

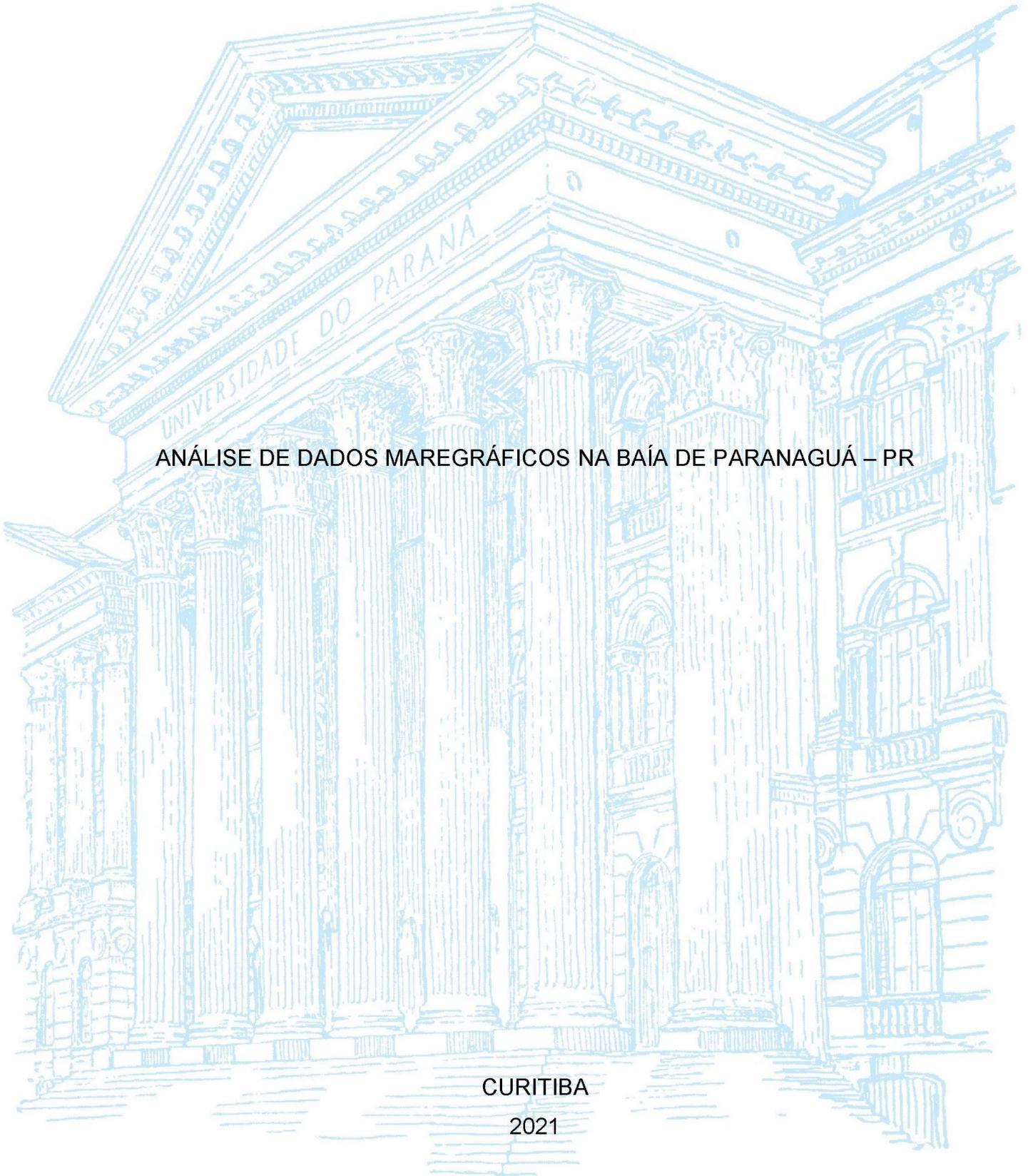
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAIMUNDO SALES DE MELO NETO

ANÁLISE DE DADOS MAREGRÁFICOS NA BAÍA DE PARANAGUÁ – PR

CURITIBA

2021



RAIMUNDO SALES DE MELO NETO

ANÁLISE DE DADOS MAREGRÁFICOS NA BAÍA DE PARANAGUÁ – PR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Regiane Dalazoana

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Pereira Krueger

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

M528a

Melo Neto, Raimundo Sales de

Análise de dados maregráficos na Baía de Paranaguá – PR [recurso eletrônico]/ Raimundo Sales de Melo Neto – Curitiba, 2021.

Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Regiane Dalazoana

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Pereira Krueger

1. Análise Harmônica. 2. Nível do mar. I. Dalazoana, Regiane. II. Krueger, Cláudia Pereira. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 515.2433

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RAIMUNDO SALES DE MELO NETO** intitulada: **ANÁLISE DE DADOS MAREGRÁFICOS NA BAÍA DE PARANAGUÁ - PR**, sob orientação da Profa. Dra. REGIANE DALAZOANA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Agosto de 2021.

Assinatura Eletrônica

27/08/2021 17:26:18.0

REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/08/2021 17:17:08.0

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

27/08/2021 17:22:45.0

SILVIO JACKS DOS ANJOS GARNES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

à minha família.

AGRADECIMENTOS

Assumi este mestrado como um dever de me capacitar e retornar, à Marinha do Brasil e à sociedade o investimento realizado. Após conhecer de perto o PPGCG, com suas linhas de pesquisa, professores e pesquisadores, percebi que era um objetivo muito ambicioso: pesquisas e seus resultados precisam da contribuição de muitas pessoas, investimento contínuo e os resultados vêm em longo prazo e com muito planejamento. Considero que o retorno se deu com minha capacitação e atualização técnicas. Certamente, com a experiência adquirida neste período, me tornei um profissional com a capacidade de produzir mais e melhor.

Após o sentido do dever, se apresenta a gratidão e assim sou grato a todos que possibilitaram a conclusão desta jornada: a Deus, primeiramente; às professoras Cláudia Krueger e Regiane Dalazoana, por terem aceitado me orientar, pela paciência, encorajamento e pelo tempo dispensado a mim durante a pesquisa; ao professor Silvio Jacks da UFPE, pela cessão da licença do programa AstGeoTop para o âmbito desta pesquisa além de tirar dúvidas e disponibilizar material teórico de maré; aos professores Gilberto Pessanha Ribeiro (UNIFESP) e José Luís Nunes Brito (UERJ), por terem concordado em apresentar ao PPGCG as suas recomendações; ao amigo Dr. Jaldair Araújo, pela revisão e sugestões; e à Capitania dos Portos do Paraná, na pessoa de seu comandante na época, o Senhor Capitão de Mar e Guerra Rogério Antunes Machado, pela cordialidade com que me recebeu e pela eficiência dos processos administrativos sob sua responsabilidade relativos à minha permanência em Curitiba.

“Não seja sábio aos seus próprios olhos”

Provérbios, 3: 7

RESUMO

O Complexo Estuarino de Paranaguá retrata com precisão a complexidade da zona costeira e dos desafios impostos em sua gestão territorial: um estuário que contém um dos portos mais movimentados do Brasil e uma importante área de proteção ambiental. Esta complexidade demanda o estudo do comportamento do nível da água para a imposição eficiente de soluções que garantam o desenvolvimento econômico sem perder de vista as questões sociais e ambientais. Esta dissertação assumiu como objetivo compreender o fenômeno da maré na área da Baía de Paranaguá – PR, através da análise de séries temporais de dados maregráficos em cinco estações maregráficas: Antonina, Ponta do Félix, Cais Oeste, Ilha das Cobras e Galheta. A análise incluiu o desenvolvimento e aplicação de processos para remoção de dados espúrios. Estes processos proporcionaram uma redução média de 9,86 % e máxima de 62,49 % na variância das constituintes determinadas pela análise harmônica. Foi observado o aumento do número de constituintes determinadas em 12 das 37 séries analisadas. A análise harmônica foi realizada pelos programas AstgeoTop e PACMARÉ. Observou-se comportamento predominantemente semidiurno nas estações maregráficas de Antonina, Ponta do Félix e Cais Oeste e semidiurna com desigualdades em Ilha das Cobras e Galheta. Foi feita uma análise da reflexão de ondas na área de estudo, concluindo que é provável que este fenômeno contribua para o aumento da amplitude das constituintes semidiurnas principais baía adentro. A diferença de fase das constituintes da entrada à cabeceira da baía concorda com a redução do comprimento de onda em virtude da redução da profundidade. A utilização do filtro passa-baixa ótimo de Thompson possibilitou delinear a predominância da maré ao longo do ano, com marés positivas no primeiro semestre e negativas no segundo. Utilizando o índice RV, pode-se concluir que a maré reconstituída pela análise harmônica explicou, em média, 82% da variação da maré nos períodos analisados, ou seja, uma influência de maré meteorológica de, aproximadamente, 18 % na área de estudo. A estimativa do Nível Médio do Mar mensal para as estações Cais Oeste e Galheta, que compreendiam as séries temporais de nível do mar mais longas, mostrou estreita concordância com a constituinte meteorológica Sa. Este último fato também foi observado com dados da Estação Maregráfica de Cananéia – SP, distante 80 km da área de estudo. A remoção do efeito barômetro invertido das observações permitiu uma redução de 5% (1 cm) no valor do desvio padrão dos resíduos para uma das séries temporais de dados da estação Cais Oeste. Uma notificação com os pontos positivos e o relato de algumas discrepâncias encontradas será enviada ao provedor dos dados utilizados nesta pesquisa, Banco Nacional de Dados Oceanográficos, com o propósito de dar modesta contribuição para a elevada qualidade dos dados disponibilizados para a comunidade científica. Apesar das limitações (séries temporais não suficientemente longas e pouca disponibilidade de dados ambientais de outras fontes, por exemplo), este estudo reforça a importância da manutenção de registros maregráficos para subsidiar estudos nas zonas costeiras, em especial a integração de referenciais verticais.

Palavras-chave: Análise Harmônica, Nível Médio do Mar, Referenciais Verticais.

ABSTRACT

Paranaguá Estuarine System accurately portrays the complexity of the coastal zone and imposed challenges regarding territorial management: an estuary that contains one of the busiest ports in Brazil and an environmental protection area of ecological importance. This complexity requires the study of the water level in order to efficiently apply solutions to ensure economic development without losing sight of social and environmental issues. The objective of this essay is to study the tide phenomenon in the Paranaguá Bay area, through the analysis of time series of sea level at five tide gauges: Antonina, Ponta do Félix, Cais Oeste, Ilha das Cobras and Galheta. The analysis comprised development and application of processes to remove clearly wrong data, which provided an average reduction of 9,86 % and a maximum of 62,49 % in constituents variance determined by harmonic analysis and an increase in the number of constituents determined in 12 of the 37 series analyzed. Harmonic analysis was performed by the AstgeoTop and PACMARÉ programs. Predominantly semidiurnal behavior was observed in Antonina, Ponta do Félix and Cais Oeste and semidiurnal with inequalities in Ilha das Cobras and Galheta. An analysis of wave reflection in the study area was carried out, concluding that it is likely that this phenomenon contributes to the increase in the amplitude of the main semidiurnal constituents in the bay head. The constituents phase lag between the entrance and the bay head agrees with the shortening in wavelength due to depth reduction. Thompson's optimal low-pass filter made it possible to estimate tide predominance throughout the year, with positive tides in the first semester and negative tides in the second. RV index showed, on average, astronomical effects explained 82% of sea level variation, that is, approximately 18% non-astronomical effects found. The estimate of the monthly Mean Sea Level at Cais Oeste and Galheta stations, which provided the longest sea level series available, was in close agreement with the meteorological constituent S_a , which was also observed for Cananeia – SP, 80 km northeast from the study area. Removing the inverted barometer effect from the observations allowed a 5% reduction in the standard deviation of the residues (one centimeter) for one of the time series obtained at Cais Oeste station. A message addressing positive issues and the report of some discrepancies found will be sent to the provider of the data used in this research, National Oceanographic Database, with the purpose of making a modest contribution to the high quality data made available to the scientific community. Despite the limitations (not long enough time series and little availability of environmental data from other sources, for example), this study reinforces the importance of maintaining tide records for support studies in coastal areas, especially regarding integration of vertical Data.

Keywords: Harmonic Analysis, Mean Sea Level, Vertical *Datum*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TIPOS DE MARÉ	27
FIGURA 2 – TIPOS DE MARÉ À COSTA LESTE DA AMÉRICA DO SUL.....	28
FIGURA 3 – FORÇA DE ATRAÇÃO.....	29
FIGURA 4 – ESFERA CELESTE.....	31
FIGURA 5 – FALSEAMENTO DE FREQUÊNCIA.....	37
FIGURA 6 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS.....	41
FIGURA 7 – ALTITUDES NIVELADAS.....	44
FIGURA 8 – ALTITUDE ELIPSOIDAL.....	45
FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA.....	49
FIGURA 10 – CEP E SEUS PRINCIPAIS CORPOS D'ÁGUA.....	50
FIGURA 11 – COMPOSIÇÃO COLORIDA ABRANGENDO A REGIÃO DE ESTUDO.	50
FIGURA 12 – LOCALIZAÇÃO DAS EEMM UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE MARÉ METEOROLÓGICA.....	52
FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DOS MARÉGRAFOS NA REGIÃO DE ESTUDO.....	54
FIGURA 14 – FORMATO DOS ARQUIVOS DO BNDO	57
FIGURA 15 – DIAGRAMA DE F-41.....	58
FIGURA 16 – METODOLOGIA DO CONTROLE DE QUALIDADE.....	61
FIGURA 17 – PROCESSOS DE CONTROLE DE QUALIDADE NÍVEL ZERO.....	62
FIGURA 18 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA SÉRIE GLH_G.....	65
FIGURA 19 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXA.....	68
FIGURA 20 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA (SÉRIE ORIGINAL (a) E FILTRADA (b)).....	69
FIGURA 21 – DIFERENÇA NA VARIÂNCIA (%) x COMPRIMENTO DA SÉRIE (DIAS) PARA CONSTITUINTES DE 1 CICLO POR DIA.....	76
FIGURA 22 – DIFERENÇA NA VARIÂNCIA (%) x COMPRIMENTO DA SÉRIE (DIAS) PARA CONSTITUINTES DE 2 CICLOS POR DIA.....	76
FIGURA 23 – DIFERENÇA NA VARIÂNCIA (%) x COMPRIMENTO DA SÉRIE (DIAS) PARA CONSTITUINTES DE 3 CICLOS POR DIA.....	77
FIGURA 24 – DIFERENÇA NA VARIÂNCIA (%) x COMPRIMENTO DA SÉRIE (DIAS) PARA CONSTITUINTES DE 4 CICLOS POR DIA.....	77
FIGURA 25 – CONSTITUINTES DETERMINADAS PARA A SÉRIE ATN_B (364 DIAS).....	80

FIGURA 26 – CONSTITUINTES DETERMINADAS PARA A SÉRIE FLX_E (384 DIAS).....	80
FIGURA 27 – NÚMEROS DE FORMA CALCULADOS A PARTIR DAS SÉRIES INDIVIDUAIS.....	81
FIGURA 28 – AMPLITUDE DAS CONSTITUINTES PRINCIPAIS DIURNAS E SEMIDIURNAS.....	82
FIGURA 29 – AMPLITUDE DE M2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.....	83
FIGURA 30 – AMPLITUDE DE M2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.....	84
FIGURA 31 – AMPLITUDE DE S2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.....	84
FIGURA 32 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DA SÉRIE CSW_M (AstGeoTop). .	86
FIGURA 33 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DA SÉRIE CSW_M CSW_M (PACMARÉ).....	86
FIGURA 34 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS SUBMAREAIS DOS RESÍDUOS DA SÉRIE CSW_M (PACMARÉ).....	88
FIGURA 35 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS MAREAIS E SUPRAMAREAIS DOS RESÍDUOS DA SÉRIE CSW_M (PACMARÉ).....	88
FIGURA 36 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS PARA A SÉRIE GLH_B (PACMARÉ).....	89
FIGURA 37 – VALORES MÉDIOS MENSIS PARA OS RESÍDUOS DA SÉRIE ATN_B (PACMARÉ).....	93
FIGURA 38 – NÍVEL DA ÁGUA E RESÍDUO PARA A SÉRIE CSW_F (1998) (PACMARÉ).....	94
FIGURA 39 – CORRELAÇÃO ENTRE RESÍDUOS E NÍVEL MÉDIO DIÁRIO DO MAR PARA A SÉRIE ATN_B.....	95
FIGURA 40 – CORRELAÇÃO ENTRE RESÍDUOS E NÍVEL DO MAR FILTRADOS PARA A SÉRIE FLX_E.....	96
FIGURA 41 – NÍVEL MÉDIO MENSAL PARA CSW E GLH	97

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – INFORMAÇÕES DA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA COB.....	71
QUADRO 2 – INFORMAÇÕES DA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA ATN.....	72
QUADRO 3 – PREDOMINÂNCIA DA MARÉ METEOROLÓGICA AO LONGO DO ANO NA ÁREA DE ESTUDO.....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	CONSTITUINTES PRINCIPAIS DIURNAS, SEMIDIURNAS E TERDIURNAS.....	34
TABELA 2 –	COMPRIMENTO DE SÉRIES (DIAS) PARA RESOLUÇÃO DE PARES DE CONSTITUINTES.....	35
TABELA 3 –	PORCENTAGEM DA MARÉ ASTRONÔMICA E NÃO ASTRONÔMICA.....	53
TABELA 4 –	ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS.....	54
TABELA 5 –	METADADOS DAS SÉRIES DE DADOS MAREGRÁFICOS.....	55
TABELA 6 –	NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS.....	58
TABELA 7 –	INTERVALO PARA ANÁLISE DE VARIAÇÃO ZERO DE OBSERVAÇÕES.....	63
TABELA 8 –	ALTURA DO NÍVEL MÉDIO PARA AS EEMM.....	73
TABELA 9 –	VARIÂNCIA DAS ESPÉCIES E NÚMERO DE CONSTITUINTES DETERMINADAS POR SÉRIE FILTRADA E ORIGINAL (PACMARÉ).....	75
TABELA 10 –	NÚMERO DE CONSTITUINTES DETERMINADAS POR PROGRAMA.....	79
TABELA 11 –	RV PARA SÉRIES.....	79
TABELA 12 –	DIFERENÇAS DE FASE PARA 'M2' e 'S2' EM RELAÇÃO À GALHETA.....	85
TABELA 13 –	AMPLITUDE DOS RESÍDUOS NA FAIXA MAREAL E SUPRAMAREAL.....	87
TABELA 14 –	PROPORÇÃO DAS SÉRIES COM HIPÓTESES NULAS REJEITADAS.....	90
TABELA 15 –	MÉDIA MENSAL DO NÍVEL DO MAR EM CSW E GLH.....	96
TABELA 16 –	DESVIO PADRÃO DAS SÉRIES COM EFEITO BARÔMETRO INVERTIDO.....	98

LISTA DE SIGLAS

AJB	- Águas Jurisdicionais Brasileiras
BathyElli	- <i>Bathymetry referred to the Ellipsoid</i>
BDMEP	- Banco Dados Meteorológicos
BI	- efeito do Barômetro Invertido
BLAST	- <i>Bring Land and Sea Together</i>
BNDO	- Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CD	- <i>Chart Datum</i>
CEP	- Complexo Estuarino de Paranaguá
CHM	- Centro de Hidrografia da Marinha
CICVTM	- Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marítima
CONCAR	- Comissão Nacional de Cartografia
DCN	- Datum da Carta Náutica
EM	- Estação Maregráfica
EEMM	- Estações Maregráficas
FFT	- <i>Fast Fourier Transform</i>
GLOSS	- <i>Global Sea-Level Observing System</i>
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GRS80	- <i>Geodetic Reference System 1980</i>
HAT	- <i>Highest Astronomical Tide</i>
IAG	- <i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDE	- <i>Integrated Development Environment</i>
IHO	- <i>International Hydrographic Organization</i>
IHRF	- <i>International Height Reference Frame</i>
IHRS	- <i>International Height Reference System</i>
IM	- <i>Inaction Method</i>
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
IOC	- <i>Intergovernmental Oceanographic Commission</i>
LAGEH	- Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia
LARAS	- Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites
LAT	- <i>Lowest Astronomical Tide</i>
LECZ	- <i>Low Elevation Coastal Zones</i>

LH	- Levantamentos Hidrográficos
MB	- Marinha do Brasil
MHWN	- <i>Mean High Water Neaps</i>
MHWS	- <i>Mean High Water Springs</i>
MLWN	- <i>Mean Low Water Neaps</i>
MLWS	- <i>Mean Low Water Springs</i>
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
MSL	- <i>Mean Sea Level</i>
MSS	- <i>Mean Sea Surface</i>
NA	- Nível da Água
NAN	- <i>Not A Number</i>
NMM	- Nível Médio do Mar
NOC	- <i>National Oceanography Centre</i>
NOAA	- <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NR	- Nível de Redução
NRCan	- <i>Natural Resources Canada</i>
OHI	- Organização Hidrográfica Internacional
PPGCG	- Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
PROCOSTA	- Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa
PSMSL	- <i>Permanent Service for Mean Sea-Level</i>
PVCG	- Problema de Valor de Contorno da Geodésia
RGRC	- Rede Geodésica de Referência Costeira
RN	- Referência de Nível
RRNN	- Referências de Nível
RV	- <i>Reduction in Variance</i>
SCRV	- Sistema Costeiro de Referências Verticais
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
SHOM	- <i>Service Hydrographique et Océanographique de la Marine</i>
SIRGAS	- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SONEL	- <i>Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales</i>
TNMM	- Topografia do Nível Médio do Mar
UE	- União Europeia
UFPE	- Universidade Federal de Pernambuco
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHSLC	- <i>University of Hawaii Sea Level Center</i>

UKHO - *United Kingdom Hydrological Office*
UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
VORF - *Vertical Offshore Reference Frame*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	18
1.2	PROBLEMA.....	20
1.3	OBJETIVOS.....	20
1.4	JUSTIFICATIVA.....	21
1.5	ESTADO DA ARTE.....	22
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
2	BASE CONCEITUAL.....	25
2.1	MARÉ.....	25
2.1.1	Introdução.....	25
2.1.2	Padrões de Maré.....	26
2.1.3	Forças geradoras das marés.....	28
2.1.4	Maré teórica.....	30
2.1.5	Análise Harmônica.....	32
2.1.6	Estações Maregráficas.....	37
2.1.7	Controle de Qualidade de Dados Maregráficos.....	38
2.1.8	Referenciais Hidrográficos.....	40
2.2	LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS.....	42
2.3	REFERENCIAIS VERTICAIS.....	43
2.3.1	Transformações entre Superfícies de Referência.....	46
3	METODOLOGIA.....	48
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	49
3.1.1	Descrição da área de estudo.....	49
3.2	MATERIAIS.....	53
3.2.1	Dados de marégrafos.....	53
3.2.2	Dados meteorológicos.....	59
3.2.3	Programas de Computador.....	59
3.3	CONTROLE DE QUALIDADE.....	60
3.4	PROCESSAMENTO.....	64
3.4.1	Análise Harmônica.....	65
3.4.2	Reconstituição da Maré.....	66
3.4.3	Cálculo dos Resíduos das Séries.....	66
3.4.4	Aplicação de Filtros nas Séries.....	67

3.4.5 Cálculo do Nível Médio Diário e Mensal.....	69
3.4.6 Cálculo das Diferenças de Fase das Constituintes M2 e S2 entre GLH, CSW e ATN.....	69
3.4.7 Cálculo da Correlação com Pressão Atmosférica.....	70
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
4.1 CONTROLE DE QUALIDADE.....	71
4.1.1 Análise das Fichas Descritivas das EEMM.....	71
4.1.2 Filtro de Remoção de Dados Espúrios.....	74
4.2 PROCESSAMENTO.....	78
4.2.1 Análise Harmônica.....	78
4.2.2 Verificação do atraso de fase ao longo da baía.....	85
4.2.3 Resíduos.....	85
4.2.4 Correlação com Dados Meteorológicos.....	97
5 CONCLUSÃO.....	99
5.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	101
REFERÊNCIAS.....	103
APÊNDICE 1 – DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DE DADOS ESPÚRIOS.....	110
APÊNDICE 2 – RESULTADO DA APLICAÇÃO DO FILTRO DE DADOS ESPÚRIOS.....	116
APÊNDICE 3 – RESULTADO DA ANÁLISE HARMÔNICA.....	117
APÊNDICE 4 – RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE SOBRE OS RESÍDUOS.....	118

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A zona costeira engloba uma faixa que inclui tanto a parte terrestre quanto o mar. Nesta região encontram-se diversos ecossistemas que são importantíssimos para o equilíbrio da vida marinha. Estes ambientes possuem “elevado grau de suscetibilidade ambiental devido às suas características intrínsecas, tais como: propriedades litológicas, hidrológicas, geomorfológicas, climáticas e biogeográficas” (CUNHA; OLIVEIRA, 2015).

Além dos aspectos ambientais, a zona costeira apresenta grande importância econômica devido à indústria portuária; à exploração de recursos naturais; ao turismo, entre outros. No que se refere à população humana, Neumann et al. (2015) estimaram que a zona costeira de baixa altitude (LECZ na sigla em inglês – *Low Elevation Coastal Zones*) áreas adjacentes à linha da costa com altitudes de até 10 m de elevação – abrigava 10,9 % da população mundial no ano 2000. No Brasil, aproximadamente 24% da população reside em área costeira (IBGE, 2020), considerando-a como sendo a área dos municípios que fazem frente ao mar incluindo aqueles que pertencem a áreas metropolitanas contíguas aos municípios costeiros. Por isso, é uma região de grande demanda por produtos cartográficos, em diversas escalas.

Os níveis de referência para levantamentos e mapeamentos altimétricos continentais e hidrográficos marinhos utilizam, tradicionalmente, diferentes sistemas de referência vertical para o estabelecimento de altitudes e profundidades. Esta discrepância remonta à origem (*Datum*) de cada um destes tipos de coordenada vertical.

As profundidades representadas nas cartas náuticas devem possuir forte vínculo com o regime de marés da área mapeada. Portanto, as superfícies de referência vertical, neste caso, são determinadas a partir da análise de séries de observações maregráficas.

A referência para os sistemas de altitude terrestres com significado físico é uma superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra. Nas redes clássicas, supunha-se que esta superfície – o geóide – coincidia com o Nível Médio do Mar (NMM). Então, o *Datum* Vertical era determinado pela análise de uma série temporal

de observações de um marégrafo e seu vínculo com uma Referência de Nível (RN). A densificação da rede era feita por meio de nivelamento geométrico. Devido ao caráter local deste *Datum*, observam-se inconsistências entre sistemas de referência verticais clássicos de países diferentes. Estas inconsistências decorrem, por exemplo, do fato que o NMM muda ao longo do tempo e no espaço, ou seja, muda de local para local (GEMAEL, 1999).

Uma adequada análise de possíveis impactos ambientais e antropogênicos na região costeira requer a homogeneidade de informações georreferenciadas tanto altimétricas quanto batimétricas. Em outra vertente, a disseminação do uso de posicionamento por satélites na navegação, a demanda contínua por aumento da eficiência do transporte marítimo atendendo à segurança da navegação, requer padronização de produtos e serviços para hidrografia e para a comunidade marítima.

Daí a importância da integração de dados entre diferentes referenciais ou, de um ponto de vista mais moderno, a necessidade de adoção de referenciais unificados.

Neste sentido, a Resolução No. 1 da IAG (*International Association of Geodesy*): “*Definition and realization of an International Height Reference System (IHRIS)*”, publicada em julho de 2015, estabeleceu uma série de condições e padrões para o estabelecimento de um Sistema Global de Altitudes com base em valores do geopotencial. Neste caso a superfície única para referência das altitudes é fixada como sendo a superfície do campo da gravidade com valor do geopotencial $W_0=62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ (IAG, 2015).

Alinhado com isso, destaca-se no Brasil a atuação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) que, em 2018, apresentou as altitudes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) com significado físico (IBGE, 2019) e está implantando a Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC), que atende também o Projeto Alt-Bat do Programa Nacional para Conservação da Linha de Costa (PROCOSTA) do Ministério do Meio Ambiente (SOARES et al., 2019).

Em todos estes trabalhos, o estudo da variabilidade do nível do mar através de dados maregráficos é de crucial importância, tanto na caracterização do comportamento da maré na região, quanto para fornecer dados para calibração de modelos hidrodinâmicos.

O Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) vem atuando, no Brasil e na América

Latina, de forma relevante nesta questão. No Laboratório de Geodésia Espacial e Hidrografia (LAGEH), entre outras linhas de pesquisa, destaca-se a Geodésia Marinha, onde são desenvolvidas pesquisas em levantamentos hidrográficos e reduções de sondagem; monitoramento de áreas costeiras; emprego de boias para determinação da variação do nível instantâneo da água; posicionamento preciso de plataformas e elementos que integram a carta náutica. No Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS) são realizadas pesquisas relacionadas à modernização da Rede Altimétrica Fundamental do Brasil e vínculo a um Sistema Global de Altitudes.

Neste trabalho será apresentada a análise de dados maregráficos na Baía de Paranaguá – PR, com o propósito de destacar a sua importância neste contexto e com a intenção de contribuir para o desenvolvimento das atividades voltadas a essa temática no PPGCG.

1.2 PROBLEMA

Com o objetivo de delimitar a pesquisa e contribuir para o planejamento das ações decorrentes, foi definido o seguinte problema: como a integração de referenciais verticais em zonas costeira é uma necessidade cada vez mais premente, então a análise de dados maregráficos se faz imprescindível visando a obtenção de séries temporais do nível do mar, caracterização do comportamento da maré e sua análise por meio da determinação das constituintes de maré.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o fenômeno da maré na área da Baía de Paranaguá – PR, através da análise de dados maregráficos. Neste sentido, pretende-se ainda atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Reunir, através do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), séries de dados maregráficos e fichas descritivas da área de estudo;
- b) Aplicar processos de controle de qualidade nos dados maregráficos;
- c) Analisar as séries temporais de dados por meio de Análise Harmônica e Análise Espectral; e
- d) Verificar a influência do efeito Barômetro Invertido (BI) na região.

1.4 JUSTIFICATIVA

O estudo da maré é importante para uma série de atividades, como geração de energia, planejamento urbano, desenvolvimento de sistemas de alerta de enchentes, segurança da navegação, entre outros. Além disso, a variação do NMM em um dado local ao longo do tempo se reveste de grande importância no contexto do aquecimento global. As projeções de elevação do nível do mar podem contribuir na gestão de empreendimentos costeiros como portos, por exemplo. Alfredini e Arasaki (2019), apresentaram uma estimativa da taxa de elevação do NMM no porto de Santos de 0,33 cm / ano, citando o uso desta informação no planejamento estratégico de empreendimentos portuários. Dados maregráficos são essenciais na caracterização da maré observada nas áreas dos portos em proveito das atividades de levantamentos hidrográficos realizados como subsídios para a produção e atualização de documentos náuticos, bem como para controle de dragagem.

Pelos mesmos motivos, a zona costeira é uma região de grande demanda por produtos cartográficos, tendo, entretanto, uma inconsistência relacionada ao referencial vertical no âmbito terrestre e oceânico. Isto constitui uma questão importante a ser considerada na gestão territorial em áreas costeiras. No Brasil, tal questão foi analisada pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) que, em reunião plenária em setembro de 2015, instituiu o Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marítima (CICVTM) que tem o seguinte objetivo:

“Desenvolver estudos visando à padronização de uma metodologia de integração das superfícies de referência para altitudes e profundidades na zona costeira, através do refinamento do Sistema Geodésico Brasileiro, que viabilize a correta avaliação dos riscos de inundação costeira em decorrência das mudanças climáticas” (CONCAR, 2020).

Ainda neste fórum, Neves (2016, p 56, grifo do autor) aponta que este assunto “[...] é uma questão de *gestão territorial*, que se vale de meios e conhecimentos cartográficos, apoiados em ferramentas geodésicas, para benefício da população.” Uma das tarefas deste fórum foi analisar três projetos europeus, a saber, um projeto francês, BathyElli (*Bathymetry referred to the Ellipsoid*); um projeto realizado no Reino Unido, VORF (*Vertical Offshore Reference Frame*); e um projeto dos países do mar do Norte, BLAST (*Bring Land and Sea Together*). Em todos estes projetos, o objetivo é possibilitar a transformação entre diferentes superfícies de referência vertical na zona costeira. Por ser considerada uma solução mais

completa, o projeto BLAST foi apontado por Bosch (2016a) como modelo mais adequado para ser adotado no Brasil na abordagem desta questão. Ainda existem iniciativas semelhantes de integração de referenciais verticais em outros países. Nos Estados Unidos, o *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) desenvolveu o *VDatum*; no Canadá, o *Natural Resources Canada* (NRCan) lançou, em 2013, o *Datum Vertical Canadense de 2013* (CGVD2013) (SANTANA et al., 2020).

Ainda no âmbito do CICVTM, o IBGE iniciou em 2017 um projeto-piloto no litoral do Rio de Janeiro, com vistas ao desenvolvimento da RGRC, que será a realização do Sistema Costeiro de Referências Verticais (SCRV). Este sistema fará o vínculo entre os níveis de referência verticais marítimos e terrestres, integrado ao SGB. Este projeto-piloto tem o propósito de desenvolver e testar metodologias e especificações técnicas para a implantação do SCR, tendo em vista que o Brasil possui mais de 9.000 km de linha de costa. O projeto inclui levantamentos gravimétricos, implantação de marcos geodésicos, nivelamento geométrico da rede, instalação de marégrafos e estações GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) (SOARES et al., 2019).

A integração de referenciais verticais na costa, com âmbito global, traz benefícios para a vasta gama de usuários das informações altimétricas nesta região, com a possibilidade de utilização de GNSS nos levantamentos topográficos e / ou hidrográficos. Como pode-se ver nos projetos europeus e norte-americanos citados, esta tarefa envolve o processamento de dados de diversas fontes, como gravimetria, hidrografia, oceanografia e geodésia. Estes dados, por sua vez, são obtidos por diferentes técnicas e instrumentos como receptores GNSS, satélites altímetros, marégrafos, correntômetros e gravímetros. Neste sentido, este trabalho pretende contribuir nesta questão apresentando o processamento e posterior análise de uma destas fontes: os dados de maré.

1.5 ESTADO DA ARTE

O método harmônico é amplamente utilizado para análise de dados maregráficos e tem sido aprimorado desde sua formulação em 1886 por Lord Kelvin. Dentre algumas recentes melhorias cita-se: Guo et al. (2018), que apresentaram e validaram uma abordagem empírica de análise harmônica para determinar a

variação das amplitudes e fases das constituintes em uma escala temporal de alguns meses através da incorporação de funções lineares no modelo convencional de análise harmônica; Foreman, Cherniawsky e Ballantyne (2009), que desenvolveram um programa para análise harmônica que incluía melhorias em relação aos pacotes disponíveis de então como: possibilidade de processamento de séries amostradas de forma não regular; melhoria na precisão da correção nodal e inferência pela adaptação do modelo de ajustamento; e inclusão de estimativa de erros; Franco (2009), que desenvolveu na década de 70 métodos computacionais baseados no emprego da Transformada Rápida de Fourier, que culminou no conjunto de programas PACMARÉ; e o módulo “Análise de Maré” do programa científico AstGeoTop que utiliza o método harmônico no domínio do tempo que possibilita o cálculo de até 69 constituintes de maré.

No entanto, a análise harmônica exige um registro longo de dados maregráficos para se obter parâmetros precisos (amplitude e fase das constituintes). Outros métodos foram propostos para contornar estas desvantagens como: utilização de filtro de Kalman; Redes Neurais Artificiais; e *wavelet*.

Abubakar et al. (2019) dizem que o estado da arte em análise de dados maregráficos são os modelos híbridos, quais sejam, modelos que incorporam as vantagens de métodos diferentes. Cita, como exemplos mais recentes: Li et al. (2019), que apresentaram um modelo de análise harmônica utilizando um método denominado *Inaction Method* (IM) combinado com o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) para determinar as constituintes e ao mesmo tempo suas variações no tempo; Liu e Zhu (2019), que propuseram um modelo combinado de previsão de marés baseado na análise harmônica e um modelo auto-regressivo integrado de médias móveis (ARIMA); e El-Diasty, Al-Harbi e Pagiatakis (2018), que apresentaram um modelo híbrido aproveitando as vantagens da análise harmônica e a análise por *wavelets*.

São diversas as aplicações que fazem uso de dados maregráficos, ressaltando a navegação e serviços de dragagem. Nestes casos, séries de até alguns meses de duração já atendem aos requisitos operacionais. Para outras aplicações, como estudos sobre referenciais verticais, por exemplo, além da necessária extensão da série de algumas décadas, se faz imprescindível também a integração com dados de outras fontes. Os pesquisadores do Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS) da UFPR tem trabalhado

no sentido de alinhar as pesquisas aos preceitos do IHRG/IHRF. Dentre alguns estudos neste sentido ressaltam: Dalazoana (2006) que integrou em uma análise temporal do *Datum* vertical brasileiro, dados maregráficos, dados de GNSS, nivelamento de precisão, dados de satélites altímetros e modelos do geopotencial; Silva (2017), que, no contexto da unificação de sistemas de referência verticais, analisou a evolução temporal do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba, utilizando dados maregráficos, dados de satélites altímetros e dados de posicionamento contínuo GNSS; Calado (2019), que investigou a variação temporal do nível do mar em 12 estações maregráficas (EEMM) na América do Sul utilizando séries temporais de dados maregráficos obtidas do banco de dados do PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea-Level*) e séries de dados da rede de estações GNSS de monitoramento contínuo do Sistema de Referência Geodésico para as Américas, SIRGAS/CON com o processamento e análise dos dados das séries temporais realizados com o *software* AstGeoTop; e Santana (2020), no contexto da Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha em zonas costeiras, estimou a Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) baseada em dados maregráficos, modelos globais do geopotencial e modelos globais do oceano em Imbituba-SC e Fortaleza-CE.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. O primeiro tem caráter introdutório. O capítulo 2 apresenta a *revisão bibliográfica*, na qual estão destacados os assuntos relevantes a esta pesquisa: inicialmente apresentam-se os conceitos de maré astronômica; em seguida, considerações acerca de Levantamentos Hidrográficos; e, por fim, considerações acerca de referenciais verticais. O capítulo 3 apresenta a *metodologia*, com a descrição da área de estudos, os dados utilizados, material empregado e a metodologia adotada para atingir os objetivos propostos. O capítulo 4, apresenta os resultados e discussões. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL

Neste capítulo são disponibilizados alguns conceitos importantes para a compreensão da pesquisa a ser desenvolvida. Inicialmente, será apresentada uma revisão sobre marés, em seguida será abordado o levantamento hidrográfico e, posteriormente, referenciais verticais.

2.1 MARÉ

2.1.1 Introdução

Para uma definição mais ampla do conceito de maré, Melo Filho (2017, p.6) sugere usar o substantivo “maré” acompanhado de um adjetivo que caracterize os fenômenos associados. Neste sentido, o autor cita: “maré astronômica”, “maré meteorológica” e “maré de tempestade”, dentre outras marés não-astronômicas. Kalil (1999, p.1) ressalta que:

“o Nível Médio do Mar é uma grandeza sujeita a um grande número de forçantes: astronômicas, pressão atmosférica, ventos, ondas, deflúvios, precipitações, evaporação, salinidade, temperatura, correntes marítimas, geotectonismo e ação antrópica.”

O mesmo autor descreve algumas destas forçantes, das quais se destacam: **pressão atmosférica**, que em condições hidrostáticas, exerce uma ação denominada "efeito barômetro invertido", onde para cada elevação em 1 mbar na pressão corresponde a uma diminuição aproximada de 1 cm no nível do mar; e **vento**, que pode elevar ou reduzir o nível do mar conforme esteja incidindo do mar para a terra (*onshore winds*) ou da terra ao mar (*offshore winds*) (KALIL, 1999).

A “maré astronômica”, segundo Franco (2009), é a variação periódica do nível do mar sob a influência de forças astronômicas. Esta variação responde, principalmente, às posições da Lua e do Sol em relação à Terra. A influência de outros astros pode ser negligenciada pela insignificância de seus efeitos em comparação aos do Sol e da Lua.

2.1.2 Padrões de Maré

As respostas das massas d'água às forças gravitacionais possuem o caráter periódico e por isso, as duas principais características das marés são: *amplitude*, diferença de altura entre sucessivos altos e baixos; e *período*, tempo entre dois máximos (ou mínimos) consecutivos. Devido à complexidade da geometria e à rotação da Terra, as marés variam muito de um local para o outro e tendem a desenvolver pontos – chamados pontos anfifrômicos – em torno dos quais a onda gira e a variação vertical do nível é reduzida. No Brasil, a maré astronômica na costa S/SE (até o Sul da Bahia) apresenta amplitude menor do que 2 m; a costa Nordeste (até o Ceará) apresenta amplitude entre 2 e 4 m; e a costa Norte brasileira apresenta amplitude maior do que 4 m. Em alguns locais no extremo norte do país, a maré astronômica supera os 6 m (MELO FILHO, 2017).

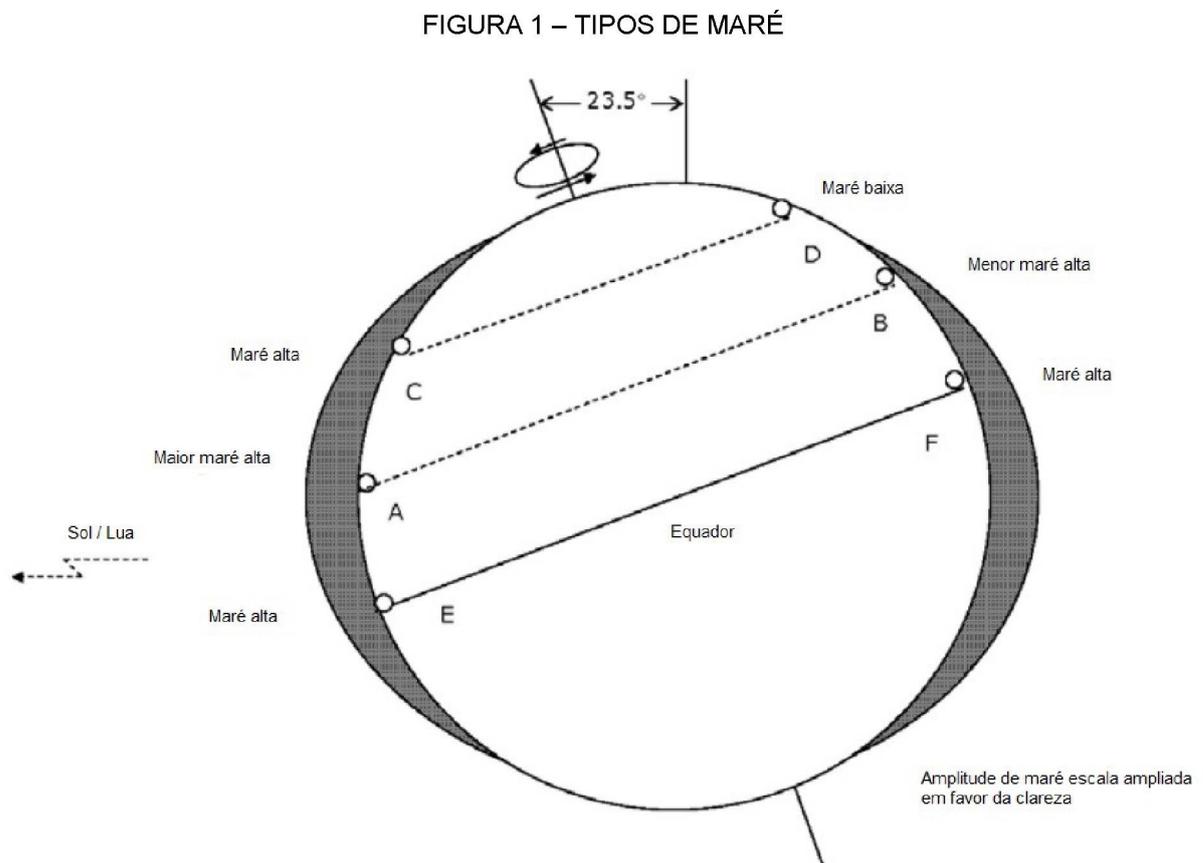
Na maior parte dos oceanos, o padrão dominante possui um ciclo de aproximadamente 12 horas e 25 minutos, dois ciclos por dia Lunar (24 horas e 50 minutos) (PUGH; WOODWORTH, 2014). Por se repetir aproximadamente duas vezes ao dia, este padrão é chamado de *semidiurno*. As amplitudes das marés semidiurnas oscilam em um período de, aproximadamente, 14 dias. As maiores amplitudes ocorrem nas luas novas e cheias (marés de sizígia, quando a Lua, a Terra e o Sol estão alinhados); e as menores amplitudes ocorrem no primeiro e último quarto (quadratura). Portanto, evidencia-se a relação entre a amplitude de maré e as fases da Lua, ou seja, a posição da Terra em relação ao Sol e à Lua.

Assim como a posição relativa entre os dois astros afeta as marés periodicamente, todas as mudanças periódicas em suas órbitas também o fazem. Neste ponto, evidencia-se a existência de outras frequências, ou componentes de maré, relacionadas a outros ciclos dos astros. Como exemplo de alguns ciclos cita-se: oscilação da declinação da Lua, oscilação do nodo ascendente da Lua, ciclo da lunação, apogeu e perigeu lunar, entre outros (PARKER, 2007).

Além das marés semidiurnas, há locais onde os ciclos de maré tem período de um dia – *marés diurnas* – e há as marés semidiurnas com desigualdades diurnas em picos de máximo e mínimo. Finalmente, há casos em que a maré, quando da

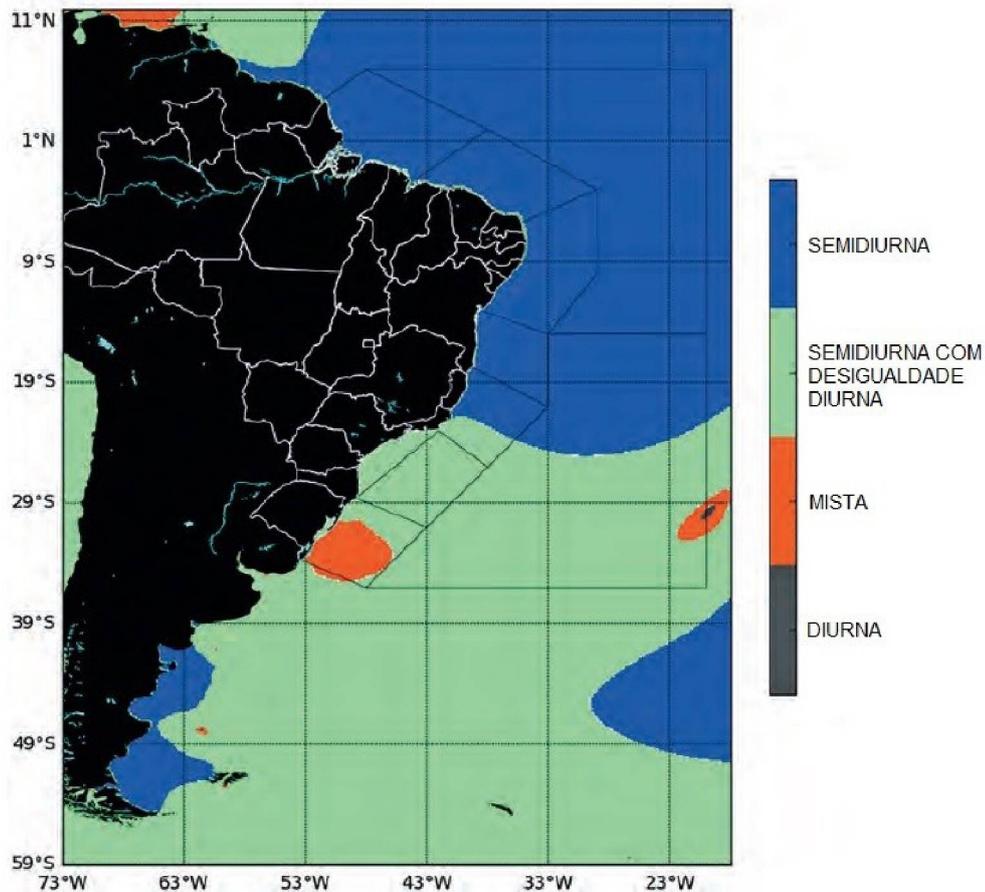
máxima declinação da Lua, possui características de maré diurna que desaparecem quando a declinação chega a zero, situação em que a maré se torna semidiurna.

Este último tipo de maré denomina-se *maré mista* (FRANCO, 2009). A Figura 1 ilustra o comportamento da amplitude de maré semidiurna (latitude EF), diurna (latitude CD) e semidiurna com desigualdades (latitude AB). No ponto A a preamar é mais intensa que em B, o que se denomina desigualdade diurna de uma maré semidiurna. Na latitude CD há apenas uma preamar por dia, sendo então uma região de predomínio de uma maré diurna. Nos pontos EF, na linha do Equador, as preamares e baixa mares são de mesma magnitude, com duas preamares e duas baixa mares por dia, típica da maré semidiurna (COSTA, 2017).



A Figura 2 ilustra como se caracteriza a maré na costa do Brasil de acordo com a classificação apresentada anteriormente.

FIGURA 2 – TIPOS DE MARÉ À COSTA LESTE DA AMÉRICA DO SUL



FONTE: Coelho, Alves e Teixeira (2015)

A associação do comportamento das marés com a posição relativa do Sol e da Lua não foi tarefa extraordinária para os povos antigos, sobretudo para aqueles que dominavam a arte da navegação. Entretanto, o desenvolvimento deste conhecimento tomou grande impulso com a lei da gravitação de Newton, que também desenvolveu o conceito de *maré estática* (FOREMAN; HENRY, 1989). Este conceito será abordado nos próximos itens.

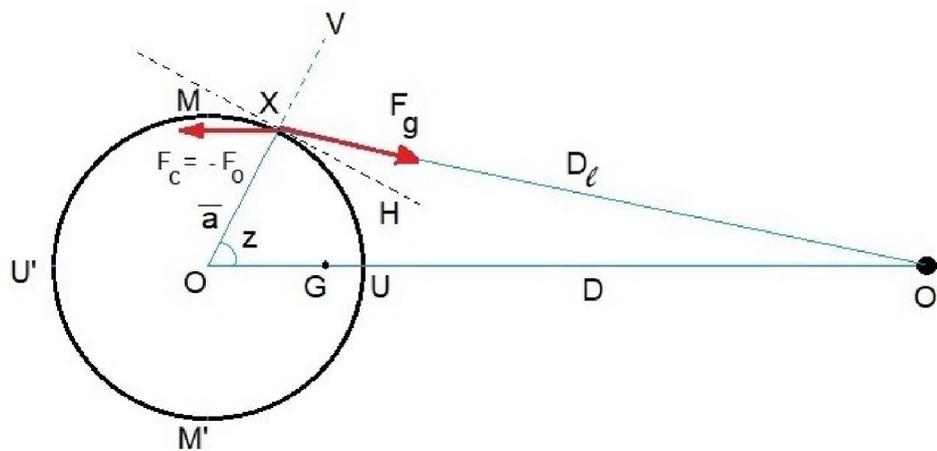
2.1.3 Forças geradoras das marés

As forças gravitacionais que geram a maré podem ser matematicamente expressas baseadas na Lei da Gravitação Universal de Newton. A força gravitacional do Sol é cerca de 200 vezes maior do que a da Lua. Entretanto, a maré gerada pela estrela é menos da metade da maré lunar. Como será visto na demonstração apresentada na sequência, isto se deve ao fato de que a força gravitacional do Sol não varia do centro à superfície da Terra tanto quanto a força gravitacional da Lua.

Para demonstração, será utilizado o sistema Terra-Lua mas o princípio é semelhante para o sistema Terra-Sol (FRANCO, 2009).

Na Figura 3, está representada uma seção **MU'M'U** da Terra (considerada esférica e com raio \bar{a}), com um plano que contém o seu centro (**O**), o centro da lua (**O'**) afastada de uma distância (**D**), o centro de gravidade do sistema (**G**) e uma unidade de massa posicionada em **X** na superfície da Terra afastada de uma distância (**D_l**) da Lua.

FIGURA 3 – FORÇA DE ATRAÇÃO.



FONTE: Adaptado de Franco (2019)

Se o sistema Terra-Lua for considerado como representado na Figura 3, girando em torno do centro de gravidade **G** mas sem o movimento de rotação da Terra, todos os pontos da Terra descreverão um movimento circular de mesmo raio e mesma velocidade em torno de **G** e, portanto, estarão sujeitos à mesma força centrífuga (F_c). No centro da Terra, a força de atração da Lua (F_0) é função da distância **D** e, uma vez que o sistema está em equilíbrio, esta força é igual à força centrífuga, $F_c = -F_0$. Para um ponto **X** na Terra, a força de atração da Lua (F_g) é função da distância **D_l**. Portanto, pode-se dizer que a força geradora de maré em **X** é a diferença entre a força de atração da Lua (F_g) e a força centrífuga (F_c). Para pontos na Terra mais próximos da Lua, a força resultante atua no sentido do satélite. Nos pontos mais afastados, a força atua em sentido contrário.

Isto explica o fato de que, para um dado instante, as marés altas estão localizadas simultaneamente, tanto nos pontos mais próximos da Lua quanto nos pontos mais afastados.

Considerando L a massa da Lua, T a massa da Terra, g a aceleração da gravidade em X e z o ângulo entre $\overline{OO'}$ e \overline{OX} , pode-se decompor a força geradora de maré em sua componente vertical (F_V) e horizontal (F_H) de acordo com as seguintes expressões (FRANCO, 2009):

$$F_V = g \frac{L \cdot \bar{a}^3}{T \cdot D^3} \cdot (3 \cos^2 z - 1) + g \frac{3 \cdot L \cdot \bar{a}^4}{2 \cdot T \cdot D^4} \cdot (5 \cos^3 z - 3 \cos z) \quad (1)$$

$$F_H = g \frac{L \cdot \bar{a}^3}{2 \cdot T \cdot D^3} \cdot \sin 2z + g \frac{3 \cdot L \cdot \bar{a}^4}{2 \cdot T \cdot D^4} \cdot (5 \cos^3 z - 1) \cdot \sin z \quad (2)$$

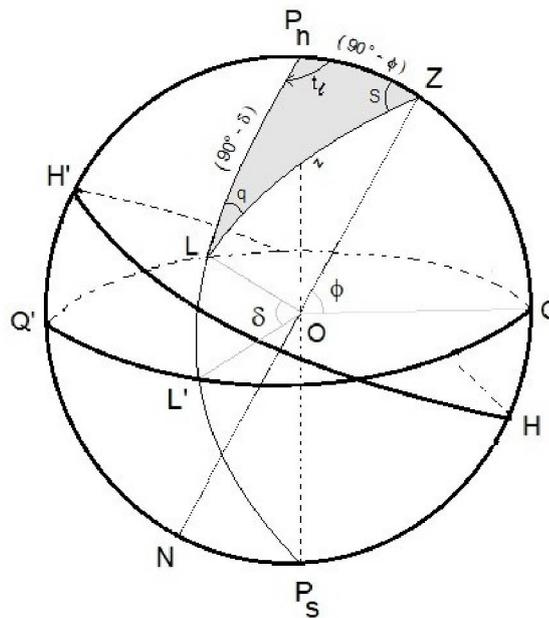
Franco (2009) verificou que o valor máximo da componente vertical (F_V) é igual a 0,000 000 115 g , com $z = 0^\circ$ (Lua no zênite), enquanto que o valor máximo da componente horizontal desta força (F_H) é 0,000 000 084 g , com $z = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$ e 315° . Ambas as magnitudes são desprezíveis em relação à gravidade, entretanto, a componente horizontal encontra resistência apenas no atrito e viscosidade da água. Essa mesma referência apresenta uma demonstração, em um modelo com simplificações, em que a componente horizontal (F_H) pode provocar a elevação e o abaixamento do nível da água em um ponto por 78 m, concluindo que a formação das marés está associada a esta componente.

2.1.4 Maré teórica

A maré estática é determinada a partir de um modelo simplificado e contribui para o entendimento da realidade e com a qual se pode comparar as observações. Franco (2009), apresenta o desenvolvimento da maré estática por Newton partindo da hipótese de que a Terra tem um núcleo esférico homogêneo e é coberta por uma fina camada líquida sem viscosidade ou inércia. De acordo com a Teoria da Gravitação Universal, esta superfície reagirá às forças gravitacionais através do deslocamento da altura de maré (ζ) teórica (FRANCO, 2009).

Na Figura 4 está representada a esfera celeste, onde: P_n e P_s são os polos do equador celeste ($\overline{QQ'Q}$); Z (zênite) e N (nadir) os polos do plano do horizonte ($\overline{HH'H}$); δ é a declinação da Lua (L); ϕ é a latitude de um ponto cujo zênite é Z ; t_l é o ângulo horário da Lua; z é a distância zenital da Lua; S é o suplemento do azimute da Lua; e q , é o ângulo paralático.

FIGURA 4 – ESFERA CELESTE



FONTE: O Autor (2021).

A equação (3) fornece a altura da maré teórica em um ponto cujo zênite é Z em função das coordenadas astronômicas da Lua. A dedução desta equação pode ser encontrada em Franco (2009) e parte da resolução do triângulo de posição $P_n ZL$, destacado na Figura 4. Os lados deste triângulo são: colatitude do ponto ($90^\circ - \phi$); distância polar do astro ($90^\circ - \delta$); e z . Os ângulos são: t_l ; S ; e q . Nesta equação figuram ainda: L a massa da Lua; T , a massa da Terra; \bar{a} , raio da Terra considerada esférica; e D a distância do centro da Terra ao centro da Lua.

$$\zeta = \frac{3}{2} \frac{L}{T} \left(\frac{\bar{a}}{D} \right)^3 \bar{a} \left[\frac{1}{4} (1 - 3 \operatorname{sen}^2 \phi) \left(\frac{2}{3} - 2 \operatorname{sen}^2 \delta \right) + \frac{1}{2} \operatorname{sen} 2\phi \operatorname{sen} 2\delta \cos t_l + \frac{1}{2} \cos^2 \phi \cos^2 \delta \cos 2t_l \right]$$

(3)

Nesta equação, pode-se observar três oscilações: uma em função da declinação da Lua (δ), outra em função do ângulo horário da Lua t_l , diurna, e uma

semidiurna que varia com $2t$. Neste desenvolvimento, a rotação da Terra não foi considerada, nem a contribuição horizontal da força gravitacional na geração da aceleração da maré.

Aproximadamente 100 anos após o desenvolvimento da teoria da maré estática, Laplace desenvolveu a *teoria dinâmica* da força de maré, onde decompôs a maré observada como a soma de componentes senoidais (primeira abordagem de análise harmônica para marés) cujos argumentos eram os períodos de variações nas posições do Sol e da Lua (BOON, 2007).

2.1.5 Análise Harmônica

A análise harmônica de maré tem o propósito de extrair informações de séries temporais de níveis da água com o objetivo de gerar parâmetros que descrevam o regime das marés no local de observação (PUGH; WOODWORTH, 2014).

Como citado no item anterior, foi Laplace, em 1775, quem primeiro apresentou a ideia de análise harmônica, separando a maré em três espécies – diurna, semidiurna e de longo período (PARKER, 2007). Mas somente em 1867, um método prático de *análise harmônica de maré* foi desenvolvido, quase simultaneamente e independentemente, por Thomson (Lord Kelvin) (Inglaterra) e William Ferrel (Estados Unidos). Posteriormente, o método foi modificado por George Darwin (1883) e Arthur Doodson (1921) (FOREMAN; HENRY, 1989; PARKER, 2007).

Neste método, a maré é considerada como a soma das *constituintes* de frequências conhecidas. Algumas dessas frequências são de causas astronômicas (como demonstrado no item anterior) e outras geradas em decorrência de efeitos hidrodinâmicos (PARKER, 2007). Isto por que em águas rasas e em estuários as marés ficam sujeitas a deformações que podem ser representadas por componentes adicionais resultantes de interações das componentes astronômicas (FRANCO, 2009).

Existe um número infinito de constituintes para descrever a maré. Algumas dezenas são capazes de apresentar a maré em algumas áreas enquanto que em áreas complexas, como estuários, são necessárias acima de uma centena de constituintes para descrever adequadamente a curva de maré (IHO, 2005).

Pode-se enumerar basicamente dois enfoques para análise de séries temporais: no domínio do tempo e no domínio da frequência.

Na análise no domínio do tempo, após definir as M constituintes a serem calculadas, Foreman e Henry (1989) dizem que, em uma abordagem pelo MMQ, o problema consiste em resolver o seguinte sistema de equações:

$$y_i = A_0 + \sum_{j=1}^M A_j \cos(\sigma_j t_i - \Phi_j) \quad (4)$$

Para as incógnitas A_j e Φ_j , onde A_j , Φ_j e σ_j são a amplitude, fase e frequência do j -ésimo constituinte, respectivamente, e y_i é a observável no instante t_i . Cada equação pode ser linearizada pelas substituições (FOREMAN; HENRY, 1989):

$$A_j \cos(\sigma_j t_i - \Phi_j) = C_j \cos(\sigma_j t_i) + S_j \sin(\sigma_j t_i) \quad (5)$$

Onde:

$$A_j = (C_j^2 + S_j^2)^{1/2} \quad \text{e} \quad \Phi_j = \arctan(S_j/C_j) \quad (6)$$

Uma análise harmônica no domínio do tempo que usa a abordagem de MMQ permite que a série temporal seja amostrada a intervalos irregulares, ou regularmente amostrada, mas contendo intervalos sem dados.

A análise harmônica no domínio da frequência é feita com o objetivo de encontrar a distribuição da energia do sinal em função da frequência. O algoritmo FFT – *Fast Fourier Transform* – é geralmente utilizado. As frequências do domínio são função do comprimento da série e da taxa de amostragem. Neste método, o sinal não pode conter intervalos sem dados.

O resultado da análise harmônica é um conjunto de constituintes com suas respectivas amplitudes e fases. A partir delas pode-se, por exemplo, determinar o número de forma F (DEFANT (1960), apud Miranda, Castro e Kjerfve, 2012), que caracteriza o tipo de maré, de acordo com a seguinte equação:

$$F = \frac{H(O1) + H(K1)}{H(M2) + H(S2)} \quad (7)$$

Onde, O1, K1, M2 e S2 são as constituintes principais diurnas e semidiurnas: O1, lunar principal diurna; K1, lunissolar declinacional diurna; M2, lunar principal semidiurna; e S2, solar principal semidiurna. $H(i)$ é a amplitude da i -ésima constituinte. De acordo com a referência, se $0 < F < 0,25$, então a maré é classificada

como semidiurna; se $0,25 < F < 1,5$, é semidiurna com desigualdade diurna; se $1,5 < F < 3,0$ é mista; e se $F > 3,0$ a maré é classificada como diurna.

O resultado da análise harmônica pode ser considerado como uma modelagem da maré no local onde foram observados os dados. Isto porque é possível reconstituir um sinal muito próximo ao sinal da maré observada a partir das constituintes calculadas. Entretanto, a maré prevista desta forma, confrontada com a maré observada, apresentará diferenças que são, na maioria das vezes, de causas meteorológicas. A Tabela 1 apresenta uma lista com algumas constituintes, seus nomes e frequências em graus por hora.

TABELA 1 – CONSTITUINTES PRINCIPAIS DIURNAS, SEMIDIURNAS E TERDIURNAS.

Símbolo	Nome	Frequência (° / h)
Diurna		
σ_1	Variacional	12,9271398
Q1	Lunar Elíptica Maior	13,3986609
O1	Lunar Principal	13,9430356
ρ_1	Eveccional Maior	13,4715145
M1	Lunar Elíptica Menor	14,4966939
x_1	Eveccional Menor	14,5695475
π_1	Solar Elíptica Maior	14,9178647
P1	Solar Principal	14,9589314
K1	Lunissolar Declinacional	15,0410686
ψ_1	Solar Elíptica Menor	15,0821353
Φ_1	Solar de 2ª Ordem	15,1232059
θ_1	Eveccional	15,5125897
Semidiurna		
N2	Lunar Elíptica Maior	28,4397295
ν_2	Eveccional Maior	28,512583
M2	Lunar Principal	28,9841042
λ_2	Eveccional Menor	29,4556254
L2	Lunar Elíptica Menor	29,5284789
T2	Solar Elíptica Maior	29,9589333
S2	Solar Principal	30
R2	Solar Elíptica Menor	30,0410667
K2	Lunissolar Declinacional	30,0821373
Terdiurna		
M3	Terdiurna Lunar	43,4761563

FONTE: Adaptado de Parker (2007).

As constituintes: solar anual (Sa) e solar semestral (Ssa) são constituintes de longo período, geradas pelas variações da declinação relativa do Sol e da distância da Terra. A constituinte solar anual, Sa, tem um período de 365 dias e a constituinte solar semestral, Ssa, um período de 183 dias. Entretanto, a energia de um ciclo por ano (da Sa) e um ciclo por semestre (Ssa) é originada principalmente de parâmetros meteorológicos causados por mudanças sazonais que influenciam o nível da água.

Estas influências meteorológicas, que incluem temperatura, vento, salinidade, pressão atmosférica, podem apresentar um efeito assimétrico (e.g., maiores energias apenas durante um mês) (PARKER, 2007). Melo Filho (2017) afirma que há uma controvérsia se as oscilações de nível do mar dos longos períodos têm origem gravitacional ou se devem a fatores relacionados ao efeito da radiação solar e/ou ao efeito da atmosfera sobre o oceano. Por isso estas constituintes, se incluídas numa reconstituição de maré, podem inserir fatores não astronômicos na previsão.

Como pode-se observar na Tabela 1, algumas constituintes têm frequências muito próximas. Para diferenciá-las na análise, Godin (1972) apresenta o critério de Rayleigh que diz que dada uma série de dados maregráficos composta por m amostras com taxa de amostragem Δt , somente constituintes cujas frequências estão separadas mais do que $m \cdot \Delta t$ poderão ser determinadas. Portanto, segundo este critério, o comprimento da série é o único fator determinante.

Uma série de dados maregráficos tomados a cada hora por um período de 29 dias pode gerar as dez maiores constituintes de maré astronômica. A Tabela 2 apresenta o comprimento da série necessário para a resolução de pares das principais constituintes astronômicas.

TABELA 2 – COMPRIMENTO DE SÉRIES (DIAS) PARA RESOLUÇÃO DE PARES DE CONSTITUINTES

Constituintes Semi diurnas						
		N2	K2	NU2	L2	M2
Solar Principal	S2	9,6	182,6	10,1	31,8	14,8
Lunar Elíptica Maior	N2		9,1	205,9	13,8	27,6
Lunissolar Declinacional	K2			9,6	27,1	13,7
Eveccional Maior	NU2				14,8	31,8
Lunar Elíptica Menor	L2					27,6
Lunar Principal	M2					--
Constituintes Diurnas						
		O1	P1	Q1	J1	M1
Lunissolar Declinacional Diurna	K1	13,7	182,6	9,1	27,6	27,6
Lunar Principal Diurna	O1		14,8	27,6	9,1	27,1
Solar Principal Diurna	P1			9,6	23,9	32,5
Lunar Elíptica Maior Diurna	Q1				6,9	13,7
Lunar Elíptica Diurna	J1					13,8
Lunar Elíptica Menor Diurna	M1					--

Fonte: O Autor (2021).

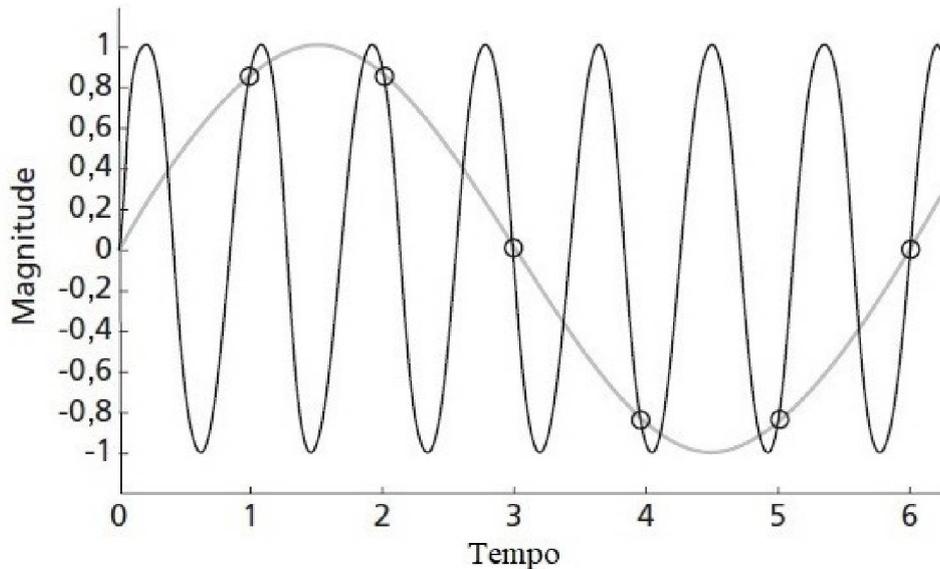
Foreman e Henry (1989) e Godin (1972) ressaltam que a aplicação deste critério depende da intensidade do ruído presente no sinal e da precisão requerida. Há, ainda, a possibilidade de determinação das constituintes excluídas da análise pelo critério de Rayleigh, por um método chamado de inferência (BOON, 2007; FOREMAN; HENRY, 1989; GODIN, 1972). Neste método, as constituintes são determinadas através do conhecimento de correlações com outras constituintes. Boon (2007) pondera que a melhor alternativa é a utilização de registros mais longos.

Ainda no que se refere ao comprimento de séries de observações, deve-se ressaltar a influência do ciclo nodal da Lua. Este ciclo possui um período de aproximadamente 18,6 anos. Para levar em conta o efeito deste ciclo em séries de observações mais curtas, como as anuais, aplica-se um fator nodal e um ajuste de fase, f e u , respectivamente, nas constituintes. Quando da reconstituição da maré (previsão), a amplitude e fase de cada constituinte são multiplicadas por f e u respectivamente. Quando da análise harmônica, a amplitude e a fase de cada constituinte são divididas por f e u (PARKER, 2007).

As séries de dados maregráficos são séries discretas obtidas a partir da transformação de um sinal contínuo (maré) através de um processo chamado de quantização ou discretização. Neste processo, a palavra-chave é a amostragem. Com relação à taxa de amostragem, o critério de Nyquist diz que a maior frequência de um sinal contínuo que pode ser representada com precisão a partir de uma amostra é igual à metade da taxa de amostragem. Na prática, em virtude dos erros inerentes à aquisição e processamento dos dados, esta taxa de amostragem deve ser um pouco maior, mas quando se tem um sinal amostrado a uma taxa de amostragem A_q , a maior frequência a ser representada fidedignamente é N_y (frequência de Nyquist) igual a $A_q/2$. Entretanto, uma série temporal discreta com determinada taxa de amostragem pode conter contribuições de componentes com frequência acima da N_y . Essas altas frequências dobram-se para o espectro da série temporal discreta e aparecem como frequências mais baixas em um efeito chamado de falseamento de frequência (*aliasing* em inglês). Na Figura 5, que ilustra este efeito, os círculos representam as amostras; o sinal a ser representado é o senoidal de maior frequência; e o sinal interpolado pela amostra é o senoidal de menor frequência.

O falseamento é originado pelas frequências acima da frequência de Nyquist (metade da taxa de amostragem) presentes no sinal verdadeiro (nível da água instantâneo). Para evitá-lo, é necessário filtrar o sinal original removendo as frequências entre A_q e $A_q/2$ antes mesmo deste ser amostrado. No caso de um marégrafo, o poço de tranquilização pode ser considerado um filtro, que realiza filtragem pelo bloqueio de ondas de alta frequência.

FIGURA 5 – FALSEAMENTO DE FREQUÊNCIA



FONTE: Oshana (2006)

A taxa de aquisição de dados horária existe tradicionalmente pelo fato de ser uma unidade natural de ser utilizada e pode fornecer dados para o estudo da maior parte dos fenômenos relativos à variação do nível da água. Além disso, esta taxa seria uma espécie de filtro passa-baixa, uma vez que evita o registro de ondas de maior frequência. Na atual era dos registros digitais, não há razões práticas para não utilizar taxas maiores, mas a utilização de altas taxas de aquisição são úteis em casos específicos como sistema de alerta de tsunamis, por exemplo (UNESCO/IOC, 2020).

2.1.6 Estações Maregráficas

Estações Maregráficas (EEMM) podem ser consideradas como um sistema com a função de obter séries temporais do nível de água, confiáveis e consistentes, a uma determinada taxa de amostragem. EEMM podem ser utilizadas em modo

contínuo ou por curtos períodos de tempo (um mês até alguns anos) neste último caso para, por exemplo, apoiar levantamentos hidrográficos ou obras de engenharia. São essenciais no estudo do nível do mar em áreas costeiras. Uma Estação Maregráfica (EM) mais simples é composta por uma régua de marés vinculada a RN por nivelamento. A régua permite a leitura do nível da água (NA) e a RN materializa uma cota ou altitude na qual se referencia a régua e, conseqüentemente, o nível do mar observado. Com esta configuração mínima, uma régua pode ser substituída mas os dados manterão a consistência desde que a nova régua mantenha a posição de sua origem em relação à RN. Desta forma, a estabilidade das Referências de Nível (RRNN) é essencial para consistência de observações de longo prazo. UNESCO/IOC (2006), por exemplo, preconiza pelo menos 5 RRNN nas proximidades (até um quilômetro) de cada estação maregráfica e Brasil (2017), indica o número de RRNN nas imediações de uma estação maregráfica quando há o intuito de se efetuar um levantamento hidrográfico.

Atualmente, na maioria das vezes, a leitura do nível da água é feita de forma automática por instrumentos chamados marégrafos. Existem, basicamente, quatro tipos de tecnologias empregadas em marégrafos: boia e contrapeso; sistemas de pressão; sistemas acústicos; e sistemas RADAR (UNESCO/IOC, 2006). A escolha do tipo de sensor depende dos requisitos e restrições do usuário, e envolvem taxa de aquisição, custo de instalação, operação e manutenção, entre outros.

Dentre outros elementos que podem compor uma EM, pode-se citar: sistemas de armazenamento e transmissão de dados; estação GNSS operando de forma contínua nas proximidades da EM; vínculo com redes geodésicas; e estações meteorológicas.

2.1.7 Controle de Qualidade de Dados Maregráficos

Os erros que afetam as observações maregráficas podem ser de dois tipos: aleatórios ou sistemáticos. Erros aleatórios podem surgir de ruídos do equipamento, condições externas como objetos flutuando sob o sensor, por exemplo. Erros sistemáticos surgem basicamente quando há uma mudança no instrumento, como movimento do sensor ou movimento da plataforma em que está instalado. (UNESCO/IOC, 2006)

A estabilidade de um marégrafo é uma questão primordial, seja qual for a sua aplicação. O controle de sua posição e o vínculo a marcos geodésicos localizados nas proximidades, tais como RRNN e estações GNSS, é um requisito à garantia da qualidade das observações do instrumento. Como exemplo de procedimentos a serem adotados para este fim, cita-se a edição nº 11 da série Manuais Técnicos em Geociências do IBGE (IBGE, 2010) que apresenta as instruções técnicas para o controle geodésico de EEMM.

Uma forma de verificação qualitativa do marégrafo é a partir do Teste Van de Castele realizado na EM, com a observação do nível da água pelo marégrafo e pela leitura direta na régua de marés. A análise da diferença entre as observações (que deve ser nula em um perfeito funcionamento do marégrafo) pode indicar possíveis causas para o seu mal funcionamento (DALAZOANA, 2006).

Além da estabilidade do marégrafo e o funcionamento do sensor, também são objetivos do controle de qualidade: garantir a consistência de dados oriundos de uma EM ou de um conjunto de EEMM e transmitir ao usuário um indicador da qualidade destes dados. E neste sentido, a importância do controle de qualidade cresce na medida que aumenta a disponibilidade de dados ao usuário.

Um dos indutores do aumento da disponibilidade de dados maregráficos é o programa internacional GLOSS (*Global Sea-Level Observing System*). Conduzido sob os auspícios da IOC (*Intergovernmental Oceanographic Commission*) da UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), este programa tem o propósito de implantar uma rede global de dados maregráficos e torná-los acessíveis aos usuários para diversos fins. Sob sua coordenação, alguns centros de dados proveem produtos e serviços relacionados a dados maregráficos destacando-se: PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea-Level*), localizado nas instalações do NOC (*National Oceanography Centre*) em Liverpool, Reino Unido, provê séries mensais e anuais do NMM; UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*), nos Estados Unidos, provê dados maregráficos do tipo “pronta entrega” (entregues com uma latência de 1 a 2 meses após passarem por um controle de qualidade preliminar); e SONEL (*Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales*), Universidade La Rochelle da França, fornece informações sobre o status de estações GNSS em EEMM (UNESCO/IOC, 2020).

Neste contexto, o controle de qualidade proporciona aos dados os seguintes atributos: padronização, consistência e confiabilidade. Dentre os diversos

procedimentos destacam-se: identificação de erros grosseiros em observações; erros de data e hora; interpolação de intervalos com ausência de observações; filtragem dos dados brutos adquiridos com taxas de alguns minutos para taxas horárias; cálculo dos resíduos (maré prevista menos observada); cálculo de NMM anual, mensal e diário; cálculo de constituintes de maré; cálculo de extremos; entre outros. Esta dissertação se apoiou na UNESCO/IOC (2020) para definição dos processos de controle de qualidade.

2.1.8 Referenciais Hidrográficos

Como salientado por Jigena Antelo, Vidal e Berrocoso (2015), o NMM é a superfície de referência vertical fundamental em zonas costeiras. Pode-se determinar o NMM a partir de séries temporais de dados maregráficos através de um filtro passa-baixa nos dados horários para se obter um valor médio diário. Os valores diários são então utilizados para a determinação de NMM mensais. Outra forma de se determinar o NMM, é através de dados de satélites altímetros. Entretanto, a altimetria por satélite mede a altura do nível do mar em relação a um elipsoide de referência. Além disso, dado de altimetria por satélite perto da costa tem o potencial de contaminação do *footprint* do pulso do satélite por retorno de superfície terrestre, causando perda de precisão (AVISO, 2021).

Um referencial vertical importante, especialmente para a navegação, cartografia náutica e serviços de dragagem, é o *Datum* da Carta Náutica (DCN). O DCN é um nível arbitrário em relação ao qual as profundidades são representadas em uma carta náutica. Em virtude da variação constante do nível do mar, este nível de referência é considerado como o nível mais baixo que a maré pode alcançar. Desta forma, as profundidades representadas raramente serão menores do que as observadas. No Brasil, o DCN é obtido através do Nível de Redução (NR) e sua determinação está vinculada a observações de uma EM e, portanto, tem caráter local. Portanto, uma carta náutica poderá ter profundidades referidas a mais de um NR. Para o cálculo do NR, pode-se utilizar as amplitudes das principais constituintes harmônicas de um regime de maré, previamente classificado pelo número de forma F (BRASIL, 2017). Segundo este método, baseado em Franco (2009), o cálculo do nível de redução abaixo do nível médio (para marés do tipo semidiurna com desigualdades diurnas) se utiliza da seguinte fórmula:

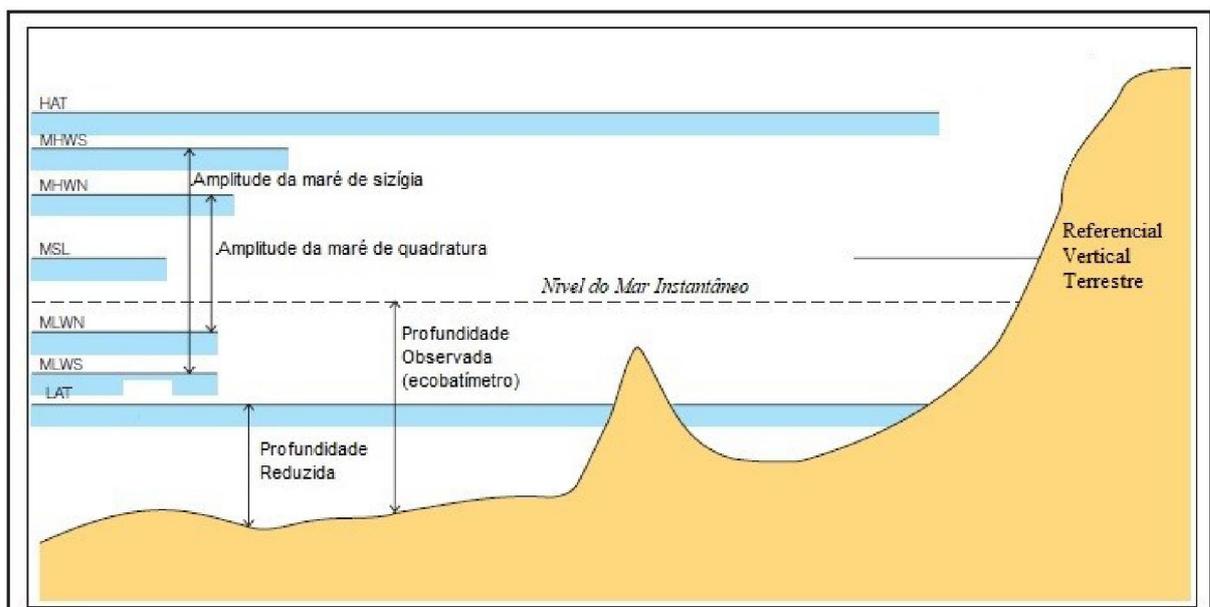
$$\text{Altura do NR} = H(M_2) + H(S_2) + 0,7 \times [H(K_1) + H(O_1)] \times \left| \sin(G(M_2) - \frac{[G(K_1) - G(O_1)]}{2}) \right| \quad (8)$$

Nesta fórmula, $H(i)$ e $G(i)$, são a amplitude e a fase das i -ésimas constituintes entre parênteses. Assim, o NR é calculado com base nas constituintes semidiurnas M_2 , S_2 , e diurnas K_1 e O_1 . Franco (2009) também apresenta uma determinação estatística do NR, a partir das funções densidade de probabilidade do nível da água ao longo de um determinado período de tempo.

Outros referenciais hidrográficos podem ser obtidos a partir da análise de séries de observações maregráficas, dentre os quais destacam-se: HAT (*Highest Astronomical Tide*): maior Maré Astronômica ou cota máxima; MHWS (*Mean High Water Springs*): média das preamares das marés de sizígia; MHWN (*Mean High Water Neaps*): média das preamares das marés de quadratura; MSL (*Mean Sea Level*) ou NMM (Nível Médio do Mar): média do nível do mar ou média das preamares e baixa-mares de sizígia e quadratura; MLWN (*Mean Low Water Neaps*): média das baixa-mares de quadratura; MLWS (*Mean Low Water Springs*): média das baixa-mares de sizígia; e LAT (*Lowest Astronomical Tide*): menor maré astronômica.

A Figura 6 ilustra estes referenciais hidrográficos.

FIGURA 6 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS



FONTE: Adaptada de IHO (2018).

Cabe ressaltar que estes referenciais possuem representatividade local devido à variabilidade do nível do mar no espaço e no tempo.

2.2 LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS

A história da hidrografia está intimamente ligada ao desenvolvimento da navegação. Por volta do século X a.C, os Fenícios possuíam experiência de navegação maior do que a dos gregos e romanos contemporâneos e conhecimento de correntes e ventos que os permitia explorar rotas comerciais que atravessavam o mar Mediterrâneo (HUNT, 2009). Apesar disso, a carta de navegação mais antiga que se tem registro, data do século XIII, período em que as cartas foram produzidas pelas primeiras escolas de cartografia náutica (Gênova, Veneza e Maiorca) (IHO, 2005). No século XV, a expansão marítima iniciada pelos portugueses contribuiu para o desenvolvimento da cartografia náutica. À medida que as terras eram “descobertas”, o conhecimento da geografia e da produção cartográfica se aperfeiçoavam.

Os levantamentos hidrográficos podem incluir uma grande diversidade de objetivos tais como: medição de marés; correntes; gravidade; e determinação das propriedades físicas e químicas da água (IHO, 2005).

Pelo fato dos navegantes se deslocarem muitas vezes em águas internacionais, demandando portos de diferentes países, emerge a necessidade de padronização dos serviços de cartografia náutica. Tal necessidade motivou a formação de um Serviço Hidrográfico Internacional.

A Organização Hidrográfica Internacional (OHI) foi criada em Mônaco em 1921, com o Brasil entre os dezoito Estados fundadores. A OHI coordena as atividades dos serviços hidrográficos nacionais e promove a uniformidade em cartas e documentos náuticos. Sua relevância repousa no fato de que a hidrografia é a base de todas as atividades que envolvem o mar. Suas publicações estão disponíveis em seu *site* (iho.int) separadas pelos seguintes temas: Publicações Batimétricas (B); Publicações de Capacitação (C); Publicações Diversas (M); Publicações Periódicas (P); Normas e Especificações (S); Outras Publicações; e Minutas. Alguns documentos importantes no contexto desta pesquisa são: C-13 Manual de Hidrografia e S-44 Especificações da OHI para Levantamentos Hidrográficos.

O Levantamento Hidrográfico (LH) realizado em Águas Jurisdicionais Brasileiras¹ (AJB), por órgão ou entidade não pertencente à Marinha do Brasil (MB), deve ser executado de acordo com normas e procedimentos indicados em Brasil (2017). Em seu Anexo J, constam recomendações para a Geodésia e Topografia, Maregrafia, Fluviometria, Batimetria, Geologia e Geofísica. O conteúdo da Norma no que se refere à maregrafia, está diretamente relacionado às atividades de levantamentos hidrográficos em apoio à produção e atualização de documentos náuticos.

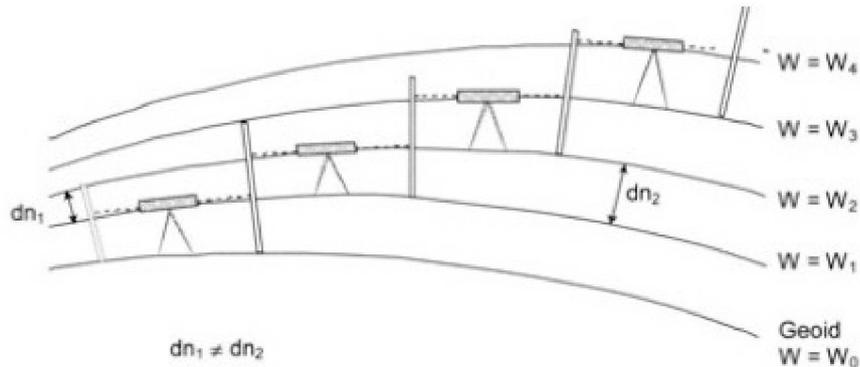
2.3 REFERENCIAIS VERTICAIS

O *Datum* vertical é usado para especificar a altitude de um ponto na superfície da Terra, sendo que esta altitude, para fins práticos, deve possuir significado físico. Os *Data* verticais modernos, utilizados nas práticas terrestres utilizam, de alguma forma, o campo da gravidade da Terra como referência. Já os dados utilizados em zonas costeiras (*data* hidrográficos) são aqueles derivados de observações de níveis de água, como: MLWS, MLWN, LAT e HAT.

Um sistema de referência vertical é definido por quatro etapas: tipo de altitude; superfície de referência correspondente; realização da rede fundamental; e densificação e manutenção da rede. Os referenciais verticais clássicos utilizavam o geoide como superfície de referência supostamente materializado pelo NMM. Nesse caso, observava-se o nível o mar em um marégrafo durante um certo período de tempo (idealmente 18,6 anos) e vinculava-se o NMM a uma ou mais RRNN situadas nas proximidades (VANICEK; KRAKIWSKY, 1986), definindo assim, o *Datum* Vertical com características clássicas. A densificação da rede era feita por nivelamento geométrico (permitindo a obtenção de altitudes niveladas) e aos desníveis brutos medidos podiam ser aplicadas correções gravimétricas (teóricas) devido ao não paralelismo das superfícies equipotenciais (SEVERO et al., 2013). A figura 7, ilustra a diferença entre os desníveis dn_1 e dn_2 entre duas equipotenciais ao longo de duas verticais diferentes.

1 compreendem as águas interiores e os espaços marítimos, nos quais o Brasil exerce jurisdição, em algum grau, sobre atividades, pessoas, instalações, embarcações e recursos naturais vivos e não vivos, encontrados na massa líquida, no leito ou no subsolo marinho, para os fins de controle e fiscalização, dentro dos limites da legislação internacional e nacional.

FIGURA 7 – ALTITUDES NIVELADAS



FONTE: Drewes (2001)

Entretanto, sabe-se que o NMM difere do geóide ao que se chama de topografia do NMM (TNMM) e ainda, segundo Gemael (1999), o NMM obtido numa estação maregráfica vale para o local e para uma dada época, pois o NMM varia de local para local e no mesmo ponto em função do tempo. A característica local da definição do *Datum Vertical* associada ao tratamento diferenciado das operações de nivelamento geométrico faz com que a correlação entre diferentes marégrafos e entre diferentes redes verticais seja inconsistente conforme discutido em Dalazoana (2006).

Atualmente, a Resolução No. 1 da IAG de julho de 2015 estabeleceu uma série de condições e padrões para a definição e realização de um novo Sistema Global de Altitudes (IHRF/IHRS – *International Height Reference System/Frame*) vinculado ao campo de gravidade da Terra. Neste caso, a superfície a ser utilizada como referência para as altitudes é fixada como sendo a superfície do campo da gravidade com valor do geopotencial $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. A coordenada vertical de cada ponto P na superfície física da Terra é dada por seu número geopotencial (C_P), calculado a partir da diferença de potencial $C_P = W_0 - W_P$ (IAG, 2015). O número geopotencial dividido por um determinado valor de gravidade resulta numa altitude com significado físico para o ponto P. A determinação do número geopotencial em campo requer a condução conjunta de nivelamento e gravimetria.

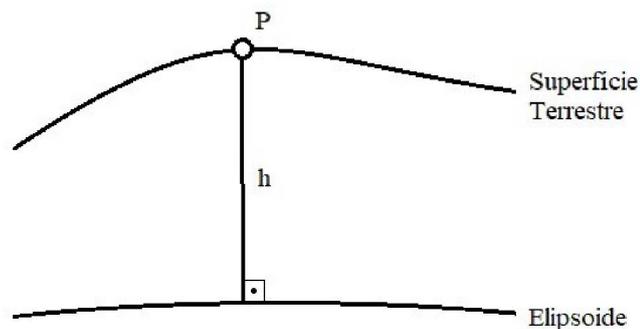
No Brasil, o Reajustamento da Rede Altimétrica com base em Números Geopotenciais, conduzido pelo IBGE, permitiu que esse conceito moderno para definição de altitudes com significado físico seja seguido com a obtenção de altitudes físicas do tipo normal, calculadas em função dos números geopotenciais.

Porém o vínculo ao geóide global (W_0) ainda não foi alcançado, conforme indicado em IBGE (2019).

Na América do Sul, os esforços relacionados a determinação de altitudes com características físicas estão concentrados em atividades relacionadas ao Grupo de Trabalho III do Projeto SIRGAS. Freitas (2015) apresenta uma visão geral da fundamentação teórica e possíveis estratégias visando a modernização das redes verticais dos países no contexto do SIRGAS, buscando atender aos preceitos do IHRs.

As altitudes geodésicas (h), também denominadas altitudes elipsoidais, representam a distância entre um ponto na superfície da Terra e um elipsoide de referência. Essa distância é definida ao longo da normal ao elipsoide que passa pelo ponto (Figura 8). Como estas altitudes têm significado puramente geométrico, dois pontos podem ter a mesma altitude elipsoidal mas estarem em níveis diferentes. Entretanto, com as alturas elipsoidais associadas à gravimetria, a superfície da Terra pode ser considerada como a condição de contorno para solução do Problema de Valor de Contorno para a Geodésia (PVCG) na sua versão fixada (FERREIRA, 2011) o que permite a obtenção de altitudes em um sistema de referência global.

FIGURA 8 – ALTITUDE GEODÉSICA



Fonte: O Autor (2021).

Outra aplicação das altitudes geodésicas é a discriminação de movimentos eustáticos e tectônicos em marégrafos para determinação da variação absoluta do NMM. Isso por que marégrafos registram os movimentos relativos entre o nível do mar e crosta, não discriminando os movimentos próprios de cada segmento (SILVA, 2017).

2.3.1 Transformações entre Superfícies de Referência

Estabelecer o NR por meio de uma superfície de referência uniforme e seu modelo de transformação para outras superfícies de referência verticais é a chave para unificação de referenciais verticais em zonas costeiras. Interpolares os NR de marégrafos também requer o conhecimento do comportamento da onda de maré na área de estudo, uma vez que a amplitude e a velocidade da onda sofrem alterações de acordo com a batimetria. Portanto, a adoção de uma superfície de separação é uma solução específica e exclusiva para uma dada área uma vez que se trata de modelar a superfície do NR.

BathyElli é um projeto conduzido pelo Serviço Hidrográfico e Oceanográfico da Marinha da França (SHOM) que teve início em 2005. Tem o objetivo de definir o DCN em relação ao elipsoide internacional de 1980 (GRS80) junto com o desenvolvimento de um programa de computador visando à transformação entre superfícies de referência verticais (LAT, MSL, elipsoide e modelos geoidais). O produto está em sua versão 2.0, porém as especificações desta versão não indicam o seu uso para navegação (SHOM, 2018).

O VORF foi desenvolvido pelo Serviço Hidrográfico do Reino Unido (UKHO) a partir de 2005 com o objetivo de promover a transformação de altitudes em zona costeira e *offshore*. A solução foi concluída em 2008. Informações da precisão do VORF, incluindo resultados de campo, podem ser encontrados em Iliffe et al. (2013).

BLAST é um projeto da região do mar do Norte da União Europeia (UE), realizado no período de outubro de 2009 a setembro de 2012. Os participantes incluem grupos da Noruega, Suécia, Alemanha, Dinamarca, Holanda, Bélgica, França e Reino Unido. Um dos objetivos do projeto era desenvolver um conjunto de padrões para transformação entre referenciais verticais no Mar do Norte (BOSCH, 2016a).

O projeto francês BathyElli e o projeto britânico VORF baseiam-se no pressuposto de que a modelagem de maré fornece alturas em relação ao NMM. Portanto, concentram-se na realização de uma superfície do NMM (MSS na sigla em inglês – *Mean Sea Surface*) vinculada por GNSS ao elipsoide. A MSS resultante é então reduzida para a LAT com relação a um elipsoide de referência. Por outro lado, o projeto BLAST sugere o uso do geóide como referência de altitude. Para atingir seu objetivo, calcula um geóide por meio de um ajuste de mínimos quadrados a

partir de todas as fontes de dados disponíveis; realiza uma modelagem hidrodinâmica e de marés para obter elevações da água em relação a uma superfície geopotencial; relaciona as elevações hidrodinâmicas ao geóide e em seguida ao elipsoide (BOSCH, 2016b).

Ainda existem iniciativas semelhantes de integração de referenciais verticais em outros países. No Canadá, o *Natural Resources Canada* (NRCan) lançou, em 2013, o *Datum Vertical Canadense de 2013* (CGVD2013) em substituição ao *Datum Vertical Geodésico Canadense de 1928* (CGVD28). O CGVD2013 é definido pela superfície equipotencial ($W_0 = 62.636.856,0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$) e fornece a separação entre o elipsoide GRS80 e a superfície equipotencial acima descrita, tornando-o compatível com os sistemas globais de navegação por satélite (NRCan, 2021). Nos Estados Unidos, o NOAA desenvolveu o *VDatum*, um *software* que tem como objetivo atingir cobertura para todas as águas costeiras dos EUA. O *VDatum* permite que os usuários convertam seus dados de diferentes referências horizontais / verticais em um sistema comum permitindo a fusão de dados geoespaciais diversos nos níveis de referência desejados (NOAA, 2021).

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos desta pesquisa foram adotados os procedimentos ilustrados no fluxograma da Figura 9. Após a revisão bibliográfica, o primeiro passo compreendeu a definição da área de estudos e a coleta dos dados. Em seguida, foi realizado o controle de qualidade dos dados maregráficos, conforme orientações e procedimentos indicados em UNESCO/IOC (2020). Posteriormente, os dados maregráficos foram processados e analisados. Neste capítulo são apresentadas informações da área de estudo, dos dados e recursos utilizados, bem como sobre o processamento. Resultados e análises serão apresentadas no próximo capítulo.

FIGURA 9 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA



FONTE: O Autor, (2021).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A escolha da área de estudo – baía de Paranaguá – se deu pela proximidade do campus da UFPR, por possuir relativa quantidade de dados de marégrafos disponíveis e pela sua relevância ambiental e econômica.

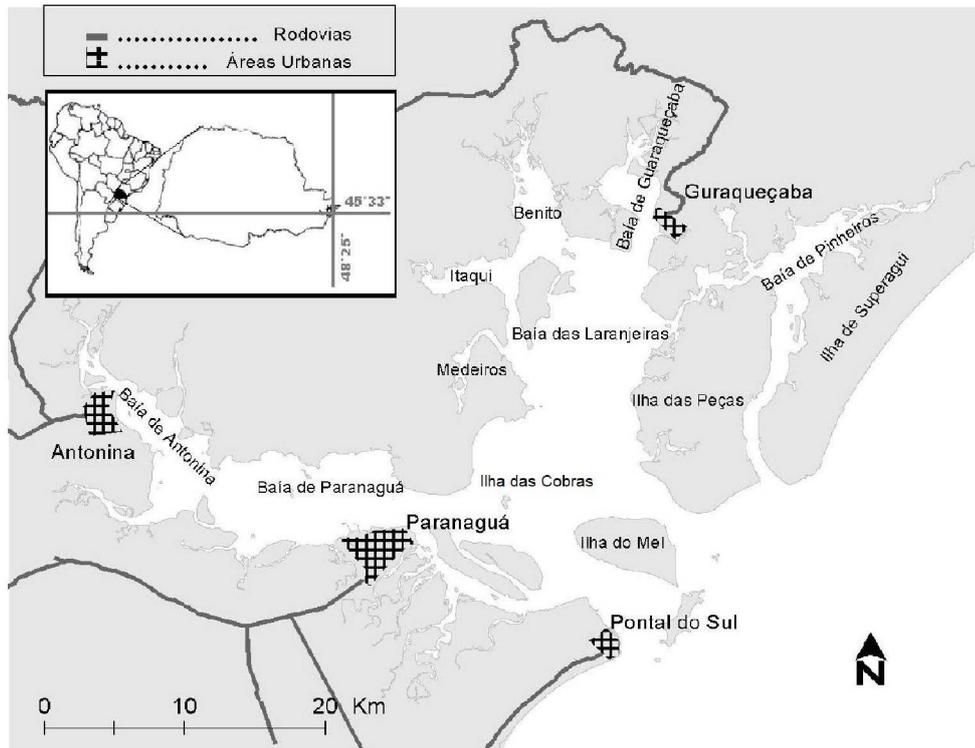
O porto de Paranaguá é um dos maiores portos do Brasil e em 2020 foi o sexto colocado em um ranking nacional em movimentação total de carga (ANTAQ, 2021).

Além do porto, no Complexo Estuarino de Paranaguá encontra-se um estuário de características pristinas (baixo nível de antropização) que é objeto de estudos frequentes pelos pesquisadores do Centro de Estudos do Mar da UFPR.

3.1.1 Descrição da área de estudo

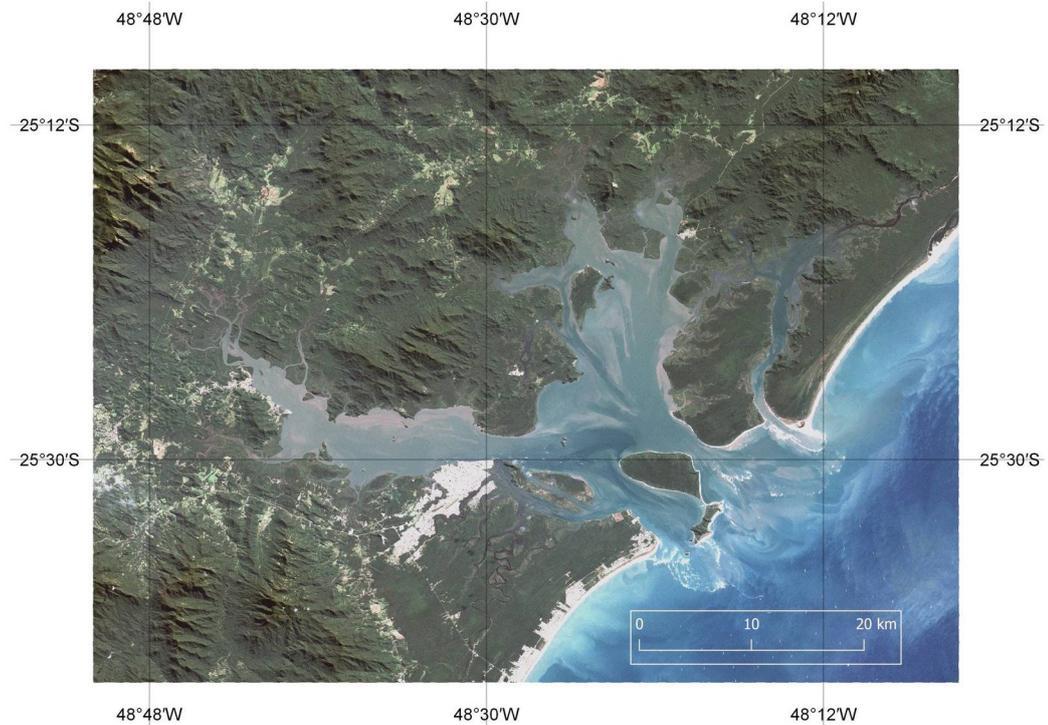
A baía de Paranaguá está localizada no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), um sistema estuarino localizado na costa sul do Brasil, na porção centro-norte do litoral paranaense, em torno de $25^{\circ} 30'S$ e $48^{\circ} 30'W$, (Figura 10). Tem uma área superficial aproximada de 600 km^2 . O estuário é formado por dois ramos: um ramo leste-oeste, com extensão de 50 km com as baías de Paranaguá e Antonina; e um ramo norte-sul, que compreende a baía das Laranjeiras, o sub-estuário de Guaraqueçaba e o canal de acesso interno a baía dos Pinheiros (MARONE et al. 2007). O CEP está representado na Figura 11, em uma composição colorida do sensor MUX do satélite CBERS-4 de julho de 2020 (INPE, 2020).

FIGURA 10 – CEP E SEUS PRINCIPAIS CORPOS D'ÁGUA.



FONTE: Oliveira (2009)

FIGURA 11 – COMPOSIÇÃO COLORIDA ABRANGENDO A REGIÃO DE ESTUDO.



FONTE: INPE (2020)

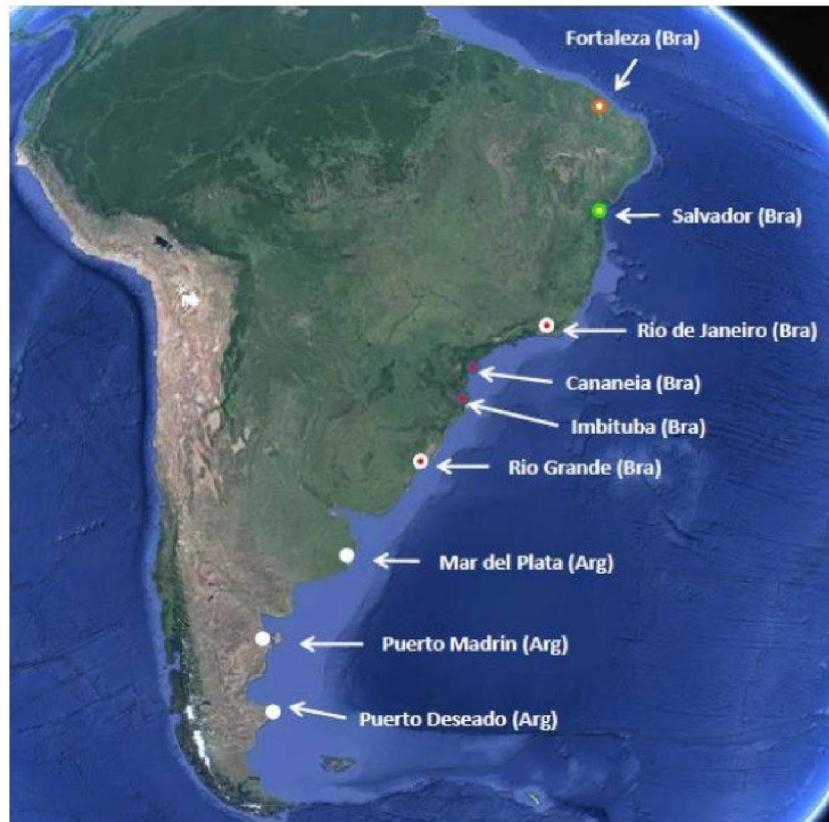
A maré na baía de Paranaguá apresenta regime semidiurno, do fundo ao meio e semidiurna com desigualdades diurnas a partir da Ilha das Cobras. A amplitude da maré é de 1,7 m na desembocadura sul (Ilha da Galheta) e pode atingir 2,7 m em algumas áreas (CAMARGO; HARARI, 2003). A forma da costa e a topografia do fundo proporcionam uma considerável amplificação da amplitude da maré, da boca do CEP aos pontos interiores. Franz et al. (2016) apresentam que na plataforma sudeste brasileira, as maiores amplitudes do constituinte de maré terdiurno lunar principal (M3) são encontradas no sistema estuarino de Paranaguá em virtude do efeito da ressonância. A profundidade média é de cerca de 3 metros e nos canais de navegação alcança 12 a 15 m, mantida por dragagens regulares (CAMARGO; HARARI, 2003).

Ambos os ramos possuem características ambientais semelhantes, mas estão sujeitos a diferentes pressões antropogênicas. O ramo leste tem suas águas influenciadas pelos efluentes industriais e domésticos da cidade de Paranaguá e dos portos de Paranaguá e de Antonina (MARTINS, 2010 apud NOERNBERG et al. 2014). O ramo norte-sul contém uma Área de Proteção Ambiental cuja bacia hidrográfica é protegida como reserva da biosfera pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, na sigla em inglês - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*) desde 1993 (NOERNBERG et al, 2014).

Franz et al. (2016), apresentam um histórico dos estudos realizados na região do CEP a partir de dados meteorológicos e oceanográficos. Evidencia-se em muitos destes estudos, as componentes não lineares das marés nesta região cujos efeitos podem aumentar a altura das marés em até 80 cm (MARONE; CAMARGO, 1994).

Melo Filho (2017), analisando a maré meteorológica na costa Brasileira, reuniu séries de um ano de dados de marés de 9 locais distribuídos conforme a Figura 12.

FIGURA 12 – LOCALIZAÇÃO DAS EEMM UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE MARÉ METEOROLÓGICA.



FONTE: Melo Filho (2017)

Nestas estações, Melo Filho (2017) estimou a maré não astronômica através da variância do sinal da maré observada e da variância da maré astronômica. O autor considerou que a energia e a variância de um sinal são grandezas relacionadas. O resultado encontra-se na Tabela 3.

TABELA 3 – PORCENTAGEM DA MARÉ ASTRONÔMICA E NÃO ASTRONÔMICA.

Local	Maré Observada Variância (cm ²)	Maré Astronômica Variância (cm ²)	Maré não Astronômica Variância (cm ²)
Fortaleza (Bra)	5.081 (100%)	5.070 (99,8%)	11 (0,2%)
Salvador (Bra)	3.695 (100%)	3.660 (99,1%)	35 (0,9%)
Rio de Janeiro (Bra)	1.054 (100%)	813 (77,1%)	241 (22,9%)
Cananéia (Bra)	1.631 (100%)	1.187 (72,8%)	444 (27,2%)
Imbituba (Bra)	1.354 (100%)	961 (71,0%)	393 (29,0%)
Rio Grande (Bra)	595 (100%)	145 (24,4%)	450 (75,6%)
Mar del Plata (Arg)	1.870 (100%)	1.039 (55,5%)	831 (44,5%)
Puerto Madrin (Arg)	19.954 (100%)	19.283 (96,6%)	671 (3,4%)
Puerto Deseado (Arg)	17.902 (100%)	17.636 (98,5%)	266 (1,5%)

FONTE: Adaptado de Melo Filho (2017).

Paranaguá está localizada entre Cananeia e Imbituba, portanto espera-se encontrar uma maré não astronômica com um valor próximo de 28%.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Dados de marégrafos.

Os dados maregráficos na região de estudo foram obtidos através do BNDO do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) através de solicitação por correio eletrônico (chm.bndo@marinha.mil.br). Os dados em estudo são das EEMM listadas na Tabela 4. O trígama em parênteses após o nome da EM será utilizado deste ponto em diante para simplificar a referência aos dados da EM.

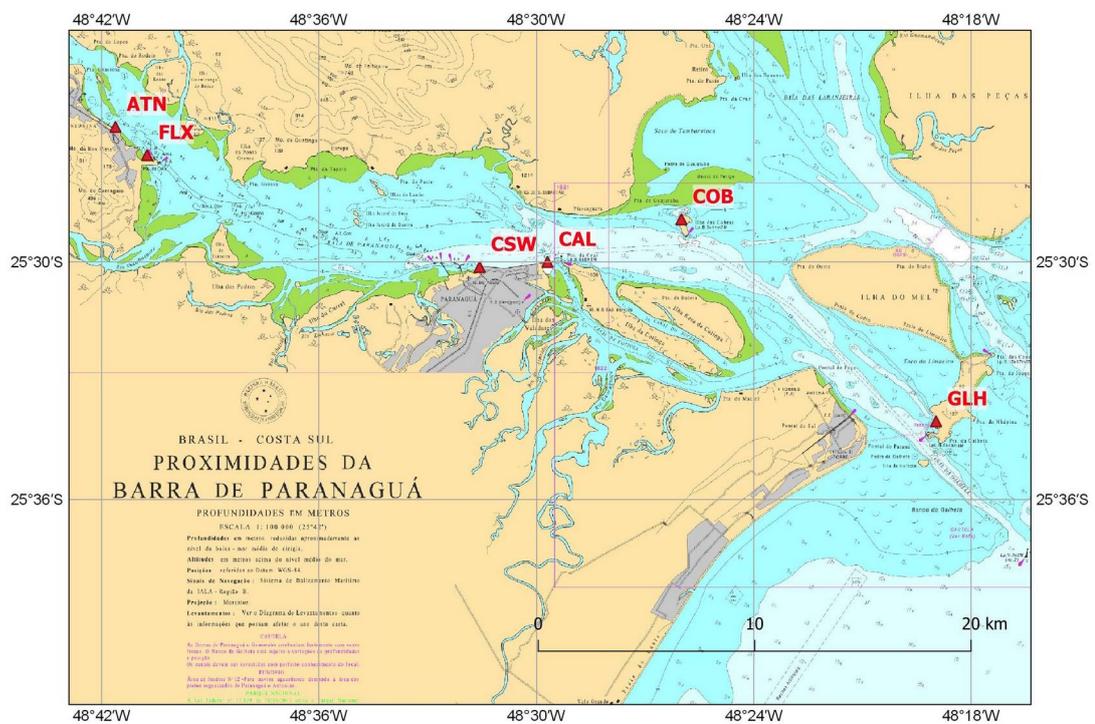
TABELA 4 – ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS

ESTAÇÃO	COORDENADAS APROXIMADAS
60110 - ANTONINA (ATN)	25° 26',6 S 48° 41',6 W
60120 - ILHA DAS COBRAS (COB)	25° 28',9 S 48° 26',0 W
60132 - PORTO DE PARANAGUÁ - CAIS OESTE(CSW)	25° 30',1 S 48° 31',5 W
60135 - BARRA DE PARANAGUÁ CANAL DA GALHETA (GLH)	25° 34',0 S 48° 19',0 W
60139 - TERMINAL PORTUÁRIO DA PONTA DO FÉLIX (FLX)	25° 27',3 S 48° 40',7 W
60141 - PORTO DE PARANAGUÁ - CAIS LESTE (CAL)	25° 30',0 S 48° 29',7 W

FONTE: O Autor (2021)

A Figura 13 ilustra o posicionamento dos marégrafos na área de estudo sobre um trecho da carta náutica 1820 obtida em CHM (2020).

FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DOS MARÉGRAFOS NA REGIÃO DE ESTUDO



FONTE: O Autor (2021).

A Tabela 5 apresenta as principais informações (metadados) das séries temporais de dados maregráficos disponíveis.

TABELA 5 – METADADOS DAS SÉRIES DE DADOS MAREGRÁFICOS

(continua)

Nome da Estação	Código da série	Tipo do Sensor	Taxa de Gravação	Período das observações	Duração (dias)	Total (dias)
Antonina (60110)	ATN_A	Boia e Contrapeso	1 hora	29/04/1995 - 15/06/1995	48	413
	ATN_B	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/1997 - 31/12/1997	365	
Ilha das Cobras (60120)	COB_A	Boia e Contrapeso	1 hora	15/04/1975 - 16/05/1975	32	152
	COB_B	Boia e Contrapeso	1 hora	04/05/1995 - 21/06/1995	49	
	COB_C	RADAR	5 minutos	31/05/2018 - 09/08/2018	71	
Cais Oeste (60132)	CSW_A	Boia e Contrapeso	1 hora	13/07/1992 - 16/08/1992	35	3259
	CSW_B	Boia e Contrapeso	1 hora	02/01/1994 - 31/10/1994	303	
	CSW_C	Boia e Contrapeso	1 hora	07/12/1994 - 31/12/1994	25	
	CSW_D	Boia e Contrapeso	1 hora	01/04/1995 - 30/11/1995	244	
	CSW_E	Boia e Contrapeso	1 hora	02/05/1996 - 31/05/1996	30	
	CSW_F	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/1997 - 31/12/1999	1095	
	CSW_G	Boia e Contrapeso	1 hora	02/01/2001 - 31/01/2001	30	
	CSW_H	Boia e Contrapeso	1 hora	01/06/2001 - 01/06/2001	1	
	CSW_I	Boia e Contrapeso	1 hora	01/07/2001 - 27/10/2001	119	
	CSW_J	Boia e Contrapeso	1 hora	29/10/2001 - 30/11/2002	398	
	CSW_K	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/2003 - 31/12/2003	365	
	CSW_L	Boia e Contrapeso	1 hora	02/01/2004 - 12/02/2004	42	
	CSW_M	Boia e Contrapeso	1 hora	27/02/2004 - 31/12/2004	309	
	CSW_N	Pressão	5 minutos	21/09/2018 - 14/03/2019	175	
	CSW_O	Pressão	10 minutos	24/08/2018 - 19/11/2018	88	
Galheta (60135)	GLH_A	Boia e Contrapeso	1 hora	07/04/1975 - 08/05/1975	32	2268
	GLH_B	Boia e Contrapeso	1 hora	26/04/1995 - 26/11/1995	215	
	GLH_C	Boia e Contrapeso	1 hora	01/12/1995 - 27/12/1995	27	
	GLH_D	Boia e Contrapeso	1 hora	05/01/1996 - 18/01/1996	14	
	GLH_E	Boia e Contrapeso	1 hora	01/05/1996 - 31/05/1996	31	

TABELA 5 – METADADOS DAS SÉRIES DE DADOS MAREGRÁFICOS

(conclusão)						
Nome da Estação	Código da série	Tipo do Sensor	Taxa de Gravação	Séries de observações	Duração (dias)	Total (dias)
Galheta (60135)	GLH_F	Boia e Contrapeso	1 hora	01/07/1996 - 31/08/1996	62	2268
	GLH_G	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/1997 - 31/12/1997	365	
	GLH_H	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/2001 - 31/01/2001	31	
	GLH_I	Boia e Contrapeso	1 hora	02/04/2001 - 19/04/2001	18	
	GLH_J	Boia e Contrapeso	1 hora	09/05/2001 - 28/02/2005	1392	
	GLH_K	Pressão	5 minutos	28/10/2018 - 29/11/2018	33	
	GLH_L	Pressão	10 minutos	03/04/2019 - 20/05/2019	48	
Ponta do Felix (60139)	FLX_A	Boia e Contrapeso	1 hora	02/05/2000 - 20/06/2000	50	629
	FLX_B	Boia e Contrapeso	1 hora	19/09/2000 - 24/12/2000	97	
	FLX_C	Boia e Contrapeso	1 hora	01/01/2001 - 02/02/2001	33	
	FLX_D	Boia e Contrapeso	1 hora	01/03/2001 - 03/05/2001	64	
	FLX_E	Boia e Contrapeso	1 hora	02/06/2001 - 21/06/2002	385	
Cais Leste (60141)	CAL_0	RADAR	5 minutos	04/02/2016 - 22/05/2016	109	109

FONTE: O Autor (2021).

A Figura 14 apresenta o formato dos dados de cada EM. A série de dados é separada do cabeçalho pelo caractere '#'. Os dados compreendem o dia, mês e ano da observação, no formato DD/MM/AAAA, o horário da observação no fuso local (neste exemplo, fuso PAPA) e o valor de nível d'água em centímetros acima do zero da régua do marégrafo.

FIGURA 14 – FORMATO DOS ARQUIVOS DO BNDO

```

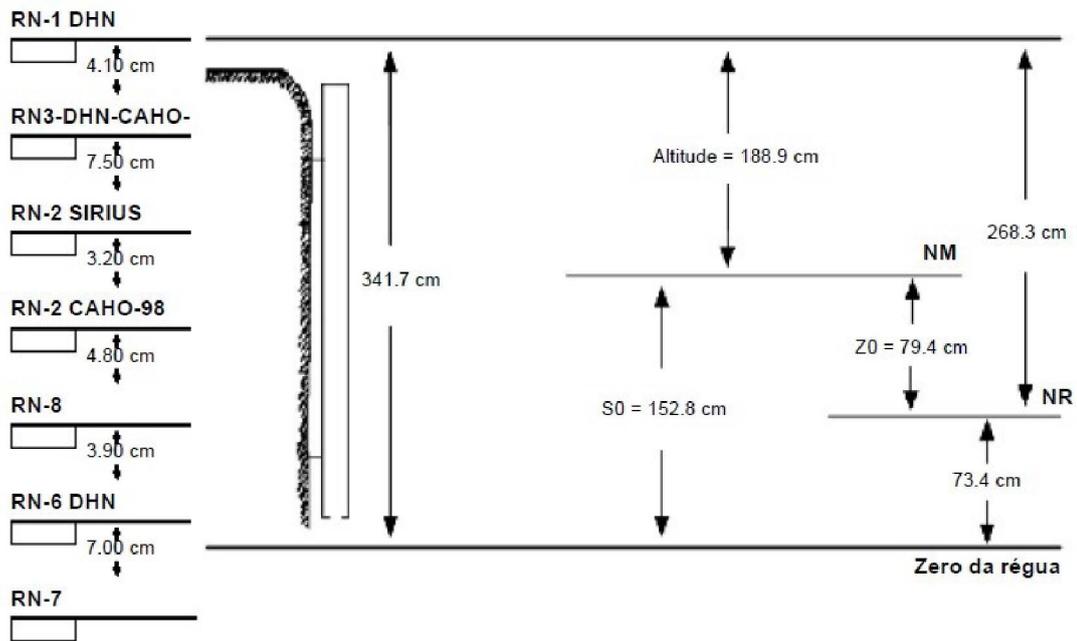
1 PERÍODO DE ALTURAS OBSERVADAS
2 ESTAÇÃO:60120
3 NOME ESTAÇÃO:ILHA DAS COBRAS
4 LATITUDE:25° 28'.9 S
5 LONGITUDE:048° 26'.0 W
6 DATA INICIAL:15/04/1975
7 DATA FINAL:16/05/1975
8 EQUIPAMENTO:315 - BÓIA E CONTRA-PESO
9 ALTURAS EM CENTÍMETROS
10 HORÁRIO PAPA
11 #
12 15/04/1975 00:00;130;
13 15/04/1975 01:00;160;
14 15/04/1975 02:00;183;
15 15/04/1975 03:00;200;
16 15/04/1975 04:00;205;
17 15/04/1975 05:00;209;
18 15/04/1975 06:00;210;
19 15/04/1975 07:00;190;
20 15/04/1975 08:00;158;

```

FONTE: O Autor (2021).

O BNDO também disponibiliza as Fichas de Descrição de Estações Maregráficas (F-41), documento no qual o CHM registra todas as informações necessárias para reconstituir uma determinada EM, em apoio a um LH. Os níveis de referência apresentados em cada ficha são dados em relação às RRNN próximas. A F-41 apresenta a descrição da estação e das RRNN, coordenadas, período de aquisição dos dados, um diagrama onde são representados: o NMM, o NR, o zero da régua maregráfica, as RRNN de referência, além das diferenças entre os níveis. A Figura 15 ilustra um trecho da F-41 de GLH.

FIGURA 15 – DIAGRAMA DE F-41



FONTE: O Autor (2021).

A Tabela 6 apresenta a altura do NMM em relação ao zero da régua (S_0) para cada estação a partir dos dados da F-41. Considerando as alturas do NR em relação ao NMM, como uma aproximação à semi-amplitude de maré, nota-se maiores amplitudes nas estações mais interiores (ATN e FLX).

TABELA 6 – NÍVEIS DE REFERÊNCIA DAS ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS

ESTAÇÃO	Altura do NMM em relação ao zero (S_0)	Número da F-41	Período de observação
ATN	216,93 cm	F-41-1822-001/97	01/01/1997 a 31/12/1997
COB	157,70 cm	F-41-1822-002/95	04/05/1995 a 01/06/1995
CSW	180,30 cm	F-41-1822-001/97	01/01/1997 a 31/12/1997
GLH	152,80 cm	F-41-1821-001/97	01/01/1997 a 31/12/1997
FLX	222,20 cm	F-41-1824-001/00	19/09/2000 a 19/11/2000
CAL	199,20 cm	F-41-1822-001/16	04/02/2016 a 22/05/2016

FONTE: O Autor (2021).

Além dos dados do BNDO referentes às estações maregráficas do CEP, foram utilizados também níveis médios diários da estação Cananeia – SP, obtidos no banco de dados do Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Havaí (*University of Hawaii Sea Level Center (UHSLC) Research Quality Database*) (CALDWELL; MERRIFIELD; THOMPSON, 2015). A EM de Cananeia está localizada a aproximadamente 80 km da baía de Paranaguá e dispõe de dados a partir de 1954.

3.2.2 Dados meteorológicos.

Os dados meteorológicos foram obtidos através do portal do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2020). Os dados referem-se à estação Paranaguá, nº 83844, e compreendem observações realizadas três vezes ao dia, às 0h, 12h e 18h, com dados de pressão atmosférica (mbar).

3.2.3 Programas de Computador

O PACMARÉ foi desenvolvido pelo Almirante Alberto dos Santos Franco, com a contribuição de eminentes pesquisadores. A análise harmônica dos dados de marés é efetuada no domínio da frequência. A probabilidade adotada para rejeição de pequenas componentes é de 95% (FRANCO, 2009). Neste programa foram executados os seguintes processos: análise harmônica, cálculo do nível médio diário e previsão de maré.

O AstGEOtop é um programa científico desenvolvido pelo professor Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) que contempla diversas aplicações dentro das geotecnologias, como: Astronomia, Geodésia e Topografia, por exemplo. Para o processamento dos dados maregráficos, foi utilizado o módulo “Análise de Maré” (GARNÉS, 2021), que utiliza o método harmônico no domínio do tempo. Este módulo, dentre as diversas opções implementadas, permite efetuar análises estatísticas dos dados de maré disponíveis, efetuar previsão de maré e aplicar regressão. A ferramenta “Análise Harmônica” possibilita o cálculo de até 69 constituintes de maré.

Além destes programas, foram utilizados: planilhas eletrônicas; sistemas de processamento de dados geoespaciais (SIG); e a IDE (*Integrated Development Environment*) *Spyder* de código aberto para programação científica na linguagem Python para o desenvolvimento dos filtros do controle de qualidade, rotinas para reamostragem das séries, aplicação de filtros passa-baixa, geração de gráficos, gerenciamento e edição dos arquivos.

Existem, ainda, uma série de outras ferramentas que possibilitam o tratamento dos dados maregráficos e a análise da maré. Como exemplos, pode-se citar: *T_tide* para o MatLab; *Tides* para o R; e *SLP64* da Universidade do Havai.

3.3 CONTROLE DE QUALIDADE

Os procedimentos de controle de qualidade adotados nesta dissertação têm os seguintes objetivos:

- verificar possíveis alterações no referencial vertical da EM através de levantamento e análise das respectivas fichas descritivas (F-41);
- identificar e remover dados espúrios nas séries de observações;
- avaliar a qualidade dos dados; e
- preparar os dados para o processamento.

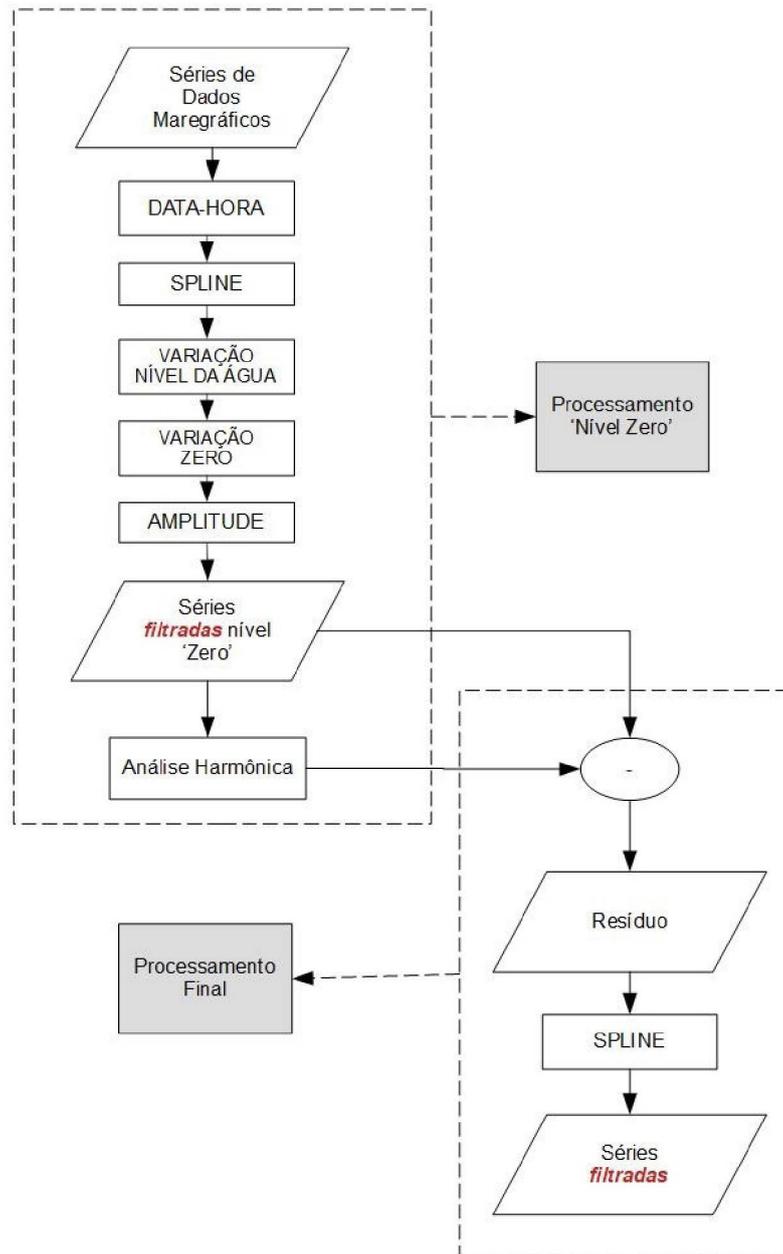
A análise das fichas descritivas das EEMM tem o propósito de verificar possíveis mudanças na EM ao longo do tempo, tais como alteração da RN e instalação de novas réguas, por exemplo.

Os procedimentos adotados neste sentido se basearam em UNESCO/IOC (2020), após o processo de decisão descrito no Apêndice 1 que considerou os métodos disponíveis no AstGeoTop e consistiram nas seguintes tarefas:

- verificação se há lacunas nos registros de data e hora;
- ajuste de *spline* para detecção de picos;
- busca por variação de nível d'água acima de valor máximo;
- teste de estabilidade/linha plana: quando não houver mudança na amplitude do nível do mar após 'N' elementos consecutivos; e
- busca por valores fora de intervalo de máximo e mínimo.

A análise foi feita em dois níveis segundo o fluxograma da Figura 16.

FIGURA 16 – METODOLOGIA DO CONTROLE DE QUALIDADE

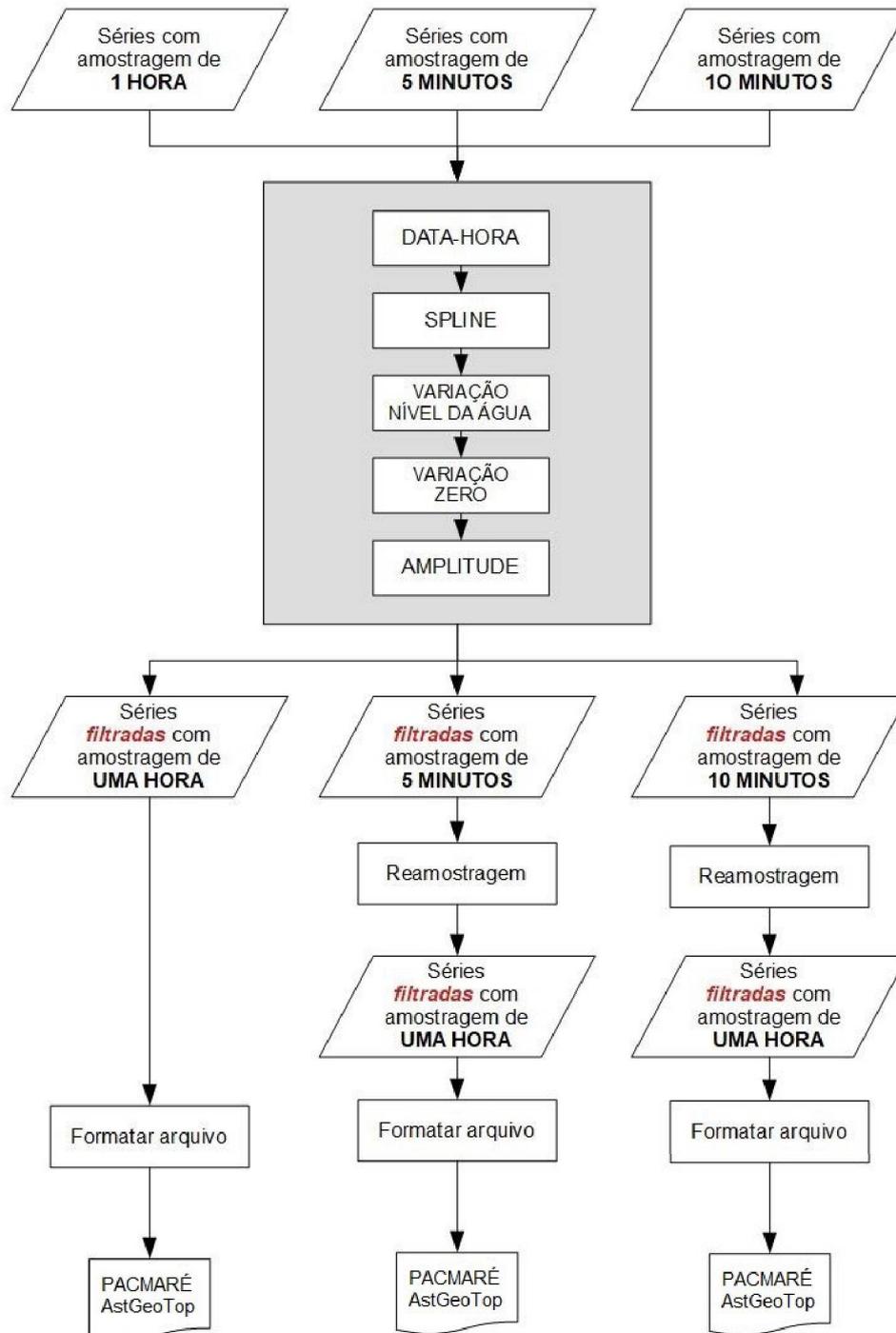


FONTE: O Autor (2021).

Para o processamento 'nível zero', um filtro implementado pelo autor com as tarefas descritas anteriormente foi aplicado nos dados. Em seguida, as séries com taxas de aquisição de 5 e 10 minutos foram reamostradas para valores horários. Por fim, todos os dados filtrados e reamostrados foram editados para o formato de entrada dos programas utilizados para a análise harmônica.

O fluxograma da Figura 17 apresenta de forma detalhada os procedimentos relacionados ao processamento de nível zero e uma descrição dos processos é apresentada na sequência.

FIGURA 17 – PROCESSOS DE CONTROLE DE QUALIDADE NÍVEL ZERO



FONTE: O Autor (2021).

DataHora: verifica a ausência de registros nas séries. Em caso afirmativo, cria o registro e atribui um valor NAN (*Not A Number*). Métrica: número de registros adicionados.

Spline: gera uma *Spline* de segundo grau a uma janela de 16 horas ao longo da série. O período sugerido em UNESCO/IOC (2020) é de 12 a 16 horas. O período foi escolhido empiricamente como aquele que identificou melhor os dados espúrios. Utiliza um critério de 3-sigma (também sugestão da referência) para identificação de dados espúrios, os substituindo por NAN. Métrica: número de registros com valores substituídos por NAN.

Variação do Nível da Água (Var_NA): compara cada variação horária de nível com um valor de referência. O valor de referência adotado foi obtido utilizando a relação para a taxa de variação do nível em função da vazão dada pela fórmula (MARONE et al., 2007):

$$\text{Variação de nível (m/h)} = 2,44 \times 10^{-5} \times \text{Vazão (m}^3/\text{s)} \quad (9)$$

Segundo AMB (2021), a vazão no CEP pode atingir 20.000 m³/s no canal da Galheta, o que resulta em uma taxa de variação do nível de 0,49m/h. Para evitar a eliminação de dados representativos e como este valor calculado é apenas por referência, foi acrescentado a ele 100%. Portanto o valor de referência para este processo foi de 1m/h. Métrica: número de registros com valores substituídos por NAN.

Variação Zero: analisa sequência de observações. Caso haja sequência maior ou igual a X observações iguais, os elementos são substituídos por NAN. O valor de X foi escolhido para poder identificar erros grosseiros mas com baixa probabilidade de identificar erroneamente uma maré de quadratura com baixas amplitudes. Os valores de X escolhidos foram conservadores e estão apresentados na Tabela 7. Métrica: número de registros com valores substituídos por NAN.

TABELA 7 – INTERVALO PARA ANÁLISE DE VARIAÇÃO ZERO DE OBSERVAÇÕES

Taxa de aquisição	Número de observações iguais (X)	Intervalo correspondente (h)
1 hora	6	6
10 min	18	3
5 min	36	3

FONTE: O Autor (2021).

Amplitude: como a maior amplitude da baía é de 2,7 m segundo Camargo e Harari (2003), adotou-se o valor de 2,7m como critério de verificação. Assim, cada elemento que desvie de 2,7 m é substituído por NAN. Métrica: número de registros com valores substituídos por NAN.

Reamostragem: foram utilizados filtros apresentados em Pugh (1987) para reamostragem de taxa de 5 e 10 minutos para taxa de 1 hora.

Formatar arquivo: edita as séries filtradas para que possam ser utilizadas como entrada para os programas AstGeoTop e PACMARÉ.

Para os dados a serem utilizados no programa AstGeoTop, os valores NAN são removidos uma vez que o modelo matemático da análise harmônica utiliza o MMQ.

Para os dados empregados no PACMARÉ, os valores NAN devem ser substituídos, pois o modelo utiliza a FFT. Os dados espúrios isolados foram substituídos pela média dos valores vizinhos. Já para o caso dos dados espúrios identificados formarem um intervalo, a solução utilizada foi a sugerida em UNESCO/IOC (2020): primeiro se interpola linearmente a série dos resíduos no intervalo usando os valores dos extremos e, posteriormente, a estes resíduos interpolados, se adiciona a previsão astronômica da maré.

No processamento final, o filtro SPLINE foi aplicado nos resíduos obtidos das séries filtradas na etapa anterior.

3.4 PROCESSAMENTO

O processamento de dados maregráficos efetuado nesta dissertação seguiu os seguintes processos:

- a) Análise harmônica;
- b) Reconstituição da maré com as constituintes obtidas pela Análise Harmônica para o mesmo período de observação;
- c) Cálculo dos resíduos
- d) Aplicação de filtros para remoção dos sinais de maré;
- e) Cálculo do Nível Médio Mensal;
- f) Cálculo das diferenças de fase das constituintes M2 e S2 ao longo da baía de Paranaguá; e

g) Cálculo da correlação com condicionantes atmosféricas.

Em virtude da variabilidade dos tamanhos das séries disponíveis, em algumas etapas os processos foram aplicados em apenas um subconjunto delas. Os seguintes grupos foram utilizados e serão referidos mais a frente:

a) Individuais: séries de maior duração para cada EM.

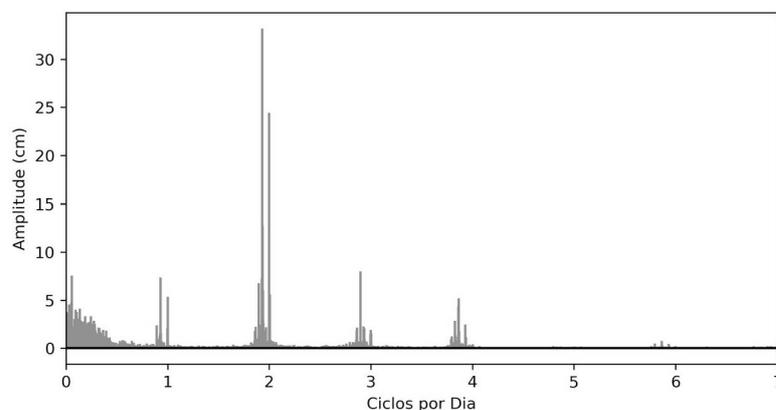
Séries_Individuais = 'ATN_B', 'FLX_E', 'CSW_B', 'CSW_F', 'CSW_J', 'CSW_K', 'CSW_M', 'CAL_O', 'COB_C', 'GLH_B', 'GLH_G', e 'GLH_J'

b) Simultâneas: as séries com um ano de observações simultâneas em Galheta, Antonina e Cais oeste, localizadas nos extremos e meio da área de estudo. Séries_Simultâneas = 'ATN_B', 'CSW_F', e 'GLH_G'

3.4.1 Análise Harmônica

A análise harmônica foi realizada pelos programas AstGeoTop (versão 2021) e PACMARÉ (versão 2009). Para fins de comparação dos dois *softwares*, foram selecionadas as constituintes de um até quatro ciclos por dia obtidas pelos dois programas e com amplitude maior que 5 cm no AstGeoTop. Para a escolha do número de ciclos (4) foi realizada uma análise de frequência dos dados não filtrados, uma vez que todas as séries do grupo “Individuais” apresentaram espectro semelhante ao da Figura 18, da série GLH_G, ou seja, com as maiores amplitudes até as espécies de quatro ciclos por dia. Foi escolhida a amplitude de 5 cm, como um critério quantitativo que representasse as constituintes de maior relevância.

FIGURA 18 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA DA SÉRIE GLH_G
EVIDENCIANDO AS AMPLITUDES PARA CADA FREQUÊNCIA



FONTE: O Autor (2021).

Na figura 18, as frequências de maior amplitude (2 ciclos por dia) evidenciam a relação entre a amplitude de maré e as fases da Lua, ou seja, a posição da Terra em relação ao Sol e à Lua.

3.4.2 Reconstituição da Maré

A reconstituição da maré consiste na utilização das constituintes obtidas pela análise harmônica para gerar dados de alturas de nível da água para o mesmo período de observação. Como apresentado no item 2.1.5, constituintes de longo período podem absorver energias meteorológicas que muitas vezes são assimétricas.

Para investigar este efeito, dentre alguns parâmetros estatísticos, foi utilizado o índice RV (*Reduction in Variance*). Este índice é a razão da variância da maré reconstituída com a variância da maré observada (BOON, 2007):

$$RV = \frac{\sum [h(t) - h_0]^2}{\sum [h_t - h_0]^2} \quad (10)$$

onde, $h(t)$ é a altura da maré reconstituída no instante t ; h_t é a altura da maré observada no instante t ; e h_0 é a média aritmética das alturas h_t . Como exemplo, um $RV = 0,90$ indica que 90% da variância da maré observada pode ser descrita pelo modelo. Outras estatísticas utilizadas foram: média, desvio padrão e assimetria dos resíduos (diferença da maré reconstituída com a maré observada).

Como apresentado em 2.1.5, há uma controvérsia em utilizar ou não constituintes de longo período nas reconstituições de maré. Em virtude disto, o autor decidiu calcular as reconstituições de maré sem as constituintes de longo período.

3.4.3 Cálculo dos Resíduos das Séries

Os resíduos foram calculados subtraindo a maré reconstituída da maré observada. A partir das séries de resíduos, foram aplicados filtros, construídos histogramas e feitas análises espectrais.

3.4.4 Aplicação de Filtros nas Séries

Uma das maneiras de extrair informações de séries temporais é através da aplicação de filtros. Para comparar a série de dados maregráficos ou resíduos com algumas outras séries temporais de dados, como a de pressão atmosférica, Parker (2007) diz que é aconselhável aplicar o mesmo filtro nas séries analisadas.

Os filtros geralmente são classificados como: *filtros passa-baixa*, permitem que passe a energia abaixo de uma determinada frequência; *filtros passa-alta*, permitem que passe a energia acima de uma determinada frequência; *filtros passa-banda*, permitem que passe a energia entre duas frequências determinadas; e *filtros rejeita-faixa*, não permite que passe energia entre duas frequências determinadas.

As frequências de interesse no âmbito desta dissertação são (MIRANDA; CASTRO; KJERFVE, 2012):

- frequência de maré ou mareal: corresponde a frequência de uma a duas oscilações por dia;
- frequência supramareal: corresponde a frequências maiores que as de maré;
- frequência submareal: corresponde a frequências menores que as de maré.

As frequências mareais serão determinadas através da análise harmônica, com a determinação das amplitudes e fases para cada constituinte. As frequências supramareais são eliminadas pelo próprio sistema do marégrafo (que funciona como um filtro mecânico) e também pela taxa de amostragem de 1h. Na faixa de frequência submareal estão concentrados os efeitos meteorológicos (MELO FILHO, 2017) e para a extração das frequências desta faixa foi utilizado um filtro passa-baixa no domínio do tempo.

A filtragem no domínio do tempo consiste na convolução da série temporal (x_t) com os pesos do filtro utilizado (w_k) na seguinte forma (UAISSONE, 2004):

$$y_t = \sum_{k=-N}^N w_k x_{t+k} \quad (11)$$

O número de elementos do filtro (N) e a magnitude dos pesos (w) usados definem a resposta do filtro (y_t). Os pesos obedecem às condições de simetria e normalização, respectivamente:

$$w_k = w_{-k} \quad \text{e} \quad \sum_{k=-N}^N w_k = 1 \quad (12)$$

A resposta do filtro ($H(w)$) é definida como:

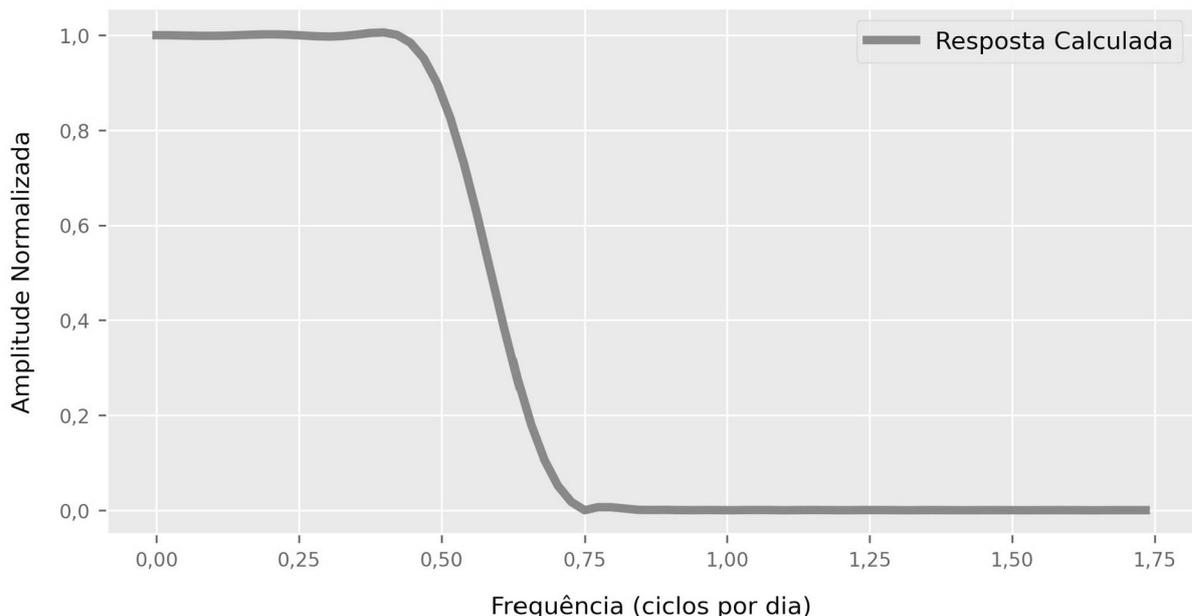
$$H(w) = \begin{cases} 1, & w < w_0 \\ 0, & w > w_0 \end{cases} \quad (13)$$

Ou seja, o filtro elimina as frequências maiores que um certo valor de frequência w_0 e deixa passar as frequências menores que w_0 .

Kalil (1999), lista alguns dos principais filtros passa-baixa utilizados em oceanografia: o filtro X0 de Doodson & Warburg; o filtro de Godin; o filtro co-seno de Lanczos quadrado; e o filtro de Thompson.

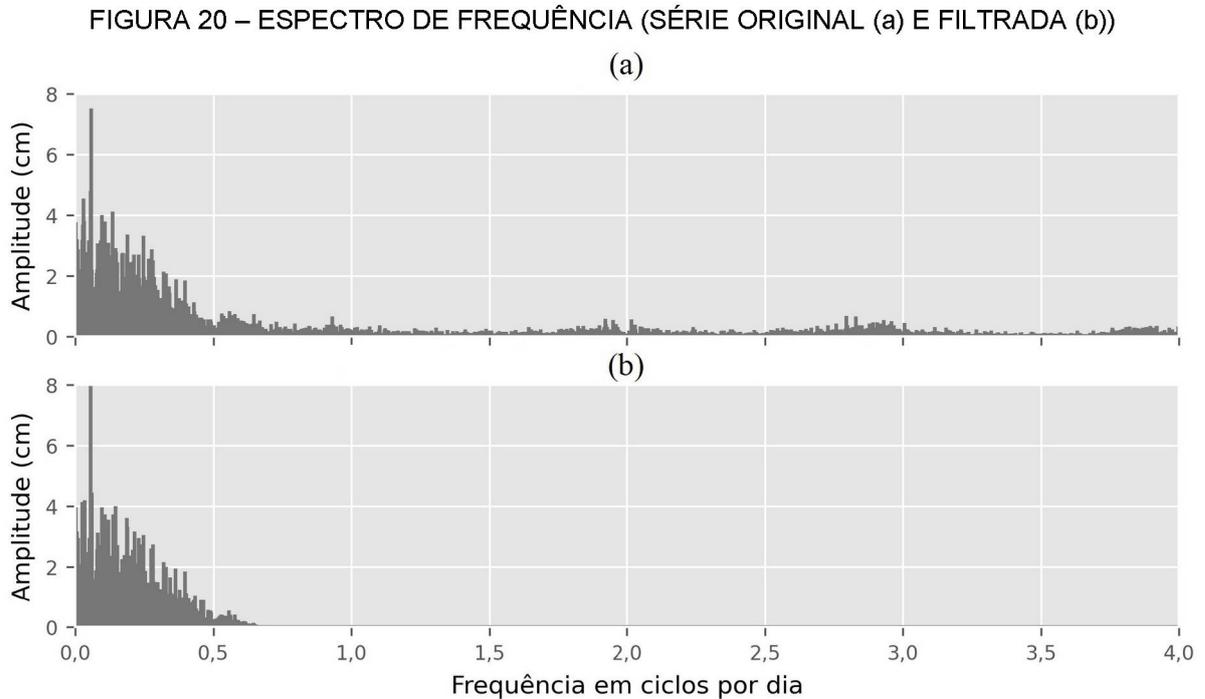
Neste trabalho, foi utilizado o filtro passa-baixa ótimo de Thompson cujos pesos foram calculados por Oliveira (2004) para a mesma área de estudo. Na determinação dos pesos deste filtro, Oliveira (2004) utilizou as principais componentes astronômicas locais diurnas, semidiurnas e de águas rasas bem como a frequência inercial ou de Coriolis ($f = 2 \Omega \sin \varphi$, em que Ω é a velocidade angular de rotação da Terra e φ é a latitude local). As frequências de corte foram: $\Omega_1 = 6,4 \text{ }^\circ/\text{h}$ (0,4267 ciclos por dia); e $\Omega_2 = 11,2 \text{ }^\circ/\text{h}$ (0,7467 ciclos por dia), e o número de pesos $N = 120$. A Figura 19 apresenta a resposta em frequência do filtro calculado.

FIGURA 19 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO PASSA-BAIXA ÓTIMO DE THOMPSON UTILIZADO. OBSERVA-SE PESOS UNITÁRIOS PARA FREQUÊNCIAS INFERIORES A 0,75 CPD)



FONTE: O Autor (2021).

Um exemplo da aplicação deste filtro é ilustrado na Figura 20 onde, no gráfico de cima (a), tem-se o espectro de energia por frequência dos resíduos da série GLH_G e no de baixo (b), o espectro da mesma série filtrada.



FONTE: O Autor (2021).

3.4.5 Cálculo do Nível Médio Diário e Mensal

Para o cálculo do nível médio diário foi utilizado o programa NIMED do pacote PACMARÉ empregando a opção do filtro de Thompson. A determinação de NMM mensal foi feita pela média dos níveis diários para cada mês que tivesse pelo menos 30 médias diárias (27 para fevereiro).

3.4.6 Cálculo das Diferenças de Fase das Constituintes M2 e S2 entre GLH, CSW e ATN

Para o cálculo das diferenças de fase das constituintes M2 e S2 entre as EEMM GLH, CSW e ATN, foram utilizadas as observações simultâneas entre as EEMM.

3.4.7 Cálculo da Correlação com Pressão Atmosférica

Os dados de pressão atmosférica foram utilizados para calcular o efeito do barômetro invertido (MELO FILHO, 2017) empregando a equação (14), onde $\Delta\eta$ é a variação do nível em relação ao nível de repouso, Δp_{atm} = é a variação da pressão em relação à pressão na condição de repouso do oceano (1013,3 mbar).

$$\Delta\eta = -0,993 \Delta p_{atm} \quad (14)$$

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONTROLE DE QUALIDADE

4.1.1 Análise das Fichas Descritivas das EEMM

O Quadro 1 apresenta algumas informações de duas fichas da estação 'Ilha das Cobras'. O desnível entre a RN-1 e a RN-2 é de 1,907 m. Observa-se que provavelmente existe uma inconsistência com relação a RN atrelada ao zero da régua da ficha 002/95 (em encarnado). Mediante uma análise das fichas de 1975 e 1995 percebe-se que deve ser a RN1 e não a RN2 conforme indicado no diagrama da ficha. Isto por que ao se analisar as diferentes RN, os dois NM se afastam mais de 1,8 m. Caso seja considerado que é a RN1, os dois NM diferem em 7,9 cm o que seria uma variação normal tendo em vista que os períodos de observação são diferentes e separados por 20 anos. Entretanto, esta discrepância deve ser considerada em caso de reocupação da EM com o propósito de verificar um possível equívoco.

QUADRO 1 – INFORMAÇÕES DA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA COB

Código da Ficha	F-41-1821-002/75	F-41-1822-002/95
Período de observação	15/04/1975 a 16/05/1975	04/05/1995 a 01/06/1995
Régua	Régua de madeira com 4 metros	Régua de madeira com 3,95 metros
Zero do marégrafo	Coincide com o zero da régua.	Coincide com o zero da régua.
Zero da régua	543,8 cm abaixo da RN1	502,4 cm abaixo da RN2
Nível Médio (NMM)	191,2 cm acima do zero da régua (S0)	157,7 cm acima do zero da régua (S0)
Nível de Redução (NR)	98,8 cm abaixo do NM (Z0)	89,99 cm abaixo do NM (Z0)

FONTE: O Autor (2021).

O Quadro 2 apresenta algumas informações das fichas da estação 'Antonina'. Foram encontradas diferenças nos desníveis entre as RRNN cuja origem o autor não conseguiu identificar. Na ficha mais recente, há indicação da mudança na posição da régua. Com esta mudança, espera-se que haja mudanças entre o zero da régua e o NM, mas espera-se que o desnível entre o NM e a RN de referência (RN4) mantenha-se próximo. Entretanto, o NM em relação à RN4 fica:

- na ficha de 1995: 306,5 cm abaixo da RN4;
- na ficha de 1996: 323,98 cm abaixo da RN4;
- na ficha de 1996: 346,0 cm abaixo da RN4.

QUADRO 2 – INFORMAÇÕES DA F-41 DA ESTAÇÃO MAREGRÁFICA ATN

Código da Ficha	F-41-1822-001/97	F-41-1822-001/95	F-41-1822-001/96
Período de observação	01/01/1997 a 31/12/1997	29/04/1995 a 15/06/1995	01/01/1997 a 31/12/1997
Régua	Régua de madeira com 5,05 metros	Régua de madeira com 5,05 metros	Régua de madeira com 5,05 metros
Zero do marégrafo	Coincide com o zero da régua.	Coincide com o zero da régua.	Coincide com o zero da régua.
Zero da régua	563,5 cm abaixo da RN4	563,5 cm abaixo da RN4	460,5 cm abaixo da RN1
Nível Médio (NM)	217,5 cm acima do zero da régua (S0)	257,0 cm acima do zero da régua (S0)	216,93 cm acima do zero da régua (S0)
Nível de Redução (NR)	108,2 cm abaixo do NM (Z0)	110,8 cm abaixo do NM (Z0)	106,31 cm abaixo do NM (Z0)

FONTE: O Autor (2021).

A Tabela 8 apresenta um resumo das informações de todas as F-41 das EEMM. Nota-se ausência de F-41 mais antigas para CSW e GLH. Ao se comparar o nível médio das F-41 com o obtido pela análise harmônica para cada série, percebe-se diferenças (última coluna da tabela 8). Estas diferenças podem ser devidas à variações sazonais ou ao uso de RRNN diferentes na hora da coleta dos dados. Sem verificar a causa destas discrepâncias, estas séries não podem ser inseridas numa possível integração de série para verificação de tendência do NMM.

TABELA 8 – ALTURA DO NÍVEL MÉDIO PARA AS EEMM

Nome da Estação	Código da série	Ano	S ₀ da F-41 (cm)	Nível Médio (PACMARÉ) (cm)	Diferença entre NM calculado e NM da F-41 (cm)
Antonina	ATN_A	1995	257,00	257,03	0,03
	ATN_B	1997	216,93	217,44	0,51
Ilha das Cobras	COB_A	1975	191,20	191,23	0,03
	COB_B	1995	157,70	154,78	-2,92
	COB_C	2018	157,70	150,13	-7,57
Cais Oeste	CSW_A	1992	--	183,10	---
	CSW_B	1994	--	174,20	---
	CSW_C	1994	--	182,20	---
	CSW_D	1995	--	185,96	---
	CSW_E	1996	--	187,20	---
	CSW_F	1999	180,30	181,86	1,56
	CSW_G	2001	180,30	180,16	-0,14
	CSW_I	2001	180,30	169,70	-10,6
	CSW_J	2002	180,30	181,48	1,18
	CSW_K	2003	180,30	186,51	6,21
	CSW_L	2004	180,30	180,13	-0,17
	CSW_M	2004	180,30	179,31	-0,99
	CSW_N	2019	180,30	189,15	8,85
CSW_O	2018	180,30	166,00	-14,3	
Galheta	GLH_A	1975	--	210,51	---
	GLH_B	1995	--	157,25	---
	GLH_C	1995	--	146,91	---
	GLH_D	1996	--	150,88	---
	GLH_E	1996	--	150,11	---
	GLH_F	1996	--	160,28	---
	GLH_G	1997	152,80	152,70	-0,1
	GLH_H	2001	152,80	149,96	-2,84
	GLH_I	2001	152,80	149,69	-3,11
	GLH_J	2005	152,80	153,16	0,36
	GLH_K	2018	152,80	159,53	6,73
	GLH_L	2019	152,80	174,51	21,71
Ponta do Felix	FLX_A	2000	222,20	226,14	3,94
	FLX_B	2000	222,20	223,24	1,04
	FLX_C	2001	222,20	222,81	0,61
	FLX_D	2001	222,20	216,97	-5,23
	FLX_E	2002	222,20	226,34	4,14
Cais Leste	CAL_0	2016	199,20	198,94	-0,26

FONTE: O Autor (2021).

4.1.2 Filtro de Remoção de Dados Espúrios

Nesta etapa, o propósito foi construir um filtro que identifique dados espúrios dentro dos critérios estabelecidos evitando ao máximo a exclusão de dados representativos. O resultado do filtro desenvolvido encontra-se no Apêndice 2, onde verifica-se que para 25 das 37 séries disponíveis, a remoção de dados espúrios não ultrapassou 0,5 % do total da série; para 8 séries, a remoção alcançou uma proporção entre 0,5% e 1%; e 4 séries tiveram mais de 1% dos dados removidos ou substituídos com o máximo de 2,02% de remoção para a série FLX_D..

A Tabela 9 evidencia que a remoção dos dados espúrios reduziu a variância das constituintes calculadas com o PACMARÉ na maioria das séries, destacando-se as seguintes: COB_B, CSW_I, CSW_J, CSW_K, CSW_L, CSW_M, GLH_B, GLH_D, GLH_E, GLH_G. Foi observada uma redução média de 9,86 % na variância a partir das séries filtradas. Considerando as espécies de constituintes separadamente, as reduções foram de 10,38 %, 9,39 %, 8,86 % e 10,81 %, para as espécies de 1, 2, 3 e 4 ciclos por dia, respectivamente. Em 12 séries, a redução na variância foi acompanhada de um aumento no número de constituintes determinadas.

É de se esperar que o impacto da remoção de erros grosseiros tenha efeito maior em séries mais curtas uma vez que o peso deste erro, em relação à amostra, é relativamente maior. Há a ressalva de que este impacto se dará proporcionalmente à magnitude do erro e sua frequência. Para investigar este fato, a partir dos dados da Tabela 9 foram construídos gráficos de dispersão considerando a diferença da variância, em porcentual, e o comprimento da série correspondente, em dias. Os resultados encontram-se nos gráficos das figuras 21 a 24. Nestes gráficos, evidencia-se primeiramente que há um vazio de séries de comprimento entre 400 e 1100 dias, aproximadamente. Desta forma, não foi possível verificar a correlação negativa esperada entre a redução nas variâncias e o comprimento das séries. Entretanto, verifica-se que em séries de comprimento entre 200 e 400 dias foram observadas reduções significativas nas variâncias e como exemplos cita-se a redução média de 62,49 % para CSW_M, com 309 dias e 53,94 % para GLH_B, com 215 dias.

TABELA 9 – VARIÂNCIA DAS ESPÉCIES E NÚMERO DE CONSTITUINTES DETERMINADAS POR SÉRIE FILTRADA E ORIGINAL (PACMARÉ)

Série	Variância das Espécies de 1 Ciclo por Dia		Variância das Espécies de 2 Ciclos por Dia		Variância das Espécies de 3 Ciclos por Dia		Variância das Espécies de 4 Ciclos por Dia		Número de Constituintes Determinadas	
	Original	Filtrada	Original	Filtrada	Original	Filtrada	Original	Filtrada	Original	Filtrada
ATN_A	2,61	2,49	13,01	13,36	14,01	14,45	6,42	6,49	46	47
ATN_B	3,73	3,53	5,11	4,71	10,37	10,11	6,81	6,48	102	102
COB_A	3,65	3,62	3,92	3,79	4,63	4,51	1,03	1,05	24	24
COB_B	24,15	9,16	30,72	17,49	28,15	12,80	25,52	4,67	18	27
COB_C	2,91	2,91	13,63	13,63	10,62	10,62	1,62	1,62	35	35
CSW_A	3,99	3,99	9,11	9,11	5,80	5,80	4,25	4,25	28	28
CSW_B	2,84	2,89	48,49	40,89	24,87	24,03	18,63	15,78	66	61
CSW_C	123,13	119,61	123,13	119,61	123,13	119,61	123,13	119,61	16	16
CSW_D	3,99	3,97	3,94	3,29	5,53	5,31	3,40	3,35	77	76
CSW_E	0,26	0,26	0,92	0,92	5,15	5,15	0,74	0,74	32	32
CSW_F	2,73	2,60	4,33	4,08	8,57	8,23	3,85	3,62	108	106
CSW_G	1,26	1,24	1,21	1,34	0,63	0,59	1,77	1,43	33	33
CSW_I	10,82	6,60	6,98	4,15	25,93	12,58	10,33	5,14	35	42
CSW_J	2,88	2,35	15,91	9,26	8,04	7,54	3,42	2,99	80	87
CSW_K	3,32	2,58	8,39	5,57	6,69	6,25	2,92	2,80	82	85
CSW_L	4,13	3,16	19,44	18,72	8,91	9,05	1,41	1,57	18	18
CSW_M	26,86	8,25	58,95	25,44	42,99	16,70	29,38	10,97	32	67
CSW_N	1,69	1,68	4,01	4,02	11,37	11,39	10,81	10,81	71	71
CSW_O	4,32	4,32	30,00	29,99	14,08	14,08	5,33	5,32	44	44
GLH_A	0,87	0,87	0,89	0,89	0,45	0,45	0,22	0,22	39	39
GLH_B	12,72	3,52	49,46	33,41	10,54	5,10	10,90	4,43	27	43
GLH_C	68,97	68,97	68,97	68,97	68,97	68,97	68,97	68,97	16	16
GLH_D	45,01	37,22	45,01	37,22	45,01	37,22	45,01	37,22	17	17
GLH_E	2,00	1,46	1,96	1,69	5,02	3,80	1,29	1,01	24	25
GLH_F	9,53	9,08	247,88	241,29	36,56	30,41	31,90	30,27	14	15
GLH_G	2,14	1,79	2,96	2,53	2,66	2,58	1,62	1,32	75	78
GLH_H	2,30	2,29	1,75	1,72	0,25	0,25	1,32	1,31	27	25
GLH_I	22,81	21,70	22,81	21,70	22,81	21,70	22,81	21,70	16	16
GLH_J	1,79	1,80	4,19	4,02	3,62	3,52	0,98	0,91	104	105
GLH_K	1,90	1,90	0,62	0,62	1,83	1,83	0,42	0,42	31	31
GLH_L	1,29	1,29	6,39	6,39	2,48	2,48	0,68	0,68	35	35
FLX_A	10,20	10,20	20,85	20,94	21,94	21,92	4,51	4,50	40	40
FLX_B	4,26	4,58	44,11	43,83	25,11	25,51	23,99	24,12	46	47
FLX_C	2,25	2,28	9,79	10,40	12,02	12,15	7,66	7,43	32	31
FLX_D	16,55	17,95	60,80	61,03	19,16	17,68	55,77	48,98	30	26
FLX_E	7,22	6,89	45,89	43,62	49,82	49,21	39,87	38,51	76	76
CAL_0	1,93	1,92	5,38	5,39	8,14	8,14	5,08	5,08	57	57

FONTE: O Autor (2021).

4.2 PROCESSAMENTO

4.2.1 Análise Harmônica

A análise harmônica foi realizada com os dados filtrados e pelos dois programas: AstGeoTop e PACMARÉ. O Apêndice 3 apresenta o resultado da análise harmônica para as maiores séries (filtradas) de cada EM com amplitude e atrasos de fase referidos ao meridiano de Greenwich e respectivos desvios-padrão. Para cada série constam as dez constituintes com as maiores amplitudes.

Ambos os programas possuem interface clara e concisa, com as funções e formulários em língua portuguesa e realizam o processamento de séries de até três anos em poucos segundos. O AstGeoTop possui maior flexibilidade na entrada de dados aceitando, inclusive, o formato dos dados enviados pelo BNDO sem necessidade de alterações. O mesmo não acontece para o PACMARÉ, cujo formato de entrada requer edição ou utilização de *scripts* caso sejam muitos arquivos.

O preparo para a análise pelo AstGeoTop requer que o usuário escolha o número de constituintes a serem determinadas, até o máximo de 69. Entretanto, caso o comprimento da série não seja suficiente para resolvê-las, o programa retorna valores incomuns para as amplitudes das constituintes, de algumas dezenas de metros. Estes valores anormais são, na maioria das vezes, perceptíveis para alguém que conheça a magnitude esperada. Entretanto, especial atenção deve ser dada a séries mais curtas, onde estes valores espúrios podem apresentar-se em menor proporção.

Para a análise no PACMARÉ, o usuário precisa do número de elementos da série e inserir o valor do nível de confiança dos testes realizados pelo programa para aceitar ou rejeitar constituintes de pequena amplitude. O manual sugere 95% de confiança. A saída do programa proporciona as constituintes com estimativa de desvio padrão e, adicionalmente, o espectro das amplitudes dos resíduos.

A tabela 10 reúne o número de constituintes determinadas por cada programa para as séries do grupo “Individuais”.

TABELA 10 – NÚMERO DE CONSTITUINTES DETERMINADAS POR PROGRAMA

Série	Tamanho da Série (dias)	AstGeoTop	PACMARÉ
'ATN_B'	365	45	102
'COB_C'	71	20	35
'CSW_B'	303	45	61
'CSW_F'	1095	45	106
'CSW_J'	398	45	87
'CSW_K'	365	45	85
'CSW_M'	309	45	67
'GLH_B'	215	45	43
'GLH_G'	365	45	78
'GLH_J'	1392	45	105
'FLX_E'	385	45	76
'CAL_0'	109	20	57

FONTES: O Autor (2021)

Uma forma de avaliar a qualidade da maré reconstituída é através do índice RV (BOON, 2007). A Tabela 11 apresenta, para cada série, o RV calculado a partir da reconstituição com as constituintes do AstGeoTop e do PACMARÉ. Percebe-se, em 3 das 12 séries, pequena melhora para as marés reconstituídas pelo PACMARÉ, o que era esperado, dado o número maior de constituintes determinadas por este programa.

TABELA 11 – RV PARA SÉRIES

Série de dados	Tamanho da Série (dias)	RV (AstGeoTop)	RV (PACMARÉ)
'ATN_B'	365	0,88	0,89
'COB_C'	71	0,85	0,83
'CSW_B'	303	0,81	0,75
'CSW_F'	1095	0,85	0,86
'CSW_J'	398	0,83	0,85
'CSW_K'	365	0,85	0,85
'CSW_M'	309	0,82	0,83
'GLH_B'	215	0,81	0,72
'GLH_G'	365	0,79	0,78
'GLH_J'	1392	0,76	0,76
'FLX_E'	385	0,78	0,83
'CAL_0'	109	0,83	0,83

FONTES: O Autor (2021).

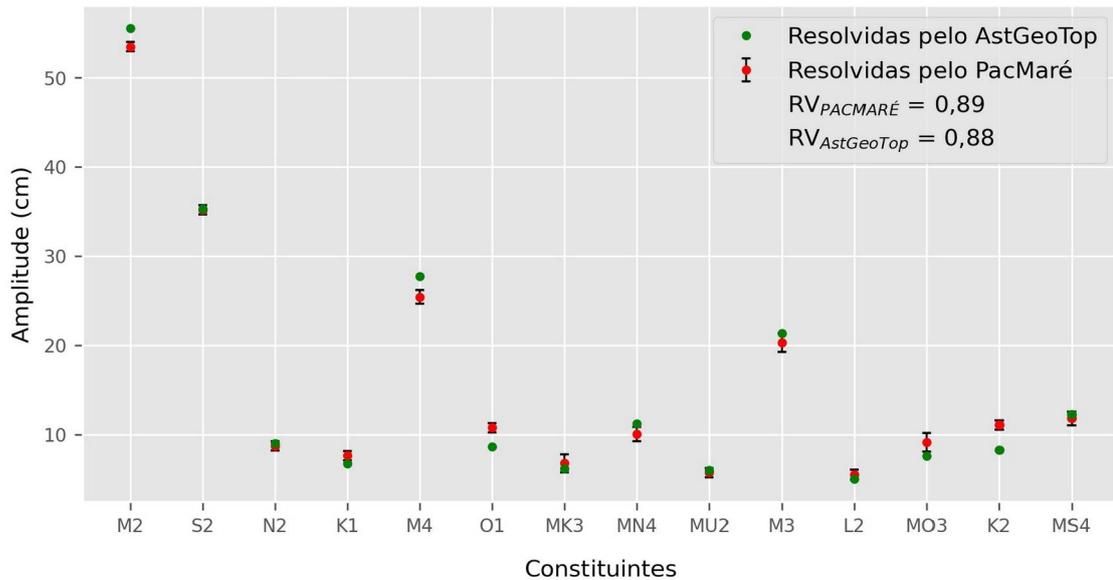
O RV pode ser interpretado como a porcentagem da maré observada que é explicada pelo modelo astronômico.

As constituintes determinadas pelos dois programas são bem similares. Os gráficos das Figuras 25 e 26 evidenciam isso. Nestes gráficos constam as constituintes de até quatro ciclos por dia, determinadas por ambos os programas

com amplitudes de no mínimo 5 cm. Foram escolhidas duas séries com comprimento aproximadamente iguais mas com RV diferentes. Evidencia-se o aumento do desvio padrão das constituintes determinadas pelo PACMARÉ para a série de menor RV (FLX_E).

FIGURA 25 – CONSTITUINTES DETERMINADAS PARA A SÉRIE ATN_B (364 DIAS)

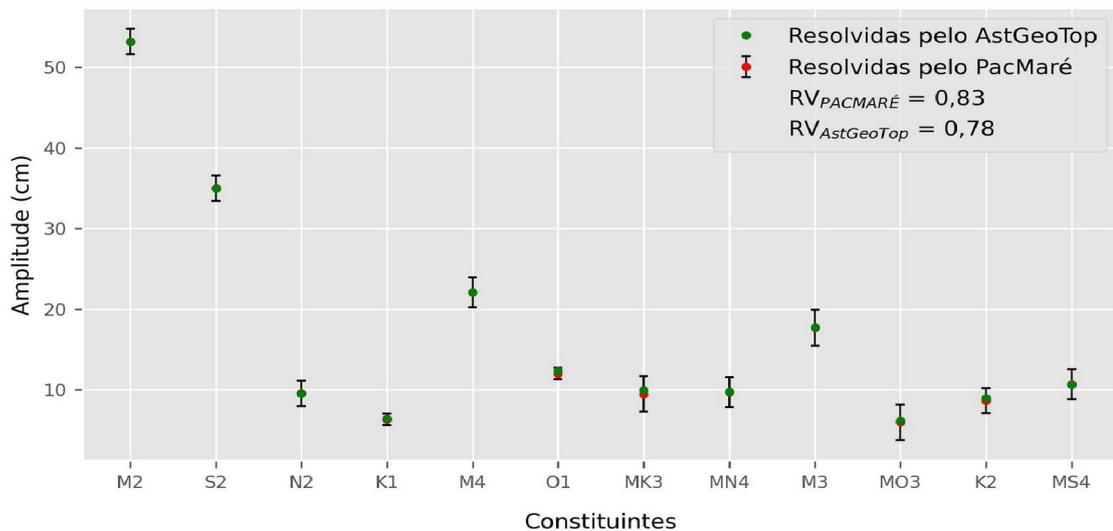
Série ATN_B (364 dias)



FONTE: O Autor (2021).

FIGURA 26 – CONSTITUINTES DETERMINADAS PARA A SÉRIE FLX_E (384 DIAS)

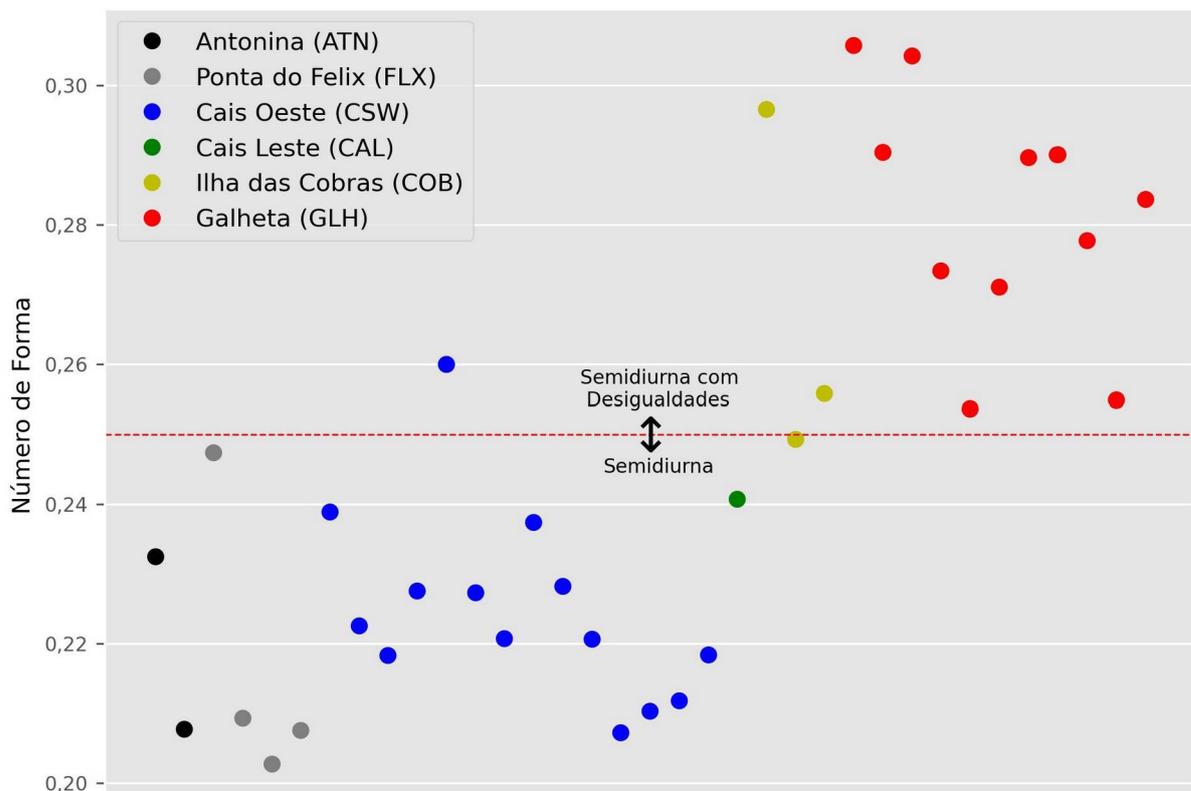
Série FLX_E (384 dias)



FONTE: O Autor (2021).

Com as constituintes calculadas pelo PACMARÉ foi possível calcular o número de forma F (item 2.1.5) para cada série. A Figura 27 apresenta os valores de F com as estações localizadas mais a leste à direita das estações localizadas mais a oeste. A distribuição destes números mostra que a maré tem predominância *semidiurna com desigualdades* na Galheta, corroborando com Marone, Raicich e Mosetti (2013).

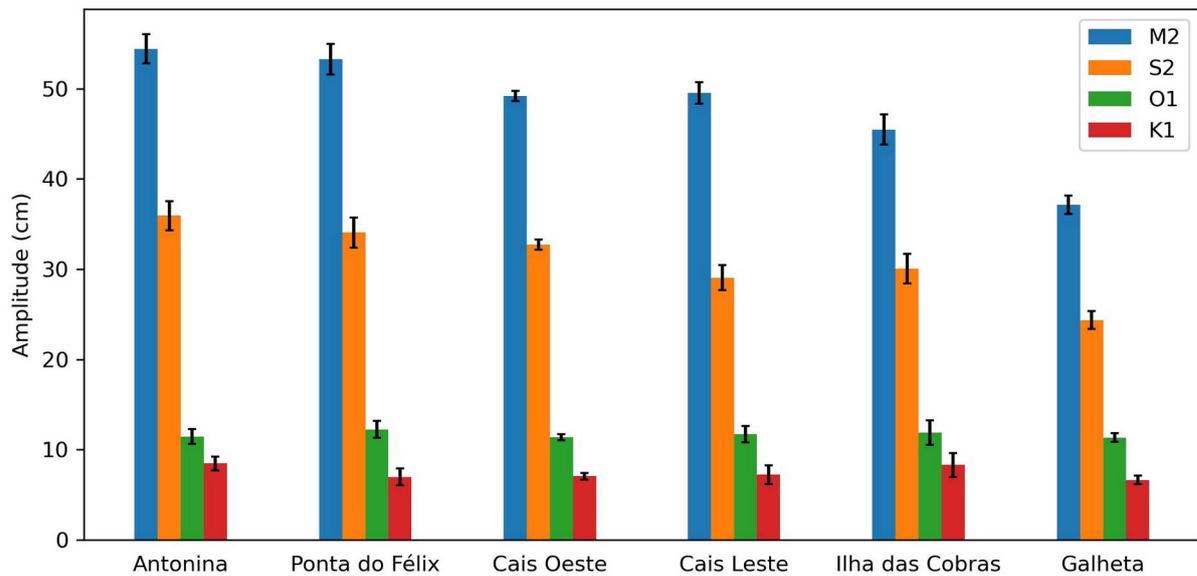
FIGURA 27 – NÚMEROS DE FORMA CALCULADOS A PARTIR DAS SÉRIES INDIVIDUAIS



FONTE: O Autor (2021).

Lembrando da equação (7) que o número de forma F é a razão das constituintes diurnas O1 e K1 com as constituintes semidiurnas M2 e S2, o gráfico da Figura 28 apresenta as amplitudes destas constituintes ao longo da baía. Com as estações mais a leste à direita das estações mais a oeste, percebe-se que a amplitude das constituintes semidiurnas (M2 e S2) tem uma ampliação, de Galheta à Antonina, em maior proporção do que ocorre com as constituintes principais diurnas (O1 e K1), o que explica a redução do número F para o fundo da baía.

FIGURA 28 – AMPLITUDE DAS CONSTITUINTES PRINCIPAIS DIURNAS E SEMIDIURNAS



FONTE: O Autor (2021).

Boon (2007) afirma que a onda de maré ao se propagar em águas rasas (cuja profundidade se aproxima da amplitude de maré, em ordem de grandeza) sofre significativa atenuação causada pelo atrito com o fundo, com a consequente diminuição de amplitude. Porém, se ao chegar na cabeceira da baía a onda não tiver sido totalmente atenuada, então ela pode sofrer uma reflexão. A onda refletida se soma à onda incidente, em fase, e o efeito é uma amplitude resultante maior do que a amplitude incidente (BOON, 2007).

Com o propósito de se ter um entendimento básico do efeito da reflexão da constituinte M2 na baía de Paranaguá, foi construído um gráfico para a propagação da onda utilizando valores aproximados da área de estudo. Este gráfico se baseou no apresentado por Boon (2007, p.77).

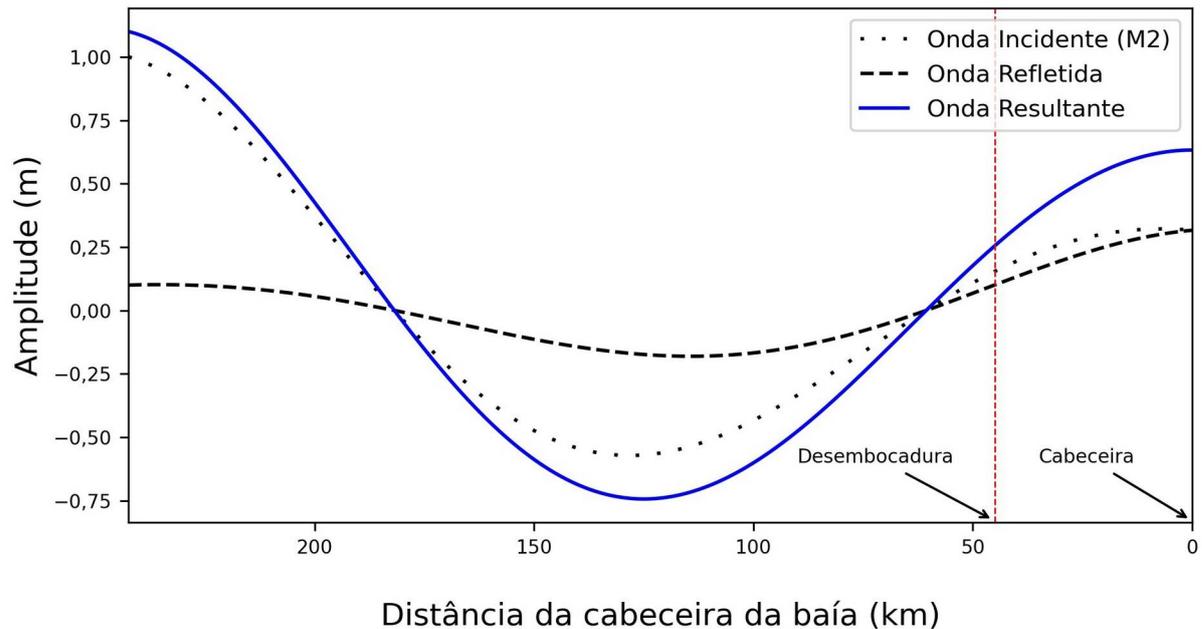
Em primeiro lugar, foi calculado o valor do comprimento de onda (L_s) de M2 em águas rasas. A equação (15) fornece uma aproximação para L_s de uma constituinte com período T quando se propaga em águas rasas com profundidade H e g é a aceleração da gravidade (BOON, 2007).

$$L_s = T \sqrt{gH} \quad (15)$$

Para a constituinte M2, T = 12,42 h e, considerando para a profundidade média na área de estudo o valor de H = 3 m (CAMARGO; HARARI, 2003), o comprimento da M2 na área de estudo é de 242 km, aproximadamente. O

comprimento da baía foi considerado com 45 km. Para uma simulação mais próxima da realidade, foi inserida uma atenuação exponencial de 90%, em todo o trajeto da onda (ainda seguindo o exemplo de Boon (2007)). Para fins de simplificação, a amplitude inicial foi considerada de 1 m. O resultado está apresentado na Figura 29.

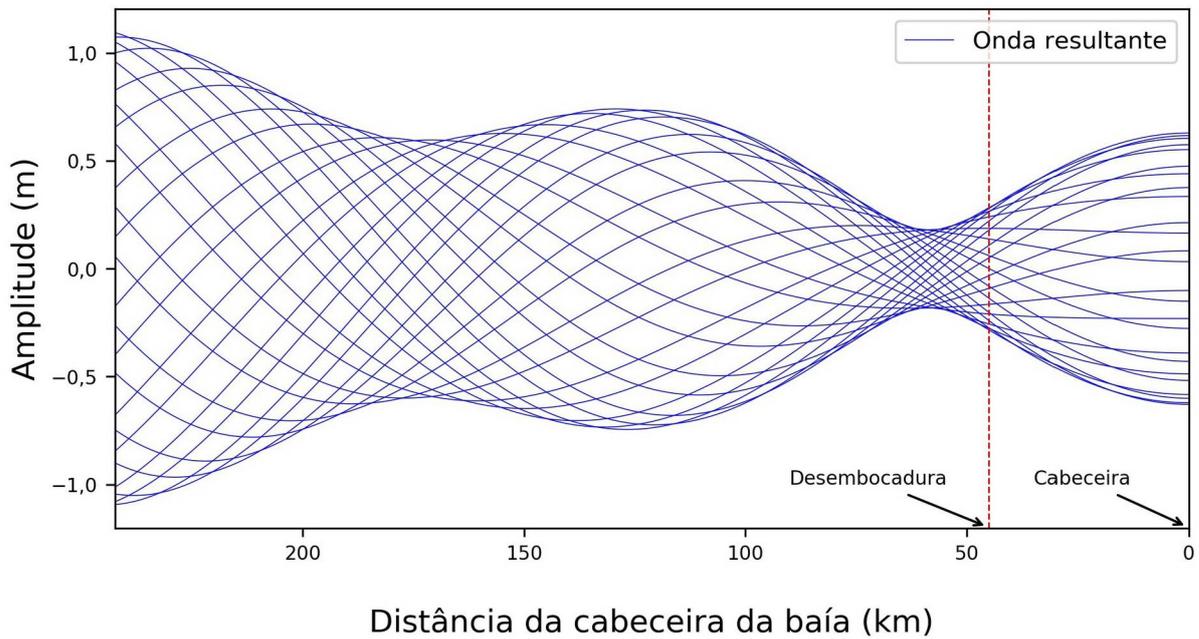
FIGURA 29 – AMPLITUDE DE M2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.



FONTE: O Autor (2021).

O gráfico (Figura 29) mostra uma tendência que se alinha à encontrada na realidade, em que pese todas as aproximações, ou seja, há um aumento da amplitude da onda M2 da desembocadura à cabeceira. Este fenômeno fica mais evidente com a superposição das curvas de maré para cada hora em um intervalo de 25 horas, como ilustrado na Figura 30. Conclui-se, portanto, que é provável que a reflexão contribua significativamente para o aumento da amplitude das constituintes semidiurnas principais na baía de Paranaguá.

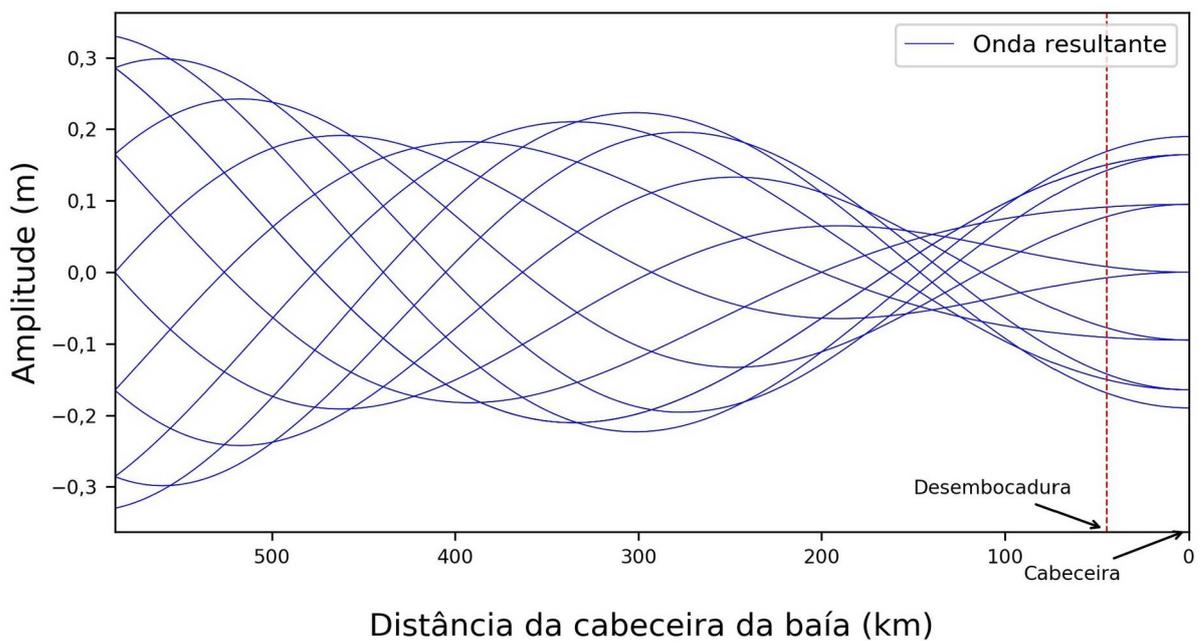
FIGURA 30 – AMPLITUDE DE M2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.



FONTE: O Autor (2021).

Para fins de comparação, o mesmo tipo de gráfico para a constituinte S2 é apresentado na Figura 31 com a amplitude inicial de 1 m (também para fins de simplificação). Nele percebe-se a mesma tendência apresentada pela constituinte M2 na baía de Paranaguá.

FIGURA 31 – AMPLITUDE DE S2 NA BAÍA DE PARANAGUÁ.



FONTE: O Autor (2021).

4.2.2 Verificação do atraso de fase ao longo da baía

A partir da análise harmônica das séries ATN_B, CSW_F, CSW_F (1997) e GLH_G, com constituintes e respectivos desvios-padrão, foi possível elaborar a Tabela 12.

TABELA 12 – DIFERENÇAS DE FASE PARA 'M2' e 'S2' EM RELAÇÃO À GALHETA

	ATN	CSW	GLH
Fase (°) para M2	21,47 +/- 0,81	8,96 +/- 0,74	0
Fase (°) para S2	24,4 +/- 1,27	11,79 +/- 1,14	0

FONTE: O Autor, (2021)

Pela Figura 13 foi possível estimar as distâncias entre GLH e CSW em 23,5 km e entre GLH e ATN em 18,2 km o que evidencia a diminuição do comprimento de onda das constituintes conforme se propagam em direção à cabeceira do estuário, em conformidade com a equação (15).

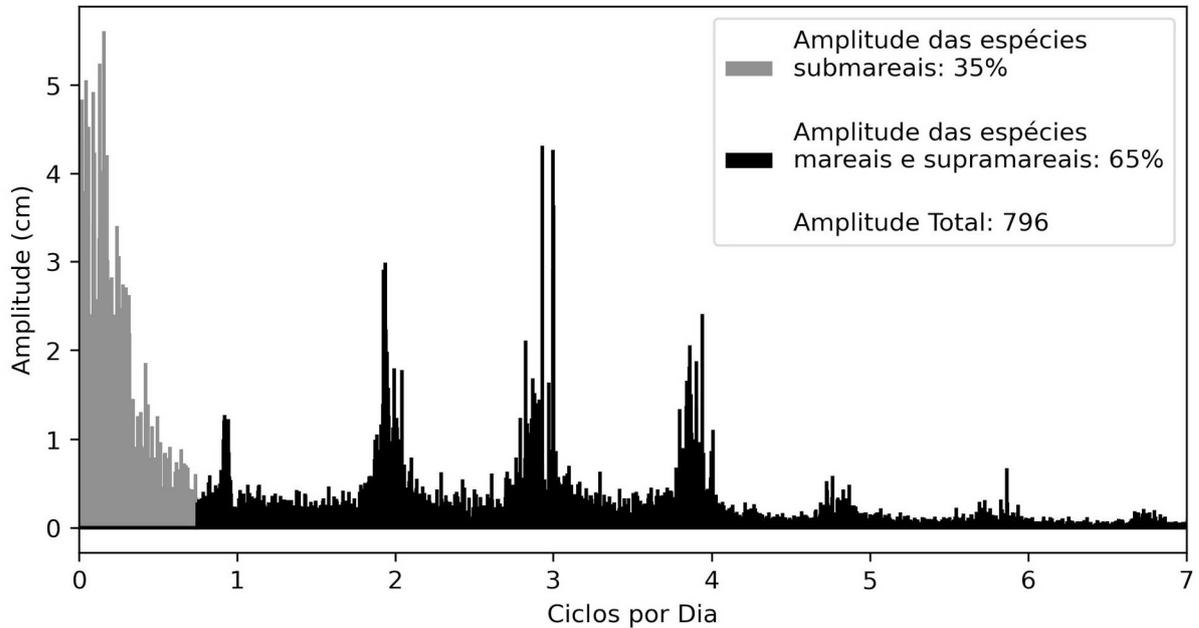
4.2.3 Resíduos

Como já mencionado, os resíduos são o resultado da subtração, das observações, de um modelo determinístico. Portanto, a sua magnitude se deve a influências meteorológicas acrescidas de uma parte aleatória. Entretanto, o modelo nem sempre incorpora todas as frequências consideradas *teóricas* em virtude das limitações do método de análise, do comprimento da série de observações, da qualidade dos dados, entre outros fatores limitantes. A análise espectral dos resíduos evidencia isto. As Figuras 32 e 33 apresentam o espectro de frequências dos resíduos da série CSW_M gerados pelo AstGeoTop e pelo PACMARÉ, respectivamente. Observa-se picos de amplitude em frequências mareais e supramareais que se sobressaem a um fundo de ruído. Este fundo de ruído decai com o aumento da frequência, o que era esperado uma vez que o próprio sistema do marégrafo apresenta um filtro para frequências mais elevadas. Entretanto, nota-se um aumento expressivo nas frequências submareais.

Ainda pela análise espectral dos resíduos foi possível estimar a quantidade de energia dos resíduos por faixa de frequência (submareal; e mareal e

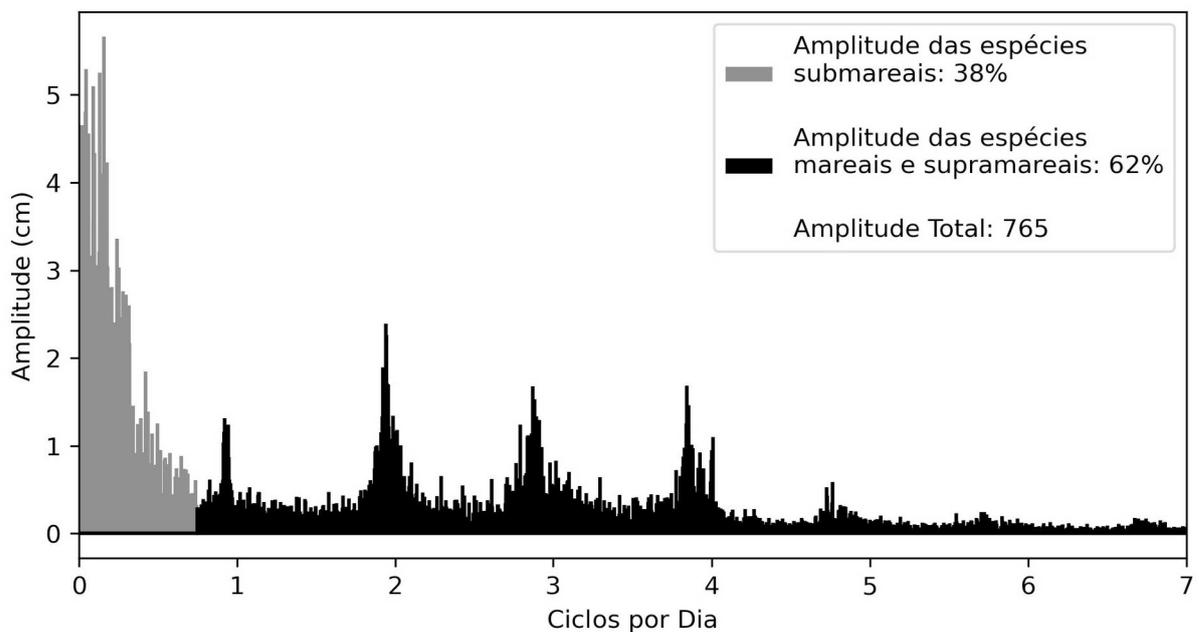
supramareal). Isto foi feito somando as amplitudes contidas em cada faixa. A amplitude total é a soma das amplitudes em todo o espectro.

FIGURA 32 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DA SÉRIE CSW_M (AstGeoTop)



FONTE: O Autor (2021).

FIGURA 33 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS DA SÉRIE CSW_M (PACMARÉ)



FONTE: O Autor (2021).

Comparando as constituintes determinadas por ambos os programas para a série CSW_M, a mesma dos gráficos apresentados anteriormente, nota-se a ausência das constituintes SO3 e SK3, ambas de três ciclos por dia, no resultado do AstGeoTop. No PACMARÉ estas constituintes de águas rasas apresentaram amplitude de 3,86 e 3,47 cm, respectivamente, similares aos picos encontrados no gráfico da Figura 32.

Da leitura dos gráficos indicados nas figuras 32 e 33, percebe-se também que o AstGeoTop deixa passar um pouco mais energia do que o PACMARÉ (796 x 765) e com uma porcentagem maior de energia mareal e supramareal. Esta tendência se observa em todas as séries do grupo 'Séries Individuais', como apresentado na Tabela 13 que contém também o desvio padrão de cada série de resíduos.

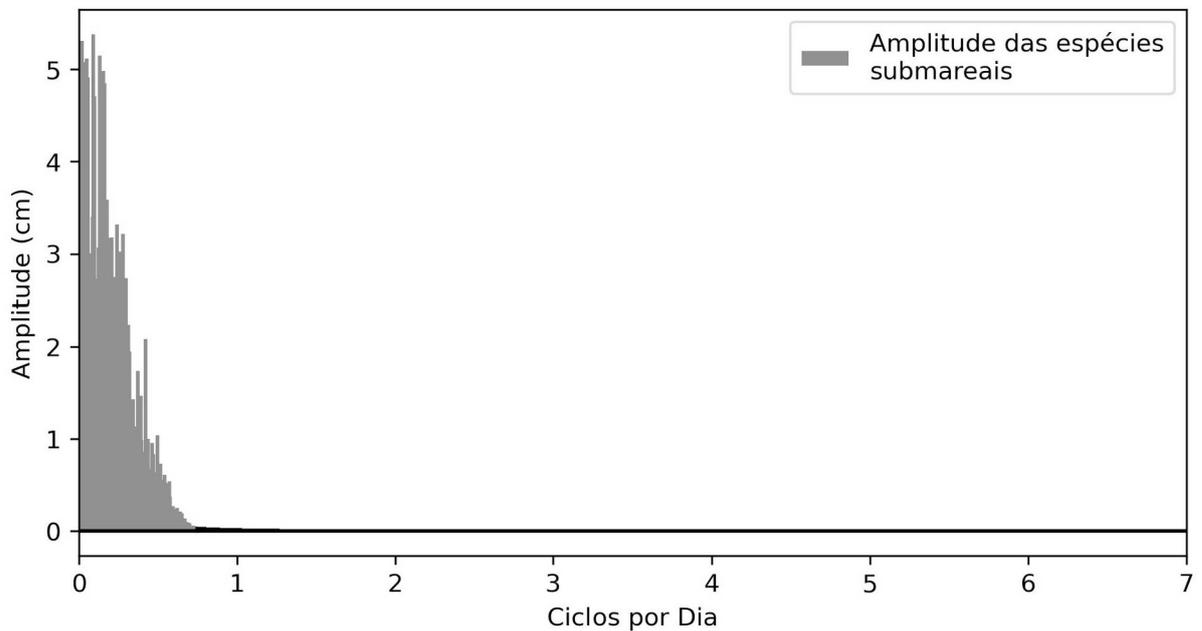
TABELA 13 – AMPLITUDE DOS RESÍDUOS NA FAIXA MAREAL E SUPRAMAREAL

Série	Frequência Mareal e Supramareal		Desvio Padrão (cm)	
	PACMARÉ	AstGeoTop	PACMARÉ	AstGeoTop
'ATN_B'	65%	69%	19,49	21,19
'COB_C'	51%	55%	17,88	17,46
'CSW_B'	64%	68%	27,47	24,16
'CSW_F'	55%	57%	19,54	20,14
'CSW_J'	60%	62%	20,68	21,56
'CSW_K'	56%	60%	20,7	20,81
'CSW_M'	62%	65%	21,62	22,02
'GLH_B'	61%	65%	21,76	18,36
'GLH_G'	51%	54%	18,37	18,21
'GLH_J'	48%	50%	19,55	19,44
'FLX_E'	75%	77%	25,06	28,25
'CAL_O'	54%	61%	18,84	22,14

FONTE: O Autor (2021)

Ao aplicar o filtro passa-baixa de Thompson otimizado na série de resíduos, obtém-se uma série cujo espectro de amplitudes é apresentado na Figura 34, como exemplo para a série CSW_M obtida pelo PACMARÉ.

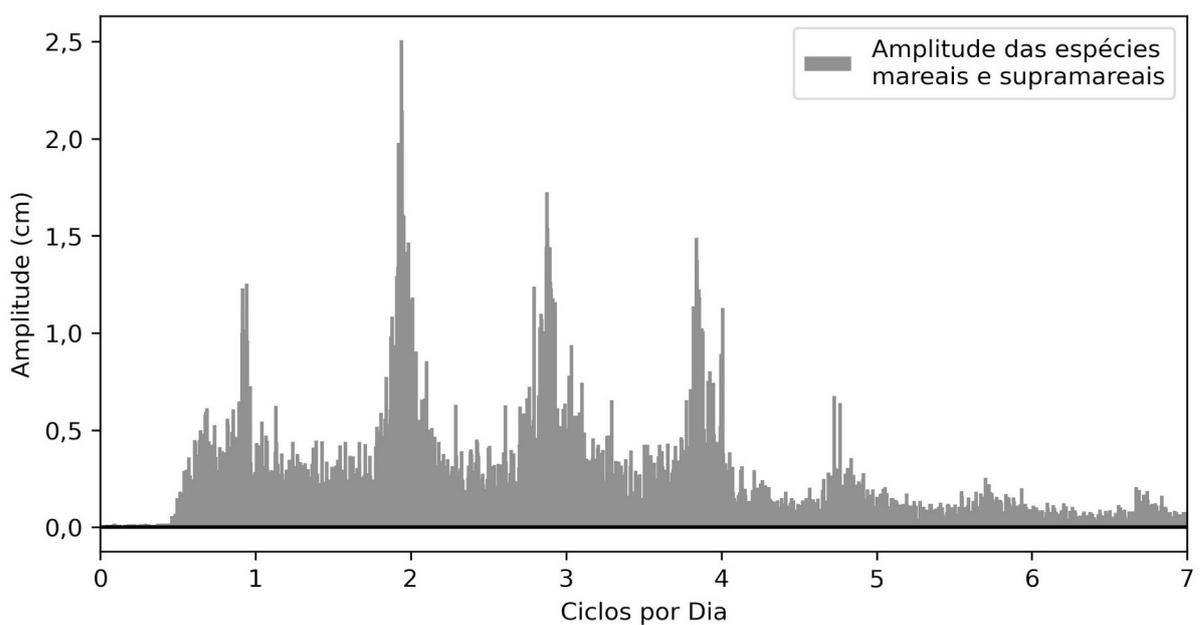
FIGURA 34 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS SUBMAREAIS DOS RESÍDUOS DA SÉRIE CSW_M (PACMARÉ)



FONTE: O Autor (2021).

Se esta série for subtraída da original, obtém-se a série das amplitudes dos resíduos para as frequências mareais e supramareais, cujo espectro está representado na Figura 35.

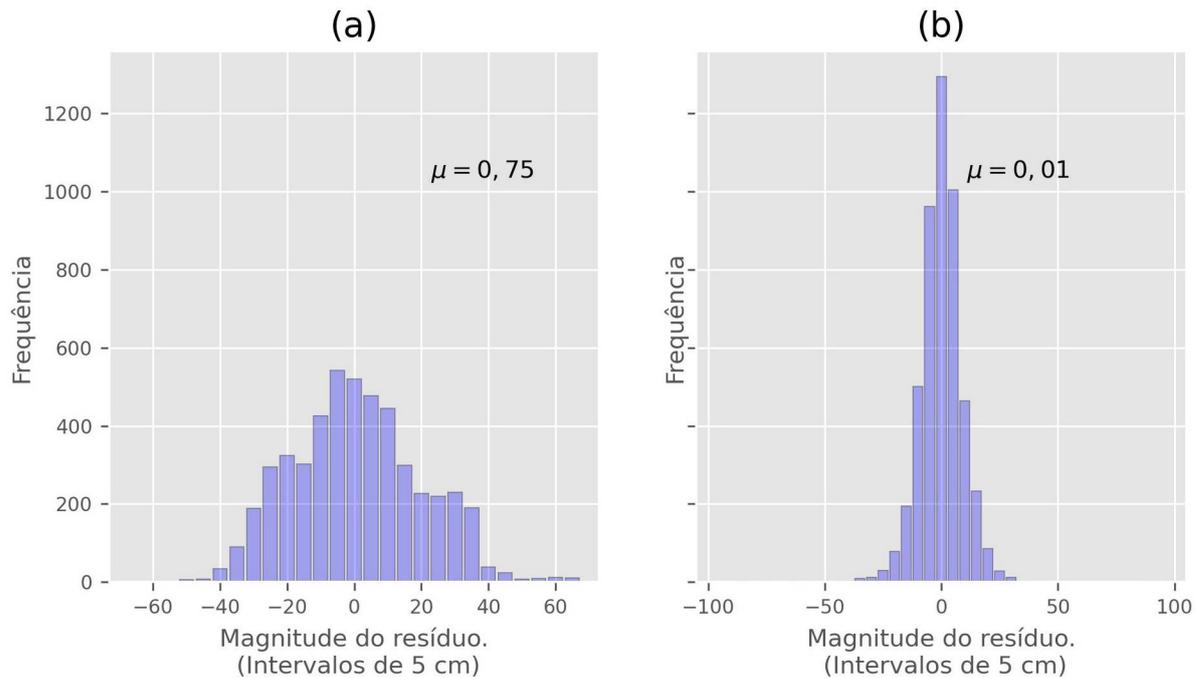
FIGURA 35 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS MAREAIS E SUPRAMAREAIS DOS RESÍDUOS DA SÉRIE CSW_M (PACMARÉ)



FONTE: O Autor (2021).

Avançando neste sentido, foram construídos dois histogramas: um para os resíduos nas frequências submareais, (a) da Figura 36, por exemplo para a série GLH_B; e outro para os resíduos nas frequências mareais e supramareais, (b) da mesma figura.

FIGURA 36 – HISTOGRAMA DOS RESÍDUOS PARA A SÉRIE GLH_B (PACMARÉ)



FONTE: O Autor (2021).

Percebe-se, ao comparar os dois histogramas, a assimetria dos resíduos submareais contrastando com a simetria do segundo. O primeiro histograma também apresenta tendência em sua média, enquanto a média do segundo é próxima de zero.

Para se ter uma medida quantitativa destas tendências foram aplicados dois testes de hipóteses em cada série; um teste de média e outro de normalidade. No primeiro teste, a hipótese nula é a média da população igual a zero. No segundo, a hipótese nula é a de que a população tem distribuição normal. Inicialmente, as séries foram divididas mensalmente, uma vez que os efeitos sazonais podem se cancelar. O resultado encontra-se no Apêndice 4. Os resíduos submareais, tiveram as hipóteses nulas para a média igual a zero rejeitadas em 78% das vezes, contra 0% para as séries de resíduos mareais e supramareais. Para o teste de normalidade, os resíduos submareais tiveram as hipóteses nulas rejeitadas em 100% das vezes,

contra 56% para as séries mareais e supramareais (Tabela 14). Destes resultados conclui-se que os resíduos mareais e supramareais possuem características mais próximas de erros aleatórios do que os resíduos na faixa submareal.

TABELA 14 – PROPORÇÃO DAS SÉRIES COM HIPÓTESES NULAS REJEITADAS.

Faixa de Frequência	Hipótese Nula Rejeitada	
	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
Frequência Submareal	78%	100%
Frequência Mareal e Supramareal	0%	56%

FONTE: O Autor (2021).

Marone, Raicich e Mosetti (2013) sugerem o seguinte modelo à análise de dados meteorológicos:

$$\zeta(t) = \left[\sum_I^N H_i \cos(\omega_i t + G_i) \right] + \left[\sum_I^N h_i \cos(v_i t + g_i) \right] + \epsilon(t) \quad (16)$$

onde H, G e ω referem-se a constituintes puramente astronômicas (incluindo as de águas rasas); h, g e v correspondem a outros sinais oscilantes presentes no nível do mar e $\epsilon(t)$ como um ruído verdadeiramente aleatório. Em que pese o fato de que as frequências mareais e supramareais possuem sinais periódicos de origem astronômica e de águas rasas ainda não modelados, elas podem ser consideradas como uma aproximação dos erros puramente aleatórios da equação (9). As frequências submareais, por sua vez, podem ser consideradas como uma aproximação do segundo termo do segundo membro da equação (16) (marés meteorológicas). Marone, Raicich e Mosetti (2013) ressaltam que a natureza das constituintes para este segundo termo ainda é objeto de investigações futuras. O índice N, portanto, é especulativo, não sendo necessariamente igual ao número de constituintes astronômicas.

A partir dos resultados expostos acima, os *resíduos na faixa submareal* foram utilizados para analisar a predominância de maré ao longo do ano e verificar a existência de eventos extremos.

Para a predominância foi considerada a média mensal dos resíduos da seguinte forma: em caso de média positiva, então há predominância de marés

positivas, ou seja, sobre-elevação do NMM em relação à maré reconstituída; e em caso de média negativa, há predominância de marés negativas, ou seja, rebaixamento do NMM em relação à maré reconstituída. Em caso de média igual a zero, então não há predominância de marés.

Para a identificação de eventos extremos, os dados foram organizados em ordem crescente e utilizados os percentis da seguinte forma: no caso do valor absoluto do 5º percentil maior que o valor absoluto do 95º percentil, então há extremos de maré negativa; e em casos do valor absoluto do 5º percentil menor que o valor absoluto do 95º percentil, então há de extremos de maré positiva. Em caso de distribuição normal, então maré sem predominância de extremos.

Em resumo:

- Só há predominância se a média dos resíduos, \bar{X} , for diferente de zero e o teste para média igual a 0 for rejeitado:

	H0: $\mu = 0$ Não rejeitada	H0: $\mu = 0$ Rejeitada
$\bar{X} > 0$	Maré sem Predominância	Maré com Predominância Positiva
$\bar{X} < 0$	Maré sem Predominância	Maré com Predominância Negativa

- Só há extremos, caso o teste da hipótese de normalidade for rejeitado:

	H0: População Normal Não Rejeitada	H0: População Normal Rejeitada
$ P_5 > P_{95} $	Sem extremos	Extremos de maré negativa
$ P_5 < P_{95} $	Sem extremos	Extremos de maré positiva

Aplicando os critérios descritos anteriormente, os resultados foram reunidos no Quadro 3. Nesse quadro, a cor azul representa predominância positiva; a cor rosa, predominância negativa; a cor cinza, sem predominância; e os símbolos ‘ + ’ e ‘ - ’ representam a existência de extremos positivos e negativos, respectivamente.

QUADRO 3 – PREDOMINÂNCIA DA MARÉ METEOROLÓGICA AO LONGO DO ANO NA ÁREA DE ESTUDO.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ATN_A					+							
ATN_B	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	
CAL_0			+	+								
COB_B					+							
COB_C						+	-					
CSW_B	-	+	+	+	+		+	-	-	-		
CSW_D				+	+	+	+	-	-	-	-	
CSW_E					+							
CSW_F	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+
CSW_F	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-		+
CSW_F	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	+
CSW_G	+											
CSW_I							+	-	+	-		
CSW_J											-	+
CSW_J	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	
CSW_K	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-
CSW_L	-											
CSW_M			-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
CSW_N										+	+	+
CSW_N	+	+										
CSW_O									-	+		
FLX_A					-							
FLX_B										+	+	
FLX_C	+											
FLX_D			+	+								
FLX_E						+		-	-	-	-	+
FLX_E	+	+	+	+	+							
GLH_B					+	+	+	+	+	-	-	
GLH_C												+
GLH_E					+							
GLH_F							+	+				
GLH_G	+	-	+	+	+	+	-	-	-		-	+
GLH_H	+											
GLH_J						+	-	-	-	-	-	+
GLH_J	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
GLH_J	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
GLH_J	-	+	-	+	+	+		-	-	-	-	+
GLH_J	+	-										
GLH_K											-	
GLH_L				-								

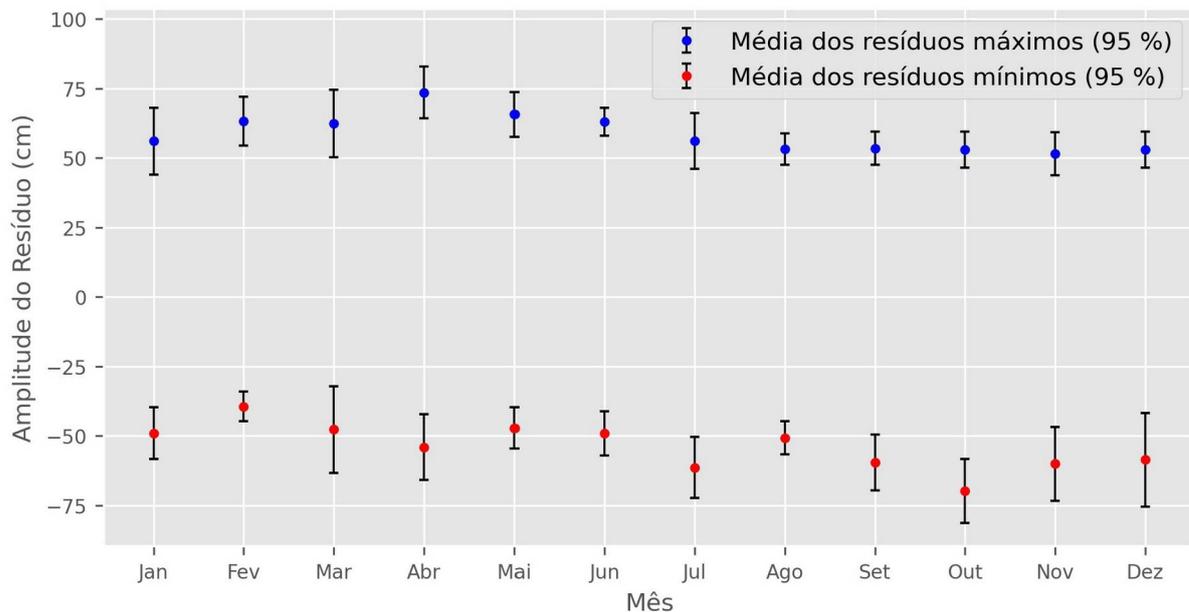
FONTE: O Autor (2021)

Observa-se a predominância de marés positivas no primeiro semestre, nos meses de fevereiro a junho. As marés negativas se concentram nos meses de julho

a novembro. Eventos extremos positivos predominam de dezembro a julho, com maior frequência nos meses de abril, maio e junho. Eventos extremos negativos predominam nos meses de agosto a novembro.

A partir dos resíduos em ambas as faixas de frequência (submareal; e mareal e supramareal) foram calculados os valores médios mensais com 95% de nível de confiança ($1,96 \times$ desvio padrão). Estes resultados podem ser visualizados na Figura 37. Nela, observa-se maiores resíduos positivos no primeiro semestre, com valor médio máximo em abril. As marés mais baixas ocorrem no segundo semestre, com eventos extremos em outubro.

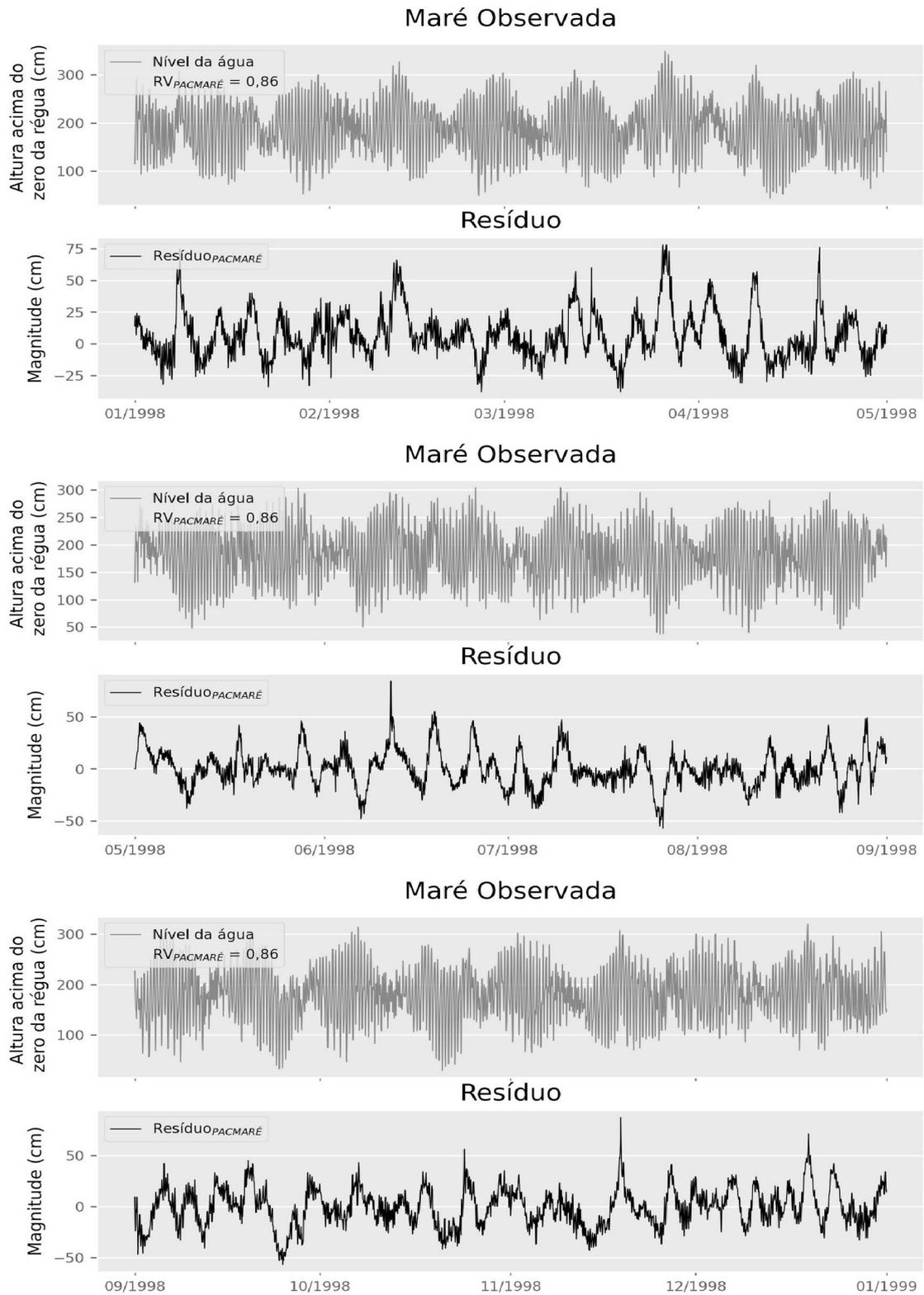
FIGURA 37 – VALORES MÉDIOS MENSAIS PARA OS RESÍDUOS DA SÉRIE ATN_B (PACMARÉ)



FONTE: O Autor (2021).

Os gráficos dos resíduos da série CSW_F, no ano de 1998 da Figura 38 evidenciam esta tendência. Neles percebe-se, no primeiro quadrimestre, maiores resíduos positivos. Para esta série, as médias dos resíduos para os meses de janeiro a abril são: janeiro, 4,19 cm; fevereiro, 9,18 cm; março, 8,01 cm; e abril, 4,33 cm. Esta tendência se reverte a partir de julho, indo até novembro, com predominância de resíduos negativos como evidenciado pelas médias: julho, -4,54 cm; agosto, -1,34 cm; setembro, -2,87 cm; outubro, -1,42 cm; e novembro, -3,51 cm.

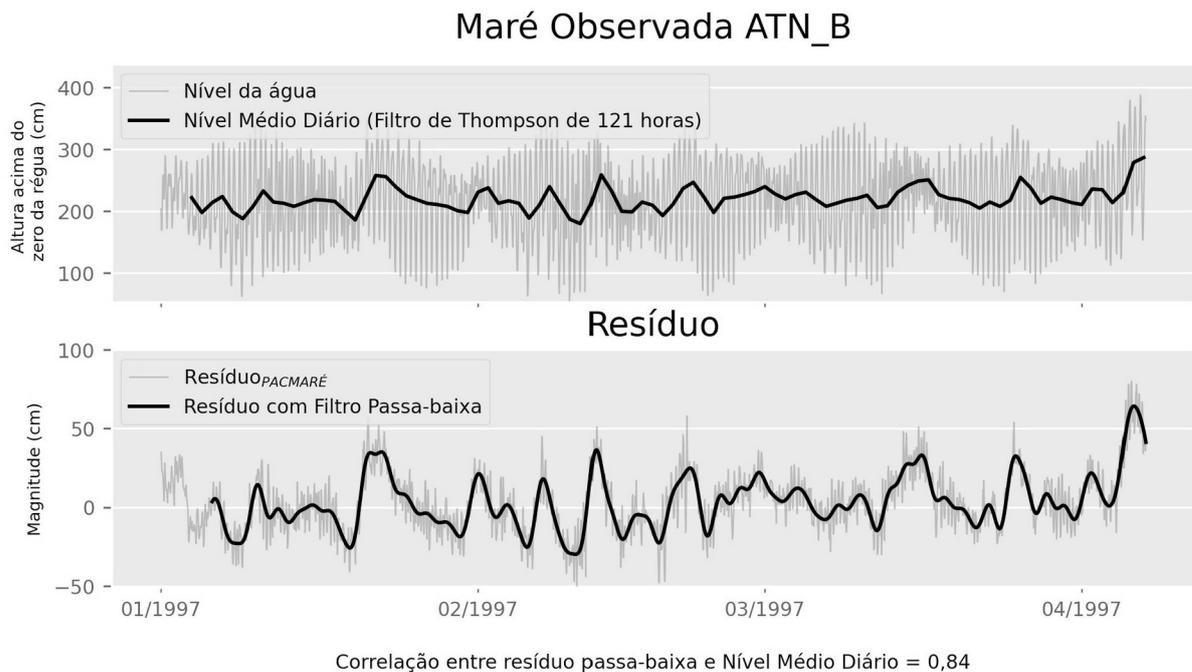
FIGURA 38 – NÍVEL DA ÁGUA E RESÍDUO PARA A SÉRIE CSW_F (1998) (PACMARÉ)



FONTES: O Autor (2021).

Os resíduos filtrados com o filtro passa-baixa de Thompson apresentaram correlação significativa com o nível médio diário calculado pelo PACMARÉ. A Figura 39 apresenta um exemplo para a série ATN_B, com correlação de 0,84.

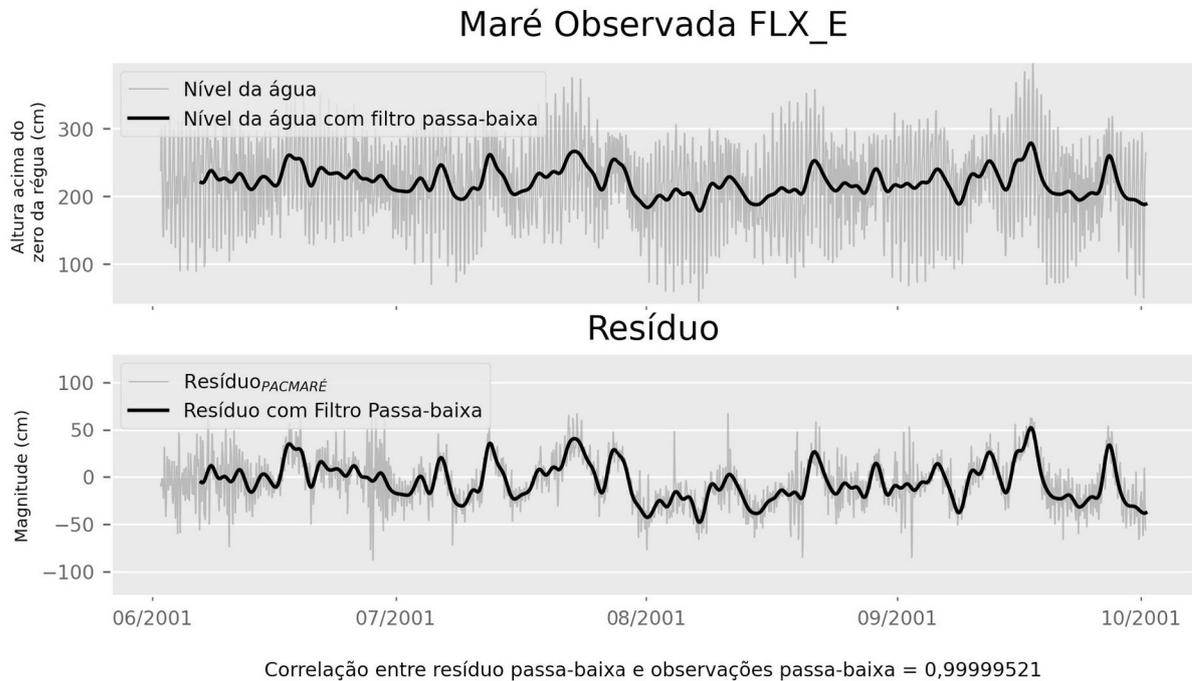
FIGURA 39 – CORRELAÇÃO ENTRE RESÍDUOS E NÍVEL MÉDIO DIÁRIO DO MAR PARA A SÉRIE ATN_B



FORNE: O Autor (2021).

O nível médio diário é obtido pela convolução de um filtro com uma janela de 121 horas nas observações. Já os resíduos, são obtidos pela subtração das observações do valor da maré reconstituída. Portanto, esta correlação elevada evidencia que ambos os processos são 'permeáveis' ao sinal de baixa frequência. Caso o filtro seja aplicado às observações, a correlação entre os resíduos com aplicação passa-baixa e observações passa-baixa é positiva quase perfeita. A Figura 40 exemplifica este fato para a série FLX_E.

FIGURA 40 –CORRELAÇÃO ENTRE RESÍDUOS E NÍVEL DO MAR FILTRADOS PARA A SÉRIE FLX_E



FONTE: O Autor (2021).

Conclui-se que o nível médio calculado desta forma, reflete as oscilações meteorológicas e aleatórias mais do que uma tendência de referência.

A partir dos níveis médios diários, foi possível calcular os níveis médios mensais e, a partir deles, se obter uma estimativa para o nível médio mensal ao longo do ano. Devido ao comprimento das séries disponíveis, só foi possível realizar esta estimativa para as EEMM CSW e GLH. Os resultados estão reunidos na Tabela 15.

TABELA 15 – MÉDIA MENSAL DO NÍVEL DO MAR EM CSW E GLH

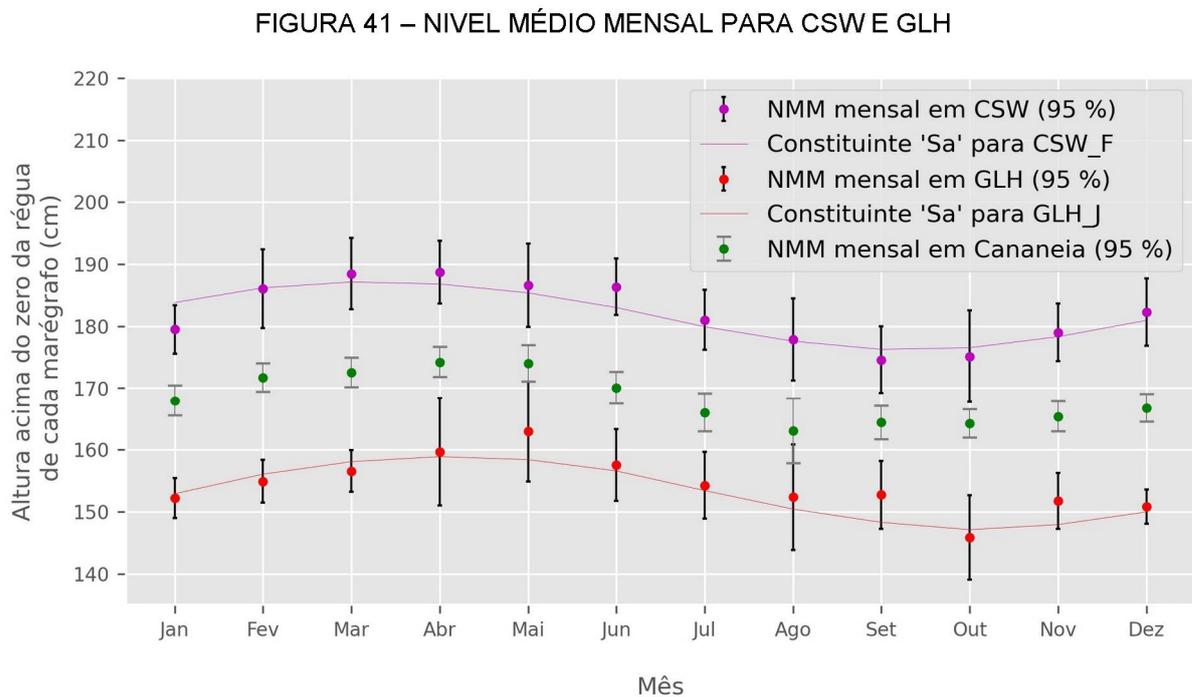
CSW	Nível Médio (cm) acima do zero da régua do marégrafo.	179,52	186,03	188,48	188,75	186,59	186,36	181,04	177,88	174,59	175,15	179	182,29
	Intervalo de Confiança para 95%.	3,91	6,33	5,76	5,06	6,71	4,55	4,83	6,61	5,37	7,44	4,63	5,4
GLH	Nível Médio (cm) acima do zero da régua do marégrafo.	152,2	154,89	156,53	159,68	162,98	157,52	154,26	152,35	152,71	145,83	151,75	150,81
	Intervalo de Confiança para 95%.	3,24	3,43	3,36	8,71	8,09	5,78	5,41	8,53	5,44	6,78	4,54	2,76
Mês		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez

FONTE: O Autor (2021).

Para melhor visualização estes dados foram plotados em um gráfico, Figura 41. Neste gráfico também foram incluídas: a constituinte Sa para ambas as EEMM e o nível do mar mensal de Cananéia, SP.

Percebe-se a correlação da variabilidade do NMM ao longo do ano com a constituinte Sa.

A EM de Cananéia está a aproximadamente 80 km de Paranaguá. Nota-se o comportamento sazonal de oscilação do nível do mar na região.



FONTE: O Autor (2021).

4.2.4 Correlação com Dados Meteorológicos

Para investigar o efeito do barômetro invertido nas observações do nível da água foram utilizados dados de três séries simultâneas para o ano de 1997: ATN_B, CSW_F e GLH_G e dados de pressão atmosférica.

Os dados de pressão atmosférica apresentaram média de 1013,9 mb com máximo de 1031,3 mb em agosto e mínimo de 997,5 mb em setembro. A taxa de amostragem dos dados de pressão atmosférica obtidos pelo INMET é de três

observações por dia (às 0h, 12h e 18h). Para compatibilizar com os dados maregráficos, os dados de pressão foram interpolados para a taxa horária.

As observações foram subtraídas do efeito barômetro invertido (BI) (item 3.4.7) e seus resíduos comparados com os resíduos sem o efeito BI. Para comparar as duas séries foram utilizados a RV e o desvio padrão dos resíduos. Os resultados são apresentados na Tabela 16 onde se percebe uma melhora significativa (1 cm) no desvio padrão dos resíduos, acompanhada de um aumento de 0,01 (1%) no RV da série CSW_F.

TABELA 16 – DESVIO PADRÃO DAS SÉRIES COM EFEITO BARÔMETRO INVERTIDO

	RV	Desvio Padrão dos resíduos (cm)
ATN_B	0,89	19,49
ATN_B com BI	0,89	19,56
CSW_F	0,86	19,54
CSW_F com BI	0,87	18,54
GLH_G	0,78	18,37
GLH_G com BI	0,79	18,46

FONTE: O Autor (2021)

Mesmo com estes resultados alcançados para CSW_F (apenas dados do ano de 1997) não foi possível verificar uma significativa correlação com os dados de pressão e o nível do mar utilizando a metodologia proposta. Este resultado era esperado uma vez que se trata de um fenômeno complexo, como resalta Melo Filho (2017) exemplificando a possibilidade de ressonância entre a forçante (pressão atmosférica) e a resposta (elevação ou rebaixamento do NMM), a qual implicaria numa amplificação do nível bem acima da resposta “estática”. Por outro lado, o mesmo autor, citando Hoar e Wilson (1994) na página 11, assevera que “a aproximação do BI é razoável na maior parte dos oceanos, mas uma parte da variabilidade do nível do mar pode estar relacionada com a pressão atmosférica por meios outros que não o BI”. Outro argumento apresentado, desta vez ao citar Chelton e Davis (1997) na página 12, pontua que na costa, resultados sobre a validade do BI são menos conclusivos pela dificuldade de separar os efeitos da pressão com os efeitos do vento, fenômenos fortemente correlacionados. Há que se ressaltar que a estação meteorológica está localizada a menos de 5 km ao sul da estação CSW e que, portanto, este resultado pode ter sido influenciado por esta proximidade.

5 CONCLUSÃO

Esta dissertação assumiu como objetivo compreender o fenômeno da maré na área da Baía de Paranaguá – PR. Para atingir este objetivo, esta análise apoiou-se em um conjunto de séries temporais de dados maregráficos da área de estudo, obtidos pelo BNDO. Também foram utilizados dados meteorológicos e dados da EM de Cananeia – SP, obtidos do InMET e do UHSLC (University of Hawaii Sea Level Center – Centro de Estudos do Nível do Mar da Universidade do Hawaii), respectivamente.

Realizou-se, em primeiro lugar uma revisão de literatura onde foi dada ênfase na maré astronômica. Alguns conceitos de referenciais verticais e levantamentos hidrográficos também foram apresentados, temas correlatos quando da utilização de dados maregráficos. O primeiro no que tange à integração de referenciais verticais em zonas costeiras e o segundo uma de suas aplicações práticas mais relevantes.

O trabalho empírico envolveu o tratamento da qualidade de dados, onde foi desenvolvido um conjunto de processos em linguagem Python baseado em orientações da UNESCO/IOC. Como resultado mais relevante desta pesquisa, foi observada uma redução média de 9,86 % na variância das constituintes calculadas com o PACMARÉ a partir das séries filtradas. Considerando as espécies de constituintes separadamente, as reduções foram de 10,38 %, 9,39 %, 8,86 % e 10,81 %, para as espécies de 1, 2, 3 e 4 ciclos por dia, respectivamente. Em 12 séries, a redução na variância foi acompanhada de um aumento no número de constituintes determinadas. Em séries de comprimento entre 200 e 400 dias foram observadas reduções significativas nas variâncias e como exemplos cita-se a redução média de 62,49 % para CSW_M, com 309 dias e 53,94 % para GLH_B, com 215 dias. Para 25 da 37 séries disponíveis, a remoção de dados espúrios não ultrapassou 0,5 % do total da série; para 8 séries, a remoção alcançou uma proporção entre 0,5% e 1%; e 4 séries tiveram mais de 1% dos dados removidos ou substituídos com o máximo de 2,02% de remoção para a série FLX_D.

Para a análise harmônica foram utilizados dois programas, AstGeoTop e PACMARÉ. Os resultados obtidos com esses programas se mostraram similares com relação à amplitude das constituintes. O número de constituintes determinadas pelo PACMARÉ foi maior, na maioria das vezes. Com estes programas os

pesquisadores brasileiros dispõem de excelentes ferramentas em língua portuguesa para o processamento de dados maregráficos. Uma das vantagens do método harmônico no domínio do tempo (AstGeoTop) é que não há necessidade da série temporal contínua. Isto pode ser útil quando da utilização de séries com ausência de dados como por exemplo, resultado de remoção de dados espúrios ou períodos sem coleta de dados devido a problemas instrumentais, por exemplo. O PACMARÉ mostrou melhor desempenho na resolução de constituintes de águas rasas. Através das constituintes obtidas pela análise harmônica observou-se o comportamento predominantemente semidiurno nas EM Antonina, Ponta do Félix e Cais Oeste e semidiurna com desigualdades em Ilha das Cobras e Galheta. Utilizando o índice RV, pode-se concluir que a maré reconstituída por ambos os programas explicou, em média, 82% da variação da maré nos períodos analisados, ou seja, uma influência de maré meteorológica de, aproximadamente, 18 % na área. A ampliação das constituintes baía adentro foi analisada pelo fenômeno da reflexão, concluindo que é provável que este fenômeno contribua significativamente para o aumento da amplitude das constituintes semidiurnas principais na baía de Paranaguá.

Com a análise harmônica de séries simultâneas foi possível estimar a diferença de fase das constituintes M2 e S2 nas EEMM GLH, CSW e ATN. O resultado mostrou concordância com a diminuição teórica do comprimento de onda conforme a onda se propaga em direção à cabeceira, resultado da redução da profundidade.

Pela análise espectral dos resíduos foi possível estimar a quantidade de energia por faixa espectral (mareal; submareal e supramareal).

A utilização do filtro passa-baixa ótimo de Thompson, cujos coeficientes foram calculados por Oliveira (2004), permitiu dividir os resíduos em duas espécies: aleatórios e meteorológicos. Com isso, foi possível traçar um perfil de predominância da maré ao longo do ano na área de estudo, evidenciando a predominância de marés positivas no primeiro semestre, nos meses de fevereiro a junho e marés negativas nos meses de julho a novembro.

A alta correlação entre os resíduos do espectro submareal com o nível médio diário calculado pelo PACMARÉ permitiu concluir que o nível médio calculado desta forma reflete as oscilações meteorológicas. A estimativa dos níveis médios mensais para estações CSW e GLH mostrou estreita concordância com a

constituente meteorológica Sa, e a inclusão do comportamento do nível do mar em Cananéia mostrou efeito similar na região.

A remoção do efeito barômetro invertido das observações permitiu observar uma redução de 5% (1 cm) no desvio padrão dos resíduos para a série CSW_F. Apesar destes resultados, as outras duas séries não apresentaram uma significativa correlação entre os dados de pressão e o nível do mar utilizando a metodologia proposta. Além de ser um fenômeno complexo, a diferença na taxa de aquisição dos dados de pressão atmosférica e dos dados maregráficos pode ter contribuído para não se encontrar estas correlações. Há que se ressaltar que a estação meteorológica está localizada a menos de 5 km ao sul da estação CSW e que, portanto, este resultado pode ter sido influenciado por esta proximidade.

Este estudo apresenta limitações, principalmente no que se refere às amostras de dados maregráficos. Para os serviços de batimetria e dragagem, séries curtas de alguns meses atendem aos requisitos operacionais. Entretanto, é necessária uma série temporal longa, de algumas décadas, para uma estimativa precisa do comportamento do nível médio do mar. Os dados de pressão atmosférica disponíveis para a área de estudo pelo portal do INMET têm uma taxa de aquisição baixa e irregular (0h, 12h e 18h). Dados de pressão com uma taxa de aquisição maior ensejariam uma melhor capacidade de análise numa região onde a maré meteorológica fica em torno de 18%.

5.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Futuras investigações poderiam utilizar dados de estações maregráficas temporárias para aumentar a resolução espacial dos dados maregráficos. A utilização de modelos hidrodinâmicos pode auxiliar na melhor localização destes maregrafos temporários.

Uma busca expedita pelo Banco de Dados Geodésicos do IBGE, resultou em uma quantidade razoável de marcos geodésicos (gravimétricos, altimétricos e GNSS) na área de estudo, especialmente próximos à CSW. Neste sentido, sugere-se que estas análises sejam realizadas com a integração destas informações. Tendo em vista o apresentado em 2.1.7 a respeito do SONEL, a determinação da posição geocêntrica contínua da EM poderia contribuir para o estudo do comportamento do NMM em regiões costeiras.

Outra possível linha de investigação é a modelagem da maré meteorológica. O aumento consistente da capacidade computacional, que eleva a precisão da modelagem de fenômenos meteorológicos e o aumento da disponibilidade de dados ambientais de fontes diversas contribuem para a tornar esta linha de pesquisa promissora para as aplicações costeiras citadas na introdução.

A integração de referenciais verticais em zonas costeiras, requer infraestrutura, manutenção, controle de qualidade, monitoramento, e se reveste de caráter multidisciplinar (tecnologia da informação, geociências, engenharias, entre outras). Um exemplo é a RGRC, implantada pelo IBGE. Uma das aplicações da integração de referenciais verticais é a navegação, cujo principal resultado é a redução de custos pela possibilidade de determinação do calado máximo com maior precisão e utilização de GNSS em serviços de dragagem, por exemplo. A confiabilidade nos resultados desta integração e os requisitos de infraestrutura indicam um alto custo, ou seja, somente portos, praticagem e empresas de transporte poderiam investir em soluções deste tipo. Além disso, cada porto, dadas suas condições hidrodinâmicas particulares, requer uma solução específica. A baía de Paranaguá concentra os fatores que permitem a implantação de uma solução deste tipo: há o porto, um dos maiores do país, ou seja, há a demanda e há capacidade de investimento; há infraestrutura geodésica próxima; há a proximidade com a UFPR, seja o campus politécnico, onde se encontram o LAGEH e o LARAS, seja o Centro de Estudos do Mar. Por isso, este autor considera este aspecto uma oportunidade para UFPR expandir suas pesquisas nos temas nos quais já possui renomada capacidade de produção (modelos hidrodinâmicos, levantamentos batimétricos e Geodésia) e desenvolver, com a indústria, solução técnica para um problema com possibilidade de retorno significativo para a sociedade.

REFERÊNCIAS

ABUBAKAR, A. G. et. al. A review of modelling approaches on tidal analysis and prediction. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, Kuala Lumpur, Malásia, v. XLII-4/w16. p. 23-34. 2019. Disponível em: <<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4-W16/23/2019>>. Acesso em: 23 de jul. de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (ANTAQ). Estatístico Aquaviário. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/ANUARIO/>>. Acesso em: 11 de jan. de 2021.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. Estimation of sea level rise in Santos port (Brazil). **The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation – TransNav**, v. 13, n. 2, p. 453-458, 2019.

AMB PLANEJAMENTO AMBIENTAL E BIOTECNOLOGIA LTDA. **Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do Terminal Portuário localizado no município de Pontal do Paraná, PR**. Disponível em:

<https://docs.ufpr.br/~edugeo/Estudos_Ambientais_Litoral/2005_EIA_RIMA_PortoPontal/EIA/Cap%C3%ADtulo%205/Cap%C3%ADtulo%205.1%20diagn%C3%B3stico%20ambiental%20meio%20f%C3%ADsico.pdf> Acesso em: 13 de jan. 2021.

AVISO SATELLITE ALTIMETRY DATA. Altimetry history. 2021. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry/history.html>>. Acesso em: 03 jan. 2021.

BOON, J. D. **Secrets of the Tide**. Sawston: Woodhead Publishing, 2007.

BOSCH, W. European Experiences on Refinement, Connection, and Unification of Vertical Reference Surfaces in Coastal Zones. In: **Diálogos setoriais: União Européia Brasil**. Rio de Janeiro, jun. 2016a. Disponível em:

<https://www.concar.gov.br/temp/248@Report01final_Relat%c3%b3rio%20preliminar.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BOSCH, W. Analytical Report for Integrating Hydrodynamic and Elevation Models. In: **Diálogos setoriais: União Européia Brasil**. Rio de Janeiro, jun. 2016b. Disponível em: <https://www.concar.gov.br/temp/249@Analytical-Report_2016-07-18.pdf>.

Acesso em: 25 jul. 2019.

BRASIL. Marinha do Brasil (MB). Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). **Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos**. 2º Revisão. 2017. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/node/266>>. Acesso em: 24 jul. 2021.

CALADO, L. G. L. P. **Análise do nível do mar na América do Sul**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

CALDWELL, P. C.; MERRIFIELD, M. A.; THOMPSON, P. R. **Sea level measured by tide gauges from global oceans** — the Joint Archive for Sea Level holdings (NCEI Accession 0019568), Version 5.5, NOAA National Centers for Environmental Information, Dataset, doi:10.7289/V5V40S7W. 2015.

CAMARGO, R. DE; HARARI, J. Modeling the Paranagua Estuarine Complex, Brazil: tidal circulation and cotidal charts. **Revista Brasileira de Oceanografia**, n. 51, p. 23-31. 2003.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **Proximidades da Barra de Paranaguá**. Carta Náutica *Raster*. Escala 1: 100.000. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/cartas-raster>>. Acesso em: 4 ago. 2020.

COELHO, A. L.; ALVES, A. R.; TEIXEIRA, G. L. G. O Efeito da Plataforma Continental sobre a Maré na Costa Leste da América do Sul. **Anais Hidrográficos**. Niterói, RJ. t. LXXII. DHN, 2015.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). Comitê de Integração da Componente Vertical Terrestre e Marítima (CICVTM). Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

COSTA, M. C. **O impacto da maré barotrópica global em escalas climáticas**. 120 p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2017.

CUNHA, C. M. L.; OLIVEIRA, R. C. Introdução. In: _____. **Baixada Santista: uma contribuição à análise geoambiental**. p. 7-9. São Paulo: UNESP, 2015.

DALAZOANA, R. **Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DREWES, H. et al. Scientific foundations of the SIRGAS vertical reference system. In: **International Association of Geodesy Symposium nº 124: Vertical Reference Systems**. Cartagena, Colombia. 2001.

EL-DIASTY, M.; AL-HARBI, S.; PAGIATAKIS, S. Hybrid harmonic analysis and wavelet network model for sea water level prediction. **Applied Ocean Research**, 70. p. 14-21. 2018.

FERREIRA, V. G. **Solução do tipo Brovar para o segundo problema de valor de contorno da geodésia com vistas à modernização de sistemas de altitudes**. 171 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

FOREMAN, M. G. G.; HENRY, R.F. The Harmonic Analysis of Tidal Model Time Series. **Advances in Water Resources**, v. 12, p. 109-120. 1989.

FOREMAN, M. G. G.; CHERNIAWSKY, J.Y.; BALLANTYNE, V. Versatile harmonic tidal analysis: improvements and applications. **Journal of Atmospheric & Oceanic Technology**. n. 26, i. 4, p. 806-817. Apr, 2009.

FRANCO, A. dos S. **Marés, Fundamentos, Análise e Previsão**. 2 ed. Niterói: DHN, 2009.

FRANZ, G. A. S. et al. From regional to local scale modelling on the south-eastern Brazilian shelf: Case study of Paranaguá estuarine system. **Brazilian Journal of Oceanography**, n. 64, p. 277-294, 2016.

FREITAS, S. R. C. de. SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. **Revista Cartográfica**. n. 91. p. 75-91 2015.

GARNÉS, S. J. A. AstGeoTop (2021). Software. Modulo: Análise de Maré © Versão 2016. Departamento de Engenharia Cartográfica. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: UFPR, 1999.

GODIN, G. **The analysis of tides**. Toronto: University of Toronto Press, 1972.

GUO, Z. et al. A harmonic analysis method adapted to capturing slow variations of tidal amplitudes and phases. **Continental Shelf Research**, n. 164, p. 37-44. 2018

HUNT, P. The locus of carthage: Compounding geographical logic. **African Archaeological Review**, n. 26, p. 137-154, 2009.

ILIFFE, J. C. Et al. Accuracy of vertical *Datum* surfaces in coastal and offshore zones. **Survey Review**, n. 331, v. 45, p. 254-262(9). 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Geração de Imagens (DIDGI). Imagem de satélite. CBERS 4/MUX, 156/128 e 156/129. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 05 ago. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 10 de out. de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Tabela 1121 - População residente total e em área costeira e Proporção da população residente em área costeira. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1121>>. Acesso em 16/06/2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais. 2. ed. Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>> Acesso em 18/08/2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Instruções técnicas para Controle Geodésico de Estações Maregráficas – CGEM e sua vinculação vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB. Manuais técnicos em geociências nº 11. Rio de Janeiro, 2010.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRM). München, Alemanha, 2015.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). Manual on hydrography, Publication C-13. 1. ed. International Hydrographic Bureau, Monaco, May 2005.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). Regulations of the IHO for International (INT) charts and chart specifications of the IHO, Publication S-44. Ed. 4.8.0 International Hydrographic Bureau, Monaco, Oct. 2018.

JIGENA ANTELO, B.; VIDAL, J.; BERROCOSO, M. Determination of the tide constituents at Livingston and Deception Islands (South Shetland Islands, Antarctica), using annual time series. **Dyna** **82** n.191, p. 209-218. Medellin, jun 2015.

KALIL, A. F. D. **Contribuições ao estudo do Nível Médio do Mar no estado do Rio de Janeiro**. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LI, S. et al. Tidal harmonic analysis and prediction with least-squares estimation and inaction method. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 220. p. 196-208. 2019

LIU, J.; SHI, G.; ZHU, K. High-Precision Combined Tidal Forecasting Model. **Algorithms**, v. 12, 65. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4893/12/3/65>. Acesso em 20 jul. 2021.

MARONE, E.; RAICICH, F.; MOSETTI, R. Harmonic tidal analysis methods on time and frequency domains: Similarities and differences for the Gulf of Trieste, Italy, and Paranaguá Bay, Brazil. **Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata**, v. 54, n 2. p. 183-204. 2013.

MARONE, E. et al. Medições de correntes e curva vazão-maré na baía de Paranaguá, PR. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 60, p. 55-54. Curitiba: UFPR, 2007.

MARONE, E.; CAMARGO, R. Marés Meteorológicas no Litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. In: **Neritica**, v. 8, p. 73-85. Curitiba: UFPR, 1994

MELO FILHO, E. **Maré Meteorologica na Costa Brasileira**. 328 p. Tese (Professor Titular) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 2017.

MIRANDA, L. B. de; CASTRO, B. M. de; KJERFVE, B. **Princípios de Oceanografia Física e de Estuários**. São Paulo: Universidade de São Paul, 2012

NATURAL RESOURCES CANADA (NRCan). Height Reference System Modernization. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/maps/height-reference-system-modernization/9054#_Toc372901501> Acesso em: 15 jan. 2021.

NEUMANN, B. et al. Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment. **PLoS ONE**, v. 10(3): e0118571. DOI:10.1371/journal.pone.0118571. Mar, 2015.

NEVES, C. F. **A importância da unificação dos referenciais verticais para a modelagem dos processos litorâneos**. Apresentação. Julho de 2016. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>> Acesso em 16/06/2020.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). About *VDatum*. Disponível em: <<https://vDatum.noaa.gov/about.html>> Acesso em: 15 jan. 2021.

NOERNBERG, M. A. et al. Hydrodynamics and bio-optical assessment of two pristine subtropical estuaries in southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, 62(4). p. 265-278. 2014.

OLIVEIRA, L.H.S. **Aplicação de um Modelo para a Classificação de Corpos D'água do Complexo Estuarino de Paranaguá, Paraná, Brasil**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Setor de Ciências da Terra Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paranaguá, 2009

OLIVEIRA, M. M. F. de. Redes neurais artificiais na predição da maré meteorológica em Paranaguá – PR. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

OSHANA, R. **DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems**. Burlington: Elsevier, 2006

PARKER, B. B. **Tidal analysis and prediction**. Silver Spring: NOAA, NOS Center for Operational Oceanographic Products and Services, 2007.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. Chippenham: J. Wiley, 1987.

PUGH, D.; WOODWORTH, P. **Sea-Level Science**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

SANTANA, F.R. et al. Cartas Náuticas com Modelos SEP: Evolução Histórica, e Perspectivas para Hidrografia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, ISSN 1808-0936 | <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>, 2020.

SANTANA, T. A. Contribuições para os Estudos de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha ao Longo da Costa Brasileira. 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SEVERO, T. C. et al. Estudo das correções gravimétricas para altitudes físicas aplicadas aos desníveis da RAAP. **Boletim de Ciências Geodésicas** [online]. 2013, v. 19, n. 3, pp. 472-497. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1982-21702013000300008>> Acesso em 19 Jul 2021.

SHOM, Service Hydrographique et Océanographique de la Marine. BathyElli v2.0 ZH/ell, Descriptif de contenu du produit externe. SHOM. Juin 2018. Disponível em: <<https://data.shom.fr>> Acesso em 10 jul 2020.

SILVA, L. M. **Análise da evolução temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SOARES, S. et al. Rede Geodésica de Referência Costeira: Ações Preliminares para Integração de Altitudes e Profundidades. In: **XIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite**. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM). Arraial do Cabo, RJ. Anais ... p. 219-222. 2019

UAISSONE, A. J. R. **Influência das forçantes atmosféricas em meso escala sobre o nível médio do mar em Piraquara, RJ**. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

UNESCO/IOC. Quality Control of in situ Sea Level Observations: A Review and Progress towards Automated Quality Control. v.1. Paris, 2020.

UNESCO/IOC. Manual on Sea-level Measurements and Interpretation. v. 4. Paris, 2006.

VANICEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The Concepts**. 2nd ed. Amsterdam: North-Holland, 1986.

APÊNDICE 1 – DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE TRATAMENTO DE DADOS ESPÚRIOS

As ferramentas de controle de qualidade disponíveis no AstGeoTop encontram-se na aba “Filtrar” e são as seguintes:

- a) Exclusão de dados por limites estabelecidos em alturas de marés e por intervalos de tempo; e
- b) Filtragem por modelo de maré.

Na primeira, o usuário define valores de amplitude para as observações maregráficas. O programa, então, elimina as observações que ultrapassam esses valores. É uma boa ferramenta para remoção expedita de dados espúrios de grande magnitude.

Para identificação e eliminação de dados espúrios menos evidentes, utiliza-se a segunda opção. Esta ferramenta analisa os resíduos das observações maregráficas. Aqueles cuja magnitude ultrapassam o limiar estabelecido são identificados e eliminados. Para o cálculo dos resíduos, faz-se a subtração das observações pela maré reconstituída gerada a partir das constituintes obtidas pela análise harmônica das observações maregráficas.

Um dos limiares mais comumente adotados para identificação de *outliers* é o de três vezes o desvio padrão (3-SIGMA). Considerando uma variável aleatória com distribuição normal, este valor engloba mais de 99,7 % das observações. Um outro limiar (menos comum, mas sugerido ao usuário pelo programa AstGeoTop), é o de cinco vezes o desvio padrão (5-SIGMA). Em uma variável aleatória com distribuição normal, este limiar representa quase a totalidade da população.

Para apoiar a decisão de qual limiar utilizar, foi feito um experimento onde as séries foram filtradas duas vezes: uma com o critério 3-SIGMA e outra com o 5-SIGMA.

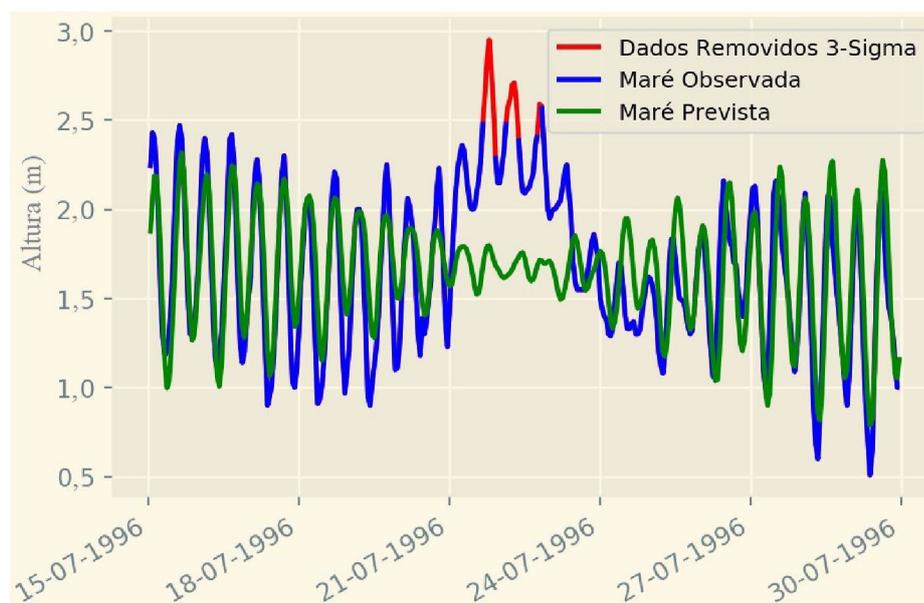
Após a aplicação das ferramentas, os resultados foram agrupados e seguem na Tabela apresentada na sequência que indica a quantidade de dados considerados como sendo *outliers* para ambos os limiares de eliminação:

Série de dados	Tamanho da Série	Taxa de Gravação	Número de elementos removidos (3 σ)	Número de elementos removidos (5 σ)
'ATN_A'	1152	1 hora	3	0
'ATN_B'	8760	1 hora	29	2
'COB_A'	768	1 hora	2	0
'COB_B'	1176	1 hora	2	1
'COB_C'	20448	5 minutos	17	0
'CSW_A'	840	1 hora	1	0
'CSW_B'	7272	1 hora	18	0
'CSW_C'	600	1 hora	5	0
'CSW_D'	5856	1 hora	17	0
'CSW_E'	720	1 hora	1	0
'CSW_F'	26280	1 hora	143	2
'CSW_G'	720	1 hora	0	0
'CSW_I'	2856	1 hora	2	1
'CSW_J'	9552	1 hora	80	14
'CSW_K'	8760	1 hora	49	0
'CSW_L'	1008	1 hora	0	0
'CSW_M'	7416	1 hora	8	4
'CSW_N'	50400	5 minutos	149	0
'CSW_O'	12672	10 minutos	35	0
'FLX_A'	1200	1 hora	6	0
'FLX_B'	2328	1 hora	9	0
'FLX_C'	792	1 hora	2	0
'FLX_D'	1536	1 hora	8	0
'FLX_E'	9240	1 hora	55	0
'GLH_A'	768	1 hora	0	0
'GLH_B'	5160	1 hora	10	2
'GLH_C'	648	1 hora	5	0
'GLH_D'	336	1 hora	1	1
'GLH_E'	744	1 hora	2	1
'GLH_F'	1488	1 hora	14	2
'GLH_G'	8760	1 hora	48	0
'GLH_H'	744	1 hora	5	0
'GLH_I'	432	1 hora	0	0
'GLH_J'	33408	1 hora	163	3
'GLH_K'	9504	5 minutos	19	0
'GLH_L'	2880	10 minutos	35	0
'CAL_0'	42912	5 minutos	201	0

FONTE: O Autor (2021)

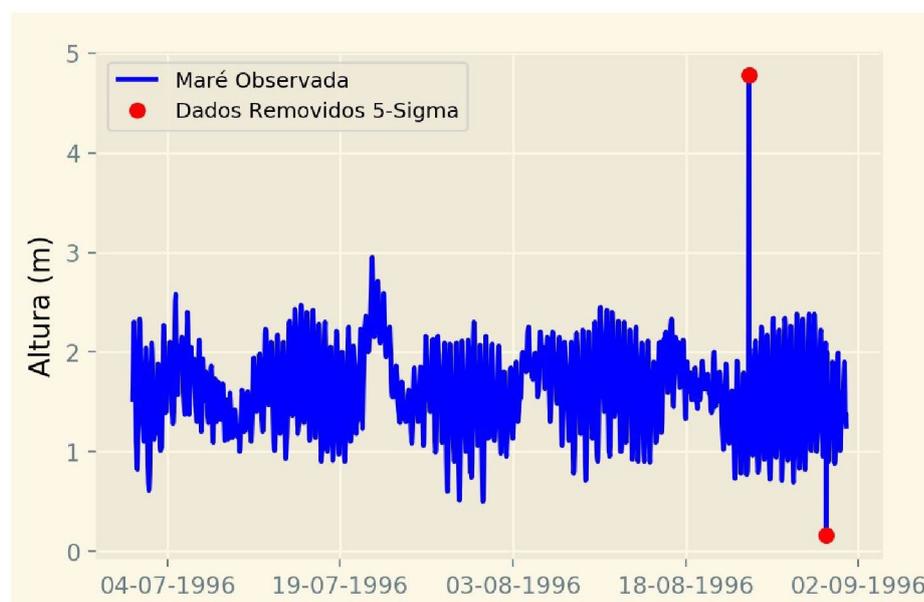
Desta tabela percebe-se uma quantidade significativa de dados filtrados pelo limiar 3-SIGMA que é proporcional ao tamanho da série. O limiar 5-SIGMA não acompanhou a mesma proporção, indicando um critério mais seletivo para a exclusão de dados de observações.

A figura mostrada na sequência apresenta um trecho da série GLH_F, de 62 dias de duração. Nela, estão representados: a série de observações, a maré prevista e os dados removidos pelo critério 3-SIGMA. Pela figura, não é possível afirmar se os dados removidos são dados espúrios.



FONTE: O Autor (2021)

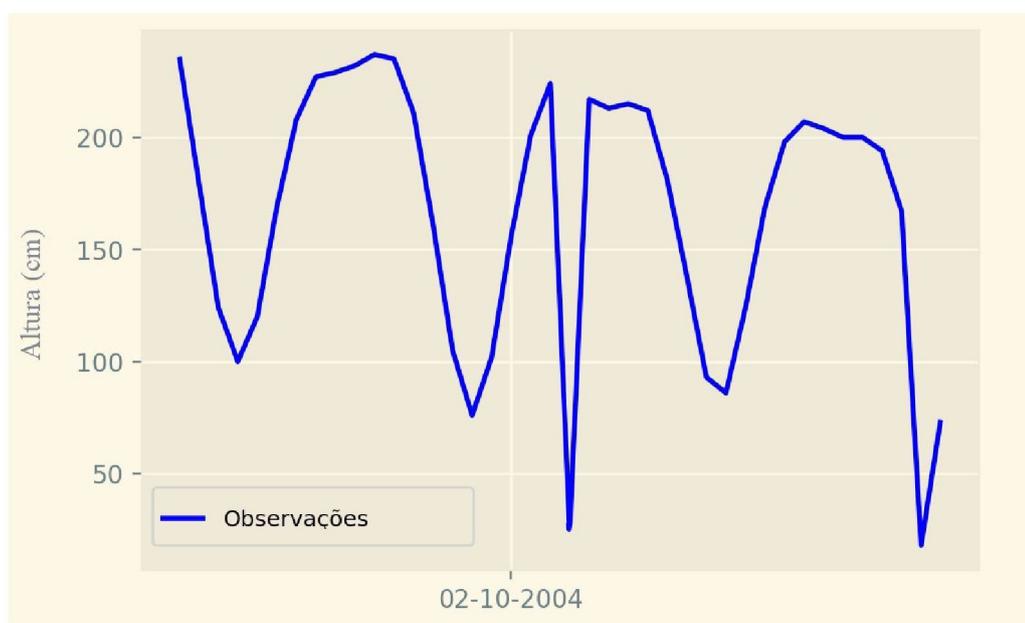
A série GLH_F inteira e os dois únicos resíduos identificados como espúrios pelo critério 5-SIGMA estão apresentados na figura incluída na sequência.



FONTE: O Autor (2021)

Pela análise visual dos resultados dos dois critérios, aplicados na série GLH_F, foi observado que o critério 5-SIGMA não eliminou dados com potencial de serem representativos. O critério 3-SIGMA, com vistas a eliminação de dados espúrios, só pode ser utilizado em dados maregráficos quando o tamanho da série permitir que os resíduos possam se comportar como uma variável aleatória com distribuição normal. Desta forma, o critério 5-SIGMA mostra-se mais adequado para séries curtas.

Uma questão que surge neste ponto é a seguinte: quando a série é suficientemente longa, estes critérios podem identificar *outliers*, mas e quanto aos erros locais, como identificado na figura a seguir? Esta figura apresenta um trecho da série CSW_M, com 309 dias de duração.

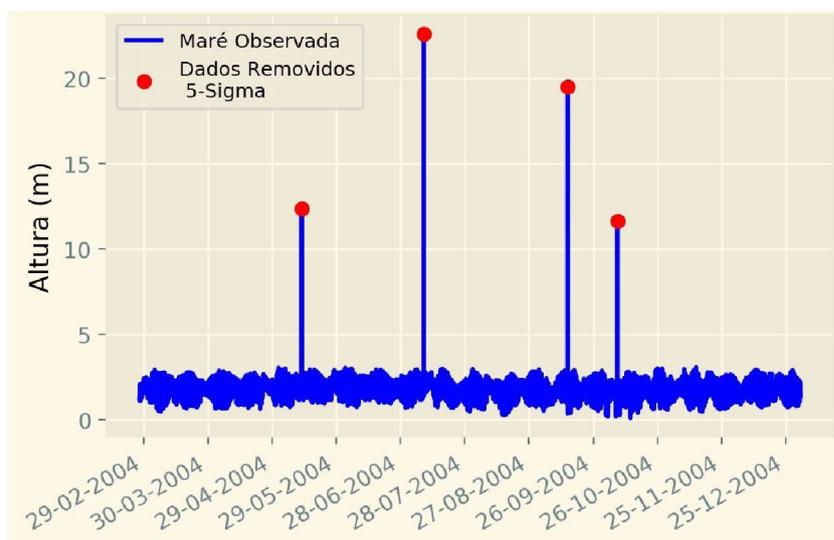


FONTE: O Autor (2021)

Na metodologia anterior (5-SIGMA), os resíduos são calculados subtraindo o modelo de maré das observações. Entretanto, aplicando 5-SIGMA na série CSW_M o possível dado espúrio não foi identificado.

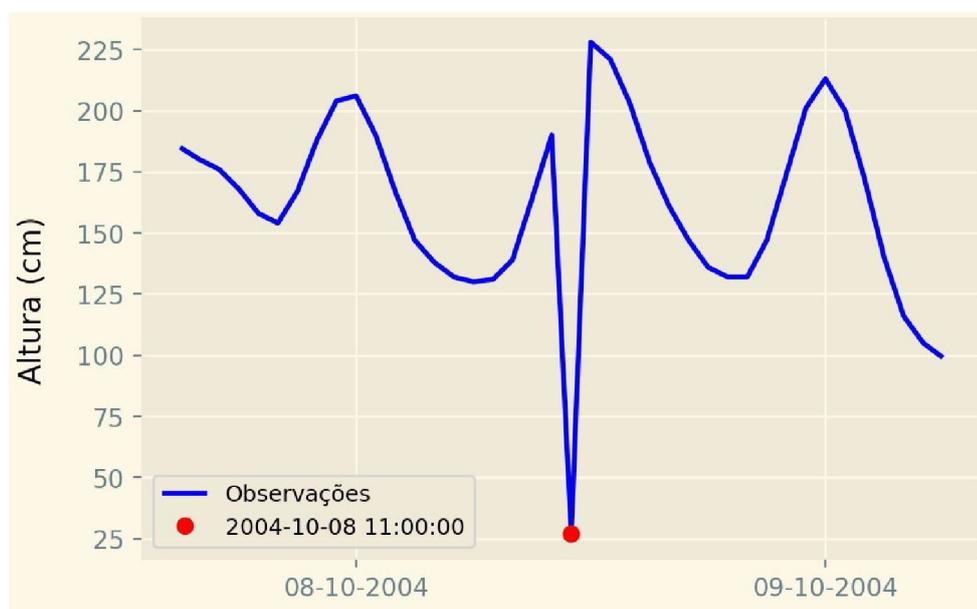
Para abordar este tipo de erro, foram desenvolvidos processos para controle de qualidade de dados recomendados em UNESCO/IOC (2020) e descritos na seção 3.3. Este conjunto de processos será chamado neste capítulo de IOC.

Para comparar o desempenho dos critérios 5-SIGMA e IOC ambos foram aplicados na série CSW_M. A figura apresentada na sequência ilustra o resultado da aplicação do 5_SIGMA que identificou 4 dados espúrios.



FONTE: O Autor (2021)

Na figura anterior, todos os quatro maiores picos foram detectados pelo critério 5-SIGMA. Na figura a seguir, a abrupta variação do nível d'água foi identificada como sendo um dado espúrio por um dos processos IOC, denominado variação do nível d'água.



FONTE: O Autor (2021)

Para o conjunto de processos IOC, os dados espúrios de grande amplitude e alguns picos relativos foram identificados. Uma outra vantagem deste método é que não é necessário um modelo de maré, o que pode ser adequado em sistemas de tratamento preliminar de dados, como na própria EM, antes de serem arquivados.

Em virtude do exposto, os processos IOC foram adotados nesta dissertação para o tratamento preliminar dos dados maregráficos, em lugar dos desvios 3-SIGMA e 5-SIGMA.

APÊNDICE 2 – RESULTADO DA APLICAÇÃO DO FILTRO DE DADOS ESPÚRIOS

Série de dados	Nível Zero						Nível Um	Total
	Tamanho da Série	Spline	Data-Hora	Variação Zero	Variação Nível da Água	Variação Amplitude	Spline em Resíduo	
ATN_A	1152	0	0	0	0	0	1	1 (0,35%)
ATN_B	8760	0	0	0	8	0	37	45 (0,51%)
COB_A	768	0	0	0	0	0	2	2 (0,26%)
COB_B	1176	1	0	0	2	0	2	5 (0,43%)
COB_C	20448 (Nível Zero) 1704 (Nível Um)	40	0	0	0	0	0	40 (0,2%)
CSW_A	840	0	0	0	0	0	0	0 (0%)
CSW_B	7272	0	0	0	0	0	53	53 (0,73%)
CSW_C	600	0	0	0	0	0	1	1 (0,17%)
CSW_D	5856	0	0	0	2	0	23	25 (0,43%)
CSW_E	720	0	0	0	0	0	0	0 (0%)
CSW_F	26280	0	0	0	2	0	100	102 (0,39%)
CSW_G	720	0	0	0	0	0	2	2 (0,28%)
CSW_I	2856	1	0	0	12	0	19	32 (1,12%)
CSW_J	9552	0	0	0	6	0	58	64 (0,67%)
CSW_K	8760	0	0	0	0	0	54	54 (0,62%)
CSW_L	1008	0	0	0	0	0	4	4 (0,4%)
CSW_M	7416	4	0	0	16	0	72	92 (1,24%)
CSW_N	50400 (Nível Zero) 4200 (Nível Um)	228	0	0	0	0	0	228 (0,45%)
CSW_O	12672 (Nível Zero) 2112 (Nível Um)	7	0	0	0	0	0	7 (0,06%)
FLX_A	1200	0	0	0	2	0	0	2 (0,17%)
FLX_B	2328	0	0	0	0	0	7	7 (0,3%)
FLX_C	792	0	0	0	2	0	1	3 (0,38%)
FLX_D	1536	0	0	0	22	0	9	31 (2,02%)
FLX_E	9240	0	0	0	16	0	41	57 (0,62%)
GLH_A	768	0	0	0	0	0	0	0 (0%)
GLH_B	5160	2	0	0	0	0	21	23 (0,45%)
GLH_C	648	0	0	0	0	0	0	0 (0%)
GLH_D	336	0	0	0	0	0	3	3 (0,89%)
GLH_E	744	0	0	0	2	0	8	10 (1,34%)
GLH_F	1488	1	0	0	4	0	0	5 (0,34%)
GLH_G	8760	0	0	0	0	0	46	46 (0,53%)
GLH_H	744	0	0	0	0	0	4	4 (0,54%)
GLH_I	432	0	0	0	0	0	1	1 (0,23%)
GLH_J	33408	2	0	0	0	0	134	136 (0,41%)
GLH_K	9504 (Nível Zero) 792 (Nível Um)	41	0	0	0	0	0	41 (0,43%)
GLH_L	6912 (Nível Zero) 152 (Nível Um)	11	0	0	0	0	0	11 (0,16%)
CAL_0	31392 (Nível Zero) 2616 (Nível Um)	125	0	0	0	0	0	125 (0,4%)

FONTE: O Autor (2021)

APÊNDICE 3 – RESULTADO DA ANÁLISE HARMÔNICA

A tabela mostrada na sequência indica o resultado da análise harmônica para as maiores séries filtradas de cada EM: amplitude e atrasos de fase referidos ao meridiano de Greenwich com respectivos desvios-padrão. Para cada série constam as dez constituintes com as maiores amplitudes.

AMPLITUDES E FASES DAS CONSTITUINTES DAS SÉRIES FILTRADAS

Constituinte	Amplitude (cm)	$\sigma_{\text{Amplitude}}$ (cm)	Fase (°)	σ_{Fase} (°)	Constituinte	Amplitude (cm)	$\sigma_{\text{Amplitude}}$ (cm)	Fase (°)	σ_{Fase} (°)
ATN_B					CSW_F				
M2	53,48	0,53	196,69	0,55	M2	48,30	0,26	183,93	0,30
S2	35,20	0,53	205,89	0,87	S2	32,21	0,26	193,41	0,47
M4	25,43	0,78	122,54	1,64	M4	16,06	0,31	89,22	1,05
M3	20,31	1,03	48,22	2,75	M3	14,92	0,51	26,08	1,88
MS4	11,82	0,78	224,30	3,66	O1	11,19	0,24	124,56	1,51
K2	11,09	0,53	197,00	3,68	K2	10,38	0,26	184,15	1,88
O1	10,78	0,53	126,66	3,49	N2	7,80	0,26	124,56	1,51
MN4	10,08	0,79	63,02	4,19	K1	7,11	0,24	189,29	2,19
MO3	9,15	1,03	179,80	7,76	MO3	5,11	0,51	151,25	6,76
N2	8,74	0,54	263,83	3,41	MS4	6,90	0,31	249,07	1,87
CAL_0					GLH_J				
M2	49,54	1,13	181,02	1,26	M2	36,88	0,23	171,19	0,36
S2	29,05	1,35	188,70	2,35	S2	24,41	0,23	177,89	0,54
M4	14,27	1,38	74,15	5,14	O1	10,78	0,18	120,98	0,86
M3	13,19	2,26	16,77	9,35	K2	7,67	0,23	166,88	1,49
O1	11,71	0,80	122,70	4,88	M3	7,63	0,30	6,56	2,29
K2	9,23	1,34	174,58	11,20	M4	7,23	0,14	353,39	1,14
N2	7,74	1,44	243,67	10,37	K1	6,24	0,18	184,83	1,55
K1	7,21	0,96	178,70	8,71	N2	5,99	0,23	241,38	2,24
MN4	7,06	1,78	18,33	13,53	MO3	4,12	0,30	183,49	3,83
MK3	6,83	2,19	265,38	20,44	MK3	3,45	0,30	254,24	4,72
COB_C					FLX_E				
M2	45,33	2,28	176,26	2,82	M2	53,18	1,57	196,35	1,70
S2	31,87	2,25	187,05	5,33	S2	35,00	1,57	204,27	2,58
O1	11,60	1,16	122,43	6,33	M4	22,05	1,86	126,41	4,84
M3	11,32	2,62	19,36	12,93	M3	17,68	2,21	62,90	7,18
SK3	10,35	2,62	95,34	16,22	O1	12,00	0,71	130,58	3,31
M4	10,09	0,98	63,11	5,32	MS4	10,68	1,85	230,29	9,99
K1	8,15	1,16	183,17	6,88	MN4	9,71	1,86	69,51	11,01
MK3	7,31	2,67	265,19	17,47	N2	9,54	1,57	260,23	9,49
N2	6,97	2,26	240,23	16,15	MK3	9,47	2,21	302,30	13,24
MN4	5,12	0,98	12,75	9,24	K2	8,64	1,57	185,13	10,20

FONTE: O Autor (2021)

APÊNDICE 4 – RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE SOBRE OS RESÍDUOS

RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESÍDUOS DE FREQUÊNCIAS SUBMAREAIS E MAREAIS E SUPRAMAREAIS.

(continua)

Série	Mês	Resíduos			
		Frequência Submareal		Frequência Mareal e Supramareal	
		H0: $\mu = 0$	H0: População Normal	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
ATN_A	Mai/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Jan/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Fev/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
ATN_B	Mar/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Abr/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Mai/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
ATN_B	Jun/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Jul/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Ago/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Set/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Out/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
ATN_B	Nov/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
ATN_B	Dez/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CAL_0	Mar/2016	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CAL_0	Abr/2016	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
COB_B	Mai/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
COB_C	Jun/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
COB_C	Jul/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Jan/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Fev/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_B	Mar/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_B	Abr/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Mai/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_B	Jun/1994	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Jul/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Ago/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_B	Set/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_B	Out/1994	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Abr/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Mai/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Jun/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Jul/1995	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Ago/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Set/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Out/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_D	Nov/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_E	Mai/1996	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jan/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Fev/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Mar/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Abr/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Mai/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jun/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jul/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Ago/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Set/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Out/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Nov/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada

RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESÍDUOS DE FREQUENCIAS SUBMAREAIS E MAREAIS E SUPRAMAREAIS.

(continua)

Série	Mês	Resíduos			
		Frequência Submareal		Frequência Mareal e Supramareal	
		H0: $\mu = 0$	H0: População Normal	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
CSW_F	Dez/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jan/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Fev/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Mar/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Abr/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Mai/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Jun/1998	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Jul/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Ago/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Set/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Out/1998	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Nov/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Dez/1998	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jan/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Fev/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Mar/1999	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Abr/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Mai/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Jun/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Jul/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Ago/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Set/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Out/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_F	Nov/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_F	Dez/1999	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_G	Jan/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_I	Jul/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_I	Ago/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_I	Set/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_I	Out/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Nov/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Dez/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Jan/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Fev/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Mar/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Abr/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Mai/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Jun/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Jul/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Ago/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_J	Set/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Out/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_J	Nov/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Jan/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Fev/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_K	Mar/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Abr/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Mai/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada

RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESÍDUOS DE FREQUÊNCIAS SUBMAREAIS E MAREAIS E SUPRAMAREAIS.

(continua)

Série	Mês	Resíduos			
		Frequência Submareal		Frequência Mareal e Supramareal	
		H0: $\mu = 0$	H0: População Normal	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
CSW_K	Jun/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_K	Jul/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Ago/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_K	Set/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Out/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_K	Nov/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_K	Dez/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_L	Jan/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Mar/2004	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_M	Abr/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Mai/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Jun/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Jul/2004	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Ago/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Set/2004	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_M	Out/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_M	Nov/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_M	Dez/2004	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_N	Out/2018	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_N	Nov/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_N	Dez/2018	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_N	Jan/2019	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_N	Fev/2019	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
CSW_O	Set/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
CSW_O	Out/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_A	Mai/2000	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_B	Out/2000	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_B	Nov/2000	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_C	Jan/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_D	Mar/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_D	Abr/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Jun/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Jul/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Ago/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Set/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_E	Out/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Nov/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_E	Dez/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Jan/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Fev/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
FLX_E	Mar/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Abr/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
FLX_E	Mai/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_B	Mai/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_B	Jun/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_B	Jul/1995	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_B	Ago/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_B	Set/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada

RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESÍDUOS DE FREQUENCIAS SUBMAREAIS E MAREAIS E SUPRAMAREAIS.

(continua)

Série	Mês	Resíduos			
		Frequência Submareal		Frequência Mareal e Supramareal	
		H0: $\mu = 0$	H0: População Normal	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
GLH_B	Out/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_B	Nov/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_C	Dez/1995	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_E	Mai/1996	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_F	Jul/1996	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_F	Ago/1996	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Jan/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Fev/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Mar/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Abr/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Mai/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Jun/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Jul/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Ago/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Set/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_G	Out/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Nov/1997	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_G	Dez/1997	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_H	Jan/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jun/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jul/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Ago/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Set/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Out/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Nov/2001	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Dez/2001	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Jan/2002	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Fev/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Mar/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Abr/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Mai/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Jun/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jul/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Ago/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Set/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Out/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Nov/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Dez/2002	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jan/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Fev/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Mar/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Abr/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Mai/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Jun/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Jul/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Ago/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Set/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Out/2003	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada

RESULTADO DOS TESTES DE HIPÓTESE PARA OS RESÍDUOS DE FREQUÊNCIAS SUBMAREAIS E MAREAIS E SUPRAMAREAIS.

(conclusão)

Série	Mês	Resíduos			
		Frequência Submareal		Frequência Mareal e Supramareal	
		H0: $\mu = 0$	H0: População Normal	H0: $\mu = 0$	H0: População Normal
GLH_J	Nov/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Dez/2003	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jan/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Fev/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Mar/2004	não rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Abr/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Mai/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jun/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Jul/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Ago/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Set/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Out/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Nov/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Dez/2004	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_J	Jan/2005	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_J	Fev/2005	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	não rejeitada
GLH_K	Nov/2018	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada
GLH_L	Abr/2019	rejeitada	rejeitada	não rejeitada	rejeitada

FONTE: O Autor (2021)