ciclo 226 do Jason-3)
ERS-1 + ERS-2 + ENVISAT + SARAL	23/10/1992 (ciclo 89 do ERS-1)	16/04/2016 (ciclo 32 do SARAL)
GFO	08/01/2000 (ciclo 37)	08/09/2008 (ciclo 222)
T/P intercalado+Jason-1 intercalado 2	20/09/2002 (ciclo 369 do T/P)	13/05/2017 (ciclo 327 do Jason-2)
HY-2A	12/04/2014 (ciclo 67)	15/03/2016 (ciclo 119)
S3A	12/03/2016 (ciclo 2)	26/01/2023 (ciclo 94)

Fonte: CTOH/LEGOS, 2023, *tradução nossa*.

Como resultado, os produtos regionais do X-TRACK são disponibilizados gratuitamente, oferecendo produtos de altimetria de nível 3 de várias missões altimétricas para aplicações costeiras e regionais. O software X-TRACK reprocessa os registros de dados geofísicos fornecidos pelas agências espaciais em tempo atrasado. Suas entradas consistem nas medições e parâmetros fornecidos nos GDRs de várias missões de altímetro, junto com correções adicionais e dados auxiliares distribuídos especificamente pelo CTOH. As correções selecionadas para cada missão de altimetria processada pelo X-TRACK estão detalhadas nas tabelas abaixo.

Tabela 2 – Correções usadas para missões seguindo a órbita Topex/Jason

Correções	T/P	Jason - 1	Jason-2	Jason-3
Ionosfera	Medições filtradas da faixa do altímetro de dupla frequência		Medições filtradas da faixa do altímetro de dupla frequência de alcance da SSB C-Band	Medições filtradas da faixa do altímetro de dupla frequência
Troposfera seca	Do modelo ERA5 de 1 hora			
Troposfera úmida	GPD+ (FERNANDES et al, 2015)	Radiômetro JMR	Radiômetro AMR	
Viés do estado do mar	Não paramétrico (TRAN et al., 2010)	Não paramétrico (TRAN et al., 2015)	Não paramétrico (TRAN et al., 2012)	
Marés sólidas	Resposta elástica ao potencial de maré (CARTWRIGHT E TYLER, 1971; CARTWRIGHT e EDDEN, 1973)			
Marés polares	Desai et al (2015) + Mean Pole Location (RIES et al. 2017)			
Marés oceânicas	FES 2014 B (CARRÈRE et al 2016) - Inclui altura das marés oceânicas de alta frequência e longo período e a correspondente altura das marés de carga.			
Correção atmosférica	TUGO HF forçado com campo de pressão e vento do ERA5 analisados + baixas frequências do barômetro inverso ¹ (IB LF).		TUGO HF forçado com campos de pressão e vento do ERA5 analisados + IB LF. E após 02/2016, HF do MOG2D forçado com pressão e vento do ECMWF + IB LF.	MOG2D HF forçado com ECMWF pressão e vento + IB LF (CARRERE e LYARD, 2003)

Fonte: CTOH/LEGOS, 2023, tradução nossa.

¹ Barômetro inverso (IB): Depressão hidrostática da superfície do mar dependente do tempo pelas variações da pressão atmosférica, também chamado de barômetro invertido.

Tabela 3 – Correções usadas para missões seguindo a órbita ERS

Correções	ERS-1	ERS-2	ENVISAT	SARAL
Ionosfera	Modelo Reaper NIC09 (<i>SCHARROO e SMITH, 2010</i>)	Do modelo GIM (<i>IJIMA et al., 1999</i>)	Filtrado de L2 e após o ciclo 65 GIM corrigido para polarização de 8 mm	GIM (<i>IJIMA et al., 1999</i>)
Troposfera seca	Do modelo ERA5 de 1 hora			
Troposfera úmida	GPD+ (<i>FERNANDES et al., 2015</i>)		Radiômetro MWR reprocessado	Neural Network (5 entradas) v4
Viés do estado do mar	BM3 (<i>GASPAR et al., 1994</i>)	Não paramétrico (<i>MERTZ et al., 2005</i>)	Não paramétrico (<i>TRAN et al., 2017</i>)	Não paramétrico (<i>TRAN et al., 2018</i>)
Marés sólidas	Resposta elástica ao potencial de maré (<i>CARTWRIGHT e TYLER, 1971; CARTWRIGHT e EDDEN, 1973</i>)			
Marés polares	<i>Desai et al (2015)</i> + Localização média do polo (<i>RIES et al. 2017</i>)			
Marés oceânicas	FES 2014 B (<i>CARRÈRE et al 2016</i>) - Inclui altura das marés oceânicas de alta frequência e longo período e a correspondente altura das marés de carga.			
Correção atmosférica	TUGO HF forçado com campo de pressão e vento do ERA5 analisados + baixas frequências do barômetro inverso.			TUGO HF forçado com análise de pressão e campo de vento do ERA5 + IB LF. Após 02/2016 MOG2D HF forçado com pressão ECMWF.

Fonte: CTOH/LEGOS, 2023, tradução nossa.

Tabela 4 – Correções usadas para missões com órbita própria

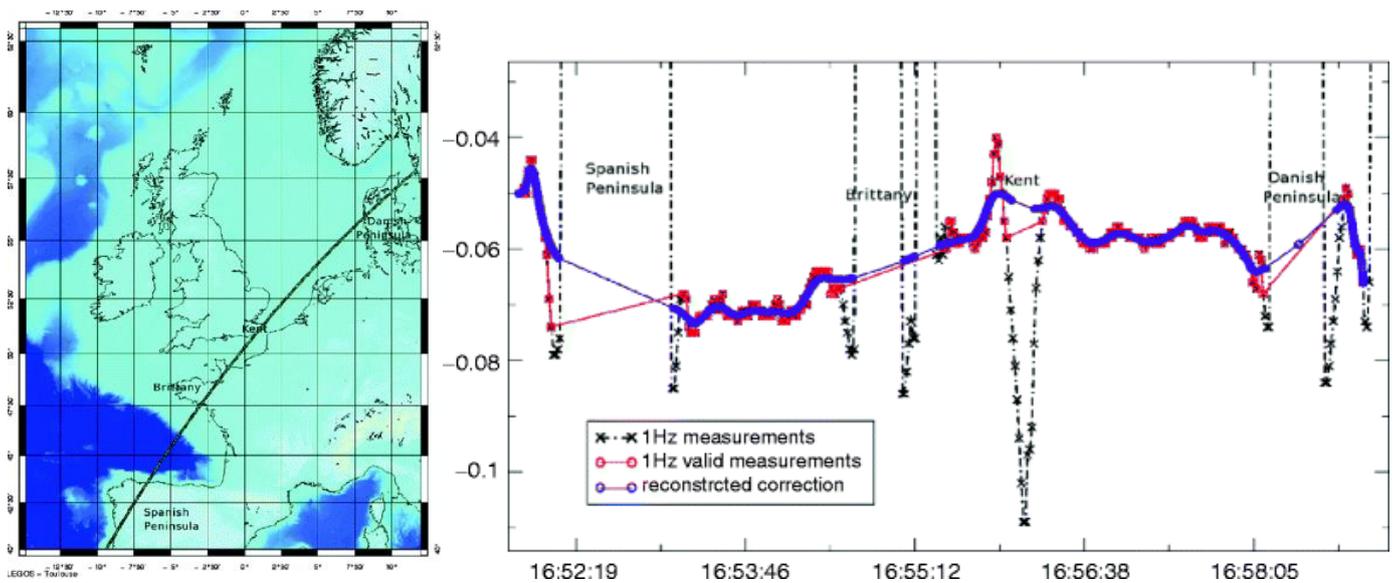
Correções	GFO	HY-2A	S3A
Ionosfera	GIM (<i>IJIMA et al., 1999</i>)		Filtrado de L2
Troposfera seca	Do modelo ERA5 de 1 hora		
Troposfera úmida	Radiômetro GFO e modelo ECMWF	Modelo ECMWF	Do radiômetro de micro-ondas
Viés do estado do mar	Não paramétrico (<i>TRAN e LABROUE 2010</i>)	Não paramétrico (<i>TRAN, 2012</i>)	
Marés sólidas	Resposta elástica ao potencial de maré (<i>CARTWRIGHT e TYLER, 1971; CARTWRIGHT e EDDEN, 1973</i>)		
Marés polares	<i>Desai et al (2015)</i> + Localização média do polo (<i>RIES et al. 2017</i>)		
Marés oceânicas	FES 2014 B (<i>CARRÈRE et al 2016</i>) - Inclui altura das marés oceânicas de alta frequência e longo período e a correspondente altura das marés de carga.		
Correção atmosférica	TUGO HF forçado com campo de pressão e vento do ERA5 analisados + baixas frequências do barômetro inverso.	TUGO HF forçado com campos de pressão e vento do ERA5 analisados + IB LF. E após 02/2016, MOG2D HF forçado com pressão e vento do ECMWF + IB LF.	MOG2D HF forçado com pressão e vento do ECMWF + IB LF. (<i>CARRÈRE e LYARD, 2003</i>)

Fonte: CTOH/LEGOS, 2023, tradução nossa.

Segundo Birol *et al.* (2017) inicia-se com a seleção das medidas altimétricas localizadas na região de interesse, definida como um polígono regional baseado em uma máscara de terreno precisa. Uma estratégia de edição em duas etapas é então usada para recuperar o máximo de observações significativas do nível do mar. O primeiro passo consiste em rejeitar potenciais outliers mediante da análise dos diferentes termos corretivos. Presume-se que mudanças abruptas nas correções geofísicas estejam associadas a erros. Primeiro, são

utilizados valores de limite (ver Tabela 9.1 em ROBLOU *et al.*, 2011)² e depois é aplicado um filtro de limite de $3r$ ou $4r$ (dependendo da área costeira) ao longo da trajetória do satélite (r é o desvio padrão do registro ao longo da trajetória). Além dos valores discrepantes nas correções, seus vizinhos adjacentes, que muitas vezes contêm valores errôneos, também são eliminados. Esta estratégia rejeita muito mais dados SSH do que o procedimento padrão utilizado pelos centros operacionais. Assim, numa segunda etapa, todos os valores de correção são interpolados a partir de uma curva de Bézier construída a partir dos dados editados. Deve-se notar que apenas as correções são interpoladas no X-TRACK, e não as medições do altímetro. Exemplos deste procedimento estão ilustrados na Figura 9.1 de Roblou *et al.* (2011)³ e Figura 2 de Vignudelli *et al.* (2005)⁴, os quais serão brevemente explicados em seguida.

Figura 2 – Exemplo de procedimento de pós-processamento de dados de altimétricos



Fonte: Roblou et al. (2011)

O procedimento ilustrado na Figura 2 representa a reconstrução de uma correção. Na imagem à esquerda nota-se a localização geográfica (Europa Ocidental) e na imagem à direita um exemplo de correção do atraso do caminho troposférico úmido (passagem T/P 137, ciclo 200). No gráfico em preto temos a correção bruta do GDR do T/P; em vermelho são os termos

² Link da Tabela 9.1 (ROBLOU et al., 2011): https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12796-0_9/tables/1.

³ Link da Figura 9.1 (ROBLOU et al., 2011): https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12796-0_9/figures/1_9.

⁴ Link da Figura 2 (VIGNUDELLI et al., 2005): <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL022602>.

corretivos válidos selecionados pelo esquema de processamento; e em roxo/azul são representados os termos corretivos reconstruídos para as medições de alcance de 10 Hz. A unidade do eixo X é o tempo em horas durante 22 de fevereiro de 1998 e a unidade do eixo Y é metros (ROBLOU *et al.*, 2011).

O algoritmo do procedimento opera da seguinte forma: inicialmente, calcula-se a evolução temporal do SLA médio ao longo da trajetória para identificar erros em grande escala. Os SLAs utilizados são suavizados ao longo da órbita com um filtro Loess passa-baixo de 20 km, reduzindo assim a influência da dinâmica de mesoescala no cálculo do erro em grande escala. Apenas os SLAs inferiores a dois desvios padrão do valor mediano ao longo da trajetória são considerados, eliminando dados espúrios na zona costeira e garantindo uma cobertura geográfica consistente ao calcular a média dos SLAs para cada ciclo (ROBLOU *et al.*, 2011).

Observa-se que alguns grandes deslocamentos ocorrem aleatoriamente: a média do SLA da trajetória salta repentinamente de 10 a 80 cm em um intervalo de dois ciclos. Esses saltos, fisicamente impossíveis, são consequências de erros em grande escala, principalmente devido à má determinação da órbita, e precisam ser eliminados. Em seguida, o sinal anual e interanual é removido usando um filtro Loess para eliminar o sinal de baixa frequência devido a efeitos estéricos. Posteriormente, são calculadas as estatísticas de média temporal (média e desvio padrão) para a série temporal do SLA com média espacial. Ciclos com valores discrepantes maiores que três desvios padrão da média temporal espacial do SLA ao longo da trajetória são identificados e corrigidos, removendo-se uma tendência para a trajetória global dos ciclos rejeitados (ROBLOU *et al.*, 2011).

Dessa forma, as tendências são determinadas em relação a uma versão suavizada das médias ao longo da trajetória, utilizando uma combinação de superfícies de Bézier para suavização e interpolação linear. Todas as etapas anteriores são integradas em um processo iterativo para selecionar, discriminar e corrigir os outliers. Esse método é especialmente adequado para estudos regionais, sendo suficiente para um estudo de escala local, especialmente quando outros erros dominam, como a cobertura de dados, correções de suavização e contaminação do solo.

A estratégia de edição do software X-TRACK foi totalmente revisitada na versão 2016. O princípio geral permanece o mesmo, mas cada termo corretivo é agora editado de uma maneira diferente, a fim de levar em conta as suas características individuais. Os resultados mostram claramente o benefício das alterações realizadas no software de processamento X-TRACK: uma detecção mais eficiente de outliers nas correções altimétricas, uma melhor

reconstrução dos valores de correção ausentes ou rejeitados e um aumento substancial na correlação entre a altimetria próxima da costa com registros de SLA feitos por marégrafos.

3. METODOLOGIA

A pesquisa aqui relatada se debruça sobre o método quantitativo de análise que implica na utilização de medidas previamente estabelecidas, cujos resultados sejam quantificáveis, garantindo o estabelecimento de conclusões seguras e confiáveis (GIL, 1999; CERVO; BERVIAN, 2002). O método quantitativo, como o próprio nome indica, caracteriza-se pelo emprego da quantificação, tanto nas modalidades de coleta de informações quanto no tratamento delas por meio de técnicas estatísticas. Estudos dessa natureza podem aplicar técnicas como médias, desvio-padrão, moda, correlação, regressão etc. (RICHARDSON, 1999).

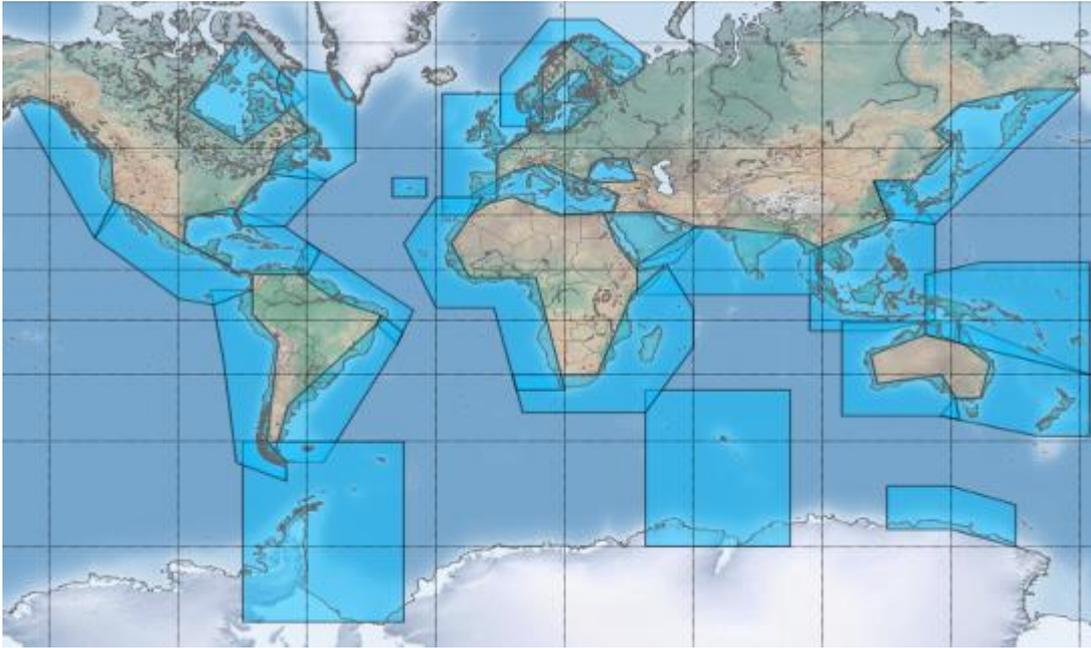
Assim, para atingir o objetivo de quantificar as médias anuais das anomalias do nível do mar (SLA) nas costas dos estados da Região Sul do Brasil, se utilizou dados de altimetria via satélite coletados juntos ao site da AVISO+.

O processamento dos dados é realizado regionalmente, e para cada zona costeira (apresentadas na Figura 3 e nominada na Tabela 5) há um arquivo por trilha, contendo para cada ponto altimétrico de 1 Hz, a SLA e outros parâmetros associados, conforme a numeração da *track* de coleta. Para o nosso caso, focaremos na zona costeira *South Atlantic America* (ver Figura 4) que recobre todo o litoral leste da América do Sul e, conseqüentemente, a área do estudo dessa pesquisa.

Para a realização desse trabalho, foram utilizados dados de satélite produtos das missões orbitais do Topex/Poseidon e Jasons-1, Jason-2 e Jason-3 que, posteriormente, foram corrigidas pelo X-TRACK onde

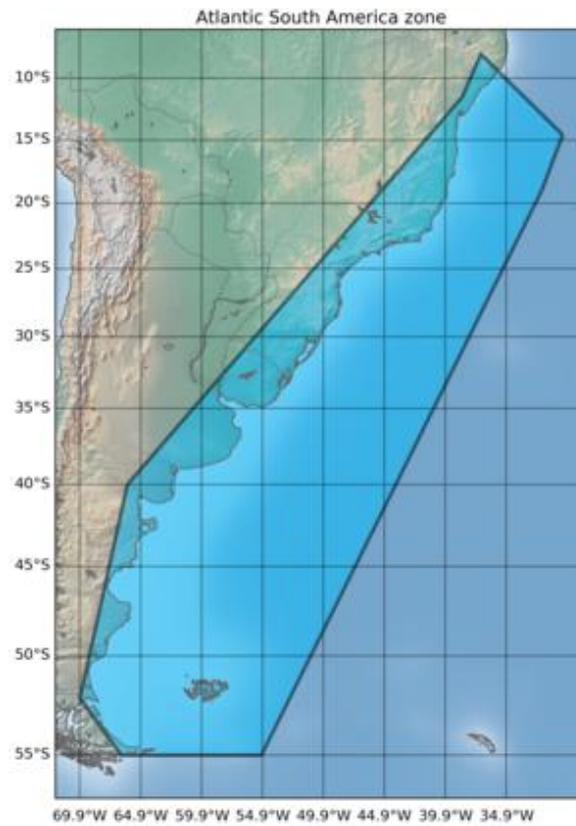
o processamento começa pela seleção de dados oceânicos válidos. Em seguida, são utilizadas uma máscara de terreno precisa e uma estratégia de edição dedicada. Este último inclui duas etapas. O primeiro passo é impor critérios de edição, tanto nas medidas do altímetro quanto nos termos corretivos, que se destinam a ser mais restritivos que os padrões. Estes critérios são limiares que foram escolhidos após vários testes para cada parâmetro, a fim de garantir que todos os valores discrepantes sejam totalmente removidos (na verdade, uma das razões encontradas para a grande variabilidade irrealista frequentemente observada em dados altímetros perto de plataformas continentais é a presença de muitos outliers nos termos corretivos). Para isso, analisa-se o comportamento de todos os termos corretivos ao longo da pista levando em consideração suas características individuais. Cada termo corretivo é editado de maneira diferente. Supõe-se que alterações abruptas estejam associadas a dados incorretos e os valores discrepantes são removidos. (AVISO, 1996).

Figura 3 – Mapa das zonas fornecidas para os produtos costeiros do X-TRACK



Fonte: CTOH/LEGOS

Figura 4 – Zona X-TRACK ASA: Atlântico Sul da América



Fonte: CTOH/LEGOS

Tabela 5 – Nomenclatura das missões e zonas costeiras do X-TRACK

MISSION <i>(Missão)</i>	ERS1+ERS2+ENV+SRL	European Remote-Sensing Satellite 1, 2 + Envisat + Saral/Altika
	GFO	Geosat Follow-On
	HY2	HaiYang-2A
	S3A	Sentinel-3A
	TP+J1+J2+J3	Topex/Poseidon + Jason-1 + Jason-2 + Jason-3
	TPN+J1N+J2N	Topex/Poseidon New orbit + Jason-1 New Orbit + Jason-2 New Orbit
ZONE <i>(Zonas)</i>	ADELIE	Adelie-Mertz (<i>Antártica Oriental</i>)
	AMAZON	Amazon (<i>Amazônica</i>)
	ARABIA	Red Sea and Persian Gulf (<i>Mar Vermelho e Golfo Pérsico</i>)
	ASA	Atlantic South America (<i>Atlântico Sul Americano</i>)
	AZORES	Azores Archipelago (<i>Arquipélago dos Açores</i>)
	BALTIC	Baltic Sea (<i>Mar Baltico</i>)
	BSEA	Black Sea (<i>Mar Negro</i>)
	CHINASEA	China Sea (<i>Mar da China</i>)
	DRAKE	Drake passage (<i>Passagem de Drake</i>)
	EAUSTRALIA	East Australia (<i>Leste da Austrália</i>)
	GOM	Gulf of Mexico Caribbean Sea (<i>Golfo do México e Mar do Caribe</i>)
	GULFSTREAM	Gulf Stream (<i>Corrente do Golfo</i>)
	HUDSON	Hudson Bay (<i>Baía de Hudson</i>)
	HUMBOLDT	Humboldt current (<i>Corrente de Humboldt</i>)
	KERGUELEN	
	KERGUELEN	Kerguelen Islands (<i>Ilhas Kerguelen</i>)
	LABRADOR	Labrador Sea (<i>Mar do Labrador</i>)
	MEDSEA	Mediterranean Sea (<i>Mar Mediterrâneo</i>)
	NEA	North East Atlantic (<i>Nordeste do Atlântico</i>)
	NINDIAN	North Indian Ocean (<i>Norte do Oceano Índico</i>)
	NORWAY	Norway (<i>Noruega</i>)
	NWA	North West America (<i>Noroeste da América</i>)
	NWP	North West Pacific (<i>Noroeste do Pacífico</i>)
	SEA	South and East Africa (<i>África do Sul e Leste</i>)
WAFRICA	West Africa (<i>África Ocidental</i>)	
WAUSTRALIA	West Australia (<i>Austrália Ocidental</i>)	
WLA	West Latin America - California (<i>América Latina Ocidental e Califórnia</i>)	
WTP	West Tropical Pacific (<i>Pacífico Ocidental Tropical</i>)	

Fonte: CTOH/LEGOS, 2023, tradução nossa

A cadeia de processamento X-TRACK (descrita em Birol *et al.*, 2017) é aplicada aos dados AVISO L2P (o manual do produto L2P está disponível no site AVISO). A partir dos produtos L2P ao longo da trilha, as medições de alcance altimétrico de 1 Hz e as correções são combinadas e projetadas em trilhas de referência, permitindo o cálculo de séries temporais de Anomalia do Nível do Mar costeiras com um espaçamento espacial de ~6-7 km entre os pontos.

Uma vez calculadas as alturas corrigidas da superfície do mar (SSHs), elas são então projetadas em pontos fixos ao longo da trajetória nominal do satélite altímetro e convertidas em SLAs subtraindo-se a uma altura média precisa da superfície do mar. Este último é calculado nos pontos nominais fixos, por inversão de todas as medições de SSH disponíveis ao longo dos repetidos percursos terrestres da missão do altímetro considerada (VIGNUDELLI *et al.*, 2005). De tal modo, após esse processo, a base de dados é disponibilizada no site da AVISO+. Os dados são fornecidos em arquivos no formato NetCDF e incluem:

- ✓ os dados de SLA ao longo de uma trilha de referência nominal;
- ✓ um perfil da Superfície Média do Mar (MSSH) ao longo da trilha, consistente com o SLA (mesmo período de dados);
- ✓ as correções de altimetria aplicadas ao SLA (dac, seco, ionosfera, maré oceânica, maré polar, maré sólida, ssb e úmido);
- ✓ parâmetros auxiliares da altimetria (σ_0 e swh);
- ✓ o viés entre missões aplicado ao SLA;
- ✓ a distância até a costa mais próxima de GSHHS (WESSEL *et al.*, 1996); e
- ✓ a topografia dinâmica média híbrida CNES_CLS22_cmems2020 (JOUSSET *et al.*, 2022) distribuída pelo AVISO+.

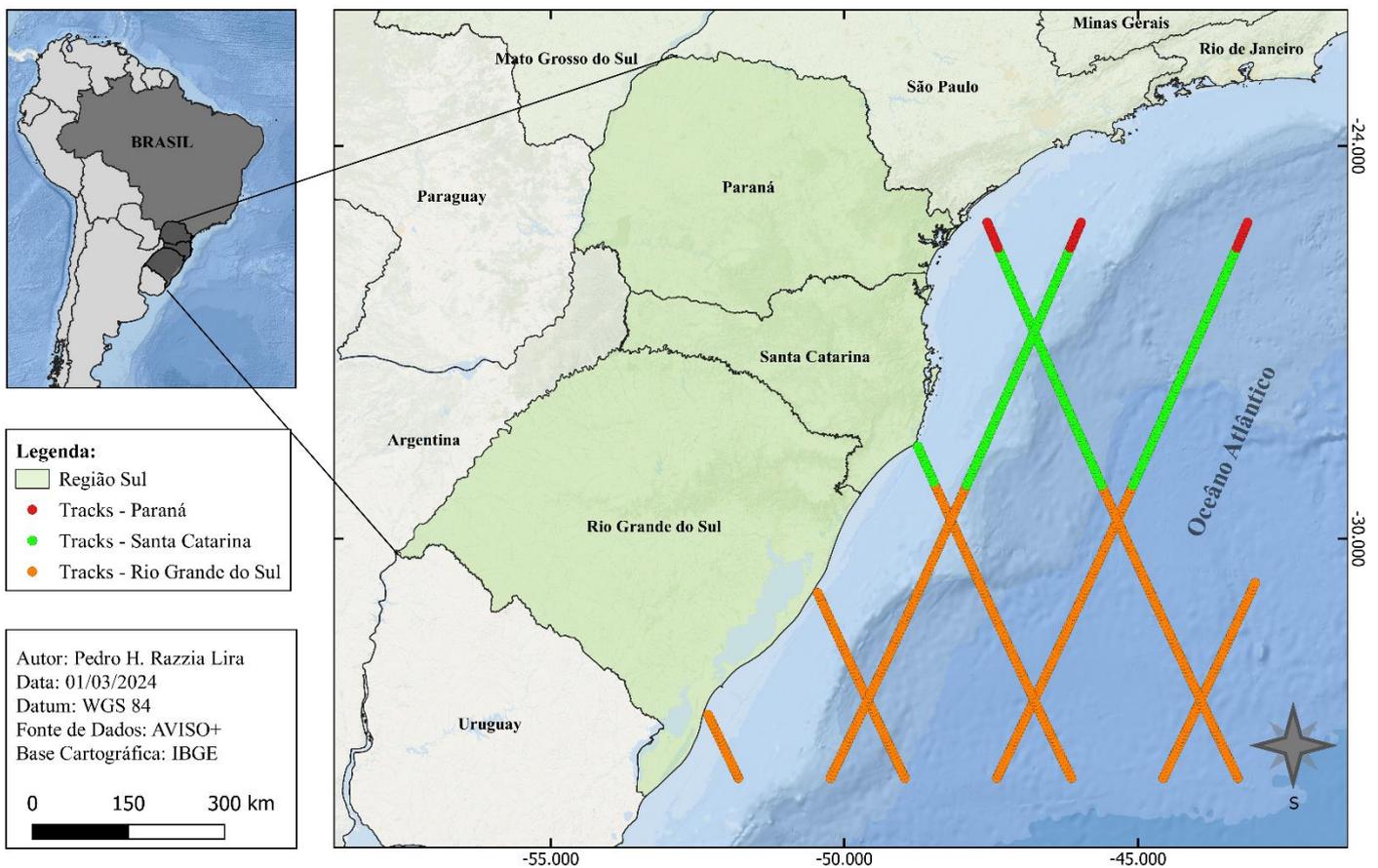
Dessa forma, os dados das medições de SLA, coletados entre 1993 e 2022, são extraídos e convertidos de arquivos NetCDF para o formato de texto (.txt) por intermédio da plataforma de dados *Panoply*. Posteriormente, esses dados são levados e organizados em planilhas junto ao editor Microsoft Excel, onde são limpos, separados - de acordo com o litoral do estado adjacente - e reorganizados em planilhas dinâmicas onde se realizarão os cálculos que gerarão médias anuais para cada *track*. Em seguida, essas médias são agrupadas com o intuito de gerar as médias altimétricas de cada ano para as costas do RS, SC e PR.

Para o estudo, foram utilizadas 769.907 medições obtidas em 1073 ciclos de 7 trilhas orbitais entre 1993 e 2022. Desses dados altimétricos foram coletados 499.801 em 487 pontos ao longo de 7 *tracks* na zona litorânea do RS; outras 242.740 medidas foram apanhadas em 231 pontos das 4 *tracks* adjacentes a SC e, por fim, mais 27.366 elementos adquiridos em 27 pontos

ao longo das 3 *tracks* que passam na costa do PR. A seguir, apresenta-se o mapa dos pontos de coleta ao longo das tracks, separados por cores de acordo com a região litorânea do estado adjacente.

Figura 5 – Mapa dos pontos de coleta das SLAs da zona costeira da Região Sul do Brasil

Pontos de coleta das Anomalias do Nível do Mar na Zona Costeira da Região Sul do Brasil



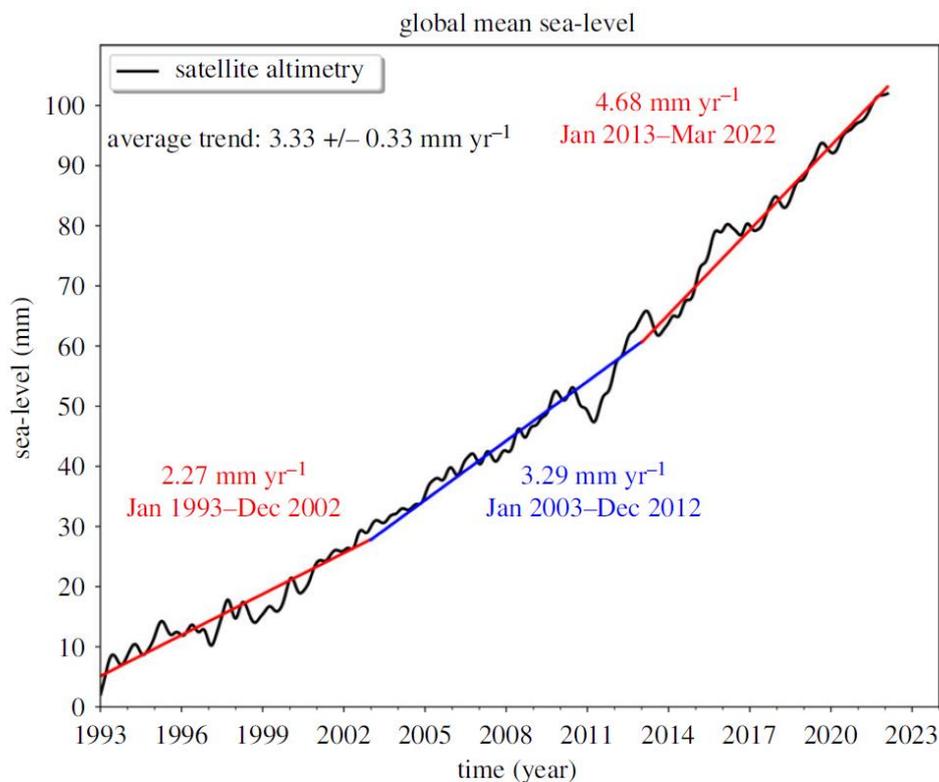
Fonte: elaborado pelo autor

Após esse processo, com as médias anuais de SLAs, foram gerados três gráficos, um para cada estado, onde poderemos visualizar com maiores detalhes as anomalias e tendências da superfície do mar ao longo da série histórica de 30 anos. Ademais, serão calculados o Coeficiente de Determinação (R^2) para os três estados da região, onde quantificará a tendência da anomalia encontrada.

4. RESULTADOS

A cobertura global das missões altimétricas permitiu estimar taxas regionais de alteração do nível do mar. Inúmeros trabalhos realizados a partir dos dados de satélite relatam que a maioria das regiões apresentam alterações positivas no nível do mar durante as séries históricas analisadas. Cazenave e Moreira (2022) sugerem que a aceleração do aumento regional do nível do mar baseada na altimetria é aproximadamente uniforme em todos os oceanos, como esperado, principalmente devido ao derretimento acelerado da camada de gelo em resposta ao aquecimento global antropogênico. Todavia, a elevação regional do nível do mar apresenta padrões espaciais complexos devido à dinâmica da atmosfera/oceano e aos efeitos gravitacionais, rotacionais e de deformação da crosta terrestre da redistribuição da massa oceânica, associados à perda de gelo das geleiras de montanha, mudanças na massa de gelo groenlandês e antárticos e mudanças no armazenamento de água terrestre, etc. (JEVREJEVA *et al*, 2019).

Figura 6 – Série temporal do nível médio do mar global a partir de altimetria de múltiplas missões orbitais (1993-2022)



Fonte: AVISO/CAZENAVE *et al*, 2022.

A Figura 6 mostra a curva média global do nível do mar (em preto) entre 1993 e 2022, mesma série histórica estudada por esse trabalho. Baseada no reprocessamento mais atualizado de missões altimétricas (CAZENAVE; MOREIRA, 2022) e inclui uma correção para a deriva instrumental ocorrida durante os primeiros 6 anos do Topex/Poseidon (ABLAIN *et al.*, 2017), bem como uma correção de ajuste isostático glacial (GIA) de $-0,3 \text{ mm a}^{-1}$ (PELTIER, 2004; TAMISIEA, 2011). As linhas retas coloridas representam tendências lineares do nível do mar ao longo de três períodos sucessivos. A taxa de aumento médio global do nível do mar neste período de 30 anos é de $3,33 \pm 0,33 \text{ mm a}^{-1}$. A incerteza de $\pm 0,3 \text{ mm}$ (nível de confiança de 90%) é baseada em Ablain *et al.* (2019), que quantificam as fontes de erros que afetam todos os componentes do sistema altimétrico (desvios, vieses e ruídos), daí a determinação do GMSL. Na figura 6 também se observa uma clara aceleração. A taxa de aumento foi de $2,3 \text{ mm a}^{-1}$ entre 1993 e 2002; $3,3 \text{ mm a}^{-1}$ entre 2003 e 2012 e $4,7 \text{ mm a}^{-1}$ durante 2013 e 2022.

Olhando para a tendência de aumento do nível médio do mar global, apresentada na Figura 6, podemos apontar uma elevação média global de aproximadamente ± 9 centímetros ao longo desses 30 anos. Vale ressaltar que esse é um aumento médio global, ou seja, uma elevação eustática do nível do mar. Por conseguinte, não é uniforme em todas as regiões, como já foi relatado anteriormente nesse escrito, assim, visualizando e entendendo isso, podemos seguir para o enfoque principal da pesquisa.

Agora, direcionando-se para as regiões costeiras, visando a sua importância e necessidade de aprofundar conhecimentos em torno da dinâmica oceânica do mar costeiro, criou-se o método conhecido como "retracking" (GOMMENDINGER *et al.*, 2010; PASSARO *et al.*, 2015; WANG & ICHIKAWA, 2017; XU *et al.*, 2018) que tem possibilitado o uso de dados de nível do mar mais confiáveis em áreas costeiras, por meio do reprocessamento adaptado das medições baseadas em altimetria para extrair uma estimativa precisa da "amplitude" dos sinais de radar. Isso tem permitido uma melhor compreensão do comportamento da altimetria marinho-costeira em escala regional, incluindo a zona costeira brasileira, o que possibilita o desenvolvimento de diversos estudos sobre as dinâmicas costeiras e suas relações com os fatores climáticos e geomorfológicos (veja LIRA *et al.*, 2023⁵).

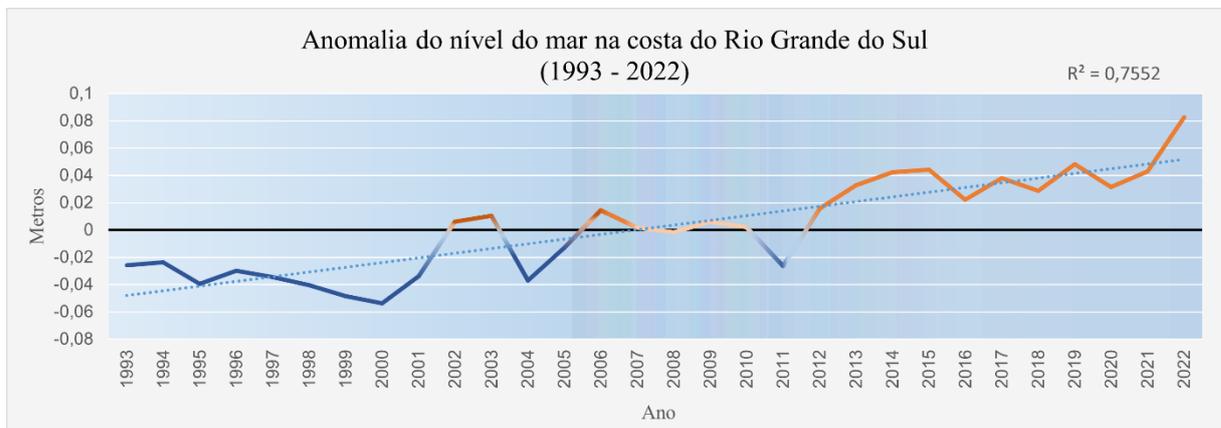
Assim, como já descrito na metodologia desse trabalho, utilizamos os dados processados pelo X-TRACK (CTOH/LEGOS), extraídos do site da AVISO+, para calcular as

⁵ LIRA, Pedro Henrique Razzia; SHOSSLER, Venisse; SIMÕES, Jefferson Cardia; AQUINO, Francisco Eliseu. Anomalias do nível do mar na costa do Rio Grande do Sul, Brasil (1993–2020): altimetria por satélite. **Meio Ambiente (Brasil)**, [S.L.], v. 5, n. 2, p. 30-36, 26 dez. 2023. <http://dx.doi.org/10.5281/ZENODO.10431715>.

médias anuais das anomalias do nível do mar costeiro dos estados da Região Sul do Brasil entre os anos de 1993 e 2022. A partir dos cálculos e respectivos resultados, criou-se gráficos contendo as médias anuais das SLAs para a área costeira marginal de cada estado da região. Também, conjuntamente as médias, calculou-se o coeficiente de determinação (R^2) de tendência das SLAS ao longo da série temporal estudada.

Para analisarmos os resultados das SLAs costeiras, ordenaremos os estados sulinos de acordo com sua posição geográfica, de sul para norte. Portanto, iniciaremos pelo estado do Rio Grande do Sul (RS), posteriormente Santa Catarina (SC) e findando com o Paraná (PR).

Gráfico 1 – SLA – Estado do Rio Grande do Sul

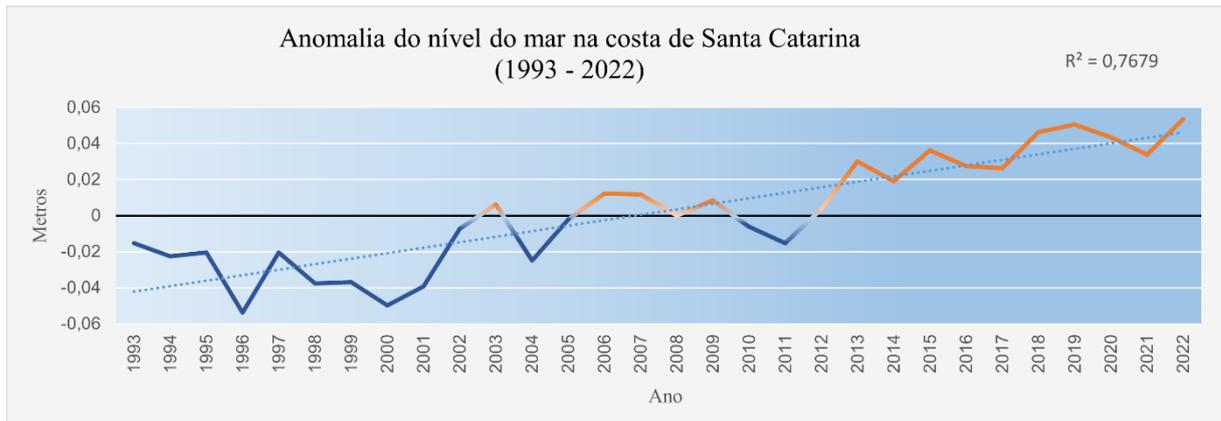


Fonte: *Elaborado pelo autor*

O Gráfico 1 apresenta as médias anuais de anomalia do nível do mar (SLA) para o estado do RS ao longo da série histórica de março de 1993 a abril de 2022. Analisando as médias calculadas, podemos perceber que a série inicia com anomalias negativas e termina com positivas. Entre os anos de 1993 e 2001, as SLAs anuais encontravam-se negativas, tendo seu máximo no ano de 2000, quando alcançou um valor aproximado de -5,5 cm. Logo em 2002 e 2003 obteve uma breve anomalia positiva com uma rápida queda em 2004 e 2005. De 2006 a 2010 as SLAs permaneceram próximas a neutralidade, contudo, em 2011, houve uma anomalia de aproximadamente -2,5 cm. A partir de 2012, as médias anuais apresentaram rápida elevação, atingindo valores superiores a +4 cm em 2015. As alterações anuais subsequentes permaneceram positivas até o final da série, com um máximo de +8 cm no ano de 2022 - vale repassar que o valor atribuído a 2022 é referente a média dos meses de janeiro a abril, pois a missão (T/P e Jason 1,2,3) utilizada para o levantamento dos dados se encerrou em abril/2022.

Com os resultados dos SLAs, obtivemos o valor de R^2 de 0,7552, determinando um coeficiente de aumento de $\pm 7,6$ centímetros no nível do mar costeiro do estado do RS durante a série temporal analisada.

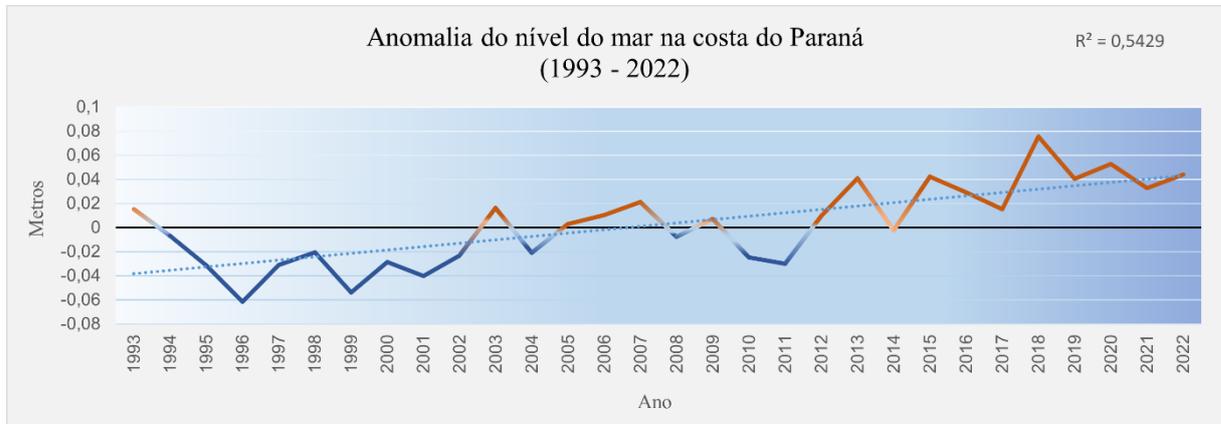
Gráfico 2 – SLA – Estado de Santa Catarina



Fonte: *Elaborado pelo autor*

O Gráfico 2 apresenta as SLAs para a região costeira adjacente a SC. Igualmente ao RS, a série histórica catarinense inicia com anomalias negativas, tendo picos próximos a -6 cm em 1996 e -5 cm em 2000. Posteriormente, teve uma sucinta anomalia positiva em 2003, seguida de rápida queda em 2004, assim como a costa gaúcha. De 2005 a 2010, a costa de SC apresentava pequena tendência positiva, com uma seguida negativa em 2011. De 2012 até o fim da série de medições, anomalias positivas foram registradas em todos os anos, com máximos entre +5 e +6 cm em 2019 e 2022, respectivamente. Atribuindo o valor de R^2 , obtivemos 0,7679, um valor pouco mais elevado do que o registrado no RS.

Gráfico 3 – SLA – Estado do Paraná



Fonte: *Elaborado pelo autor*

Finalmente, o gráfico 3 apresenta as SLAs para a zona costeira paranaense. Contrariando os registros dos outros dois estados, a série do PR iniciou com um valor para o ano de 1993 próximo a neutralidade, porém, positivo. Os anos seguintes, entretanto, foram de queda acentuada até registrar o valor da SLA mínima no ano de 1996, -6 cm. Os anos seguintes possuíram registros próximos aos outros estados, com valores negativos até 2003, pequena queda em 2004 e subsequente neutralidade levemente positiva até 2009. Contudo, em 2010 e 2011 valores médios de SLA negativos próximos a -3 cm foram registrados. A partir de 2012, no entanto, seguiu tendências que meandravam valores positivos próximos a neutralidade em 2014 e muito positivos em 2018, se aproximando dos +8 cm. Tais registros fazem com que as águas costeiras do PR se diferenciasssem das águas do RS e SC. Calculando o valor de R^2 para a série temporal paranaense, obtivemos o valor de 0,5429, valor consideravelmente inferior a tendência calculada para os estados vizinhos.

Os valores e diferenças registrados nos gráficos, nos levantam diversas questões que nos intrigam e nos conduzem a pesquisar os “por quês” dos distintos comportamentos nas zonas costeiras. É perceptível que há uma grande discrepância no número de dados que cada zona costeira possui, mas também é notório as diferenças nas dinâmicas oceânicas que cada uma possui. Uma variedade de processos de pequena escala, originados tanto da oceanografia quanto da hidrologia costeira, podem influenciar a taxa de elevação do nível do mar próximo à costa. Por exemplo, características como o talude continental e as correntes de plataforma, mudanças nas propriedades das ondas e a entrada de água doce dos rios em estuários podem desempenhar

um papel significativo (WOODWORTH et al., 2019). Além disso, fenômenos de escala global, como ventos, gradientes de pressão, circulação atmosférica e correntes oceânicas, também podem exercer influência direta sobre diferentes regiões costeiras. Em níveis regionais, as variações do nível do mar podem ser influenciadas por alterações nas circulações atmosférica e oceânica, assim como por processos geodinâmicos terrestres, incluindo deformações significativas nas bacias oceânicas e mudanças no campo gravitacional global, além do solo local.

Portanto, o nível do mar ao longo da costa pode divergir consideravelmente do nível do mar em águas abertas em várias escalas temporais. Enquanto as tendências no nível do mar em águas abertas são primariamente influenciadas por processos que afetam o nível médio global do mar, como expansão térmica média do oceano, derretimento de gelo terrestre etc, na costa, além dessas contribuições, variações e processos locais podem causar mudanças adicionais em escalas que variam de interanuais a decadais, como efeitos de ressurgência, redemoinhos, ondas geradas pelo vento, correntes de plataforma e mudanças na densidade da água associadas ao escoamento dos rios (GOUZENES et al., 2020).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos sobre o nível do mar são extremamente necessários para o entendimento das dinâmicas do oceano visando as evidências das mudanças climáticas. As variações regionais do nível do mar podem desviar substancialmente da média global, podem modificar em escalas de tempo e, em algumas regiões, podem até levar a uma reversão das tendências globais.

No entanto, a marca dos efeitos antrópicos no nível do mar regional – seja devido a mudanças no forçamento atmosférico ou a variações de massa no sistema – aumentará com o tempo à medida que as mudanças climáticas avançam e, no final do século XXI, os padrões do nível do mar serão uma superposição de modos de variabilidade climática e padrões de nível do mar estáticos naturais e induzidos antropogenicamente (STAMMER et al., 2013). Logo, a atribuição de mudanças atuais e previsões das futuras variações no nível do mar requerem um sistema de observação expandido e sustentado.

Assim, considerando os fatores que afetam as dinâmicas oceânicas, a altimetria por satélite possibilita a correção dos erros pré-processados, simplificando o processo para triviais levantamentos estatísticos. Além disso, esse método apresenta menores chances de registrar problemas com lacunas temporais nos dados devido a falhas nos sensores. Assim, estudar o nível costeiro dos mares com sensores orbitais permite levar em conta dados de áreas mais extensas, sobrepondo a precisão de marégrafos que registram a mudança relativa do nível do mar costeiro apenas em pontos da costa e, portanto, fornecem uma amostragem esparsa, não uniforme e pouco representativa da área oceânica global.

Portanto, podemos ressaltar que o método utilizado nesse trabalho facilita a obtenção de dados de nível do mar com maior precisão e espacialidade, já que o software X-TRACK fornece dados com ótimas resoluções para as áreas costeiras. Com essa capacidade de fornecer informações detalhadas em diferentes áreas geográficas, conseguimos identificar padrões, tendências e anomalias que contribuem para a compreensão dos processos oceânicos locais e suas interações com a dinâmica oceânica geral e o clima global. Além disso, a alta abrangência espacial dos dados permite uma análise mais ampla e precisa dos impactos das mudanças do nível do mar em regiões costeiras vulneráveis, auxiliando na formulação de estratégias de adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas nessas áreas.

Em suma, o uso da altimetria por satélite e do software X-TRACK representa um avanço significativo no campo da pesquisa sobre o nível do mar. Sendo uma das ferramentas essenciais para o fornecimento de dados que visem uma melhor compreensão dos processos oceânicos e climáticos, tal como para o desenvolvimento de políticas e medidas adequadas em resposta as mudanças climáticas.

Para concluir, afastamo-nos do assunto principal e nos direcionamos a uma informação descrita por Gregory *et al.* (2016) que me deixou extremamente reflexivo no decorrer da escrita desse trabalho, tal qual fiquei com os resultados da pesquisa. Os autores afirmam que: “o oceano é praticamente incompressível. Logo, as variações na pressão atmosférica têm um efeito insignificante no volume total do oceano”.

Então, com essa informação, podemos deixar uma ponderação para finalizar esse trabalho:

O oceano é incompressível ou incompreensível⁶?

...refletindo o mar em sua memória.

A "memória é o poder de efetividade contínua de experiências".

Sigmund Freud, 1895.

⁶ Um “e” faz a diferença!

REFERÊNCIAS

- ABLAIN, M.; JUGIER, R.; ZAWADZKI, L.; TABURET, N.; CAZENAVE, A.; MEYSSIGNAC, B.; PICOT, N. **The TOPEX-A drift and impacts on GMSL time series**. In: OST/ST MEETING, AVISO website. Out. 2017. Disponível em: https://meetings.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/tx_ausyclsseminar/files/Poster_OST_ST17_GMSL_Drift_TOPEXA.pdf. Acesso: 16 fev. 24.
- ABLAIN, Michaël; MEYSSIGNAC, Benoît; ZAWADZKI, Lionel; JUGIER, Rémi; RIBES, Aurélien; SPADA, Giorgio; BENVENISTE, Jérôme; CAZENAVE, Anny; PICOT, Nicolas. Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration. **Earth System Science Data**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 1189-1202, 7 ago. 2019. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-11-1189-2019>.
- ANDERSEN, O. B.; SCHARROO, R. Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: and implications for mean sea surface determination. **Coastal Altimetry**, [S.L.], p. 103-145, 10 ago. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_5.
- ANZENHOFER, Michael; SHUM, C.K.; RENTSH, Mathias. **Coastal Altimetry and Applications**. 464. ed. Columbus: The Ohio State University, 1999.
- AVISO. **AVISO user handbook**: Merged TOPEX/Poseidon products, Tech. Rep. AVINT-02-101-CN, ed. 3.0, 198pp, Toulouse, France, 1996.
- BIROL, Florence; DELEBECQUE, Caroline. Using high sampling rate (10/20Hz) altimeter data for the observation of coastal surface currents: a case study over the northwestern mediterranean sea. **Journal Of Marine Systems**, [S.L.], v. 129, p. 318-333, Jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.07.009>.
- BIROL, F.; FULLER, N.; LYARD, F.; CANCEY, M.; NIÑO, F.; DELEBECQUE, C.; FLEURY, S.; TOUBLANC, F.; MELET, A.; SARACENO, M.; LÉGER, F. Coastal applications from nadir altimetry: example of the x-track regional products. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 59, n. 4, p. 936-953, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.005>.
- BLUNDEN, J.; BOYER, T. State of the Climate in 2020. **Bulletin Of the American Meteorological Society**, [S.L.], v. 102, n. 8, p. 1-481, 1 ago. 2021. American Meteorological Society. <http://dx.doi.org/10.1175/2021bamsstateoftheclimate.1>.
- CARRÈRE, Loren; LYARD, Florent. Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 30, n. 6, p. 1-4, mar. 2003. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2002gl016473>.
- CARRÈRE, L. et al. **FES2012**: A new global tidal model taking advantage of nearly 20 years of altimetry. Proceedings of meeting "20 Years of Altimetry", Venice, 2012.

CARRÈRE, L. et al. Final version of the FES2014 global ocean tidal model, which includes a new loading tide solution. OSTST, 2016. Disponível em:

https://meetings.aviso.altimetry.fr/fileadmin/user_upload/tx_ausycslseminar/files/Poster_FES_2014b_OSTST_2016.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

CAZENAVE, Anny; PALANISAMY, Hindumathi; ABLAIN, Michael. Contemporary sea level changes from satellite altimetry: what have we learned? what are the new challenges?. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 62, n. 7, p. 1639-1653, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.017>.

CAZENAVE, Anny; MOREIRA, Lorena. Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [S.L.], v. 478, n. 2261, p. 1-30, maio 2022. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CHURCH, J. A.; CLARK, P. U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J. M.; JEVREJEVA, S.; LEVERMANN, A.; MERRIFIELD, M. A.; MILNE, G. A.; NEREM, R. S.; NUNN, P. D.; PAYNE, A.; PFEFFER, D.; STAMMER, D.; UNNIKRIISHNAN, A. S. Sea-Level Rise by 2100. **Science**, [S.L.], v. 342, n. 6165, p. 1445-1445, 2013. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.342.6165.1445-a>.

CHURCH, J. A.; CLARK, P. U.; CAZENAVE, A.; GREGORY, J. M.; JEVREJEVA, S.; MERRIFIELD, M. A.; MILNE, G. A.; NEREM, R. S.; NUNN, P. D.; PAYNE, A.; PFEFFER, D.; STAMMER, D.; UNNIKRIISHNAN, A. S. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Climate change 2013: the physical science basis. **Sea level change**. Cambridge, Cambridge University Press, p. 1137–1216, 2013.

COTTON, P.D. et al. **Improved oceanographic measurements from SAR altimetry: results and scientific roadmap from the ESA Cryosat plus for oceans project**. In: Sentinel-3 for Science Workshop, Venice, Italy, 2015.

DANGENDORF, Sönke; HAY, Carling; CALAFAT, Francisco M.; MARCOS, Marta; PIECUCH, Christopher G.; BERK, Kevin; JENSEN, Jürgen. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. **Nature Climate Change**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 705-710, 5 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>.

DESAI, Shailen; WAHR, John; BECKLEY, Brian. Revisiting the pole tide for and from satellite altimetry. **Journal Of Geodesy**, [S.L.], v. 89, n. 12, p. 1233-1243, 27 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-015-0848-7>.

ENGINER, C.; THIBAUT, P.; FENOGLIO-MARC, L.; QUARTLY, G.; DENG, X.; GÓMEZ-ENRI, J.; CHALLENGOR, P.; GAO, Y. Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. **Coastal Altimetry**, [S.L.], p. 61-101, 10 ago. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_4.

FERNANDES, M. Joana; LÁZARO, Clara; ABLAIN, Michaël; PIRES, Nelson. Improved wet path delays for all ESA and reference altimetric missions. **Remote Sensing of**

Environment, [S.L.], v. 169, p. 50-74, Nov. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.023>.

GREGORY, Jonathan M.; GRIFFIES, Stephen M.; HUGHES, Chris W.; LOWE, Jason A.; CHURCH, John A.; FUKIMORI, Ichiro; GOMEZ, Natalya; KOPP, Robert E.; LANDERER, Felix; COZANNET, Gonéri Le. Concepts and Terminology for Sea Level: mean, variability and change, both local and global. **Surveys In Geophysics**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 1251-1289, 29 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09525-z>.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GORNITZ, V. **Eustasy**. In: Schwartz, M.L. (eds) Encyclopedia of Coastal Science. Encyclopedia of Earth Science Series. Springer, Dordrecht. 2005. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_142.

HARLEY, Christopher D. G.; HUGHES, A. Randall; HULTGREN, Kristin M.; MINER, Benjamin G.; SORTE, Cascade J. B.; THORNER, Carol S.; RODRIGUEZ, Laura F.; TOMANEK, Lars; WILLIAMS, Susan L. The impacts of climate change in coastal marine systems. **Ecology Letters**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 228-241, 12 Jan. 2006. Wiley.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>.

IDIER, Déborah; BERTIN, Xavier; THOMPSON, Philip; PICKERING, Mark D.. Interactions Between Mean Sea Level, Tide, Surge, Waves and Flooding: mechanisms and contributions to sea level variations at the coast. **Surveys In Geophysics**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 1603-1630, 26 jun. 2019. Springer Science and Business Media LLC.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>.

IJIMA, B.A.; HARRIS, I.L.; HO, C.M.; LINDQWISTER, U.J.; MANNUCCI, A.J.; PI, X.; REYES, M.J.; SPARKS, L.C.; WILSON, B.D. Automated daily process for global ionospheric total electron content maps and satellite ocean altimeter ionospheric calibration based on Global Positioning System data. **Journal Of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, [S.L.], v. 61, n. 16, p. 1205-1218, Nov. 1999. Elsevier BV.
[http://dx.doi.org/10.1016/s1364-6826\(99\)00067-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1364-6826(99)00067-x).

IPCC 2014. Summary for policymakers. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (eds). **Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Part A**. Cambridge University Press, Cambridge, 2014.

IPCC 2019. **IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate**. eds H.-O. Poórtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, et al. 2019.

IPCC 2021. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. In: Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Eds MASSON-DELMOTTE V. P. et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

JACKSON, Luke P.; JEVREJEVA, Svetlana. A probabilistic approach to 21st century regional sea-level projections using RCP and High-end scenarios. **Global And Planetary Change**, [S.L.], v. 146, p. 179-189, nov. 2016. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.006>.

JEVREJEVA, S.; FREDERIKSE, T.; KOPP, R. E.; COZANNET, G. Le; JACKSON, L. P.; WAL, R. S. W. van de. Probabilistic Sea Level Projections at the Coast by 2100. **Surveys In Geophysics**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 1673-1696, 14 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09550-y>.

JOUSSET, Solène; MULET, Sandrine; WILKIN, John; GREINER, Eric; DIBARBOURE, Gérald; PICOT, Nicolas. New global Mean Dynamic Topography CNES-CLS-22 combining drifters, hydrological profiles and High Frequency radar data. **2022 Ocean Surface Topography Science Team Meeting**. Session: The Geoid, Mean Sea Surfaces and Mean Dynamic Topography, [S.L.], p. 1-15, Nov. 2022. CNES.

<http://dx.doi.org/10.24400/527896/A03-2022.3292>.

KOPP, Robert E.; HORTON, Radley M.; LITTLE, Christopher M.; MITROVICA, Jerry X.; OPPENHEIMER, Michael; RASMUSSEN, D. J.; STRAUSS, Benjamin H.; TEBALDI, Claudia. Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. **Earth's Future**, [S.L.], v. 2, n. 8, p. 383-406, 2014. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2014ef000239>.

KEMP, Andrew C.; DUTTON, Andrea; RAYMO, Maureen E.. Paleo Constraints on Future Sea-Level Rise. **Current Climate Change Reports**, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 205-215, 17 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40641-015-0014-6>.

KOPP, Robert E. *et al.* Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections. **Earth'S Future**, [S.L.], v. 5, n. 12, p. 1217-1233, dez. 2017. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2017ef000663>.

LABROUE, Sylvie; GASPAR, Philippe; DORANDEU, Joel; ZANIFÉ, Oz; MERTZ, F.; VINCENT, Patrick; CHOQUET, Denis. Nonparametric Estimates of the Sea State Bias for the Jason-1 Radar Altimeter. **Marine Geodesy**, [S.L.], v. 27, n. 3-4, p. 453-481, jul. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01490410490902089>.

LEFÈVRE, F.; LYARD, F. H.; PROVOST, C. Le; SCHRAMA, E. J. O.. FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. **Journal Of Atmospheric and Oceanic Technology**, [S.L.], v. 19, n. 9, p. 1345-1356, set. 2002. American Meteorological Society. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)0192.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(2002)0192.0.co;2).

LIU, Y., KERKERING, H., WEISBERG, R.H. **Coastal Ocean Observing Systems**. Elsevier (Academic Press), London, UK, P.461, 2015. ISBN 978-0-12-802022-7.

LOWE, J.A.; WOODWORTH, P.L.; KNUTSON, T.; MCDONALD, R.E.; MCINNES, K.L.; WOTH, K.; VON STORCH, H.; WOLF, J.; SWAIL, V.; BERNIER, N.B.; GULEV, S.; HORSBURGH, K.J.; UNNIKRISHNAN, A.S.; HUNTER, J.R.; WEISSE, R. **Past and future changes in extreme sea levels and waves**. In: CHURCH, J.A. et al. Understanding

sea-level rise and variability. Wiley-Blackwell: Chichester, xvi, p. 428, 2010. ISBN 978-1-4443-3452-4.

MARTI, Florence; CAZENAVE, Anny; BIROL, Florence; PASSARO, Marcello; LÉGER, Fabien; NIÑO, Fernando; ALMAR, Rafael; BENVENISTE, Jérôme; LEGEAIS, Jean François. Altimetry-based Sea level trends along the coasts of Western Africa. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 68, n. 2, p. 504-522, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2019.05.033>.

MILLER, Kenneth G.; KOMINZ, Michelle A.; BROWNING, James V.; WRIGHT, James D.; MOUNTAIN, Gregory S.; KATZ, Miriam E.; SUGARMAN, Peter J.; CRAMER, Benjamin S.; CHRISTIE-BLICK, Nicholas; PEKAR, Stephen F. **The Phanerozoic Record of Global Sea-Level Change**. *Science*, [S.L.], v. 310, n. 5752, p. 1293-1298, 2005. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1116412>.

NEREM, R. S.; BECKLEY, B. D.; FASULLO, J. T.; HAMLINGTON, B. D.; MASTERS, D.; MITCHUM, G. T. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [S.L.], v. 115, n. 9, p. 2022-2025, 12 fev. 2018. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1717312115>.

NICHOLLS, Robert J.; CAZENAVE, Anny. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, [S.L.], v. 328, n. 5985, p. 1517-1520, 18 jun. 2010. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1185782>.

OBLIGIS, E.; DESPORTES, C.; EYMARD, L.; FERNANDES, M. J.; LÁZARO, C.; NUNES, A. L. Tropospheric Corrections for Coastal Altimetry. **Coastal Altimetry**, [S.L.], p. 147-176, 10 ago. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_6.

PASCUAL, Ananda; LANA, Arancha; TROUPIN, Charles; RUIZ, Simón; FAUGÈRE, Yannice; ESCUDIER, Romain; TINTORÉ, Joaquín. Assessing SARAL/AltiKa Data in the Coastal Zone: comparisons with hf radar observations. **Marine Geodesy**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 260-276, 10 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2015.1019656>.

PASSARO, Marcello; CIPOLLINI, Paolo; VIGNUDELLI, Stefano; QUARTLY, Graham D.; SNAITH, Helen M. ALES: a multi-mission adaptive subwaveform retracker for coastal and open ocean altimetry. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 145, p. 173-189, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.008>.

PASSARO, M.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. Annual sea level variability of the coastal ocean: the Baltic sea: north sea transition zone. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [S.L.], v. 120, n. 4, p. 3061-3078, abr. 2015. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2014jc010510>.

PELTIER, W.R. GLOBAL GLACIAL ISOSTASY AND THE SURFACE OF THE ICE-AGE EARTH: the ice-5g (vm2) model and grace. **Annual Review of Earth and Planetary**

Sciences, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 111-149, 19 maio 2004. Annual Reviews.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082503.144359>.

RAY, R. D.; EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Tide Predictions in Shelf and Coastal Waters: status and prospects. **Coastal Altimetry**, [S.L.], p. 191-216, 10 ago. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_8.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. São Paulo: Editora Atlas, 1999.

RIES; J. C.; DESAI, S. **Conventional model update for rotational deformation**. In Fall AGU Meeting, New Orleans, LA, 2017. Disponível em:
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.G14A..07R/abstract>. Acesso em: 14 fev. 2024.

ROBLOU, L.; LAMOUREUX, J.; BOUFFARD, J.; LYARD, F.; HÉNAFF, M. Le; LOMBARD, A.; MARSALEIX, P.; MEY, P. de; BIROL, F. Post-processing Altimeter Data Towards Coastal Applications and Integration into Coastal Models. **Coastal Altimetry**, [S.L.], p. 217-246, 10 ago. 2010. Springer Berlin Heidelberg. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_9.

ROVERE, Alessio; STOCCHI, Paolo; VACCHI, Matteo. Eustatic and Relative Sea Level Changes. **Current Climate Change Reports**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 221-231, 2 ago. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40641-016-0045-7>.

SROCC. IPCC 2019. Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Eds: PÖRTNER, H. O et al. 2019.

STAMMER, Detlef; CAZENAVE, Anny; PONTE, Rui M.; TAMISIEA, Mark E. Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes. **Annual Review of Marine Science**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 21-46, 3 Jan. 2013. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406>.

TAMISIEA, Mark E. Ongoing glacial isostatic contributions to observations of sea level change. **Geophysical Journal International**, [S.L.], v. 186, n. 3, p. 1036-1044, 22 jul. 2011. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246x.2011.05116.x>.

TRAN, N.; LABROUE, S.; PHILIPPS, S.; BRONNER, E.; PICOT, N. Overview and Update of the Sea State Bias Corrections for the Jason-2, Jason-1 and TOPEX Missions. **Marine Geodesy**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 348-362, 16 ago. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2010.487788>.

TRAN, N. et al. **Impact of GDR-D standards on SSB corrections**. Venice: OSTST, 2012. Disponível em:
https://www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/OSTST/2012/oral/02_friday_28/01_instr_processing_I/01_IP1_Trans.pdf. Acesso em: 14 fev. 2024.

VERRON, Jacques; SENGENES, Pierre; LAMBIN, Juliette; NOUBEL, Jocelyne; STEUNOU, Nathalie; GUILLOT, Amandine; PICOT, Nicolas; COUTIN-FAYE, Sophie; SHARMA, Rashmi; GAIROLA, R. M. The SARAL/AltiKa Altimetry Satellite Mission. **Marine Geodesy**, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 2-21, 10 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01490419.2014.1000471>.

VIGNUDELLI, Stefano; CIPOLLINI, Paolo; ASTRALDI, Mario; GASPARINI, Gian Pietro; MANZELLA, Giuseppe. Integrated use of altimeter and in situ data for understanding the water exchanges between the Tyrrhenian and Ligurian Seas. **Journal Of Geophysical Research: Oceans**, [S.L.], v. 105, n. 8, p. 19649-19663, 2000. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2000jc900083>.

VIGNUDELLI, S.; CIPOLLINI, P.; ROBLOU, L.; LYARD, F.; GASPARINI, G. P.; MANZELLA, G.; ASTRALDI, M. Improved satellite altimetry in coastal systems: case study of the Corsica channel (Mediterranean Sea). **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 32, n. 7, p. 1-32, abr. 2005. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2005gl022602>.

WAHR, John M. Deformation induced by polar motion. **Journal Of Geophysical Research: Solid Earth**, [S.L.], v. 90, n. 11, p. 9363-9368, 30 set. 1985. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/jb090ib11p09363>.

WANG, Xifeng; ICHIKAWA, Kaoru. Coastal Waveform Retracking for Jason-2 Altimeter Data Based on Along-Track Echograms around the Tsushima Islands in Japan. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 762, 24 jul. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs9070762>.

WCRP, Global Sea Level Budget Group. Global sea-level budget 1993–present. **Earth System Science Data**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 1551-1590, 28 ago. 2018. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-10-1551-2018>.

WESSEL, P.; SMITH, W. H. F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database. **Journal Of Geophysical Research: Solid Earth**, [S.L.], v. 101, n. 4, p. 8741-8743, 10 abr. 1996. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/96jb00104>.

WMO 2021. World Meteorological Organization. **Statement on the State of the Global Climate in 2020**, WMO report n° 1264. 2021.

WOODWORTH, Philip L.; MELET, Angélique; MARCOS, Marta; RAY, Richard D.; WÖPPELMANN, Guy; SASAKI, Yoshi N.; CIRANO, Mauro; HIBBERT, Angela; HUTHNANCE, John M.; MONSERRAT, Sebastià. Forcing Factors Affecting Sea Level Changes at the Coast. **Surveys In Geophysics**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 1351-1397, 8 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09531-1>.

WÖPPELMANN, Guy; MARCOS, Marta. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. **Reviews Of Geophysics**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 64-92, 30 jan. 2016. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2015rg000502>.

WUEBBLES, D. J. et al. Executive summary. In: **Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I** [WUEBBLES, D. J.; FAHEY D. W.; HIBBARD K. A.; DOKKEN D. J., STEWART B. C.; MAYCOCK T. K. (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, p. 12-34, 2017.

XU, XI-Yu; BIROL, Florence; CAZENAVE, Anny. Evaluation of Coastal Sea Level Offshore Hong Kong from Jason-2 Altimetry. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 282, 12 fev. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10020282>.