



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
COORDENADORIA ESPECIAL DE OCEANOGRAFIA
CURSO DE OCEANOGRAFIA

Gabriel Santin Coutinho

**Simulando eventos de inundação em uma unidade de conservação no sul do Brasil sob
diferentes cenários de elevação do nível do mar**

Florianópolis

2024

Gabriel Santin Coutinho

Simulando eventos de inundação em uma unidade de conservação no sul do Brasil sob diferentes cenários de elevação do nível do mar

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Oceanografia do Centro de Ciências Físicas e Matemáticas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Antonio Fernando Härter Fetter Filho, Dr.

Coorientador: Mario Luiz Mascagni, M.e

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Coutinho, Gabriel Santin

Simulando Eventos de Inundação em uma Unidade de Conservação no Sul do Brasil sob Diferentes Cenários de Elevação do Nível do Mar / Gabriel Santin Coutinho ; orientador, Antonio Fernando Härter Fetter Filho, coorientador, Mario Luiz Mascagni, 2024.
56 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

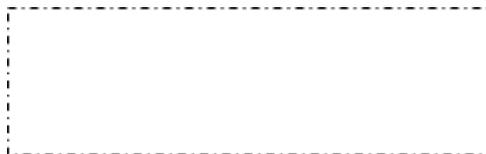
1. Oceanografia. 2. Inundação Costeira. 3. Modelagem Oceanica. 4. Maré. 5. Nível do mar. I. Fetter Filho, Antonio Fernando Härter. II. Mascagni, Mario Luiz . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Oceanografia. IV. Título.

Gabriel Santin Coutinho

**Simulando Eventos de Inundação em uma Unidade de Conservação no Sul do Brasil sob
Diferentes Cenários de Elevação do Nível do Mar**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Oceanografia e aprovado em sua forma final pelo Curso de Oceanografia.

Florianópolis, 25 de Outubro de 2024.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Prof. Antonio Fernando Härter Fetter Filho, Dr.
Orientador



Prof.(a) Felipe Mendonça Pimenta, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.(a) Pedro de Souza Pereira, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo ao meu orientador, Antonio Fetter, por todas as ferramentas disponibilizadas e também por mostrar que utilizar a física pode facilitar a resolução de vários problemas.

Ao meu coorientador, Mario Mascagni, que mesmo sempre atarefado, encontrava tempo para me ajudar e me auxiliar nesse aprendizado, ajudando também na elaboração de figuras e a entender melhor esse complexo modelo que é o Delft.

A todos os meus colegas do LABDINO que sempre estavam ali fazendo companhia, me dando dicas e ajuda quando precisava.

A minha namorada, Gabriela, por ter me dado apoio durante essa época de pouco tempo, além de sempre me tirar um sorriso, além de também me ajudar a construir algumas figuras que eu não tinha capacidade artística para fazer.

A todos os meus colegas e parceiros, em especial meu amigo Erots, e todos os outros que conheci em RPG, jogos e pela vida, que sempre estavam por aí para deixar um dia mais tranquilo e aproveitável.

Aos meus pais, Valmor e Ionara pelo apoio que me deram, seja me oferecendo um lugar para ficar ou da forma que era possível.

Ao projeto SARC, financiado pela ANP, pela bolsa de pesquisa durante essa etapa e todo o suporte com infraestrutura que foi necessário.

À CASAN, a EPAGRI e ao professor Antonio Klein pelos dados que foram disponibilizados para que essa pesquisa tenha sido feita.

À Nubia, um dos nossos anjos da graduação em Oceanografia da UFSC.

E por fim, a todos os professores do curso que sempre deram ótimas aulas e ensinamentos mesmo numa universidade em um estado precário, com saídas de campo, embarques e mergulhos incríveis.

RESUMO

O aumento do nível do mar está cada vez causando consequências mais graves nas regiões costeiras ao redor do mundo. Este trabalho investiga o potencial aumento dos impactos de inundações no próximo século na primeira Reserva Extrativista do Brasil, em Santa Catarina, e nos seus arredores urbanizados. Estes eventos são causados pelo efeito combinado da maré meteorológica, gerada por vento sul de alta intensidade no Oceano, somado aos efeitos de maré astronômica de sizígia. As simulações base são construídas a partir de eventos extremos de inundação ocorridos na região entre os anos de 2019 a 2021. São utilizados diferentes cenários (SSP) de mudanças climáticas globais descritos pelo IPCC, juntamente com dados coletados, dados de batimetria e altimetria de alta resolução integradas na base de dados do projeto. Dados de modelos globais e reanálise, são utilizadas nas simulações regionais de nível de água através do modelo numérico Delft3D FM. Quando analisada a área inundada no modelo, foi observado um aumento grande das zonas de inundação nos eventos mais extremos ao longo dos cenários, tomando cada um espaço muito maior do mangue e impactando novas zonas urbanas antes menos impactadas. A partir das análises harmônicas das séries de nível modeladas nos pontos de observação, notaram-se mudanças nos harmônicos de maré, com aumento da influência dos termos de água rasa M4 e MS4 e observada uma diminuição na amplitude dos termos de maré mais influentes como M2 e S2. Quando comparadas essas séries de nível com cotas de inundação conhecidas, houve também um aumento significativo na frequência desses fenômenos, passando de eventos de baixa frequência anual para eventos semanais de inundação, podendo chegar em casos de inundação permanente nos piores cenários. Com um nível do mar 59 cm acima do atual, também foi observado que apenas maré astronômica, sem influência de eventos de alta intensidade seria necessária para causar essa cheia necessária para o alagamento na região, tendo assim implicações bem graves para o ecossistema ali presente com perda de área de habitat, bem como para a infraestrutura humana na localidade que passaria a ter danos mais constantes e de maior intensidade.

Palavras-chave: inundação costeira; marés; modelagem numérica; aumento do nível do mar.

ABSTRACT

As sea levels rise causing more severe consequences in coastal regions around the world, this study investigates the potential increase in the frequency and impacts of floods in the next century in the first Extractive Reserve of Brazil, in Santa Catarina, and its highly urbanized surroundings. These events are simulated as a result of the combination of meteorological tides, driven by storm surges, combined with the effects of astronomical spring tides. The simulations are based on extreme flood events that occurred in the region between 2019 and 2021, using different global climate change scenarios (SSP) described by IPCC, along with collected data, high-resolution bathymetry and altimetry integrated into the project's database, as well as global models and reanalysis data to perform regional water level simulations through the Delft3D FM numerical model. In the analysis of the flooded area in the model, a significant increase in the inundation zones was observed during the most extreme events across the scenarios, with each one taking up much more space in the mangrove areas and impacting urban zones previously less affected. From the harmonic analysis of the modeled water level series at observation points, changes have occurred in tidal harmonics, with an increased influence of shallow water terms M4 and MS4, and a decrease in the amplitude of the more dominant tidal terms like M2 and S2. When these water level series were compared to known flood thresholds, there was also a significant increase in the frequency of these events, shifting from low-frequency annual events to weekly floods, potentially leading to permanent flooding in the worst-case scenarios. With sea levels 59 cm above the current level, it was also observed that only astronomical tides, without the influence of high-intensity events, would be needed to cause the flooding required to inundate the region, leading to serious implications for the local ecosystem with habitat loss and major challenges for human infrastructure in the area.

Key-Words: coastal floods; tides; numeric modeling; sea level rise.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVOS PRIMÁRIOS.....	12
2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	12
3. METODOLOGIA.....	13
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA.....	13
3.1.1 Fisiografia da Plataforma Sul.....	14
3.1.2 Massas da água, Circulação Oceânica e Atmosférica.....	15
3.1.3 As Baías de Florianópolis.....	16
3.1.4 Área principal do estudo.....	18
3.2 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D FM.....	21
3.2.1 Descrição do modelo.....	21
3.2.2 Grade.....	22
3.3 DADOS DE ENTRADA.....	24
3.3.1 Altimetria.....	24
3.3.2 Batimetria.....	24
3.3.3 Alti-batimetria.....	26
3.3.4 Harmônicos de maré.....	26
3.3.5 Forçantes de maré meteorológica.....	27
3.3.5.1 Vento.....	27
3.3.5.2 <i>Time series de nível meteorológico em imbituba.....</i>	29
3.4 CENÁRIOS FUTUROS.....	29
3.5 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	31
3.6 ANÁLISES DOS DADOS DE SAÍDA DO MODELO.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	34
4.2 CENÁRIO BASE (ZERO).....	36
4.3 OS FUTUROS CENÁRIOS.....	38
4.3.1 Cenário 1.....	38
4.3.2 Cenário 2.....	41
4.3.3 Cenário 3.....	44
4.3.4 Cenário 4.....	46
5. CONCLUSÕES.....	49
6- CÓDIGOS UTILIZADOS.....	50
7. REFERÊNCIAS.....	51

1. INTRODUÇÃO

O aumento do nível do mar é inevitável por conta do intenso aquecimento das águas do oceano, bem como pelo derretimento das calotas polares. Além disso, o nível do mar provavelmente vai permanecer elevado por muitos séculos (IPCC, 2023). Essa elevação junto do aumento dos eventos extremos devido às mudanças no clima causam impactos possivelmente irreversíveis para a humanidade (IPCC, 2022), podendo agravar inundações costeiras (RAY; FOSTER, 2016), com consequentes prejuízos para a sociedade, assim aumentando a ocorrência de doenças diarréicas, como a cólera, em conjunto de danificar os sistemas de saúde (IPCC, 2022). No mesmo relatório é demonstrado que serão necessárias modificações no modo de conduzir o uso e ocupação das regiões costeiras, o planejamento tanto para recuperação como para a prevenção de futuros impactos, visando mitigar tanto o prejuízo ecológico, como o social, econômico e cultural.

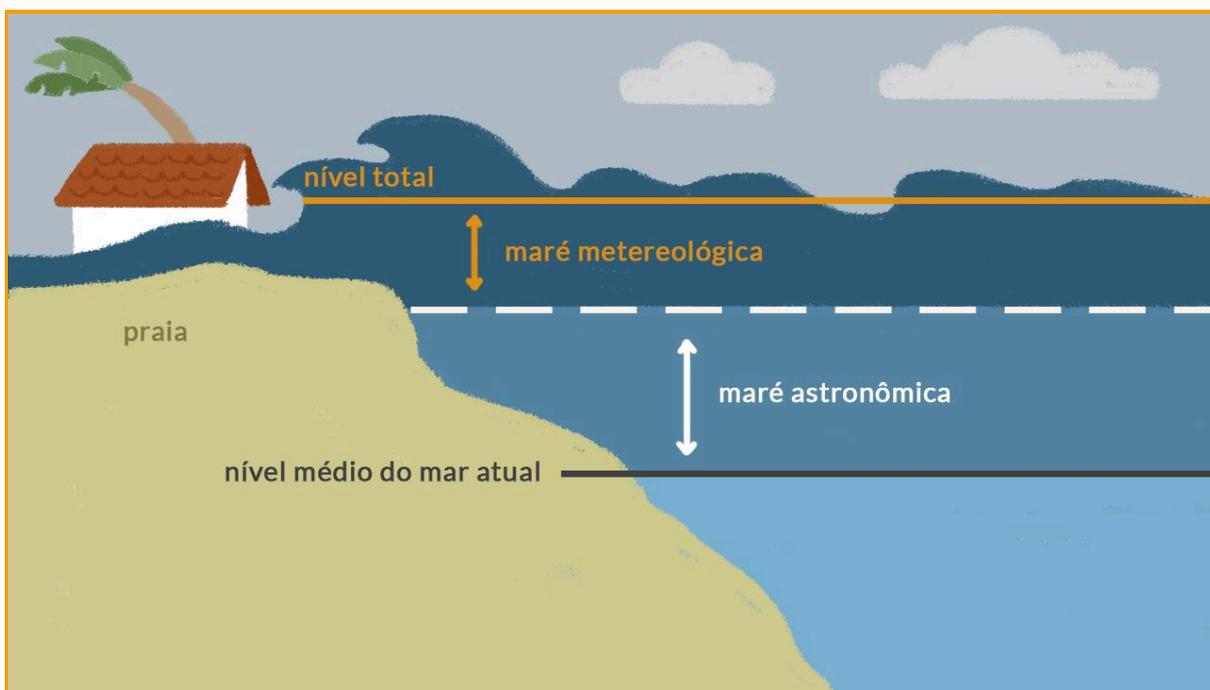
Inundações foram responsáveis por 47% de todos os desastres relacionados ao clima de 1995 até 2015, afetando cerca de 2,3 bilhões de pessoas no mundo todo (WALLEMACQ et al., 2015). Entre o período de 1998 e 2020 foram constatados 134 desastres naturais relacionados à erosão e/ou inundação nos municípios litorâneos do estado de Santa Catarina. Com uma tendência de aumento na última década (LEAL et al., 2021). Um dos locais que mais vem sofrendo com esses impactos é a Ilha de Santa Catarina, onde está localizada a capital do estado, o município de Florianópolis. É uma cidade turística, com fluxo elevado de pessoas que chegam aos milhões durante épocas de veraneio. Entre os anos de 2010 e 2022 as inundações causaram prejuízos milionários, com um somatório de danos que somaram mais de 130 milhões de reais neste período (DUTRA et al., 2023).

A região urbana do bairro do Rio Tavares, próxima ao Aeroporto Internacional de Florianópolis–SC, ponto de interesse elevado para a cidade, é uma das principais áreas que vem sofrendo com alagamentos e enchentes causadas principalmente por efeitos de maré (VANZ et al., 2021). Essa região, dominada por mangue, é onde se encontra a Reserva Marinha Extrativista (RESEX) do Pirajubaé, a primeira do seu tipo, criada no Brasil em 1992. Essa região vem sofrendo com as mudanças climáticas, já sofreu com grande mortalidade de sua fauna devido a variações no nível da água por maré em eventos extremos (ALEXANDRE; SÜHNEL; FERREIRA, 2022). Em cenários de rápida elevação do nível do mar, os mangues podem não conseguir mais executar seu papel de sequestro de carbono, além de outras funções ecossistêmicas (SAINTILAN et al., 2020). Sendo um risco enorme para a

região e para a população que depende da RESEX, juntamente com toda a população que vive nos entornos da região.

Dentre os fatores responsáveis pelas inundações costeiras em Santa Catarina, as marés astronômicas, em conjunto com as marés meteorológicas, são as mais relevantes (SHORT; KLEIN, 2016). A interação não linear dos harmônicos de maré com a batimetria e linha de costa provoca mudanças na amplitude e fase das constantes harmônicas. Esse efeito, combinado com a elevação do nível do mar, tem potencial de mudar a cota de inundação em regiões costeiras, bem como, a frequência de ocorrência de eventos de enchente (RAY; FOSTER, 2016). Situações como esta ocorrem quando essas interações são combinadas com grandes períodos de vento constante, capazes de interagir com o oceano e eventos extremos próximos à costa (figura 1). Esse efeito ocorre devido ao efeito de deriva das correntes, que, no hemisfério sul, leva ao fluxo de água na superfície, a ser direcionado a 45° graus à esquerda da direção do vento (EKMAN, 1905). Logo, quando ventos do quadrante sul sopram por grandes períodos, a água tende a se acumular na costa, fazendo com que ocorra o empilhamento de água e possivelmente inundações se somados aos efeitos de maré de sizígia.

Figura 1 - Representação do nível do mar como somatório da maré astronômica (sizígia) e maré meteorológica.



Fonte: Autor.

Uma das formas de conseguir reproduzir com alguma fidelidade os eventos de inundação que ocorreram no passado, bem como compreender e simular possíveis diferenças nas condições que geraram esses eventos, é a utilização de modelos numéricos computacionais (RÖBKE et al., 2021). Esses modelos utilizam malhas (*grids*) para calcular as equações hidrodinâmicas de fluxo e transporte a partir de forçantes, como, por exemplo, do tipo meteorológica ou astronômica.

A região costeira do estado de Santa Catarina possui um grande número de feições como praias, ilhas, baías, canais de maré, marismas, manguezais, estuários, lagoas e lagunas (SHORT; KLEIN, 2016). Essa complexidade na linha costeira dificulta a tarefa de modelar com precisão essa região. Tendo em vista essa problemática, é necessário o uso de uma ferramenta de simulações mais avançada, chamada de *Flexible Mesh* (Malha Flexível), uma versão da ferramenta Delft3D que permite mais adaptação do *grid* aos complexos contornos e fluxos do oceano costeiro, sem comprometer a funcionalidade e desempenho do modelo.

Utilizando essa versão do modelo é possível gerar uma simulação capaz de representar esses eventos de empilhamento de nível na costa, para replicar as inundações que ocorreram ao longo do ano naquele ponto. Depois disso, tendo uma boa representação dos eventos, é possível também simular esses efeitos levando em conta um nível do mar acima da média atual, o que gera maior compreensão em como essas mudanças podem modificar tais eventos, interagir com as constantes harmônicas de maré e em que grau são capazes de influenciar na inundação na localidade dentre as diferentes possibilidades de mudanças desse nível.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS PRIMÁRIOS

Simular o comportamento de nível do mar em pontos da Baía de Florianópolis e sua interação com diferentes cenários de aumento do nível do mar.

2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

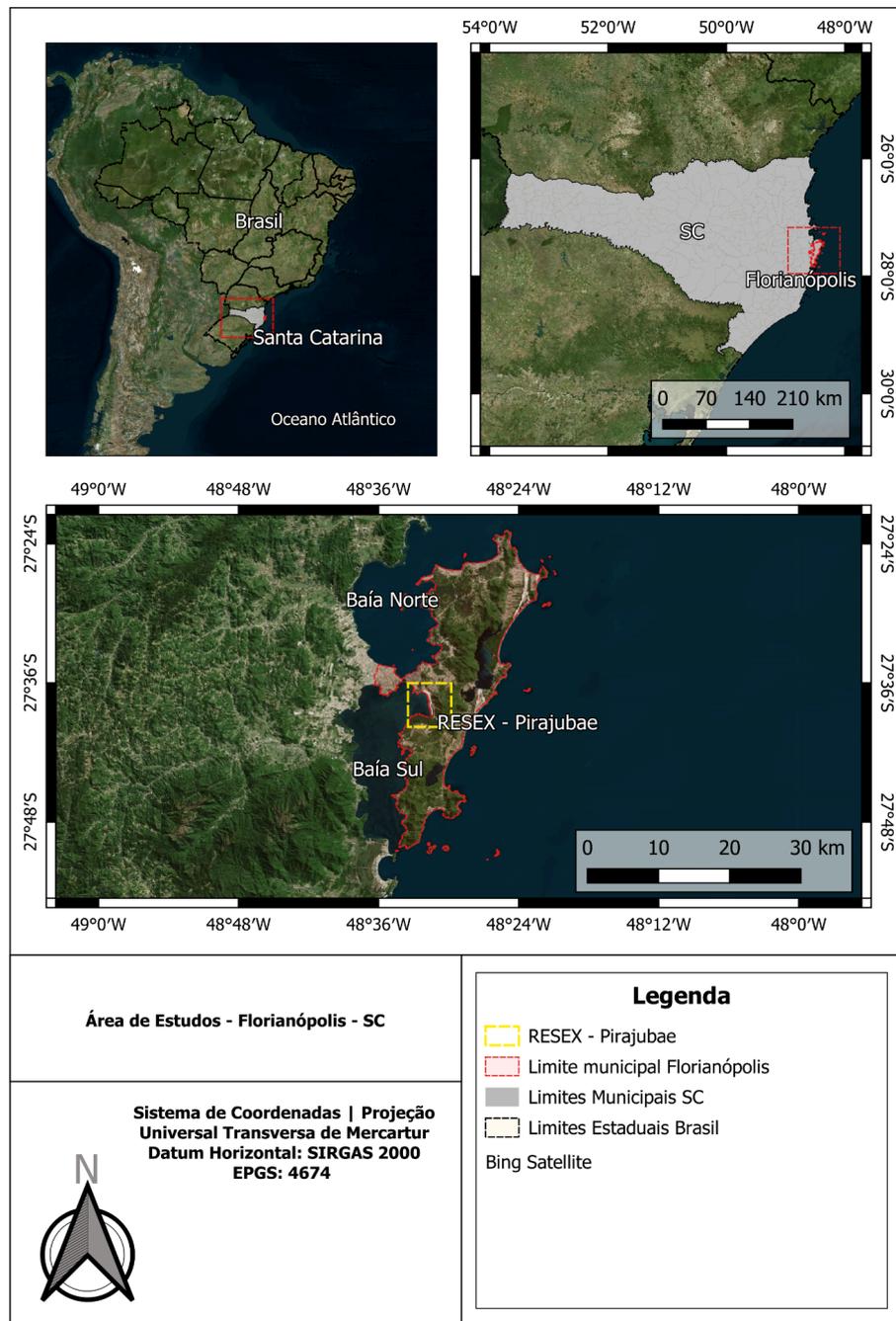
- Implementar um modelo hidrodinâmico capaz de representar o nível do mar na Baía de Florianópolis.
- Criar um arquivo de união entre batimetria e altimetria, integrado ao modelo para representação de inundação na área de estudo.
- Comparar os resultados do modelo com dados de ADCP e marégrafo registrados nas baías
- Comparar os diferentes resultados do modelo dentro dos diferentes cenários.
- Comparar as mudanças nas componentes harmônicas das ondas de maré dentre os diferentes resultados.
- Obter a mudança de frequência de ocorrência de inundações nos pontos-chave dentro dos diferentes cenários

3. METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

A região principal que vai ser observada se localiza na região costeira do estado de Santa Catarina, Brasil, banhado pelo Atlântico Sul (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudos em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, bem como os limites municipais e localização da RESEX do Pirajubaé em destaque.

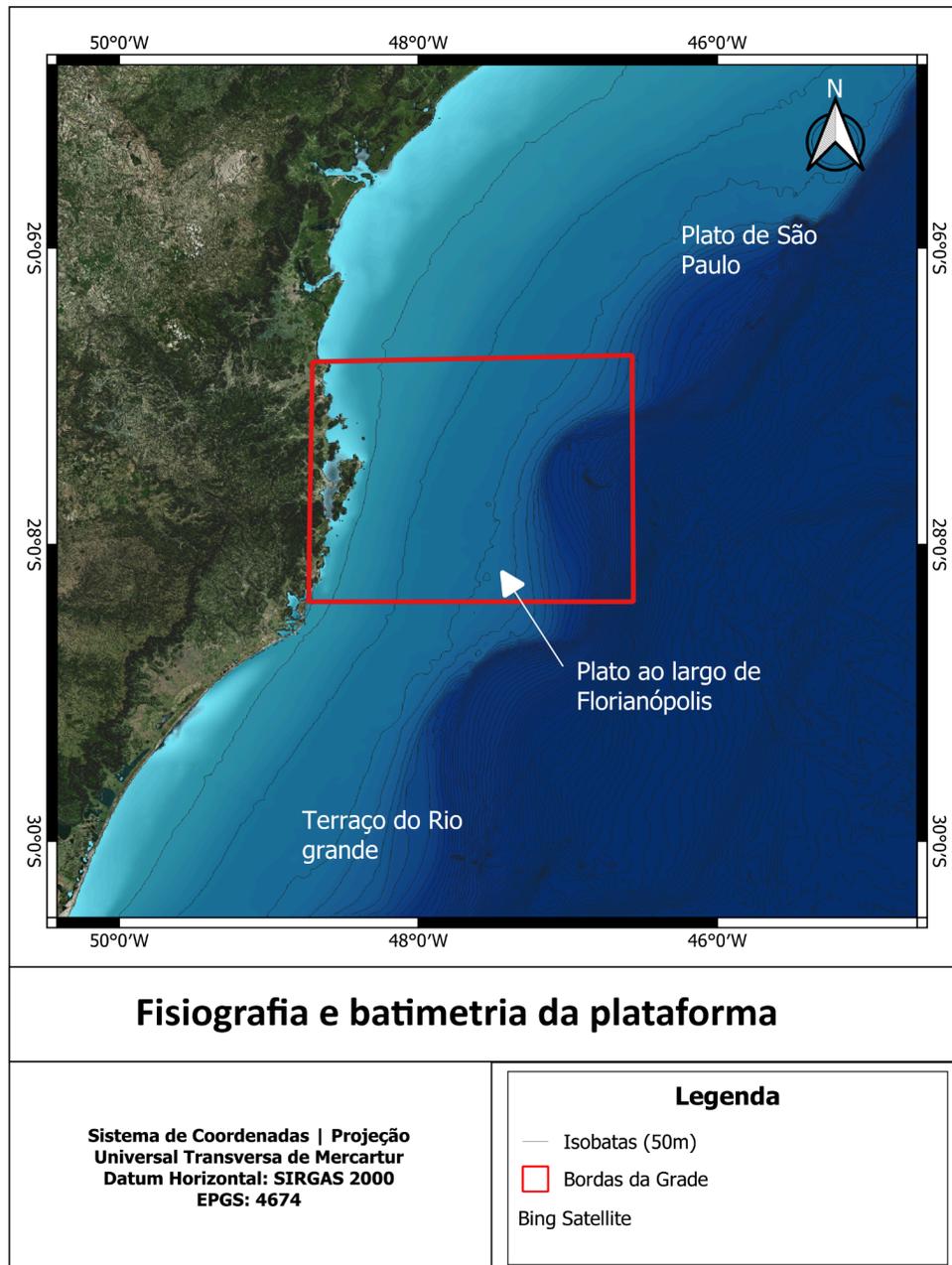


Fonte: Autor.

3.1.1 Fisiografia da Plataforma Sul

A área oceânica se localiza no platô ao largo de Florianópolis (Fig. 3) (Pinho et al. 2011), dividida entre a Baía de Santos e a Baía de Pelotas, localizada entre as latitudes de 26°S a 30°S. A extensão da região costeira catarinense varia em cerca de 160 km até a quebra do talude que normalmente ocorre entre 140 m a 180 m de profundidade (MAHIQUES, 2010). Essa configuração fisiográfica influencia a dinâmica dos fluxos hidrodinâmicos que dominam a plataforma.

Figura 3 - Fisiografia da plataforma sul do Brasil, em destaque a região modelada.

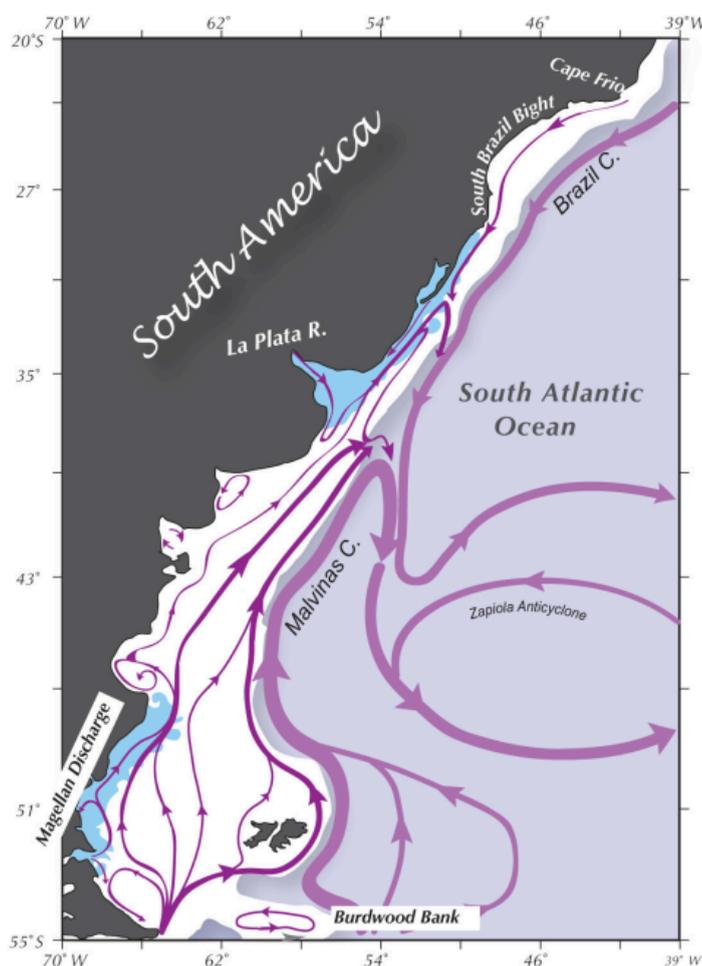


Fonte: Autor.

3.1.2 Massas da água, Circulação Oceânica e Atmosférica.

Nessa região oceânica da plataforma, duas correntes de larga escala tem maior importância para o sistema. A Corrente do Brasil, é uma corrente quente e salina, formada a partir de um braço do Giro Subtropical do Atlântico Sul (BODNARIUK et al., 2021), com circulação anti-horária movido pelo vento (DROUIN; LOZIER; JOHNS, 2021). Este braço se ramifica na costa do Brasil e segue em direção sul até se encontrar com a Corrente das Malvinas (MC) (BODNARIUK et al., 2021), que por sua vez é uma ramificação da Corrente Circumpolar Antártica (FETTER; MATANO, 2008). O encontro das duas correntes, se chama confluência Brasil-Malvinas (MATANO; PALMA; PIOLA, 2010) (Fig. 4).

Figura 4: Esquema representativo da circulação oceânica do Atlântico Sudoeste.



Fonte: Adaptado de (MATANO; PALMA; PIOLA, 2010).

Outro efeito de importância para o sistema é a descarga do Rio da Prata, já que sua pluma, especialmente em eventos extremos de El Niño, pode chegar além da região costeira levando águas com nutrientes para o oceano, com quase 22.000 m³/s de água entrando para o

Atlântico (PIOLA et al., 2005), influenciando fortemente as massas da água na região. A partir dos fluxos hidrodinâmicos das correntes e outros efeitos oceanográficos, como a ressurgência que ocorre na parte sul de Santa Catarina, no Cabo de Santa Marta, onde o afloramento de algumas massas da água podem afetar a região (CAMPOS et al., 2013). A Corrente do Brasil, que em sua parte que penetra a plataforma, também transporta algumas massas da água, como a Água Tropical ($T > 20^{\circ}\text{C}$; $S > 36$), na sua camada de mistura e a Água Central do Atlântico Sul ($T < 20^{\circ}\text{C}$; $35 < S < 36$) na piconclina (PIOLA et al., 2018), ambas têm forte influência na plataforma, podendo carregar nutrientes e causar mudanças físicas e ambientais (PASSOS et al., 2023).

Devido ao Anticiclone subtropical do Atlântico Sul, um sistema de alta pressão semi-permanente, a região é predominantemente afetada por ventos provenientes de nordeste (WAHRLICH et al., 2018). Porém, em épocas de inverno, os ventos do quadrante sul costumam a se intensificar. Esses ventos quando associados a eventos extremos, como o caso de ciclones ao sul da costa uruguaia, formados em meio ao oceano na proximidade do giro de Zapiola (RÖBKE et al., 2021; JOHNSON; KING, 2023) (Figura 4), as massas de ar frio associadas a ventos de sul com altíssima velocidade podem influenciar o oceano se permanecerem com grande intensidade durante longos períodos, sendo o suficiente para criar ondas de baixa frequência que se propagam pelo mar até chegar na costa brasileira, onde causam empilhamento de água e podem gerar a chamada maré meteorológica, um dos efeitos de maior influência em inundações costeiras em Santa Catarina (VANZ et al., 2021), assim fazendo com que o nível da água dentro das Baías de Florianópolis suba acima do normal.

3.1.3 As Baías de Florianópolis

Na região costeira de Santa Catarina, se encontra a Ilha de Santa Catarina, onde está a capital do estado, Florianópolis. Entre o continente e a ilha estão as baías da Norte e Sul (Fig. 5) que, como descrita por GARBOSSA et al. (2014), são dois corpos de água cobrindo uma área total de 340 km². Ambas possuem ligação com o oceano, contendo um canal estreito entre a baía norte e a baía sul, fazendo conexão entre elas. A profundidade média é de 3,4 m podendo chegar a 25 m em algumas regiões como a do canal central.

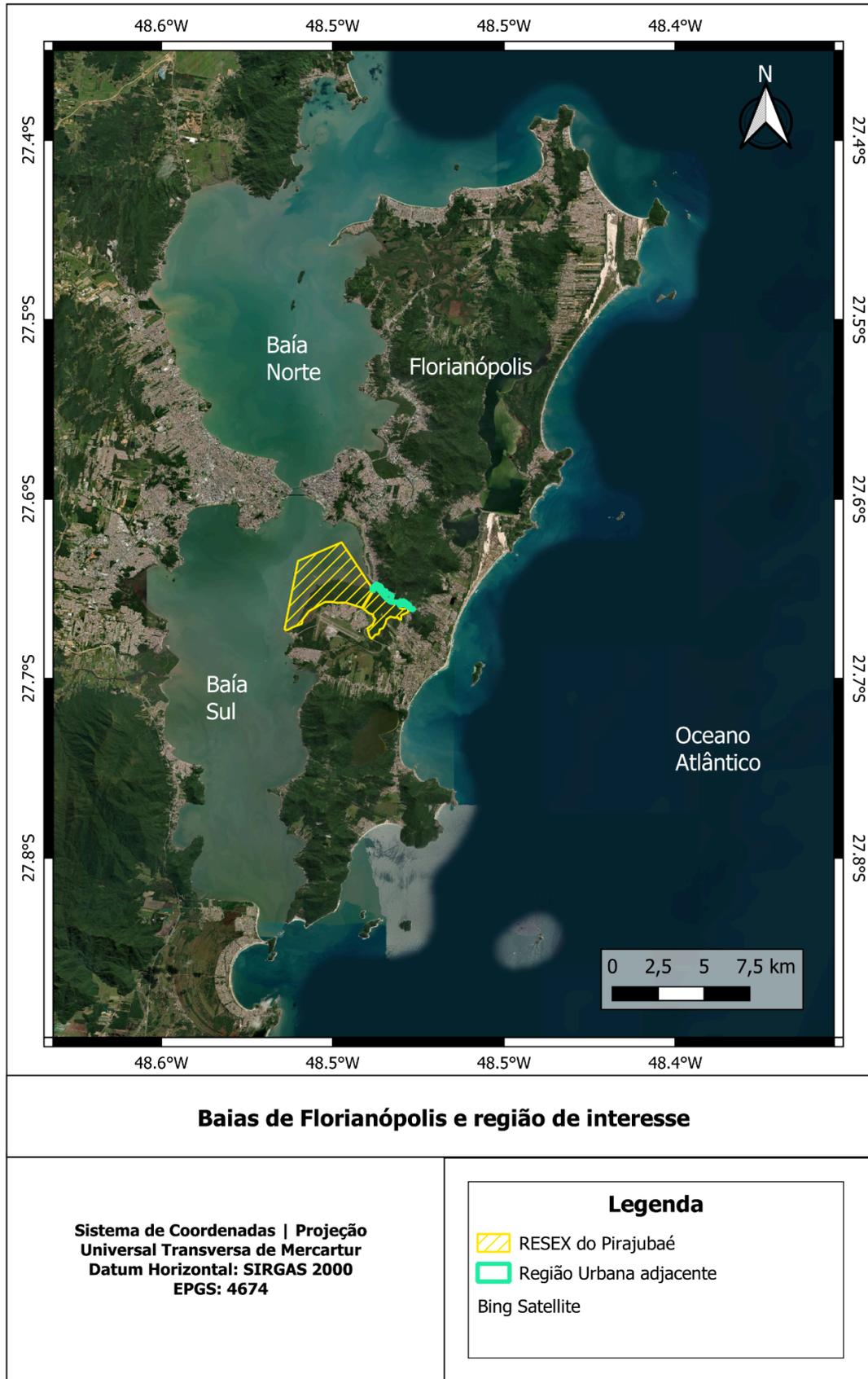
O regime de marés na Baía de Florianópolis é caracterizado como de micromaré, com amplitudes inferiores a 2m, sendo do tipo semidiurno misto (SIMONETTI, 2016). Também, de acordo com MELO et al. (1997), apresenta um fluxo muito assimétrico de maré, onde as correntes na Baía Sul diferem bastante da Baía Norte. As correntes de maré enchente avançam

sobre a Baía Norte passado o estrangulamento da Ilha com o continente. Na Baía Sul, o padrão de correntes é mais fraco em torno da parte central, próximo à desembocadura do Rio Cubatão, e mais forte em ambas as extremidades, com o fluxo sendo direcionado para o interior em ambos os lados. O procedimento inverso, isto é, maré vazante, a situação inverte e ocorre a saída da água das Baías. Segundo Simonetti (2016), as quatro principais componentes da região são os harmônicos de maré semidiurna lunar M2 (T=12,42h), sendo a com maior amplitude com cerca de 21cm. Também a semidiurna solar S2 (T=12h) e as componentes diurnas O1 (lunar, T= 25,82h) e K1(solar-lunar, =23,93h). Ainda sobre a M2, foi descoberto uma predominância dos valores de maior amplitude na região sul da Baía Norte de Florianópolis.

3.1.4 Área principal do estudo

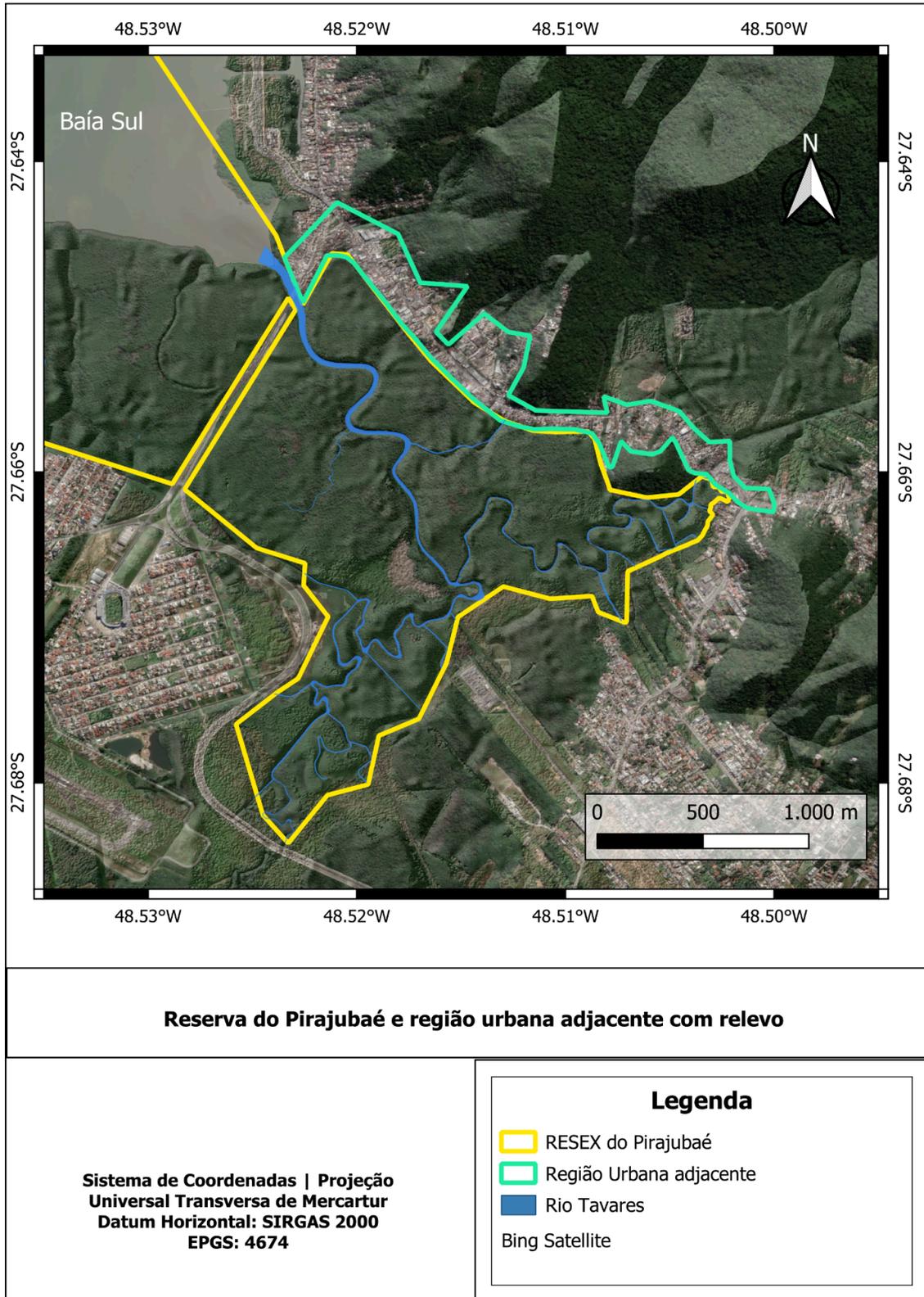
O ponto central do estudo é a região da Unidade de Conservação(UC) RESEX do Pirajubaé e seu entorno urbanizado, localizada na porção sul de Florianópolis (Fig. 5), próxima do Aeroporto Internacional . Essa porção dominada por cobertura vegetal de mangue é de altíssima importância ecológica para as espécies das baías, além de ser utilizada pela população local a mais de centenas de anos, tendo um papel cultural enorme (CASAGRANDE et al., 2021). Essa região, que atua como berçário para a vida marinha das baías e tem muita relevância para o conturbado fluxo urbano interno em Florianópolis, vem sofrendo com inundações recorrentes (VANZ et al., 2021). De acordo com dados disponibilizados em estudo feito pela CASAN durante 2018-2019, o chamado de Rio Tavares, principal rio que influencia a localidade, não apresentou fluxo maior que 0,5m³/s, mesmo em época de chuva, ou seja, o estudo concluiu que o efeito dominante para o nível da água da região são os efeitos de maré. A área da RESEX não tem elevação de terreno muito alta e é cercada por morros na sua em sua parte norte, facilitando eventos de inundação nas áreas baixas (Fig. 6).

Figura 5 - Mapa das baías de Florianópolis e das regiões de interesse.



Fonte: Autor.

Figura 6 - Região da RESEX do Pirajubaé e região urbanizada de interesse no entorno.

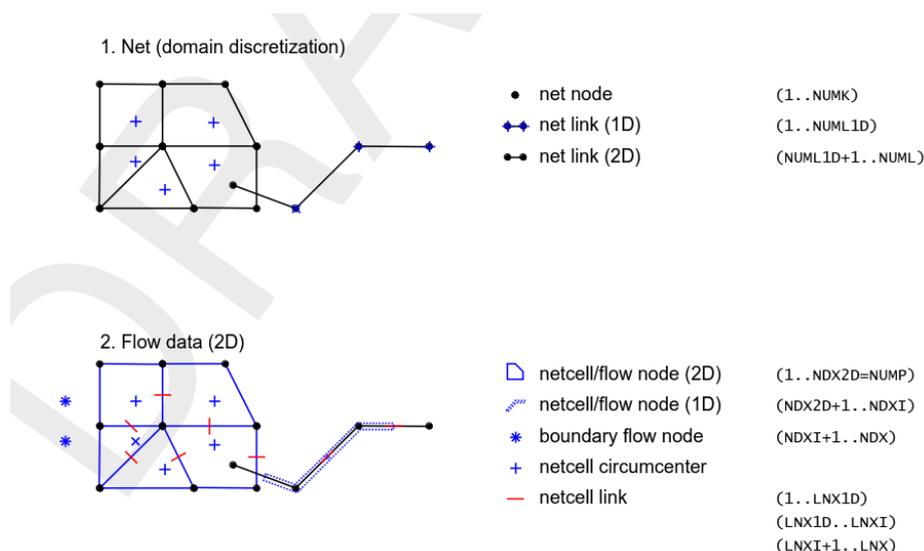


Fonte: Autor

3.2 MODELO HIDRODINÂMICO DELFT3D FM

Neste estudo, será utilizado o modelo hidrodinâmico *open source* (código aberto) Delft3D, uma ferramenta desenvolvida pelo instituto de pesquisa holandês, Deltares, focado no gerenciamento de água e engenharia costeira. Na sua versão *Flexible Mesh* (FM) que funciona a partir da construção de uma malha (*Grid*) não estruturada, que permite resolver de forma mais precisa a linha de costa complexa das Baías de Florianópolis e o fluxo hidrodinâmico que pode ser muito menos representativo quando malha estruturada clássica é utilizada. Essa malha flexível permite triângulos, quadrados, pentágonos e hexágonos, dando muito mais liberdade e possibilidade de representação da linha de costa e do fluxo. Podendo ser representado pela figura 7.

Figura 7 - Representação da tipologia e algumas definições de como uma grade funciona no modelo Delft3D FM.



Fonte: *User Manual Delft3D FM*.

3.2.1 Descrição do modelo

O modelo funciona a base de múltiplos módulos que podem ser usados em conjunto ou separadamente, sendo o módulo de fluxo (*FLOW*), o módulo de ondas (*WAVE*) e o módulo de transporte de sedimentos, bem como mudanças morfológicas (*MOR*). O módulo de fluxo é o “coração” do Delft3D e é um programa multidimensional (2D e 3D) de simulação hidrodinâmica que calcula o fluxo e transporte não estacionário, resultando de forçantes de maré e meteorológicas em um *grid*.

Em específico, a versão *Flexible Mesh* (FM), conhecida como Delft3D FM *Suite*, é

um sucessor do Delft3D 4, que usa uma abordagem de malha flexível, que permite ao usuário criar malhas com resoluções diferentes, e células com formatos diferentes, em diversas partes do domínio do modelo. Com isso permite simular geometrias complexas com alta precisão e eficiência, no projeto foi utilizada uma malha de alta resolução, não estruturada para a modelagem das baías norte e sul de Florianópolis.

As formulações matemáticas do modelo, como descrito no manual do Delft3D FM, levam em conta diversos fenômenos oceanográficos de relevância para o estudo, como, por exemplo:

- o efeito da rotação da terra (força de Coriolis);
- forçante de maré em fronteiras abertas;
- variação espacial e temporal da tensão de cisalhamento do vento na superfície da água;
- variantes de descargas e sumidouros (exemplo: rios);
- secagem e inundação de planícies de maré;
- forças geradoras de maré;
- estresse induzido por onda e fluxos de massa;
- fluxos movidos por vento, incluindo ciclones tropicais.

O modelo de forma geral resolve as equações de Navier-Stokes para toda a grade, utilizando-se dos parâmetros citados acima, que podem ser ativados ou desativados conforme a disponibilidade de dados ou conforme o objetivo da simulação.

Para esse estudo foi escolhido a representação 2D do modelo.

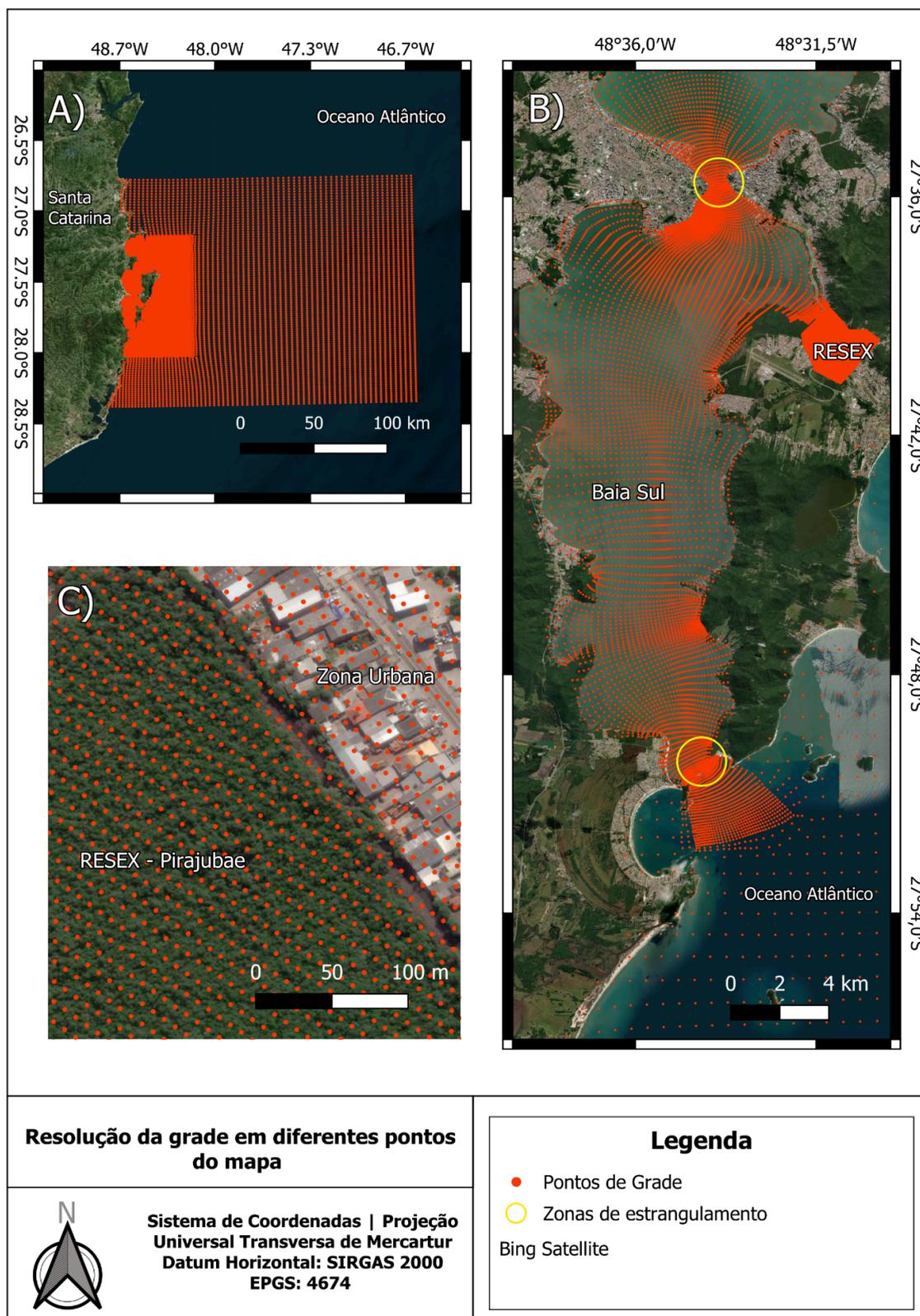
3.2.2 Grade

Como se optou pela versão FM do Delft3D, foi gerada uma grade única, com cerca de 250 km por 250 km de dimensão, capaz de abranger desde a linha de costa até a quebra do talude em zonas oceânicas mais profundas. Esse tamanho de grade foi escolhido para representar as marés astronômicas percorrendo a plataforma Catarinense (Fig. 8 A).

A grade possui 83 mil células de diferentes formatos e uma resolução dinâmica. Possuindo uma menor resolução nas bordas mais externas e ficando mais refinada dentro das Baías de Florianópolis, para ser capaz de representar mais dinamicamente seus contornos complexos e também os estrangulamentos causado pelo estreitamento do canal, como, por exemplo, na conexão entre a Baía Sul e o Oceano Atlântico (Fig. 8 B).

A grade alcança sua maior resolução após a entrada do Rio Tavares, para representar com maior fidelidade a altimetria da região e ser capaz de gerar um mapa de inundação para o local, onde cada célula possui cerca de 10m x 10m (Fig. 8 C).

Figura 8 - A) Grade inteira B) Resolução da malha dentro da baía Sul e pontos de estrangulamento em destaque. C) Resolução da malha dentro da RESEX e entorno.



3.3 DADOS DE ENTRADA

Para o modelo ser capaz de representar com maior realismo os efeitos que ocorrem na hidrodinâmica da região, um conjunto de dados de boa qualidade precisam ser inseridos (*input*) as bordas do modelo, para que as condições de contorno sejam aplicadas as equações matemáticas resolvidas em toda a grade. Esses dados foram gerados e processados que foram utilizados para as simulações com o modelo Delft3D, como altimetria, batimetria, condições de maré e nível da água.

3.3.1 Altimetria

Os eventos de inundação que ocorrem na região urbana e na região da RESEX precisam de muito detalhe para serem analisados, por se tratar de uma região de mangue e com ruas estreitas, foram utilizados dados de altimetria de alta resolução, inseridos ao *bedlevel* do modelo, visando simular com maior precisão dentro da área e gerar imagens para análise da área inundada. Esses dados foram obtidos do Sistema de Informações Geográficas (SIG) do Governo do Estado de Santa Catarina (disponível em <https://sigsc.sc.gov.br/index.html>), medidos por Levantamento Aerofotogramétrico, com resolução horizontal de 1m. Com metodologia também disponível no link. Os dados em formato “Raster” foram processados em ferramenta GIS para a área de interesse e recortados para não sobrescrever os dados de batimetria do rio, sendo, por fim, convertidos e exportados para o formato “.xyz”, para depois serem incorporados juntos aos dados de batimetria para dentro do modelo.

3.3.2 Batimetria

Dados de batimetria completos com alta resolução para toda a área modelada são escassos, sendo difícil encontrar novos levantamentos disponíveis, sendo assim necessário que dados de diferentes fontes fossem incorporados ao modelo para representar com maior qualidade a região. Esses dados possuíam o mesmo referencial, porém foram levantados em épocas diferentes e possuem resoluções diferentes.

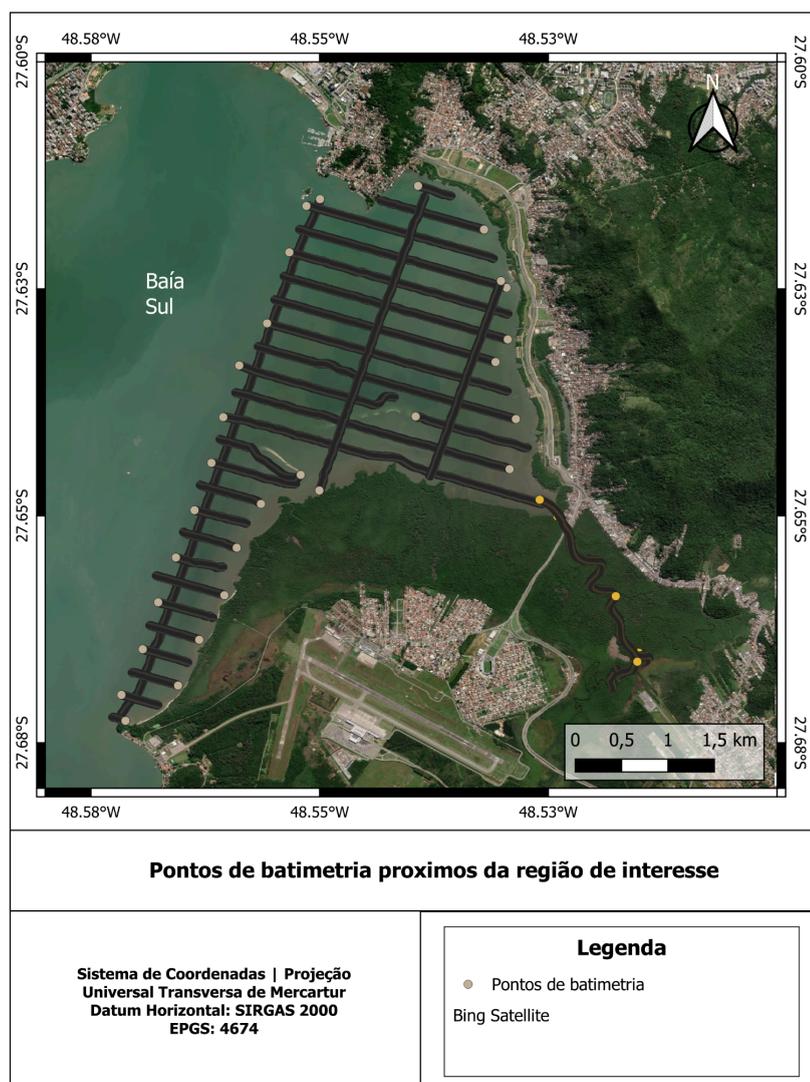
Os dados de batimetria usados para o interior das baías foram disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) e são dados de alta resolução usados para modelagem hidrodinâmica no estado. Esses dados são referenciados a carta náutica local pela DHN.

Para as regiões oceânicas mais profundas, ou para regiões onde a grade do modelo não possuía alta resolução, foram utilizados dados de satélite para completar as lacunas na

batimetria.

Já para as proximidades da área de interesse foram utilizados dados de melhor resolução, obtidos pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN) em 2019, realizada por monofeixe durante estudos feitos na área. Esses dados também apresentavam parte da batimetria incompleta do Rio Tavares, já que a campanha não conseguiu progredir por certas regiões do rio, devido a questões ambientais. Então, para completar a batimetria do rio e do seu canal foi feita uma interpolação dos dados adquiridos para as regiões onde não havia dados (Fig. 9). Esse conjunto de dados e essa região foram de maior importância para a junção com os dados de altimetria inseridos ao modelo para a criação do arquivo de alti-batimetria.

Figura 9 - Linhas batimétricas obtidas pela CASAN no estudo feito da área.



Fonte: Autor

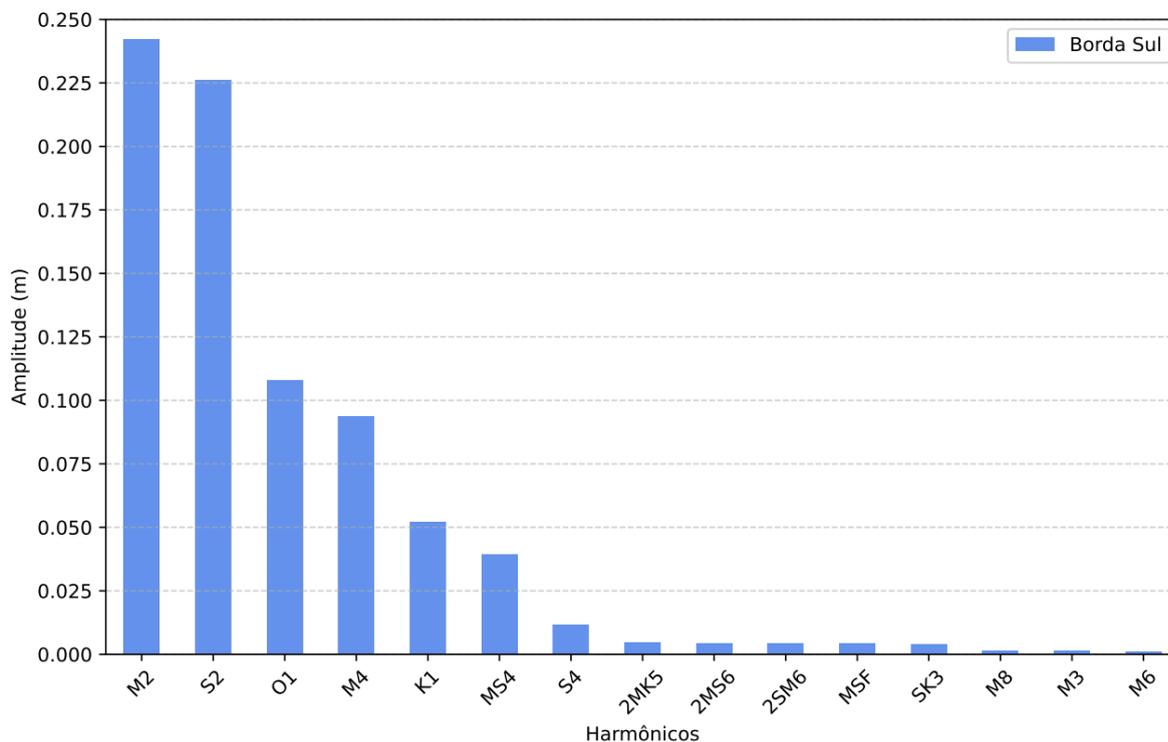
3.3.3 Composição da Altimetria e batimetria

Tendo em vista que os dados de batimetria e altimetria não usam o mesmo nível de redução, para incorporação no modelo foi necessário adequar os dados para um nível de referência (DHN) referenciado no nível de Imbituba, tendo que transladar 0,4m em relação à batimetria, sendo subtraído do valor de altimetria (TARGINO; SOARES; AMARO, 2014; FERREIRA, 2018; LINO, 2019). Então os dados foram unificados e processados com o fim de diminuir o seu tamanho de armazenamento em memória e tornar os arquivos compatíveis com o modelo Delft. Por último foram interpolados a grade do modelo pelo método de triangulação, disponibilizado pelo próprio modelo. Esse arquivo poderia ser gerado para a ilha inteira, sendo assim possível analisar inundação em outros pontos de risco, porém é necessário grande poder computacional e de armazenamento.

3.3.4 Harmônicos de maré

Após a análise harmônica dos dados de marégrafo e ADCP registrados nas baías de Florianópolis utilizando a ferramenta Utide, foram gerados os dados de maré para as fronteiras da grade através do modelo de obtidos usando o modelo TPXO, em especial sua última versão (TPXO9), de dados de maré global e regional, usando a metodologia proposta por Egbert e Erofeeva (2002). Foram obtidos quinze harmônicos de maré, com suas amplitudes conforme visto na (Fig. 10). Como a maré astronômica encontrada na região tem regime de micromaré ($< 2\text{m}$), algumas amplitudes dos harmônicos encontradas foram bem pequenas, porém foram consideradas para o modelo.

Figura 10 - Exemplo de harmônicos de maré retirados TPXO, dado de entrada no ponto 6 da Borda Sul.



Fonte: Autor.

Os harmônicos obtidos pelo TPXO 9 estavam no formato de radianos e foram convertidos para graus, sendo extraídos dos pontos conforme o Quadro 1.

Quadro 1 - Localização dos pontos de maré.

Nome	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
Latitude	- 26,77	- 26,76	- 26,75	- 27,59	- 28,35	- 28,37	- 28,39
Longitude	- 48,51	- 47,43	- 46,63	- 46,6	- 46,59	- 47,55	- 48,64

Fonte: Autor.

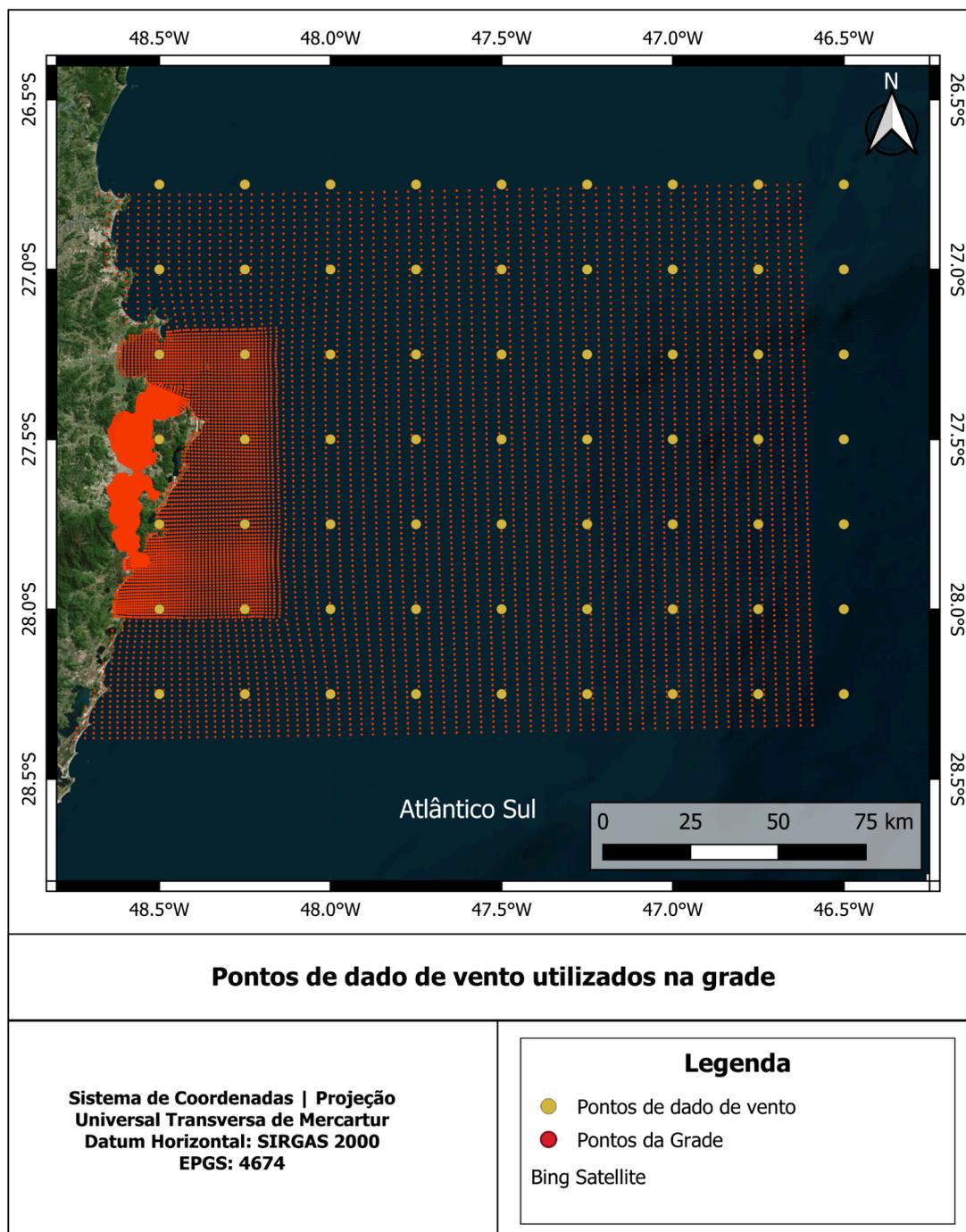
3.3.5 Forçantes de maré meteorológica.

3.3.5.1 Vento

As interações do vento com o oceano são capazes de criar grandes fluxos de deslocamento de massas da água na costa a partir dos efeitos de Ekman no hemisfério sul (EKMAN, 1905). Isto faz com que as águas sejam empilhada na região da entrada das baías. Uma grade uniforme espacialmente com 25 km de resolução foi criada (Fig. 11) utilizando dados de vento de reanálise ERA5, de hora em hora, nas componentes de vento de 10 m

acima do mar (u10 e v10) no formato de arquivo “.amu” para as componentes u e “.amv” para componentes v, seguindo os pré-requisitos descritos no manual de usuários do Delft3D. O período dos dados de vento é de janeiro de 2019 até janeiro de 2021.

Figura 11 - Pontos de vento extraídos do ERA5 e incrementados a grade para modelagem.

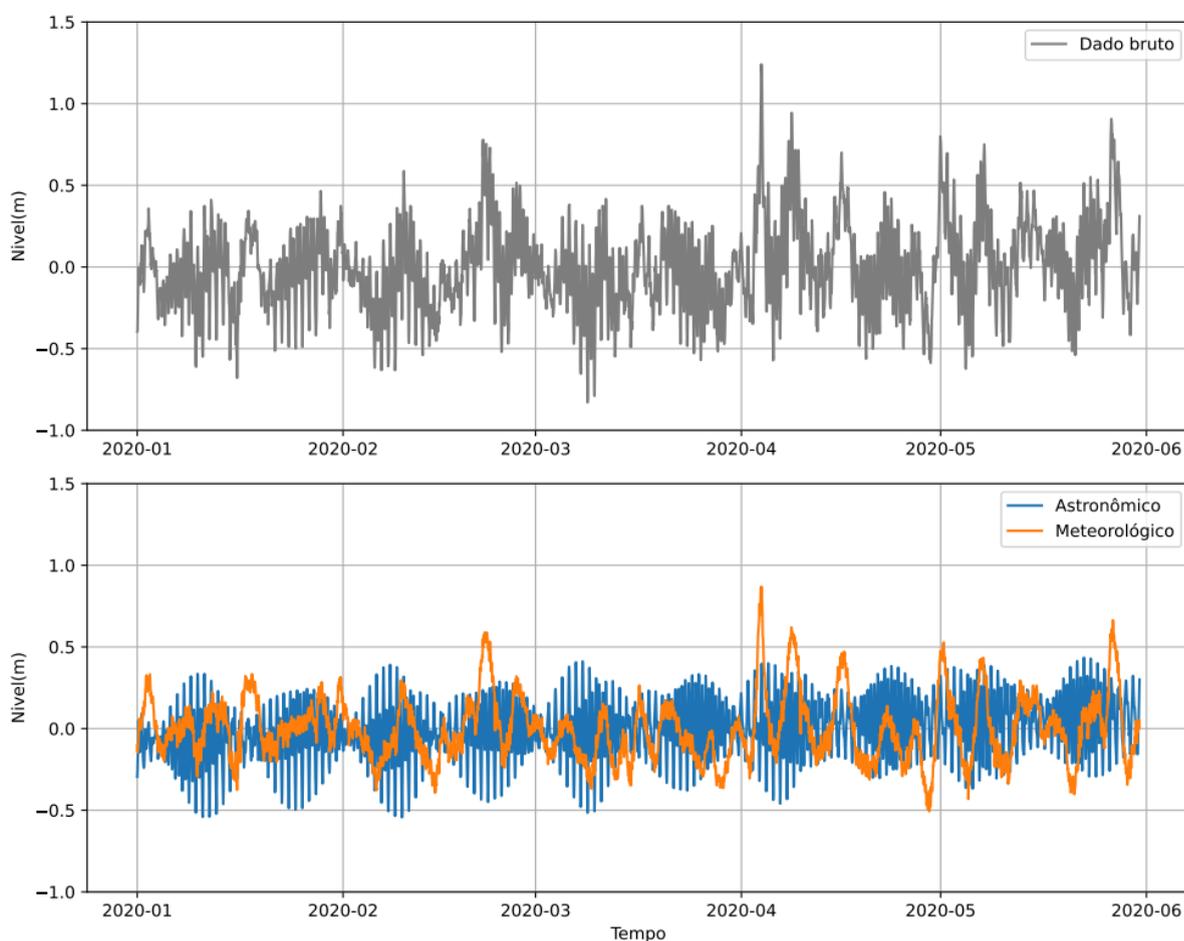


Fonte - Autor.

3.3.5.2 Série temporal de nível meteorológico em Imbituba

As ondas de baixa frequência formadas a partir dos ciclones com ventos de alta velocidade no oceano podem viajar por longas distâncias, para representar esse efeito foi processado dados coletados de nível obtidos do marégrafo disponíveis publicamente pelo IBGE para download (IBGE). Foi utilizado a série temporal de janeiro de 2020 a janeiro de 2021. Após isso foi feita a análise harmônica utilizando o Utide, onde foi possível retirar a componente astronômica da série, assim gerando uma série temporal de nível meteorológico para ser utilizada como entrada no modelo (CODIGA, 2011) (Fig. 12).

Figura 12 - Comparação entre o dado bruto obtido do marégrafo de Imbituba, após análise harmônica e separação entre nível astronômico e o resíduo meteorológico.



Fonte: Autor

3.4 CENÁRIOS FUTUROS

Com base em estudos anteriores sobre as variações do nível do mar em todo o mundo, como nos diferentes cenários expostos nos últimos relatórios do IPCC, utilizando a metodologia do SSP (*Shared Socioeconomic Pathways*), foram selecionados quatro cenários

possíveis para o futuro. Cada cenário é baseado em diferentes futuros que a sociedade pode adotar e por consequência qual o nível de emissão de Carbono que irá ocorrer (Moss et al., 2010)(Fig. 13).

Cenário Base: Momento atual do mundo com os dados observados, utilizado para comparar com os próximos experimentos.

Cenário 1: cenário onde a sociedade adotará medidas para mitigar as mudanças climáticas, baseado no SSP1-2.6, relata que o nível do mar irá subir 0,39 m até 2100.

Cenário 2: relativo ao SSP 2-4.5, um cenário mais semelhante às decisões atuais sobre mudanças climáticas, demonstra uma subida de nível de 0,59 m.

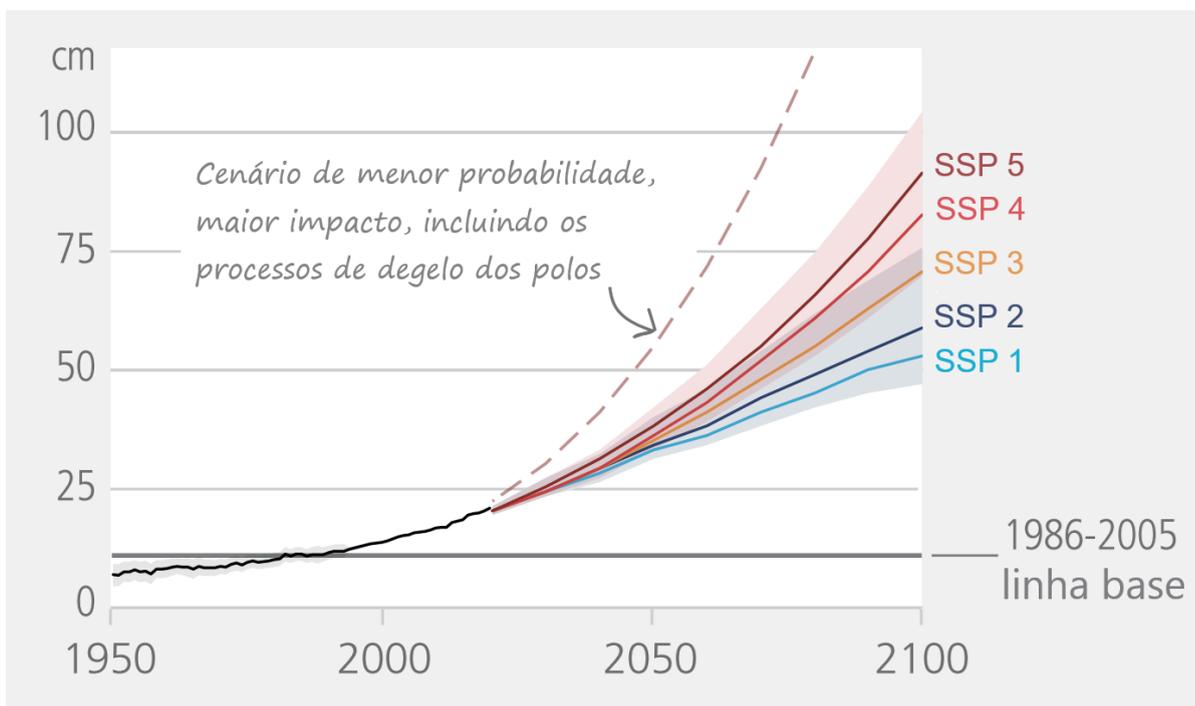
Cenário 3: com base no SSP 5-8.5, retrata uma sociedade que optou por soluções mais voltadas a combustíveis fósseis e pouca mitigação dos problemas climáticos, registrando uma subida de 0,81 m até o ano de 2100.

Cenário 4: relacionado ao SSP 5-8.5, porém dessa vez representando eventos mais catastróficos relacionados às novas descobertas do degelo da Antártida, dos cenários chamados de DP-16 (KOPP et al., 2017), esse futuro prevê uma subida de 1,46 m até o 2100.

Os dados dos 3 primeiros cenários foram retirados da plataforma disponibilizada em conjunto pelo IPCC e NASA para o ano de 2100 no ponto de grade mais próximo a Florianópolis, na região de Imbituba (NASA, 2024). Já o Cenário 4 foi retirado do Artigo de KOPP et al., 2017, e é um dado Global com menor confiança do que os 3 primeiros cenários.

Em cada cenário é reduzido o valor de batimetria e altimetria do modelo.

Figura 13- Aumento do nível do mar relativo aos diferentes cenários possíveis.



Fonte: Modificado de (IPCC, 2023).

3.5 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Foi utilizado para fins de comparação e validação dos resultados entre modelado e valores observados o coeficiente de correlação de Pearson, utilizando a função “[numpy.corrcoef](#)” da biblioteca NumPy de Python. E a raiz do erro médio quadrático (RMSE), também calculado seguindo a fórmula (1) e o erro médio absoluto (MAE), seguindo a fórmula (2):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{obs},i} - x_{\text{model},i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{\text{obs},i} - x_{\text{model},i}|}{n} \quad (2)$$

Para a calibração e validação do modelo foram utilizados dados de séries temporais de um marégrafo e um ADCP, localizados na baía Sul de Florianópolis.

Esses dados foram disponibilizados pela Casan via requerimento, e foram usados para modelagem hidrodinâmica para seus estudos de interesse. A série temporal possui cerca de

um ano de duração e possui dados com um intervalo amostral de aproximadamente 10 minutos.

3.6 ANÁLISES DOS DADOS DE SAÍDA DO MODELO

Os dados de saída do modelo, com extensão “.csv”, são do formato de séries temporais, sendo possível comparar com os dados observados. Para comparação entre cenários foram escolhidos 3 métodos.

O primeiro método consiste em utilizar um ponto de observação, colocado na região do ADCP que fica próximo à saída do Rio Tavares, sendo um dos pontos por onde a onda de maré passa antes de atingir a região de interesse (SIMONETTI, 2016), sendo possível comparar as séries temporais de dados de nível. Para comparação, também foi utilizado uma cota de inundação de aproximadamente 1.1m acima do nível médio do mar, fornecido pela Epagri em observações e estudos feitos de inundações na região, que serve como guia para observar quantos eventos de inundação podem ocorrer se atingir esse nível crítico.

O segundo, é a partir dessa série temporal fazer a análise harmônica, separando os dados de maré astronômica do resíduo de origem meteorológica, gerando assim os harmônicos que compõem a onda de maré astronômica, podendo assim comparar entre os diferentes cenários as possíveis alterações que vão ocorrer.

Já o terceiro método foi por comparação entre imagens de nível da água (*water level*) do arquivo de saída com extensão ‘.map’ do Delft3D, para observar as diferenças entre as áreas de inundação que ocorreram.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

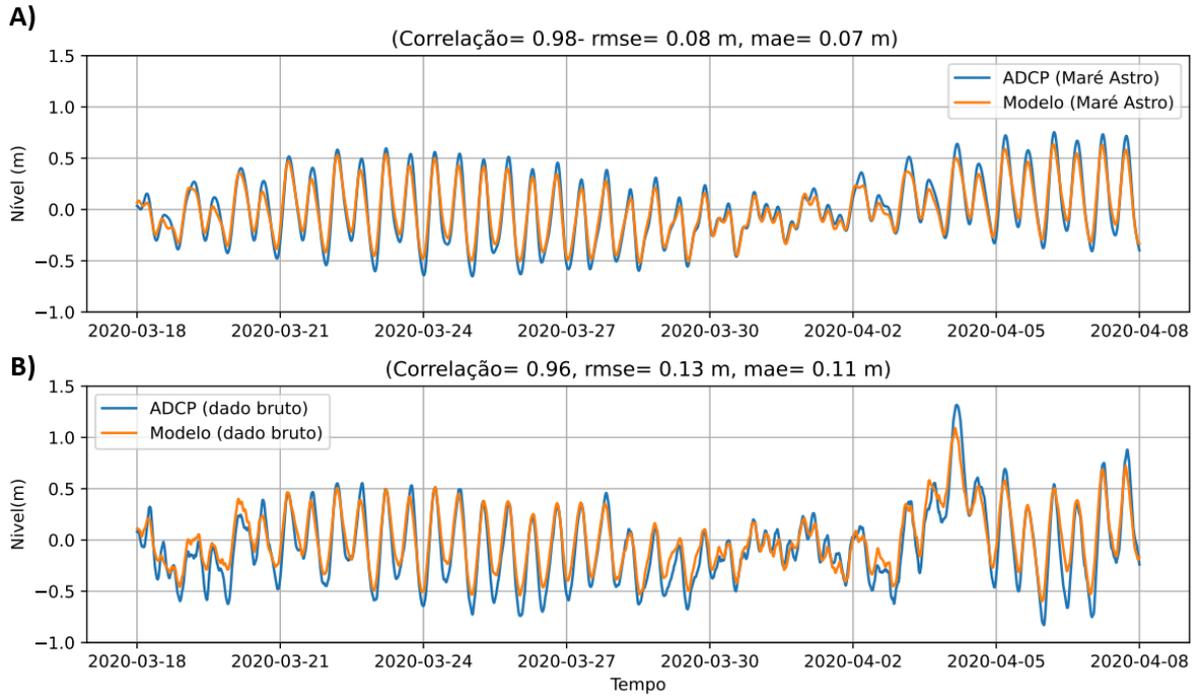
4.1 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Durante o início dos trabalhos foi feita a calibração inicial do modelo somente com dados de maré Astronômica, porém com os resultados iniciais, como foi descrito em alguns trabalhos anteriores, foi observado que a maré astronômica, mesmo em maré de sizígia, não foi possível de forma representativa simular inundações nos pontos de observação dentro da área de interesse. Isso porque as inundações dessa região são causadas principalmente associadas a eventos extremos, de ciclones na região costeira do Uruguai que levam a vento sul com velocidades altas e longa duração, causando empilhamento das águas e aumento do nível em toda a baía de Florianópolis (VANZ et al., 2021).

A partir disso foram aplicados o *grid* de vento e também a borda de maré meteorológica a partir dos dados de Imbituba, que auxiliaram a representar melhor a região e gerar melhores os resultados da calibração do modelo. Nesse período também foram testados adições de dados de reanálise GLORYS de nível do mar nas bordas, porém o modelo não teve bons resultados.

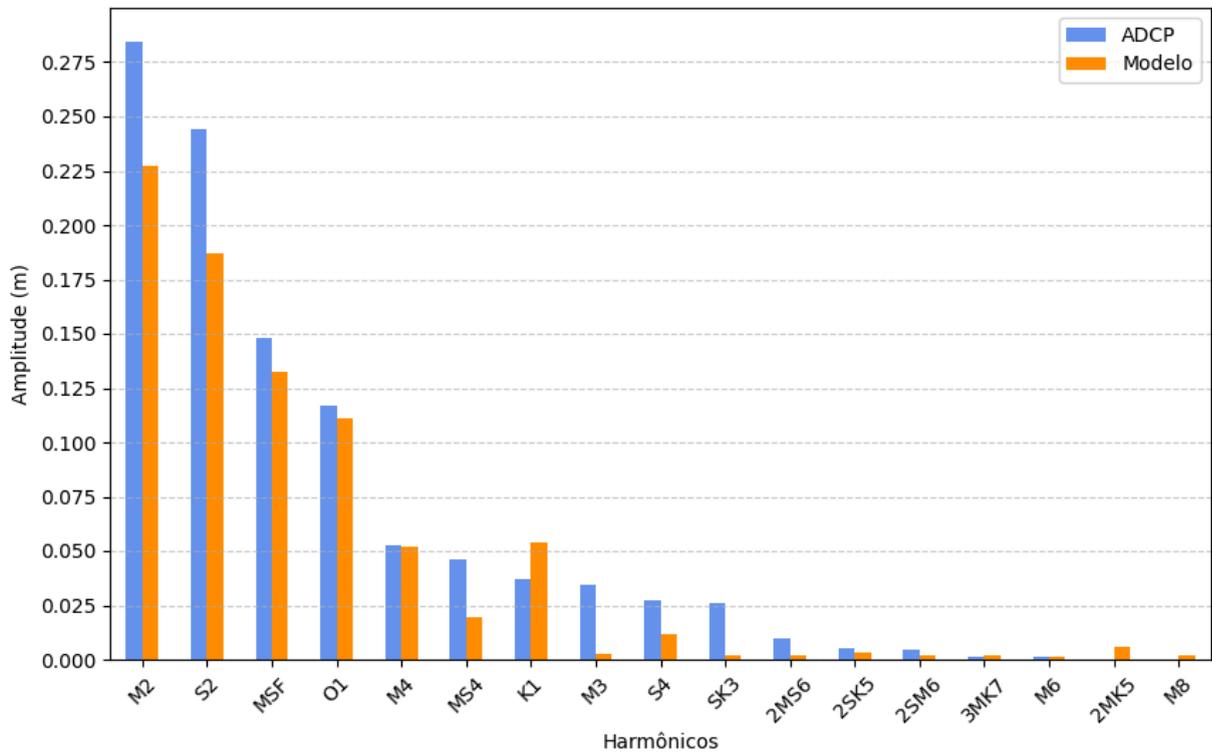
Após a fase de calibração foi escolhido um segundo período de 22 dias para a validação do modelo, sendo 7 dias para o aquecimento do modelo e 15 dias para análise. Na comparação dos dados brutos no ponto do ADCP (Fig. 15 B), obteve-se uma correlação de 0,96, um RMSE de 0,13m e um MAE de 0,11m. Na comparação do dado processado (Fig. 15 A), após análise harmônica, representando apenas a maré astronômica, a correlação ficou maior ainda, chegando a 0,96, o RMSE e o MAE também diminuíram para 0,08m e 0,07m respectivamente, porém o modelo perde um pouco em amplitude em relação ao dado observado (cerca de 7 cm). Quando comparamos os harmônicos de maré astronômica também observamos que o modelo subestima um pouco o nível (Fig. 16)

Figura 15 - Validação no ponto próximo à ponte, usando dados de ADCP. (A) Comparando dado astronômico processado após análise harmônica e (B) Dado bruto de nível.



Fonte: Autor

Figura 16 - Comparação da análise harmônica de dados observados próximos da ponte por ADCP e dados modelados.



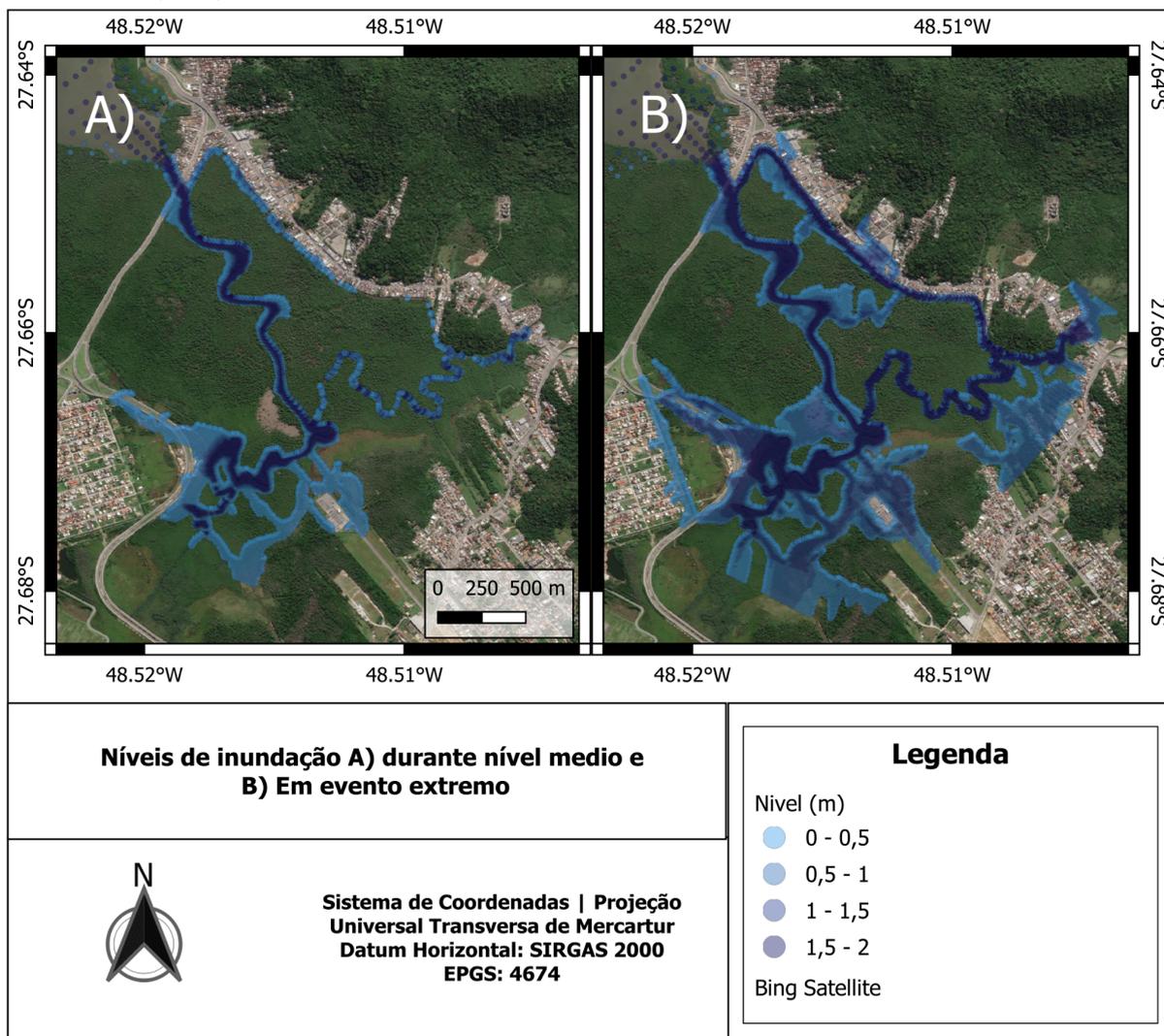
Fonte: Autor.

4.2 CENÁRIO BASE (ZERO)

Para comparação com os próximos cenários, foi criado um cenário base, com o nível do mar atual (zero), nele é possível observar o evento de inundação ocorrido no dia 04/04/2020, onde o nível do mar chegou a números muito acima da média (Fig. 18), causando problemas estruturais na cidade durante esse período, sendo o único ponto da série de dados que bateu a cota de inundação. O modelo conseguiu representar bem esse evento extremo, descrito como de alta intensidade pela Epagri (VANZ et al., 2021). Nesse mesmo evento de maior intensidade é possível observar a área inundada na região da RESEX e na região urbana adjacente (Fig. 17)

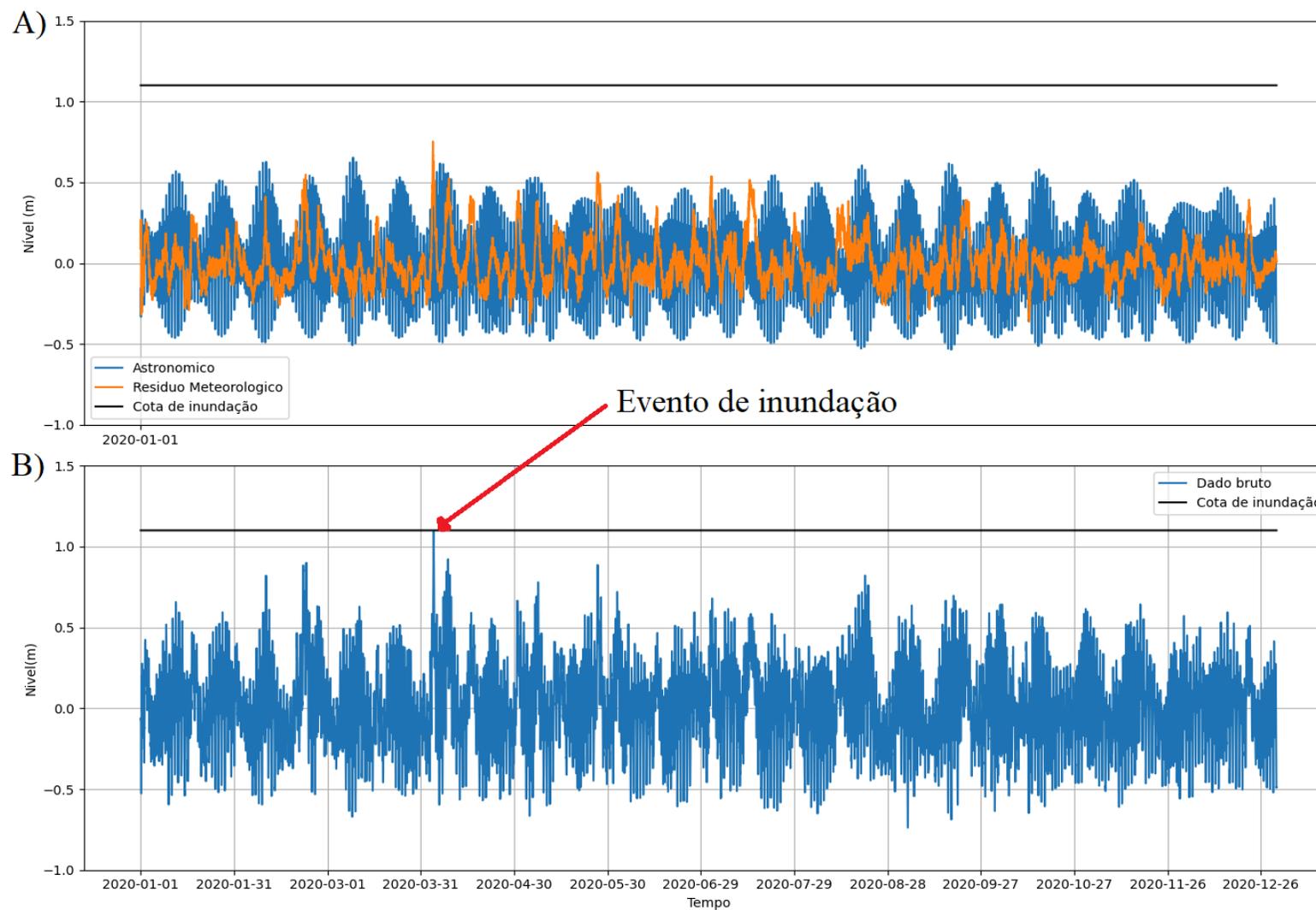
Também para comparação foram gerados os harmônicos de maré a partir da análise harmônica da série de nível resultante do modelo (Fig. 19) , nela é possível observar como algumas componentes de água rasa, como a M4, MS4, MN4 e a MO3 (PARKER, 2007), tem um impacto significativo na amplitude, conforme esperado na hidrodinâmica de uma baía rasa como a de Florianópolis. Porém, as maiores influenciadoras do nível observado no local, especialmente em maré de sizígia, são as lunares M2, O1, K1(luni-solar), K2 (luni-solar), MF, N2, Q1, P1 e a 2N2.

Figura 17 - A) Nível da água normal na área. B) Nível durante o evento de inundação do dia 04/04/2020 (4:00).



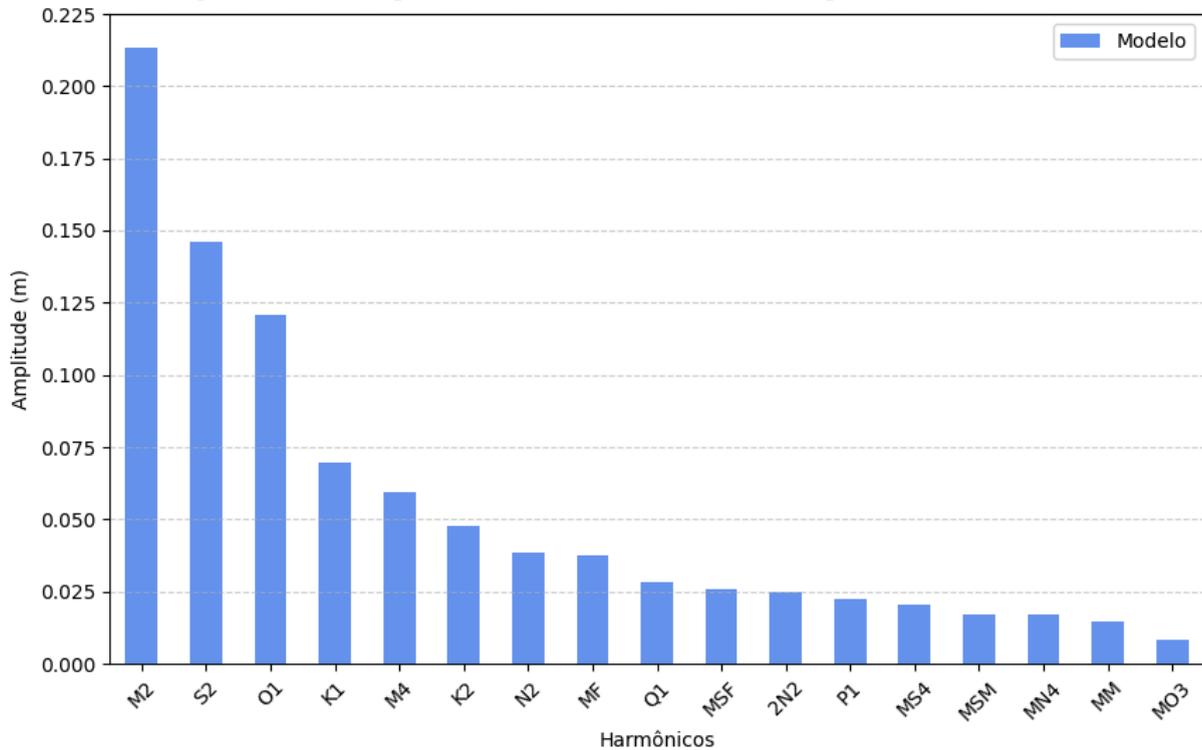
Fonte: Autor.

Figura 18 - A) Diferença entre maré astronômica e outras elevações de nível (resíduo). B) Evento de inundação, série de nível observada e nível crítico de inundação.



Fonte: Autor

Figura 19 - Principais harmônicos identificados no ponto analisado



Fonte: Autor

4.3 OS FUTUROS CENÁRIOS

Com o modelo conseguindo representar os eventos de inundação do passado com boa fidelidade à região de interesse, é possível simular agora como seriam esses eventos de inundação sobre os cenários previstos. Também é possível analisar a frequência e impacto desses eventos.

4.3.1 Cenário 1

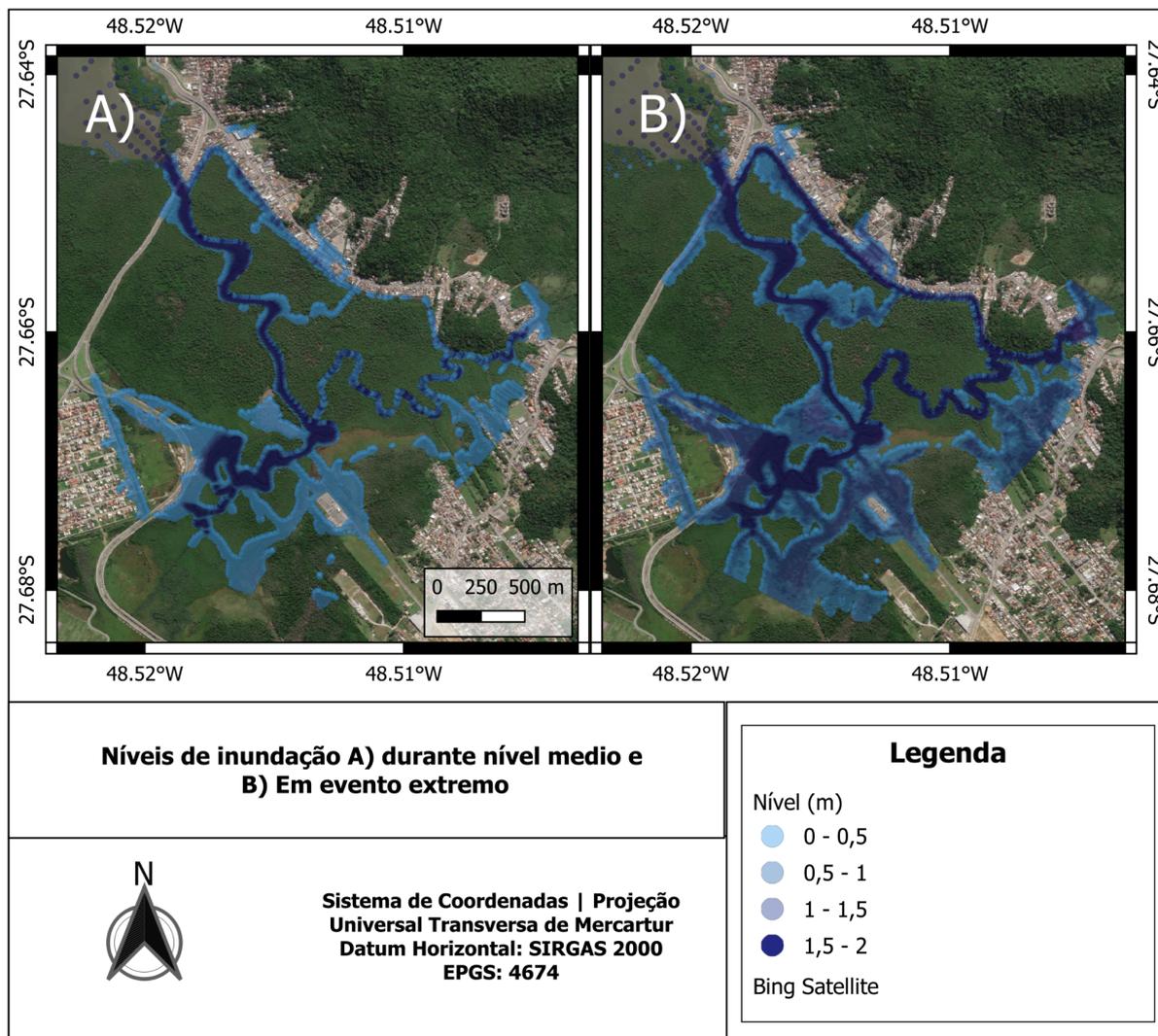
Esse cenário é um dos mais otimistas para a subida do nível do mar na região. Ele prevê um aumento conservador de 0,39 m para a região, um número que segue o aumento histórico atual registrado no passado sem nenhuma grande aceleração. Quando observamos o nível zero da água e comparamos com o maior evento de inundação da série temporal observada (Fig. 20), é possível observar uma área inundada muito maior em comparação ao

cenário base, indicando que mesmo nesse cenário mais conservador é possível ver que novas áreas serão alagadas e cada vez com mais intensidade.

Quando observamos com mais detalhe a série temporal, em comparação com a cota de inundação (Fig. 21 B), é possível observar a cota sendo batida sete vezes ao longo do tempo de simulação, sendo também necessário menor efeito dos eventos meteorológicos para aumentar o nível suficiente para inundação (Fig. 21 A).

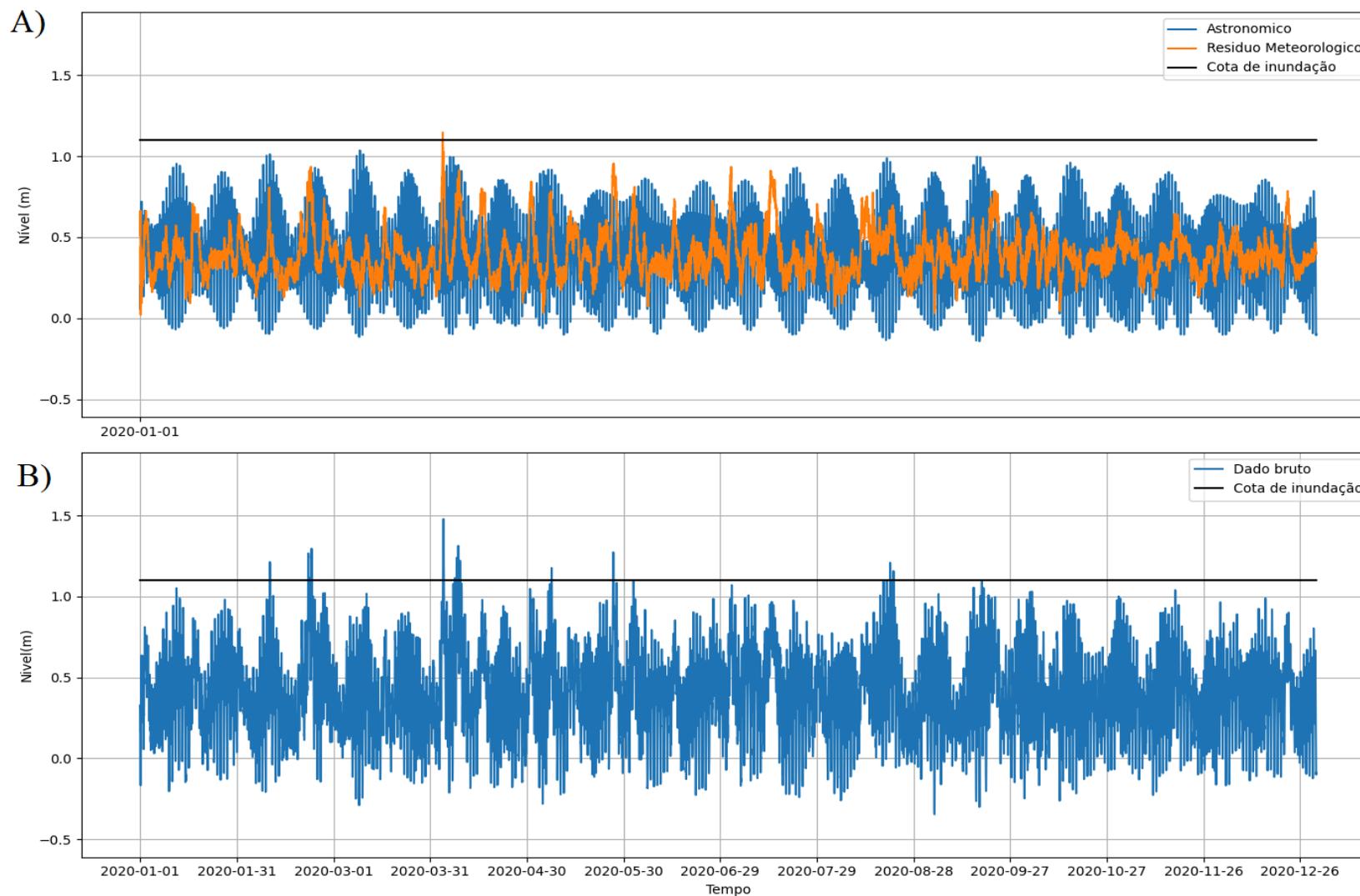
Em relação às componentes de maré astronômica desse cenário, as principais mudanças foram nos harmônicos de água rasa (M4 e MS4), com uma pequena diminuição do harmônico lunar M2 (Fig. 22) e do harmônico Solar S2. Esse efeito ocorre especialmente pela alteração na linha de fundo e na linha de costa já que esses harmônicos são os mais vulneráveis a mudanças no nível do mar (FENG; FENG, 2021).

Figura 20 - A) Nível da água base no cenário 1. B) Nível da água durante o maior evento de inundação.



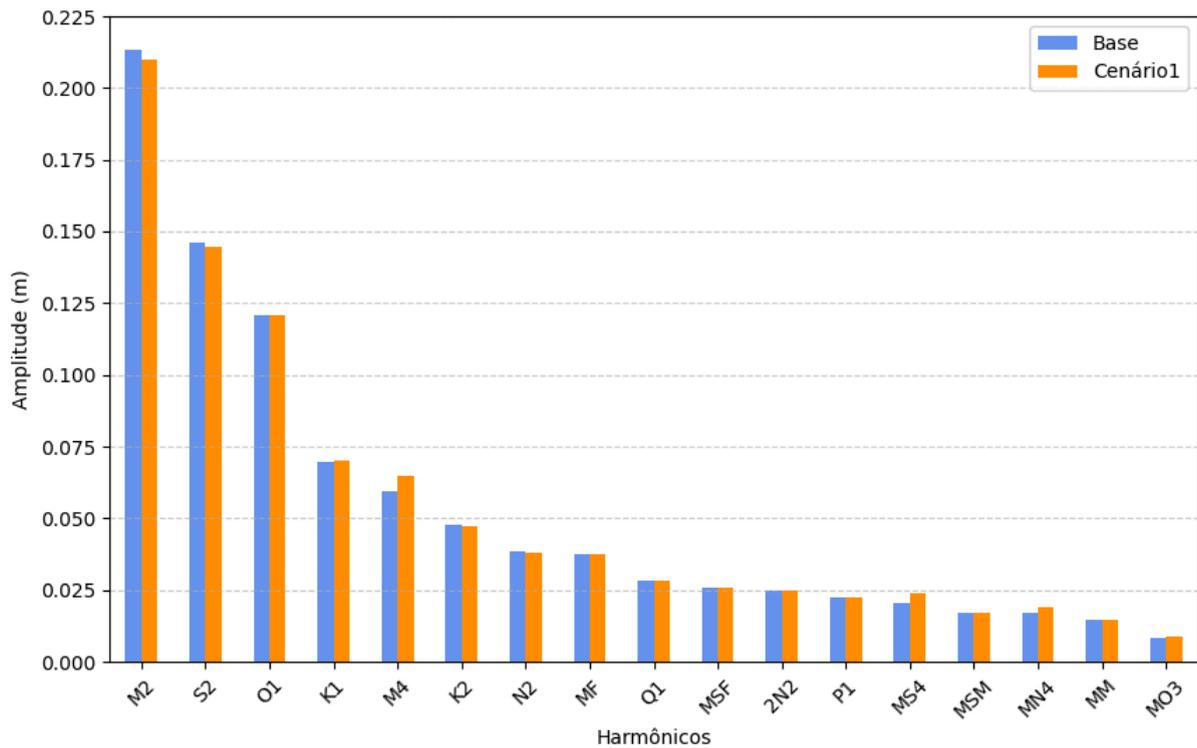
Fonte: Autor

Figura 21: A) Série temporal separada em nível astronômico contra resíduo meteorológico. B) Série temporal sem alterações com a cota de referência de inundação para comparação.



Fonte: Autor.

Figura 22 - Comparação entre os harmônicos encontrados no cenário 1 contra os harmônicos no cenário base.



Fonte: Autor

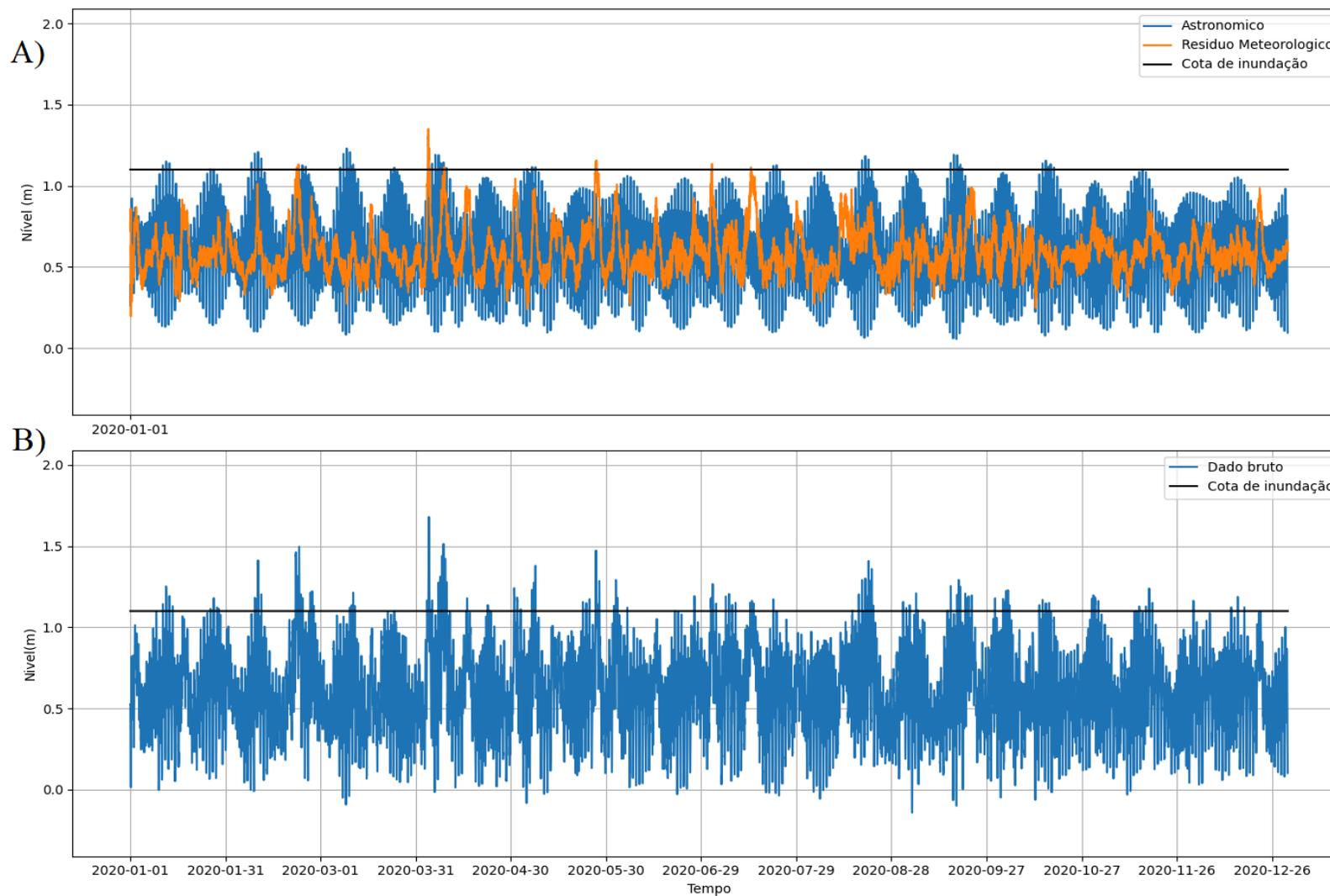
4.3.2 Cenário 2

Esse cenário, chamado de cenário intermediário, é um dos com maior índice de confiança do IPCC, muito semelhante às tomadas de decisão do mundo atual. Com base nele, está previsto um aumento de 0,59m para a região. Nesse cenário ocorreram 45 eventos de inundação (Fig. 23 B), um aumento enorme em relação ao cenário anterior, sendo que esse cenário marca o momento onde muitas das situações de inundação foram causadas por maré astronômica, de sizígia, sem componente de origem meteorológica (Fig. 23 A), ou seja, não vão mais ser necessários eventos de ciclogênese, ou ventos extremos para causar inundações menores (*Nuisance Flooding*), como visto em Ray e Foster (2016).

O evento de inundação mais extremo foi ainda mais significativo, quase tomando uma boa parte da região de mangue e afetando perigosamente a zona urbana (Fig. 24).

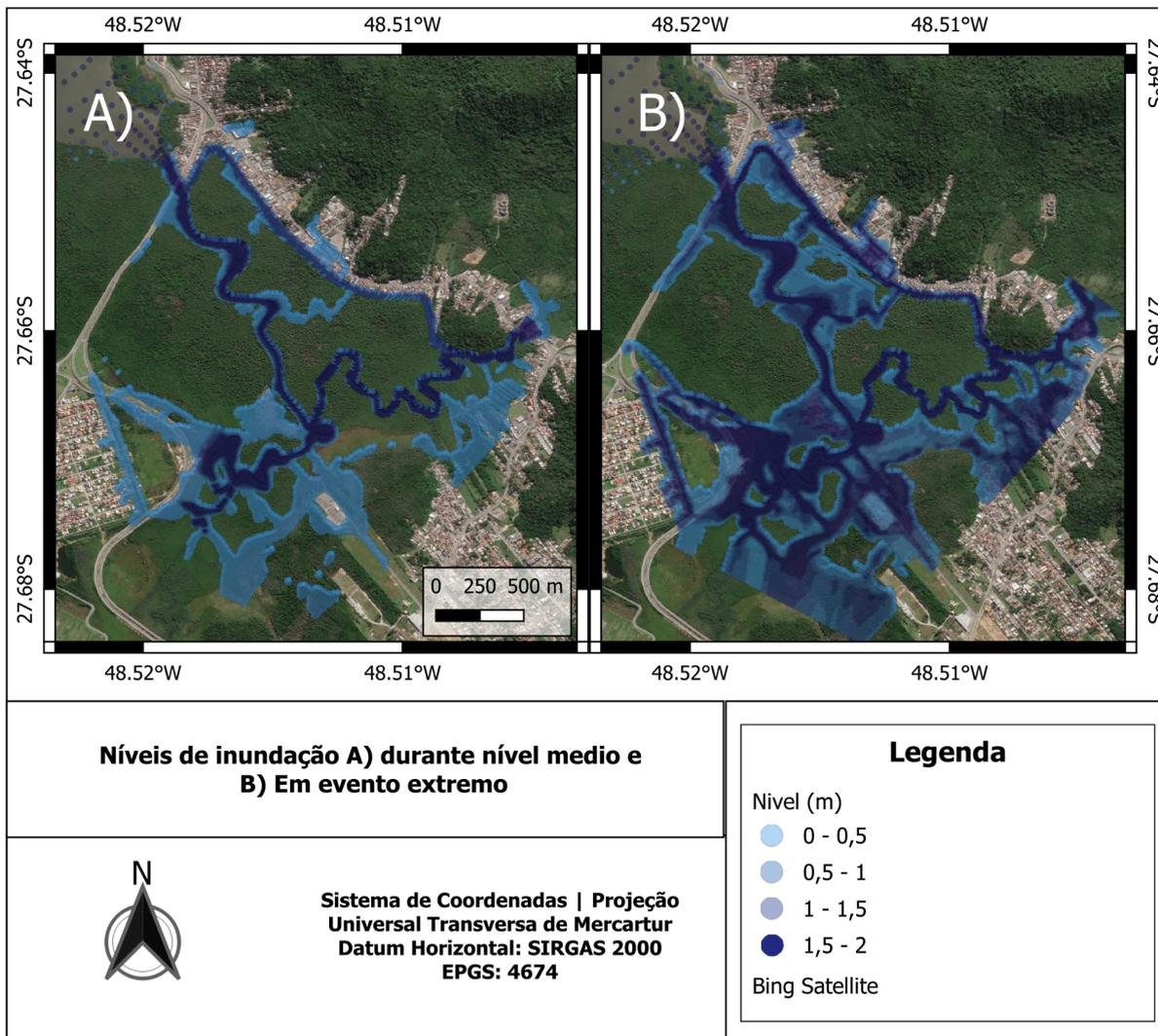
Em relação aos harmônicos de maré (Fig. 25) é possível observar a mesma tendência de redução da M2 e da S2 e aumento das componentes de água rasa como a M4 e MS4 por conta da interação dessas constantes com o fundo, bem como com a mudança na linha das baías com a mudança de nível.

Figura 23 - A) Série temporal separada em nível astronômico contra resíduo meteorológico. B) Série temporal sem alterações com a cota de referência de inundação para comparação.



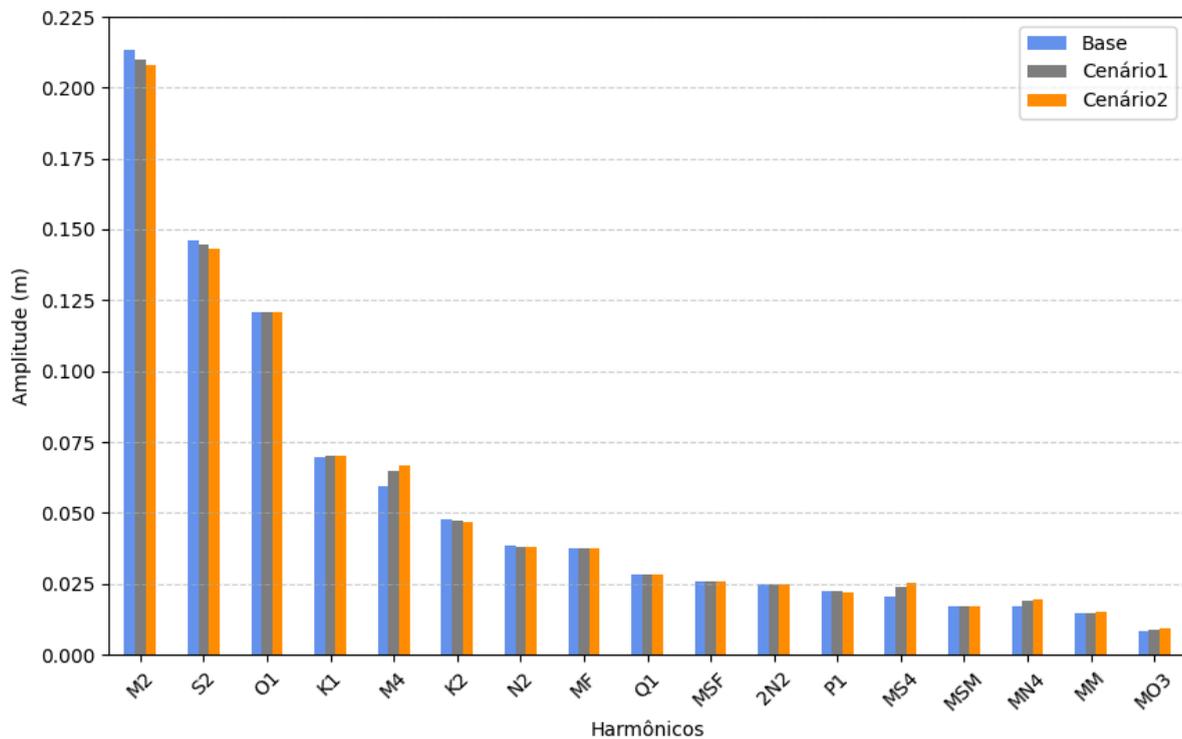
Fonte: Autor

Figura 24 - A) Nível da água base no cenário 2. B) Nível da água durante o maior evento de inundação.



Fonte: Autor

Figura 25 - Comparação entre os harmônicos encontrados nos cenários anteriores contra os harmônicos no cenário base e do cenário 2.

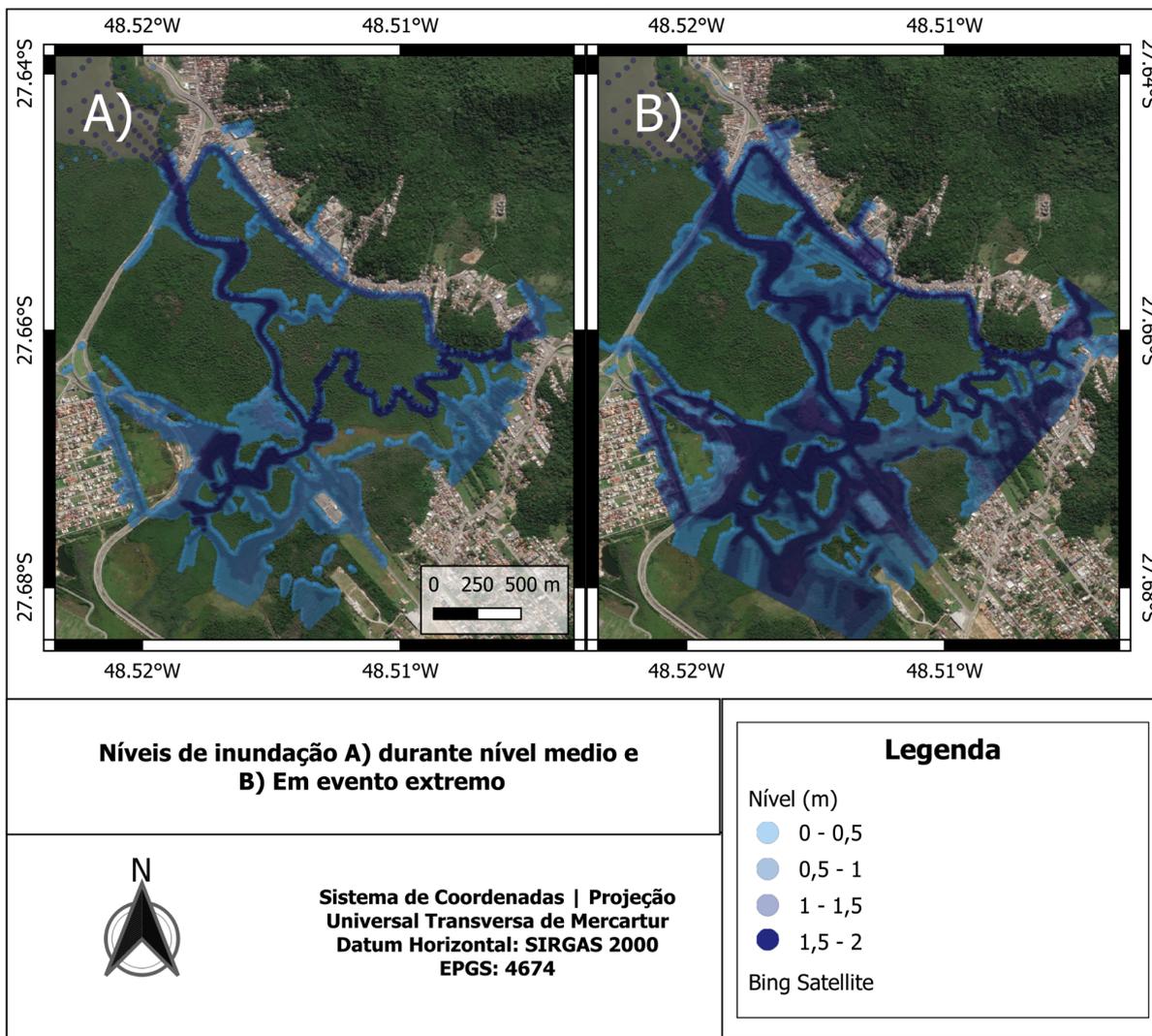


Fonte: Autor

4.3.3 Cenário 3

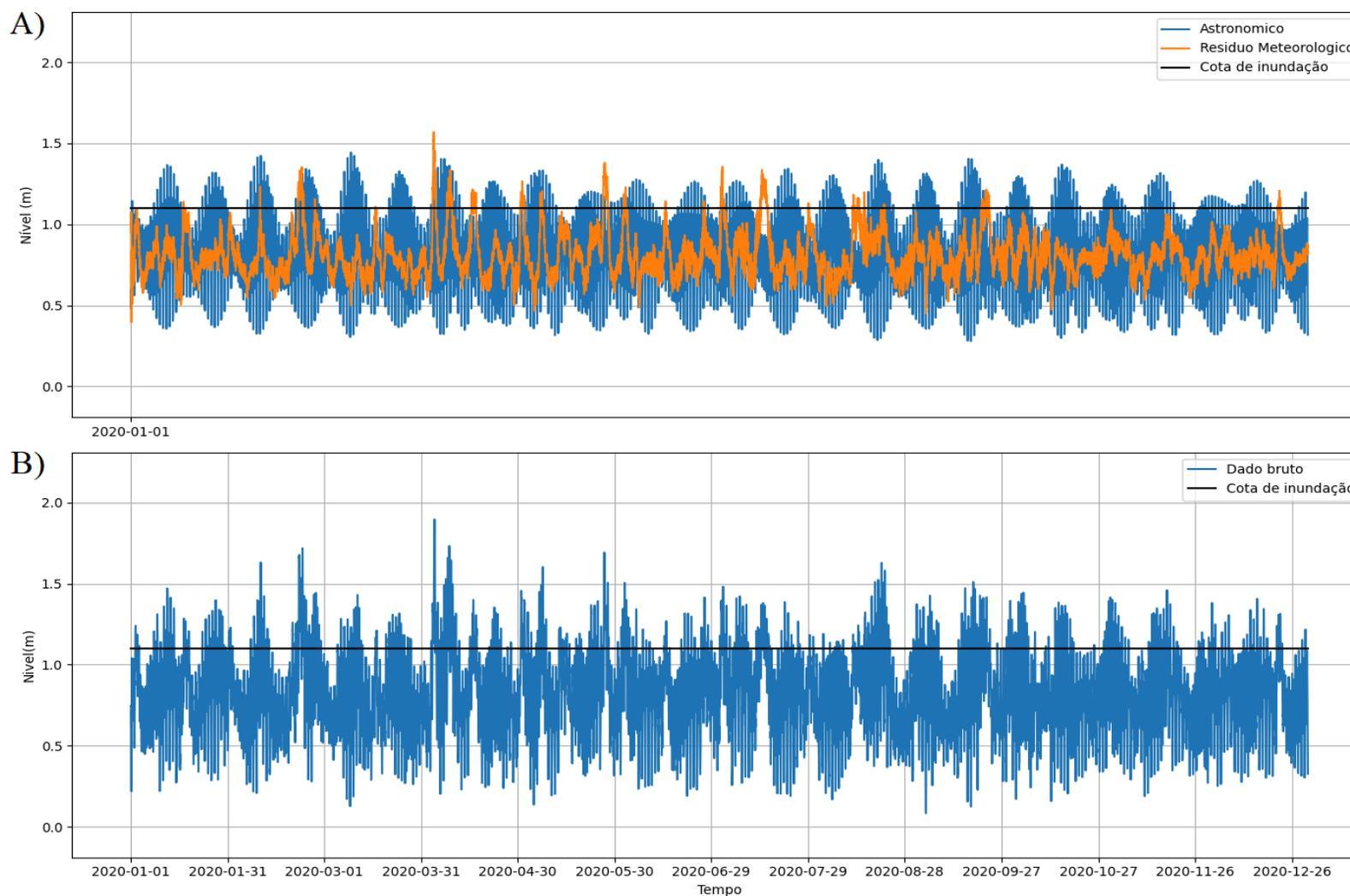
Com um aumento previsto de 0,81 m até 2100 para a região, esse cenário é um dos mais alarmantes, prevendo taxas altíssimas de produção de CO₂ para a atmosfera, refletindo de forma perigosa nos níveis globais de nível médio do mar (NMM). Com essa diferença de nível, as áreas urbanas foram ainda mais afetadas em um evento extremo (Figura 26). As inundações passaram a ser praticamente semanais (Fig. 27 B), bastando apenas a alternância do regime de marés, sem necessidade de eventos extremos ou ventos de alta intensidade para causar problemas na região. Os harmônicos continuam seguindo a mesma tendência de diminuição dos harmônicos principais e aumento da influência dos harmônicos de água rasa (Fig 28).

Figura 26 - A) Nível da água base no cenário 3. B) Nível da água durante o maior evento de inundação.



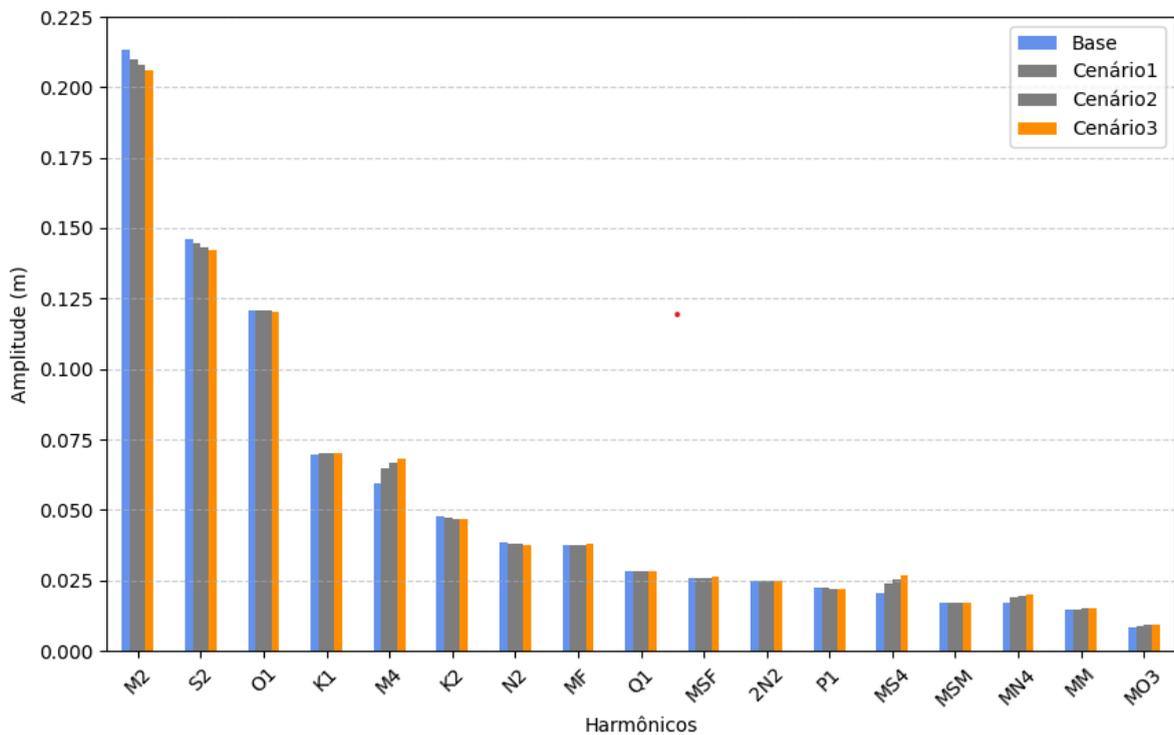
Fonte: Autor

Figura 27 - A) Série temporal separada em nível astronômico contra resíduo meteorológico. B) Série temporal sem alterações com a cota de referência de inundação para comparação.



Fonte: Autor

Figura 28 - Comparação entre os harmônicos encontrados nos cenários anteriores contra os harmônicos no cenário base e do cenário 3.

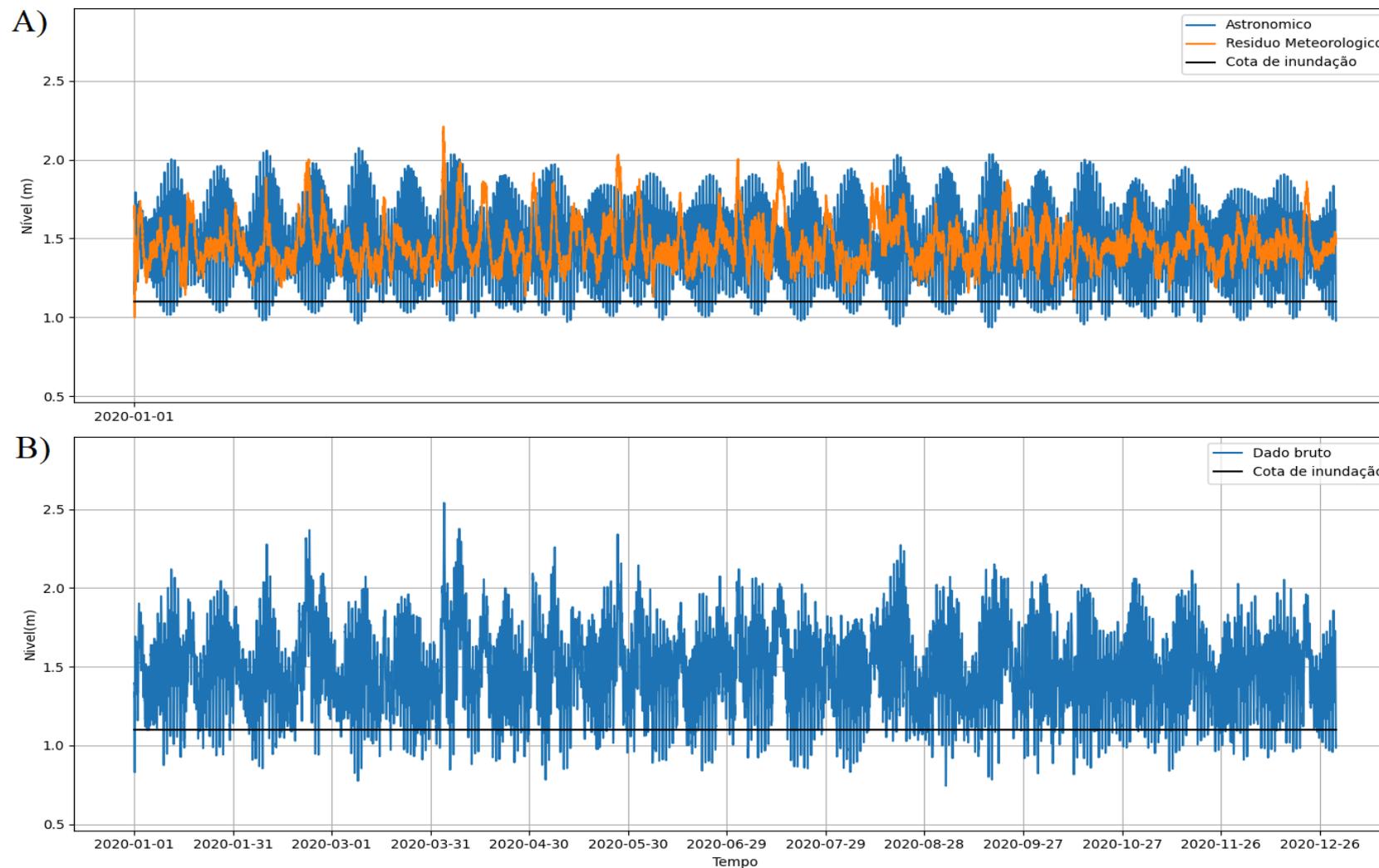


Fonte: Autor

4.3.4 Cenário 4

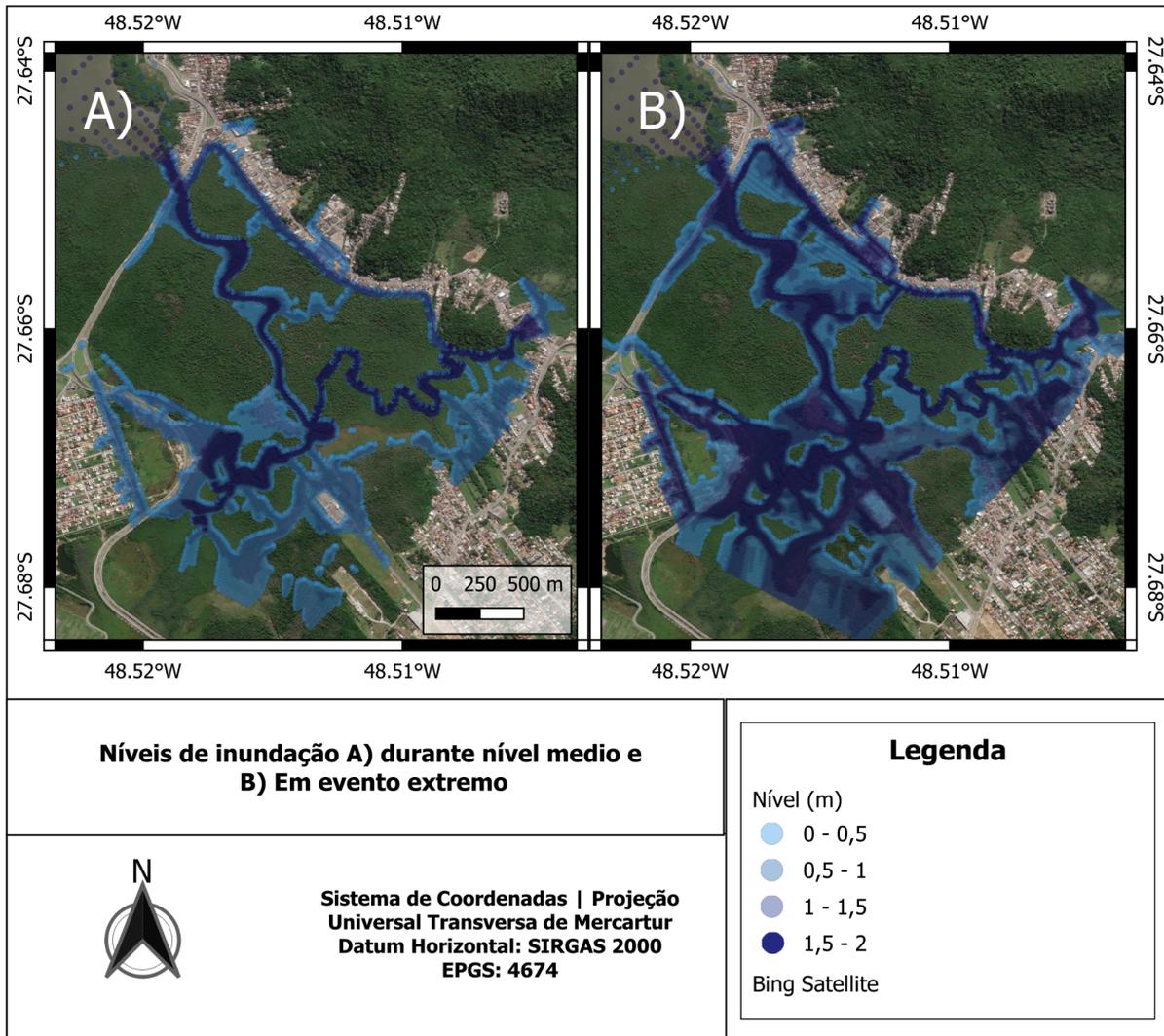
Quando as novas modelagens e novas observações do degelo da Antártica são calculadas mais a fundo, novas hipóteses surgem e com isso um possível novo cenário de aumento do NMM global. Dentro dessa perspectiva, com menor índice de confiança, o futuro global é muito mais catastrófico, prevendo um aumento de 1,46 m ao nível do mar. Quando observamos a série de nível na Figura 29 e comparamos com o nível da cota analisado, fica claro o quão preocupante um aumento desastroso deste pode ser, em todos os períodos da série temporal, mesmo em maré negativa e maré baixa, inundações ocorreram na zona observada, isso reflete também na imagem da zona de inundação (Fig. 30 A) sem nenhum evento, já há zonas alagadas. Quando comparamos com a zona em seu evento mais extremo de inundação (Fig. 30 B) boa parte da área de mangue fica completamente alagada, bem como diversas localidades urbanas da região. Também é possível observar a mesma tendência de modificação dos harmônicos, mas de forma mais exacerbada (Fig. 31).

Figura 29 - A) Série temporal separada em nível astronômico contra resíduo meteorológico. B) Série temporal sem alterações com a cota de referência de inundação para comparação.



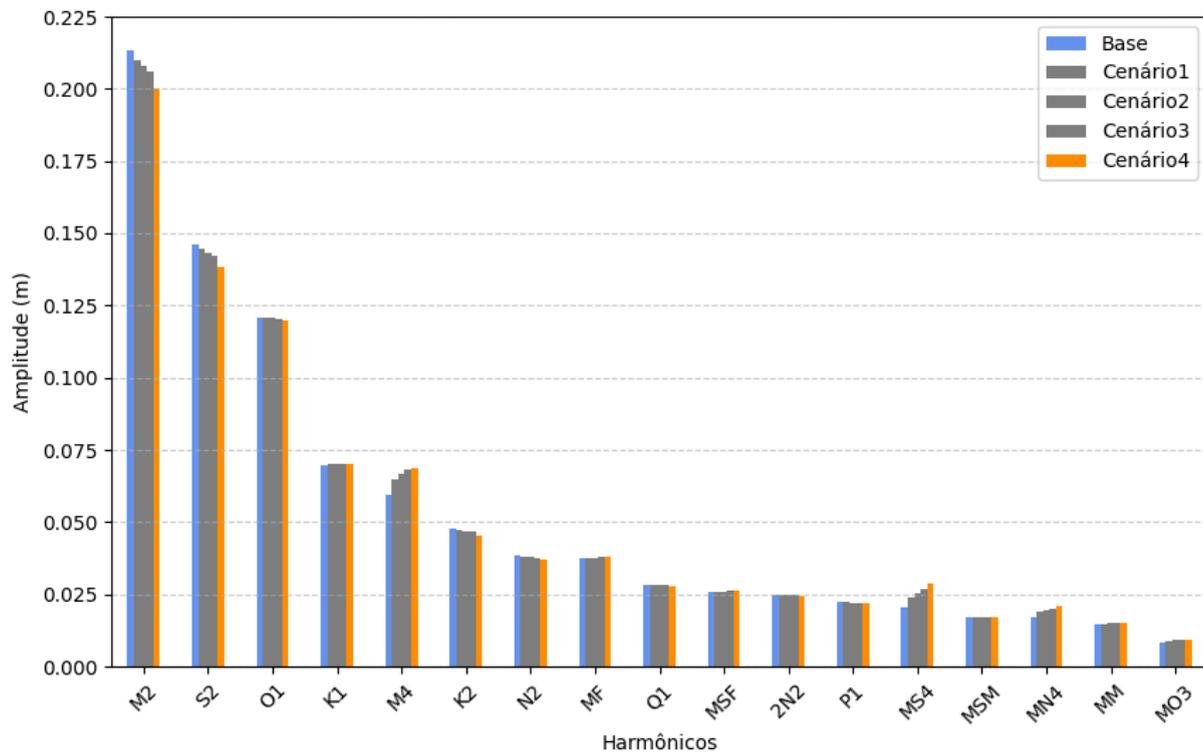
Fonte: Autor

Figura 30 - A) Nível da água base no cenário 4. B) Nível da água durante o maior evento de inundação.



Fonte: Autor

Figura 31 - Comparação entre os harmônicos encontrados nos cenários anteriores contra os harmônicos no cenário base e do cenário 4.



Fonte: Autor

O resultado dos efeitos observados nesses cenários é a destruição de parte do mangue que compõe a reserva, fazendo com que ele seja esmagado contra a região urbana, e com isso impactos ambientais de grande porte como perda de habitat, perda da efetividade do sequestro de carbono (ROVAI et al., 2018), destruição de berçário para espécies nativas aqui pescadas, impactando também a vida daqueles que dependem economicamente dos recursos naturais da RESEX. Os impactos urbanos e sociais têm efeitos de alta relevância, já que centenas de pessoas vivem às margens do local e uma das principais conexões entre o Sul e o centro-norte da Ilha passa por essa região, afetando imensamente a vida daqueles que precisam passar por ali diariamente. Quando levamos em conta o aumento populacional da ilha, cada vez mais pessoas estarão expostas aos riscos causados por essas inundações, e o prejuízo à saúde pública, bem como as obras da região são bem alarmantes, mesmo quando levamos em consideração os cenários mais otimistas apresentados.

5. CONCLUSÕES

Mesmo nos cenários mais conservadores de aumento do nível do mar, houveram grande aumento relevante tanto na frequência da ocorrência dos eventos de inundação, bem como na área impactada, mostrando que caso esses cenários venham a ocorrer dessa forma, os impactos serão grandes no futuro da região. Quando levamos em conta os cenários intermediários que possuem um índice de confiança alto, observamos isso de forma mais acentuada, o fato de somente eventos de maré de sizígia serem necessários para causar alagamentos na região, sem que grandes eventos de ciclogênese ou ventos extremos sejam necessários, demonstra um problema, pois como observado na série modelada, a frequência de ocorrência passa a ser praticamente semanal. Isso ainda piora quando observamos os resultados dos piores cenários, com inundações permanentes em certas áreas.

Um efeito que não foi simulado no estudo e que pode ser mais prejudicial ainda é o das mudanças climáticas causando um possível aumento na ciclogênese do Atlântico Sul que leva ventos de alta intensidade assim com eventos extremos mais recorrentes, fazendo com que os eventos aqui simulados possam ter efeitos ainda mais catastróficos. Mais estudos podem ser feitos, observando esses impactos e também analisando diferentes localidades da ilha que também estão sob risco.

6- CÓDIGOS UTILIZADOS

Para o processamento dos dados a principal linguagem de programação utilizada foi Python, e os códigos estão disponíveis abertamente em:

<https://github.com/HollowGbrl/Flooding-Floripa>

7. REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, R.; SÜHNEL, S.; FERREIRA, E. Mortality of the Clam *Anomalocardia brasiliensis* Population in the Pirajubaé Marine Extractive Reserve: Effect of Climate Events? **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, 2 dez. 2022.

BODNARIUK, N. et al. Interannual Variability of the Latitude of Separation of the Brazil Current: Teleconnections and Oceanic Rossby Waves Propagation. **JGR Oceans**, v. 126, n. 10, 1 out. 2021.

CAMPOS, P. C. et al. Seasonal variability and coastal upwelling near Cape Santa Marta (Brazil). **JGR Oceans**, v. 118, n. 3, p. 1420–1433, 1 mar. 2013.

CASAGRANDE, A. et al. Artisanal mollusc fisheries co-management in Brazil and Italy: Institutional innovations to address environmental crisis. **Journal of Environmental Management**, v. 291, p. 112671, ago. 2021.

CODIGA, D.L. Unified Tidal Analysis and Prediction Using the UTide Matlab Functions. Technical Report. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI. 59pp. <ftp://www.po.gso.uri.edu/pub/downloads/codiga/pubs/2011Codiga-UTide-Report.pdf> jan. 2011.

COMBE, T.; MARTIN, A.; DI PIETRO, R. To Docker or Not to Docker: A Security Perspective. **IEEE Cloud Computing**, v. 3, n. 5, p. 54–62, set. 2016.

CUMMINGS, J. A. Operational multivariate ocean data assimilation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, n. 613, p. 3583–3604, 1 out. 2005.

CUMMINGS, J. A.; SMEDSTAD, O. M. Variational Data Assimilation for the Global Ocean. **Springer eBooks**, v. 2, p. 303–343, 1 jan. 2013.

DROUIN, K. L.; LOZIER, M. S.; JOHNS, W. E. Variability and Trends of the South Atlantic Subtropical Gyre. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 126, n. 1, jan. 2021.

DUTRA, R. et al. **Análise dos Registros de Desastres na Zona Costeira da Ilha de Santa Catarina**. ABRHidro. **Anais...** In: III ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES. 2023.

EKMAN, Vagn Walfrid. On the influence of the earth's rotation on ocean-currents. 1905.

FENG, X.; FENG, H. On the Role of Anthropogenic Activity and Sea-Level-Rise in Tidal Distortion on the Open Coast of the Yellow Sea Shelf. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v. 126, n. 3, 1 mar. 2021.

FERNANDES, I. G. et al. **Offshore Validation of ERA5 Reanalysis with Hub Height Wind Observations of Brazil**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9542993/>. Acesso em: 6 fev. 2022.

FERREIRA, A. **Altibati: combinação de altimetria por satélite e batimetria multifeixe para geração de MDE dos canais de maré no litoral setentrional do RN**. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134010420>. Acesso em: 22 maio. 2024.

FETTER, A. F. H.; MATANO, R. P. On the origins of the variability of the Malvinas Current in a global, eddy-permitting numerical simulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. C11, 21 nov. 2008.

FOX-KEMPER, B. et al. SPM Coordinating Lead Authors: Lead Authors: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. **Cambridge University Press**, v. 2023, 29 jun. 2023.

FRANZ, G. et al. Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives. **Frontiers in Marine Science**, v. 8, 10 ago. 2021.

GARBOSSA, L. H. P. et al. **Modelling And Validation Of The Santa Catarina Island Bays Hydrodynamics Based On Astronomic Tides And Measured Tides**. CUNY Academic Works. **Anais...** In: 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS. City University of New York (CUNY) , 2014.

GIAREMIS, S. et al. Storm surge modeling in the AI era: Using LSTM-based machine learning for enhancing forecasting accuracy. **Coastal Engineering**, v. 191, p. 104532–104532, 1 ago. 2024.

GRAMCIANINOV, C. B.; HODGES, K. I.; CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 7-8, p. 4115–4140, 3 maio 2019.

IBGE. **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia | IBGE**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html>>. Acesso em: 6 jun. 2024.

IDIER, D. et al. Sea-level rise impacts on the tides of the European Shelf. **Continental Shelf Research**, v. 137, p. 56–71, abr. 2017.

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **IPCC**, v. 1, n. 1, 2022.

JAY, D. A. Evolution of tidal amplitudes in the eastern Pacific Ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 4, 19 fev. 2009.

JOHNSON, G. C.; KING, B. A. Zapiola Gyre, Velocities and Mixing, New Argo Insights. **Journal of Geophysical Research Oceans**, v. 128, n. 6, 1 jun. 2023.

KOPP, R. E. et al. Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity in Probabilistic Sea-Level Projections. **Earth's Future**, v. 5, n. 12, p. 1217–1233, dez. 2017.

LEAL, K. et al. **Desastres Naturais Associados à Erosão e Inundação Costeira: Um Levantamento para o Estado de Santa Catarina, Brasil**. In: XIV ENANPEGE. 2021.

LINO, A. **Eventos Pluviométricos Extremos e Inundação Composta na Cidade de Recife**. Tese—Universidade Federal de Pernambuco: [s.n.].

MATANO, R. P.; PALMA, E. D.; PIOLA, A. R. The influence of the Brazil and Malvinas Currents on the Southwestern Atlantic Shelf circulation. **Ocean Science**, v. 6, n. 4, p. 983–995, 30 nov. 2010.

MENDONÇA, L. F. F. et al. Analysis of a coastal-trapped wave generated by the 2016 extra-tropical cyclonic system in the Southern Brazilian continental shelf with COAWST modeling system. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 129, p. 104522–104522, 1 set. 2023.

MICHAELOVITCH, M. et al. The Southern Brazilian shelf: general characteristics, quaternary evolution and sediment distribution. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. spe2, p. 25–34, 1 jan. 2010.

MUIS, S. et al. A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. **Nature Communications**, v. 7, n. 1, 27 jun. 2016.

NASA. **NASA Sea Level Change Portal**. Disponível em: <<https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>>.

NUMPY. **NumPy user guide — NumPy v1.21 Manual**. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/user/index.html>>.

PARKER, B. B. **Tidal Analysis and Prediction NOAA Special Publication NOS CO-OPS 3**. [s.l.] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), jul. 2007. Disponível em: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tidal_Analysis_and_Predictions.pdf>.

PASSOS, E. et al. South Atlantic Central Water Intrusion in the Southeast Brazil Bight and its impacts. **Regional Studies in Marine Science**, v. 67, p. 103232, 20 dez. 2023.

PINHO, M. et al. Depósitos fosfáticos marinhos na costa sudeste e sul do Brasil: potenciais áreas de ocorrência identificadas com dados de retroespalhamento acústico do fundo e sedimentológicos analisados sobre mapa batimétrico 3D. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 29, p. 113–126, 1 mar. 2011.

PIOLA, A. R. et al. Subtropical Shelf Front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 105, n. C3, p. 6565–6578, 15 mar. 2000.

PIOLA, A. R. et al. The influence of the Plata River discharge on the western South Atlantic shelf. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 1, 2005.

PIOLA, A. R. et al. Physical Oceanography of the SW Atlantic Shelf: A Review. **Springer eBooks**, p. 37–56, 1 jan. 2018.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. [s.l.] John Wiley & Sons Ltd, 1987.

RAY, R.; FOSTER, G. Future nuisance flooding at Boston caused by astronomical tides alone. **Earth's Future**, v. 4, n. 12, p. 578–587, dez. 2016.

Resex Pirajubaé. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/marinho/lista-de-ucs/resex-marinha-do-pirajubae>>. Acesso em: maio. 2024.

RÖBKE, B. R. et al. Rapid Assessment of Tsunami Offshore Propagation and Inundation with D-FLOW Flexible Mesh and SFINCS for the 2011 Tōhoku Tsunami in Japan. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 5, p. 453, 22 abr. 2021.

ROVAI, A. S. et al. Global controls on carbon storage in mangrove soils. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 6, p. 534–538, 28 maio 2018.

RUIZ-ETCHEVERRY, L. A.; SARACENO, M. Sea Level Trend and Fronts in the South Atlantic Ocean. **Geosciences**, v. 10, n. 6, p. 218, 3 jun. 2020.

SAINTILAN, N. et al. Thresholds of mangrove survival under rapid sea level rise. **Science**, v. 368, n. 6495, p. 1118–1121, 4 jun. 2020.

SASAKI, D. K. et al. Intraseasonal variability of ocean surface wind waves in the western South Atlantic: the role of cyclones and the Pacific South American pattern. **Weather and climate dynamics**, v. 2, n. 4, p. 1149–1166, 2 dez. 2021.

SHORT, A.; KLEIN, A. **Brazilian Beach Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2016.

TALLEY, L. D. et al. Atlantic Ocean. **Descriptive Physical Oceanography**, p. 245–301, 2011.

TARGINO, A.; SOARES, M.; AMARO, V. GEODÉSIA APLICADA À INTEGRAÇÃO DE DADOS TOPOGRÁFICOS E BATIMÉTRICOS NA CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE PRAIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, 26 fev. 2014.

VANZ, A. et al. Principais eventos de inundação costeira na costa de Santa Catarina registrados pela rede maregráfica da Epagri entre 2012 e 2020. **Agropecuária Catarinense/Agropecuária catarinense**, v. 34, n. 3, p. 23–26, 28 dez. 2021.

WAHRLICH, J. et al. CHARACTERIZATION OF THE PREDOMINANT WIND SPEED AND DIRECTION IN SANTA CATARINA, BRAZIL. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, 28 nov. 2018.

WALLEMACQ, P. et al. **The Human Cost of Weather Related Disasters19952015**. [s.l.] UN Office for Disaster Risk Reduction, 2015.