

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SAMOEL GIEHL

DETERMINAÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA POR MEIO DA
INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DA ALTIMETRIA POR
SATÉLITE NO DATUM VERTICAL BRASILEIRO DE IMBITUBA NO PERÍODO DE
2002 A 2015

CURITIBA

2020

SAMOEL GIEHL

DETERMINAÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA POR MEIO DA
INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DA ALTIMETRIA POR
SATÉLITE NO DATUM VERTICAL BRASILEIRO DE IMBITUBA NO PERÍODO DE
2002 A 2015

Dissertação apresentada ao 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 Regiane Dalazoana

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

G454d

Giehl, Samoel

Determinação de movimentos verticais da crosta por meio da integração de observações maregráficas e da altimetria por satélite no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba no período de 2002 a 2015 [recurso eletrônico] / Samoel Giehl. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientador: Regiane Dalazoana

1. Oceanografia. 2. Nível do mar. 3. Marés. 4. Altimetria. 5. Crosta terrestre - Estrutura. I. Universidade Federal do Paraná. II. Dalazoana, Regiane. III. Título.

CDD: 551.46

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

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 **SAMOEL GIEHL** intitulada: **DETERMINAÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA POR MEIO DA INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE NO DATUM VERTICAL BRASILEIRO DE IMBITUBA NO PERÍODO DE 2002 A 2015**, 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, 24 de Julho de 2020.

Assinatura Eletrônica

24/07/2020 18:42:08.0

REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/07/2020 18:13:15.0

SÍLVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/07/2020 20:30:58.0

HENRY DIVERTH MONTECINO CASTRO

Avaliador Externo (UNIVERSIDAD DE CONCEPCION)

Dedico este trabalho aos meus pais Lourdes e Marino

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelas conquistas e por ter me conduzido até aqui.

Aos meus pais, Lourdes e Marino, ao meu irmão, Rafael, e aos meus tios, Hilda e Christian, que nunca mediram esforços para me apoiar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela oportunidade e pela infraestrutura disponibilizada, em especial do Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS).

À Professora Orientadora Dra. Regiane Dalazoana pela cordialidade, disposição em sanar as dúvidas, sugestões construtivas e ensinamentos transmitidos.

Aos Professores da banca examinadora desta pesquisa, o Dr. Silvio Rogério de Freitas e o Dr. Henry Montecino pelas contribuições e pelo tempo disponibilizado em prol desta pesquisa.

Ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) pela disponibilização dos dados maregráficos.

Ao *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut* pelos dados de altimetria por satélite.

Ao *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL) da *University of Nevada*, dos Estados Unidos, pelas soluções GNSS.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo para que fosse possível concretizar o presente trabalho.

Aos desenvolvedores do *template* UFPR-ABNTEX LATEX2 ϵ , o qual foi empregado no presente trabalho (<https://github.com/EEKBR/ufpr-abntex>).

Aos professores do PPGCG da UFPR e do Departamento de Engenharia Rural - FAEM da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL) pelos ensinamentos.

À todos os colegas e amigos que conheci no Mestrado, agradeço a amizade e o carinho.

Aos colegas de laboratório Andreia, Raimundo, Ruy e Túlio.

*A ciência consiste em substituir o saber que parecia seguro
por uma teoria, ou seja, por algo problemático.
José Ortega y Gasset*

RESUMO

Os satélites altimétricos e os marégrafos permitem monitorar as variações do nível do mar ao longo do tempo. Enquanto os marégrafos observam o nível do mar relativo a um referencial local, os satélites altimétricos o fazem em relação ao geocentro da Terra. Da comparação entre as duas séries temporais de dados, observam-se diferenças que podem estar relacionadas a possíveis movimentos verticais da crosta ($\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$). Esses movimentos perturbam a componente vertical da posição dos marégrafos e, conseqüentemente, contaminam as observações do nível do mar. A instalação de uma estação de monitoramento contínuo GNSS nas proximidades dos marégrafos possibilita determinar a tendência de movimento vertical absoluto da crosta ($T_{Up-GNSS}$). Objetiva-se no presente trabalho determinar o valor de possíveis movimentos verticais da crosta a partir da diferença entre a tendência do nível do mar observada pelos satélites altimétricos T/P, Jason 1, 2 e 3 ($\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$), entre 1992 e 2017, e a tendência do nível do mar observado pelo marégrafo de Imbituba-SC ($\dot{\delta}_{TG}(\phi, \lambda)_{EMMIMB}$) entre 2002 e 2015. Para tanto, foram confeccionadas células ao longo das trilhas dos satélites a um raio de até 500 km sobre o oceano a partir da localização da estação maregráfica, abrangendo os passes 0239, 0228, 0152, 0076, 0163 e 0050. Para a análise de movimentos verticais da crosta, foram empregadas 15 células que obtiveram os melhores coeficientes de correlação (r) em relação aos dados mareográficos. Os resultados indicaram uma correlação moderada de 0,69 e as 15 células se localizaram ao longo do passe 0163 a uma distância média de 234,40 km da estação maregráfica. Os resultados obtidos indicaram uma tendência de subsidência da estação em Imbituba-SC. Destaca-se que não foi realizada a extrapolação dos dados altimétricos até a costa e nem a correção de erros de deriva instrumental contidos nas observações da maregráfica. Os valores médios de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (1992-2017), $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2002-2015) foram de $2,53 \pm 1,18$ e $5,42 \pm 1,88$ mm/ano, respectivamente, enquanto que os valores médios de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (2007-2015), $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2007-2015) foram de $7,10 \pm 4,62$ e $12,97 \pm 4,23$ mm/ano, respectivamente, podendo indicar uma aceleração do aumento do nível do mar em Imbituba-SC com o decorrer dos anos. Verifica-se também que o erro padrão da regressão foi menor quando foram empregadas séries temporais mais longas de dados da altimetria satelital e dados mareográficos.

Palavras-chaves: Nível Médio do Mar. Movimento Vertical da Crosta. Altimetria por Satélite. Marégrafo de Imbituba-SC.

ABSTRACT

Altimetric satellites and tide gauges allow to monitor the sea level variations over the time. While tide gauges observe the sea level according to a local reference, the satellite altimetry do it according to the Earth Geocentric. From the comparison between the two-time series of data, differences that may be related to possible crustal vertical motion are observed ($\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$). These movements disturb the vertical component of the tide gauges position and contaminate the sea level observations consequently. The installation of a GNSS continuous monitoring station in the tide gauges vicinity makes it possible to determine the tendency of the absolute crustal vertical motion ($T_{Up-GNSS}$). The objective of this work is to determine the value of possible crustal vertical motions from the difference between the sea level trend observed by satellites T/P, Jason 1, 2 and 3 ($\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$), between 1992 and 2017, and the sea level trend observed by the tide gauges of Imbituba-SC ($\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$) between 2002 and 2015. To this end, cells were made along the satellite tracks at a radius of up to 500 km over the ocean from the tide gauges station location, covering 0239, 0228, 0152, 0076, 0163 and 0050 passes. For the crustal vertical motion analysis, 15 cells that obtained the best correlation coefficient (r) related to the tide gauges data were used. The results indicated an moderate correlation of 0,69 and the 15 cells were located along the 0163 pass at an mean distance of 234.40 km from the tide gauges station. The results indicated a subsidence trend in Imbituba-SC station. It is worthy to highlight that neither the altimetry dates extrapolation up to the coast was performed nor the correction of instrumental drift errors contained in the tide gauges observations. The mean values of $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (1992-2017), $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2002-2015) were $2,53 \pm 1,18$ and $5,42 \pm 1,88$ mm/year, respectively, while the mean values of $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (2007-2015), $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2007-2015) were $7,10 \pm 4,62$ and $12,97 \pm 4,23$ mm/year, respectively, which may indicate a sea level increase acceleration in Imbituba-SC over the years. It was also verified that the standard regression error was lower when longer time series of satellite altimetry and tide gauges data were used.

Key-words: Mean Sea Level. Crustal Vertical Motion. Satellite Altimetry. Imbituba-SC Tide Gauges.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÍVEIS DO GGOS	28
FIGURA 2 – ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS PERTENCENTES A REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA	34
FIGURA 3 – NILÔMETRO NA ILHA DE RODA EM CAIRO NO EGITO (A) - RÉGUA DE MARÉ NO PORTO IMBITUBA (B)	35
FIGURA 4 – MARÉGRAFO DIGITAL DA RMPG EM ARRAIAL DO CABO - RJ	37
FIGURA 5 – ESQUEMA PARA OBSERVAÇÕES DO NÍVEL DO MAR ATRAVÉS DE RECEPTOR GNSS COM ANTENA POSICIONADA NO SENTIDO: ZENITAL E NADIRAL (a) E SOMENTE ZENITAL (b) .	38
FIGURA 6 – PERÍODO DAS PRINCIPAIS MISSÕES ALTIMÉTRICAS OCEÂNICAS	40
FIGURA 7 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MISSÃO SWOT	44
FIGURA 8 – RELAÇÃO ENTRE AS GRANDEZAS DE INTERESSE PARA A ALTIMETRIA POR SATÉLITE	45
FIGURA 9 – CORREÇÕES NAS OBSERVAÇÕES DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE	46
FIGURA 10 – ESTAÇÕES DA REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS (RBMC)	51
FIGURA 11 – REDE GLOBAL DE ESTAÇÕES GNSS GEODÉSICAS PROCESADAS PELO NGL	53
FIGURA 12 – REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	58
FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DO MARÉGRAFO DA RMPG E DA ESTAÇÃO GNSS DA RBMC-IMBT	60
FIGURA 14 – DURAÇÃO E PERÍODO DAS SÉRIES TEMPORAIS DOS DADOS EMPREGADOS NO ESTUDO	61
FIGURA 15 – OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EMMIMB ENTRE 2002 A 2020	61
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA	63
FIGURA 17 – SITE DO IBGE PARA DOWNLOAD DE DADOS DA RMPG	64
FIGURA 18 – GRÁFICO DA FUNÇÃO <i>SINC</i>	67
FIGURA 19 – INTERFACE PARA A OBTENÇÃO DOS DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE DO OPENADB/DGFI	68
FIGURA 20 – DISPOSIÇÃO DAS CÉLULAS AO LONGO DA TRILHA DO SATÉLITE JASON-1	69
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA PARA A CONFECÇÃO DAS CÉLULAS DE SSH	70

FIGURA 22 – TRILHAS DOS SATÉLITES PROJETADAS SOBRE A ÁREA DE ESTUDOS	71
FIGURA 23 – DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DOS VÉRTICES DAS CÉLULAS	72
FIGURA 24 – REMOÇÃO DOS EFEITOS DE MARÉS OCEÂNICAS NOS DADOS DE SSH E APLICAÇÃO DA DAC NOS DADOS MAREGRÁFICOS	74
FIGURA 25 – INTERFACE DA APLICAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DA RMPG	77
FIGURA 26 – ARQUIVO DE ENTRADA E ARQUIVO GERADO PELA APLICAÇÃO	78
FIGURA 27 – COMPARAÇÃO ENTRE A MARÉS SINTÉTICAS E AS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS EM IMBITUBA-SC	79
FIGURA 28 – POSIÇÃO MÉDIA DAS CÉLULAS CONFECCIONADAS	80
FIGURA 29 – HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIAS DOS DADOS DE SSH	81
FIGURA 30 – RELAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DAS CÉLULAS EM RELAÇÃO A EMMIMB, OS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E AS LACUNAS DE DADOS DE SSH	82
FIGURA 31 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON EM FUNÇÃO DA ELIMINAÇÃO DA CORREÇÃO DO EFEITO DE MARÉ NOS DADOS DE SSH E DA APLICAÇÃO DA DAC NOS DADOS MAREGRÁFICOS	83
FIGURA 32 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON AO LONGO DAS TRILHAS DOS SATÉLITES EM RELAÇÃO AOS DADOS DA EMMIMB DE 2002 A 2015	84
FIGURA 33 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO DE 1992 A 2017	85
FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DAS CÉLULAS EM RELAÇÃO A EMMIMB, OS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E A TENDÊNCIA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR ENTRE 2002 E 2015	86
FIGURA 35 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2002 A 2015	87
FIGURA 36 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2002 A 2015	87
FIGURA 37 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2007 A 2015	88
FIGURA 38 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2007 A 2015	89
FIGURA 39 – TENDÊNCIA DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA DE 2007 A 2015	90

FIGURA 40 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA DE 2007 A 2015	90
---	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – IDENTIFICAÇÃO E PERÍODO DE OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA RMPG	34
TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS .	41
TABELA 3 – COEFICIENTES F_M DO FILTRO SUGERIDO POR PUGH (1987)	54
TABELA 4 – INTERPRETAÇÃO DO VALOR DA CORRELAÇÃO DE PEARSON	57
TABELA 5 – CONSTITUINTES HARMÔNICAS DA MARÉ EMPREGADAS PELA FUNÇÃO <i>TIDEM</i>	66
TABELA 6 – PROPRIEDADES DO MODELO DE MARÉS EOT11A	73
TABELA 7 – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS ENTRE SETEMBRO DE 2007 A DEZEMBRO DE 2015	92
TABELA 8 – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS PARA INTERVALOS DE TEMPOS DISTINTOS	93
TABELA 9 – VALORES DE P OBTIDOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS ENTRE SETEMBRO DE 2007 A DEZEMBRO DE 2015	95
TABELA 10 – VALORES DE P OBTIDOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS PARA INTERVALOS DE TEMPOS DISTINTOS	96

LISTA DE SIGLAS

AVISO	– <i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data</i>
BathyElli	– <i>Bathymetry referred to the Ellipsoid</i>
CICVTM	– Comitê de Integração da Componente Vertical Terrestre e Marítima
CNES	– <i>National Centre for Space Studies</i>
CONCAR	– Comissão Nacional de Cartografia
CSA	– <i>Canadian Space Agency</i>
DGFI	– <i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
DORIS	– <i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
DVB-IMBT	– <i>Datum Vertical Brasileiro de Imbituba</i>
DVI	– <i>Datum Vertical de Imbituba</i>
EMMIMB	– Estação Meteorológica de Imbituba
EOP	– <i>Earth Orientation Parameters</i> - Parâmetros de Orientação da Terra
ESA	– <i>European Space Agency</i> - Agência Espacial Europeia
FDP	– Função de Densidade de Probabilidade
FTP	– <i>File Transfer Protocol</i> - Protocolo de Transferência de Arquivos
GGOS	– <i>Global Geodetic Observing System</i> - Sistema Geodésico Global de Observação
GGRF	– <i>Global Geodetic Reference Frame</i>
GGRS	– <i>Global Geodetic Reference System</i>
GLONASS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GMES	– <i>Global Monitoring for Environment and Security</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i> - Sistema Global de Navegação por Satélites
GNSS-R	– <i>GNSS Reflectometry</i> - Refletometria GNSS

GPS	– <i>Global Positioning System</i> - Sistema de Posicionamento Global
IAG	– <i>International Association of Geodesy</i> - Associação Internacional de Geodésia
IAGS	– <i>Inter American Geodetic Survey</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICRF	– <i>International Celestial Reference Frame</i> - Rede Internacional de Referência Celeste
ICRS	– <i>International Celestial Reference System</i> - Sistema Internacional de Referência Celeste
IGS	– <i>International GNSS Service</i> - Serviço Internacional do GNSS
IGSNn	– <i>International Gravity Standardisation Net</i> - Rede Global de Gravidade Absoluta
IHRF	– <i>International Height Reference Frame</i> - Rede Internacional de Referência para Altitudes
IHRS	– <i>International Height Reference System</i> - Sistema Internacional de Referência para Altitudes
ITRF	– <i>International Terrestrial Reference Frame</i> - Rede Internacional de Referência Terrestre
ITRS	– <i>International Terrestrial Reference System</i> - Sistema Internacional de Referência Terrestre
LARAS	– Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites
LEO	– <i>Low Earth Orbit</i> - Órbita Terrestre Baixa
LLR	– <i>Lunar Laser Ranging</i>
MGG	– Modelo Global do Geopotencial
MSS	– <i>Mean Sea Surface</i> - Superfície Média do Oceano
NGL	– <i>Nevada Geodetic Laboratory</i>
NMM	– Nível Médio do Mar
NaN	– <i>Not a Number</i> - Não é um Número (Valor Numérico Indefinido)

OpenADB/DGFI	– Open Altimeter Database / <i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Technische Universität München</i>
PD	– Problema Direto da Geodésia
PI	– Problema Inverso da Geodésia
POD	– <i>Precise Orbit Determination</i> - Determinação Precisa de Órbita
PPP	– <i>Precise Point Positioning</i> - Posicionamento por Ponto Preciso
PSMSL	– <i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RMPG	– Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RMS	– <i>Root Mean Square</i> - Raiz do Valor Quadrático Médio ou Valor Eficaz
RMSE	– <i>Root Mean Square Error</i> - Raíz do Erro Quadrático Médio
SGR	– Sistema Geodésico de Referência
SI	– Sistema Internacional de Unidades
SLA	– <i>Sea Level Anomalies</i> - Anomalia do nível do Oceano
SLR	– <i>Satellite Laser Ranging</i>
SNR	– <i>Signal to Noise Ratio</i> - Relação Sinal Ruído
SONEL	– <i>Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales</i>
SSB	– <i>Sea State Bias</i> - Viés do Estado do Mar
SSH	– <i>Sea Surface Height</i> - Altitude da Superfície Oceânica
UFPR	– Universidade Federal do Paraná
UKSA	– <i>United Kingdom Space Agency</i>
URL	– <i>Uniform Resource Locator</i>
UTM	– Universal Transversa de Mercator
VLBI	– <i>Very Long Baseline Interferometry</i> - Interferometria de Linha de Base Longa

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔR	– Conjunto de Correções em Altimetria por Satélite, como por exemplo, Efeitos de Refração Atmosférica, Viés do Estado do Mar, entre outros
ΔR_{ion}	– Correção Ionosférica
ΔR_{seca}	– Correção da Troposfera Seca
ΔR_{umida}	– Correção da Troposfera Úmida
$-\Delta W_P$	– Negativo da Diferença de Potencial da Gravidade ou de Geopotencial avaliada em um ponto da SF da Terra.
$\dot{\delta}_A$	– Tendência de Variação do Nível do Mar Observado pelo Satélite Altimétrico Relativo ao Geocentro
$\dot{\delta}_U$	– Tendência de Movimento Vertical Absoluto da Crosta
$\dot{\delta}_{TG}$	– Tendência de Variação do Nível do Mar Observado pelo Marégrafo Relativo a Crosta Terrestre
η	– Índice de Refração Atmosférica
\hat{R}	– Distância entre o Radar Altimétrico e o Nível Instantâneo do Mar sem Considerar a Refração Atmosférica
λ	– Longitude Geodésica
ρ	– Densidade da Água
\mathbf{X}_P	– Posição tridimensional do Ponto P dada pelas Coordenadas X_P, Y_P, Z_P
φ	– Latitude Geodésica
c	– Velocidade de Propagação da Luz no Vácuo
C_P	– Número Geopotencial
g	– Valor da Gravidade
H	– Altitude com Significado Físico
h	– Altitude Elipsoidal
IBC	– <i>Inverse Barometer Effect</i> - Efeito de Barômetro Inverso

P_{atm}	– Pressão Atmosférica na Superfície
P_{ref}	– Pressão Média Global sobre os Oceanos
PD_{liq}	– Atraso do Sinal de Radar Devido a Gotículas de Água
PD_{vap}	– Atraso do Sinal de Radar Devido ao Vapor d'Água
r	– Coeficiente de Correlação de Pearson
R	– <i>Range</i> - Distância entre o Satélite e a Superfície do Mar
R_C	– Distância entre o satélite e o nível do mar observada na faixa de frequência C (f_C)
R_{Ku}	– Distância entre o satélite e o nível do mar observada na faixa de frequência K_u (f_{ku})
$sinc$	– Seno Cardinal
SSB_{Ku} e SSB_C	– Correções dependentes da frequência, como por exemplo, o viés eletromagnético
$T_{Up-GNSS}$	– Tendência de movimento vertical da crosta obtida por GNSS
t	– Tempo de Percurso entre a Transmissão e a Recepção do Sinal de Radar
W_0	– Geopotencial na Superfície do Geoide
W_P	– Valor do Geopotencial em um Ponto P

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2 HIPÓTESE	22
1.3 OBJETIVOS	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 JUSTIFICATIVA	23
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 POTENCIAL DA GEODÉSIA NO MONITORAMENTO DAS VARIAÇÕES DO SISTEMA TERRA	26
2.1.1 GGOS	26
2.1.2 O IHRS/IHRF	28
2.1.3 O GGRS/GGRF	30
2.1.4 Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marítima	31
2.2 DEFINIÇÃO DO <i>DATUM</i> VERTICAL BRASILEIRO	32
2.2.1 Rede Maregráfica Permanente para Geodésia	33
2.2.2 Breve Histórico do Princípio de Funcionamento dos Marégrafos	35
2.3 ASPECTOS GERAIS DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE	38
2.3.1 Breve Histórico da Evolução das Missões Altimétricas	41
2.3.2 Produtos Provenientes da Altimetria por Satélites	44
2.3.3 Correções em Observações da Altimetria por Satélite	45
2.3.3.1 Correção dos Efeitos Atmosféricos na Propagação dos Sinais	46
2.3.3.2 Viés do Estado do Mar	48
2.3.3.3 Efeito de Barômetro Inverso	48
2.3.3.4 efeitos de marés e carga oceânica	49
2.4 MOVIMENTO VERTICAL DA CROSTA TERRESTRE DETERMINADO POR GNSS	49
2.4.1 Redes SIRGAS-CON e Soluções GNSS semanais	50
2.4.2 Soluções GNSS diárias NGL14	52
2.5 ASPECTOS RELACIONADOS A INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE	53
2.5.1 Filtro Passa-Baixa	54
2.5.2 Marés Sintéticas	55

	19
2.5.3 Análises Estatísticas	56
2.5.3.1 Coeficiente de Correlação de Pearson	56
2.5.3.2 Regressão Linear Simples	57
3 MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1 ÁREA DE ESTUDO	59
3.2 MATERIAL	60
3.3 MÉTODOS	62
3.3.1 Aquisição de Dados Maregráficos	63
3.3.1.1 Pré-processamento dos Dados Maregráficos	65
3.3.2 Dados de Altimetria por Satélite	67
3.3.2.1 Confecção das Células	68
3.3.3 Remoção das correções de marés oceânicas nos dados de SSH e aplicação dos efeitos atmosféricos nos dados maregráficos	72
3.3.4 Dados GNSS	75
3.3.5 Integração de Dados Maregráficos e de Altimetria por Satélite	75
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1 ANÁLISE DA AQUISIÇÃO E DO TRATAMENTO DE LACUNAS NAS OB- SERVAÇÕES MAREGRÁFICAS	77
4.2 COMPARAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS OBTIDAS A PARTIR DAS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES	79
4.3 EVOLUÇÃO DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR EM IMBITUBA-SC	84
5 CONCLUSÕES	97
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
5.2 RECOMENDAÇÕES	98
REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os objetivos fundamentais da Geodésia são a determinação da forma, dimensão e campo da gravidade externo da Terra bem como as suas variações temporais (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006; TORGE; MÜLLER, 2012). De acordo com Drewes (2006), a Geodésia configura-se como a ciência da medição e análise dos fenômenos e efeitos relacionados aos processos físicos da Terra, e, desta forma, contribui de forma significativa para com os estudos relacionados a uma série de processos geodinâmicos e também com os estudos relacionados às mudanças climáticas globais. Dentro destas perspectivas, o monitoramento do nível do mar tornou-se uma prática relevante, uma vez que, por exemplo, a sua elevação progressiva pode ocasionar, no futuro, inundações de zonas costeiras. Segundo Nicholls e Cazenave (2010), a tendência média de aumento do nível do mar global entre 1993 e 2009, foi de 3.3 ± 0.4 mm/ano, sendo que a principal causa deste evento deve-se a expansão térmica da água do mar e a entrada de água proveniente de degelo e de reservatórios do continente. Em função do crescente impacto do fator antropogênico sobre a Terra, a Associação Internacional de Geodésia (IAG), em 2003, implementou o GGOS (*Global Geodetic Observing System*) com a missão de fornecer a infraestrutura geodésica necessária para o monitoramento das mudanças globais (GGOS, 2019). O GGOS é dividido em quatro Temas (*Focus Area*) com destaque, na linha de interesse do presente trabalho, para o tema um que visa padronizar um sistema de altitude para todo o mundo e o tema três que abrange atividades para a compreensão da variabilidade do nível do mar em escala global e regional ou local (GGOS, 2019).

Há quase dois séculos, os marégrafos foram os instrumentos mais confiáveis para as observações do nível do mar (BARNETT, 1984). Longas séries temporais de observações maregráficas definiam o nível médio do mar (NMM) considerado coincidente a uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra (ou geoide) e serviam como base para a definição clássica de *Datum* Vertical. No entanto, ao interligar-se diferentes *Data* verticais, observou-se diferenças nos valores da altitude nivelada para um mesmo ponto que não podem ser atribuídas somente a erros na operações de nivelamento. Outros fatores que contribuem para estas diferenças são as distintas épocas de estabelecimento do nível de referência de cada *Datum* vertical, bem como sua variação temporal e espacial (DALAZOANA, 2006).

Para viabilizar a correta avaliação dos riscos de inundação na região costeira do Brasil, foi estabelecido o Comitê de Integração da Componente Vertical Terrestre

e Marítima (CICVTM), pela Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) sob a coordenação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) juntamente com o Ministério do Meio Ambiente. O objetivo central é o de padronizar uma metodologia para a integração das superfícies de referência para altitudes e profundidades na zona costeira, através do refinamento do Sistema Geodésico Brasileiro (CICVTM, 2019).

Em âmbito global, a detecção da mudança do nível do mar na ordem do milímetro por ano, constitui um dos propósitos para o estabelecimento do Sistema Internacional de Referência para Altitudes (*International Height Reference System - IHRs*) dado pela Resolução n° 1 de 2015 da IAG (IAG, 2015). O IHRs deverá ser realizado com base em uma superfície de referência equipotencial do campo de gravidade com valor de geopotencial $W_0 = 62.636.853,4m^2s^{-2}$ e associado a uma época de referência específica (IAG, 2015).

Em 1985 foi lançado o primeiro satélite radar, denominado GEOSAT, para fins geodésicos (ESCUDIER et al., 2017, p. 4) e a partir de então, iniciou-se o lançamento de satélites exclusivamente para o monitoramento do nível do mar, denominados de satélites altimétricos. Por meio destes satélites, foi possível a obtenção de observações do nível do mar em uma escala global e num sistema de referência geocêntrico. Além disso, esta técnica proporcionou novas funcionalidades aos marégrafos, como por exemplo, determinação de movimentos verticais da crosta (NEREM; MITCHUM, 2002; FENOGLIO-MARC et al., 2012; CASTRO et al., 2017) e o monitoramento da estabilidade de satélites altimétricos por meio de marégrafos (MITCHUM, 1998).

Embora as observações maregráficas e de altimetria por satélites estejam sujeitas as diversas variações que afetam o nível do mar, os marégrafos, por estarem fixados na crosta terrestre, também registram movimentos tectônicos. Explorando este contexto, existem estudos cujos objetivos são: a) a determinação da tendência de movimento vertical absoluto da crosta ($\dot{\delta}_U$), na região do marégrafo, pela diferença entre a tendência de variação do nível do mar observado pelo satélite altimétrico relativo ao geocentro ($\dot{\delta}_A$); e b) a tendência de variação do nível do mar observado pelo marégrafo relativo a crosta terrestre ($\dot{\delta}_{TG}$). Estas variações podem ser integradas conforme a equação (1) (NEREM; MITCHUM, 2002; CASTRO et al., 2017):

$$\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda) = \dot{\delta}_A(\varphi, \lambda) - \dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda) \quad (1)$$

onde φ e λ são a latitude e longitude geodésicas, respectivamente.

Para fins de verificação da metodologia proposta pela equação (1), diversos estudos, como por exemplo Castro et al. (2017), compararam o valor de $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ com a tendência da variação vertical da posição do marégrafo obtida por uma técnica geo-

désica mais fidedigna, como por exemplo, o monitoramento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) contínuo da posição geocêntrica do marégrafo.

Nesse sentido, é importante destacar que a integração ou o uso conjunto de séries temporais de observações do nível do mar, provenientes de marégrafos e da altimetria por satélites, conforme exemplificado na equação (1), requer uma análise cuidadosa acerca dos dados e uma série de atividades tais como: a exclusão de *outliers*, tratamento de dados faltantes, aplicação ou remoção de correções aplicadas aos dados da altimetria por satélites, entre outros. Como exemplos de estudos relacionados com a determinação da variação do nível do mar na região de Imbituba a partir de dados maregráficos, da altimetria por satélites e posicionamento GNSS, pode-se citar os trabalhos de Dalazoana (2006), Da Silva e De Freitas (2014) e Da Silva (2017) que obtiveram tendências de elevação do nível médio do mar, em torno de 2,00 mm/ano, 2,05 mm/ano e 2,24 mm/ano, respectivamente.

A ideia central do presente trabalho é verificar a possibilidade de determinar movimentos verticais absolutos da crosta na localização do marégrafo de Imbituba, em Santa Catarina, a partir da diferença entre a tendência de variação da altitude da superfície do mar (*Sea Surface Height* - SSH) provinda de multimissões satelitais e a tendência de variação do nível do mar observado pela Estação Meteomaregráfica de Imbituba (EMMIMB).

1.2 HIPÓTESE

Se for possível identificar discrepância entre as séries temporais de valores de nível d'água observados pelo marégrafo de Imbituba (2001 - 2016) e por multimissões de altimetria por satélites (1991 - 2017), então é possível determinar movimentos verticais da crosta na região do marégrafo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Determinar a componente linear de movimentos verticais da crosta a partir de séries de observações do nível d'água provenientes do marégrafo de Imbituba e de multimissões de altimetria por satélite.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um algoritmo para a obtenção de dados maregráficos da RMPG;
- Processar qualitativamente as séries temporais maregráficas, de altimetria por satélite e de posicionamento GNSS;

- Correlacionar observações maregráficas com as de altimetria por satélite;
- Analisar a tendência temporal do nível médio do mar no Porto de Imbituba, discriminando movimentos verticais da crosta; e
- Validar os resultados da combinação de dados maregráficos e da altimetria por satélites com a série temporal de dados GNSS.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Brasil possui cerca de 10.800 quilômetros de costa atlântica, predominantemente, no sentido latitudinal (PRATES; GONÇALVES; ROSA, 2012). Ainda segundo a referência citada, a zona costeira rege uma ampla gama de funções ecológicas, tais como a prevenção de inundações, intrusão salina, erosão costeira, reciclagem de nutrientes entre outros. Além disso, na região costeira do Brasil reside uma parcela expressiva da população que detém boa parte dos fluxos econômicos do país.

Apesar da crescente preocupação em relação a futuros impactos decorrentes do aumento do nível do mar em regiões costeiras, a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) possui ainda uma baixa densidade de marégrafos atualmente em operação. Logo, para monitorar o nível do mar em regiões afastadas dos marégrafos, justificam-se os estudos que envolvam observações de nível do mar obtidas por outras técnicas, como por exemplo a altimetria por satélite.

Segundo Fenoglio-Marc et al. (2012), a integração de observações maregráficas e de altimetria por satélite representa uma alternativa para o monitoramento da posição geocêntrica de estações maregráficas que não dispõem de uma estação GNSS.

A determinação de deformações verticais da crosta e da variação do nível médio do mar com base em séries temporais GNSS, dados maregráficos e da altimetria por satélite tem sido foco de pesquisa pela comunidade Geodésica e Geofísica, porém, ainda pouco explorado ao longo da costa brasileira. Uma das justificativas para este fato é a curta duração das séries temporais maregráficas e de posicionamento GNSS, que limitam resultados mais fidedignos.

Em 2001, iniciou-se a operação do marégrafo digital de Imbituba e em setembro de 2007 foi instalada uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) a fim de possibilitar o monitoramento da posição geocêntrica do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba (DVB-IMBT). Em contrapartida, desde o início da década de 1990 ocorre o lançamento de satélites com as mesmas características orbitais o que possibilita observações contínuas ao longo dos anos. Citam-se, como exemplo, as missões TOPEX/Poseidon, Jason 1, 2 e 3, respectivamente. Desta

forma, as séries temporais de altimetria por satélite apresentam um registro maior em comparação com os registros do marégrafo digital e da estação RBMC de Imbituba (RBMC-IMBT). Portanto, a combinação de observações do marégrafo digital de Imbituba e de multimissões satelitais, permite um maior conjunto de séries temporais do nível do mar e conseqüentemente uma tendência de movimentos da crosta mais realística.

A Terra é um sistema complexo, com processos físicos, químicos e biológicos interagindo em diversas escalas espaciais, de micrômetros a escalas globais e temporais, de segundos a bilhões de anos (PLAG; PEARLMAN, 2009). Ainda de acordo com a referência anterior, a Geodésia tem como objetivo, a determinação dessas mudanças espaciais e temporais na forma da Terra, que envolve os oceanos, a cobertura de gelo e as superfícies terrestres, com precisão igual ou melhor que o nível de 1 ppb (parte por bilhão).

1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está organizado em 5 capítulos: Introdução, Fundamentação Teórica, Material e Métodos, Resultados e Discussões e Conclusões.

O Capítulo 2 descreve a fundamentação teórica do trabalho, onde é apresentado um breve estado da arte das diferentes técnicas de observações do nível do mar, mais frequentemente empregadas pela Geodésia: observações maregráficas, de altimetria por satélite e a mais recente técnica, baseada em características de sinais recebidos por um receptor GNSS, após estes serem refletidos pela superfície do oceano. São apresentados aspectos relacionados a integração de observações maregráficas e de altimetria por satélite. Além disso, também é discutido a importância da Geodésia no monitoramento das variações do sistema Terra e as perspectivas futuras deste campo, através da concepção do GGOS e do estabelecimento do IHRF.

O Capítulo 3 é destinado à metodologia da pesquisa. São apresentados três tópicos principais: a área de estudo, o material e os métodos empregados. A área de estudo especifica a localização do marégrafo e da estação GNSS em Imbituba-SC e a delimitação da área sobre o oceano, que contém as observações de altimetria por satélite. O tópico do material descreve o tipo de dado e o período das séries temporais empregadas no estudo. Por fim, o tópico dos métodos apresenta a forma de obtenção dos dados, questões inerentes a integração de dados maregráficos e de altimetria por satélite para a determinação de movimentos verticais da crosta e a comprovação da análise por meio de séries temporais da componente vertical provinda do monitoramento contínuo GNSS.

No Capítulo 4 são descritos os resultados e as discussões da pesquisa, onde

é apresentada a aplicação para aquisição e pré-processamento de dados maregráficos e realizada uma análise das marés sintéticas para o preenchimento de lacunas nas observações maregráficas. São apresentadas as etapas de processamento das séries temporais de dados maregráficos e da altimetria por satélite. Também é realizada a comparação das séries temporais obtidas a partir das observações maregráficas e de altimetria por satélites e por fim são apresentadas as regressões lineares de variação da coordenada vertical a partir das diferentes séries de dados.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais do estudo. Também são sugeridas recomendações para possíveis trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 POTENCIAL DA GEODÉSIA NO MONITORAMENTO DAS VARIAÇÕES DO SISTEMA TERRA

Segundo Plag e Pearlman (2009, p. 4), para prever as mudanças no sistema Terra, é necessário um sistema integrado de monitoramento geodésico composto por diferentes constituintes, denominados de “Três Pilares da Geodésia”: *Geocinemática*, que visa determinar a forma da superfície terrestre e suas variações espaciais e temporais; *Rotação da Terra*, que objetiva determinar e monitorar as variações na rotação da terra; e *Campo da gravidade*, com o objetivo de determinar e monitorar o campo de gravidade externo da Terra e as suas redistribuições de massa.

2.1.1 GGOS

A necessidade da compreensão da dinâmica do sistema Terra e de suas variações temporais e espaciais, resultaram, em 2003, no estabelecimento do GGOS pela IAG durante a Assembléia Geral da União Geodésica e Geofísica Internacional em Sapporo, Japão (GGOS, 2019).

O GGOS visa fornecer uma infraestrutura geodésica capaz de medir variações na forma, no campo de gravidade e na rotação da Terra mediante latência cada vez menor e precisão e consistência de 0,1 a 1 ppb (PLAG; PEARLMAN, 2009, p. 10). Conforme IAG (2016), esse propósito é realizado, principalmente, por meio de manutenções e melhorias contínuas das redes de instrumentação geodésica e missões geodésicas espaciais e a análise combinada de observações geométricas e gravimétricas feitas por essas redes.

Com o propósito de reunir colaboradores para tratar de questões específicas, o GGOS é dividido em quatro Áreas de Estudo: *Focus Area 1 - International Height Reference System (IHRIS)*; *Focus Area 2 - Geohazards Monitoring*; *Focus Area 3 - Sea Level Changes, Variability, and Forecasting*; e *Focus Area 4 - Geodetic Space Weather Research*. Somente as áreas de estudo 1 e 3 serão abordadas na sequência, uma vez que vão em direção da linha de interesse do presente trabalho.

Assim sendo, a Área de Estudo 1 visa padronizar os sistemas de altitude em todo o mundo por meio da definição e realização de um sistema de referência vertical global que suporte altitudes geométricas (elipsoidais) e físicas (normais, ortométricas, geoidais) com precisão centimétrica e estabilidade a longo prazo das coordenadas verticais (GGOS, 2019). Um primeiro passo para o estabelecimento de um sistema global de altitudes unificadas foi o lançamento da Resolução n° 1 de 2015 da IAG (IAG,

2015) e o próximo passo será a realização do IHRS, ou seja, o estabelecimento do IHRF (*International Height Reference Frame*).

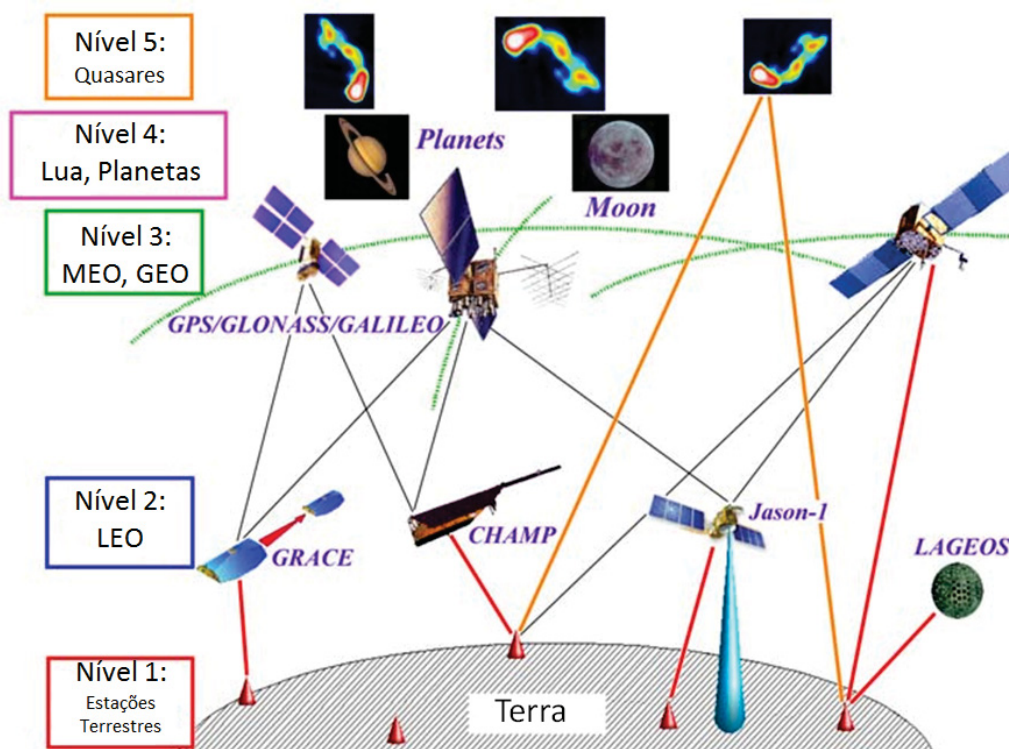
A preocupação com os impactos sobre as regiões costeiras em função da elevação do nível do mar, levou o GGOS, em 2010, a estabelecer a Área de Estudo 3, com o objetivo de estimar e prever mudanças globais e locais do nível do mar em um horizonte de 10 a 30 anos a partir das seguintes tarefas (GGOS, 2019):

- Identificar ou (re)definir os requisitos para uma melhor compreensão do aumento global e regional/local do nível do mar e de sua variabilidade, especialmente na medida em que se refiram ao monitoramento geodésico fornecido pela infraestrutura GGOS e seus vínculos atuais com organizações externas (por exemplo outros sistemas de observação);
- Identificar lacunas nas técnicas de observação geodésica de modo a auxiliar nas pesquisas sobre o nível do mar e aprimorar a rede de monitoramento e os serviços GGOS;
- Estabelecer a Área de Estudo 3 como interface entre o GGOS e as organizações preocupadas com os aspectos de pesquisa do nível do mar; e
- Apoiar, a longo prazo, a previsão do nível do mar global e regional para o século XXI, com ênfase especial a projetos locais e regionais que sejam relevantes para as comunidades costeiras e que dependam da perspectiva global do GGOS.

De acordo com Plag e Pearlman (2009, p. 240), o GGOS visa definir uma infraestrutura geodésica compreendida por diversos níveis de observação:

- Nível 1: infraestrutura geodésica terrestre;
- Nível 2: missões satelitais de órbitas baixas (LEO- Low Earth Orbit), como por exemplo, as missões gravimétricas (CHAMP e Grace), da altimetria por satélites (T/P, Jason-1, 2 e 3) e satélites voltados a aplicação da técnica SLR (*Satellite Laser Ranging*), como o Lageos;
- Nível 3: satélites GNSS, como por exemplo, GPS E GLONASS (*Global Navigation Satellite System*);
- Nível 4: retrorrefletores laser instalados na Lua (técnica *Lunar Laser Ranging - LLR*); e
- Nível 5: objetos extragalácticos (quasares) emitem sinais de rádio que são recebidos por estação terrestres VLBI.

FIGURA 1 – NÍVEIS DO GGOS



FONTE: Adaptado de Plag e Pearlman (2009, p. 239)

2.1.2 O IHRIS/IHRF

Segundo a IAG (2015), a determinação de pequenas variações do nível médio do mar de alguns milímetros por ano, necessita de uma referência espacial global estável durante um longo período de tempo. Para isso, é fundamental a definição de um sistema altimétrico que atenda os requisitos e padrões exigidos pelo GGOS. Neste contexto, a Resolução n° 1 de 2015 da IAG estabelece as seguintes convenções para a definição do IHRIS (IAG, 2015):

- O nível de referência vertical é uma superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra com valor de geopotencial W_0 ;
- Parâmetros, observações e dados devem estar relacionados com o sistema médio de maré;
- A unidade de comprimento é o metro e a unidade de tempo é o segundo (SI);
- A coordenada vertical será a diferença entre o valor do potencial do campo da gravidade terrestre (W_P), no ponto P , e o valor do geopotencial no geoide (W_0); a diferença de potencial da gravidade ou geopotencial ($-\Delta W_P$) também

é designada de número geopotencial (C_P), dado pela seguinte relação: $C_P = -\Delta W_P = W_0 - W_P$; e

- A referência espacial da posição do ponto P ou $\mathbf{X}_P(X_P, Y_P, Z_P)$ para o potencial $W_P = W(\mathbf{X}_P)$ será no ITRS (*International Terrestrial Reference System*).

Além das convenções citadas, a resolução em questão também definiu o valor do geopotencial da superfície de referência do IHRS igual a $W_0 = 62636853,4m^2/s^2$.

De modo geral, as convenções do IHRS são diretrizes para a implantação de uma rede vertical que suporte o monitoramento das mudanças do sistema Terra. Essa rede é denominada de IHRF e representa a realização ou materialização do IHRS. As principais propostas para o estabelecimento do IHRF são (IHDE et al., 2017):

- O procedimento para determinação de W_0 deve ser documentado em convenções e guias para assegurar a sua reprodução e interpretação de mudanças. O valor de W_0 é definido em resolução como já mencionado em parágrafos anteriores;
- O elemento central do IHRF é um Modelo Global do Geopotencial (MGG, do inglês *Global Geopotential Model* - GGM), uma vez que, a disponibilidade de MGGs de alta resolução possibilita o cálculo direto de W_P por meio da introdução de coordenadas ITRF de qualquer ponto nas equações de expansão em harmônicos esféricos. No entanto, os MGGs não têm, na atualidade, ainda uma resolução suficiente para tal propósito;
- A diferença de potencial ($-\Delta W_P$) em relação ao valor convencionado W_0 deve ser conhecida por meio de uma rede de estações de observações geodésicas de maior acurácia, onde as observações possam ser geradas para derivar os elementos definidores no maior nível de qualidade possível, consistentes com outros sistemas e redes de referência; e
- A rede de referência IHRF deve seguir a mesma hierarquia da rede de referência ITRF, isto é, uma rede global com densificações nacionais e regionais. Esta rede deve conter:
 - Marégrafos de referência (*Datum* vertical local);
 - Principais pontos nodais de redes de nivelamento;
 - Pontos limítrofes conectando vizinhanças de *Data* Verticais;
 - Estações de referência geométricas (ITRF e densificações); e
 - Observáveis geodésicas fundamentais (conexão entre W_0 , o tempo atômico internacional e gravidade absoluta).

No âmbito do SIRGAS, o Grupo de Trabalho III (GT-III: Datum Vertical) foi criado durante reunião do Projeto SIRGAS no Rio de Janeiro em 6 de setembro de 1997 (IBGE, 1998, p. 8), com a tarefa inicial de definir um sistema unificado de altitudes e coordenar seu estabelecimento e manutenção. Sob o ponto de vista moderno, e com o intuito de modernizar o sistema de altitudes na América Latina e no Caribe, o principal objetivo do GT-III é unificar os diferentes *Data* ou referências verticais dos países membros do SIRGAS à uma mesma superfície equipotencial (W_0) com base na definição do IHRs (SIRGAS, 2019).

2.1.3 O GGRS/GGRF

A determinação de mudanças na Terra, conforme propósitos da IAG e do GGOS, requer Sistemas Geodésicos de Referência (SGR) estáveis ao longo do tempo e de consistência homogênea em todo o globo. Além disso, inconsistências existentes entre estratégias de análise, modelos e produtos relacionados à geometria e ao campo de gravidade da Terra devem ser resolvidas (IHDE et al., 2015). Para resolver essa questão, a Assembleia Geral das Nações Unidas adotou em 26 de Fevereiro de 2015 a resolução do *Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development* (A/RES/69/266) (UNITED NATIONS, 2015).

O GGRS (*Global Geodetic Reference System*) visa estabelecer um sistema de referência comum para a geometria e o campo de gravidade da Terra, por meio da combinação de diferentes SGR: ITRS-ITRF (*International Terrestrial Reference System - International Terrestrial Reference Frame*), IHRs-IHRF (*International Height Reference System - International Height Reference Frame*), ICRS-ICRF (*International Celestial Reference System - International Celestial Reference Frame*) e IGSNn (*International Gravity Standardisation Net*). A realização do GGRS passa pelas seguintes especificações (IAG, 2016):

- Para o ponto físico P , o potencial $W_P = W(\mathbf{X})$ é avaliado no ponto com vetor de posição \mathbf{X} para o ITRS;
- A unidade de tempo é o segundo e a unidade de comprimento é o metro, ambos no Sistema Internacional de Unidades (SI);
- A altitude física é a diferença $-\Delta W_P$ entre o potencial da gravidade terrestre no ponto P (W_P) e o potencial da superfície equipotencial de referência ou o potencial no geoide W_0 ;
- O vetor de gravidade (\vec{g}) é o gradiente do potencial do campo de gravidade da Terra;
- A geometria e a gravidade são funções implícitas do tempo;

- São necessários parâmetros fundamentais e convenções para o uso de modelos e procedimentos;
- O ICRS fornece a base celeste para o GGRS; e
- A relação entre o ITRS e o ICRS é descrita pelos Parâmetros de Orientação da Terra (EOP).

A materialização do GGRS, o *Global Geodetic Reference Frame* (GGRF), baseia-se no preceito de uma rede de pontos terrestres global, com densificação nacional e regional da infraestrutura geodésica. Esta rede de estações GGRF tipicamente compreende (IAG, 2016):

- Observatórios geodésicos fundamentais que empregam uma ou mais técnicas geodésicas espaciais co-localizadas com instrumentos gravimétricos, permitindo a ligação entre \mathbf{X} , W e \vec{g} ; e
- Outras estações geodésicas que incluam também marégrafos de referência, pontos de referência de altitude e pontos gravimétricos co-localizados, sempre que for possível com instrumentos geodésicos espaciais;

Todas as estações GGRF devem:

- Funcionar continuamente, a longo prazo, para assegurar a estabilidade do GGRF;
- Ser equipadas com tecnologia de observação de ponta, para produzir medições de quantidades geodésicas;
- Ser monitoradas continuamente para detectar deformações superficiais da Terra; e
- Ser conectadas a *Data* verticais para relacionar suas diferenças de geopotencial para unificação.

2.1.4 Comitê de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marítima

Segundo Bosch (2016), a topografia da Terra e a profundidade do mar são, tradicionalmente, observadas em diferentes referenciais verticais o que pode implicar no risco de subestimar, como por exemplo, erosões e inundações em regiões costeiras. Para solucionar esse problema, a CONCAR estabeleceu o CICVTM para desenvolver estudos com o intuito de padronizar uma metodologia que integre as superfícies de referência para altitudes e profundidades em regiões costeiras a fim de viabilizar a correta avaliação dos riscos de inundação costeira em decorrência das mudanças climáticas (CICVTM, 2019).

O relatório denominado “*European Experiences on Refinement, Connection, and Unification of Vertical Reference Surfaces in Coastal Zones*” sob autoria de Bosch (2016), descreve três experiências europeias sobre a conexão e unificação de superfícies verticais em regiões costeiras: BATHYELLI (França), VORF (Reino Unido) e BLAST (*North Sea Neighbors*). A título de exemplificação, o projeto francês BathyElli (*Bathymetry referred to the Ellipsoid*) consiste na determinação do NMM absoluto a partir da combinação de observações provindas de (BOSCH, 2016; s.d.):

- Altimetria por satélite para áreas a mais de 16 quilômetros (10 milhas) da costa;
- Marégrafos para determinar o NMM em locais costeiros;
- Levantamentos GPS (*Global Positioning System*) no modo cinemático, próximos à costa, por meio de navios para preencher lacunas (*gaps*) deixadas pela altimetria por satélite e pelos marégrafos.

2.2 DEFINIÇÃO DO *DATUM* VERTICAL BRASILEIRO

A definição clássica de *Datum* Vertical considerava o nível médio do mar local proveniente de um certo número de anos de observações maregráficas como uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra (GEMAEL, 1999, p. 211).

Embora de caráter provisório, o primeiro *Datum* Vertical Brasileiro foi definido com base em um ano de observações (1919-1920) do nível do mar pelo Marégrafo de Torres no Rio Grande do Sul, cujo propósito era determinar a componente altimétrica da Cadeia de Triangulação de 1^a ordem e, assim, fornecer as coordenadas dos pontos de apoio básico necessários ao mapeamento da Zona Carbonífera de Santa Catarina (ALENCAR, 1990).

Ainda com base na mesma referência citada anteriormente, em 1958 (ou 1959 segundo LUZ (2008)), o *Datum* Vertical de Imbituba (DVI) substituiu o *Datum* de Torres, pois, contava com 9 anos de observações maregráficas (1949-1957) no porto de Imbituba em Santa Catarina. Nesta época o *Datum* de Imbituba estava sob a supervisão e manutenção da instituição norte-americana denominada IAGS (*Inter American Geodetic Survey*). Atualmente, na maior parte do território brasileiro, o DVI ainda é a referência das altitudes fundamentais do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

O banco de dados do PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*) armazena as médias mensais e anuais da rede maregráfica do IAGS sendo que as observações existentes para o marégrafo original de Imbituba são de 1949 a 1969 (PSMSL, 2019).

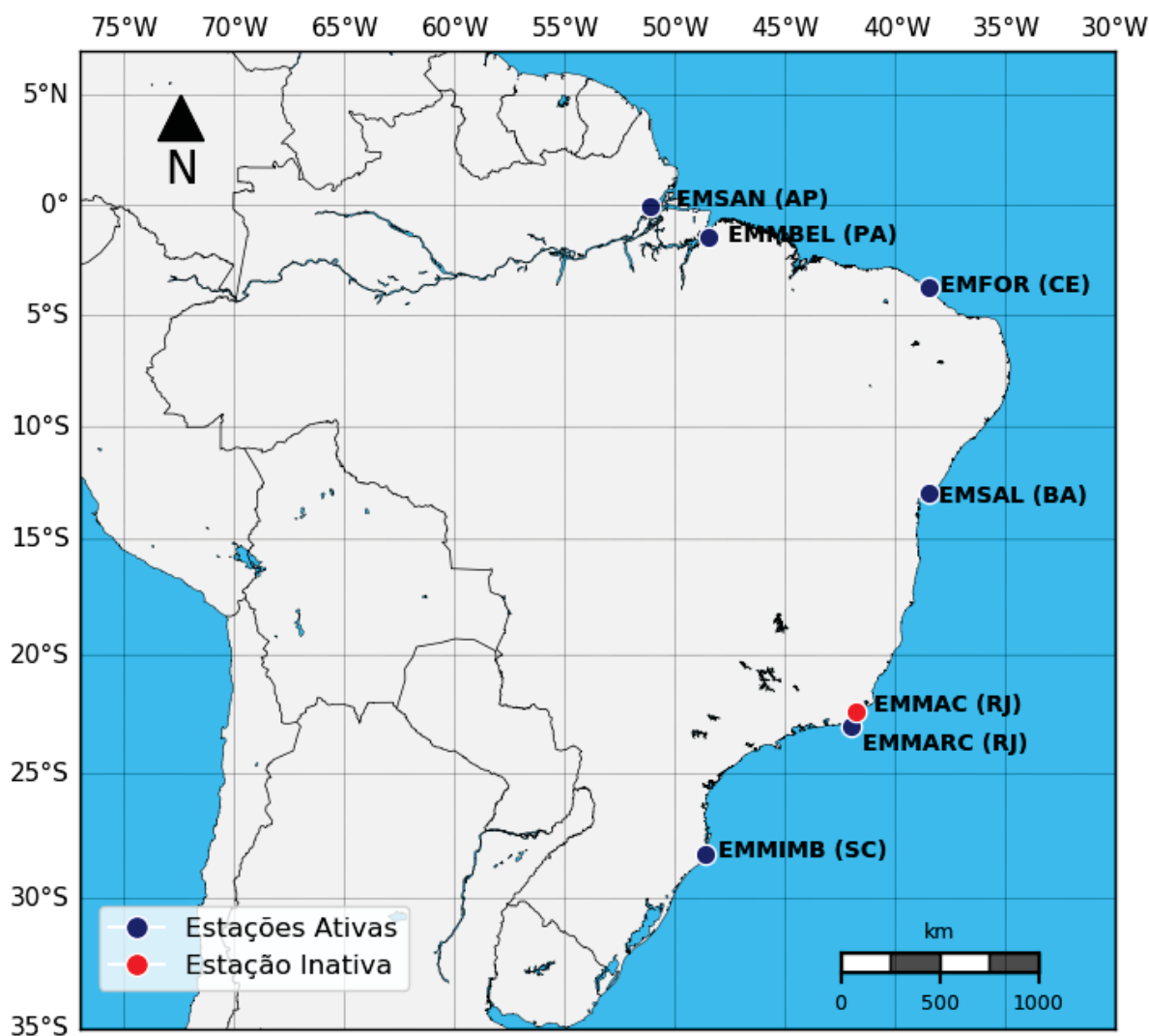
Segundo LUZ (2008), apesar do PSMSL não ter dados do período após a operação das estações ter sido assumida pelas autoridades portuárias brasileiras, os documentos da antiga Portobrás comprovam que as observações existem. O IBGE obteve somente a cópia dos dados originais (maregramas) coletados entre 1986 e 1992 da Companhia Docas de Imbituba.

2.2.1 Rede Maregráfica Permanente para Geodésia

A Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) foi proposta pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR) ao IBGE em 1996 (LUZ; NEVES; DE FREITAS, 1996) e no ano seguinte a RMPG foi lançada com o objetivo de realizar a transição para o *Datum* Vertical SIRGAS e a correlação entre o *Datum* de Imbituba e outros referenciais altimétricos existentes ao longo do litoral brasileiro (LUZ; DE FREITAS; DALAZOANA, 2002). Em 2001 foram estabelecidas as primeiras estações da RMPG pelo IBGE e em 2008 a capacidade operacional plena foi alcançada quando as estações de Santana, Fortaleza, Salvador, Macaé e Imbituba passaram a contar com sensores maregráficos digital e convencional (IBGE, 2010).

Atualmente, o IBGE mantém seis estações digitais da RMPG ativas (Imbituba, Salvador, Santana, Fortaleza, Arraial do Cabo e Belém) e uma estação inativa (Macaé) desde junho de 2015 (IBGE, 2019), conforme apresentado na FIGURA 2. A identificação e o período de operação das estações da RMPG é apresentada na TABELA 1.

FIGURA 2 – ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS PERTENCENTES A REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA



FONTE: O autor (2020)

TABELA 1 – IDENTIFICAÇÃO E PERÍODO DE OPERAÇÃO DAS ESTAÇÕES DA RMPG

Estação RMPG	Identificação	Início e Fim de operação
Imbituba - SC	EMMIMB	2001 - atual
Macaé - RJ	EMMAC	2001 - 2015
Salvador - BA	EMSAL	2004 - atual
Santana - AP	EMMSAN	2005 - atual
Fortaleza - CE	EMFOR	2008 - atual
Arraial do Cabo - RJ	EMMARC	2017 - atual
Belém - PA	EMMBEL	2017 - atual

FONTE: IBGE (2019)

NOTA: EMM = Estação Meteoromaregráfica

EM= Estação Maregráfica

Segundo IBGE (2019), os valores disponibilizados de nível d'água dos marégrafos da RMPG, são relativos a um referencial próprio do IBGE e podem ser acessados pelo portal do IBGE com amostragem a cada cinco minutos em arquivos compactados (extensão ZIP) diários em formato de texto (txt). Antes das observações serem disponibilizadas ao público é realizado um controle de qualidade e uma reformatação do horário para o fuso horário de Brasília, sem considerar horário de verão. Os arquivos apresentam três colunas: a primeira registra a data (dd/mm/aaaa); a segunda o horário da coleta (hh:mm:ss); e a terceira o valor do nível d'água (em metros). Para algumas Estações Maregráficas estão disponíveis 4 colunas onde as últimas duas colunas referem-se aos dados dos sensores Radar e Encoder, respectivamente.

Cada estação da RMPG é composta no mínimo de dois sistemas independentes de observação do nível do mar, um analógico e outro digital. O primeiro disponibiliza os dados de nível do mar em meio gráfico (maregrama) e o segundo em meio digital. Caso ocorra interrupção no funcionamento do equipamento digital, as observações serão providas do equipamento analógico com amostragem horária IBGE (2019). De acordo com IBGE (2002), o equipamento digital não garante a qualidade e a infalibilidade da medição do nível do mar em relação aos equipamentos convencionais, entretanto, permitem realizar o monitoramento permanente das condições de operação dos mesmos e ter acesso imediato aos dados coletados.

2.2.2 Breve Histórico do Princípio de Funcionamento dos Marégrafos

Os antigos egípcios previam o início das inundações do Rio Nilo por meio de nilômetros que eram marcas na margem do rio, escadas ou pilares, ligados aos templos (PUGH; WOODWORTH, 2014, p. 94), conforme apresentado na FIGURA 3A. O princípio de funcionamento dos nilômetros é similar ao das régua de marés encontradas com frequência em portos. Basicamente, a leitura do nível instantâneo do mar é verificada diretamente na graduação da régua por alguém designado para esta função, como pode ser visto na FIGURA 3B.

FIGURA 3 – NILÔMETRO NA ILHA DE RODA EM CAIRO NO EGITO (A) - RÉGUA DE MARÉ NO PORTO IMBITUBA (B)



FONTE: FIGURA 3A - David Stanley ([link](#)),
FIGURA 3B - Dalazoana (2006)

Segundo Pugh e Woodworth (2014, p. 22), a leitura das réguas de marés proporcionam uma acurácia de 2 cm em condições de águas calmas, o que as tornam obsoletas para o monitoramento do nível do mar com qualidade geodésica. No entanto, as réguas de marés são fundamentais para verificar possíveis erros sistemáticos em marégrafos por meio do Teste Van de Casteele, visto que, elas permitem a observação do nível instantâneo do mar sem necessidade de uma fonte de energia, sistema de registro e mecanismos de filtragem (IBGE, 2010).

Em 1665, a publicação de Robert Moray denominada de *Philosophical Transactions of the Royal Society*, descreve um instrumento para medição do nível da água denominado de *stilling-well*, o qual consistiu de um tubo vertical com um pequeno orifício aberto no fundo por onde ocorre a entrada da água do mar (MORAY, 1665). A água dentro do tubo permite uma observação mais precisa do nível do mar, pois, nestas condições as altas frequências são atenuadas. Embora o instrumento citado não tenha sido construído por Moray, sua idealização foi empregada mais tarde e até hoje é amplamente utilizada em marégrafos (CARTWRIGHT, 1999).

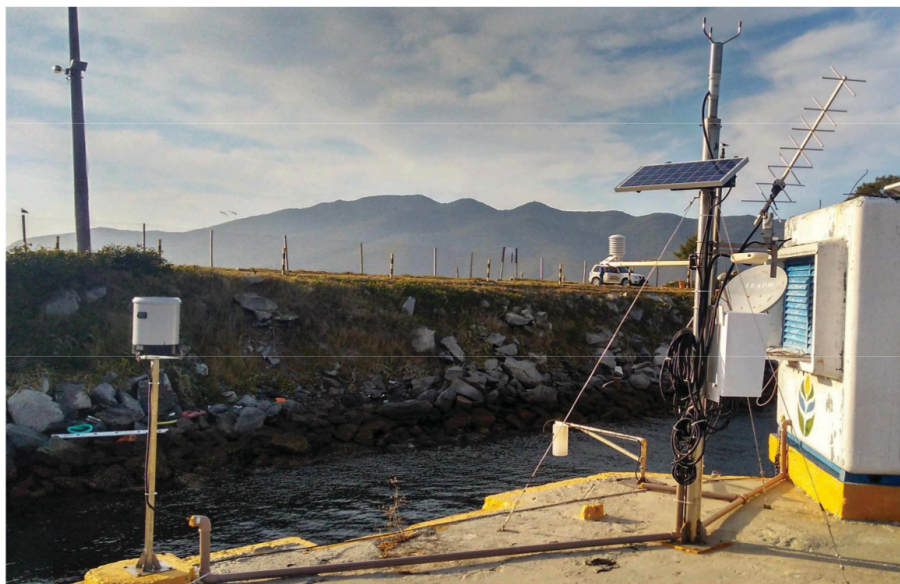
Um dos primeiros marégrafos com registrador automático do nível do mar foi construído em 1831 pelo Engenheiro Civil Henry Robinson Palmer. Palmer desejava obter uma série de observações precisas durante todas as mudanças das marés no estuário do Tamisa em Sheerness (Inglaterra) e para isso construiu um equipamento que registrava a subida e a descida do nível da água a partir dos movimentos verticais de uma boia flutuante em um tubo com um pequeno orifício no fundo. A boia era conectada a uma pena que gravava os movimentos da água em um papel (maregrama) enrolado a um cilindro de latão programado para realizar uma rotação em seis horas (PALMER, 1831).

Além dos sistemas de observações do nível d'água citados anteriormente, existem outros sistemas, cujo o princípio básico de funcionamento e vantagens serão apresentados a seguir (PUGH; WOODWORTH, 2014):

- **Pressão:** consiste em medir a pressão em um ponto fixo, localizado abaixo da superfície do mar e com base em relações de hidrostática básica determinar o valor de nível d'água. A pressão aumenta de forma diretamente proporcional à medida que o nível d'água aumenta. De modo geral, esse método consiste em determinar o "peso" da coluna d'água acima do medidor. Este sistema permite um bom desempenho geral e estabilidade dos dados;
- **Ondas sonoras:** consiste na medida da distância pelo tempo gasto por um sinal de som que viaja da fonte para uma superfície refletora (nível d'água) e vice-versa. Além do nível do mar, outros parâmetros como temperatura da água, pressão e temperatura do ar e velocidade do vento podem ser registrados e transmitidos ao mesmo tempo;
- **Radar:** consiste em cronometrar o tempo de viagem de ida e volta de um sinal como ocorre no sistema de ondas sonoras, entretanto, neste caso o sinal emitido é de radiação eletromagnética. Os marégrafos de radar são bastante utilizados, na atualidade, devido

ao baixo custo e à facilidade de instalação e manutenção. A FIGURA 4 apresenta o marégrafo da RMPG em Arraial do Cabo equipado com uma estação meteorológica e sensores de nível de radar e enconder.

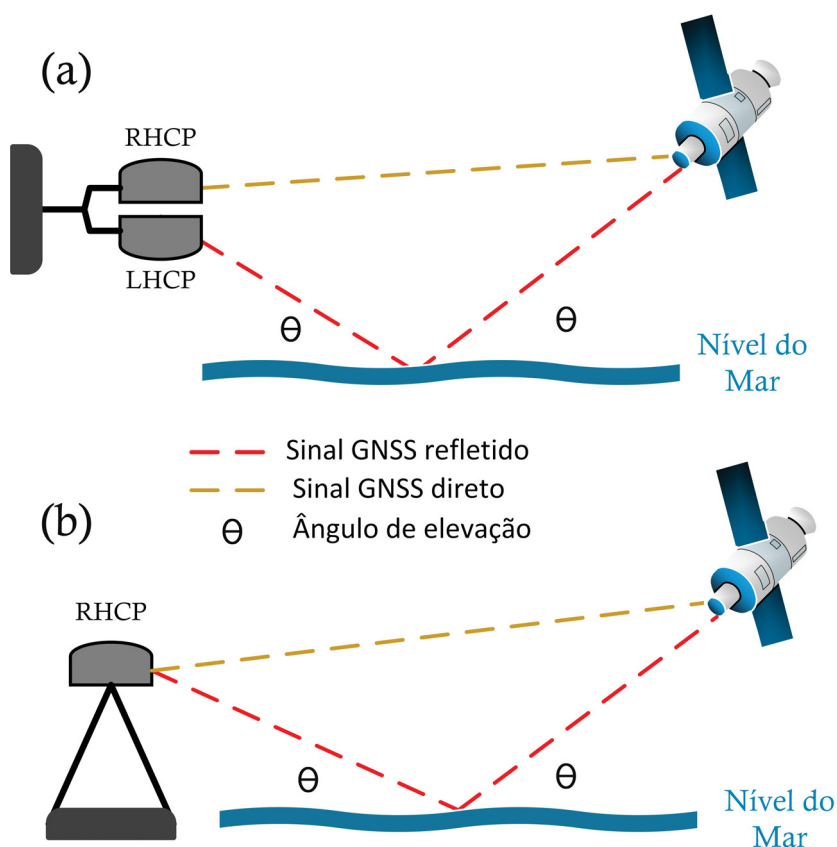
FIGURA 4 – MARÉGRAFO DIGITAL DA RMPG EM ARRAIAL DO CABO - RJ



FONTE: IBGE (2019)

Além das técnicas citadas anteriormente, Martin-Neira et al. (1993) propuseram, em 1993, o conceito de altimetria oceânica baseada em refletometria GNSS. De modo geral, o princípio considera que o atraso de tempo (*time delay*) entre os sinais diretos e refletidos, está diretamente correlacionado com a diferença de altura entre o receptor e a superfície refletora (ROUSSEL et al., 2015). As observações do nível do mar são realizadas pelo uso de duas antenas: uma com visada para o sentido zenital, a fim de receber o sinal direto (polarização circular à direita - RHCP) e a outra com visada para o sentido nadiral a fim de receber o sinal refletido (principalmente polarização circular à esquerda - LHCP), ambas montadas de modo que os seus centros de fase fiquem alinhados ao longo da vertical local (MARTIN-NEIRA et al., 2001; LÖFGREN; HAAS; JOHANSSON, 2011; LARSON; LÖFGREN; HAAS, 2013), conforme apresentado na Figura 5a.

FIGURA 5 – ESQUEMA PARA OBSERVAÇÕES DO NÍVEL DO MAR ATRAVÉS DE RECEPTOR GNSS COM ANTENA POSICIONADA NO SENTIDO: ZENITAL E NADIRAL (a) E SOMENTE ZENITAL (b)



FONTE: Adaptado de Larson, Löfgren e Haas (2013)

Embora o objetivo da antena RHCP, direcionada ao zênite, seja maximizar o sinal direto e suprimir os sinais refletidos, é sabido que ela não rejeita completamente a energia dos sinais refletidos. À vista disso, Larson, Löfgren e Haas (2013) apresentam um método para monitorar o nível do mar local pela utilização de um único receptor GNSS com qualidade geodésica, conforme apresentado na Figura 5b.

2.3 ASPECTOS GERAIS DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE

A altimetria por satélite fornece as observações instantâneas da superfície do mar, gelo ou grandes corpos d'água na superfície com relação a um referencial, normalmente um elipsoide de referência global, com uma precisão da ordem de alguns centímetros (PLAG; PEARLMAN, 2009, p. 40-43).

Um satélite altimétrico é equipado, basicamente, com um transmissor, um receptor, um sistema de temporização e um sistema de coleta de dados (LU; QU; QIAO, 2014, p. 55). Conforme abordado em Chelton et al. (2001, p. 1) e Seeber (2003, p. 144), o princípio básico de funcionamento dos satélites altimétricos consiste na transmissão de um pulso de radiação eletromagnética (micro-ondas), em direção nadiral até a superfície do mar. Este pulso interage

com a superfície do mar e reflete de volta ao receptor do altímetro. O tempo de percurso (t) entre a transmissão e a recepção do sinal multiplicado pela velocidade de propagação da luz no vácuo (c) permite determinar a distância (*range* - R) entre o satélite e a superfície do mar, conforme apresentado na equação (2):

$$R = \frac{ct}{2} - \sum_j \Delta R_j \quad (2)$$

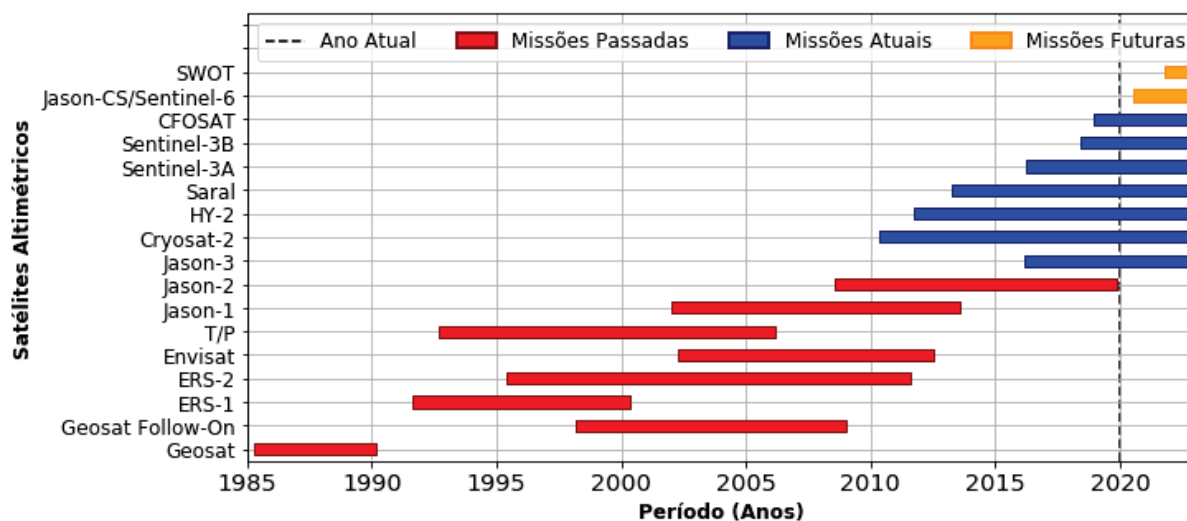
onde o termo $\Delta R_j, j = 1, \dots$ corresponde a um conjunto de correções, como por exemplo, dos efeitos de refração atmosférica, viés do estado do mar, entre outros.

Além da determinação do valor de R , as características dos sinais refletidos de altimetria por satélite contém informações sobre a rugosidade, a altura das ondas e a velocidade do vento sobre a superfície oceânica (BENVENISTE, 2011, p. 3).

O sinal que chega à superfície do mar é parcialmente absorvido pela água do mar e parcialmente disperso para diversas direções. A refletividade da água é alta na faixa de frequência de micro-ondas entre 2-18 GHz e por isso essas faixas são as mais adequadas para a altimetria por satélite. Frequências superiores a 18 GHz, causam diminuição da potência do sinal transmitido e recebido pelo altímetro (CHELTON et al., 2001, p. 4).

Com o propósito de aumentar a série temporal de observações do nível do mar por meio da altimetria por satélite, são lançados satélites com as mesmas características orbitais, principalmente desde meados da década de 1990, de modo que, os dados mantenham um padrão para permitir o estudo de fenômenos oceânicos ao longo do tempo e do espaço. Neste contexto, cita-se como exemplo o estudo de Castro et al. (2017) que analisou a variação do nível do mar por meio de uma série temporal de observações providas dos satélites TOPEX/Poseidon, Jason-1 e Jason-2, entre janeiro de 1994 e janeiro de 2015 (aproximadamente 20 anos). A FIGURA 6 apresenta o período de operação de alguns satélites altimétricos.

FIGURA 6 – PERÍODO DAS PRINCIPAIS MISSÕES ALTIMÉTRICAS OCEÂNICAS



FONTE: Adaptado de AVISO (2020)

A determinação das variações locais do nível do mar requer que os satélites altimétricos sejam mantidos em uma órbita repetida. No entanto, diversas perturbações, como por exemplo, o arrasto atmosférico e a pressão da radiação solar, fazem com que a órbita se desvie. Para o Geosat, por exemplo, esse desvio fez com que a trilha (projeção da órbita do satélite na superfície da Terra, onde o satélite realiza as observações) variasse ± 1 km em relação a trilha nominal (BRENNER; KOBLINSKY; BECKLEY, 1990).

A distância entre o altímetro e o nível do mar é determinada com base na média de todas as elevações elementares dentro do campo de visão ou pegada (*footprint*) abrangido pela largura do feixe de micro-ondas incidente sobre a superfície do mar. De modo geral, as missões altimétricas utilizam um diâmetro de pegada do feixe de 1 a 10 km sobre a superfície do mar (CHELTON et al., 2001, p. 11).

A posição do satélite fornece a referência para as observações da altimetria por satélite e por isso a Determinação Precisa da Órbita (*Precise Orbit Determination - POD*) é fundamental para garantir um produto altimétrico final de qualidade geodésica. De acordo com Dalzoana (2006), a determinação da órbita dos satélites altimétricos consiste na determinação da posição tridimensional do centro de massa do satélite a intervalos regulares de tempo, com relação a um elipsoide de referência (por exemplo, WGS84). Diferentes sistemas de rastreamento são empregados para a POD: SLR (*Satellite Laser Ranging*), GPS (*Global Positioning System*), DORIS (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*), entre outros. Mais informações relativas a POD podem ser encontradas em Chelton et al. (2001, p. 73,79).

Com o advento de instrumentos mais precisos voando em uma trajetória muito mais conhecida, a altimetria de radar começou a fornecer informações valiosas para a Geodésia, Oceanografia, Geofísica, Glaciologia e Hidrologia Continental.

2.3.1 Breve Histórico da Evolução das Missões Altimétricas

O potencial da altimetria por satélite foi reconhecido pelo Congresso de Williams-town em 1969 e já durante a década de 1970 foi lançada a missão Skylab (*Sky Laboratory*, 1973–1974) que forneceu as primeiras medições das ondulações do geóide marinho (ESCU-DIER et al., 2017; AVISO, 2020; KAULA et al., 1970). Posteriormente, foi lançada a missão GEOS-3 (*Geodynamic Experimental Ocean Satellite*, 1975-1979), que forneceu observações altimétricas mais precisas por meio de um conjunto de refletores a laser a bordo do satélite. A missão SEASAT, (*SEAFaring SATellite*, Junho de 1978 - Outubro de 1978), evidenciou a capacidade da altimetria por satélite de monitorar os oceanos em mesoescala e foi a primeira missão que possibilitou a livre distribuição dos dados aos cientistas de todo o mundo para o aprimoramento de novas missões altimétricas e a missão GEOSAT (*GEODetic SATellite*, 1985 - 1995), objetivou medir o geóide marinho para a Marinha dos EUA a partir de dados de alta qualidade a longo prazo (ESCU-DIER et al., 2017, p. 4,5). Lançada em 1998, a missão GEOSAT follow-on (GFO) deu sequência às observações GEOSAT. A TABELA 2 apresenta as características de alguns satélites altimétricos.

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

Missão	Altitude (km)	Inclinação (graus)	Repetitividade (dias)	Agências Responsáveis	Data de Lançamento	Data Final
Skylab	435	50	-	NASA	1973	1974
Geos - 3	830	114.98	-	NASA	1975	1979
Seasat	800	108	17	NASA	26/07/1978	10/10/1978
Geosat	800	108	17	Marinha dos EUA	10/03/1985	31/01/1990
ERS 1	785	98.52	35, 3 (gelo) e 168 (geodesico)	ESA	17/07/1991	31/03/2000
TOPEX/ Poseidon	1336	66	9.9156	NASA e CNES	10/08/1992	18/01/2006
ERS 2	785	98.52	35	ESA	21/04/1995	06/07/2011
GFO	800	108	17	Marinha dos EUA e NOAA	10/02/1998	26/11/2008
Jason-1	1336	66	9.9156	NASA e CNES	07/12/2001	01/07/2013
Envisat	782.4 - 799.8	98.55	30 - 35	ESA	01/03/2002	08/06/2012
Jason-2	1336	66	9.9156	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA	20/06/2008	10/10/2019
Cryosat-2	717	92	369 dias com subciclo de 30 dias	ESA	08/04/2010	ativo
SARAL/ AltiKa	800	98.55	35	ISRO e CNES	25/02/2013	ativo
Jason-3	1336	66	9.9156	NASA, CNES, NOAA e EUMETSAT	17/01/2016	ativo
Sentinel-3	814.5	98.645589	Ciclo de repetição de 27 dias, 14 + 7/27 órbitas por dia	EC e ESA	A: 16/02/2016 B: 25/04/2018	A: ativo B: ativo

FONTE: AVISO (2020)

O satélite ERS-1 (*European Remote Sensing Satellite*, 1991 - 2000) permitiu imagens de alta resolução em todas as condições climáticas sobre a Terra, determinação da altura e comprimento das ondas, da velocidade e direção do vento, de vários parâmetros de gelo, de temperaturas da superfície oceânica, da cobertura de nuvens, do conteúdo de vapor da água atmosférico e também possibilitou a altimetria precisa sobre oceanos e geleiras (SEEBER,

2003, p. 446). Em função da natureza multidisciplinar pela qual a missão ERS-1 foi planejada, foram utilizados diferentes períodos orbitais (AVISO, 2020):

- um período de 3 dias para calibração (de 28/12/1991 a 30/03/1992) e observação do gelo marinho (de 24/12/1993 a 10/04/1994);
- um período de 168 dias para aplicações geodésicas (de 04/ 10/1994 a 28/09/1994 e de 28/09/1994 a 21/03/1995); e
- um período de 35 dias para observações multidisciplinares do oceano (para as outras datas).

Antes do encerramento da missão ERS-1, em 2000, foi lançada a missão ERS-2 em 1995 pela Agência Espacial Europeia (ESA) e em 2011 ao reduzir para uma órbita mais baixa, o ERS-2 foi colocado fora de operação (AVISO, 2020). O sucessor das missões ERS-1 e ERS-2 foi o satélite Envisat (*Environmental Satellite*) que objetivou estudos ambientais e observação da atmosfera, do oceano, da terra e da cobertura de gelo (SEEBER, 2003). Ainda conforme a mesma referência citada, o período orbital do satélite Envisat (35 dias) é semelhante ao satélite ERS-2 e em algumas fases do ERS-1, de acordo com a TABELA 2. Segundo ESA (2020), para dar sequência nas observações das missões ERS-1 e 2 e ENVISAT como também para contribuir ao programa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), a ESA vem dedicando esforços para o lançamento de seis novas missões de satélites, denominadas de Sentinel 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Cada missão Sentinel apresenta uma diferente tecnologia embarcada o que permitirá o monitoramento terrestre, oceânico e atmosférico. No contexto do presente trabalho, a missão Sentinel-3 objetiva observar alterações do nível do mar, da temperatura e da cor da superfície oceânica e da terra, a fim de, apoiar sistemas de previsão da variação do nível do mar, monitoramento ambiental e climático. Os satélites gêmeos Sentinel-3A e Sentinel-3B foram lançados em 16 de fevereiro de 2016 e em 25 de abril de 2018, respectivamente.

A missão T/P foi lançada após 20 anos de esforços em desenvolvimento tecnológico para reduzir erros, aumentar a altitude de voo (para 1.336 km) e empregar frequências adicionais (5,3 GHz e 18 GHz), a fim de reduzir os efeitos de atraso ionosférico e velocidade do vento na medição de vapor de água (BENVENISTE, 2011). Segundo Plag e Pearlman (2009, p. 43), a partir da missão T/P, as precisões das observações de SSH melhoraram em um fator de 10 ou mais, permitindo pela primeira vez a determinação precisa da variabilidade temporal da superfície do oceano. Para dar continuidade aos registros do altímetro T/P, foram lançadas, na mesma órbita, as missões Jason-1, 2 e 3 (AVISO, 2020). No futuro, a missão Jason-CS/Sentinel-6 garantirá a continuidade das observações do Jason-3 (FU et al., 2019; AVISO, 2020).

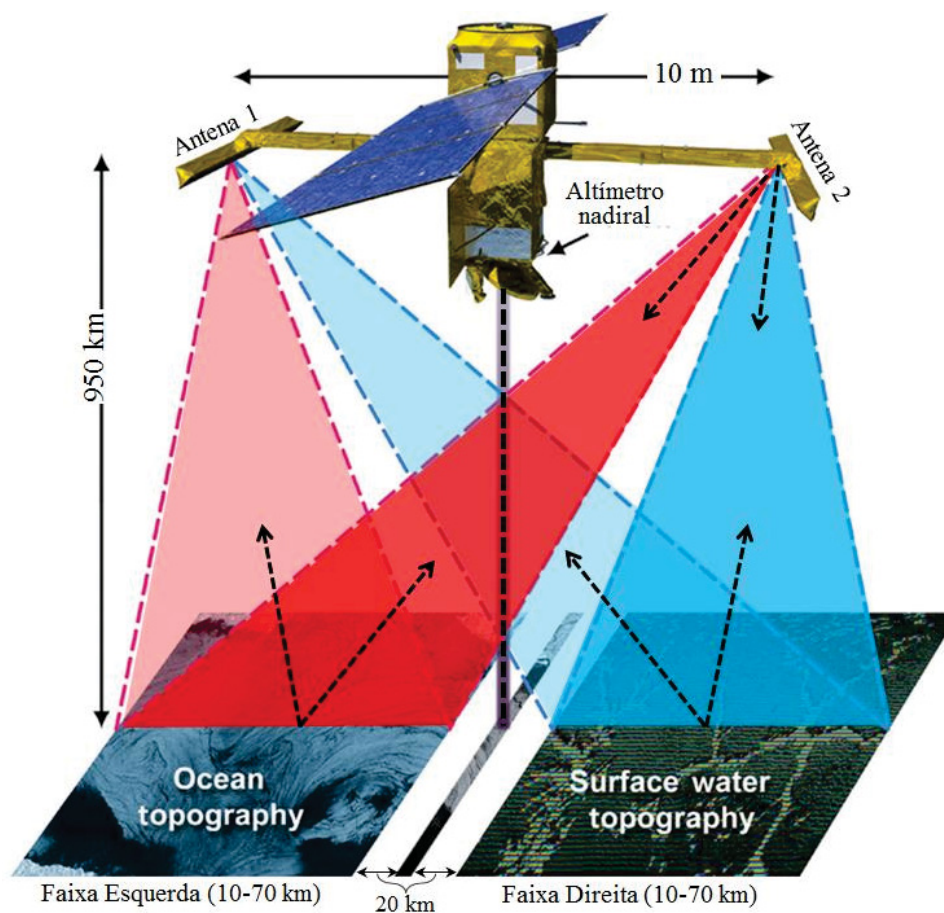
Em 2005, uma falha do lançamento comprometeu a missão do satélite CryoSat-1. Cinco anos depois, em 2010, foi lançada pela ESA o satélite CryoSat-2 com o objetivo de medir a espessura do gelo terrestre e oceânico para o estudo dos efeitos do aquecimento global (FU et al., 2019).

Apesar de melhorias significativas na determinação do nível médio do mar ao longo dos anos, as observações de altimetria por satélites perdem resolução nas proximidades da costa

em função da rugosidade do estado da superfície do mar decorrente de perturbações causadas pela pequena profundidade e à interferência do terreno no sinal de retorno (DALAZOANA, 2006). No entanto, é justamente nessas regiões que os estudos acerca da variação do nível do mar são de grande importância, uma vez que, nelas se concentram uma parcela considerável da população mundial e um aumento do nível do mar, implica, de acordo com Fenoglio-Marc et al. (2012), em possíveis inundações, erosões, aumento da salinização de aquíferos e perda do ecossistema costeiro. Novas tecnologias, como as missões CryoSat-2 e Sentinel-3 transportam um altímetro de radar interferométrico de abertura sintética (SIRAL) que emite pulsos contínuos de radar modulados com Atraso-Doppler (Delay Doppler) com frequência na banda Ku (13,575 GHz, largura de banda 350 MHz), capaz de observar o nível do mar com melhor qualidade em regiões costeiras em relação as missões anteriores (IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2018). Embora a banda Ku seja a principal frequência para a observação de R , a missão Sentinel também emprega a banda C (5,41 GHz, largura de banda 320 MHz) para a correção ionosférica (ESA, 2020).

O satélite SWOT (*Surface Water Ocean Topography*) está sendo desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em conjunto com o CNES (*National Centre for Space Studies*), com contribuições da CSA (*Canadian Space Agency*) e da UKSA (*United Kingdom Space Agency*). Este satélite está planejado para ser lançado em 2021 e será capaz de cobrir a maioria dos corpos oceânicos e de água doce do mundo, fornecendo observações detalhadas da topografia da superfície dos oceanos e de como os corpos d'água variam com o tempo (JPL-NASA, 2020). Os grandes espaçamentos entre as trilhas dos satélites altimétricos "tradicionais" ou de perfil, como por exemplo, as missões T/P e Jason-1/2, impedem observações de processos oceânicos de mesoescala. Desse modo, a missão SWOT empregará a tecnologia denominada de altimetria de faixa ampla (*Wide-Swath Altimetry*) que visa alcançar uma largura de faixa de 120 km projetada sobre a Terra, conforme apresentado na FIGURA 7. Para isso, são instaladas duas antenas, cada uma fixa nas extremidades opostas de uma haste rígida de 10 m de comprimento, munidas com tecnologia KaRIn (*Ka-band Radar Interferometer*), na qual uma antena ilumina alternadamente duas faixas fora do nadir e ambas as antenas recebem os sinais refletidos. Na FIGURA 7 pode ser visto a antena 2 iluminando a faixa da esquerda e da direita e ambas as antenas (1 e 2) recebendo o sinal refletido. Desse modo, é criado um par interferométrico para cada faixa a partir da combinação do sinal refletido pela superfície do mar e recebido pelas antenas simultaneamente. No espaço central, um altímetro nadir semelhante ao que foi usado nos satélites T/P e Jason 1, 2 e 3, fornece observações de R (RODRIGUEZ et al., 2017).

FIGURA 7 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MISSÃO SWOT

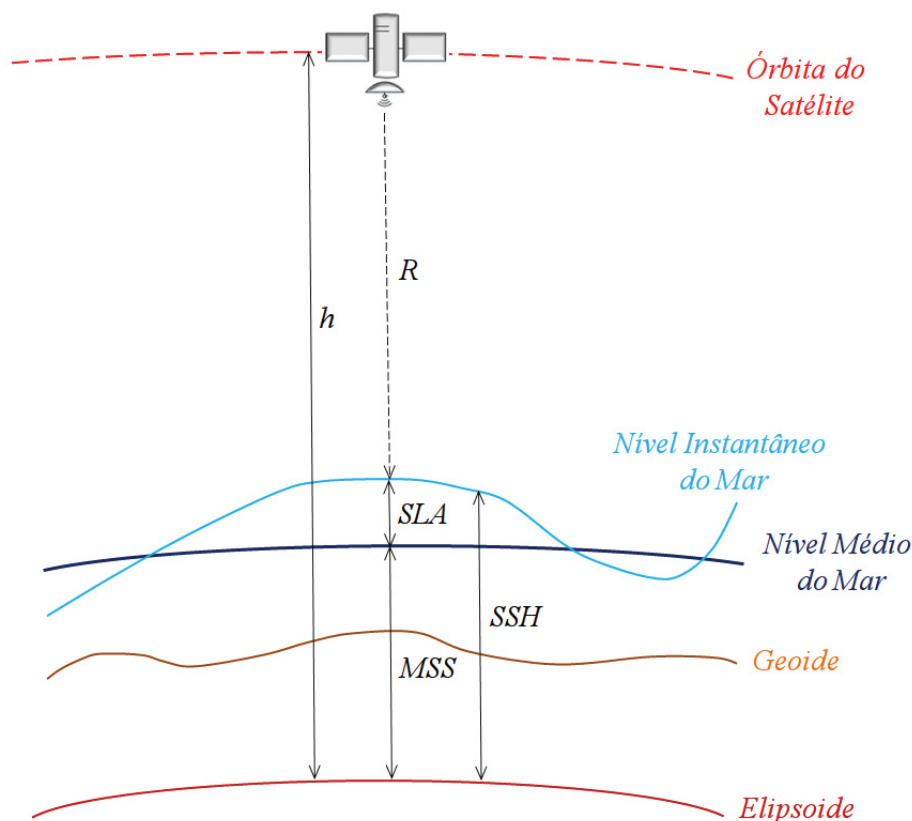


FONTE: Adaptado de JPL-NASA (2020)

2.3.2 Produtos Provenientes da Altimetria por Satélites

Denomina-se altitude da superfície do mar (SSH) como a diferença entre a altitude do satélite em relação a um elipsoide de referência (h) e a altitude do satélite em relação à superfície dos oceanos (R) (ESCUDIER et al., 2017, p. 1). O nível médio do mar (*Mean Sea Surface* - MSS) é definido como uma superfície estacionária do mar que não muda com o tempo (LU; QU; QIAO, 2014, p. 56). De acordo com Escudier et al. (2017, p. 50) a diferença entre a MSS e a SSH resulta na anomalia do nível do mar (*Sea Level Anomalies* - SLA). A FIGURA 8 apresenta as grandezas de interesse para a altimetria por satélite.

FIGURA 8 – RELAÇÃO ENTRE AS GRANDEZAS DE INTERESSE PARA A ALTIMETRIA POR SATÉLITE



FONTE: Adaptado de Lu, Qu e Qiao (2014, p. 56)

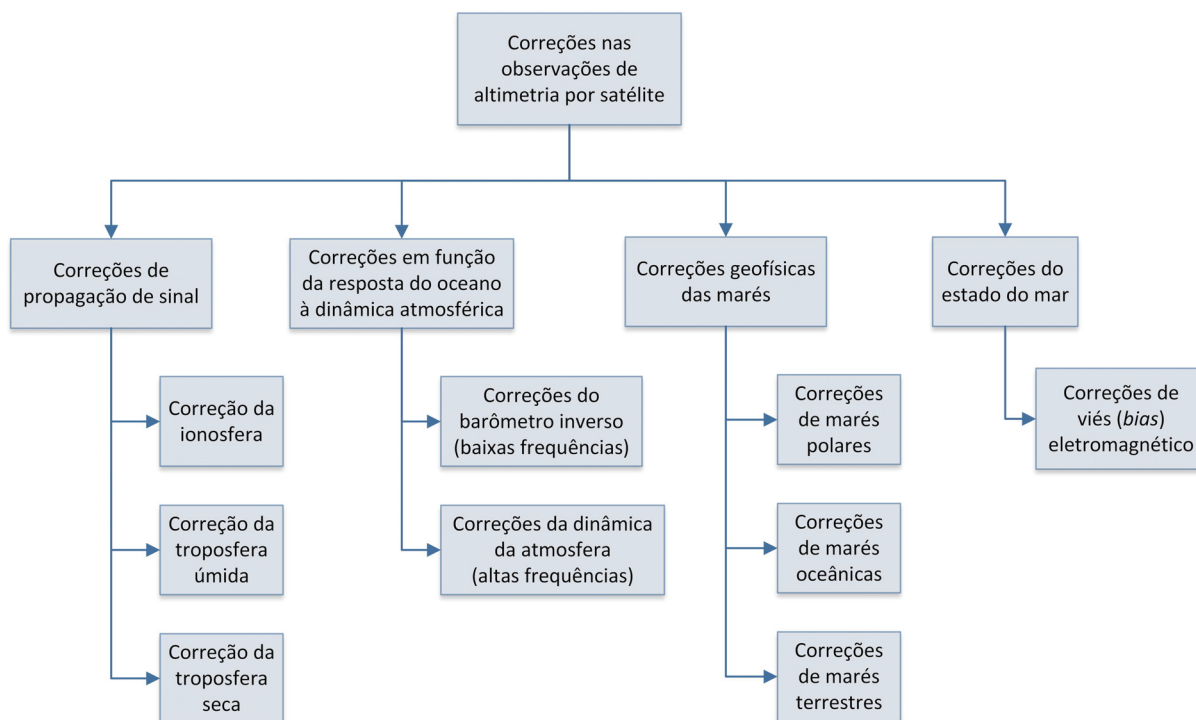
As séries temporais dos valores de SSH e SLA podem ser acessadas por meio de bancos de dados como o do DGFI (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) e da AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*). O DGFI, disponibiliza as séries temporais de SSH e SLA corrigidos dos efeitos geofísicos (por exemplo, marés, atrasos atmosféricos, entre outros) e harmonizados e calibrados de acordo com a abordagem de Bosch, Dettmering e Schwatke (2014). Esta harmonização e calibração permite a combinação dos dados das diferentes missões, melhorando assim sua resolução espacial e temporal (SCHWATKE et al., 2010).

2.3.3 Correções em Observações da Altimetria por Satélite

A qualidade das observações do nível do mar obtidas pela altimetria por satélite depende de uma série de correções, como por exemplo, correções devido a refração atmosférica, efeitos geofísicos, entre outros, estas correções estão representadas pelo termo (ΔR_j) indicado na equação (2), já apresentada anteriormente. A importância dessas correções, bem como o cálculo preciso da órbita dos satélites, são evidenciadas por Plag e Pearlman (2009, p. 43), visto que, permitem alcançar um valor de RMS (*Root Mean Square*) de aproximadamente 1-2cm para uma única observação de SSH. Além disso, Ablain et al. (2009) ressaltam que diferentes autores constataram discrepâncias nas estimativas do aumento do NMM global

acima de 0,7 mm/ano que se devem, principalmente, a metodologia de processamento dos dados e as correções geofísicas aplicadas nos dados. A FIGURA 9 apresenta as principais correções aplicadas nas observações de altimetria por satélite.

FIGURA 9 – CORREÇÕES NAS OBSERVAÇÕES DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE



FONTE: Adaptado de Nerem et al. (2017, p. 189)

2.3.3.1 Correção dos Efeitos Atmosféricos na Propagação dos Sinais

Supondo que a atmosfera fosse constituída de vácuo e a função de densidade de probabilidade (*FDP*) do campo de ondas fosse Gaussiana, a distância entre o satélite e o nível instantâneo do mar seria facilmente determinada por $\frac{ct}{2}$. No entanto, a presença de vapor de água, gases secos e elétrons na atmosfera reduz a velocidade de propagação do sinal do radar e, conseqüentemente, o tempo entre a transmissão e a recepção do sinal é maior que no vácuo (CHELTON et al., 2001, p. 37). Na sequência, serão abordadas as correções da refração atmosférica aplicadas nas observações de altimetria por satélite.

A contribuição do vapor d'água e das gotículas de água (nuvens) presentes na atmosfera produzem uma refração no sinal do satélite altimétrico durante o seu percurso de ida e volta (CHELTON et al., 2001, p. 40). Para minimizar esse problema, os satélites altimétricos transportam radiômetros de micro-ondas com uma banda no intervalo de absorção de vapor d'água (21 a 23,8 GHz) e uma ou duas para estimar os efeitos de emissividade e dispersão das nuvens, permitindo, portanto, a determinação da correção da troposfera úmida (ΔR_{umida}) pela seguinte equação (ESCUDIER et al., 2017, p. 41):

$$\Delta R_{umida} = PD_{vap} + PD_{liq} \quad (3)$$

onde PD_{vap} e PD_{liq} são o atraso do sinal devido ao vapor d'água e as gotículas de água, respectivamente. Ainda segundo Escudier et al. (2017, p. 42) o valor de PD_{liq} é menor que 5 mm e por isso frequentemente ele é desprezado e somente o valor de PD_{vap} é utilizado no cálculo de ΔR_{umida} . A incerteza da estimativa do NMM em função de ΔR_{umida} é da ordem de 0,2 a 0,3 mm/ano ao longo de todo período da missão altimétrica (ABLAIN et al., 2009).

De acordo com Chelton et al. (2001, p. 39), o atraso da propagação do sinal em função dos diferentes gases secos que compõem a atmosfera resulta na maior correção que deve ser aplicada nas observações de altimetria por satélite, denominadas de correção da troposfera seca (ΔR_{seca}). Segundo Escudier et al. (2017, p. 41), a contribuição dos gases secos produz um erro em R da ordem de -2,3 m. Uma forma para determinar o valor de ΔR_{seca} é através da seguinte relação (SAASTAMOINEN, 1972):

$$\Delta R_{seca} = -2.277 P_{atm} [10.0026 \cos(2\varphi)] \quad (4)$$

onde P_{atm} é a pressão atmosférica na superfície em *mbar* e φ é a latitude geodésica. O valor de P_{atm} é derivado de modelos de pressão atmosférica em superfície como os disponibilizados pela *European Centre for Medium-range Weather Forecast* (ECMWF) para todo o globo. Embora a contribuição dos gases secos na determinação do valor de P_{atm} é, no geral, maior que 99%, é conveniente em aplicações práticas, considerar a pressão exercida pelo vapor de água da atmosfera (CHELTON et al., 2001, p. 39).

A ionosfera é produzida pela ionização da atmosfera superior da Terra por radiação solar e, portanto, o conteúdo total de elétrons presentes nela varia em função de alterações temporais do ciclo solar, localização geográfica e o período do dia (CALLAHAN, 1984). A presença desses elétrons torna a ionosfera um meio dispersivo para os sinais provenientes do radar altimétrico (ESCUDIER et al., 2017, p. 40). Para minimizar este problema, muitos satélites altimétricos, como por exemplo, T/P, Jason-1, Envisat, Jason-2, e Jason-3, operam em duas faixas de frequência, uma de aproximadamente 13,6 GHz (banda K_U) e outra de 5,3 GHz (banda C) (CHELTON et al., 2001, p. 48), que permitem realizar a correção ionosférica (ΔR_{ion}) por meio da equação (5) dada por Imel (1994):

$$\Delta R_{ion} = \frac{f_C^2}{f_{ku}^2 - f_C^2} [(R_C - SSB_C) - (R_{K_u} - SSB_{K_u})] \quad (5)$$

onde R_{K_u} e R_C são as distâncias entre o satélite e o nível do mar observadas nas faixas de frequência K_u (f_{ku}) e C (f_C), respectivamente e SSB_{K_u} e SSB_C representam todas as correções dependentes da frequência, como por exemplo, o viés eletromagnético.

No entanto, para satélites altimétricos que operam com uma única frequência, como por exemplo, GEOSAT, GFO, ERS-1, ERS-2 e CryoSat-2, a equação (5) não é válida e, neste caso, a correção dos sinais pode ser realizada por meio do Conteúdo Total de Elétrons (TEC) obtido de Mapas Ionosféricos Globais, derivados de dados coletados de uma rede global de operação contínua de receptores GPS (MANNUCCI et al., 1998).

2.3.3.2 Viés do Estado do Mar

Segundo Chelton et al. (2001, p. 57), o sinal emitido pelo satélite altimétrico incide sobre facetas, pequenas superfícies planas formadas nos vales e nas cristas das ondas, dentro da área de pegada e retorna perpendicularmente à direção do receptor do altímetro. O intervalo de tempo entre a emissão do sinal e sua recepção é função das diferenças na distribuição das facetas dentro da área da pegada do altímetro. O efeito conjunto destas facetas é denominada na literatura de viés do estado do mar (*Sea State Bias - SSB*). Os efeitos do SSB afetam o valor de R , principalmente, em função das seguintes situações (ESCUDIER et al., 2017, p. 38):

- natureza não linear, não gaussiana e distorcida das ondas da superfície do oceano induz diferenças entre o nível determinado pela mediana das alturas das facetas sobre superfície do mar e o nível real do mar.
- em razão do raio de curvatura dos vales das ondas ser maior que o das cristas, a potência de retro-espalhamento do radar por unidade de área será maior nos vales das ondas do que nas cristas, resultando em valores abaixo do valor verdadeiro do nível do mar. Esse efeito é conhecido como viés eletromagnético; e
- erros de processamento do instrumento e de métodos na computação da distância entre o satélite e o nível do mar, também relacionados ao estado do mar;

2.3.3.3 Efeito de Barômetro Inverso

O efeito do barômetro inverso (*Inverse Barometer - IB*) corresponde às deformações na superfície do mar em função de variações da pressão atmosférica (DALAZOANA, 2006). A pressão atmosférica ao nível do mar é da ordem de 1 atm (uma atmosfera). Segundo Andersen e Scharroo (2010), a atmosfera exerce uma força descendente sobre a superfície do mar fazendo-a abaixar quando a pressão for maior que 1 atm (pressão alta) e elevar quando a pressão é menor que 1 atm (pressão baixa). A correção de barômetro inverso (IBC) é dada pela relação (PONTE; SALSTEIN; ROSEN, 1991):

$$IBC = \frac{-1}{\rho g(P - P_{ref})} \quad (6)$$

onde P é a pressão atmosférica de superfície, P_{ref} é a pressão média global sobre os oceanos (varia em função do tempo), ρ é a densidade da água e g é o valor da gravidade.

Os marégrafos observam as variações do nível do mar relativo a crosta terrestre, incluindo as variações causadas pelo efeito da pressão atmosférica. Por outro lado, os bancos de dados altimétricos, como por exemplo o DGFI, geralmente disponibilizam os valores de SSH ou SLA com as correções apresentadas na FIGURA 9. Desse modo, para proceder a integração entre as duas técnicas abordadas, é necessário remover as correções dos efeitos do barômetro inverso das observações de altimetria por satélite (JOHANNESSEN; ANDERSEN, 2017, p. 279).

2.3.3.4 efeitos de marés e carga oceânica

As observações de altimetria por satélite incluem correções para os seguintes tipos de marés: maré da Terra sólida que consiste na resposta elástica da Terra sólida devido aos efeitos do potencial gravitacional luni-solar; maré polar que é ocasionada por pequenas perturbações no eixo de rotação da Terra; maré oceânica, ocasionada pelo potencial luni-solar; e carga oceânica (*Ocean tide loading*) (ESCUDIER et al., 2017, p. 51-52). No próximo parágrafo é descrito com maiores detalhes o efeito da carga oceânica.

Segundo Bastos, Bos e Fernandes (2010, p. 169), a carga oceânica consiste no deslocamento de massa no oceano devido a efeitos de marés oceânicas e de cargas não provocadas pela maré oceânica (“non-tidal ocean loading”), como, por exemplo, a redistribuição de massa na atmosfera devido as condições climáticas. Este deslocamento de massa no oceano faz a Terra se mover vários milímetros para manter o centro de massa de todo o sistema em equilíbrio. Como os satélites incluem diferentes técnicas geodésicas, como SLR, DORIS e GPS, e orbitam em torno do centro de massa da Terra, aplica-se as correções de carregamento oceânico e atmosférico nas observações altimétricas.

De acordo com Andersen e Scharroo (2010, p. 107), a remoção dos efeitos de marés consiste na principal correção que contribui nas variações temporais do valor de SSH, sendo que, a maré oceânica é a maior componente das marés. Os sinais de maré são melhores modelados em alto mar em relação a regiões costeiras.

2.4 MOVIMENTO VERTICAL DA CROSTA TERRESTRE DETERMINADO POR GNSS

Originalmente projetado para fins militares (SEEBER, 2003, p. 211), o GNSS, atualmente, pode ser utilizado em muitas aplicações de geofísica, como por exemplo, no monitoramento de deformação da crosta em função de sua precisão milimétrica, cobertura global e moderados custos quando comparado com outras técnicas, como o VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) e o SLR (*Satellite Laser Ranging*). Além disso, o acesso gratuito para todos os públicos permitiu que diversos pesquisadores realizassem melhorias na precisão do posicionamento GNSS por meio do aperfeiçoamento de modelos (BLEWITT, 2007)

No contexto dos países da América do Sul, uma das principais limitações na análise de movimentos verticais da crosta é a ausência de longas séries temporais e de uma rede GNSS densa e homogênea. Este fato foi enaltecido por Castro et al. (2017), especialmente para o Chile, uma vez que, o país sofre frequentes terremotos por se localizar na junção das placas de Nazca e da América do Sul na maior parte de sua área e da placa Antártica no extremo sul.

De acordo com Dalazoana (2006), o monitoramento GNSS contínuo da posição geocêntrica de marégrafos permite referenciar o nível do mar observado pelo marégrafo num Sistema Geodésico de Referência (SGR) geocêntrico e, conseqüentemente, ser integrado com observações de Altimetria por Satélites. No Brasil, foram instaladas estações de monitoramento contínuo da RBMC nas proximidades de cada marégrafo da RMPG.

2.4.1 Redes SIRGAS-CON e Soluções GNSS semanais

Segundo IBGE (2011a), denominam-se de redes ativas, o conjunto de estações equipadas com receptores GNSS de dupla-frequência, materializadas por uma estrutura rígida em locais estáveis, os quais coletam dados dos satélites GNSS continuamente. Essas redes permitem monitorar com precisão variações nas coordenadas dessas estações em um referencial geocêntrico, e, conseqüentemente, produzir ou aprimorar modelos de velocidades.

Atualmente, o SIRGAS está materializado por uma rede ativa de cerca de 400 estações GNSS distribuídas nos países da América Latina e no Caribe. O conjunto dessas estações formam a rede SIRGAS-CON, cujo objetivo é fornecer coordenadas (associadas a uma época de referência específica) e suas variações ao longo do tempo (velocidades das estações) (SIRGAS, 2019). No Brasil, todas as estações da RBMC fazem parte da rede SIRGAS-CON. O estabelecimento e manutenção de estações da RBMC é de responsabilidade do IBGE. A FIGURA 10 apresenta a configuração atual das estações da RBMC.

SIRGAS-N. Atualmente, os Centros participantes são: CEPGE (Equador), CPAGS-LUZ (Venezuela), IBGE (Brasil), IGAC (Colômbia), IGM-Cl (Chile), IGN-Ar (Argentina), INEGI (México) e SGM-Uy (Uruguai).

- Centros de Combinação SIRGAS, combinam a rede SIRGAS-N com a rede SIRGAS-C assegurando que as posições e velocidades de todas as estações sejam compatíveis entre si. Atualmente, os centros de combinação são o DGFI (do alemão *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut*) e o IBGE.

No processamento SIRGAS são introduzidos parâmetros dos relógios e das órbitas dos satélites GNSS. Consequentemente, as coordenadas da estação apresentam total consistência com o sistema de referência das órbitas dos satélites GNSS. Dessa forma, as soluções semanais SIRGAS se referem ao Serviço Internacional GNSS (*International GNSS Service - IGS*) de acordo com as seguintes realizações (SÁNCHEZ, 2017):

- IGS05 (ITRF2005) de 4 de novembro de 2006 a 16 de abril de 2011;
- IGS08/IGb08 (ITRF2008) de 17 de abril de 2011 a 28 de janeiro de 2017; e
- IGS14 (ITRF2014) desde 29 de janeiro de 2017.

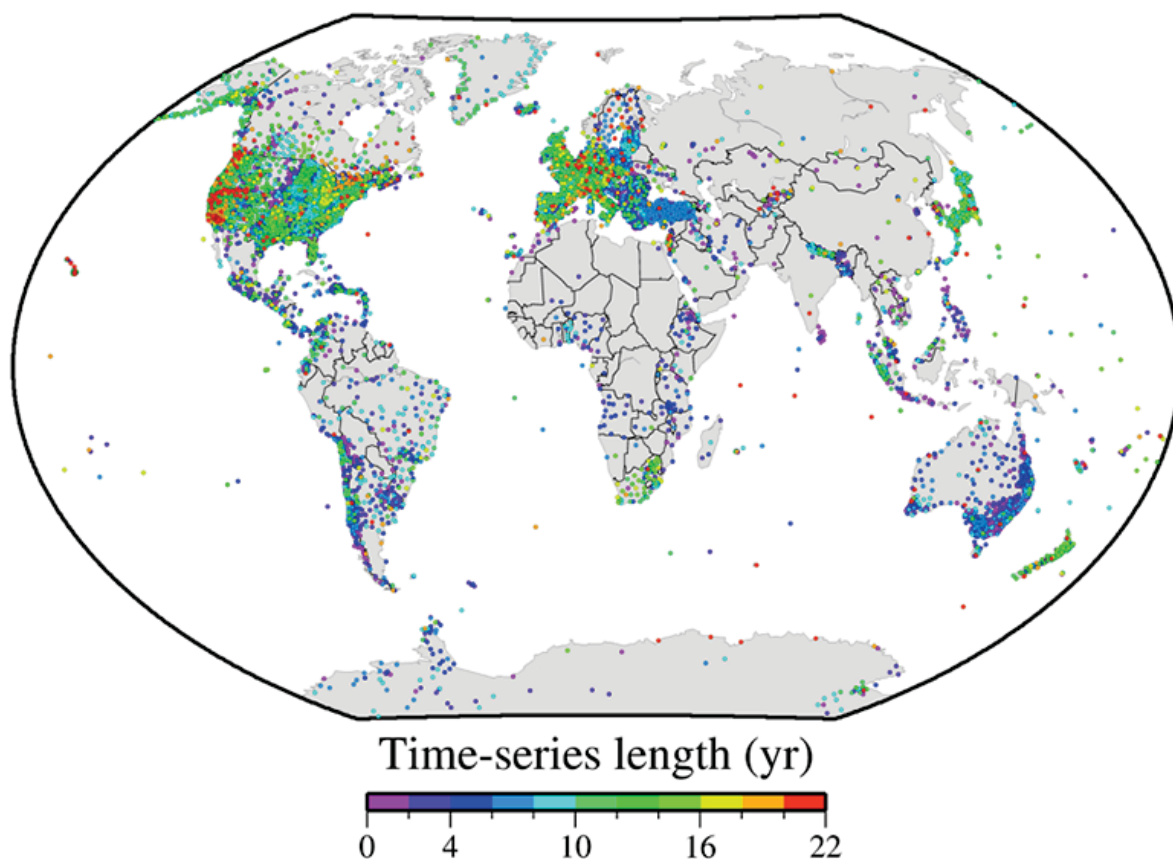
O SIRGAS disponibiliza as posições semanais finais combinadas das estações da rede SIRGAS-CON em arquivos com extensão *crd*. A nomenclatura dos arquivos segue a ordem *cccyPwww*, onde (SIRGAS, 2019):

- *ccc* identifica o centro de combinação (IBG: IBGE e SIR:IGS-RNAAC-SIR);
- *yy* representa os dois últimos dígitos do ano;
- *P* indica que foi utilizado o posicionamento com GPS; e
- *www* é a semana GPS.

2.4.2 Soluções GNSS diárias NGL14

Desde 17/12/2019, o Laboratório Geodésico de Nevada (*Nevada Geodetic Laboratory - NGL*), fornece soluções diárias GNSS, denominadas de NGL14, que são processadas pelo software GipsyX (versão 1.0) do Laboratório de Propulsão a Jato (*Jet Propulsion Laboratory - JPL*). São fornecidas soluções para mais de 17.000 estações distribuídas globalmente, conforme apresentado na FIGURA 11 (BLEWITT; HAMMOND; KREEMER, 2018a).

FIGURA 11 – REDE GLOBAL DE ESTAÇÕES GNSS GEODÉSICAS PROCESSADAS PELO NGL



FONTE: Blewitt, Hammond e Kreemer (2018a)

O método de processamento utilizado pelo NGL é o Posicionamento por Ponto Preciso (*Precise Point Positioning* - PPP) e os dados são vinculados ao referencial IGS14 (ITRF2014) com base na posição da época de 2013,9713. Mais detalhes pertinentes a estratégia de análise de dados GNSS empregada para se obter a solução NGL14 pode ser vista em Blewitt, Hammond e Kreemer (2018b).

O SONEL (*Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales*) armazena as soluções GNSS geradas pelo NGL em arquivos com extensão “.txt” individuais para cada estação GNSS. Estes arquivos contém a série temporal das posições residuais diárias (DN, DE, DU) em metros, com os seus respectivos desvios (SDN, SDE, SDU).

2.5 ASPECTOS RELACIONADOS A INTEGRAÇÃO DE OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE

Para proceder a integração de séries temporais maregráficas e de altimetria por satélite deve-se realizar diversos procedimentos, como por exemplo, atenuar altas frequências e preencher os dados faltantes das séries maregráficas, aplicar análises estatísticas, entre outros. Todos esses procedimentos envolvem a manipulação de grandes conjuntos de dados e,

portanto, a utilização de uma linguagem de programação é de fundamental importância para aferir eficiência e garantir resultados com qualidade geodésica, uma vez que, a automatização dos processos evita erros grosseiros. A seguir são apresentados alguns aspectos relevantes para proceder a integração de observações maregráficas e de altimetria por satélite.

2.5.1 Filtro Passa-Baixa

De acordo com COI (1985), a propagação das marés nos oceanos ocorre sob a forma de ondas longas e na medida que se aproximam de regiões de menores profundidades nas plataformas continentais, a velocidade de propagação diminuiu e a amplitude das ondas aumenta em função da dissipação de energia para vencer a resistência do atrito no fundo e como resultado ocorrem ressonâncias nas bacias costeiras. Outra causa de mudanças do nível d'água do mar é decorrente dos efeitos meteorológicos, principalmente, pressão atmosférica ou efeito de barômetro invertido, ventos e temperatura. O acréscimo de um milibar na pressão atmosférica diminui em um centímetro o nível da água.

Neste contexto, os valores de nível do mar observados pelos marégrafos estão contaminados por altas frequências ou curtos comprimentos de onda. Para eliminar essas frequências das observações maregráficas, Pugh (1987, p. 416), descreve um filtro simétrico e centrado no valor inteiro da hora, conforme a equação (7):

$$X_F(t) = F_0 X(t) + \sum_{m=1}^{54} F_m [X(t+i) + X(t-i)] \quad (7)$$

onde t é o valor inteiro da hora, $X(t)$ é o valor de nível d'água observado no tempo t , m varia de 1 até 54 para observações realizadas a cada 5 minutos, $i = 5, 10, 15, 20, \dots, 270$ minutos e F_m é o coeficiente do filtro, indicado na TABELA 3.

TABELA 3 – COEFICIENTES F_M DO FILTRO SUGERIDO POR PUGH (1987)

F_m	F_m	F_m	F_m
$F_0 = 0.0648148$	$F_{14} = 0.0056529$	$F_{28} = -0.0032942$	$F_{43} = 0.0005986$
$F_1 = 0.0643225$	$F_{15} = 0.0015685$	$F_{29} = -0.0020225$	$F_{44} = 0.0003568$
$F_2 = 0.0628604$	$F_{16} = -0.0019127$	$F_{30} = -0.0008672$	$F_{45} = 0.0001662$
$F_3 = 0.0604728$	$F_{17} = -0.0047544$	$F_{31} = 0.0001321$	$F_{46} = 0.0000294$
$F_4 = 0.0572315$	$F_{18} = -0.0069445$	$F_{32} = 0.0009493$	$F_{47} = -0.0000560$
$F_5 = 0.0532331$	$F_{19} = -0.0084938$	$F_{33} = 0.0015716$	$F_{48} = -0.0000970$
$F_6 = 0.0485954$	$F_{20} = -0.0094346$	$F_{34} = 0.0019984$	$F_{49} = -0.0001032$
$F_7 = 0.0434525$	$F_{21} = -0.0098173$	$F_{35} = 0.0022398$	$F_{50} = -0.0000862$
$F_8 = 0.0379505$	$F_{22} = -0.0097074$	$F_{36} = 0.0023148$	$F_{51} = -0.0000578$
$F_9 = 0.0322412$	$F_{23} = -0.0091818$	$F_{37} = 0.0022492$	$F_{52} = -0.0000288$
$F_{10} = 0.0264773$	$F_{24} = -0.0083247$	$F_{38} = 0.0020729$	$F_{53} = -0.0000077$
$F_{11} = 0.0208063$	$F_{25} = -0.0072233$	$F_{39} = 0.0018178$	$F_{54} = 0.0000000$
$F_{12} = 0.0153661$	$F_{26} = -0.0059642$	$F_{40} = 0.0015155$	-
$F_{13} = 0.0102800$	$F_{27} = -0.0046296$	$F_{41} = 0.0011954$	-

FONTE: Pugh (1987)

Cada coeficiente deve ser multiplicado por um valor de observação, desse modo a equação (7) necessita de 54 observações anteriores e posteriores à observação realizada nos valores inteiros da hora. Como o intervalo entre as observações é de cinco minutos, o filtro compreende o intervalo de $t \pm 270$ min. A seguir é apresentado um exemplo da aplicação da equação (7) para o cálculo do valor de nível d'água para às 12:00 horas.

$$\begin{aligned} X_F(12 : 00) = & F_0 X(12 : 00) + F_1 [X(12 : 05) + X(11 : 55)] + \\ & + F_2 [X(12 : 10) + X(11 : 50)] + F_3 [X(12 : 15) + X(11 : 45)] + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

2.5.2 Marés Sintéticas

Publicadas pela primeira vez em 1770, as tábuas de marés de Liverpool (*Liverpool Tide Tables*) foram confeccionadas pelos irmãos Richard e George Holden e o seu método construtivo permaneceu durante três gerações guardado pela família Holden em função de interesses comerciais (REIDY, 2008). De acordo com Pugh e Woodworth (2014, p. 94), as marés de Holden eram estimadas com base na maré semi-diurna lunar (efeito M2), devido a alterações na distância (paralaxe) e declinação lunar, e na maré semi-diurna solar (efeito S2).

Os efeitos das marés nas regiões costeiras não são diretamente causados por forças astronômicas. As forças gravitacionais do Sol e da Lua agem sobre as águas profundas do oceano produzindo uma elevação forçada que se propaga até as regiões costeiras (PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002). Desse modo, a variabilidade das marés em regiões costeiras é grande em função da pouca profundidade da água. Mesmo assim, ocorrem oscilações periódicas nestas regiões. Os modelos de marés são desenvolvidos com base na análise harmônica destas oscilações periódicas (PUGH; WOODWORTH, 2014, p. 62). De acordo com Foreman e Neufeld (1991), a análise harmônica das marés requer o cálculo das amplitudes e fases de um número finito de funções sinusoidais com frequências conhecidas a partir de uma série temporal de observações.

Segundo Pugh e Woodworth (2014, p. 3), as duas principais características das marés em um registro do nível do mar são a amplitude das marés, medida da altura entre os níveis alto e baixo sucessivos e o período, tempo transcorrido entre um nível alto (ou baixo) e o próximo nível alto (ou baixo). Essas características são afetadas principalmente por um conjunto de seis parâmetros fundamentais, chamados de números de Doodson, que representam os efeitos da rotação da Terra (dia lunar de 24,8 horas), órbita da lua ao redor da Terra (mês lunar de 27 dias), órbita da Terra ao redor do sol (ano tropical), periodicidades na localização de perigeu lunar (8,85 anos), inclinação orbital lunar (18,6 anos) e localização do periélio (aproximadamente 21.000 anos) (PAWLOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002). Neste contexto, um modelo de maré é aprimorado a partir do emprego de séries temporais de nível do mar maiores que 18,6 anos.

A análise de marés possibilita a modelagem de previsões futuras de marés por meio de parâmetros, consideráveis estáveis no tempo, que descrevem o regime das marés no local de observação. Esses parâmetros, frequentemente denominados constantes harmônicas mares (amplitude e fase), são determinados com base no pressuposto de que as forças causado-

ras de marés (principalmente atração luni-solar) são previsíveis ao do longo tempo (PUGH; WOODWORTH, 2014, p. 60). Segundo NOAA (2020), existem centenas de movimentos periódicos da Terra, Sol e Lua que são identificados pela Astronomia. Cada um destes movimentos são conhecidos como constituintes harmônicas da maré e são materializados por constantes harmônicas, ou seja, valores numéricos de amplitude e fase. Segundo Gemael (1986) e Dalazoana (2003), as funções harmônicas variam com o cosseno de um ângulo que cresce proporcionalmente com o tempo, conforme apresentado na equação (9):

$$H = H_0 + \sum_{i=0}^n A_i \cos(a_i t) \quad (9)$$

onde H é a altura teórica da maré oceânica na época t ; H_0 é uma altura inicial. Cada termo do somatório é um constituinte função harmônica do ângulo $(a_i t)$. O valor desse ângulo na época t é denominado de fase, a é a velocidade do constituinte em graus por hora, A é a amplitude do constituinte i e n é o número de constituintes harmônicos necessários para representar o sinal da maré.

2.5.3 Análises Estatísticas

A estatística fornece subsídios para resolver diversos problemas de carácter multidisciplinar. Um problema bastante comum em diferentes áreas do conhecimento consiste na análise de variação conjunta entre duas variáveis que pode ser solucionado pela determinação do coeficiente de correlação. Outra ferramenta importante da estatística são os modelos de regressão, os quais permitem a quantificação da tendência linear entre duas ou mais variáveis.

2.5.3.1 Coeficiente de Correlação de Pearson

Segundo Jupp (2006, p. 43), a correlação refere-se à relação linear entre duas variáveis enquanto que o coeficiente de correlação é uma medida da associação entre duas variáveis. Moore (2010, p. 105) diz que a correlação mede a direção e a força da relação linear entre duas variáveis quantitativas. A fórmula do coeficiente de correlação de Pearson (r) é dada por:

$$r = \frac{1}{1 - n} \sum \left(\frac{x_i - \bar{X}}{Sx} \right) \left(\frac{y_i - \bar{Y}}{Sy} \right) \quad (10)$$

onde n é o número de observações, x_i é uma variável que será correlacionada com y_i ou vice-versa, \bar{X} e \bar{Y} são as médias aritméticas de x_i e y_i respectivamente e Sx e Sy são os desvios padrão de x_i e y_i respectivamente.

As principais propriedades e condições a serem satisfeitas para a correta aplicação e análise do coeficiente de correlação de Pearson são descritas a seguir (MOORE, 2010, p. 107-110):

- o valor da correlação entre X e Y é o mesmo entre Y e X, ou seja, não faz diferença qual variável é denominada de x e qual é denominada de y no cálculo da correlação;

- a determinação da correlação é baseada em valores padronizados, ou seja, não muda quando utiliza-se diferentes unidades de medida de X e/ou Y ;
- sinal positivo de r indica associação positiva entre as variáveis e o sinal negativo indica associação negativa;
- r pode variar de -1 a 1. Valores de r próximos a 0 estabelecem uma relação linear muito fraca. A força da relação linear entre as variáveis aumenta à medida que r se afasta de 0 em direção a 1 ou -1. Valores de r próximos a -1 ou 1 indicam perfeita relação linear e neste caso, os pontos em um gráfico de dispersão estão dispostos sobre uma linha reta;
- a correlação mede a força da relação linear entre variáveis;
- a presença de *outliers* pode comprometer a veracidade das estimativas, pois, o valor de r é determinado com base nas médias e nos desvios das variáveis, conforme constatado na equação (10). Por isso, recomenda-se plotar as variáveis em um gráfico de dispersão para analisar a qualidade do conjunto de valores e se necessário aplicar um filtro para a remoção de *outliers*;
- a interpretação dos resultados não deve se basear somente pelo valor da correlação, mas também por meio das médias e dos desvios padrão para X e Y .

Em função do coeficiente de correlação ser adimensional, podem ocorrer dificuldades na interpretação dos resultados. Desse modo, alguns pesquisadores estabeleceram classificações de acordo com a magnitude do valor de r . A TABELA 4 apresenta a interpretação de r em palavras dado o seu valor numérico.

TABELA 4 – INTERPRETAÇÃO DO VALOR DA CORRELAÇÃO DE PEARSON

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

FONTE: Shimakura (2006)

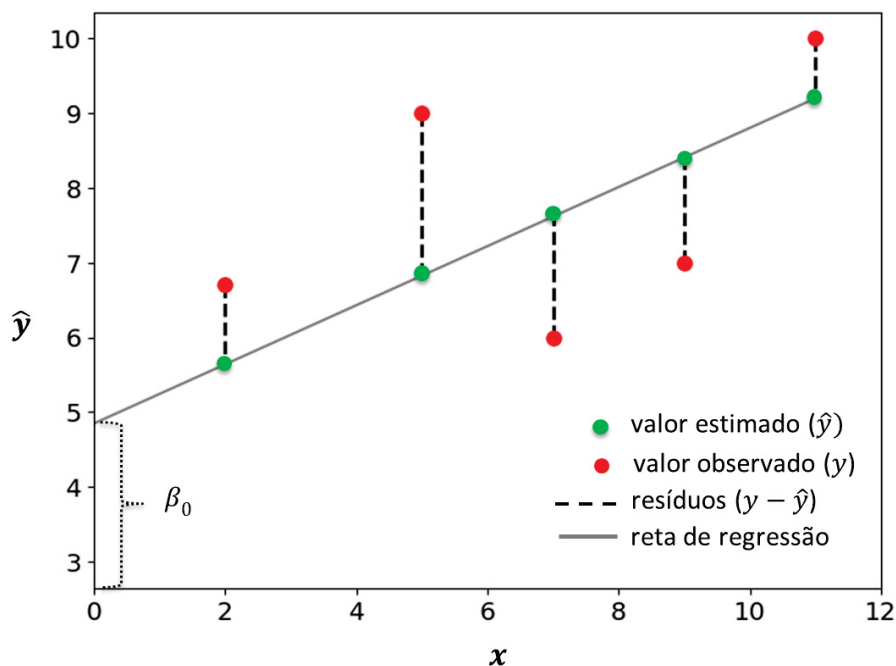
2.5.3.2 Regressão Linear Simples

A regressão linear objetiva encontrar uma relação matemática de um conjunto de dados aleatórios, geralmente em forma de uma linha reta. Suponha que \hat{y} é uma variável de resposta ou dependente (plotada no eixo vertical) e x é uma variável explicativa ou independente (plotada no eixo horizontal). A regressão linear simples descreve a relação entre \hat{y} e x por meio de uma reta que apresenta a seguinte forma (MOORE, 2010, p. 127):

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon \quad (11)$$

onde β_0 é a estimativa da interceptação de um valor de \hat{y} quando $x = 0$, β_1 é a estimativa da inclinação da reta de regressão e ϵ é a estimativa do valor do resíduo. O valor de ϵ é determinado pela diferença entre a variável resposta observada (y) e a variável resposta estimada pela reta de regressão (\hat{y}). A FIGURA 12 apresenta as características inerentes a regressão linear simples (RLS).

FIGURA 12 – REGRESSÃO LINEAR SIMPLES



FONTE: O autor (2020)

De acordo com Moore (2010, p. 600), o erro padrão da regressão (s) descreve a variabilidade (ou o desvio padrão) entre as respostas observadas (y) e as respostas previstas pelo modelo de regressão (\hat{y}). A equação (12) apresenta o cálculo de s :

$$s = \sqrt{\frac{1}{GL} \sum (y - \hat{y})^2} = \sqrt{\frac{1}{GL} \sum (\epsilon)^2} \quad (12)$$

onde GL é o valor do grau de liberdade determinado através da diferença entre o número de observações e de parâmetros, sendo empregado o valor de $n - 2$ no cálculo de s empregando a equação (11).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O capítulo de Material e Métodos baseia-se nos fundamentos da revisão de literatura, realizada no capítulo anterior. Serão abordados três tópicos principais: a área de estudo, o material e os métodos empregados.

A discriminação dos movimentos da crosta baseada no uso combinado de observações maregráficas, de altimetria por satélite e da componente vertical GNSS, é um assunto que já vem há algum tempo sendo estudado no Laboratório de Referenciais Geodésicos e Altimetria por Satélites (LARAS) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Destacam-se os trabalhos de Dalazoana (2006) e Da Silva (2017).

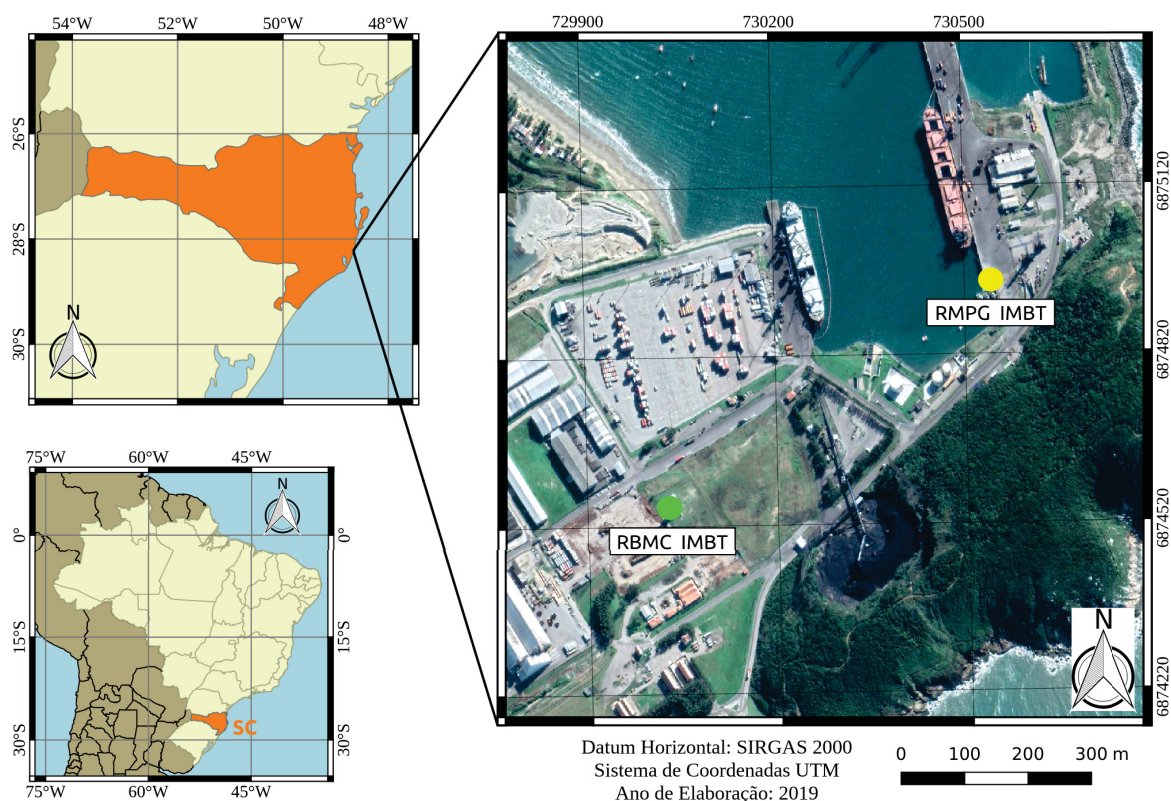
Dalazoana (2006) analisou os dados dos marégrafos de Cananea e Ilha Fiscal pelo fato destes, possuírem longas séries temporais e estarem favoravelmente localizados em relação às trilhas do satélite T/P. Além disso, também realizou testes preliminares para o marégrafo de Imbituba-SC. Da Silva (2017) utilizou os dados de altimetria por satélites para validar a estimativa de variação do nível médio do mar que obteve pelo uso conjunto de dados maregráficos e dados GNSS em Imbituba-SC. Além disso, a mesma referência citada anteriormente, também aplicou modelos de velocidades para analisar o processamento GNSS realizado.

Neste contexto, o presente trabalho visa a determinação de movimentos verticais da crosta em Imbituba-SC, a partir da diferença entre a tendência de variação da SSH provinda de multimissões satelitais e a tendência de variação do nível do mar observado pelo marégrafo, conforme apresentado na equação 1. Para tanto, foram aplicados métodos alternativos para a manipulação de dados maregráficos em relação aos trabalhos de Dalazoana (2006) e Da Silva (2017), como o preenchimento de lacunas por marés sintéticas, correções de baixas frequências (IB) e altas frequências (Mog2D-G) e reamostragem do intervalo de tempo baseada no somatório da função seno cardinal (*sinc*) normalizada dos pontos da vinhança.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

As localizações do marégrafo e da estação GNSS em Imbituba são apresentadas na FIGURA 13. Ambos os instrumentos se localizam a uma distância de, aproximadamente, 648 metros um do outro.

FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DO MARÉGRAFO DA RMPG E DA ESTAÇÃO GNSS DA RBMC-IMBT



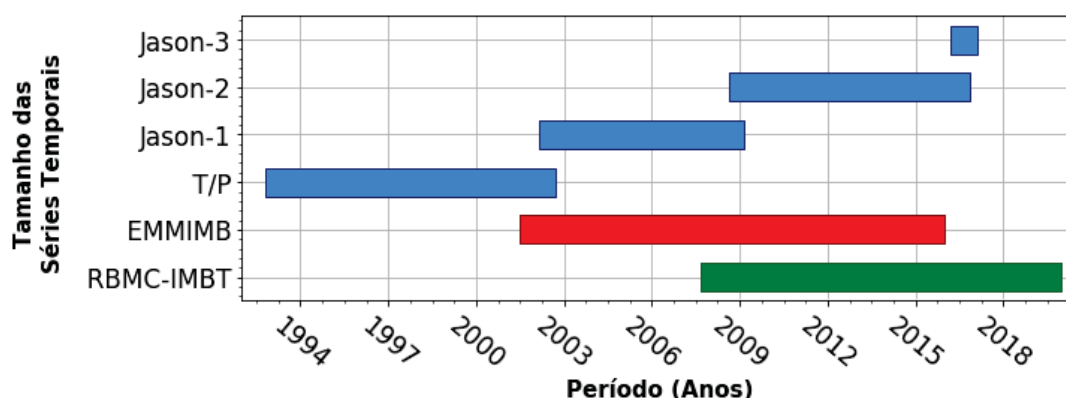
FONTE: O autor (2020)

A delimitação da área de estudo, sobre a qual foram realizadas as observações altimétricas, baseou-se nos trabalhos de Wahr, Molenaar e Bryan (1998), Garcia et al. (2011) e Castro et al. (2017), os quais empregaram uma área que permitisse obter os valores de SSH em um raio de 500 km sobre o oceano a partir da localização do marégrafo. De acordo com os autores citados anteriormente, esse raio foi determinado por meio da convolução dos dados da altimetria por satélite em uma Função Gaussiana Bidimensional centrada na localização do marégrafo. A função assume o valor de 1/2 (metade da intensidade) a uma distância de 50 km do marégrafo e desaparece além de 500 km (sem intensidade).

3.2 MATERIAL

A tendência de variação de movimentos verticais absolutos da crosta ($\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$) será determinada a partir de séries de SSH, entre 1992 e 2017, provindos dos satélites altimétricos T/P, Jason 1, 2 e 3 e de séries maregráficas, entre 2002 e 2015, provindas da EMMIMB. A validação dessa tendência ocorrerá por meio da comparação com a tendência de variação da componente vertical, entre 2007 e 2019, provinda da estação GNSS pertencente a RBMC em Imbituba-SC. A FIGURA 14 apresenta a duração e o período das diferentes séries temporais que foram utilizados no presente estudo.

FIGURA 14 – DURAÇÃO E PERÍODO DAS SÉRIES TEMPORAIS DOS DADOS EMPREGADOS NO ESTUDO



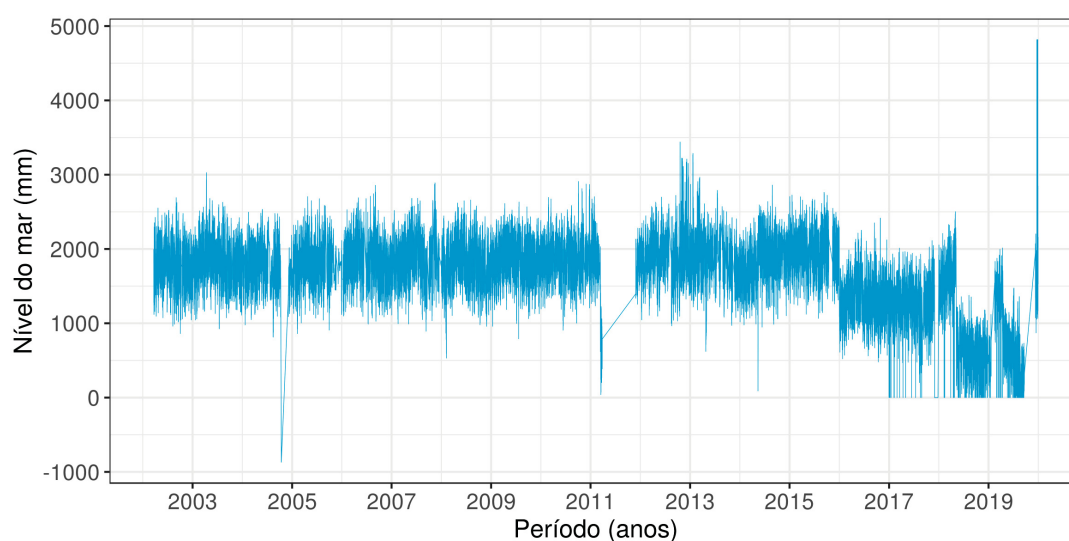
FONTE: O autor (2020)

As séries de SSH, apresentadas na FIGURA 14, correspondem a versão 33, que é a mais atual disponibilizada pelo OpenADB/DGFI (*Open Altimeter Database / Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Technische Universität München*) para os propósitos do presente estudo.

A sobreposição entre a série temporal maregráfica e a de SSH é de aproximadamente 13,8 anos (2002-2015), conforme pode ser visto na FIGURA 14. Ray, Beckley e Lemoine (2010) preconizam que ambas as séries temporais devem ter uma sobreposição de pelo menos cinco anos para serem integradas.

A escolha do período da série maregráfica de 2002 a 2015, deve-se ao fato dos dados não apresentarem nenhum indício de alteração na referência de origem das leituras (ou seja, do zero do marégrafo), conforme pode ser visto na FIGURA 15.

FIGURA 15 – OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS DA EMMIMB ENTRE 2002 A 2020

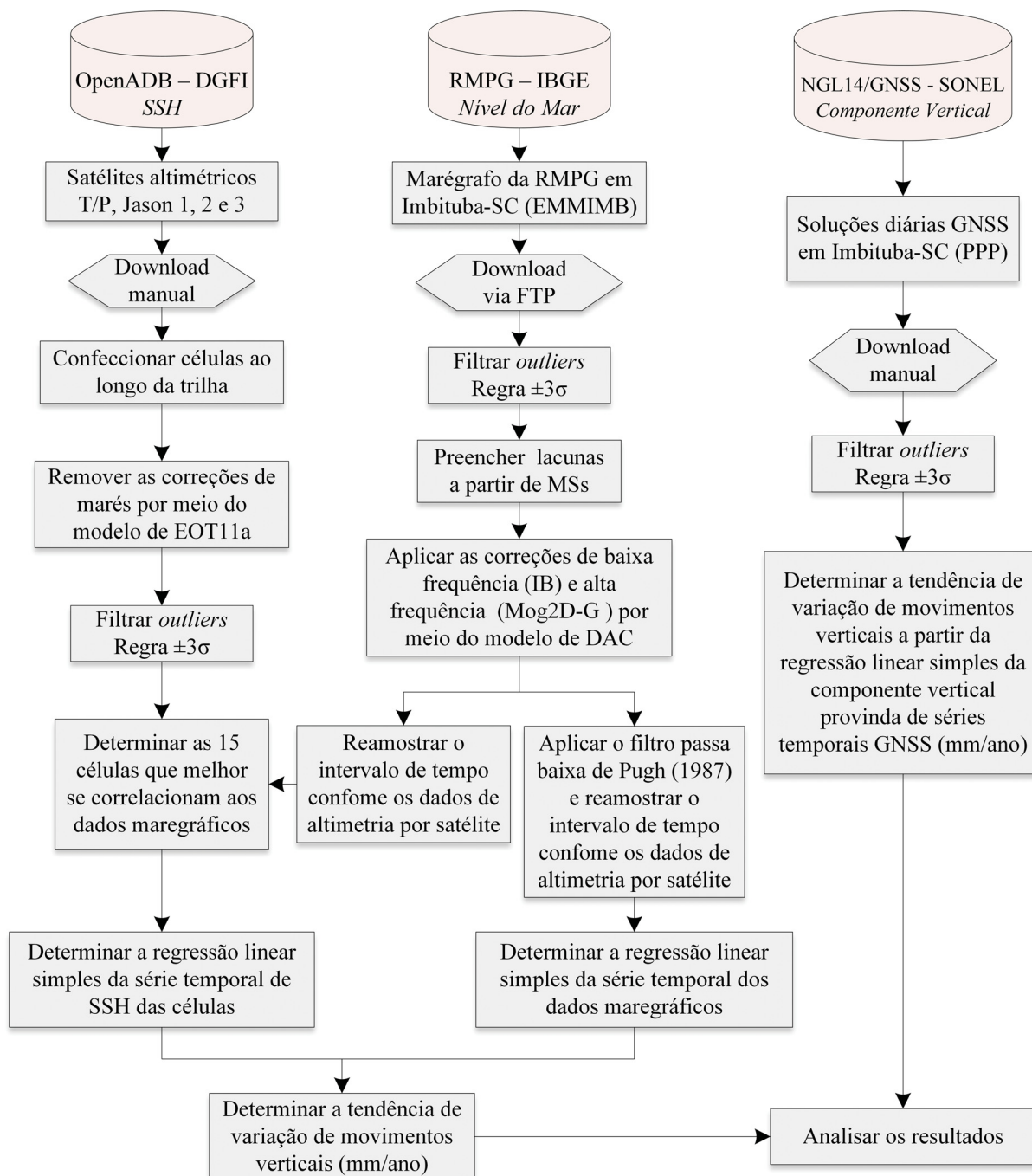


FONTE: O autor (2020)

3.3 MÉTODOS

Anteriormente à etapa de integração das observações maregráficas e da altimetria por satélite, são necessários diversos esforços preliminares para a aquisição e o tratamento qualitativo dos dados oriundos das diferentes técnicas. Neste sentido, foram propostas soluções para aquisição dos dados, preenchimento de *gaps* em observação maregráficas, compatibilização do intervalo de tempo entre diferentes séries, entre outros. A FIGURA 16, apresenta, resumidamente, as etapas que constituem a metodologia do presente trabalho e que serão discutidas com maiores detalhes nas seções seguintes.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA



FONTE: O autor (2020)

3.3.1 Aquisição de Dados Maregráficos

Como já apresentado na seção 2.2.1, o IBGE mantém seis estações digitais da RMPG em funcionamento: Imbituba (SC), Salvador (BA), Santana (AP), Fortaleza (CE), Arraial do Cabo (RJ) e Belém (PA). As observações desses marégrafos são disponibilizadas no portal do IBGE com amostragem a cada cinco minutos, em arquivos diários compactados, contendo em seu interior os arquivos em extensão ".txt". Desta forma o *download* manual dos arquivos torna-se um serviço árduo, principalmente, quando se deseja trabalhar com séries maregráficas de

longa duração, como por exemplo, para um ano de observações maregráficas seria necessário realizar o *download* e a descompactação de 365 arquivos. A denominação dos arquivos segue a seguinte ordem: *xxxaammdd.zip*, onde:

- *xxx* o identificador da estação, sendo: MAC para Macaé; IMB para Imituba; SAL para Salvador; SAN para Santana; FOR para Fortaleza, ARC para Arraial do Cabo e BEL para Belém;
- *aa* ano da coleta;
- *mm* mês da coleta; e
- *dd* dia da coleta.

O padrão na denominação dos arquivos, como visto no parágrafo anterior, permite a extração dos dados por meio da modificação da URL (*Uniform Resource Locator*) a partir de um processo interativo realizado por uma rotina de programação. A FIGURA 17 apresenta a denominação e disposição dos arquivos no *site* do IBGE.

FIGURA 17 – SITE DO IBGE PARA DOWNLOAD DE DADOS DA RMPG

The screenshot shows the IBGE website interface. At the top, there is the IBGE logo and navigation links for 'Institucional' and 'Próximas Divulgações'. Below this is a blue navigation bar with 'Estatísticas', 'Geociências', and 'Cidades e Estados'. A breadcrumb trail indicates the current location: 'Geociências > Posicionamento geodésico > Redes Geodésicas'. The main heading is 'Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG'. On the left, there is a sidebar with links like 'O que é', 'Parcerias', 'Arquivos de Dados da Estação', etc. The main content area is titled 'Downloads' and shows a tree structure: 'cartograma' > 'dados' > '0101'. Under '0101', there is a list of zip files with download icons. The file 'FOR140101.zip' is highlighted with a blue background.

FONTE: IBGE (2019)

Com o objetivo de facilitar a aquisição dos dados maregráficos da RMPG, foi desenvolvida uma aplicação de código aberto em linguagem *Python*. Para facilitar a usabilidade da aplicação, foi realizada uma interface amigável e objetiva que possibilita a seleção da data inicial

e final em um calendário e a escolha de um marégrafo da RMPG em uma caixa de listagem de seleção múltipla.

A aplicação também realiza uma análise preliminar nas séries temporais de dados maregráficos com base nas seguintes condições: exclusão de valores fora do intervalo de 5 min; exclusão de valores não numéricos; e preenchimento dos campos vazios por “NaN” (*Not a Number*). No final é disponibilizado ao usuário um arquivo em extensão “.txt”, com os dados dispostos na mesma sequência que os arquivos de entrada.

3.3.1.1 Pré-processamento dos Dados Maregráficos

Com as séries de dados da EMMIMB em mãos, foram desenvolvidos *scripts* em *Python* e *R* para a remoção de *outliers*, preenchimento dos “NaNs”, remoção de altas frequências e reamostragem para compatibilização temporal com as observações de altimetria por satélite. Estas etapas serão abordadas com mais detalhes nos próximos parágrafos.

A primeira etapa de tratamento matemático dos dados maregráficos consistiu na remoção dos valores discrepantes (*outliers*) de nível d’água por meio da regra $\pm 3\sigma$, como também efetuado por Dalazoana (2006), Castro et al. (2017) e Da Silva (2017).

O preenchimento dos “NaNs” foi realizado pelo emprego de marés sintéticas (MSs) produzidas a partir dos valores observados pelo marégrafo digital de Imbituba, entre março de 2002 a dezembro de 2015. As MSs são confeccionadas pela função *tidem* instalada no biblioteca *oce*, sob autoria de Kelley (2019) e disponível para linguagem de programação em *R*. O pacote *oce* fornece funções para a análise de séries temporais ao nível do mar, dados costeiros e topográficos, propriedades da água do mar, como temperatura, entre outros. Uma dessas funções é denominada de *tidem* que se assemelha a ferramenta T_{TIDE} disponível para o *Matlab*, descrito por Pawlowicz, Beardsley e Lentz (2002). Ela extrai as componentes seno e cosseno das frequências de marés contidas nas observações maregráficas. Com base nos coeficientes resultantes dos termos seno e cosseno é calculada a amplitude e a fase, permitindo então, a criação das MSs. Desse modo, são selecionados automaticamente 69 constituintes das marés, considerados por Foreman (1977) como padrão, com base nas faixas de frequências (frequências astronômicas e algumas de águas rasas) e na duração da série temporal do nível do mar. Segundo Forrest, Miller e Zagar (1993), as regiões de águas rasas atuam como um filtro passa-alto e existe uma relação entre a profundidade de um ambiente e a frequência de corte desse filtro: quanto mais profundo o ambiente, menor será a frequência de corte. As constituintes utilizadas são apresentadas na TABELA 5.

TABELA 5 – CONSTITUINTES HARMÔNICAS DA MARÉ EMPREGADAS PELA FUNÇÃO *TIDEM*

Z0	SA	SSA	MSM	MM	MSF	MF	ALP1	2Q1	SIG1
Q1	RHO1	O1	TAU1	BET1	NO1	CHI1	PI1	P1	S1
K1	PSI1	PHI1	THE1	J1	SO1	OO1	UPS1	OQ2	EPS2
2N2	MU2	N2	NU2	GAM2	H1	M2	H2	MKS2	LDA2
L2	T2	S2	R2	K2	MSN2	ETA2	MO3	M3	SO3
MK3	SK3	MN4	M4	SN4	MS4	MK4	S4	SK4	2MK5
2SK5	2MN6	M6	2MS6	2MK6	2SM6	MSK6	3MK7	M8	

FONTE: Kelley (2019)

Como pode ser visto na seção 2.5.2, o ideal é que o tempo de duração das séries temporais maregráficas seja de, no mínimo, 18,6 anos. No presente estudo foram empregadas em torno de 13,8 anos (03/2002 - 12/2015) de observações maregráficas providas da EMMIMB. A qualidade das MSs, produzidas pela função *tidem*, foi analisada por meio da comparação da média aritmética e do desvio padrão dos dados observados das MSs e dos resíduos. Após a constatação da normalidade da distribuição dos dados, foi verificado o grau de relação entre as MSs e os dados observados, através do cálculo do coeficiente de correlação de *Pearson* (r) e da classificação apresentada na TABELA 4.

Após o preenchimento das lacunas pelas MSs, os dados maregráficos foram corrigidos para os efeitos atmosféricos de alta e baixa frequências, a partir do modelo DAC (*Description Atmospheric Corrections*) que será apresentado com maiores detalhes na seção 3.3.3. Na sequência, são apresentados diferentes procedimentos em relação à filtragem de altas frequências dos dados maregráficos para a determinação do r com os dados de altimetria por satélite e da $\delta_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$.

Para determinar o valor do r entre a série temporal maregráfica e a série temporal de SSH, os dados maregráficos foram reamostrados para o intervalo corresponde a resolução temporal dos satélites T/P, Jason 1, 2 e 3. A reamostragem foi realizada pela função *resample* disponibilizada pelo pacote *signal* para a linguagem de programação em R (LIGGES, 2015). O pacote *signal* consiste de um conjunto de funções para o processamento de sinais, que envolve filtragem, rotinas de reamostragem e visualização de modelos de filtro. A função *resample* permite reamostrar o intervalo de tempo de variáveis contínuas, como é o caso das séries temporais maregráficas, a partir do somatório da função seno cardinal (*sinc*) normalizada dos pontos da vinhança. Além disso, um filtro passa-baixa é usado independentemente do fator de conversão da taxa de amostragem. Dadas as amostras $x(nT_s)$ de um sinal contínuo $x(t)$, onde t é o tempo em segundos, n varia em números inteiros e T_s é o período de amostragem, o Teorema da amostragem de Shannon permite reconstruir $x(t)$ a partir $x(nT_s)$ e da função *sinc*, conforme as equações 13 e 14 (SMITH, 2002; SMITH; GOSSETT, 1984).

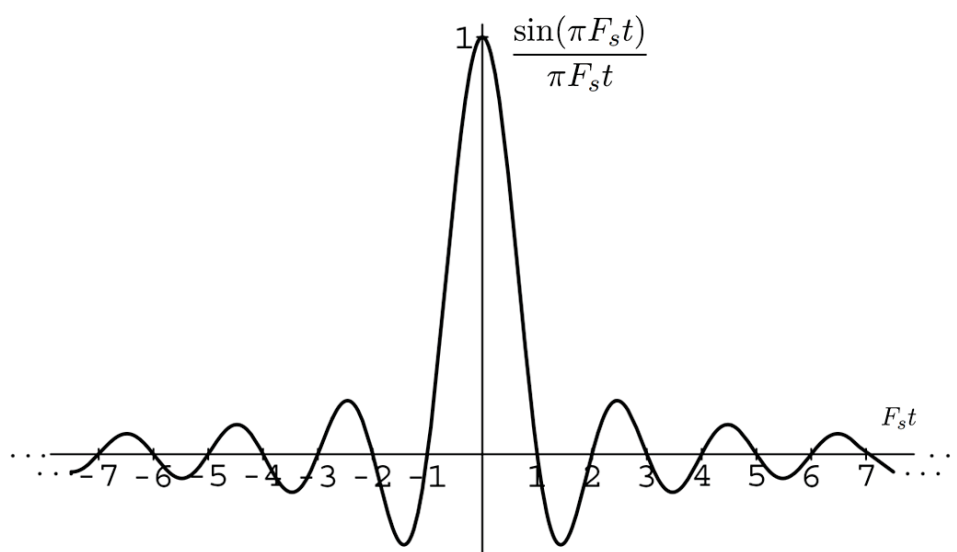
$$\hat{x}(t) \triangleq \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT_s)h_s(t - nT_s) \equiv x(t) \quad (13)$$

$$h_s(t) \triangleq \text{sinc}(\pi F_s t) \triangleq \frac{\sin(\pi F_s t)}{\pi F_s t} \quad (14)$$

onde, $\pi=3,14159$, $F_s = \frac{1}{T_s}$ é a taxa de amostragem.

No gráfico $\text{sinc}(\pi F_s t) \triangleq \frac{\sin(\pi F_s t)}{\pi F_s t}$ apresentado na FIGURA 18, observa-se que os cruzamentos em zero ocorrem nos valores inteiros de $F_s t$ e a amplitude um (1) ocorre quando $F_s t = 0$. Desse modo, a normalização faz com que a integral definida da função $\text{sinc}(\pi F_s t)$ sobre os números reais ($F_s t$) seja um (1) (SMITH, 2002).

FIGURA 18 – GRÁFICO DA FUNÇÃO *SINC*



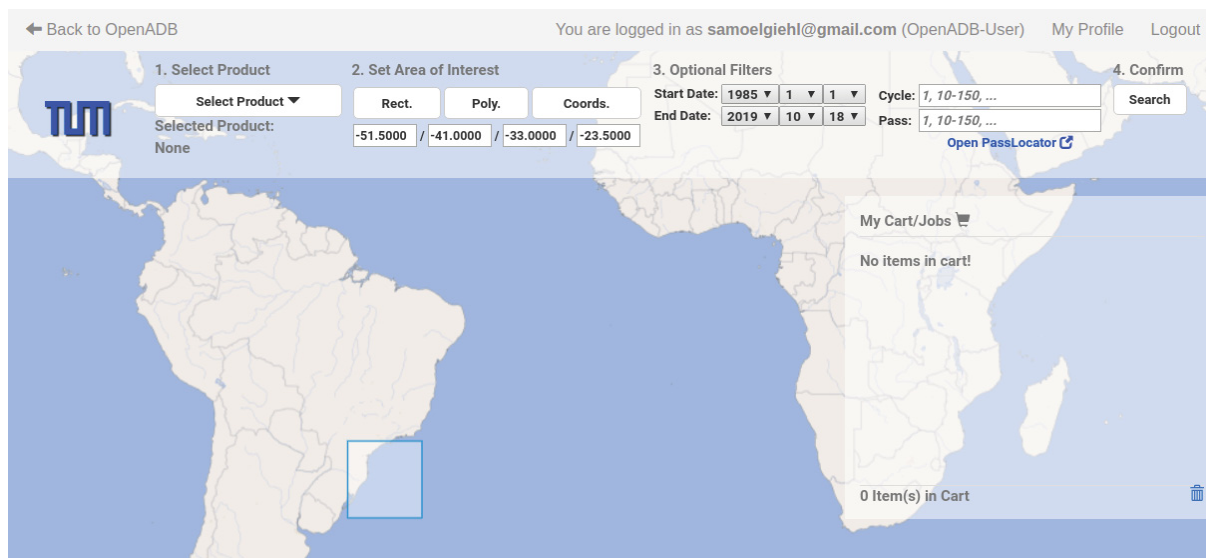
FONTE: Adaptado de Smith (2002)

Para determinar a $\hat{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$, aplicou-se o filtro passa baixa descrito na seção 2.5.1, para a remoção das altas frequências restantes nas observações maregráficas e também para transformar a série temporal que tem dados amostrados a cada 5 minutos numa série temporal horária. Após aplicar o filtro passa baixa, os dados maregráficos foram remostrados para a resolução temporal dos satélites altimétricos, para, então aplicar a regressão linear.

3.3.2 Dados de Altimetria por Satélite

No presente trabalho, os valores de SSH foram adquiridos via OpenADB/DGFI. Para o acesso às séries temporais de SSH foi necessário um registro no site do DGFI. A interface de obtenção dos dados, possibilita a fácil interação entre o usuário e a máquina, pois nela basta apenas informar a missão altimétrica, o período e o recorte da área de estudo sobre a qual serão projetadas as trilhas. A FIGURA 19 apresenta a interface do OpenADB/DGFI e a área sobre a qual são projetadas as observações de SSH utilizadas no estudo.

FIGURA 19 – INTERFACE PARA A OBTENÇÃO DOS DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE DO OPENADB/DGFI



FONTE: Schwatke et al. (2010)

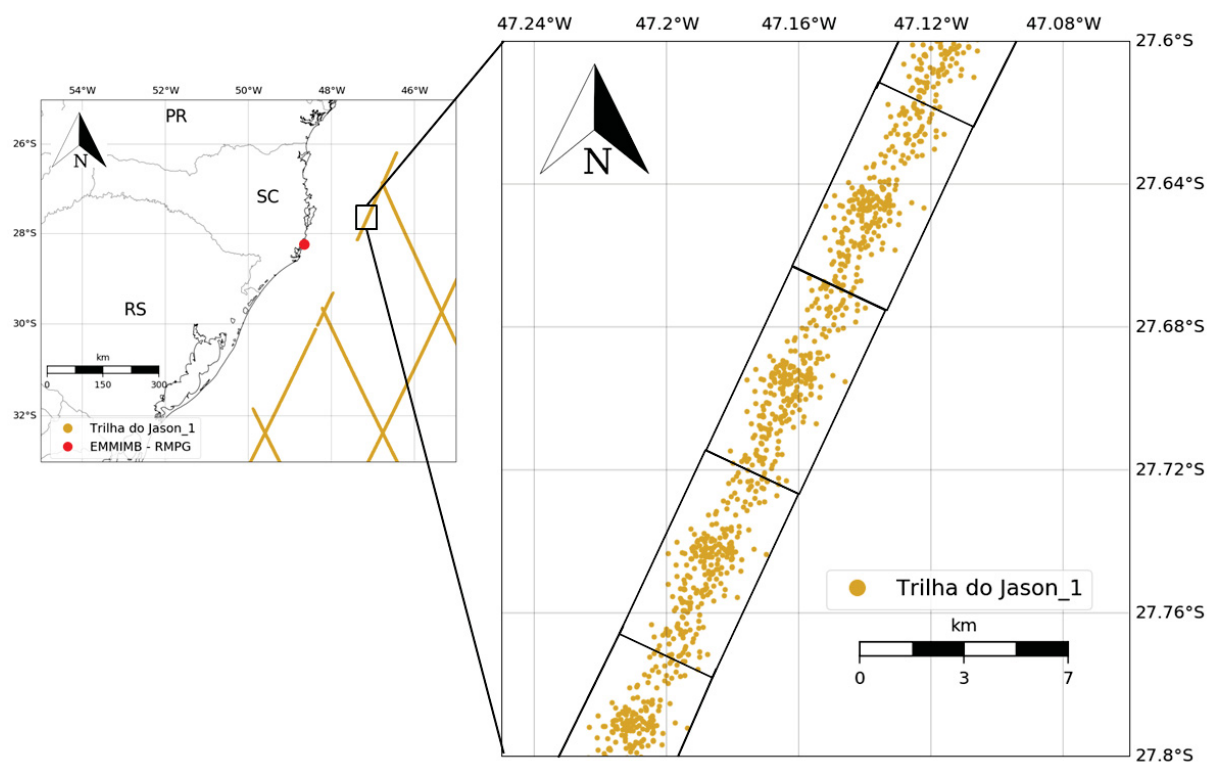
Para a aquisição dos dados via OpenADB/DGFI, foram então selecionadas: a área de estudo conforme definição apresentada na seção 3.1; as missões altimétricas T/P, Jason 1, 2 e 3; o período de observações que vai de 1992 até 2017, e o produto altimétrico que é a SSH. Posteriormente, as informações solicitadas foram processadas pelo DGFI e no final foi disponibilizado um arquivo compactado. Este procedimento foi realizado para cada missão altimétrica. O arquivo compactado organiza os ciclos em sub-arquivos, os quais contém os passes em formato binário *NetCDF* da área de interesse. Os arquivos binários contém as seguintes informações: *glon*, longitude do centro da área referente à pegada (footprint) do satélite; *glat*, latitude do centro da área referente à pegada (footprint) do satélite; *jday*, dia Juliano 2000; *ssh*, SSH; *sflag*, indicação da qualidade das correções geofísicas; *oflags*, indicação do status e da qualidade da órbita; e *iflags*, indicação do status e qualidade do instrumento. Estes dados são referentes a versão 33, que é a versão mais recente disponível pelo DGFI.

3.3.2.1 Confecção das Células

Os dados de altimetria por satélite são observados ao longo de trilhas. Para a correlação de séries de SSH com dados maregráficos optou-se por estabelecer um limite espacial sobre a trilha, que contenha ao menos uma observação a cada revisita do satélite. Este limite espacial é delimitado, para o presente trabalho, por meio de células localizadas ao longo das trilhas dos satélites. O OpenADB/DGFI disponibiliza os dados de SSH a uma taxa de amostragem de 1 Hz o que corresponde a uma medição, aproximadamente, a cada 7 km ao longo da trilha (SCHWATKE et al., 2010). Assim sendo, foram confeccionados células de 7 km de comprimento e 3 km de largura ao longo da trilhas dos satélites T/P, Jason 1, 2 e 3 a um raio de até 500 km sobre o oceano a partir da localização do marégrafo da EMMIMB. Embora a dispersão lateral da trilha seja de aproximadamente ± 1 km em relação a trilha nominal, conforme foi abordado

na seção 2.3, observou-se nos arquivos que, algumas observações obtiveram uma dispersão maior. Em vista disto, foi adotada a largura de 3 Km. A FIGURA 20 apresenta a disposição das células nas trilhas do satélite Jason-1, entre 2002 e 2009, sobre a área de estudo.

FIGURA 20 – DISPOSIÇÃO DAS CÉLULAS AO LONGO DA TRILHA DO SATÉLITE JASON-1

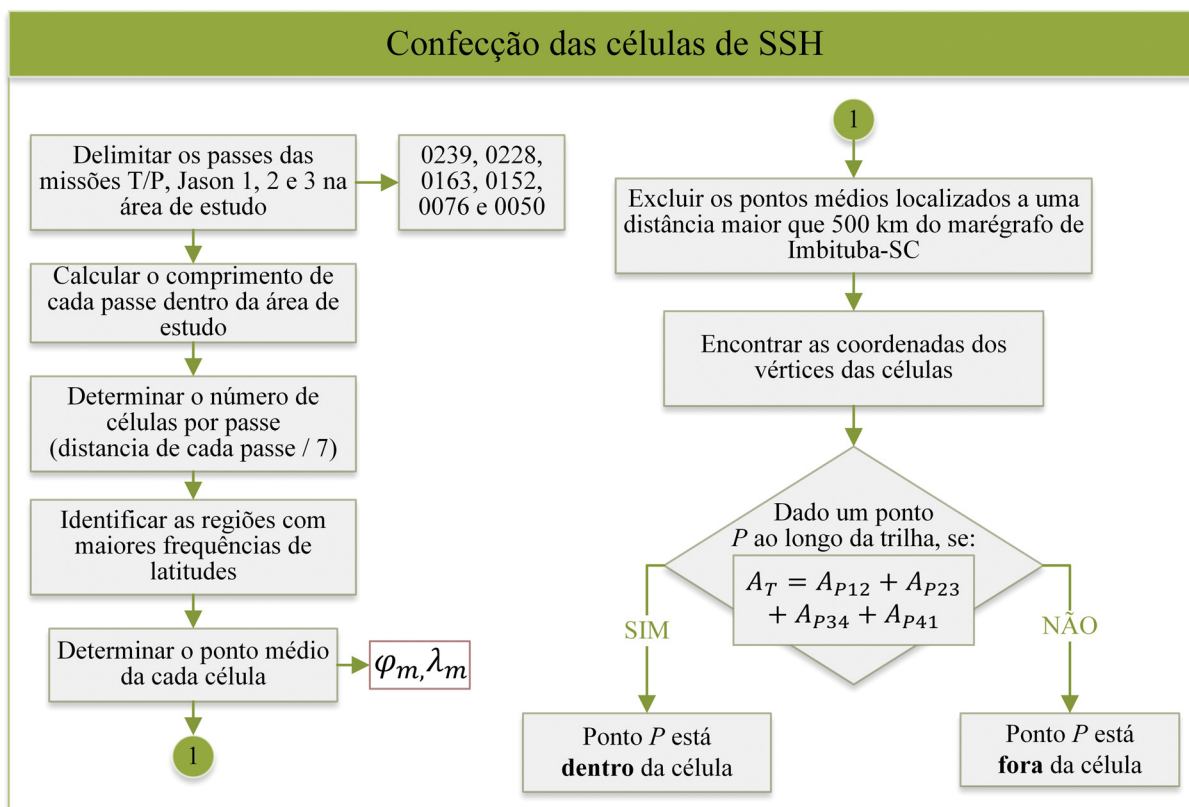


FONTE: O autor (2020)

A confecção das células foi realizada em ambiente de programação *Python*, de modo que, a quantidade de observações de SSH por célula, quando possível, seja sempre a mesma. Nota-se, na FIGURA 20, que nas proximidades da costa existem lacunas de observações.

O fluxograma da FIGURA 21 apresenta as etapas para a confecção das células ao longo das trilhas dos satélites T/P, Jason 1, 2 e 3 projetadas na área de estudo.

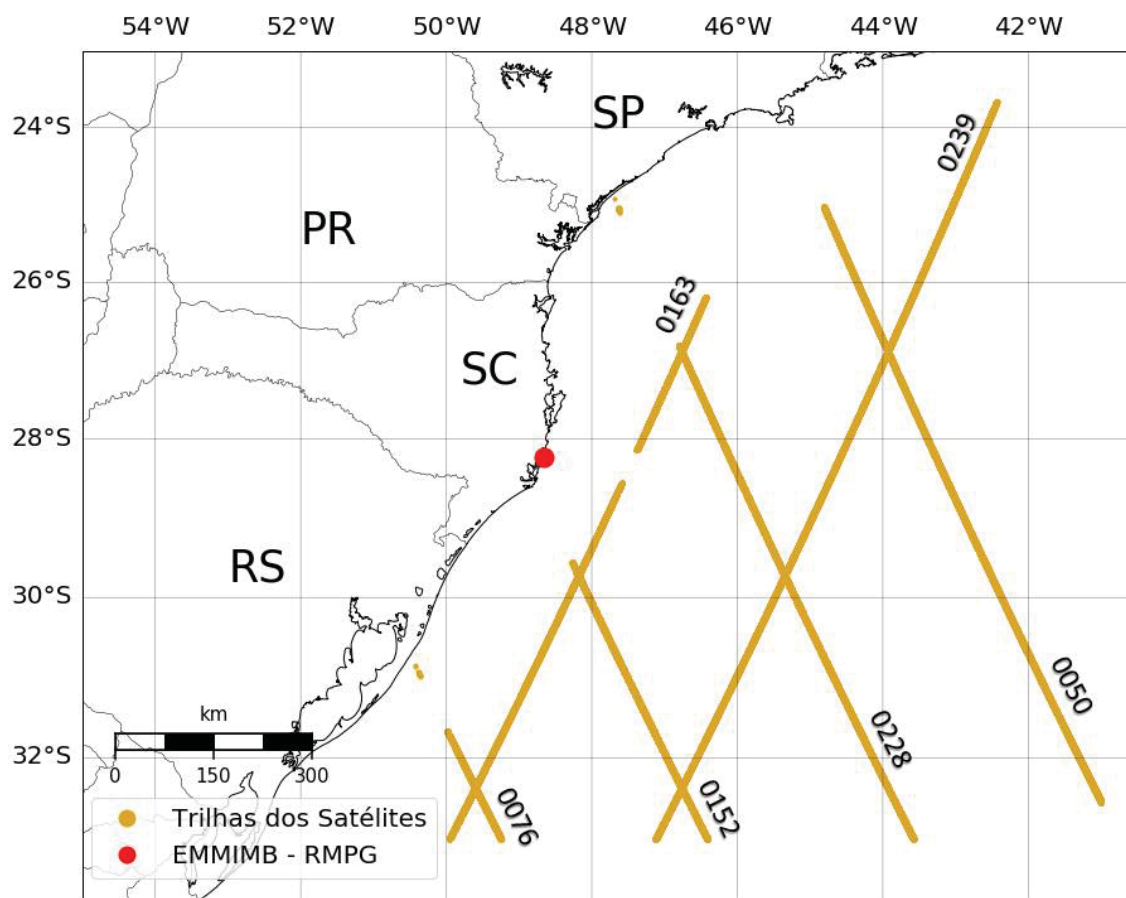
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA PARA A CONFEÇÃO DAS CÉLULAS DE SSH



FONTE: O autor (2020)

Inicialmente, foram determinados os passes das missões que estão compreendidos dentro da área de estudo e, como resultado, encontrou-se os passes ascendentes (trajetória de sul para norte) 0228, 0152, 0076, e 0050 e os passes descendentes (trajetória de norte para sul) 0239 e 0163, conforme ilustrado na FIGURA 22. Para cada passe compreendido dentro da área de estudo, obteve-se a geodésica máxima com base nas latitudes e longitudes máximas e mínimas. Sabendo-se que cada célula deve ter aproximadamente 7 km de comprimento ao longo das trilhas, divide-se a geodésica por sete para determinar o número de células por passe. Na sequência, foi elaborado um histograma de frequência das latitudes e, então, foram extraídos os intervalos de classes mais frequentes de acordo com a quantidade de células por passe. Desde modo, obteve-se uma lista dos valores mais frequentes de latitude para cada célula ao longo de um passe. Observa-se na FIGURA 20 que, a maior frequência de observações de SSH se localiza em torno do centro da célula. Com base na lista de latitudes, foi possível localizar os correspondentes valores de longitude. Tendo as coordenadas geodésicas em mãos, as próximas etapas foram o cálculo da posição central de cada célula (φ_m, λ_m) por meio da média aritmética e a exclusão das células localizadas a uma distância maior que 500 km do marégrafo de Imbituba-SC.

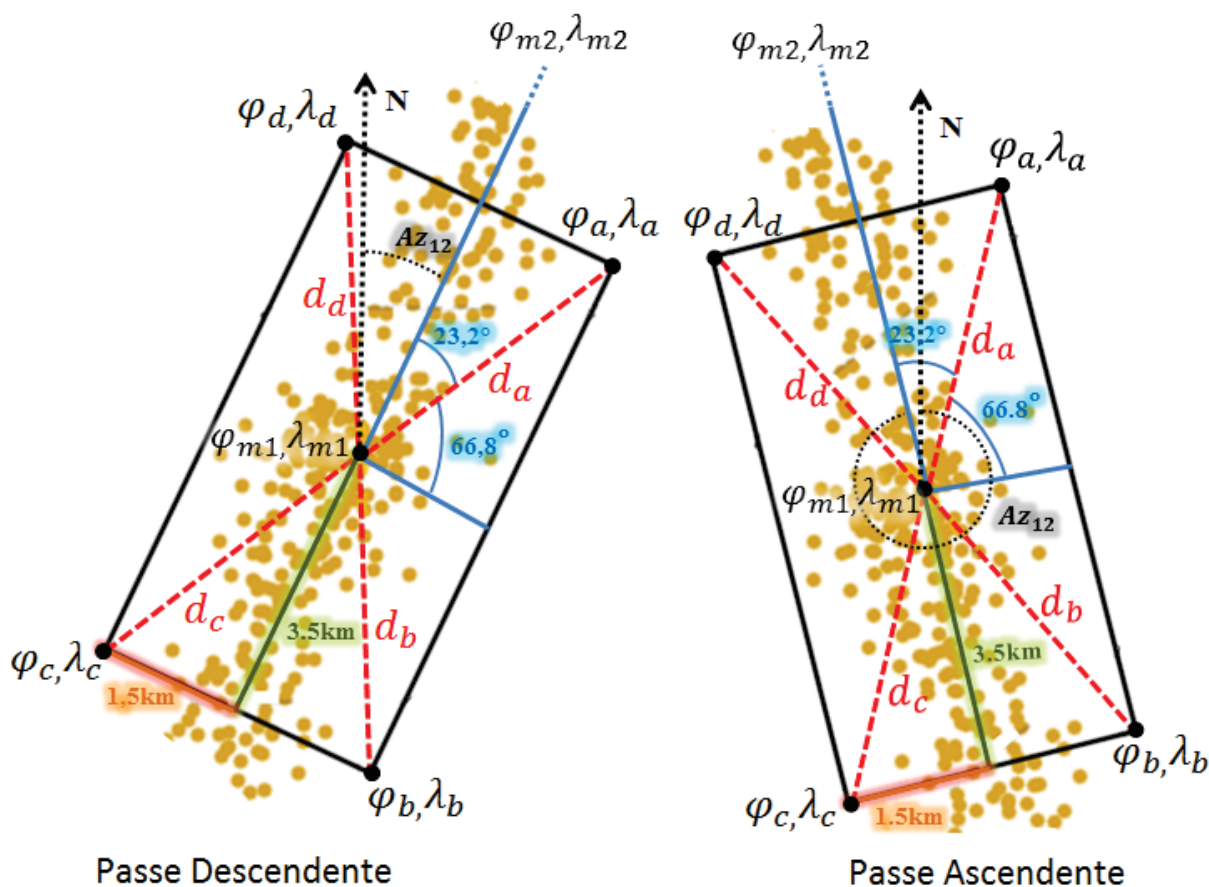
FIGURA 22 – TRILHAS DOS SATÉLITES PROJETADAS SOBRE A ÁREA DE ESTUDOS



FONTE: O autor (2020)

De posse dos valores médios das coordenadas de uma célula ($\varphi_{m1}, \lambda_{m1}$) e da célula seguinte ($\varphi_{m2}, \lambda_{m2}$), obtém-se o valor do Azimute Geodésico (Az_{12}) por meio do Problema Inverso da Geodésia (PI). As coordenadas dos vértices da célula são obtidos pelo Problema Direto da Geodésia (PD), uma vez que, se conhece os valores de " $\varphi_{m1}, \lambda_{m1}$ ", d_a , d_b , d_c e d_d , e os azimutes Az_{1a} , Az_{1b} , Az_{1c} e Az_{1d} , conforme pode ser visto na FIGURA 23.

FIGURA 23 – DETERMINAÇÃO DAS COORDENADAS DOS VÉRTICES DAS CÉLULAS



FORNE: O autor (2020)
 NOTA: Figura sem escala

Para verificar se um ponto P qualquer (φ_P, λ_P), representado por um ponto marrom qualquer da FIGURA 23, pertence ou não a uma determinada célula, foi realizada uma relação de áreas, conforme apresentada na equação (15).

$$A_T = A_{Pab} + A_{Pbc} + A_{Pcd} + A_{Pda} \quad (15)$$

onde, A_T é a área total da célula, A_{Pab} é a área do triângulo formado pelos vértices " $\varphi_P, \lambda_P - \varphi_a, \lambda_a - \varphi_b, \lambda_b$ ", A_{Pbc} é a área do triângulo formado pelos vértices " $\varphi_P, \lambda_P - \varphi_b, \lambda_b - \varphi_c, \lambda_c$ ", A_{Pcd} é a área do triângulo formado pelos vértices " $\varphi_P, \lambda_P - \varphi_c, \lambda_c - \varphi_d, \lambda_d$ ", A_{Pda} é a área do triângulo formado pelos vértices " $\varphi_P, \lambda_P - \varphi_d, \lambda_d - \varphi_a, \lambda_a$ ". As coordenadas geodésicas dos vértices foram transformadas em coordenadas plano retangulares no sistema UTM (Universal Transversa de Mercator) para a obtenção da área no sistema métrico.

3.3.3 Remoção das correções de marés oceânicas nos dados de SSH e aplicação dos efeitos atmosféricos nos dados maregráficos

Os dados das missões de altimetria por satélite processadas pelo OpenADB/DGFI recebem correções geofísicas de acordo com a abordagem de Bosch, Dettmering e Schwatke

(2014). Desde modo, no presente trabalho, para considerar que os satélites altimétricos e os marégrafos estão observando o mesmo sinal oceânico, removeu-se a correção das marés oceânicas e de carga oceânica dos valores de SSH e aplicou-se as correções atmosféricas, altas e baixas frequências, nos dados maregráficos. Fenoglio-Marc, Braitenberg e Tunini (2012) e Cipollini et al. (2016) realizaram a correção dos efeitos atmosféricos nos dados maregráficos a partir do modelo global DAC, que consiste na resposta barotrópica do oceano às forças de vento e pressão atmosférica estimadas pelo modelo Mog2D-G por períodos inferiores a 20 dias e a aproximação do IB por períodos mais longos. O modelo de DAC é produzido pela Divisão de Oceanografia Espacial do CLS (*Collecte Localization Satellites*) e sua distribuição é realizada pela AVISO, com suporte da CNES (BOSCH; DETTMERING; SCHWATKE, 2014). Os arquivos com os valores da DAC são fornecidos com extensão *.nc.bz2*, sendo estes acessados via protocolo FTP a partir de uma licença permitida para fins científicos. São disponibilizados quatro arquivos por dia (00:00, 6:00, 12:00, 18:00 UTC), desde 01/07/1992 até na atualidade, em grades regulares de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$, em todo o globo. Os nós das grades contém os valores de latitude (90° a -90°), longitude (0° a 359.75°) e DAC (em metros).

As células de SSH receberam as correções de marés por meio de um modelo empírico denominado EOT11a (*Empirical Ocean Tide Model 11a*) (SCHWATKE et al., 2010). Ainda conforme a mesma referência citada anteriormente, os modelos empíricos de maré oceânica utilizados pelo DGFI são soluções globais que fornecem amplitudes e fases das constituintes mais dominantes da maré oceânica com base em uma análise empírica de dados de multimissões de altimetria por satélite. O EOT11a foi calculado por meio da análise de marés residuais dos dados do altímetro multi-missão de T/P, ERS-2, ENVISAT, Jason 1 e 2, adquiridos entre setembro de 1992 e abril de 2010 (SAVCENKO; BOSCH, 2012). A TABELA 6 apresenta as constituintes harmônicas da maré empregadas pelo modelo EOT11a.

TABELA 6 – PROPRIEDADES DO MODELO DE MARÉS EOT11A

Modelo	Forma de disponibilização	Constituintes			
		Diurnal	Semidiurnal	Águas Rasas	Longo período
EOT11a	Grades de $1/8^\circ \times 1/8^\circ$ ou ao longo das trilhas	K_1, O_1, P_1, Q_1, S_1	$M_2, S_2, N_2, K_2, 2N_2$	M_4	M_m, M_f

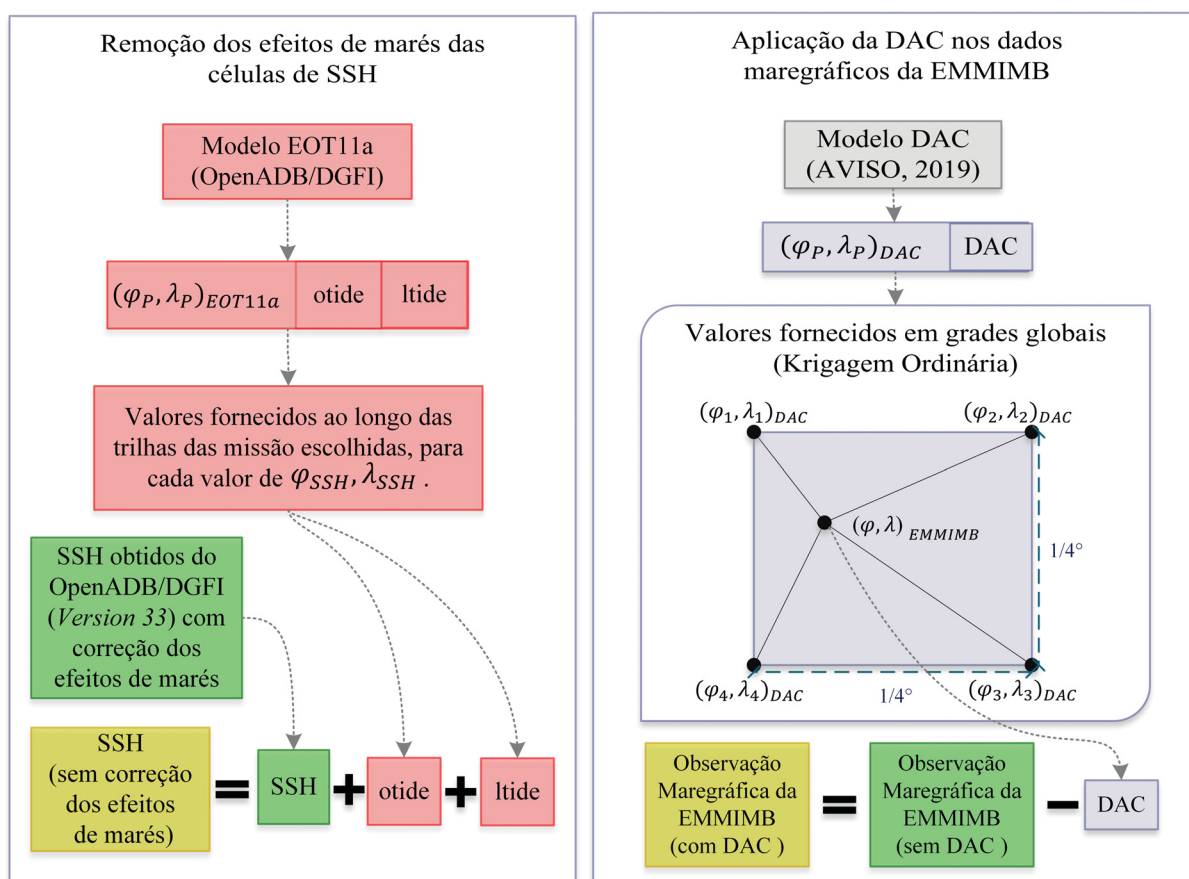
FONTE: Adaptado de Schwatke et al. (2010) e Savcenko e Bosch (2012)

O OpenADB/DGFI disponibiliza o modelo EOT11a ao longo das trilhas dos satélites em arquivos compactados para cada missão no formato binário *NetCDF*. Esses arquivos contém os ciclos e, dentro desses, os passes. A forma de obtenção segue o mesmo esquema dos valores de SSH, conforme descrito na seção 3.3.2. O modelo EOT11a fornece as seguintes informações: *glon* longitude do centro da área de pegada do satélite; *glat*, latitude do centro da área de pegada do satélite; *jday*, dia Juliano 2000; *otide*, correção da maré oceânica em metros; *ltide*, correção da maré em função da carga oceânica em metros; e *oflags* indicação do status e da qualidade da órbita. Pelo fato dos efeitos de marés já estarem disponíveis ao longo da trilha, foi necessário apenas identificar as coordenadas homólogas dos dados de SSH e do

modelo EOT11a para, então, proceder a soma de *otide* e *ltide* ao valor de SSH, conforme pode ser visto na FIGURA 24.

As correções das baixas e altas frequências fornecidas pelo modelo DAC, foram aplicados nas observações maregráficas, através da subtração do nível do mar com os valores encontrados pela interpolação da posição do marégrafo de Imbituba-SC ($\varphi_{SSH}, \lambda_{SSH}$) com a posição dos quatro nós da grade. Essa interpolação se deu pelo método da Krigagem Ordinária (KO), baseado na distribuição espacial ou distância dos elementos amostrais vizinhos. Segundo Marques et al. (2012), a interpolação pela KO possibilita pontuar alguns aspectos referentes à espacialidade dos dados, tais como a disposição dos elementos na área, a proximidade entre eles e o tamanho da amostra. Fenoglio-Marc, Braitenberg e Tunini (2012) e Cipollini et al. (2016) aplicaram as correções atmosféricas, provindas do modelo DAC, com base no ponto da grade mais próxima do marégrafo. Os dados maregráficos da RMPG são amostrados em intervalos de tempo de cinco minutos enquanto os do modelo DAC em intervalos de 00:00, 6:00, 12:00, 18:00 UTC. Desse modo, a compatibilização do tempo se deu partir do emprego dos horários mais próximos entre as duas séries de dados, como por exemplo, para os dados maregráficos compreendidos entre 03:00 à 08:55 e 09:00 à 14:55 UTC foi empregado o valor de DAC obtido às 06:00 e 12:00 UTC, respectivamente.

FIGURA 24 – REMOÇÃO DOS EFEITOS DE MARÉS OCEÂNICAS NOS DADOS DE SSH E APLICAÇÃO DA DAC NOS DADOS MAREGRÁFICOS



FONTE: O autor (2020)

3.3.4 Dados GNSS

Nas seções 2.4.1 e 2.4.2 foram descritas duas soluções GNSS processadas pelos centros de processamento SIRGAS e o NGL, respectivamente. Ambas processam os dados de monitoramento contínuo da estação GNSS da RBMC em Imbituba-SC. No entanto, assim como Castro (2018), optou-se pelas soluções do NGL, pelas seguintes vantagens:

- Melhor resolução temporal (diária);
- Fornece o desvio padrão das soluções;
- O modo de processamento utilizado pelo NGL, o Posicionamento por Ponto Preciso (*Precise Point Positioning* - PPP) gera soluções menos dependentes das estações fiduciais; e
- Fornece as soluções em um único arquivo no formato de texto (.txt).

Após a aquisição da solução NGL para a estação da RBMC de Imbituba, foram removidos os valores discrepantes (*outliers*) por meio da regra $\pm 3\sigma$ e então aplicado um modelo de regressão linear, descrito na seção 2.5.3.2.

3.3.5 Integração de Dados Maregráficos e de Altimetria por Satélite

Em cada célula foi elaborada uma série temporal de SSH a partir dos dados provindos dos satélites escolhidos para a pesquisa. A série de observações maregráficas provindas da EMMIMB foram correlacionadas com as séries de SSH de cada célula, de acordo com a equação (10). O cálculo do valor de r será realizado por meio da linguagem R. Detalhes sobre o coeficiente de correlação de *Pearson* podem ser vistos na seção 2.5.3.1.

As 15 células que obtiverem os melhores valores do r foram empregadas para a análise de movimentos verticais da crosta. Optou-se por 15 células ao invés da célula que melhor se correlaciona aos dados maregráficos, com o propósito de verificar o comportamento de $\dot{\delta}_A$ em diferentes células. A determinação da $\dot{\delta}_A$ e da $\dot{\delta}_{TG}$ foi realizada pela equação (11). Pela importância da equação (1) para esta seção, ela será novamente apresentada, agora com a numeração (16):

$$\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda) = \dot{\delta}_A(\varphi, \lambda) - \dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda) \quad (16)$$

Existem três situações possíveis de interpretação para o valor de $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ em relação a tendência de movimento vertical da crosta obtida por GNSS ($T_{Up-GNSS}$):

- $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda) = 0$: não houve movimento vertical da crosta;
- $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda) > 0$: movimento vertical da crosta se dá no sentido ascendente (soerguimento); e
- $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda) < 0$: movimento vertical da crosta se dá sentido descendente (subsidiência).

A verificação da metodologia proposta foi realizada através da análise entre a $\hat{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ determinada pela equação (16) e a tendência de variação da componente vertical ($T_{Up-GNSS}$) obtida pelas soluções diárias da estação GNSS da RBMC em Imbituba-SC. Para aferir a qualidade do ajuste do modelo de regressão linear, determinaram-se o RMSE (*root-mean-square error*) e o valor de p considerando um intervalo de confiança de 95%, que é o mais comum empregado pela literatura, por meio do teste t de *Student*. De acordo com Alves e Vecchia (2011), o RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados. Além disso, o RMSE tem a mesma unidade da variável de resposta ou dependente (plotada no eixo vertical).

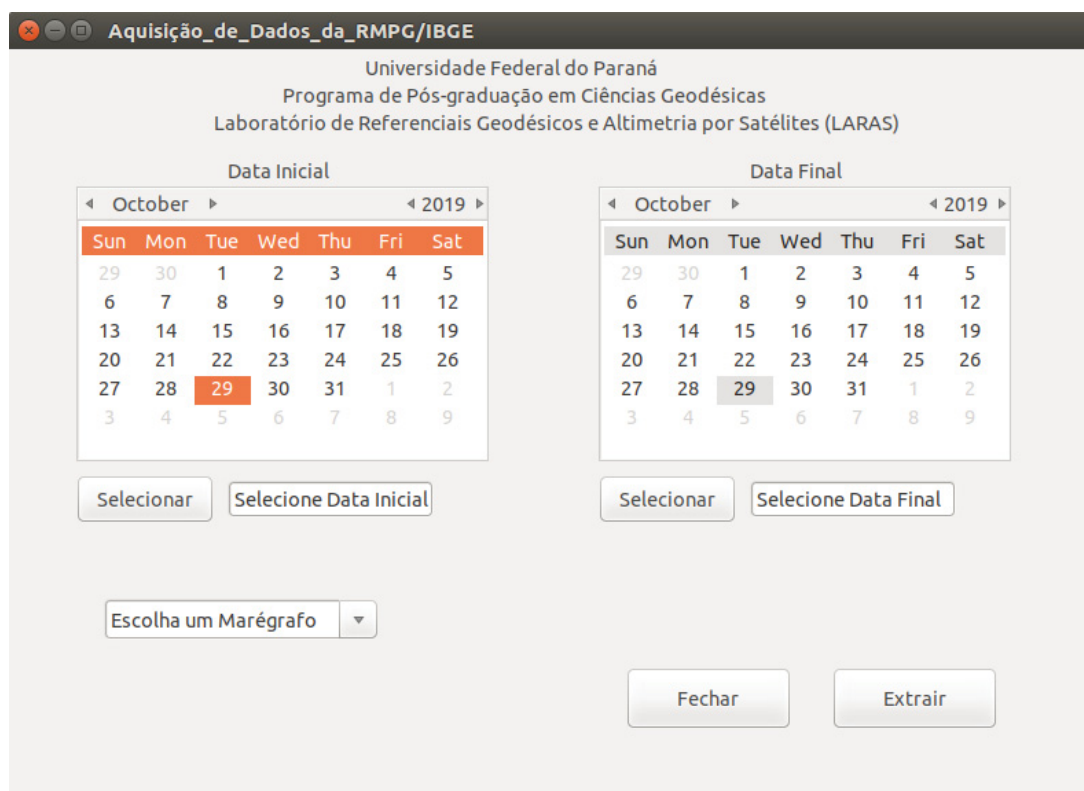
Por fim, destaca-se que não foi necessário a compatibilização dos sistemas de referência entre os dados maregráficos, de SSH e da componente vertical provinda do monitoramento GNSS, uma vez que, o objetivo do presente estudo é realizar uma análise relativa entre estes dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DA AQUISIÇÃO E DO TRATAMENTO DE LACUNAS NAS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS

Embora o presente trabalho tenha se restringido as observações maregráficas providas da EMMIMB, foi desenvolvida uma aplicação em linguagem *Python* para a aquisição de observações de qualquer marégrafo da RMPG. A aplicação está disponível em *URL*¹ e poderá ser utilizada por qualquer usuário que demanda da obtenção de dados maregráficos das estações da RMPG. Essa aplicação e os *scripts* realizados para o presente trabalho, foram hospedadas no *GitHub*, de modo que, qualquer usuário cadastrado na plataforma possa contribuir em aprimoramentos. A interface apresentada na FIGURA 25 segue as condições estabelecidas na seção 3.3.1, ou seja, ela possibilita a seleção da data inicial e final em um calendário e a escolha de um marégrafo da RMPG em uma caixa de listagem de seleção múltipla.

FIGURA 25 – INTERFACE DA APLICAÇÃO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DA RMPG



FONTE: O autor (2020)

Quando algum critério não for inserido corretamente durante o preenchimento da interface, será exibida uma mensagem de erro. Em seguida deve-se clicar no botão “Extrair”

¹ <https://github.com/Giehl/Software-de-Aquisicao-de-Dados-da-RMPG-IBGE>

para, então, iniciar a aquisição das observações maregráficas. Destaca-se aqui, que o correto funcionamento da aplicação demanda de uma boa conexão com a internet. Na sequência, se iniciará um pré-processamento das observações por meio dos seguintes critérios: exclusão de observações fora do intervalo de 5 minutos, exclusão de valores não numéricos e preenchimento dos campos vazios ou faltantes por “nan” . No final o usuário poderá escolher qualquer diretório no computador para salvar o arquivo das observações em formato de texto. O arquivo disponibilizado ao usuário no final da aquisição e do tratamento dos dados pela aplicação, segue a mesma organização dos arquivos entrada da RMPG, conforme apresentado na FIGURA 26.

FIGURA 26 – ARQUIVO DE ENTRADA E ARQUIVO GERADO PELA APLICAÇÃO

Arquivo da RMPG		
01/01/2016	00:00:00	1,337
01/01/2016	00:15:00	1,348
01/01/2016	00:30:00	1,379

↓

Arquivo gerado pela aplicação		
01/01/2016	00:00:00	1.337
01/01/2016	00:05:00	nan
01/01/2016	00:10:00	nan
01/01/2016	00:15:00	1.348
01/01/2016	00:20:00	nan
01/01/2016	00:25:00	nan
01/01/2016	00:30:00	1.379

FONTE: O autor (2020)

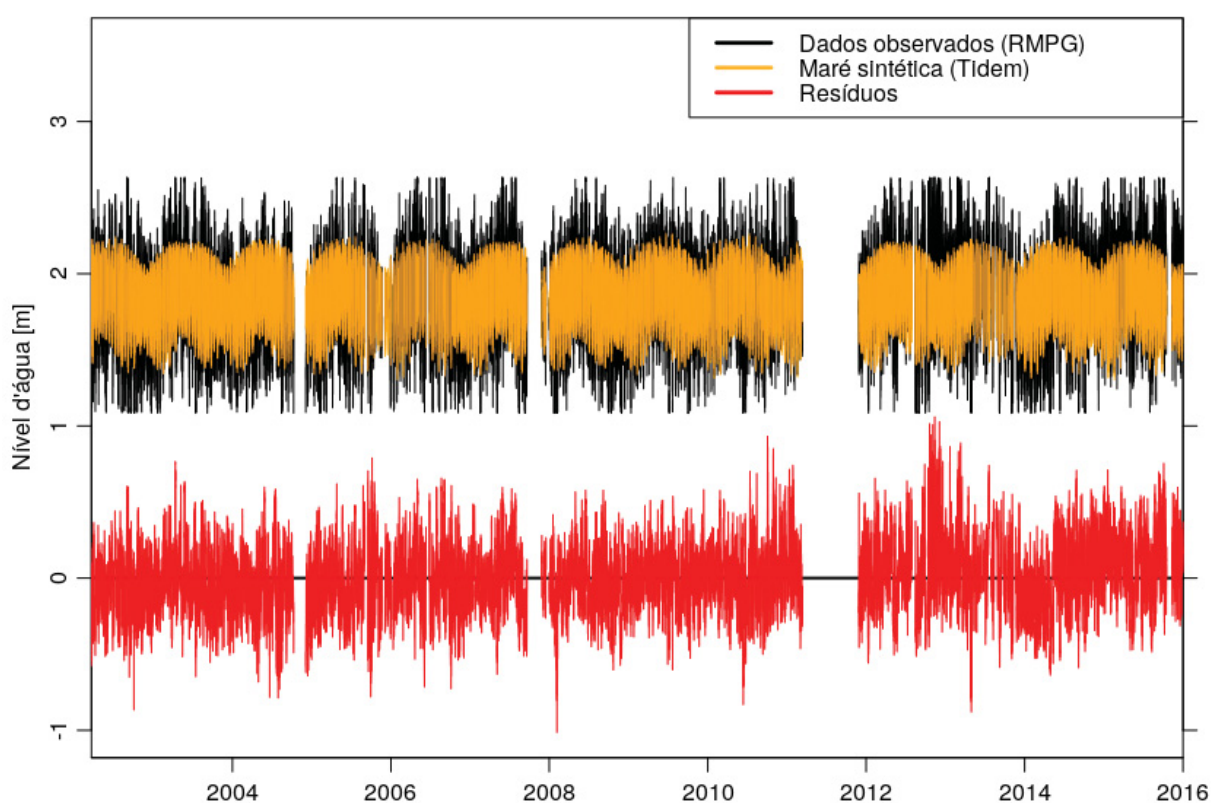
Após a aquisição das observações maregráficas de Imbituba-SC, foram removidos os *outliers* e preenchidas as lacunas a partir de MSs confeccionadas pela função *Tidem*. Para isso, desenvolveu-se um *script* em R que está disponível em *URL*². As MSs foram confeccionadas com base nas observações provindas da EMMIMB entre março de 2002 a dezembro de 2015. Para o período de outubro de 2002 a outubro de 2006 os dados estavam amostrados para o horário de 2, 7, 12, ..., 57 minutos, enquanto que para os outros períodos, o horários eram de 5, 10, 15, ..., 55 minutos. Desse modo, empregou-se os valores provindos da MSs para referenciar os dados maregráficos, entre outubro de 2002 e outubro de 2006, aos horários de 5, 10, 15, ..., 55 minutos. Destaca-se que, para a confecção das MSs considerou-se as diferentes amostragens de horários citados anteriormente.

A FIGURA 27 apresenta os gráficos dos dados maregráficos observados, das MSs e dos resíduos. Verifica-se no gráfico das MSs uma atenuação de altas frequências em relação

² https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Aplicar_Mares_Sinteticas.R

aos dados observados. Essa atenuação também pode ser constatada nos valores do desvio padrão das MSs e dos dados observados que correspondem a $\pm 16,05$ cm e $\pm 25,34$ cm, respectivamente, sendo que o valor da média foi de 1,86 m para ambos os dados. Embora apresente um desvio padrão no valor de $\pm 19,61$ cm, os resíduos estão dispersos aleatoriamente em torno da média, conforme análise visual dos resíduos apresentados na FIGURA 27, o que leva a concluir que as MSs apresentam um bom comportamento frente aos dados maregráficos observados. O coeficiente de correlação de *Pearson* entre as MSs e os dados observados foi de 0,63, o que indica uma correlação moderada conforme a classificação encontrada em Shimakura (2006).

FIGURA 27 – COMPARAÇÃO ENTRE A MARÉS SINTÉTICAS E AS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS EM IMBITUBA-SC



FONTE: O autor (2020)

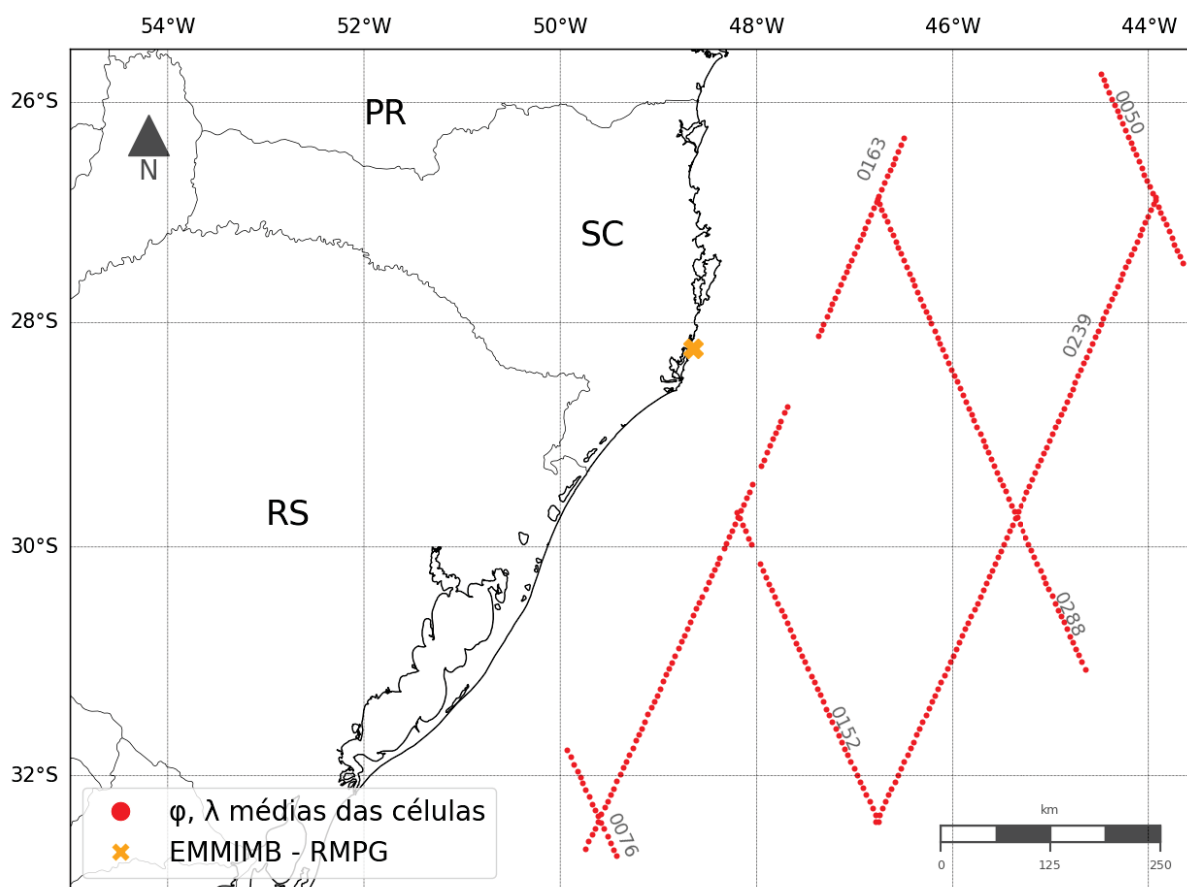
4.2 COMPARAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS OBTIDAS A PARTIR DAS OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS E DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES

Como já visto na Metodologia, a comparação de séries temporais maregráficas provenientes da EMMIMB foi realizada com base em células confeccionadas ao longo das trilhas dos satélites altimétricos T/P, Jason 1, 2 e 3. O *script* para a confecção dessas células foi realizado em *Python* e está disponível em *URL*³. Foram confeccionadas 363 células de SSH ao longo

³ https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Confeccionar_Celulas.py

dos passes 0050, 0076, 0152, 0163, 0228 e 0239. A FIGURA 28 apresenta a posição média das células dispostas ao longo das trilhas.

FIGURA 28 – POSIÇÃO MÉDIA DAS CÉLULAS CONFECCIONADAS

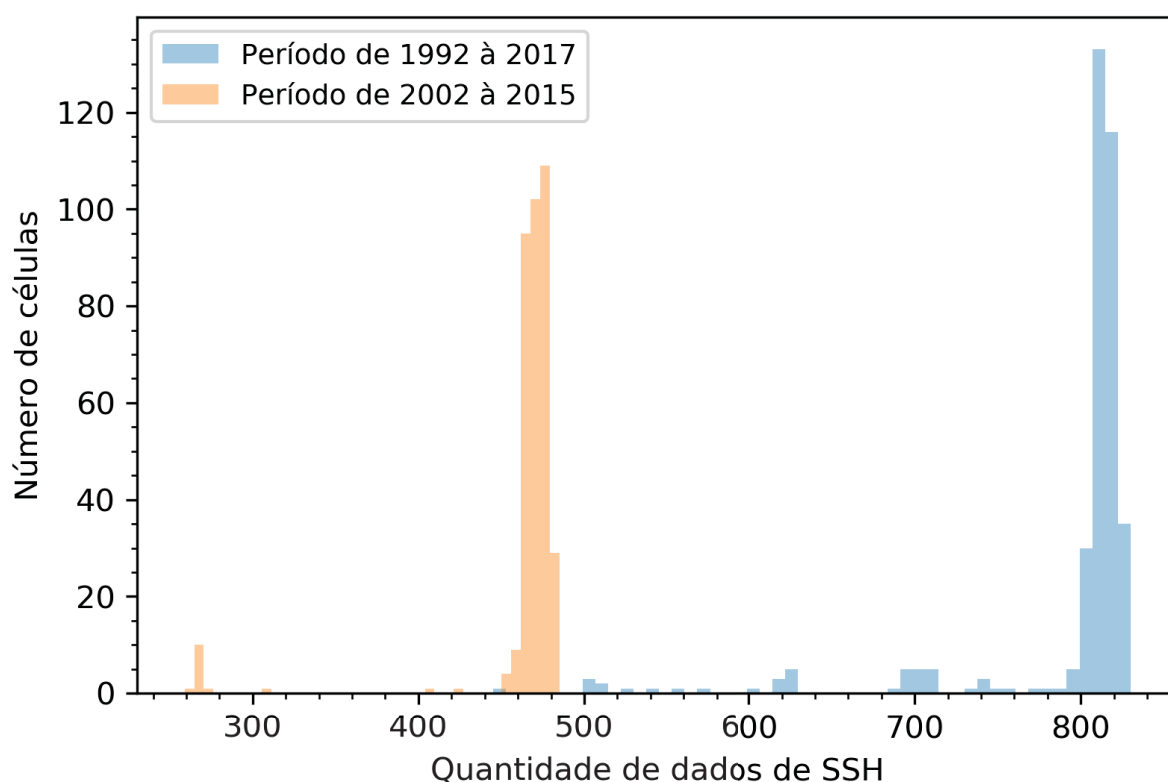


FONTE: O autor (2020)

A versão 33 dos dados de SSH disponíveis pelo OpenADB/DGFI, os quais foram empregados na confecção das células, compreendem um período de tempo que vai de setembro de 1992 até janeiro de 2017, totalizando em 8872 dias de observações. Esse período, associado a resolução temporal das missões (9,91564 dias), fornece um total de, em teoria, 894 observações de SSH por célula. No entanto, a presença de lacunas faz diminuir esse número de observações e, conseqüentemente, prejudica a análise do nível do mar. Desse modo, o *script* de confecção das células apresentado no parágrafo anterior, excluiu as células que contêm menos de 500 dados de SSH. A FIGURA 29 apresenta a quantidade de dados de SSH contida em cada célula com os *outliers* eliminados pela regra $\pm 3\sigma$. São apresentados dois histogramas de frequências: um da cor azul e outro da cor vermelha. No histograma azul, o qual compreende um período de tempo que vai de 1992 à 2017, ocorre uma concentração de dados no lado direito, entre 800 e 830 e poucos valores menores que 800 dados de SSH por célula. O histograma vermelho apresenta a mesma série de dados de SSH que o histograma azul, porém delimitada para o intervalo de tempo que vai de março de 2002 até dezembro

de 2015, totalizando em teoria 507 observações de SSH por célula. A justificativa para essa delimitação está no fato de que a correlação de *Pearson* requer que o número de elementos de duas variáveis seja o mesmo. Desse modo, os dados de SSH foram delimitados para o mesmo intervalo de tempo dos dados maregráficos de Imbituba-SC. Devido as lacunas existentes na série, os dados do histograma vermelho concentram-se entre 460 e 485 valores de SSH por célula.

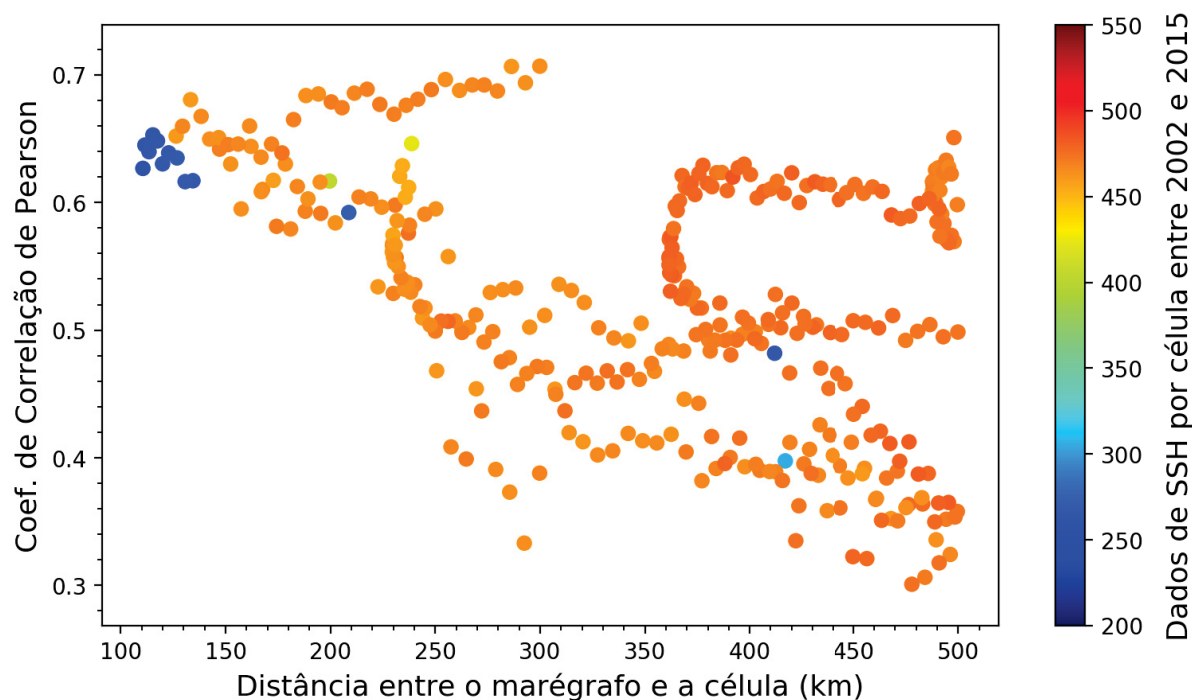
FIGURA 29 – HISTOGRAMAS DE FREQUÊNCIAS DOS DADOS DE SSH



FONTE: O autor (2020)

Na FIGURA 30, pode-se observar que a maioria das células com lacunas de dados de SSH se localizam nas proximidades da EMMIMB, justamente pelo fato das observações de altimetria por satélite perderem resolução nas proximidades da costa. Além disso, a FIGURA 30 mostra que o valor de r não foi o maior em células localizadas mais próximas da EMMIMB, fato este que pode estar relacionado com a presença das lacunas de dados de SSH nestas células.

FIGURA 30 – RELAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DAS CÉLULAS EM RELAÇÃO A EMMIMB, OS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E AS LACUNAS DE DADOS DE SSH



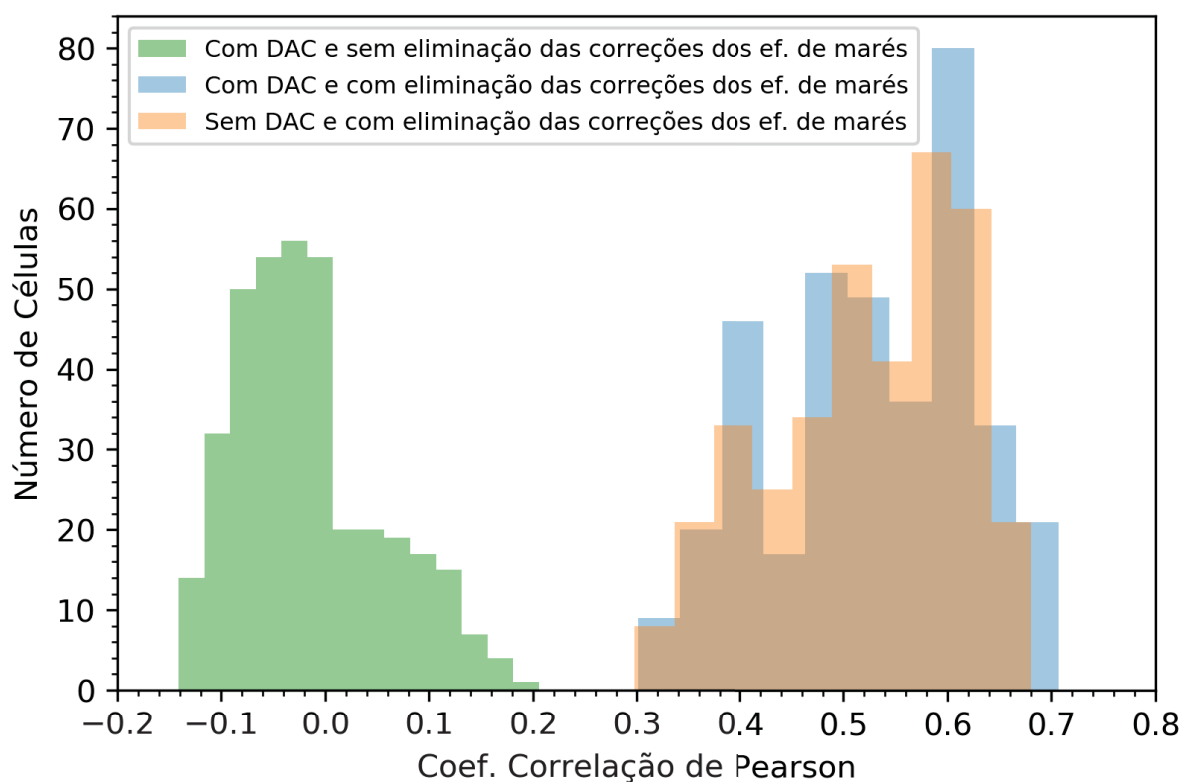
FONTE: O autor (2020)

Para considerar que os satélites altimétricos e os marégrafos estejam observando o mesmo sinal oceânico, removeu-se as correções de marés dos dados de SSH e corrigiu-se os dados maregráficos para os efeitos de altas frequências (Mog2D-G) e baixas frequências (IB), inclusas no modelo DAC, conforme apresentado na seção 3.3.3. Os *scripts*, desenvolvidos em *Python*, para a remoção dos efeitos de marés e de aplicação da DAC estão disponíveis em *URL*⁴ e *URL*⁵, respectivamente. A FIGURA 31 apresenta a variação dos valores de correlação entre os dados de SSH e os dados maregráficos com e sem a aplicação da DAC e a remoção dos efeitos de marés. Quando a correção DAC foi aplicada aos dados maregráficos, ocorreu um incremento no número de células e uma melhoria da correlação para valores de r acima de 0,60. Ressalta-se que a aplicação da DAC melhorou a correlação das células localizadas mais próximas do marégrafo de Imbituba-SC, fato este esperado pois, as correções atmosféricas são variáveis no espaço. No entanto, o maior incremento no valor de r foi ocasionado ao se eliminar a correção devido aos efeitos de maré dos dados de SSH.

⁴ https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Remover_Efeitos_Mares_EOT.py

⁵ https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Aplicar_DAC_dados_maregraficos.py

FIGURA 31 – VARIÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON EM FUNÇÃO DA ELIMINAÇÃO DA CORREÇÃO DO EFEITO DE MARÉ NOS DADOS DE SSH E DA APLICAÇÃO DA DAC NOS DADOS MAREGRÁFICOS

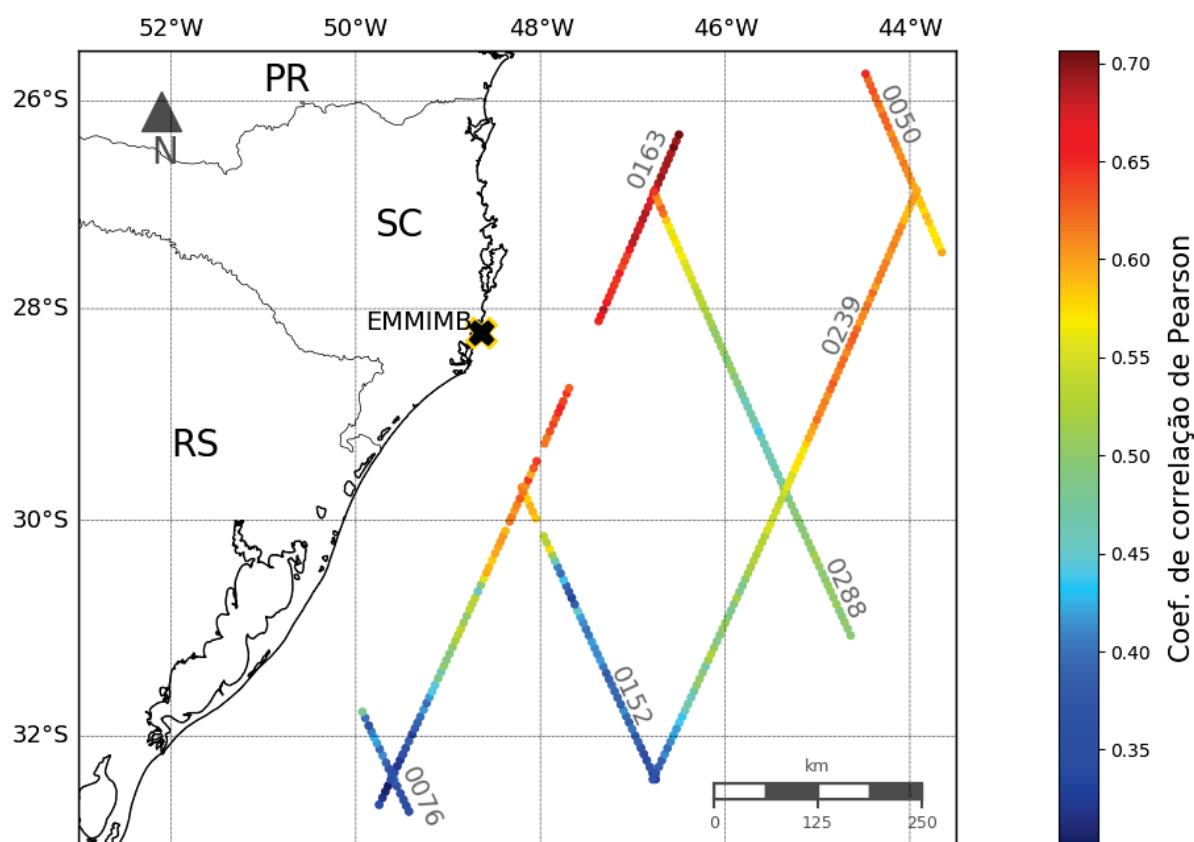


FONTE: O autor (2020)

Na sequência foram eliminados os *outliers* da série de dados de SSH e o intervalo de dados maregráficos e de SSH foram compatibilizados para o mesmo instante de tempo, com o propósito de realizar o cálculo da correlação de *Pearson*. Para isso, foi elaborado um *script* em linguagem R, disponível em *URL*⁶. A FIGURA 32 apresenta a variação do valor de r entre os dados maregráficos e as células de SSH dispostas ao longo das trilhas das missões empregadas no estudo. Nota-se valores maiores de r nas proximidades da EMMIMB e uma tendência de diminuição da correlação nas células mais afastadas do marégrafo. Para as células localizadas no passe 0163 foram observados os maiores valores de r .

⁶ https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Integracao_SSH_TG.R

FIGURA 32 – VARIÇÃO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON AO LONGO DAS TRILHAS DOS SATÉLITES EM RELAÇÃO AOS DADOS DA EMMIMB DE 2002 A 2015

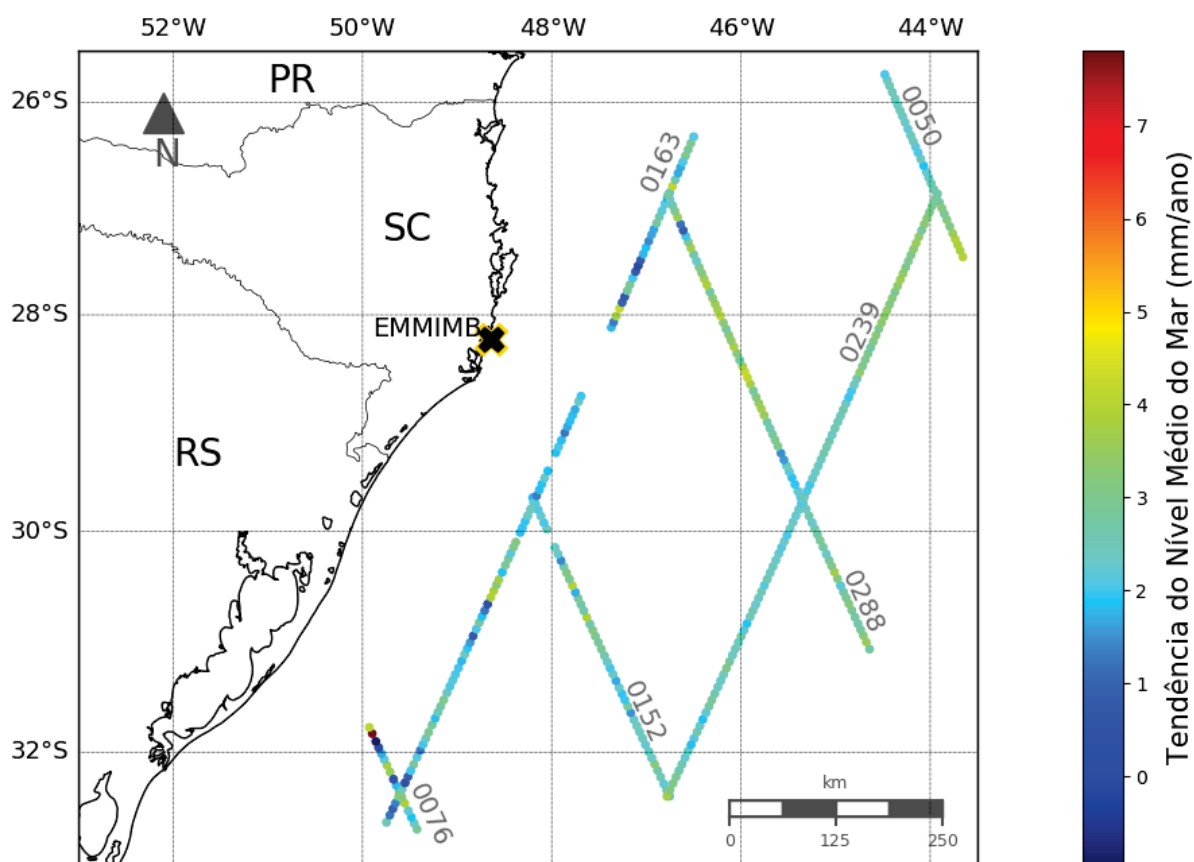


FONTE: O autor (2020)

4.3 EVOLUÇÃO DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR EM IMBITUBA-SC

A tendência do nível médio do mar, apresentada na FIGURA 33, foi derivada dos dados de SSH para cada célula dentro da área de estudo, entre 1992 e 2017 e resultou em uma elevação, em torno de 2 a 3 mm/ano, aproximando-se da tendência média do nível do mar global de $3,3 \pm 0,4$ mm/ano, entre 1993 e 2009, obtida por Nicholls e Cazenave (2010). Ressalta-se que para esta estimativa, foram mantidas as correções procedentes do Openadb/DGFI nos dados de SSH. Nota-se também na FIGURA 33 que as células localizadas nas proximidades da costa apresentaram maiores oscilações no valor de tendência do nível do mar quando comparadas com as células mais distantes da costa.

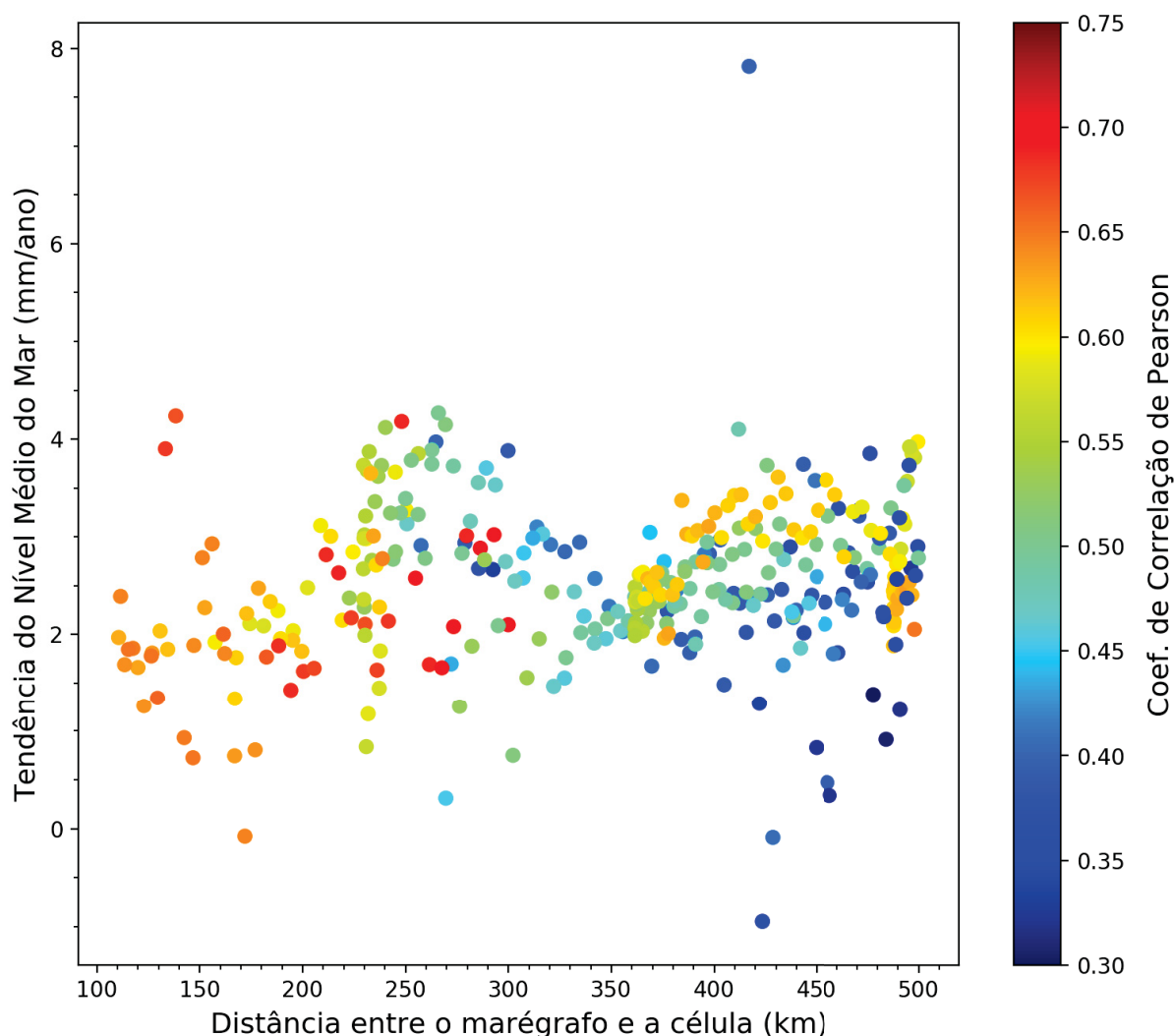
FIGURA 33 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA ÁREA DE ESTUDO DE 1992 A 2017



FONTE: O autor (2020)

Para a verificação da tendência do nível médio do mar a partir de observações altimétricas entre 2002 e 2015, foram analisadas, conjuntamente, as distâncias das células até a EMMIMB ($Dist_{SSH_EMMIMB}$) com o valor de r , conforme apresentado na FIGURA 34. O período de tempo de 2002 a 2015 foi delimitado com o objetivo de comparar as tendências do nível do mar entre a altimetria por satélite e os dados da EMMIMB. Observa-se que, para distâncias menores que 200 km, têm-se uma predominância de células com correlação acima de 0,6 e uma concentração de valores de tendência do nível médio do mar entre 0,5 e 3,5 mm/ano.

FIGURA 34 – RELAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DAS CÉLULAS EM RELAÇÃO A EMMIMB, OS VALORES DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E A TENDÊNCIA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR ENTRE 2002 E 2015

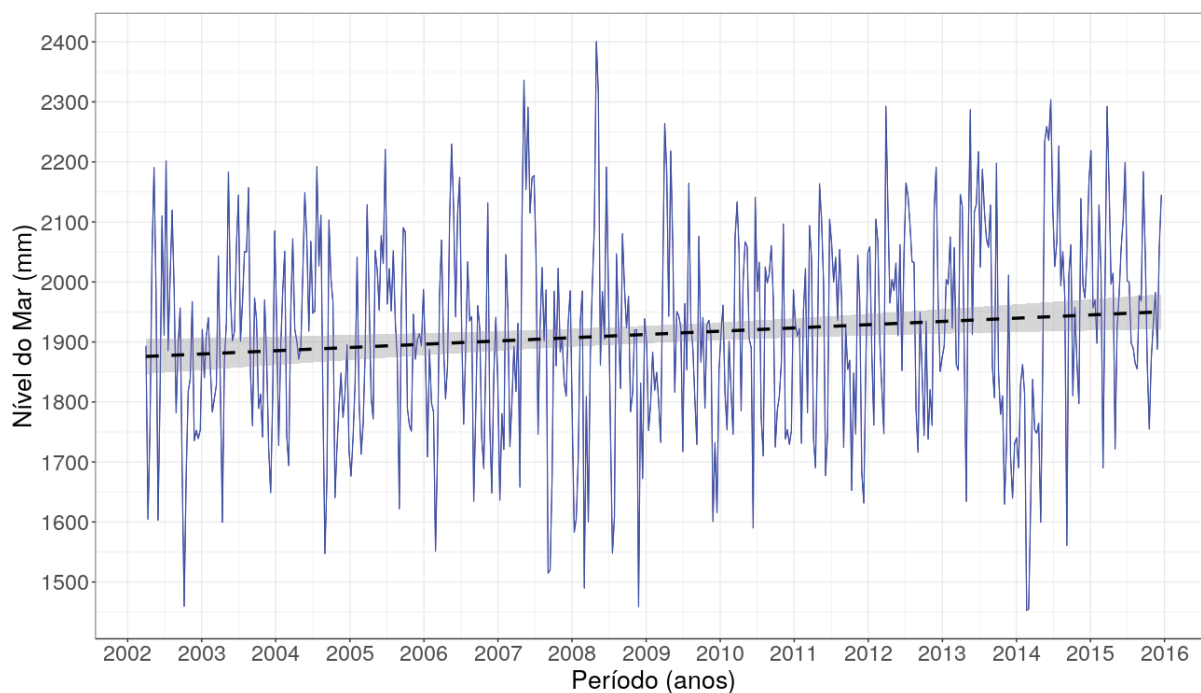


FONTE: O autor (2020)

Ao analisar a reta de regressão dos dados maregráficos entre 2002 e 2015, conforme apresentado na FIGURA 35, verificou-se uma tendência do nível médio do mar de $5,42 \pm 1,88$ mm/ano. Os resíduos estão na FIGURA 36. Destaca-se que, aproximadamente entre a metade de 2013 e a metade de 2014 houve uma aparente redução do nível do mar e na sequência uma elevação. Desse modo, é importante que a análise do nível médio do mar contemple o maior período de tempo possível. Além disso, faz-se necessário maiores estudos acerca de possíveis efeitos instrumentais na série temporal de dados maregráficos.

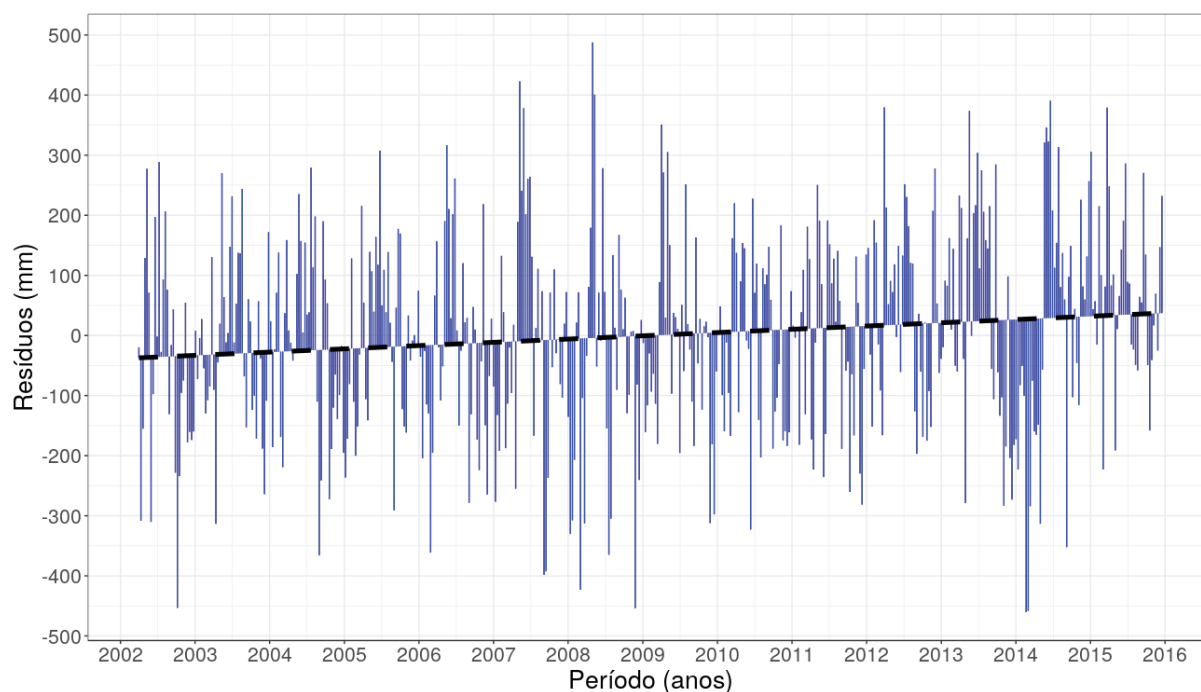
As faixas sombreadas entorno das retas de regressão apresentadas nas FIGURAS 35, 37 e 39, correspondem ao nível de confiança de 95%, ou seja, tem-se 95% de confiança de que a linha de regressão verdadeira está dentro da região sombreada. O nível de confiança de 95% é o padrão adotado pelo pacote de visualização de dados “ggplot” e disponível para a linguagem de programação R (WICKHAM et al., 2020).

FIGURA 35 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2002 A 2015



FONTE: O autor (2020)

FIGURA 36 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2002 A 2015



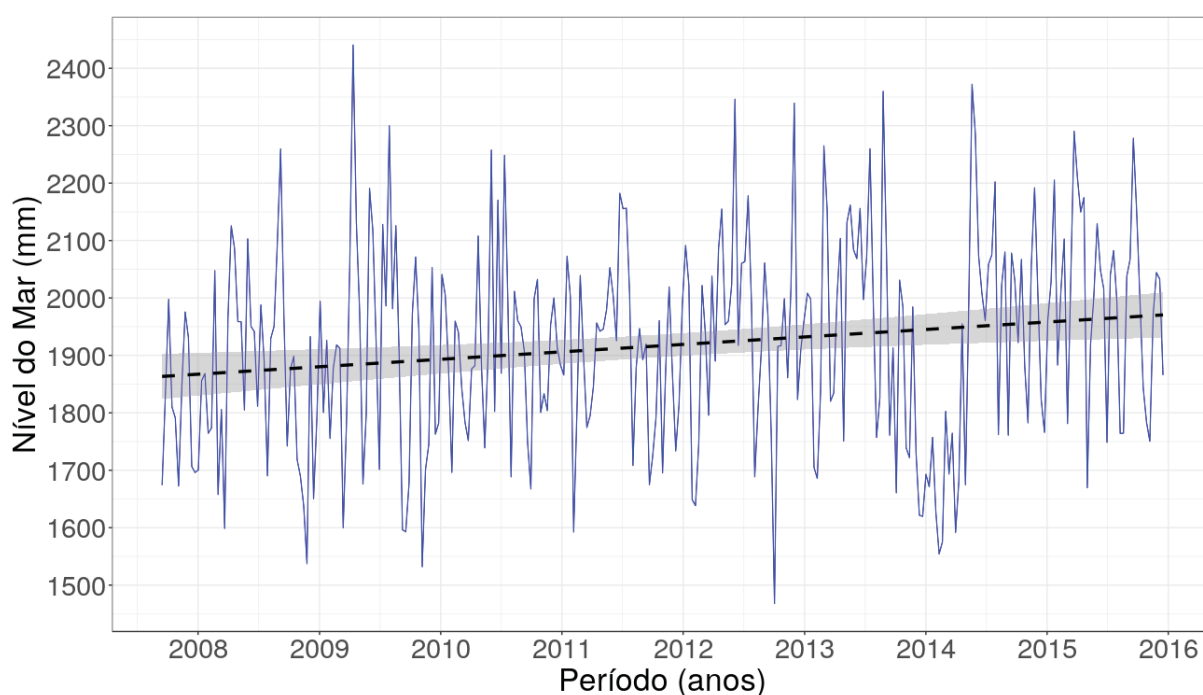
FONTE: O autor (2020)

Analisando os resultados do nível médio do mar obtidos a partir dos dados maregráficos ($5,42 \pm 1,88$ mm/ano) e dos dados de altimetria por satélite (0,5 a 3,5 mm/ano) para o período de 2002 a 2015, verifica-se uma diferença que pode ser associada a movimentos verticais da

crosta. No entanto, não é possível atestar que essa diferença seja ocasionada, de fato, por movimentos verticais da crosta, uma vez que, somente a partir de setembro de 2007, é que foi instalada uma estação GNSS de monitoramento contínuo nas proximidades da EMMIMB.

Como o propósito do trabalho é verificar a possibilidade do emprego combinado entre séries maregráficas e de altimetria por satélite para a determinação de movimentos verticais da crosta, delimitou-se as séries temporais maregráficas e de SSH ao mesmo período de tempo da série provinda do monitoramento contínuo GNSS em Imbituba-SC. Desse modo a análise se restringiu ao período de setembro de 2007 a dezembro de 2015. As FIGURAS 37 e 38 apresentam a tendência do nível do mar e os respectivos resíduos obtidos das observações maregráficas em Imbituba-SC. Verificou-se uma elevação do nível do mar de $12,97 \pm 4,23$ mm/ano. O gráfico dos resíduos, ou seja, o afastamento de uma observação para o seu valor ajustado no modelo de regressão, apontou valores mínimos e máximos de -750 a +500 mm, respectivamente. Destaca-se, ainda, que para proceder a regressão dos dados maregráficos, aplicou-se o filtro passa-baixa apresentando na seção 2.5.1, cujo o *script* está disponível em *URL*⁷ e, na sequência, os dados foram amostrados na mesma resolução temporal dos dados de SSH (9,91564 dias).

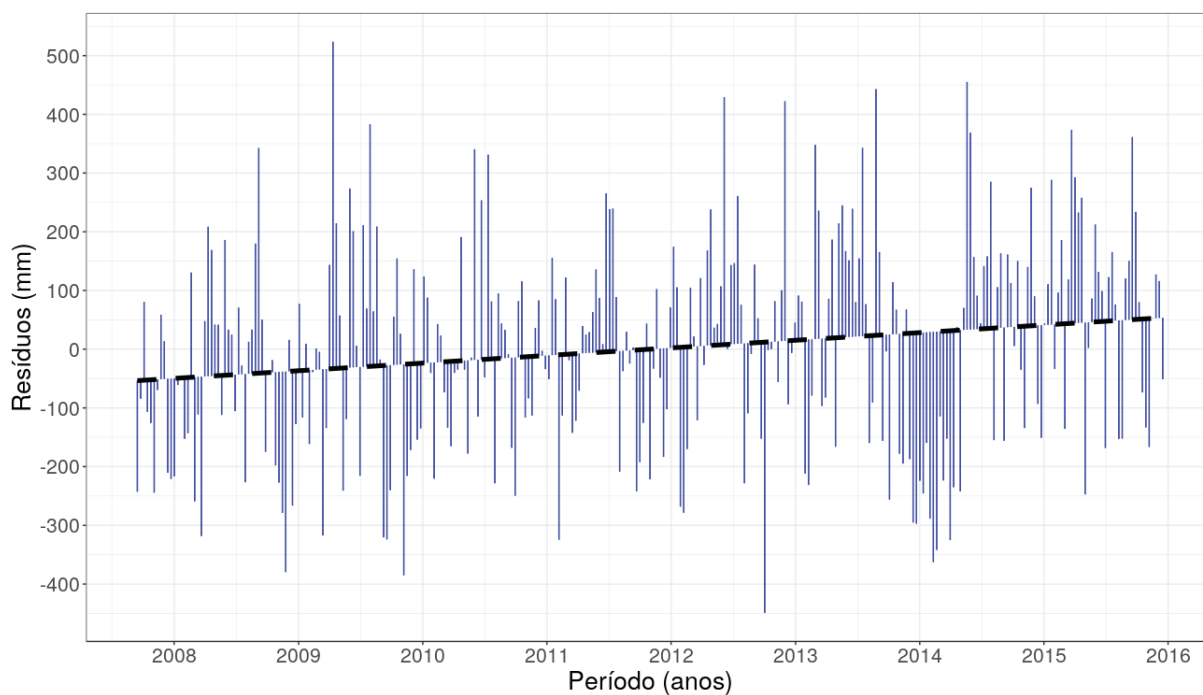
FIGURA 37 – TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2007 A 2015



FONTE: O autor (2020)

⁷ https://github.com/Giehl/scripts_dissertacao/blob/master/Filtro_Passa_Baixa.R

FIGURA 38 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DO NÍVEL DO MAR NA EMMIMB DE 2007 A 2015

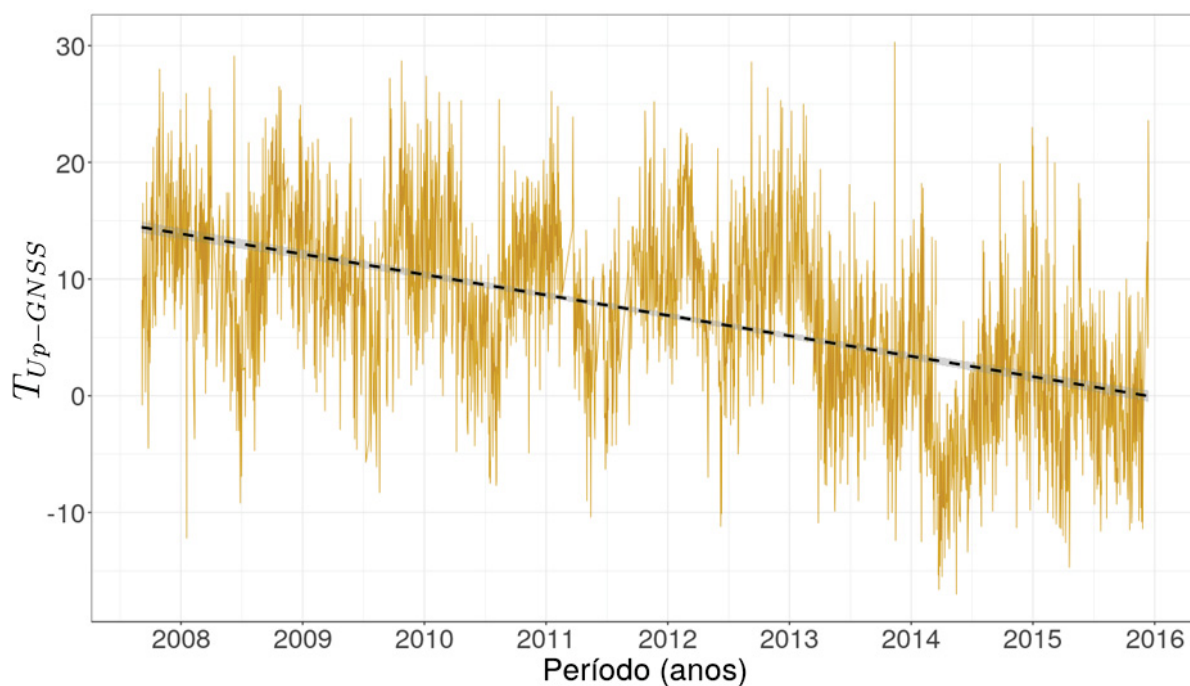


FONTE: O autor (2020)

Os resultados do RMSE dos resíduos apresentaram os valores de 167,06 mm e 175,31 mm para a $\hat{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ entre 2002 e 2015 e entre 2007 e 2015, respectivamente. Desse modo, a série temporal mais longa (2002-2015) teve uma maior aproximação entre os valores observados e os previstos pelo modelo de regressão linear, e, conseqüentemente, a qualidade da determinação da $\hat{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ entre 2002 e 2015 foi melhor quando se leva em conta apenas o indicador estatístico RMSE.

A tendência de movimento vertical da crosta, determinada a partir da série temporal da componente vertical provinda da estação GNSS da RBMC em Imbituba-SC, entre setembro de 2007 e dezembro de 2015, resultou num valor descendente de $-1,75 \pm 0,05$ mm/ano, conforme pode ser visto na FIGURA 39.

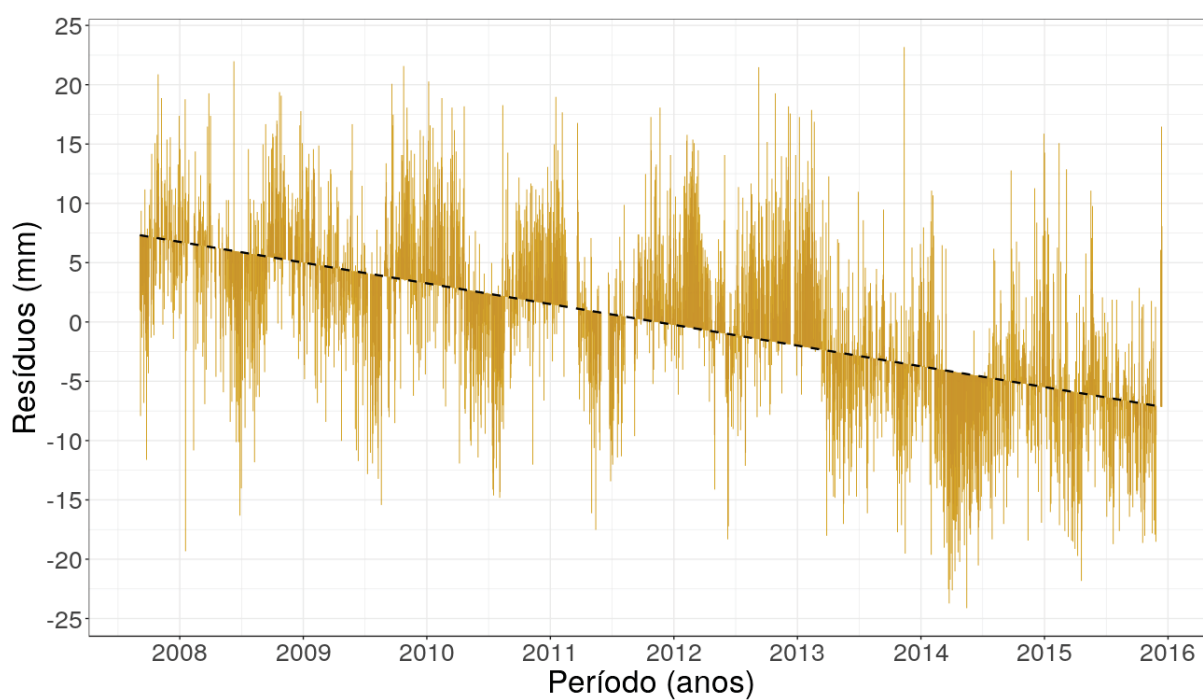
FIGURA 39 – TENDÊNCIA DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA DE 2007 A 2015



FONTE: O autor (2020)

Os desvios padrão para a componente vertical do posicionamento GNSS, disponibilizados juntamente com as soluções diárias do NGL, resultaram num valor médio de 2,86 mm para o período de 2007 a 2019. A FIGURA 40 apresenta os resíduos obtidos da regressão.

FIGURA 40 – RESÍDUOS DA TENDÊNCIA DE MOVIMENTOS VERTICAIS DA CROSTA DE 2007 A 2015



FONTE: O autor (2020)

O RMSE dos resíduos da $T_{Up-GNSS}$ apresentou os valores de 6,83 mm e 6,68 mm para o período entre setembro de 2007 e dezembro de 2019 e entre setembro de 2007 e dezembro de 2015, respectivamente. Assim sendo, constatou-se uma pequena melhoria na proximidade entre os valores da solução GNSS (componente vertical) e os valores previstos pelo modelo de regressão linear para o período de 2007 a 2015 em relação ao período de 2007 a 2019.

Para a análise de movimentos verticais da crosta, foram selecionadas 15 células de SSH que apresentaram o maior valor de r quando correlacionadas com os dados maregráficos de Imbituba-SC, entre 2002 a 2015. A TABELA 7 apresenta os resultados das regressões lineares dos dados maregráficos ($\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$), de SHH ($\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$) e de GNSS ($T_{Up-GNSS}$) entre setembro de 2007 a dezembro de 2015. Os valores médios da $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e da $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ foram de $12,97 \pm 4,23$ mm/ano e $7,10 \pm 4,62$ mm/ano, respectivamente. Os sinais negativos da $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ e da $T_{Up-GNSS}$ caracterizam um movimento vertical da crosta no sentido descendente (subsistência). O coeficiente de correlação de *Pearson* médio entre os dados maregráficos e de altimetria por satélite, para o período de 2002 a 2015, foi de 0,69, o que indica uma correlação moderada conforme a classificação encontrada na TABELA 4.

TABELA 7 – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SSH E DE GNSS ENTRE SETEMBRO DE 2007 A DEZEMBRO DE 2015

Posição central da célula	r 2002 – 2015	$Dist_{SSH_EMMIMB}$ (km)	$\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ 2007 – 2015 mm/ano	$\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ 2007 – 2015 mm/ano	$\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ 2007 – 2015 mm/ano	$T_{Up-GNSS}$ 2007 – 2015 mm/ano
26°19'32,16"S 46°29'59,04"W	0,71	299,88	6,19 ± 5,01	12,97 ± 4,23	-6,78 ± 6,56	-1,75 ± 0,05
26°26'47,87"S 46°33'26,58"W	0,71	286,36	9,12 ± 4,97	12,97 ± 4,23	-3,85 ± 6,53	-1,75 ± 0,05
26°43'56,52"S 46°41'40,09"W	0,70	254,86	7,27 ± 4,68	12,97 ± 4,23	-5,70 ± 6,31	-1,75 ± 0,05
26°23'12,63"S 46°31'44,28"W	0,69	293,02	8,50 ± 4,81	12,97 ± 4,23	-4,47 ± 6,41	-1,75 ± 0,05
26°33'49,55"S 46°36'48,71"W	0,69	273,36	4,57 ± 4,70	12,97 ± 4,23	-8,40 ± 6,32	-1,75 ± 0,05
26°36'55,76"S 46°38'17,48"W	0,69	267,66	6,20 ± 4,72	12,97 ± 4,23	-6,77 ± 6,34	-1,75 ± 0,05
27°4'56,49"S 46°51'47,90"W	0,69	217,50	8,23 ± 4,40	12,97 ± 4,23	-4,74 ± 6,10	-1,75 ± 0,05
26°47'40,33"S 46°43'26,80"W	0,69	248,13	9,51 ± 4,59	12,97 ± 4,23	-3,46 ± 6,24	-1,75 ± 0,05
26°40'14,45"S 46°39'52,73"W	0,69	261,61	6,06 ± 4,77	12,97 ± 4,23	-6,91 ± 6,38	-1,75 ± 0,05
26°30'24,37"S 46°35'10,08"W	0,69	279,67	8,18 ± 4,76	12,97 ± 4,23	-4,79 ± 6,37	-1,75 ± 0,05
27°8'28,27"S 46°53'29,63"W	0,69	211,41	6,22 ± 4,31	12,97 ± 4,23	-6,75 ± 6,04	-1,75 ± 0,05
27°18'36,51"S 46°58'25,95"W	0,69	194,24	5,05 ± 4,30	12,97 ± 4,23	-7,92 ± 6,03	-1,75 ± 0,05
27°22'11,47"S 47°00'10,84"W	0,68	188,33	8,99 ± 4,33	12,97 ± 4,23	-3,98 ± 6,05	-1,75 ± 0,05
26°51'15,74"S 46°45'10,52"W	0,68	241,67	5,57 ± 4,63	12,97 ± 4,23	-7,40 ± 6,27	-1,75 ± 0,05
28°00'36,24"S 47°19'01,13"W	0,68	133,30	5,88 ± 4,17	12,97 ± 4,23	-7,09 ± 5,94	-1,75 ± 0,05
Média	0,69	243,40	7,10 ± 4,62	12,97 ± 4,23	-5,93 ± 6,26	-1,75 ± 0,05

FONTE: O autor (2020)

A TABELA 8 apresenta os resultados das $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$, $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ e $T_{Up-GNSS}$ para os períodos de tempo de 2002 a 2015, 1992 a 2017 e 2007 a 2019, respectivamente. Ressalta-se que esses períodos correspondem as maiores séries temporais de SSH, disponibilizadas pela Versão 33 através do OpenADB/DGFI, e da estação GNSS em Imbituba-SC, disponibilizada pelo SONEL, até a finalização do presente trabalho. Os valores médios da $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e da $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ foram de $5,42 \pm 1,88$ mm/ano e $2,53 \pm 1,18$ mm/ano, respectivamente.

Os erros padrões das regressões (s , equação (12)) dos valores de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$, foram, na média de $\pm 4,62$ e $\pm 1,18$ mm/ano, para os períodos de 2007 a 2015 (TABELA 7) e 1992 a 2017 (TABELA 8), respectivamente. Este fato demonstra que o emprego de séries temporais mais longas de dados de altimetria por satélite (SSH), permite resultados mais consistentes para quantificar a variação do nível do mar. Também verificou-se valores menores de s médio associados a $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ obtidos de séries temporais mais longas, ou seja, obteve-se erros de $\pm 4,23$ e $\pm 1,88$ mm/ano para os períodos de 2007 a 2015 (TABELA 7) e 2002 a 2015 (TABELA 8), respectivamente.

TABELA 8 – RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS PARA INTERVALOS DE TEMPOS DISTINTOS

Posição central da célula	r 2002 – 2015	$Dist_{SSH_EMMIMB}$ (km)	$\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ 1992 – 2017 mm/ano	$\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ 2002 – 2015 mm/ano	$\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ mm/ano	$T_{Up-GNSS}$ 2007 – 2019 mm/ano
26°19'32,16"S 46°29'59,04"W	0,71	299,88	2,10 ± 1,30	5,42 ± 1,88	-3,32 ± 2,29	-0,66 ± 0,03
26°26'47,87"S 46°33'26,58"W	0,71	286,36	2,88 ± 1,30	5,42 ± 1,88	-2,54 ± 2,29	-0,66 ± 0,03
26°43'56,52"S 46°41'40,09"W	0,70	254,86	2,58 ± 0,99	5,42 ± 1,88	-2,84 ± 2,12	-0,66 ± 0,03
26°23'12,63"S 46°31'44,28"W	0,69	293,02	3,02 ± 1,07	5,42 ± 1,88	-2,40 ± 2,16	-0,66 ± 0,03
26°33'49,55"S 46°36'48,71"W	0,69	273,36	1,76 ± 1,04	5,42 ± 1,88	-3,66 ± 2,15	-0,66 ± 0,03
26°36'55,76"S 46°38'17,48"W	0,69	267,66	1,66 ± 1,26	5,42 ± 1,88	-3,76 ± 2,26	-0,66 ± 0,03
27°4'56,49"S 46°51'47,90"W	0,69	217,50	2,63 ± 0,94	5,42 ± 1,88	-2,79 ± 2,10	-0,66 ± 0,03
26°47'40,33"S 46°43'26,80"W	0,69	248,13	3,88 ± 1,22	5,42 ± 1,88	-1,54 ± 2,24	-0,66 ± 0,03
26°40'14,45"S 46°39'52,73"W	0,69	261,61	1,69 ± 1,24	5,42 ± 1,88	-3,73 ± 2,25	-0,66 ± 0,03
26°30'24,37"S 46°35'10,08"W	0,69	279,67	3,01 ± 1,28	5,42 ± 1,88	-2,41 ± 2,27	-0,66 ± 0,03
27°8'28,27"S 46°53'29,63"W	0,69	211,41	2,62 ± 1,16	5,42 ± 1,88	-2,80 ± 2,21	-0,66 ± 0,03
27°18'36,51"S 46°58'25,95"W	0,69	194,24	1,43 ± 0,91	5,42 ± 1,88	-3,99 ± 2,09	-0,66 ± 0,03
27°22'11,47"S 47°00'10,84"W	0,68	188,33	1,96 ± 0,90	5,42 ± 1,88	-3,46 ± 2,08	-0,66 ± 0,03
26°51'15,74"S 46°45'10,52"W	0,68	241,67	2,14 ± 1,22	5,42 ± 1,88	-3,28 ± 2,24	-0,66 ± 0,03
28°00'36,24"S 47°19'01,13"W	0,68	133,30	3,61 ± 1,76	5,42 ± 1,88	-1,81 ± 2,57	-0,66 ± 0,03
Média	0,69	243,40	2,53 ± 1,18	5,42 ± 1,88	-2,96 ± 2,22	-0,66 ± 0,03

FONTE: O autor (2020)

Todos os valores de $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ apresentados nas TABELAS 7 e 8, têm sinal negativo, e, portanto, os valores de $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ foram maiores do que a $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$. Uma análise do nível médio do mar nas estações da RMPG, entre 2001 e 2015, realizada pelo IBGE, constatou um efeito sistemático nos dados maregráficos em função da deriva dos sensores maregráficos ou deriva instrumental na EMMIMB (IBGE, 2016). Além disso, os valores de $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ foram maiores para o período de 2007 a 2015 em relação aos valores de $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ para o período de 2002 a 2015 e de 1992 a 2015, respectivamente, caracterizando, assim, uma aceleração da elevação do nível do mar com o decorrer dos anos.

Os valores de p apresentados nas TABELAS 9 e 10, derivados do Teste t de *Student*, analisam se ocorre uma relação linear entre a variável explicativa (tempo) e a variável de resposta (nível do mar), de modo que, o modelo de regressão linear possa representar a variação temporal do nível do mar. Para isto, foi empregado o intervalo de confiança de 95%, que é o mais comum empregado pela literatura. Os valores com a cor vermelha representam a não rejeição da hipótese nula (valor de $p > 0,05$) e os outros valores a rejeição da hipótese

nula (valor de $p \leq 0,05$), o que implica que não há e que há relação linear entre as variáveis explicativa e a de resposta, respectivamente, considerando o intervalo de confiança de 95%. No entanto, destaca-se que os valores vermelhos (acima de 0,05) também apresentam uma relação linear, como por exemplo, o valor de 0,06 significa que há uma probabilidade de 6% do modelo de regressão linear não ser o adequado para representar a variação do nível do mar no tempo em Imbituba-SC. Para a $\hat{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e a $T_{Up-GNSS}$ de todos os períodos analisados, a hipótese nula foi rejeitada, conforme pode ser visto nas TABELAS 9 e 10, o que implica em uma adequação do modelo de regressão linear às variações do nível do mar em Imbituba-SC.

Em relação aos valores de p determinados a partir dos dados altimétricos, houve um maior número de células com o valor de $p \leq 0,05$ na estimação de $\hat{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ para o período de 1992 a 2017 (TABELA 10) em relação ao período de 2007 a 2015 (TABELA 9). Desse modo, a variação do nível do mar em Imbituba-SC tende seguir uma linearidade maior ao longo do tempo quando se emprega séries temporais mais longas.

TABELA 9 – VALORES DE P OBTIDOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS ENTRE SETEMBRO DE 2007 A DEZEMBRO DE 2015

Posição central da célula	r 2002 – 2015	$Dist_{SSH_EMMIMB}$ (km)	valor de p $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ 2007 – 2015	valor de p $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ 2007 – 2015	valor de p $T_{Up-GNSS}$ 2007 – 2015
26°19'32,16"S	0,71	299,88	0,60	0,05	≈ 0
46°29'59,04"W					
26°26'47,87"S	0,71	286,36	0,11	0,05	≈ 0
46°33'26,58"W					
26°43'56,52"S	0,70	254,86	0,08	0,05	≈ 0
46°41'40,09"W					
26°23'12,63"S	0,69	293,02	0,19	0,05	≈ 0
46°31'44,28"W					
26°33'49,55"S	0,69	273,36	0,58	0,05	≈ 0
46°36'48,71"W					
26°36'55,76"S	0,69	267,66	0,53	0,05	≈ 0
46°38'17,48"W					
27°4'56,49"S	0,69	217,50	0,02	0,05	≈ 0
46°51'47,90"W					
26°47'40,33"S	0,69	248,13	0,03	0,05	≈ 0
46°43'26,80"W					
26°40'14,45"S	0,69	261,61	0,53	0,05	≈ 0
46°39'52,73"W					
26°30'24,37"S	0,69	279,67	0,12	0,05	≈ 0
46°35'10,08"W					
27°8'28,27"S	0,69	211,41	0,55	0,05	≈ 0
46°53'29,63"W					
27°18'36,51"S	0,69	194,24	0,90	0,05	≈ 0
46°58'25,95"W					
27°22'11,47"S	0,68	188,33	0,06	0,05	≈ 0
47°00'10,84"W					
26°51'15,74"S	0,68	241,67	0,42	0,05	≈ 0
46°45'10,52"W					
28°00'36,24"S	0,68	133,30	0,07	0,05	≈ 0
47°19'01,13"W					

FONTE: O autor (2020)

TABELA 10 – VALORES DE P OBTIDOS DA REGRESSÃO LINEAR DOS DADOS MAREGRÁFICOS, DE SHH E DE GNSS PARA INTERVALOS DE TEMPOS DISTINTOS

Posição central da célula	r 2002 – 2015	$Dist_{SSH_EMMIMB}$ (km)	valor de p $\hat{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ 1992 – 2017	valor de p $\hat{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ 2002 – 2015	valor de p $T_{Up-GNSS}$ 2007 – 2019
26°19'32,16"S 46°29'59,04"W	0,71	299,88	0,12	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°26'47,87"S 46°33'26,58"W	0,71	286,36	0,03	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°43'56,52"S 46°41'40,09"W	0,70	254,86	0,01	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°23'12,63"S 46°31'44,28"W	0,69	293,02	0,01	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°33'49,55"S 46°36'48,71"W	0,69	273,36	0,05	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°36'55,76"S 46°38'17,48"W	0,69	267,66	0,19	$\simeq 0$	$\simeq 0$
27°4'56,49"S 46°51'47,90"W	0,69	217,50	0,01	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°47'40,33"S 46°43'26,80"W	0,69	248,13	$\simeq 0$	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°40'14,45"S 46°39'52,73"W	0,69	261,61	0,17	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°30'24,37"S 46°35'10,08"W	0,69	279,67	0,02	$\simeq 0$	$\simeq 0$
27°8'28,27"S 46°53'29,63"W	0,69	211,41	0,02	$\simeq 0$	$\simeq 0$
27°18'36,51"S 46°58'25,95"W	0,69	194,24	0,12	$\simeq 0$	$\simeq 0$
27°22'11,47"S 47°00'10,84"W	0,68	188,33	0,04	$\simeq 0$	$\simeq 0$
26°51'15,74"S 46°45'10,52"W	0,68	241,67	0,08	$\simeq 0$	$\simeq 0$
28°00'36,24"S 47°19'01,13"W	0,68	133,30	0,03	$\simeq 0$	$\simeq 0$

FONTE: O autor (2020)

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo visou a combinação de dados maregráficos e de altimetria por satélite para a determinação de movimentos verticais da crosta e a análise da variação do nível médio do mar no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba.

Inicialmente, foram abordados o potencial da Geodésia para o monitoramento das variações temporais e espaciais e a compreensão da dinâmica do sistema Terra. Além disso, elencou-se, brevemente, a evolução, o princípio de funcionamento das principais técnicas de observação do nível do mar empregadas pela Geodésia.

Foi desenvolvida uma aplicação em linguagem *Python* para aquisição e tratamento preliminar dos dados maregráficos. As lacunas de dados maregráficos foram preenchidas a partir de MSs produzidas pela função *Tidem*, que se apresentaram como boa alternativa para o preenchimento de lacunas, pois, estas apresentam boa consistência e correlação moderada com as observações maregráficas. A atenuação de altas frequências observadas nas MSs é resultante do emprego de oscilações periódicas de 69 constituintes harmônicas que limitam a rugosidade da superfície do mar ocasionadas em função de efeitos astronômicos e de águas rasas, principalmente, sobre regiões costeiras. Este fato não prejudica a análise da variação do nível médio do mar, uma vez que, altas frequências são indesejadas.

As correções atmosféricas de altas e baixas frequências provindas do modelo DAC, aplicadas aos dados maregráficos, proporcionaram melhores valores de r nas células localizadas mais próximas do marégrafo de Imbituba-SC. A correção DAC proporcionou um incremento no número de células com o valor de r acima de 0,60. No entanto, a remoção da correção dos efeitos de marés contidas nos dados de SSH foi responsável pelos maiores incrementos do valor de r .

Uma das condições para a determinação do coeficiente de correlação de *Pearson* entre os dados maregráficos e os dados de SSH é que ambas as séries devem ter a mesma resolução temporal. Desse modo, a função *resample*, contida no pacote *signal* e disponível para a linguagem em R, mostrou-se bastante eficiente e versátil na reamostragem dos dados maregráficos, observados a cada cinco minutos, para a resolução temporal dos satélites altimétricos de 9,91564 dias.

A análise de movimentos verticais da crosta foi realizada por meio de 15 células que obtiveram os melhores valores de r em relação aos dados maregráficos da EMMIMB. Constatou-se um r médio de 0,69 e que as 15 células se localizaram ao longo do passe 0163 a uma distância média de 234,40 km da localização da EMMIMB, sendo que, estas células não foram as mais próximas da EMMIMB. Destaca-se que não foi realizado a extrapolação das células até a costa e nem a correção de erros de deriva instrumental contidos nas observações maregráficas.

Os valores médios de $\dot{\delta}_U(\varphi, \lambda)$ para o período de 2007 a 2015 e para períodos distintos ($\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (1992-2017) – $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2002-2015)) foram de $-5,93 \pm 6,26$ mm/ano e $-2,96 \pm 2,22$ mm/ano. Os valores médios de $T_{Up-GNSS}$ também foram negativos em todos os períodos analisados. Desse modo, os sinais negativos indicam que o movimento vertical da crosta na região da EMMIMB é no sentido descendente (subsidência).

O RMSE dos resíduos para $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ entre 2002 e 2015 e entre 2007 e 2015 apresentaram os valores de 167,06 mm e 175,31 mm, respectivamente, enquanto que o RMSE dos resíduos para $T_{Up-GNSS}$ apresentaram os valores de 6,83 mm e 6,68 mm para o período entre 2007 e 2019 e 2007 e 2015, respectivamente. Desse modo, percebe-se que o valor do RMSE apresenta uma maior variabilidade em função do período de duração da série de dados maregráficos do que da série de solução GNSS (componente vertical) em Imbituba-SC. Outro indicador estatístico para avaliar a qualidade do modelo de regressão linear, o valor de p, apresentou valores $\leq 0,05$ para todos os períodos das $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ e $T_{Up-GNSS}$. Para a $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$, observou-se um maior número de células com valores $\leq 0,05$ para o período de 1992 a 2017 em relação ao período de 2007 a 2015.

Em relação a variação do nível médio do mar, observa-se que os valores médios de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (1992-2017), $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2002-2015) foram de $2,53 \pm 1,18$ e $5,42 \pm 1,88$ mm/ano, respectivamente, enquanto que os valores médios de $\dot{\delta}_A(\varphi, \lambda)$ (2007-2015) e de $\dot{\delta}_{TG}(\varphi, \lambda)_{EMMIMB}$ (2007-2015) foram de $7,10 \pm 4,62$ e $12,97 \pm 4,23$ mm/ano, respectivamente, indicando, desse modo, uma possível aceleração do aumento do nível do mar em Imbituba-SC com o decorrer dos anos. Nota-se que o emprego de séries temporais mais longas de SSH e de dados provindos da EMMIMB, permitiu reduzir o valor do erro padrão da regressão, o que proporciona uma maior proximidade da reta de regressão em relação aos dados observados.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Com base nas análises realizadas recomenda-se:

- Considerar as variações temporais e espaciais da superfície do mar entre a EMMIMB e as células;
- Pesquisar uma metodologia no sentido de reduzir os efeitos da deriva instrumental contida nos dados maregráficos da EMMIMB;
- Analisar outros marégrafos pertencentes a RMPG a fim de verificar a metodologia empregada na região do marégrafo de Imbituba-SC; e
- Analisar o uso de dados meteorológicos locais para o cálculo das correções atmosféricas aplicadas nas observações maregráficas.

REFERÊNCIAS

ABLAIN, M.; CAZENAVE, A.; VALLADEAU, G.; GUINEHUT, S. **A new assessment of the error budget of global mean sea level rate estimated by satellite altimetry over 1993–2008**. *Ocean Science*, Copernicus GmbH, v. 5, n. 2, p. 193–201, jun. 2009. DOI: 10.5194/os-5-193-2009.

ALENCAR, J. C. M. de. **DATUM ALTIMÉTRICO BRASILEIRO**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. p. 5.

ALVES, Elis Dener Lima; VECCHIA, Francisco Arthur Silva. **Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás**. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences*, Universidade Estadual de Maringá, v. 33, n. 2, dez. 2011. DOI: 10.4025/actascihumansoc.v33i2.13815.

ANDERSEN, Ole Baltazar; SCHARROO, R. Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: And Implications for Mean Sea Surface Determination. In: **COASTAL Altimetry**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, ago. 2010. cap. 5, p. 103–145.

AVISO, Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data. **MISSIONS**. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

BARNETT, TP. **The estimation of “global” sea level change: a problem of uniqueness**. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 89, n. C5, p. 7980–7988, 1984.

BASTOS, Luisa; BOS, Machiel; FERNANDES, Rui Manuel. Deformation and Tectonics: Contribution of GPS Measurements to Plate Tectonics – Overview and Recent Developments. In: **Sciences of Geodesy - I: Advances and Future Directions**. Edição: Guochang Xu. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. cap. 5, p. 155–184. DOI: 10.1007/978-3-642-11741-1_5.

BENVENISTE, Jérôme. Radar altimetry: past, present and future. In: VIGNUDELLI, Stefano; KOSTIANOV, Andrey G.; CIPOLLINI, Paolo; BENVENISTE, Jérôme. **Coastal Altimetry**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. cap. 1, p. 1–17.

BLEWITT, Geoffrey. GPS and Space-Based Geodetic Methods. In: **TREATISE on Geophysics**. EUA: Elsevier, 2007. p. 351–390. DOI: 10.1016/b978-044452748-6.00058-4.

BLEWITT, Geoffrey; HAMMOND, William C.; KREEMER, Corn e. **Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science**. *Eos*, v. 99, 2018a. DOI: 10.1029/2018EO104623.

_____. **NGL/UNR GPS Data Analysis Strategy and Products Summary**. 2018b. Disponível em: <<http://geodesy.unr.edu/gps/ngl.acn.txt>>. Acesso em: 20 maio 2020.

BOSCH, Wolfgang. **Analytical Report for Integrating Hydrodynamic and Elevation Models**. [S.l.]: EUROPEAN UNION-BRAZIL SECTOR DIALOGUES SUPPORT FACILITY.

_____. **European Experiences on Refinement, Connection, and Unification of Vertical Reference Surfaces in Coastal Zones**. [S.l.]: EUROPEAN UNION-BRAZIL SECTOR DIALOGUES SUPPORT FACILITY, jun. 2016.

BOSCH, Wolfgang; DETTMERING, D.; SCHWATKE, C. **Multi-Mission Cross-Calibration of Satellite Altimeters: Constructing a Long-Term Data Record for Global and Regional Sea Level Change Studies**. *Remote Sensing*, MDPI AG, v. 6, n. 3, p. 2255–2281, mar. 2014. DOI: 10.3390/rs6032255.

BRENNER, A. C.; KOBLINSKY, C. J.; BECKLEY, B. D. **A preliminary estimate of geoid-induced variations in repeat orbit satellite altimeter observations**. *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union (AGU), v. 95, n. C3, p. 3033, 1990. DOI: 10.1029/jc095ic03p03033.

CALLAHAN, P. S. **Ionospheric Variations Affecting Altimeter Measurements: A Brief Synopsis**. *Marine Geodesy*, Informa UK Limited, v. 8, n. 1-4, p. 249–263, jan. 1984. DOI: 10.1080/15210608409379505.

CARTWRIGHT, D. E. **Tides: A Scientific History**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999.

CASTRO, Henry D. Montecino. **AVALIA O DAS VARIA OES TEMPORAIS NOS SISTEMAS DE REFERÊNCIA VERTICAIS NA AMÉRICA DO SUL BASEADA EM OBSERVA OES GPS E GRACE**. 2018. f. 217. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CASTRO, Henry D. Montecino; FERREIRA, Vagner G.; CUEVAS, Aharon; CABRERA, Leoncio Castro; BÁEZ, Juan Carlos Soto; DE FREITAS, S lvio Rogério Correia. **Vertical deformation and sea level changes in the coast of Chile by satellite altimetry and tide gauges**. *International Journal of Remote Sensing*, Informa UK Limited, v. 38, n. 24, p. 7551–7565, fev. 2017. DOI: 10.1080/01431161.2017.1288306.

CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; LEE-LUENGFU; CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, Lee-Lueng; CAZENAVE, Anny. **Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and applications**. Boca Raton: Academic Press, 2001. cap. 1, p. 1–122.

CICVTM, Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima. **Comitê de Integração dos Componentes Verticais Terrestre e Marítima**. Comissão Nacional de Cartografia. Disponível em: <<https://www.concar.gov.br/detalheEntidades.aspx?cod=25>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

CIPOLLINI, Paolo; CALAFAT, Francisco M.; JEVREJEVA, Svetlana; MELET, Angelique; PRANDI, Pierre. **Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges**. Surveys in Geophysics, Springer Science e Business Media LLC, v. 38, n. 1, p. 33–57, nov. 2016. DOI: 10.1007/s10712-016-9392-0.

COI, Comissão Oceanográfica Intergovernamental. **Manual de Medição e Interpretação do Nível do Mar**. 14. ed. Reino Unido, 1985.

DA SILVA, Luciana Maria. **Análise da evolução temporal do datum vertical brasileiro de Imbituba**. 2017. f. 272. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DA SILVA, Luciana Maria; DE FREITAS, Sílvio Rogério Correia. ANÁLISE DA VARIACÃO TEMPORAL DO NÍVEL MÉDIO DO MAR NAS ESTAÇÕES DA RMPG. In: SYMPOSIUM SIRGAS 2014, La Paz, Bolívia.

DALAZOANA, Regiane. **Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. f. 202. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

_____. Marés Oceânicas e o Nível Médio do Mar – Abordagem Preliminar com Respeito a Fundamentação Teórica e Análise. In: SEMINÁRIO APRESENTADO PARA A DISCIPLINA GEODÉSIA MARINHA, 2003, Curitiba.

DREWES, H. **The changing objectives in geodetic research**. Zeitschrift für Geodäsie, Geo-Information und Landmanagement, v. 131, n. 5, p. 1–7, 2006.

ESA, EUROPEAN SPACE AGENCY. Disponível em: <<https://www.esa.int/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

ESCUDIER, P.; COUHERT, A.; MERCIER, F.; MALLET, A.; THIBAUT, P.; TRAN, N.; AMAROUCHE, L.; PICARD, B.; CARRERE, L.; DIBARBOURE, G.; ABLAIN, M.; RICHARD, J.; STEUNOU, N.; DUBOIS, P.; RIO, Marie-Hélène; DORANDEU, J. Satellite

Radar Altimetry: Principle, Accuracy, and Precision. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces (Earth Observation of Global Changes)**. Boca Raton, FL, (EUA): CRC Press, 2017. cap. 1.

FENOGLIO-MARC, L.; BRAITENBERG, C.; TUNINI, L. **Sea Level Variability and Trends in the Adriatic Sea in 1993–2008 from Tide Gauges and Satellite Altimetry**. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Elsevier BV, v. 40-41, p. 47–58, jan. 2012. DOI: 10.1016/j.pce.2011.05.014.

FENOGLIO-MARC, L.; SCHÖNE, T.; ILLIGNER, J.; BECKER, M.; MANURUNG, P.; KHAFID. **Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region**. Marine Geodesy, Informa UK Limited, v. 35, sup1, p. 137–150, dez. 2012. DOI: 10.1080/01490419.2012.718682.

FOREMAN, M. G. G. **Manual for tidal heights analysis and prediction**. Sidney: Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 1977.

FOREMAN, M. G. G.; NEUFELD, E.T. **Harmonic tidal analyses of long time series**. International Hydrographic Review, v. 68, jan. 1991.

FORREST, T. G.; MILLER, G. L.; ZAGAR, J. R. **SOUND PROPAGATION IN SHALLOW WATER: IMPLICATIONS FOR ACOUSTIC COMMUNICATION BY AQUATIC ANIMALS**. Bioacoustics, Informa UK Limited, v. 4, n. 4, p. 259–270, jan. 1993. DOI: 10.1080/09524622.1993.10510437.

FU, Wenxue; MA, Jianwen; CHEN, Pei; CHEN, Fang. Remote Sensing Satellites for Digital Earth. In: MANUAL of Digital Earth. Singapore: Springer Nature, nov. 2019. p. 55–123. DOI: 10.1007/978-981-32-9915-3_3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9915-3_3>.

GARCIA, F.; VIGO, M. I.; GARCIA-GARCIA, D.; SÁNCHEZ-REALES, J. M. **Combination of Multisatellite Altimetry and Tide Gauge Data for Determining Vertical Crustal Movements along Northern Mediterranean Coast**. Pure and Applied Geophysics, Springer Science e Business Media LLC, v. 169, n. 8, p. 1411–1423, set. 2011. DOI: 10.1007/s00024-011-0400-5.

GEMAEL, C. **Introducao a Geodesia Fisica**. Curitiba: UFPR, 1999.

_____. **Marés Terrestres: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Curso de Pós- Graduação em Ciências Geodésicas, 1986. p. 80.

GGOS, Global Geodetic Observing System. **Global Geodetic Observing System**. Disponível em: <<http://www.ggos.org>>. Acesso em: 11 ago. 2019.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. Wien New York: Wien-New York, 2006.

IAG, International Association of Geodesy. **Definition and Realization of an International Height Reference System (IHR)**. Prague, Czech Republic: [s.n.], jul. 2015. Adopted by the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly.

_____. **Description of the Global Geodetic Reference Frame**. IAG Newsletter, p. 3–6, 2016.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **Breve análise dos primeiros resultados da RMPG em 2002**. Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 2 fev. 2020.

_____. **Instruções Técnicas para Controle Geodésico de Estações Maregráficas - CGEM e sua Vinculação Vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro - SGB**. 11. ed. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Monitoramento da Variação das Coordenadas de Estações da Rede SIRGAS - 2003 a 2010**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011a. p. 47.

_____. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS 15 anos**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011b. p. 54.

_____. **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11 set. 2019.

_____. **Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul – SIRGAS. Boletim Informativo**. Rio de Janeiro: [s.n.], fev. 1998. Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/bol_005.pdf>.

IDŽANOVIĆ, Martina; OPHAUG, Vegard; ANDERSEN, Ole Baltazar. **Coastal sea level from CryoSat-2 SARIn altimetry in Norway**. *Advances in Space Research*, Elsevier BV, v. 62, n. 6, p. 1344–1357, set. 2018. DOI: 10.1016/j.asr.2017.07.043.

IHDE, J.; BARZAGHI, R.; MARTI, U.; SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; PAIL, R. **Report of the Ad-hoc Group on an International Height Reference System (IHR)**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1300913/1300913.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2019.

IHDE, J.; SÁNCHEZ, L.; BARZAGHI, R.; DREWES, H.; FOERSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; MARTI, U.; PAIL, R.; SIDERIS, M. **Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR)**. *Surveys in Geophysics*, Springer Nature, v. 38, n. 3, p. 549–570, mar. 2017. DOI: 10.1007/s10712-017-9409-3.

IMEL, D. A. **Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction**. *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union (AGU), v. 99, n. C12, p. 24895, 1994. DOI: 10.1029/94jc01869.

JOHANNESSEN, J. A.; ANDERSEN, Ole Baltazar. The High Latitude Seas and Arctic Ocean. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces (Earth Observation of Global Changes)**. Boca Raton, FL, (EUA): CRC Press, 2017. cap. 8.

JPL-NASA, JET PROPULSION LABORATORY - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Surface Water Ocean Topography Satellite Mission (SWOT)**. Disponível em: <<https://swot.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 20 jan. 2020.

JUPP, V. **The SAGE Dictionary of Social Research Methods**. [S.l.]: SAGE Publications Ltd, maio 2006. ISBN 0761962972.

KAULA, William M et al. **The terrestrial environment: solid earth and ocean physics**. NASA Contractor Report, v. 1579, 1970.

KELLEY, D. E. **Analysis of Oceanographic Data**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/oce/versions/1.1-1>>. Acesso em: 20 out. 2019.

LARSON, Kristine M; LÖFGREN, Johan S; HAAS, Rüdiger. **Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver**. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 51, n. 8, p. 1301–1310, 2013.

LIGGES, Uwe. **Signal Processing**. 2015. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/signal>>. Acesso em: 20 maio 2020.

LÖFGREN, Johan S; HAAS, Rüdiger; JOHANSSON, Jan M. **Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals**. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 47, n. 2, p. 213–220, 2011.

LU, Z.; QU, Y.; QIAO, S. **Geodesy: Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems**. Berlin Heidelberg: Springer, 2014. ISBN 9783642412448.

LUZ, R. T. **ESTRATÉGIAS PARA MODERNIZAÇÃO DA COMPONENTE VERTICAL DO SISTEMA GEODÉSICO BRASILEIRO E SUA INTEGRAÇÃO AO SIRGAS**. 2008. f. 228. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná.

LUZ, R. T.; DE FREITAS, Sívio Rogério Correia; DALAZOANA, Regiane. Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. In: VII CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA, Santiago, Chile.

LUZ, R. T.; NEVES, C. F.; DE FREITAS, Sívio Rogério Correia. **Proposição e teste de metodologia para instalação e operação de uma rede maregráfica permanente com fins geodésicos**. Proposta submetida ao Departamento de Geodésia do IBGE. 1996.

MANNUCCI, A. J.; WILSON, B. D.; YUAN, D. N.; HO, C. H.; LINDQWISTER, U. J.; RUNGE, T. F. **A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements**. Radio Science, American Geophysical Union (AGU), v. 33, n. 3, p. 565–582, maio 1998. DOI: 10.1029/97rs02707.

MARQUES, Ana Paula da Silva; JUNIOR, José Marcato; AMORIM, Amiltom; FLORES, Edilson Ferreira. **APLICAÇÃO DO INTERPOLADOR KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA A ELABORAÇÃO DE PLANTA DE VALORES GENÉRICOS**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, n. 2, 2012.

MARTIN-NEIRA, Manuel et al. **A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry**. ESA journal, v. 17, n. 4, p. 331–355, 1993.

MARTIN-NEIRA, Manuel; CAPARRINI, Marco; FONT-ROSSELLO, J; LANNELONGUE, Stephane; VALLMITJANA, C Serra. **The PARIS concept: An experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals**. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, IEEE, v. 39, n. 1, p. 142–150, 2001.

MITCHUM, G. T. **Monitoring the Stability of Satellite Altimeters with Tide Gauges**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, American Meteorological Society, v. 15, n. 3, p. 721–730, jun. 1998. DOI: 10.1175/1520-0426(1998)015<0721:mtsosa>2.0.co;2.

MOORE, D. S. **Basic Practice of Statistics, 5th Edition**. New York: W. H. Freeman e Company, 2010.

MORAY, R. **Considerations and enquiries concerning tides, by Sir Robert Moray likewise for a further search into Dr. Wallis's newly publish't hypothesis.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London, The Royal Society, v. 1, n. 17, p. 298–301, maio 1665. DOI: 10.1098/rstl.1665.0113.

NEREM, R. S.; ABLAIN, M.; CAZENAVE, A.; CHURCH, J.; LEULIETTE, E. A 25-Year Satellite Altimetry-Based Global Mean Sea Level Record: Closure of the Sea Level Budget and Missing Components. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces (Earth Observation of Global Changes)**. Boca Raton, FL, (EUA): CRC Press, 2017. cap. 5.

NEREM, R. S.; MITCHUM, G. T. **Estimates of Vertical Crustal Motion Derived from Differences of TOPEX/POSEIDON and Tide Gauge Sea Level Measurements.** Geophysical Research Letters, American Geophysical Union (AGU), v. 29, n. 19, p. 40–1–40–4, out. 2002. DOI: 10.1029/2002gl015037.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. **Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones.** Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 328, n. 5985, p. 1517–1520, jun. 2010. DOI: 10.1126/science.1185782.

NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. **Tides Currents - About Harmonic Constituents.** Disponível em: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/about_harmonic_constituents.html>. Acesso em: 20 maio 2020.

PALMER, H. R. **XII. Description of a graphical registrar of tides and winds.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London, The Royal Society, v. 121, p. 209–213, jan. 1831. DOI: 10.1098/rstl.1831.0013.

PAWLOWICZ, Rich; BEARDSLEY, Bob; LENTZ, Steve. **Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE.** Computers & Geosciences, Elsevier BV, v. 28, n. 8, p. 929–937, out. 2002. DOI: 10.1016/s0098-3004(02)00013-4.

PLAG, Hans-Peter; PEARLMAN, M. (Ed.). **Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020.** Reno NV e Cambridge MA: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

PONTE, R. M.; SALSTEIN, D. A.; ROSEN, R. D. **Sea Level Response to Pressure Forcing in a Barotropic Numerical Model.** Journal of Physical Oceanography, American Meteorological Society, v. 21, n. 7, p. 1043–1057, jul. 1991. DOI: 10.1175/1520-0485(1991)021<1043:slrtpf>2.0.co;2.

PRATES, A. P. L.; GONÇALVES, M. A.; ROSA, M. R. **Panorama da Conservação dos Ecossistemas Costeiros e Marinhos no Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Biodiversidade e Florestas, Gerência de Biodiversidade Aquática e Recursos Pesqueiros, 2012. p. 152.

PSMSL, Permanent Service for Mean Sea Level. **Obtaining Tide Gauge Data**. Disponível em: <<https://www.psmsl.org/>>. Acesso em: 20 set. 2019.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. Swindon: John Wiley Sons, 1987. p. 472.

PUGH, D. T.; WOODWORTH, P. **Sea Level Science**. Liverpool: Cambridge University Press, abr. 2014. p. 409.

RAY, Richard D.; BECKLEY, B. D.; LEMOINE, FG. **Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements**. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 45, n. 12, p. 1510–1522, 2010. DOI: 10.1016/j.asr.2010.02.020.

REIDY, M. S. **Tides of History: Ocean Science and Her Majesty's Navy**. Chicago e London: University of Chicago Press, jun. 2008. p. 405.

RODRIGUEZ, Ernesto; FERNANDEZ, Daniel Esteban; PERAL, Eva; CHEN, Curtis W.; BLESER, Jan-Willem De; WILLIAMS, Brent. **Wide-Swath Altimetry: A Review**. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces**. Boca Raton, FL, (EUA): CRC Press, out. 2017. p. 71–112. DOI: 10.1201/9781315151779-2. Disponível em: <<https://doi.org/10.1201/9781315151779-2>>.

ROUSSEL, Nicolas; RAMILLIEN, Guillaume; FRAPPART, Frédéric; DARROZES, José; GAY, Adrien; BIANCALE, Richard; STRIEBIG, Nicolas; HANQUIEZ, Vincent; BERTIN, Xavier; ALLAIN, Damien. **Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver**. *Remote sensing of Environment*, Elsevier, v. 171, p. 261–277, 2015.

SAASTAMOINEN, J. **Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites**. In: *THE Use of Artificial Satellites for Geodesy*. [S.l.]: American Geophysical Union, 1972. p. 247–251. DOI: 10.1029/gm015p0247.

SÁNCHEZ, L. **Kinematics of the SIRGAS Reference Frame**. In: *SYMPOSIUM SIRGAS2017*, Mendoza, Argentina.

SAVCENKO, Roman; BOSCH, Wolfgang. **EOT11a-empirical ocean tide model from multi-mission satellite altimetry**. DGFI Report No. 89, 2012.

SCHWATKE, C.; BOSCH, Wolfgang; SAVCENKO, R.; DETTMERING, D. OpenADB - An open database for multi-mission altimetry. In: EGU 2010. **EGU, Vienna, Austria**. Vienna, Austria: [s.n.], 2010. Poster.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Berlin: Walter De Gruyter, 2003.

SHIMAKURA, Silvia. **Interpretação do coeficiente de correlação**. Departamento de Estatística UFPR. CE003-Estatística II. 2006. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE003/notes.html>>. Acesso em: 20 mar. 2020.

SIRGAS, Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas. **Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas (SIRGAS)**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org>>. Acesso em: 7 out. 2019.

SMITH, J. **Digital audio resampling home page**. Online] <http://www-ccrma.stanford.edu/~jos/resample>, 2002.

SMITH, J.; GOSSETT, P. **A flexible sampling-rate conversion method**. In: ICASSP '84. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. New York: Institute of Electrical e Electronics Engineers, 1984.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy (De Gruyter Textbook)**. 4. ed. Berlin-Boson: Walter De Gruyter, 2012.

UNITED NATIONS. **Resolution adopted by the General Assembly on 26 February 2015: A global geodetic reference frame for sustainable development (A/RES/69/266)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–3.

WAHR, John; MOLENAAR, Mery; BRYAN, Frank. **Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE**. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, American Geophysical Union (AGU), v. 103, B12, p. 30205–30229, dez. 1998. DOI: 10.1029/98jb02844.

WICKHAM, Hadley; CHANG, Winston; HENRY, Lionel; PEDERSEN, Thomas Lin; TAKAHASHI, Kohske; WILKE, Claus; WOO, Kara; YUTANI, Hiroaki; DUNNINGTON, Dewey. **Package 'ggplot2'**. [S.l.], 2020. (Technical Report). Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2020.