



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM EM CIÊNCIAS  
DA TERRA E DO AMBIENTE  
Doutorado em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente

Tese de doutorado

Modelagem Espaço Temporal de Variáveis  
Altimétricas e Climatológicas em Estações  
Maregráficas do Litoral Brasileiro: Uma Abordagem  
Estatística e Computacional

Apresentada por: Nilton de Souza Ribas Júnior  
Orientador: Aloísio Machado da Silva Filho

Novembro de 2025

Nilton de Souza Ribas Júnior

**Modelagem Espaço Temporal de Variáveis  
Altimétricas e Climatológicas em Estações  
Maregráficas do Litoral Brasileiro: Uma Abordagem  
Estatística e Computacional**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, como requisito parcial para a obtenção do título de **Doutor em Ciências Ambientais**.

Área de conhecimento: Estudos Ambientais e Geotecnologias

Orientador: Dr. Aloísio Machado da Silva Filho

*UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA*

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteado - UEFS

R365m

Ribas Júnior, Nilton de Souza

Modelagem espaço temporal de variáveis altimétricas e climatológicas em estações maregráficas do litoral brasileiro: uma abordagem estatística e computacional / Nilton de Souza Ribas Júnior. – 2025.

162 f.: il.

Orientador: Aloísio Machado da Silva Filho

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente, Feira de Santana, 2025.

1.Séries temporais. 2.Dados meteorológicos. 3.Variáveis climatológicas. 4.Estações maregráficas. 5.Nível médio do mar. 6.Litoral brasileiro. I. Silva Filho, Alísio Machado da, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU 519.2

---

## Nota sobre o estilo do PPGM-UEFS

---

Esta tese de doutorado foi elaborada considerando as normas de estilo propostas e aprovadas pelo colegiado do Programa de Pós-graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente e estão disponíveis no formato eletrônico (<http://ppgm.uefs.br/banco-de-dissertacoes>) ou no formato impresso para consulta.

**Nilton de Souza Ribas Júnior**

## **Modelagem Espaço Temporal de Variáveis Altimétricas e Climatológicas em Estações Maregráficas do Litoral Brasileiro: Uma Abordagem Estatística e Computacional**


Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Orientação: Prof. Dr. Aloisio Machado da Silva Filho (UEFS)

Linha de Pesquisa: Estudos Ambientais e Geotecnologias.

**Data de aprovação: 28 de novembro de 2025.**

### **BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente  
 **ALOISIO MACHADO DA SILVA FILHO**  
Data: 02/12/2025 12:25:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Aloisio Machado da Silva Filho  
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS




---

Prof. Dr. Neilon Duarte da Silva  
Instituto Federal do Pará- IFPA




---

Prof. Dr. Elmo Leonardo Xavier Tanajura  
Universidade Federal da Bahia-UFBA

Documento assinado digitalmente  
 **WILLIAN MOURA DE AGUIAR**  
Data: 02/12/2025 21:14:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Willian Moura de Aguiar  
Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS

Documento assinado digitalmente  
 **RODRIGO NOGUEIRA DE VASCONCELOS**  
Data: 03/12/2025 21:33:56-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof Dr. Rodrigo Nogueira de Vasconcelos  
Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS

*”As nuvens não são esferas, as montanhas não são cones, as linhas costeiras não são círculos e a casca de uma árvore não é suave, nem os relâmpagos se propagam em linha reta”*

Benoit Mandelbrot

*”O nível do mar não sobe em degraus e nem respeita previsões lineares. Ele sobe enquanto medimos e enquanto negligenciamos. Cada centímetro é uma consequência, cada maré alta, um aviso ignorado. O oceano não negocia — responde”*

O Autor

---

## Agradecimentos

---

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço a Deus por me dar saúde e disposição em todos os dias de minha vida;

Ao PPGM por me proporcionar mais esta realização, em especial aos professores em que tive a oportunidade de assistir as suas aulas/apresentações, a citar: Profa. Joselisa Chaves, Profa. Marjorie Nolasco, Prof. José Garcia, Prof. Willian Aguiar, Prof. Rodrigo Vasconcelos, Prof. Gilney Zebende e Prof. Aloísio Machado;

A turma I do doutorado (Evaldo, João Paulo, Joelande, Mahysa, Paula Porto, Basílio, Fernando Ribeiro, Danilo, Iara Costa, Jailza, Paula Rios e Paulo Tadeu) pelo laço de amizade e companheirismo que se formou entre todos e as trocas de experiências mútuas;

Ao colega João Paulo, primeiro doutor do PPGM, por ter me proporcionado conhecer o  $\text{\LaTeX}$  e poder aplicá-lo nesta tese;

Ao Prof. Dr. Aloísio Machado da Silva Filho, não só pela orientação, mas por ter sido um grande parceiro e incentivador desde o início, que acreditou e hoje vê essa conquista sendo realizada;

A UFPE, que proporcionou minha graduação em engenharia cartográfica, primeiro passo para chegar até aqui, fruto da dedicação de grandes mestres, como o Prof. Adeildo Antão, Prof. Jaime Mendonça, Prof. Héber Compasso (*in memoriam*), Prof. Admilson Pacheco, Prof. Shuller, Prof. Tarcísio, Profa. Andrea Carneiro, Profa. Lucilene Antunes (minha primeira orientadora de estágio científico), Profa. Ana Lúcia, Profa. Verônia Romão, Prof. Luiz Portugal, Prof. Ernesto Gurgel, entre tantos outros;

Ao IBGE, instituição que tenho o prazer em trabalhar desde 2002 exatamente na área em que me formei, em especial a Coordenação de Geodésia que fornece gratuitamente as séries temporais das estações maregráficas por meio da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia, com os devidos créditos aos engenheiros Roberto Luz, Salomão Soares e Everton Gomes, mas também aqueles que lutam diariamente pela manutenção e operacionalidade das estações da RBMC, com os créditos aos engenheiros Sônia Costa e Guiderlan Mantovani;

---

A Superintendência Estadual do IBGE na Bahia, em especial aos colegas da Gerência de Geodésia e Cartografia, que com muita dedicação e profissionalismo, executam desde 2002 todas as observações de campo no complexo maregráfico e consegue, com todas as dificuldades do serviço público, manter as estações maregráficas e GNSS ativas. São eles: Hildeberto Biserra (aposentado), Antônio Lúcio (aposentado), José Rocha (*in memorian*), José Ernesto (*in memorian*), José Mira (*in memorian*), Paulo Cesar (*in memorian*), Domingos Lima (*in memorian*), Sérgio Carvalho (aposentado), José Santos (aposentado), Francisco Costa (aposentado), Luiz Valois, Florisvaldo dos Santos, Antônio Eli, Lucas Coneglian (ex servidor), Gabriel Mota, e os engenheiros Dionísio Júnior e Márcio Bonifácio. Este último, além de amigo e compadre, me incentivou a fazer pós-graduação e se comprometeu a se aposentar só depois que eu concluísse, sendo o meu braço direito nas atividades técnicas e administrativas da GGC-BA. Agradeço também a todos os APMs atuais e os que já passaram pela GGC, sendo fundamentais no reforço para as atividades de campo;

Aos meus pais, Nilton e Neusa, as minhas irmãs Nívea, Nilza e Nilma, que torcem por mim sempre;

Aos meus filhos, João Victor e Matheus Henrique, meu orgulho e motivação para buscar sempre a auto superação;

A minha esposa, Anne Danielle, companheira e parceira de mais de 30 anos juntos, faltam palavras para agradecer todo o seu carinho, atenção, dedicação, incentivo e compreensão. Sem ela não sou ninguém;

A todos que fizeram parte desta caminhada, seja direta ou indiretamente, meu muitíssimo obrigado.

Feira de Santana, BA, Brasil  
28 de Novembro de 2025

Nilton de Souza Ribas Júnior

---

## Resumo

---

Esta tese tem como objetivo geral modelar e analisar a dinâmica temporal e pontual do nível médio do mar (NMM) e demais variáveis altimétricas e climatológicas (precipitação e temperatura do ar) das estações maregráficas do litoral brasileiro no período de 2002 a 2023, visando identificar e quantificar a influência de forças não oceânicas que possam mascarar as verdadeiras variações marinhas. A pesquisa iniciou com uma análise bibliométrica abrangente de 35 artigos científicos entre 2009-2021, que revelou a França, Estados Unidos e China como os países mais influentes na temática. Em seguida, foi empregada uma abordagem estatística e computacional inovadora baseada em métodos robustos para séries temporais não estacionárias. Foram analisadas séries temporais de sete estações maregráficas da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia (RMPG) geridas pelo IBGE (Santana/AP, Fortaleza/CE, Salvador/BA, Arraial do Cabo/RJ, Imbituba/SC e Macaé/RJ-descontinuada em 2015). A metodologia incluiu a aplicação da *Detrended Fluctuation Analysis* (DFA) para avaliar a persistência de longo prazo, os coeficientes *Detrended Cross-Correlation Analysis* ( $\rho$ DCCA) e *Detrended Multiple Cross-Correlation* ( $DMC_x^2$ ) para quantificar correlações bivariadas e multivariadas, respectivamente, e a entropia (*FastApEn*) para mensurar o grau de previsibilidade das séries. Os principais resultados revelaram um comportamento persistente ( $\alpha > 0,5$ ) na maioria das estações, indicando memória de longo alcance nas séries temporais do NMM. A correlação com a altimetria GNSS, empregada na estimativa dos movimentos verticais da Terra, internacionalmente conhecido como *Vertical Land Motion* (VLM), foi a mais forte e estável, especialmente em Salvador e Santana, sugerindo uma relação direta com os movimentos verticais da crosta terrestre. Em contraste, a precipitação apresentou correlações mais fracas e flutuantes, enquanto a temperatura do ar exibiu padrões de correlação positiva persistentes, consistentes com o efeito de expansão térmica. A análise de entropia identificou que as estações de Fortaleza e Arraial do Cabo possuem séries mais regulares e previsíveis, enquanto Macaé e Imbituba exibiram um comportamento mais caótico. A abordagem com janelas deslizantes permitiu detectar dinamicamente padrões de sazonalidade anual e a influência de fenômenos climáticos de larga escala, como o El Niño e La Niña. Conclui-se que fatores não oceânicos exercem influência significativa e regionalmente diferenciada nas variações do NMM no litoral brasileiro, demonstrando a eficácia da metodologia proposta para a modelagem integrada do nível do mar, fornecendo subsídios vitais para o planejamento costeiro, a gestão de riscos associados às mudanças climáticas e a atualização de referenciais altimétricos, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em particular com o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

**Palavras Chaves:** Nível Médio do Mar, Dados meteorológicos, Séries Temporais.

---

## Abstract

---

This thesis aims to model and analyze the temporal and pointwise dynamics of mean sea level (MSL) and other altimetric and climatological variables (precipitation and air temperature) from tide gauge stations along the Brazilian coast from 2002 to 2023, seeking to identify and quantify the influence of non-oceanic forces that may mask true marine variations. The research began with a comprehensive bibliometric analysis of 35 scientific articles between 2009-2021, which revealed France, the United States, and China as the most influential countries in the theme. Subsequently, an innovative statistical and computational approach based on robust methods for non-stationary time series was employed. Time series from seven tide gauge stations of the Permanent Tide Gauge Network for Geodesy (RMPG) managed by IBGE (Santana/AP, Belém/PA, Fortaleza/CE, Salvador/BA, Arraial do Cabo/RJ, Imbituba/SC, and Macaé/RJ-discontinued in 2015) were analyzed. The methodology included the application of Detrended Fluctuation Analysis (DFA) to assess long-term persistence, Detrended Cross-Correlation Analysis ( $\rho$ DCCA) and Detrended Multiple Cross-Correlation (DMC) coefficients to quantify bivariate and multivariate correlations, respectively, and entropy (FastApEn) to measure the degree of predictability of the time series. The main results revealed persistent behavior ( $\alpha > 0.5$ ) at most stations, indicating long-range memory in MSL time series. The correlation with GNSS altimetry, used in the estimation of the Earth's vertical motions, internationally known as Vertical Land Motion (VLM), proved to be the strongest and most stable, especially in Salvador and Santana, suggesting a direct relationship with vertical crustal movements. In contrast, precipitation showed weaker and more fluctuating correlations, while air temperature exhibited persistent patterns of positive correlation, consistent with the thermal expansion effect. Entropy analysis identified that Fortaleza and Arraial do Cabo stations have more regular and predictable series, while Macaé and Imbituba exhibited more chaotic behavior. The sliding windows approach allowed for the dynamic detection of annual seasonality patterns and the influence of large-scale climate phenomena such as El Niño and La Niña. It is concluded that non-oceanic factors exert a significant and regionally differentiated influence on MSL variations along the Brazilian coast, demonstrating the effectiveness of the proposed methodology for integrated sea level modeling, providing vital support for coastal planning, the management of risks associated with climate change, and the updating of altimetric references, aligning with the Sustainable Development Goals, particularly SDG 13 (Climate Action).

**Keywords:** Mean Sea Level, Weather Data, Time Series.

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Problema de Pesquisa . . . . .	3
1.1.1	Perguntas de Investigação . . . . .	3
1.1.2	Hipótese de Estudo . . . . .	4
1.2	Objetivos . . . . .	4
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	4
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	4
1.3	Estrutura da Tese . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1	Nível do Mar . . . . .	6
2.1.1	Conceitos e variabilidades do Nível do Mar . . . . .	6
2.1.2	Níveis de Referência . . . . .	9
2.1.3	Redes Altimétricas e Maregráficas . . . . .	12
2.1.3.1	Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) . . . . .	12
2.1.3.2	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) . . . . .	14
2.1.4	O Nível do Mar no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS . . . . .	18
2.2	Rede de Referência por Satélite . . . . .	21
2.2.1	Constelações GNSS . . . . .	22
2.2.1.1	GPS - <i>Global Position System</i> . . . . .	22
2.2.1.2	GLONASS - <i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i> . . . . .	25
2.2.1.3	GALILEO - <i>European Global Navigation Satellite System</i> . . . . .	27
2.2.1.4	BEIDOU - <i>Chinese Global Navigation Satellite System</i> . . . . .	29
2.2.2	RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS . . . . .	31
2.3	Métodos Estatísticos . . . . .	34
2.3.1	Séries temporais . . . . .	34
2.3.2	Previsibilidade em séries temporais . . . . .	35
2.3.3	Estacionariedade em séries temporais . . . . .	37
2.3.4	<i>Detrended Fluctuation Analysis</i> (DFA) . . . . .	39
2.3.4.1	DFA com janelas deslizantes . . . . .	41
2.3.5	<i>Detrended Cross-Correlation Analysis</i> (DCCA) . . . . .	42
2.3.6	<i>Detrended Cross-Correlation Coefficient</i> ( $\rho$ DCCA) . . . . .	43
2.3.7	<i>Detrended Multiple Cross-Correlation</i> ( $DMC_x^2$ ) . . . . .	44
2.3.7.1	$DMC_x^2$ com janelas deslizantes . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>48</b>
3.1	Análise bibliométrica do nível do mar . . . . .	49
3.1.1	Introdução . . . . .	50
3.1.2	Materiais e Métodos . . . . .	52
3.1.2.1	Métodos . . . . .	52
3.1.2.2	Critérios de Seleção . . . . .	52
3.1.3	Resultados e Discussões . . . . .	54
3.1.3.1	Visão Geral . . . . .	54

3.1.3.2	Principais Países . . . . .	55
3.1.3.3	Palavras-Chave . . . . .	56
3.1.3.4	Periódicos mais relevantes . . . . .	58
3.1.3.5	Instituições de destaque – país de origem . . . . .	60
3.1.3.6	Autores . . . . .	61
3.1.4	Relações entre artigos . . . . .	63
3.1.5	Conclusões . . . . .	65
3.2	O Nível do Mar no Litoral Brasileiro: Uma Abordagem com Janelas Deslizantes . . . . .	66
3.2.1	Introdução . . . . .	67
3.2.2	Metodologia . . . . .	69
3.2.2.1	Área de estudo . . . . .	69
3.2.2.2	Dados . . . . .	71
3.2.2.3	Métodos . . . . .	72
3.2.3	Resultados e Discussões . . . . .	75
3.2.3.1	Análise Exploratória dos Dados . . . . .	75
3.2.3.2	Análise pelas janelas deslizantes . . . . .	77
3.2.4	Conclusões . . . . .	80
3.3	Forças não oceânicas e nível do mar no Brasil . . . . .	81
3.3.1	Introdução . . . . .	83
3.3.2	Métodos . . . . .	86
3.3.2.1	Área de Estudo . . . . .	86
3.3.2.2	Tratamento dos Dados . . . . .	87
3.3.2.3	Métodos Estatísticos . . . . .	90
3.3.3	Resultados . . . . .	95
3.3.3.1	Análise Exploratória dos Dados . . . . .	95
3.3.3.2	Entropia . . . . .	98
3.3.3.3	Coefficiente de Correlação Cruzada . . . . .	100
3.3.3.4	Detrended Multiple Cross-Correlation . . . . .	103
3.3.4	Discussões . . . . .	105
3.3.4.1	Limitações do Estudo . . . . .	108
3.3.5	Conclusões . . . . .	110
<b>4</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>112</b>
<b>A</b>	<b>Anexo I</b>	<b>116</b>
A.1	Array DFA . . . . .	116
A.2	$DMC_x^2$ Deslizante . . . . .	118
A.3	TS Input . . . . .	120
	<b>Referências</b>	<b>121</b>

---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Coordenadas das Estações Maregráficas . . . . .	17
2.2	Intensidade de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência . . . . .	46
3.1	Classificação dos periódicos segundo a Lei de Bradford . . . . .	60
3.2	Coordenadas das Estações Maregráficas . . . . .	71
3.3	Resumo dos dados utilizados . . . . .	72
3.4	Estatística Descritiva das Estações Maregráficas . . . . .	76
3.5	Distância aproximada entre as estações utilizadas . . . . .	89
3.6	Intensidade de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência . . . . .	93
3.7	Análise Exploratória das Séries Temporais e percentual de Imputação . . . . .	96
3.8	Entropia do Nível Médio do Mar das Estações Maregráficas do litoral brasileiro pelo método FastApEn normalizado para uma janela deslizante de 30 dias ( $w=30$ ) . . . . .	99

---

## Lista de Figuras

---

2.1	Posição relativa Sol - Lua - Terra nas 4 fases principais da Lua. Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2003) . . . . .	7
2.2	Marés de sizígia (SIZ) e quadratura (QUAD) ao longo de um mês (setembro de 2009), em Cananéia(SP). A linha azul representa o nível do mar medido e a linha vermelha representa o cálculo dos efeitos meteorológicos e de densidade no nível do mar. Fonte: (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021) . . . . .	8
2.3	Níveis médios em Imbituba: valores anuais entre 1949 e 1968, e mensais de 1957. Fonte: PSMSL, 1996 apud (IBGE, 2009) . . . . .	12
2.4	Nivelamento Geométrico Composto. Fonte: Elaborado pelo autor . . . . .	13
2.5	Especificação e exemplo de chapa altimétrica. Fonte: (IBGE, 2008) . . . . .	14
2.6	Outros modelos de RRNN encontrados no entorno da Estação Maregráfica. Fonte: Acervo IBGE . . . . .	14
2.7	Estações Maregráficas ativas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor. . . . .	16
2.8	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Fonte: Nações Unidas . . . . .	20
2.9	Boia GPS usada durante a campanha de Kerguelen. Fonte: (FUND et al., 2013). . . . .	22
2.10	Constelação GPS. Fonte: <i>U.S. Coast Guard Navigation Center</i> . . . . .	23
2.11	Segmento de controle do GPS. Fonte: GPS.GOV . . . . .	24
2.12	Configuração dos satélites GLONASS. Fonte: <a href="https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php">https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php</a> . . . . .	26
2.13	Evolução dos satélites GLONASS, de acordo com os tipos de naves espaciais: Glonass (1982-2005), Glonass-M (2003-2016), Glonass-K (2011-2018) e Glonass-K2 (a partir de 2017) Fonte: <a href="https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php">https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php</a> (Visitado em 19/10/2025) . . . . .	27
2.14	Configuração dos satélites GALILEO. Fonte: Adaptado de <a href="https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/12/Galileo_Initial_Services">https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/12/Galileo_Initial_Services</a> . . . . .	28
2.15	Segunda geração de satélites Galileo (G2). Fonte: ESA em <a href="https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/05/Galileo_Second_Generation">https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/05/Galileo_Second_Generation</a> (Visitado em 24/10/2025) . . . . .	29
2.16	Componentes do Sistema BeiDou (BDS-3). Fonte: <a href="http://Beidou Navigation Satellite System Development">Beidou Navigation Satellite System Development</a> . . . . .	30
2.17	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Fonte: IBGE . . . . .	32
2.18	Exemplo de Estação GNSS integrante a RBMC. Fonte: IBGE . . . . .	33
2.19	Representação gráfica dos passos 1, 2 e 3 do método DFA. Fonte: O autor . . . . .	40
2.20	Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o DFA para $W=1000$ . Fonte: O Autor . . . . .	42
2.21	Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o $DMC_x^2$ . Fonte: (GUEDES; FILHO; ZEBENDE, 2021) . . . . .	47
3.1	Fluxograma do processo de seleção dos artigos relacionadas ao tema nível do mar, 2009 – 2021. Fonte: Lucidchart. Nota: Elaborado pelos autores . . . . .	53

3.2	Quantidade de publicações anuais e respectivas citações relacionadas ao tema nível do mar, 2009 – 2021. Fonte: Scopus. Nota: Elaborado pelos autores . . . . .	54
3.3	Publicações por países de origem relacionadas ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny . . . . .	56
3.4	Nuvem de palavras-chave relacionadas ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny . . . . .	57
3.5	Rede de có-ocorrência de palavras-chave. Fonte: Vosviewer. Adaptado pelos autores . . . . .	58
3.6	Periódicos mais citados relacionados ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny . . . . .	59
3.7	Lei de Lotka (Distribuição de frequência da produtividade científica). Fonte: Biblioshiny . . . . .	62
3.8	Produção dos autores ao longo do tempo. Fonte: Biblioshiny . . . . .	63
3.9	Rede de có-citações entre autores. Fonte: Biblioshiny . . . . .	64
3.10	Estações Maregráficas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor . . . . .	69
3.11	Séries Originais das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor . . . . .	72
3.12	Representação gráfica dos passos 1, 2 e 3 do método DFA. Fonte: O autor	74
3.13	Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o DFA para $W=1000$ . Fonte: O Autor . . . . .	75
3.14	Média deslizante das séries temporais do nível médio do mar das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE para uma janela de 1000 dias ( $w=1000$ ). Fonte: IBGE. Nota: Dados processado pelo autor . . . . .	78
3.15	DFA deslizante das séries temporais diárias do nível mar (mínimo, máximo, mediano e médio) das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE para uma janela de 1000 dias ( $w=1000$ ). Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor . . . . .	79
3.16	Estações Maregráficas controladas pelo IBGE e objeto de estudo da pesquisa. Fonte: (JUNIOR et al., 2025) . . . . .	87
3.17	Fluxograma metodológico da análise das flutuações da série temporal do nível médio do mar (variável dependente) e das variáveis independentes (temperatura do ar, precipitação e altimetria por satélite). As etapas incluem: (1) aquisição, pré-processamento dos dados, (2) Imputação, (3) Análise exploratória das séries temporais, (4) Determinação da entropia da série do nível médio do mar (5) Aplicação dos métodos de mensuração do nível de correlação cruzada sem tendência, (6) Resultados. Fonte: Elaborado pelos autores. . . . .	88
3.18	A - Coeficiente DMC para diferentes escalas temporais de tamanho $n$ para séries temporais da EMSAL (maio/2007 a dezembro/2023) definidas pela expressão reduzida (Equação ??) e pelo método matricial (Equação 2.19). B - Diferença pelo método matricial e pela expressão reduzida. Fonte: Elaborada pelos autores. . . . .	93

3.19	Entropia da séries temporal do nível médio do mar das estacoes maregráficas do litoral brasileiro para uma janela de 30 dias ( $w=30$ ). Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas e os valores de entropia foram normalizados entre 0 e 1, sendo a linha vermelha horizontal dos gráficos correspondentes a média da entropia no período. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	98
3.20	Coefficiente $\rho_{DCCA}$ do nível médio do mar vs altimetria GNSS das estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	100
3.21	Coefficiente $\rho_{DCCA}$ do nível médio do mar vs precipitação nas estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	101
3.22	Coefficiente $\rho_{DCCA}$ do nível médio do mar vs temperatura do ar nas estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	102
3.23	$DMC_x^2$ do nível médio do mar com altimetria por gnss, precipitação e temperatura do ar. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas e o $n$ corresponde a escala temporal. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	103
3.24	Correlação múltipla sem tendência para escalas temporais específicas ( $n = 7, n = 15, n = 30$ e $n = 60$ dias) entre nível médio do mar ( $y$ ), altimetria por GNSS ( $x_1$ ), precipitação ( $x_2$ ) e temperatura do ar ( $x_3$ ) para janela de 365 dias ( $w = 365$ ). Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores . . . . .	104
A.1	Array DFA - Implementa o método DFA para uma matriz de séries temporais	116
A.2	Array DFA - Implementa o método DFA para uma matriz de séries temporais	117
A.3	DMC Deslizante - Implementa o método DMC com a abordagem das janelas deslizantes . . . . .	118
A.4	DMC Deslizante - Implementa o método DMC com a abordagem das janelas deslizantes . . . . .	119
A.5	TS Input - Implementa rotina para imputação de dados . . . . .	120

---

## Lista de Siglas

---

ApEn .....	<i>Approximate Entropy</i>
BDS .....	<i>Beidou</i>
BDSBAS .....	<i>Satellite-Based Augmentation Service</i>
BDT .....	<i>Beidou Navigation Satellite System Time</i>
BEIDOU .....	<i>Chinese Global Navigation Satellite System</i>
CCRBMC ..	<i>Centro de Controle da RBMC</i>
CDC .....	<i>Companhia Docas do Ceará</i>
CDMA .....	<i>Code Division Multiple Access</i>
CDP .....	<i>Companhia Docas do Pará</i>
CDSA .....	<i>Companhia Docas de Santana</i>
COI .....	<i>Comissão Oceanográfica Intergovernamental</i>
CNG .....	<i>Conselho Nacional de Geografia</i>
CV .....	<i>Coefficiente de variação</i>
DCCA .....	<i>Detrended Cross-Correlation Analysis</i>
DFA .....	<i>Detrended Fluctuation Analysis</i>
DHN .....	<i>Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha</i>
DMC .....	<i>Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient</i>
DNSS .....	<i>Defense Navigation Satellite System</i>
DoC .....	<i>Departamento do Comércio Americano</i>
DoD .....	<i>Departamento de Defesa Americano</i>
DoT .....	<i>Departamento de Transportes Americano</i>
DP .....	<i>Desvio padrão</i>
DVB .....	<i>Datum Vertical Brasileiro</i>
EMFOR .....	<i>Estação Maregráfica de Fortaleza</i>
EMM .....	<i>Estação Meteo-maregráfica</i>
EMMAC .....	<i>Estação Meteo-maregráfica de Macaé</i>
EMMARC ..	<i>Estação Meteo-maregráfica de Arraial do Cabo</i>
EMMBEL ..	<i>Estação Meteo-maregráfica de Belém</i>
EMMIMB ..	<i>Estação Meteo-maregráfica de Imbituba</i>
EMMSAN ..	<i>Estação Meteo-maregráfica de Santana</i>
EMSAL .....	<i>Estação Maregráfica de Salvador</i>
EPUSP .....	<i>Escola Politécnica da Universidade de São Paulo</i>
ESA .....	<i>European Space Agency</i>
EUSPA .....	<i>European Union Agency for the Space Programme</i>
FAA .....	<i>Administração Federal da Aeronáutica</i>
FastApEn ...	<i>Fast Approximate Entropy</i>
FNMA .....	<i>Fundo Nacional de Meio Ambiente</i>
GALILEO ..	<i>European Global Navigation Satellite System</i>
GCC .....	<i>Galileo Control Sensors</i>
GEO .....	<i>Órbitas Geoestacionárias</i>
GIA .....	<i>Modelo de Ajuste Isostático Global</i>
GLONASS ..	<i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i>
GLONASST ..	<i>GLONASS Time</i>
GLOSS .....	<i>Global Sea Level Observing System</i>
GNSS .....	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS .....	<i>Global Position System</i>

---

GSS .....	<i>Galileo Sensor Stations</i>
GST .....	<i>Galileo System Time</i>
IAG .....	<i>Internacional Association of Geodesy</i>
IAGS .....	<i>Inter American Geodetic Survey</i>
IBGE .....	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
ICAO .....	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IGG .....	<i>Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo</i>
IERS .....	<i>International Earth Rotation Service</i>
IGSO .....	<i>Órbitas Geossíncronas Inclinadas</i>
IHR5 .....	<i>International Height of Reference System</i>
INMET .....	<i>Instituto Nacional de Meteorologia</i>
IPCC .....	<i>Intergovernmental Pannel of Climate Change</i>
IPGH .....	<i>Instituto Pan-americano de Geografia e História</i>
ITRF .....	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
KSP5 .....	<i>Teste estatístico de estacionariedade</i>
MEO .....	<i>Medium Earth Orbits</i>
NASA .....	<i>Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica</i>
NAVSTAR ..	<i>Navigation System with Time and Ranging</i>
NGL .....	<i>Nevada Geodetic Laboratory</i>
NIMA .....	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
NMM .....	<i>Nível Médio do Mar</i>
NR .....	<i>Nível de Redução</i>
ODM .....	<i>Objetivos de Desenvolvimento do Milênio</i>
ODS .....	<i>Objetivos de Desenvolvimento Sustentável</i>
OECD .....	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
ONU .....	<i>Organização das Nações Unidas</i>
OS .....	<i>Open Service</i>
PCS .....	<i>Phase Control System</i>
PPGM .....	<i>Programa de Pós-Graduação em Modelagem em Ciências da Terra e do Ambiente</i>
PPP .....	<i>Precise Point Position Service</i>
PSMSL .....	<i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>
PTF .....	<i>Precision Time Facility</i>
QPSK .....	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAAP .....	<i>Rede Altimétrica de Alta Precisão</i>
RBMC .....	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RMPG .....	<i>Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia</i>
RRNN .....	<i>Referência de Nível</i>
RSMC .....	<i>Regional Short Message Communication Service</i>
SBPC .....	<i>Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência</i>
SGB .....	<i>Sistema Geodésico Brasileiro</i>
SGE .....	<i>Serviço Geográfico do Exército</i>
SIRGAS ....	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
TAI .....	<i>Tempo Atômico Internacional</i>
TM .....	<i>Tábua de Maré</i>
TUC .....	<i>Tempo Universal Coordenado</i>
UFPR .....	<i>Universidade Federal do Paraná</i>
UFRJ .....	<i>Universidade Federal do Rio de Janeiro</i>
UEFS .....	<i>Universidade Estadual de Feira de Santana</i>
UNDP .....	<i>Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas</i>
UNODC ....	<i>Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime</i>
USSF .....	<i>United States Space Force</i>
UTC .....	<i>Universal Time Coordinated</i>

---

VNIIFTRI... *Instituto Russo de Tempo e Frequência*

## Introdução

---

O mar sempre nos encanta com sua beleza e com o seu balé vertical rigorosamente regular, impulsionado pelas forças de atração gravitacional entre a Terra, o Sol e a Lua, principalmente. Muito embora, todo esse rigor venha sendo perturbado de uma forma cada vez mais intensa, ocasionando sua elevação em virtude de diversos fatores, o que vem preocupando os governantes e a comunidade científica de um modo geral.

Publicação de setembro de 2013 da revista *National Geographic* (FOLGER, 2013), baseado no relatório da OECD (2008) sobre as 136 maiores cidades portuárias do mundo, afirma que com o planeta mais quente, a elevação do nível dos oceanos se acentua, onde estima-se que em 2070 150 milhões de pessoas nestas cidades estariam em risco e uma riqueza avaliada em 35 trilhões de dólares ameaçados. Esse aumento do nível do mar se daria principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis pela sociedade que ao liberar na atmosfera dióxido de carbono e outros gases do efeito estufa, aqueceram a Terra em mais de meio grau Celsius ao longo do século passado, complementa a publicação.

De fato, o quinto relatório apresentado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), mostra que a expansão térmica dos oceanos e o derretimento de geleiras têm sido os contribuintes dominantes para o aumento do nível médio do mar global do século 20. Observações desde 1971 indicam que esse aumento do nível médio do mar global vai continuar para além de 2100 (CHANGE; others, 2013). Oito anos mais tarde, o IPCC publica o sexto e mais novo relatório sobre mudanças climáticas, não só confirmando as previsões do relatório anterior, mas trazendo cenários pessimistas ainda mais preocupantes (LEGG, 2021). Para o gestor do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o nível do mar tem fundamental importância na determinação do datum altimétrico oficial do país. Desde 1945, o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) é o responsável por medir e calcular as altitudes de milhares de marcos geodésicos de alta precisão implantados em todo o território nacional, sendo estas altitudes contadas a partir do nível médio do mar (NMM) dado por estações maregráficas de referência.

Estações maregráficas são uma importante fonte confiável e segura para o monitoramento do nível do mar, mas extremamente vulneráveis a problemas instrumentais e ações externas que afetam a qualidade desses dados.

Embora estudos recentes venham sendo desenvolvidos para modelagem do nível médio do mar global (TOCHO; ANTOKOLETZ; PIÑÓN, 2020); (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017); (DREWES, 2017), após publicação da IAG (*Internacional Association of Geodesy*) para

definição e realização de um sistema internacional de referência altimétrico (IHRs) que visa principalmente a integração de altitudes entre países (IAG, 2015), a presente pesquisa tem seu foco em modelos clássicos de estações maregráficas usualmente encontradas para fins de determinação do NMM.

Essas estações desempenham papel fundamental na análise das mudanças climáticas e de seus impactos, temática diretamente relacionada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um conjunto de 17 objetivos propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) como um esforço conjunto entre países, empresas, instituições e a sociedade civil, visando assegurar os direitos humanos, erradicar a pobreza, reduzir desigualdades e injustiças, promover a igualdade de gênero e o empoderamento de mulheres e meninas, agir frente às mudanças climáticas, bem como enfrentar outros dos maiores desafios da contemporaneidade.

No Brasil, existem atualmente seis estações maregráficas ativas controladas pelo IBGE e distribuídas ao longo da costa, sendo elas: Imbituba-SC, Arraial do Cabo-RJ, Salvador-BA, Fortaleza-CE, Belém-PA e Santana-AP. Adicionalmente, destaca-se a estação maregráfica de Macaé-RJ, que integrou essa rede até o ano de 2015, quando foi descontinuada, permanecendo, contudo, como uma importante fonte histórica de dados para estudos sobre a variabilidade do nível do mar no litoral sudeste brasileiro.

Contudo, desde a definição dos *data* altimétricos para o Brasil, ainda na década de 50 (ALENCAR, 1990), o nível do mar já sofreu e vem sofrendo constantes modificações. Entretanto, necessitamos analisar o que é aumento do nível do mar real e o que é aumento influenciado por outras forças de origem não oceânica, tais como: movimentos da crosta terrestre, instabilidade nas estruturas de suporte dos sensores, erros instrumentais ou até mesmo fatores de ordem climatológica, tais como temperatura e precipitação, por exemplo.

Na presente, métodos estatísticos foram utilizados para avaliar as flutuações do comportamento das séries temporais em diferentes escalas de tempo, assim como o DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) para avaliar sua memória ao longo do tempo, além da utilização do  $\rho$ DCCA (coeficiente capaz de quantificar o nível de correlação cruzada, tendo como base o DFA e o DCCA- *Detrended Cross-Correlation Analysis*). Adicionalmente, o método  $DMC_x^2$  (*Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient*), sendo uma generalização do  $\rho$ DCCA, que possibilita mensurar a correlação múltipla entre as séries maregráficas com as demais séries provenientes das redes geodésicas e climatológicas, o que pode nos ajudar a entender melhor os resultados obtidos da análise histórica de tais séries maregráficas. Também foram utilizados cálculos de entropia, os quais ajudam a compreender que a série temporal do NMM não é tão previsível e pode sofrer interferências externas, o que dificulta sua análise.

O tema é atual e relevante, visto as discussões a nível global com respeito ao assunto. [Parra, López e Franco \(2006\)](#), por exemplo, analisaram a variação do nível médio do mar no caribe colombiano, [Neto e others \(2009\)](#) estudou os impactos do aumento do nível médio do mar no nordeste brasileiro e suas consequências do ponto de vista ambiental, [Santos et al. \(2015\)](#) traçaram uma metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira, enquanto que [Albarici et al. \(2019b\)](#) modelaram os efeitos geodinâmicos que afetam as medições maregráficas e GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Já [Sampaio et al. \(2003\)](#) fizeram uma análise temporal desde a época do período terciário das possíveis consequências do avanço do nível do mar para o Brasil, entre tantos outros. Mas apesar de ter sido pesquisado, não se verificou na literatura trabalhos de monitoramento do NMM com a utilização do DFA,  $\rho$ DCCA e  $DMC_x^2$  como métodos capazes de avaliar séries temporais em regime não estacionário para diferentes escalas temporais, tal como apresentado pelo autor em sua dissertação ([JUNIOR et al., 2021b](#)), que utilizou DFA e  $\rho$ DCCA para analisar a série maregráfica da estação de Salvador-BA.

## 1.1 Problema de Pesquisa

### 1.1.1 Perguntas de Investigação

Face a importância e complexidade da temática, esta investigação procura responder aos seguintes questionamentos:

- Qual é a tendência temporal e pontual do nível médio do mar ao longo do litoral brasileiro no período de 2002 a 2023?
- As oscilações altimétricas (detectadas por GNSS) influenciam as variações observadas nas séries temporais de nível do mar?
- As variáveis climatológicas, como precipitação e temperatura do ar, apresentam correlação significativa com o comportamento do nível médio do mar em diferentes escalas temporais?
- Em que medida é possível modelar e quantificar a relação entre o nível médio do mar e os fatores altimétricos e climatológicos nas estações maregráficas do litoral brasileiro?

### *1.1.2 Hipótese de Estudo*

As variações do nível médio do mar ao longo do litoral brasileiro apresentam tendência crescente e estão associadas a variações altimétricas e climatológicas, de modo que fatores como movimentos verticais da crosta terrestre, precipitação e temperatura do ar contribuem para a dinâmica observada nas séries temporais maregráficas.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo Geral*

Modelar e analisar a dinâmica temporal e pontual do nível médio do mar e demais variáveis altimétricas e climatológicas (precipitação e temperatura do ar) das estações maregráficas do litoral brasileiro no período de 2002 a 2023.

### *1.2.2 Objetivos Específicos*

- Implementar rotinas computacionais para imputação de valores em séries maregráficas provenientes de falhas nos instrumentos de coleta do nível do mar das estações maregráficas do litoral brasileiro;
- Analisar descritivamente o comportamento da série temporal do nível médio do mar, dos dados GNSS e das principais variáveis meteorológicas nas estações maregráficas do litoral brasileiro;
- Identificar e mensurar a tendência e a autocorrelação dos dados de maré das estações no litoral brasileiro em diferentes escalas de tempo;
- Estimar a correlação cruzada bivariada (duas séries temporais) e multivariada (três ou mais séries temporais) entre os dados de maré e demais variáveis altimétricas e climatológicas nas estações maregráficas que compõem o litoral brasileiro em diferentes escalas de tempo.

## **1.3 Estrutura da Tese**

A tese está estruturada em capítulos e na forma de artigo, conforme explicitados a seguir.

No capítulo 2 é feita uma abordagem teórica sobre diversos assuntos, necessários inicialmente para entender o conjunto de dados utilizados e os diferentes métodos aplicados, a começar com uma breve explanação sobre o conceito e a variabilidade da maré, apresentando em seguida os sistemas de referência altimétricos e a Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia - RMPG, fechando este tópico com o ponto de vista ambiental, abordando um pouco sobre as medidas tomadas para conter o avanço do nível do mar, os denominados Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS. Em seguida, são apresentados os conceitos básicos dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite - GNSS, entre eles: Navstar-GPS, Galileo, Glonass e Beidou, assim como seus segmentos espaciais, de controle e de usuários, que resultará na fundamentação necessária para entender os princípios e objetivos da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo – RBMC, estrutura responsável por gerar uma das séries a serem correlacionadas e sua importância na detecção da movimentação vertical da Terra. Por fim, também são apresentados os diferentes métodos estatísticos utilizados e o que se pode extrair de cada um deles.

No capítulo 3 são apresentados os resultados alcançados nesta tese de doutorado e de acordo com os objetivos que foram propostos (seção 1.2.2). Por opção metodológica, os resultados são apresentados em formato de artigo.

No primeiro artigo (seção 3.1) objetiva apresentar através de técnicas de revisão bibliométrica um panorama geral de como o tema “nível do mar” vem sendo estudado ao longo do tempo e suas relações com seus fatores perturbadores, que técnicas estão sendo utilizadas e quais os principais achados.

No segundo artigo (seção 3.2), por meio do método de análise DFA com o procedimento das janelas deslizantes, objetiva avaliar as flutuações das séries temporais de cada uma das estações maregráficas do litoral brasileiro de forma dinâmica e fornecer respostas as mudanças de comportamento dos níveis do mar no Brasil em função do tempo.

No terceiro artigo (seção 3.3) as mesmas séries maregráficas foram correlacionadas com outras variáveis de origem não oceânica (altimetria por GNSS para avaliar a movimentação vertical da Terra (VLM), além da precipitação e temperatura do ar) aplicando o método de análise  $DMC_x^2$ , além de análises de entropia.

Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as considerações finais da tese, bem como as perspectivas para trabalhos futuros. Embora a parceria com o orientador e outros pesquisadores tenha resultado na produção de diversos artigos e participações científicas, no Anexo A do Apêndice são apresentados exclusivamente os produtos desenvolvidos durante o período de elaboração da tese e que tiveram aplicação direta na pesquisa.

---

## Fundamentação Teórica

---

### 2.1 *Nível do Mar*

#### 2.1.1 *Conceitos e variabilidades do Nível do Mar*

Desde os primórdios da civilização os movimentos das águas dos oceanos despertaram a atenção de estudiosos e daqueles que vivem próximo ao mar. Entre os fenômenos que mais intrigaram os habitantes das regiões costeiras do globo, o movimento oscilatório do nível do mar merece destaque, por sua periodicidade absolutamente regular ([CAMARGO; HARARI, 2015](#)).

A oscilação vertical da superfície do mar ou outra grande massa d'água sobre a Terra é chamada de Maré, causada primariamente pelas diferenças na atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol sobre os diversos pontos da Terra ([MIGUENS, A. P., 1996](#)). As marés possuem períodos de 12 horas e 25 minutos a 24 horas e 50 minutos ([PUGH, 1996](#)) e comprimento de onda que pode alcançar a circunferência do equador ([SCHMIEGELOW, 2004](#)). Essas 24 horas e 50 minutos também é conhecida como dia lunar ([MIGUENS, A. P., 1996](#)). De acordo com [Schmiegelow \(2004\)](#), as águas normalmente sobem e descem duas vezes por dia, existindo, portanto, duas preamares (maré alta) e duas baixa-mares (maré baixa). Essa situação é vista nas marés semidiurnas, mais comum, com duas preamares e duas baixa-mares aproximadamente iguais em cada dia lunar e nas marés mistas, comuns na região sudeste, na qual ocorrem duas preamares e duas baixa-mares de alturas distintas ([SCHMIEGELOW, 2004](#)). Além destas, temos as marés diurnas, característica de latitudes baixas e período de aproximadamente 24h, existindo apenas uma maré alta e uma maré baixa neste período ([LEMUS; TORRES-GARCÍA; MONDRAGÓN, 1997](#)).

Existem essencialmente duas forças envolvidas na origem das marés: a força de atração entre os astros, formulada por Newton em 1686, fundamentando-se no fato de que a atração entre corpos é diretamente proporcional as suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa, sendo a Lua mais importante em sua formação por estar mais próxima da Terra, embora o Sol possua massa muito maior. A outra força é a centrífuga, devido ao movimento Terra-Lua em torno de um centro comum de massa ([SCHMIEGELOW, 2004](#)).

Tendo a Lua como a principal forçante, suas fases interferem diretamente na amplitude das

marés, sendo as Marés de Sizígia, aquelas que ocorrem em situações de luas cheia e nova, quando os três astros (Terra, Lua e Sol) estão alinhados, resultando em maiores amplitudes de maré (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021); e as Marés de Quadratura, nas luas crescente e minguante, quando os astros formam um ângulo reto com a Terra, originando as marés com as menores amplitudes (SCHMIEGELOW, 2004), conforme pode ser visto na figura 2.1.

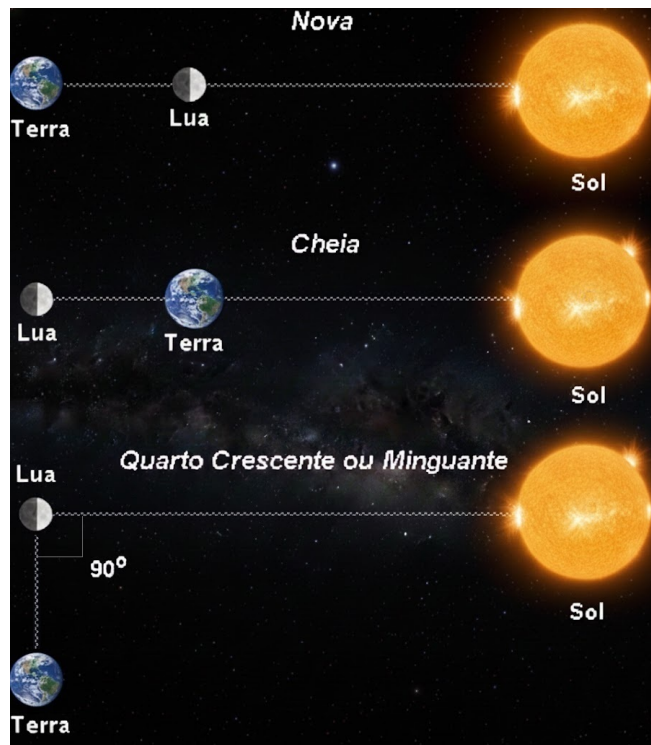


Figura 2.1: Posição relativa Sol - Lua - Terra nas 4 fases principais da Lua. Fonte: Adaptado de (SILVEIRA, 2003)

Essas amplitudes formadas pelas marés de sizígia e de quadratura, se dispostas ao longo do tempo, pode ser representada conforme a figura 2.2, que representa a oscilação da superfície e nível médio do mar em Cananéia para o período de setembro de 2009.

No Brasil, essas amplitudes de maré também variam a depender do local, sendo a região Norte dominada por macromarés (amplitude maiores que 4 metros), Nordeste dominada por mesomarés (amplitudes maiores que 2 metros e menores que 4 metros) e as regiões Sul e Sudeste dominadas por micromarés (amplitudes menores que 2 metros) (KNOPPERS et al., 2009).

Vale a pena mencionar que os fundamentos básicos que explicam o fenômeno das marés por meio da Teoria do Equilíbrio foram descritos de maneira simplificada, considerando a Terra integralmente coberta (sem continentes) por um oceano de profundidade uniforme, existindo assim muitas restrições impostas pelas bacias oceânicas e pela diferença de profundidade. Dessa forma, os aspectos dinâmicos das marés são bastante abrangentes e

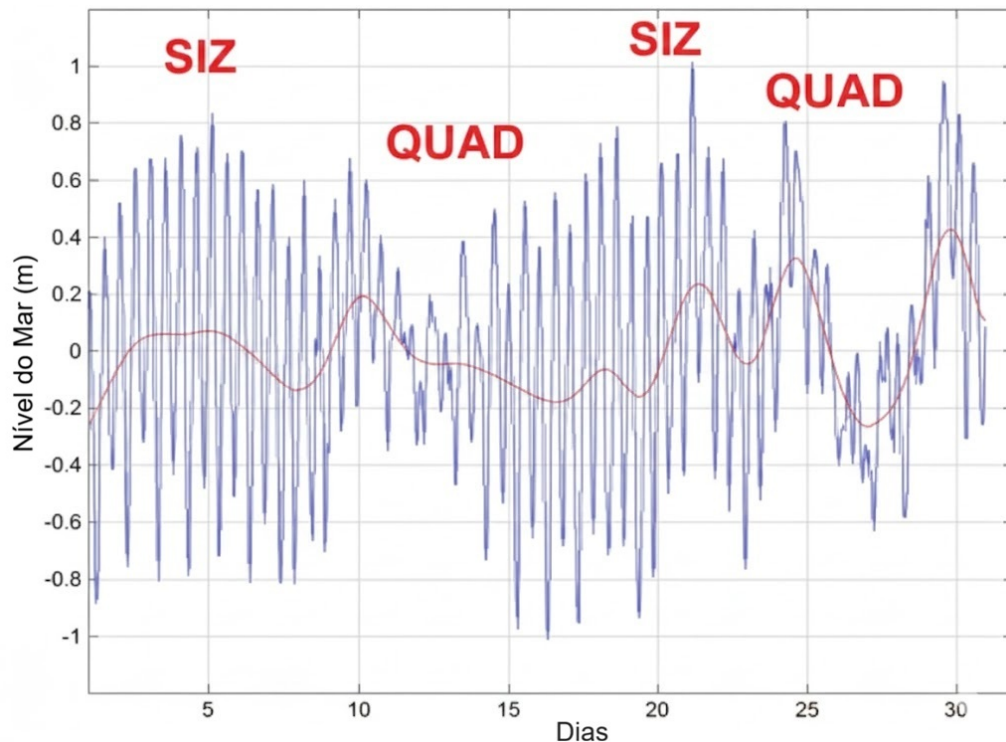


Figura 2.2: Marés de sizígia (SIZ) e quadratura (QUAD) ao longo de um mês (setembro de 2009), em Cananéia(SP). A linha azul representa o nível do mar medido e a linha vermelha representa o cálculo dos efeitos meteorológicos e de densidade no nível do mar. Fonte: (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021)

envolvem uma série de conceitos (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021).

Segundo Camargo e Harari (2015), o resultado idealizado em uma Terra esférica, sem continentes e com profundidade do oceano constante, é a formação de um elipsoide com dois bulbos, na direção da Lua e na direção oposta a ela. Na prática, os bulbos não se formam, simplesmente porque a Terra gira em torno de seu eixo. Mesmo assim, a Teoria do Equilíbrio prova intuitivamente a periodicidade fundamental das marés, embora existam muitas razões para explicar porque as marés reais não se comportam como na Teoria do Equilíbrio. A primeira delas refere-se ao fato da Terra girar em torno de seu eixo, o que implicaria a necessidade de que o bulbo de maré se propagasse em sentido contrário do movimento da superfície terrestre para manter-se alinhado com a Lua. Entretanto, em decorrência da profundidade dos oceanos, não haveria velocidade suficiente para tal. A segunda razão está ligada a presença dos continentes, que impedem que os bulbos se propaguem livremente, além do fato de que a geometria dos continentes restringe a direção dos escoamentos. Adicionalmente, há também razões dinâmicas que envolvem a existência de um intervalo de tempo para a resposta do oceano às forças trativas de maré, ou seja, conjunto de forças que força a água a se mover horizontalmente (CAMARGO; HARARI, 2015), uma vez que a reação não seria instantânea e nem tampouco estática. Por último, o efeito de rotação (Coriolis) que exerce um papel importante na deflexão dos fluxos de maré, dadas as escalas espacial e temporal dessas oscilações em escala global. O efeito de

Coriolis (ou efeito giroscópico) poderá reforçar ou reduzir o efeito das forças astronômicas. Este, devido a rotação da Terra, tende a desviar as correntes de maré para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul, concorrendo, juntamente com as próprias forças astronômicas, para a gênese de correntes rotatórias (MIGUENS, A. P., 1996).

### 2.1.2 Níveis de Referência

De acordo com Dalazoana (2005), a fonte de informação mais comum sobre os níveis de maré na costa brasileira é a Tábua de Marés (TM), fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN). Esta, em colaboração com as autoridades portuárias brasileiras, é a principal responsável pela manutenção das observações de nível do mar no país. Esses dados da TM são publicados anualmente e disponibilizados também no sítio da DHN na internet com os horários e alturas das preamares e baixa-mares locais, medidas a partir do Nível de Referência ou Nível de Redução (NR), ou seja, um nível mínimo definido localmente de forma que não haja valores negativos de altura de maré (IBGE, 2009). Outra definição para NR é um nível suficientemente abaixo do nível médio do mar, que informa aos navegantes as condições mínimas de segurança de um ponto para suas embarcações e navios, normalmente publicados nas cartas náuticas (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021).

A previsão das marés fundamenta-se na análise harmônica de registros maregráficos obtidos ao longo de um intervalo de tempo suficientemente longo para permitir a identificação e a separação das diversas componentes que compõem o movimento de maré. Conforme estabelecido na formulação clássica de Schureman (1958), o período mínimo de observação pode variar desde aproximadamente 31 dias, suficiente para a determinação das principais componentes diurnas e semidiurnas, até séries temporais extensas, da ordem de 18,6 a 19 anos, necessárias para a completa separação dos efeitos nodais associados ao ciclo da regressão lunar. No Brasil, informações adicionais sobre observações maregráficas e previsões de maré podem ser obtidas junto à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), disponível em (<http://www.marinha.mil.br/dhn>) (Visitado em 28/05/2019).

As componentes de maré representam termos individuais da expansão harmônica da elevação do nível do mar em um ponto específico. Os períodos dessas componentes são derivados de combinações lineares das velocidades angulares da rotação da Terra e dos movimentos orbitais da Lua e do Sol, conforme a Teoria do Equilíbrio das Marés (SCHUREMAN, 1958). A partir dessa teoria, são reconhecidas centenas de constituintes harmônicos, usualmente classificados em componentes de longo período, diurnas, semidiurnas e terdiurnas. Compilações modernas indicam a existência de cerca de 390 componentes, das quais aproximadamente 100 são de longo período, 160 diurnas, 115 semidiurnas e 14

terdiurnas (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021). O número de componentes efetivamente utilizadas na previsão de maré varia conforme a complexidade do regime de maré local e a extensão da série de observações disponível. No contexto brasileiro, por exemplo, são utilizados até cerca de 60 constituintes em Salinópolis (PA), enquanto em Aratu (BA) empregam-se aproximadamente 19 componentes (SCHMIEGELOW, 2004).

Na formulação teórica clássica, cada componente de maré é caracterizada por uma velocidade angular  $\sigma_j$ , determinada exclusivamente pela astronomia, bem como por uma amplitude e uma fase de equilíbrio, que representam a resposta idealizada do oceano ao potencial gerador de maré. Assim, a elevação de equilíbrio da superfície do mar,  $\eta_e$ , em um instante de tempo  $t$ , pode ser expressa como uma soma harmônica do tipo:

$$\eta_e(t) = \sum_j A_j \cos(\sigma_j t + \alpha_j) \quad (2.1)$$

As amplitudes de equilíbrio das diferentes componentes são usualmente expressas em relação à amplitude da principal componente lunar semidiurna ( $M_2$ ). Cada constituinte harmônico está fisicamente associado a uma combinação específica dos movimentos astronômicos da Terra, da Lua e do Sol, sendo esses movimentos e seus respectivos períodos a base para a determinação das frequências angulares das componentes de maré (SCHURMAN, 1958).

Entretanto, a maré observada em um local específico difere da maré de equilíbrio em função de efeitos dinâmicos, geométricos e dissipativos do oceano. Dessa forma, o objetivo principal da análise de um registro maregráfico é a determinação das amplitudes e fases reais das componentes de maré naquele local, conhecidas como constantes harmônicas. Para cada componente  $j$ , são estimadas uma amplitude local  $H_j$  e uma fase local  $G_j$ , que caracterizam a resposta do oceano às forçantes astronômicas naquele ponto específico.

Uma vez determinadas essas constantes, a elevação da maré  $\eta$  pode ser prevista para qualquer instante de tempo  $t$  por meio da expressão harmônica clássica, escrita em notação moderna conforme apresentado por Camargo e Harari (2015):

$$\eta(t) = \sum_j f_j H_j \cos(\sigma_j t + \beta_j + G_j) \quad (2.2)$$

em que  $\sigma_j$  são as velocidades angulares constantes das componentes de maré, conforme a Teoria do Equilíbrio;  $f_j$  e  $\beta_j$  são, respectivamente, os fatores nodais de amplitude e de fase, funções do tempo que corrigem os efeitos de longo período associados principalmente

ao ciclo nodal lunar de 18,6 anos; e  $H_j$  e  $G_j$  são as constantes harmônicas determinadas a partir das observações maregráficas no local considerado. Essa formulação é matematicamente equivalente à expressão clássica apresentada por [Schureman \(1958\)](#), diferindo apenas na notação e na organização dos termos, sem perda de generalidade física.

Outro nível de referência utilizado se dá através da observação do nível do mar para determinação de um valor médio, sendo para a geodésia a superfície de referência altimétrica, também chamada de geóide. Em outras palavras, é a superfície de nível do campo de gravidade que melhor se adapta ao nível médio do mar (NMM), e pode se estender para dentro do corpo sólido da Terra ([TORGE; MÜLLER, 2012](#)). É essa superfície de nível ideal que corresponde a superfície de equilíbrio, de que se tem ideia observando as águas do mar, supondo-as em tranquilidade absoluta ([COMASTRI; TULLER, 2005](#)).

No Brasil, o *Inter American Geodetic Survey* (IAGS) foi responsável pela manutenção e coleta de dados de várias estações maregráficas ao longo da costa entre as décadas de 40 e 60 ([ALENCAR, 1990](#)), embora o período de operação não tenha sido homogêneo, variando de poucos meses (Salinópolis-MA) até aproximadamente duas décadas (Fortaleza, Salvador e Imbituba), encerrando suas atividades em 1971 ([LUZ, 2008](#)). Desde então existiram no país mais de 300 estações onde foram realizadas observações do nível do mar, sendo que em muitos lugares não eram feitas leituras numa régua maregráfica e nem nivelamento geodésico regular, servindo apenas para finalidades portuárias, de navegação ou de engenharia ([DALAZOANA, 2005](#)).

O Datum Vertical Brasileiro (DVB) foi determinado inicialmente em Torres/RS de maneira provisória com apenas um ano de observações do NMM (1919-1920), mais para atender ao cálculo de altimetria da Cadeia de Triangulação de 1<sup>a</sup>. ordem, iniciada em 1945 que iria fornecer as coordenadas dos pontos de apoio básico necessários ao mapeamento da Zona Carbonífera de Santa Catarina. Posteriormente, o Datum de Torres foi substituído em 1958 pelo Datum de Imbituba com uma série temporal de observações do nível do mar mais longa (1949-1957) ([ALENCAR, 1990](#)).

A Figura 2.3 mostra graficamente os níveis médios anuais de Imbituba, assim como as médias mensais de 1957. Observa-se que a variação das médias anuais pode ultrapassar 5 cm, enquanto que as médias mensais podem alcançar diferenças de até 25 cm. Fica evidente que a utilização de níveis de referência baseados em curtos períodos de observações maregráficas devem ser feitas com cuidado, principalmente nas regiões sul e sudeste onde a influência meteorológica sazonal é mais intensa.

De acordo com [Marmer \(1927\)](#), 19 anos de análise de dados representa o período mínimo ideal de observações para a obtenção dos *data* altimétricos, necessários para que sejam reduzidos os efeitos das variações periódicas provocadas pelas influências astronômicas. Em

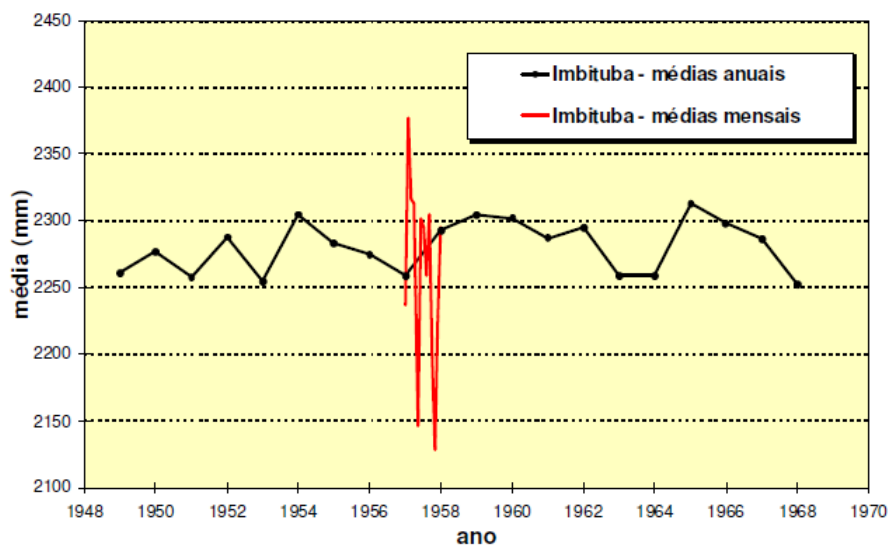


Figura 2.3: Níveis médios em Imbituba: valores anuais entre 1949 e 1968, e mensais de 1957. Fonte: PSMSL, 1996 apud (IBGE, 2009)

outras palavras, a completa separação dos efeitos nodais associados ao ciclo da regressão lunar (SCHUREMAN, 1958). Entretanto, o Datum de Imbituba foi definido com apenas 9 anos de observações, quando se tratou de calcular a altitude da RN 4X, construída junto ao Marégrafo de Imbituba, partindo dos dados fornecidos pelo IAGS (ALENCAR, 1990).

### 2.1.3 Redes Altimétricas e Maregráficas

#### 2.1.3.1 Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP)

A RAAP é o conjunto homogêneo de marcos ou estações geodésicas, vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), dotadas de altitudes de alta precisão. O cálculo dessas altitudes é realizado a partir de medições de nivelamento geométrico duplo (Figura 2.4). Este, consiste na medição da diferença de altitude entre duas referências de nível, para a obtenção da altitude de uma delas, a partir da altitude da outra, utilizando-se de instrumentos, métodos e procedimentos especiais com o objetivo de garantir a precisão dos resultados (COMASTRI; TULLER, 2005).

Embora neste estudo não tenha utilizado dados oriundos de medições altimétricas por nivelamento geométrico, é importante mencioná-la, uma vez que seus valores de altitudes são determinados a partir do valor médio observado do nível do mar. Segundo o IBGE (2009), essas altitudes são as informações mais solicitadas no banco de dados geodésico da qual a comunidade usuária do SGB estabelece suas próprias redes de altitudes para os mais variados objetivos, tais como: obras de saneamento, irrigação, estradas, telecomunicações, usinas hidrelétricas, mapeamento e estudos científicos (IBGE, 2017).

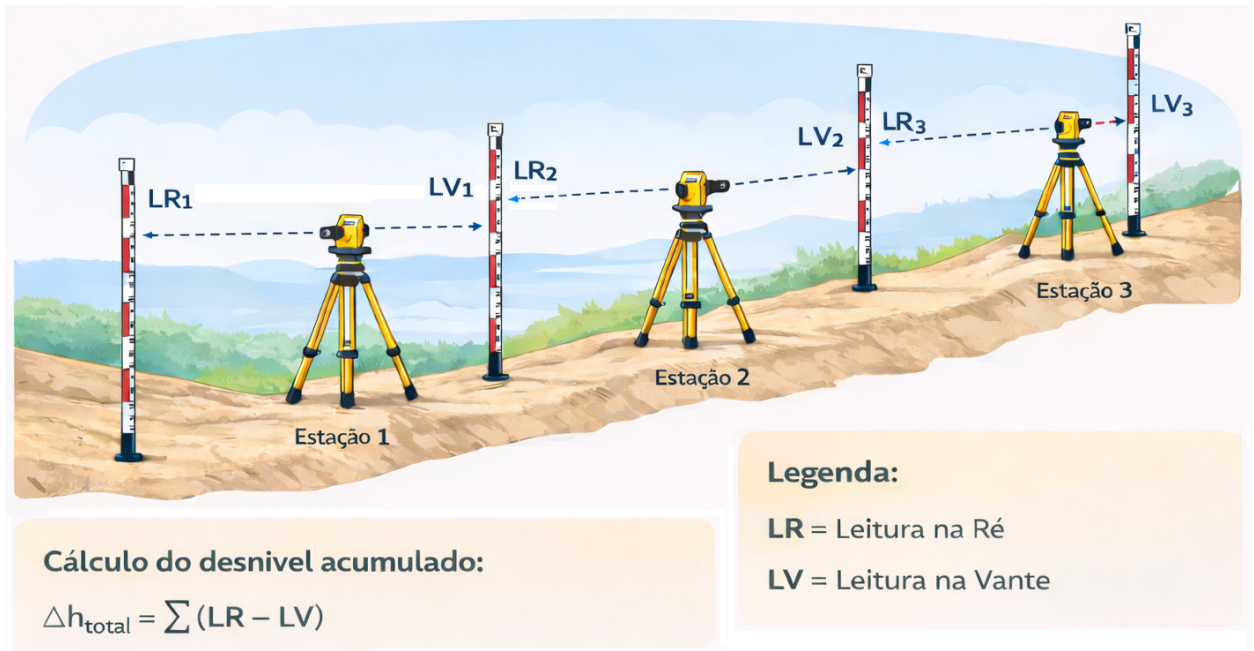


Figura 2.4: Nivelamento Geométrico Composto. Fonte: Elaborado pelo autor

O estabelecimento da RAAP, sob coordenação inicial do então Conselho Nacional de Geografia (CNG), teve início em 1945, no extremo sul do Brasil (ALENCAR, 1990). Nos primeiros anos foram realizadas conexões com as redes de nivelamento implantadas pelos então Serviço Geográfico do Exército (SGE) e Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo (IGG). Do Sul, a RAAP progrediu inicialmente em direção ao norte do país através das regiões litorâneas de maior desenvolvimento econômico e demográfico, chegando também a recém estabelecida capital, Brasília. A partir da década de 1970, a implantação da RAAP foi direcionada ao interior do país, à substituição das redes de outras instituições e à reconstituição dos trechos destruídos (IBGE, 2018).

Sua materialização se dá através de chapas cravadas, marcos ou pilares, de forma a garantir sua estabilidade e durabilidade. No caso das estações altimétricas construídas no entorno das estações maregráficas, é priorizado o estabelecimento de referência de nível (RRNN) do tipo chapa cravada (Figura 2.5) em estruturas estáveis (colunas de grandes estruturas de engenharia, capeamento dos cais de portos, afloramentos rochosos, etc), evitando-se, sempre que possível, a construção de marcos de concreto apoiados apenas no solo, em função da possibilidade de subsidência associada a aterros, comuns em áreas portuárias (IBGE, 2010).

Embora esta seja a forma mais comum para as RRNN que compõem o SGB, modelos mais antigos ou até mesmo modelos de outros órgãos também podem ser encontrados no entorno das estações maregráficas, como podemos ver na Figura 2.6.

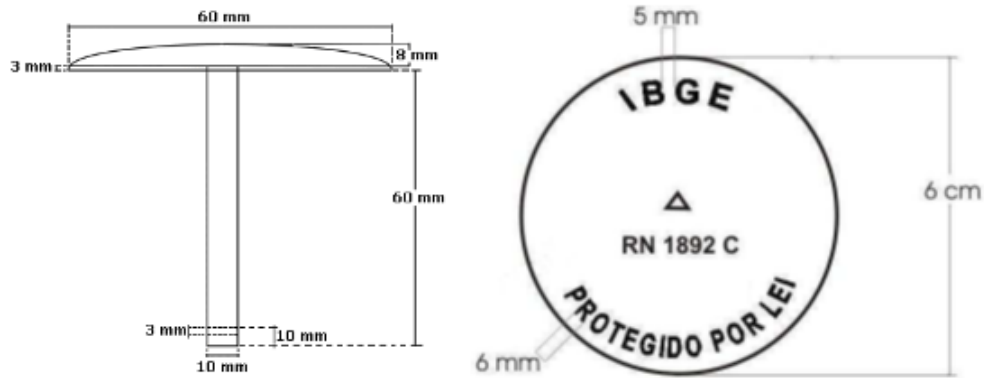


Figura 2.5: Especificação e exemplo de chapa altimétrica. Fonte: (IBGE, 2008)



Figura 2.6: Outros modelos de RRNN encontrados no entorno da Estação Maregráfica. Fonte: Acervo IBGE

Todas essas RRNN, inclusive as de outros órgãos, recebem uma identificação que é feita por código composto de uma parte numérica de até quatro dígitos (série) e por uma letra (LUZ, 2008).

### 2.1.3.2 Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)

Para a determinação da componente altimétrica é indispensável dispor de valores iniciais de altitude em pontos de referência bem definidos, os quais servirão como base para o nivelamento geométrico de todos os demais vértices do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Esses valores, denominados *Data* Altimétricos, são estabelecidos a partir do nível médio do mar (NMM), determinado com base em longas séries de observações maregráficas contínuas.

Apesar da necessidade de longas séries de observações maregráficas, o *Datum* de Imbituba, por exemplo, foi definido a partir de registros obtidos entre 1949 e 1957 no Porto de Imbituba (SC) e passou a ser oficialmente adotado em 1959, permanecendo em uso

até os dias atuais. Sua limitação está na ausência de atualização com dados mais recentes, além da sua posição geográfica no extremo sul da Rede Altimétrica, o que afeta a homogeneidade do referencial vertical em escala nacional.

Essas limitações acarretam discrepâncias significativas nas altitudes determinadas para regiões distantes, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, quando comparadas aos referenciais maregráficos locais. Para enfrentar esse problema, o IBGE instituiu, em 1997, a **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)**, concebida em parceria com as Universidades Federais do Rio de Janeiro (UFRJ) e do Paraná (UFPR) (LUZ, R. T.; NEVES, C. F.; FREITAS, S. R. C., 1996).

A RMPG tem como finalidade principal monitorar continuamente o nível do mar ao longo da costa brasileira, assegurando a integração temporal e espacial entre os diferentes *Data Verticais Nacionais*, especialmente o de Imbituba e o de Santana, e demais referenciais maregráficos utilizados em aplicações náuticas, cartográficas e de engenharia costeira. A consolidação desse sistema é obtida por meio da correlação temporal das observações atuais com aquelas que definiram o *Datum* original e, paralelamente, pela correlação espacial entre as observações realizadas simultaneamente em diferentes estações (LUZ; GUIMARÃES, 2003).

Além da finalidade geodésica, os dados gerados pela RMPG possuem importância estratégica para o gerenciamento costeiro integrado, apoiando análises ambientais e socioeconômicas. O Brasil possui mais de 7.000 km de litoral, onde se concentram importantes centros urbanos, portos, indústrias e infraestrutura crítica, abrigando mais de 50 milhões de habitantes. Essa região apresenta alta vulnerabilidade a processos de erosão, ressacas, subsidência e à elevação do nível médio do mar. Assim, para o correto planejamento de medidas preventivas é fundamental observar as variações do nível do mar na região costeira e correlacioná-las com as informações de altitudes dos mapas topográficos que orientam governos municipais e estaduais no controle e ocupação do solo (LUZ et al., 2014 apud (IBGE, 2016)).

Atualmente, a RMPG conta com estações distribuídas ao longo de toda a costa brasileira (Figura 2.7) e integram sensores maregráficos e meteorológicos modernos, possibilitando medições de alta resolução temporal. Adicionalmente, contribuem para o Sistema Global de Observação do Nível do Mar (*Global Sea Level Observing System - GLOSS*), coordenado no Brasil pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) e algumas delas transmitem em tempo quase real (5 minutos) para o serviço da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) de Rede Ativa do GLOSS, contribuindo diretamente com a sub rede de Alerta de Tsunami no Caribe.

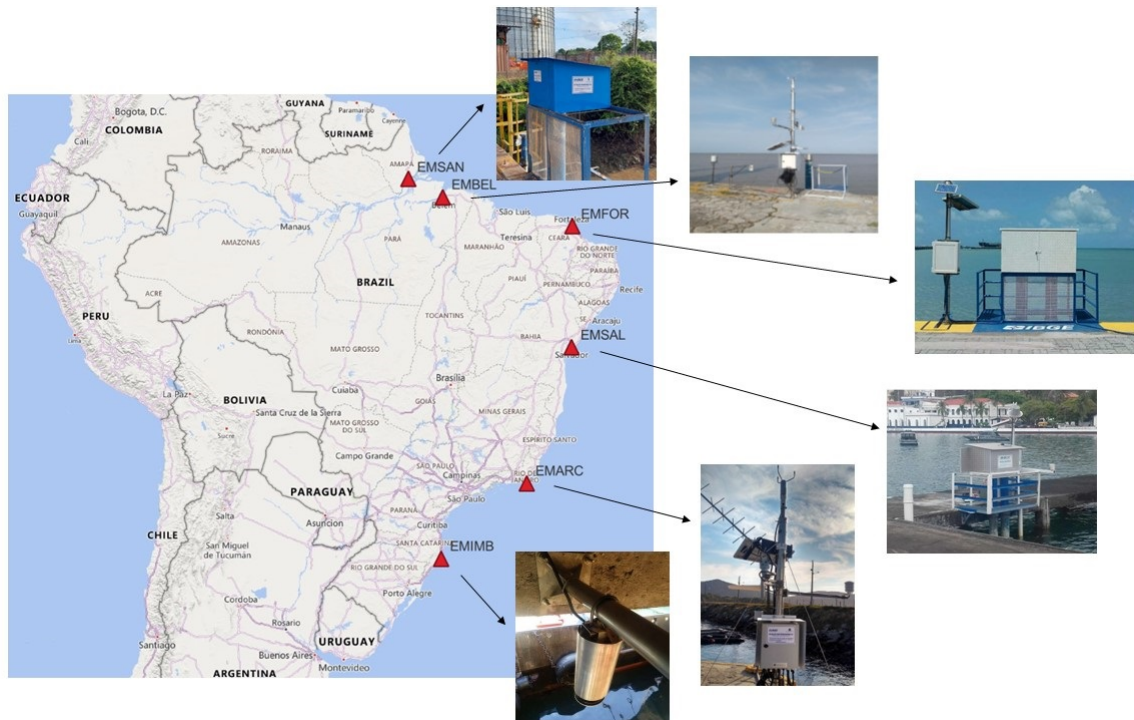


Figura 2.7: Estações Maregráficas ativas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor.

De acordo com o IBGE <sup>1</sup>, as principais estações que compõem a RMPG são:

- **Estação Meteomaregráfica de Santana (EMMSAN)** — localizada na Companhia Docas de Santana (CDSA), em operação desde junho de 2005, inicialmente com sensor de nível de pressão (taxa de coleta de 5 min) e, desde 2017, com sensores de nível Radar e Encoder (taxa de coleta de 1 min);
- **Estação Maregráfica de Fortaleza (EMFOR)** — localizada na Companhia Docas do Ceará (CDC), em operação desde 2007, com marégrafo convencional (já desativado) e, desde 2008, com sensores de nível Radar e Encoder (taxas de coleta de 1 min e 5 min, respectivamente);
- **Estação Maregráfica de Salvador (EMSAL)** — localizada na Capitania dos Portos de Salvador, em operação desde 2002, inicialmente com marégrafo convencional (desativado em 2019) e, desde 2008, com sensores de nível Radar e Encoder (taxas de coleta de 1 min e 5 min);
- **Estação Meteomaregráfica de Arraial do Cabo (EMMARC)** — localizada no Porto do Forno (RJ), em operação desde 2017 com sensores de nível Radar e Encoder (taxa de coleta de 1 min);

<sup>1</sup><https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html> (Visitado em 28/06/2022)

- **Estação Meteomaregráfica de Imbituba (EMMIMB)** — localizada no Porto de Imbituba (SC), em operação desde 1998, com marégrafo convencional e, a partir de 2001, com marégrafo digital. Entre 2001 e 2016 utilizou sensor de nível de pressão (5 min), entre 2013 e 2019 sensor Encoder (5 min) e, desde 2019, sensores Radar e Encoder (1 min);
- **Estação Meteomaregráfica de Belém (EMMBEL)** — localizada na Companhia Docas do Pará (CDP), em operação desde 2019 com sensores de nível Radar e Encoder (1 min);
- **Estação Meteomaregráfica de Macaé (EMMAC)** — localizada no Porto da Petrobras de Imbetiba (RJ), operou entre 1994 e 2015, com marégrafo convencional e, a partir de 2001, marégrafo digital com sensor de nível de pressão (5 min).

Observa-se que há heterogeneidade entre as estações quanto aos sensores utilizados (de pressão, radar ou *encoder*), bem como nos períodos e taxas de coleta de dados. Ainda assim, o IBGE disponibiliza todos os registros padronizados em seu portal, consolidando-os em arquivos horários, o que favorece análises comparativas e o uso integrado em modelos geodésicos, oceanográficos e estatísticos.

A Tabela 2.1 apresenta as coordenadas geográficas de todas as estações acima citadas.

Tabela 2.1: Coordenadas das Estações Maregráficas

Estação	Latitude	Longitude
EMMSAN	00° 03' 41" S	51° 09' 57" O
EMFOR	03° 42' 53" S	38° 28' 37" O
EMSAL	12° 58' 26" S	38° 31' 02" O
EMMARC	22° 58' 21" S	42° 00' 49" O
EMMIMB	28° 13' 52" S	48° 39' 01" O
EMMBEL	01° 26' 32" S	48° 29' 47" O
EMMAC	22° 23' 08" S	41° 46' 10" O

Fonte: IBGE.

Os dados de nível do mar coletados pelas Estações Meteo-Maregráficas (EMM) visam aprimorar a integração das altitudes do SGB na zona costeira, uma vez que muitas atividades portuárias, de engenharia e de gestão ambiental utilizam referenciais verticais locais do NMM, e não diretamente nos *Data* altimétricos de Imbituba ou Santana.

Como o NMM apresenta variações significativas ao longo do litoral devido a fatores oceanográficos, meteorológicos e geodinâmicos, a utilização das altitudes do SGB em áreas costeiras demanda ajustes e vinculações locais. Essas ligações são realizadas por meio de estações RRNN (Referências de Nível Nacionais), implantadas nas proximidades dos marégrafos, com o propósito de:

1. vincular o nível do mar ao terreno firme, assegurando a continuidade do referencial altimétrico; e
2. referenciar as observações maregráficas a um sistema de referência externo e estável, garantindo a rastreabilidade dos dados em caso de substituição ou perda do marégrafo (BEVIS; SCHERER; MERRIFIELD, 2002).

Além das aplicações geodésicas, os dados da RMPG são amplamente utilizados em estudos de dinâmica costeira, hidrografia, oceanografia operacional e mudanças climáticas, subsidiando ações de adaptação à elevação global do nível médio do mar e planejamento de obras costeiras e portuárias (KEYSERS et al., 2013 apud (IBGE, 2013)).

É possível encontrar alguns estudos que se utilizaram dos dados da RMPG, a citar como exemplos: Obtenção de alturas de maré a partir de séries históricas da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia - RMPG (SILVA; TANAJURA, 2025), Estimativas da Topografia do Nível Médio do Mar na costa brasileira por meio da Altimetria por Satélites (SOUZA; DALAZOANA; SANTANA, 2025), Comparação absoluta entre o satélite Sentinel-3A e observações maregráficas da RMPG em Imbituba, Arraial do Cabo, Salvador, Fortaleza e Santana (GIEHL; DALAZOANA; SANTANA, 2022), Comparação das variações do nível médio do mar a partir de dados de altimetria por satélites e maregrafia em Fortaleza-CE (MENEZES; SOUZA; FERREIRA, 2021), assim como publicações provenientes desta pesquisa (JUNIOR et al., 2021b; JUNIOR et al., 2025).

#### 2.1.4 O Nível do Mar no contexto dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS

O aumento do nível do mar é uma preocupação global não apenas para a comunidade científica, mas também para autoridades governamentais, organizações não governamentais e a sociedade em geral. Com impactos que podem ser irreversíveis, medidas urgentes precisam ser pensadas e adotadas com o objetivo de mitigar seus efeitos sobre a população, o meio ambiente e a economia global.

Desde a Primeira Revolução Industrial, ocorrida no século XVIII, os efeitos negativos da ação humana sobre o meio ambiente têm se tornado ainda mais notáveis. Esse histórico coloca em pauta, cada vez mais, a necessidade de se equilibrar o desenvolvimento tecnológico com a sustentabilidade ambiental.

Em 1992, foi realizada no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como Rio-92 ou ECO-92. A realização da conferência proporcionou avanços para a questão ambiental, consolidou a preocupação mun-

dial com o meio ambiente e culminou na criação de um documento que propôs diretrizes técnicas e práticas para o desenvolvimento sustentável para as nações – a Agenda 21, um documento com diretrizes práticas para o desenvolvimento sustentável, assinado por 179 países comprometidos com a redução dos problemas socioambientais. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página das Nações Unidas sobre a Rio-92, em: [United Nations](#) (visitado em 30/07/2022).

Nos anos 2000, os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) foram estabelecidos como uma primeira tentativa de definir metas globais. Entre elas estavam a exploração sustentável dos recursos hídricos, a preservação das florestas e a redução de catástrofes naturais. Esses objetivos serviram de base para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que viriam posteriormente. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência - SBPC, em: [Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência](#) (Visitado em 30/07/2022).

Em 2012, novamente no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio+20. A conferência teve como foco a economia verde no contexto da erradicação da pobreza e da sustentabilidade, e reforçou a necessidade de uma estrutura institucional global para o desenvolvimento sustentável. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página da Rio+20, em: [Rio+20](#) (Visitado em 30/07/2022).

Três anos depois, em 2015, a sede da ONU em Nova York recebeu líderes mundiais e representantes da sociedade civil que estabeleceram a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Essa agenda é composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que formam um plano de ação ambicioso para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir prosperidade e paz para todos até o ano de 2030. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página do Escritório das Nações Unidas sobre Drogas e Crime - UNODC, em: [UNODC](#) (Visitado em 27/07/2022)

Os ODS abordam temas como igualdade de gênero, energia limpa, educação de qualidade, trabalho decente e ação climática. Nesse último ponto, destaca-se o ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, que busca combater os efeitos do aquecimento global, um dos principais responsáveis pelo aumento do nível médio do mar.

Esse aumento do nível médio do mar, provocado pelo derretimento de geleiras e pela expansão térmica dos oceanos, representa uma das ameaças mais urgentes para o alcance dos ODS. Entretanto, esse fenômeno impacta diretamente não só o ODS 13, mas também outros ODS listados na figura 2.8, tais como:

- ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima): evidenciando os efeitos do

aquecimento global e exigindo políticas de redução de emissões de gases de efeito estufa;

- ODS 14 (Vida na Água): afetando ecossistemas costeiros, recifes de corais e populações marinhas;
- ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis): colocando em risco milhões de pessoas que vivem em zonas costeiras sujeitas a inundações e erosão;
- ODS 6 (Água Potável e Saneamento): devido à intrusão salina em fontes de água doce nas regiões litorâneas;
- ODS 10 (Redução das Desigualdades): uma vez que comunidades vulneráveis são desproporcionalmente afetadas por esses impactos.



Figura 2.8: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Fonte: Nações Unidas

A coleta e o monitoramento de dados sobre o nível do mar são essenciais para embasar decisões políticas, prevenir desastres e planejar adaptação climática. Sistemas como a rede GLOSS (*Global Sea Level Observing System*), por exemplo, contribuem significativamente para isso. Em suma, compreender e integrar o aumento do nível do mar nas estratégias nacionais e internacionais é um passo crucial para o cumprimento da Agenda 2030.

Além disso, estão previstas para os próximos anos diversas ações de acompanhamento e avaliação dos ODS, com destaque para a Cúpula dos ODS das Nações Unidas, realizada periodicamente para revisar o progresso dos países e redefinir estratégias. Esta década será marcada como a "Década de Ação", na qual governos, setor privado e sociedade civil devem acelerar os esforços para atingir as metas estabelecidas. Tecnologias de monitoramento ambiental, soluções baseadas na natureza e planos de adaptação climática locais estão entre as prioridades futuras, especialmente no enfrentamento de impactos como o aumento do nível do mar.

## 2.2 Rede de Referência por Satélite

A Geodésia tem por objetivo a determinação da forma e das dimensões do nosso planeta, mas em se tratando de um corpo limitado por uma superfície irregular, tal determinação exige o levantamento de pontos escolhidos sobre essa superfície. Os demais são então obtidos por interpolação, embora atualmente esta seja uma tarefa que pode ser realizada com relativa simplicidade, utilizando-se, por exemplo, satélites artificiais apropriados para esse fim (GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B., 2004).

Essas determinações por satélite foram impulsionadas a partir da década de 1970, nos Estados Unidos, com a proposta do NAVSTAR-GPS (*Global Positioning System*), sistema que revolucionou praticamente todas as atividades que dependiam da determinação de posições. Em paralelo e de forma independente, foi desenvolvido na antiga URSS o GLO-NASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*). Além destes, a Agência Espacial Européia propôs o desenvolvimento do Galileo no final da década de 1990 e a China, o Beidou ou Compass, com a missão de transformá-lo em sistema de navegação global até 2020 (MONICO, J. F. G., 2008).

GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) é o termo atribuído ao conjunto de todas as constelações de satélites, seja americana, russa, europeia, chinesa ou qualquer outra, possibilitando o posicionamento em tempo real, bem como a navegação aérea, terrestre ou marítima. Foi concebido na 10<sup>a</sup>. Conferência de Navegação Aérea em 1991, quando a Organização Internacional de Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization* – ICAO) reconheceu que o “sistema de navegação autônomo primário no século 21 será fornecido pelo Sistema de navegação por satélite (GNSS)” (HEIN, 2000).

A facilidade nas suas aplicações são inquestionáveis, seja na engenharia, nas ciências da terra, na astronomia, nas ciências ambientais, na agricultura, entre outras. Entretanto, merece destaque a sua aplicação para fins de determinação altimétrica do nível do mar, pois suas determinações independem das condições físicas da Terra. Nesse cenário, é possível citar os seguintes autores: (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010; RAY; BECKLEY; LEMOINE, 2010; FADIL et al., 2011; WÖPPELMANN; TESTUT; CRÉACH, 2011; SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2012; WÖPPELMANN; MARCOS, 2012; SATIRAPOD et al., 2013; SARAMUL; EZER, 2014; ABBASI; MALEKI, 2017; FREDERIKSE et al., 2017; PARKER, 2018; WATSON, 2019; BORETTI, 2020; DENYS et al., 2020; BORETTI, 2021; MURRAY et al., 2025). Outros estudos que merecem destaque são aqueles que se utilizam do sistema GNSS como sendo o próprio equipamento de medição do nível do mar por meio de boias, como é o caso de Wanshan, na China (ZHAI et al., 2020) ou nas Ilhas Kerguelen, no extremo sul do Oceano Índico (FUND et al., 2013), conforme pode ser visto na figura 2.9.



Figura 2.9: Boia GPS usada durante a campanha de Kerguelen. Fonte: (FUND et al., 2013).

As subseções a seguir (2.2.1.1, 2.2.1.2) são destinadas ao conhecimento de cada uma das principais constelações GNSS.

## 2.2.1 Constelações GNSS

### 2.2.1.1 GPS - Global Position System

Como parte dos esforços do Departamento de Defesa (DoD), da Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica (Nasa), do Departamento do Comércio (DoC), do Departamento de Transportes (DoT) e da Administração Federal da Aeronáutica (FAA) para investigar a praticabilidade de sistemas de satélites para comunicação, disponibilidade de tempo preciso e de controle de tráfego, foi estabelecido o Sistema de Navegação por Satélites da Defesa (*Defense Navigation Satellite System* – DNSS), denominados *Timation* e *System 621B*, sob responsabilidade da Marinha e da Força Aérea, respectivamente, como propostas para o DNSS. Do cotejo desses dois projetos, nasceu o conceito do sistema *Navstar Global Positioning System*. Navstar-GPS, um acrônimo para *NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System* (Sistema de Navegação com Tempo e Distância – Sistema de Posicionamento Global) (GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B., 2004).

Atualmente (outubro de 2025), o sistema GPS é desenvolvido, mantido e operado pelo DoD, sob a responsabilidade da Força Espacial dos Estados Unidos (USSF), e fornece serviços contínuos de posicionamento, navegação e tempo em escala global, de forma livre e aberta a todos os usuários civis e militares. (<https://www.spaceforce.mil/>).

O princípio do sistema GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites em um sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites, sendo que o posicionamento geodésico utilizando o GPS fornece as coordenadas cartesianas  $(X, Y, Z)$  de pontos sobre a superfície terrestre, podendo alcançar precisão milimétrica. A partir destas coordenadas, por meio de modelos matemáticos e parâmetros do modelo terrestre envolvido, pode-se transformá-las em coordenadas geodésicas: latitude ( $\varphi$ ), longitude ( $\lambda$ ) e altura geométrica ( $h$ ) (CASTRO, 2002). Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. Nesse caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações com três incógnitas. A quarta medida é necessária por causa do não sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, que adiciona uma incógnita ao problema (MONICO, J. F. G., 2008).

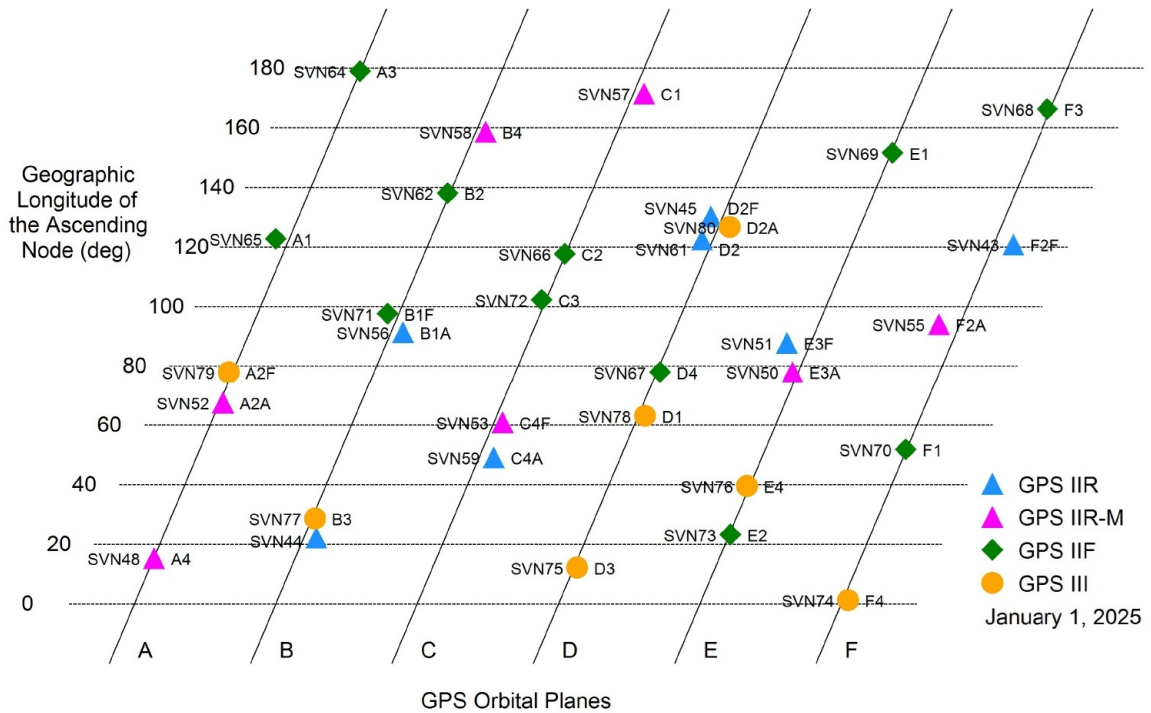


Figura 2.10: Constelação GPS. Fonte: *U.S. Coast Guard Navigation Center*

O segmento espacial do GPS consiste de no mínimo 24 satélites MEO (*Medium Earth Orbits* – Satélites de Órbita Média) distribuídos em 6 planos orbitais igualmente espaçados (Figura 2.10), em uma altitude aproximada de 20.200 km, mas conta hoje com 32 satélites (outubro de 2025), sendo 31 ativos e 1 em reserva, de acordo com informações atualizadas do *U.S. Coast Guard Navigation Center*.

Os planos orbitais são inclinados 55° em relação ao Equador e o período orbital é de aproximadamente 12 horas siderais. Dessa forma, a posição dos satélites se repete a cada dia, aproximadamente quatro minutos antes em relação ao dia anterior. Essa configuração ga-

rante que, no mínimo, quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora (MONICO, J. F. G., 2008).

Os satélites GPS chegam a pesar em órbita cerca de 2.100 kg (satélites do bloco III) (<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>). Seus painéis solares possuem a capacidade de serem orientados perpendicularmente à direção do Sol, para obter o máximo de rendimento (GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B., 2004). Esses satélites de última geração (bloco III e IIIA) oferecem maior potência de sinal, vida útil estendida e capacidade aprimorada de transmissão de múltiplas frequências, melhorando a precisão e a resistência a interferências (<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>).

De acordo com o *U.S. Coast Guard Navigation Center*, o segmento de controle do GPS consiste em uma estação de controle mestre em Colorado Springs, com cinco estações de monitoramento e três antenas terrestres localizadas em todo o mundo. As estações de monitoramento rastreiam todos os satélites GPS visíveis e coletam informações de alcance a partir das transmissões via satélite. As estações de monitoramento enviam as informações coletadas de cada um dos satélites de volta para a estação de controle mestre, que calcula órbitas de satélite com extrema precisão. As informações são então formatadas em mensagens de navegação atualizadas para cada satélite. As informações atualizadas são transmitidas a cada satélite por meio das antenas terrestres, que também transmitem e recebem sinais de controle e monitoramento por satélite. A Figura 2.11 apresenta a distribuição espacial dessas estações de controle.

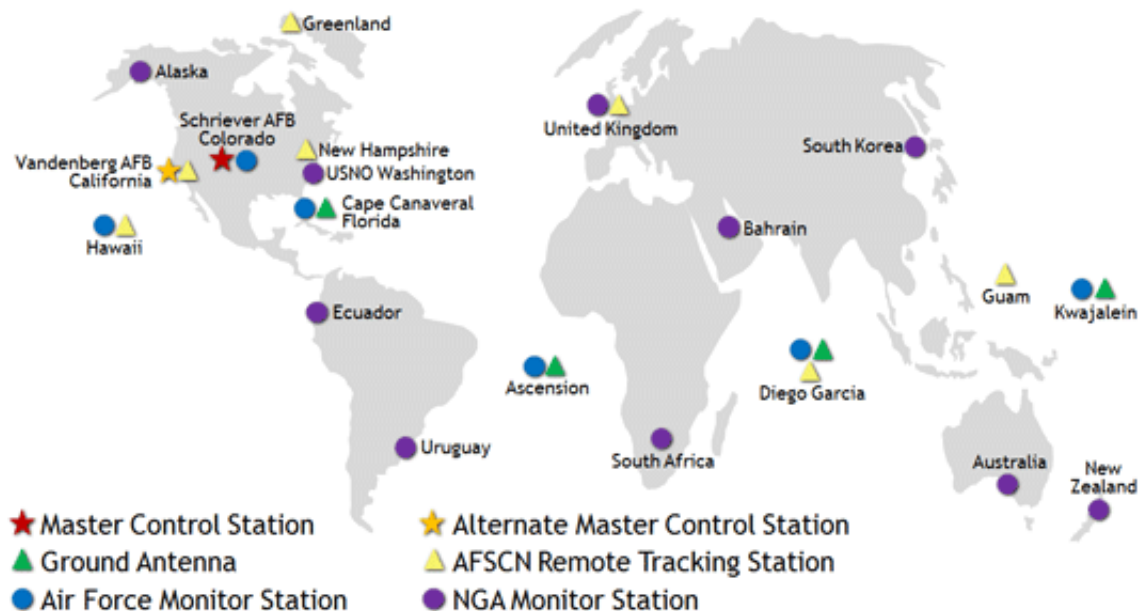


Figura 2.11: Segmento de controle do GPS. Fonte: GPS.GOV

Os sinais de navegação do GPS estão referenciados ao sistema UTC (*Universal Time Coordinated*) de tempo e o segmento de usuários está diretamente associado aos receptores,

existindo uma grande quantidade no mercado para as mais diversas aplicações, limitadas apenas pela imaginação dos usuários (MONICO, J. F. G., 2008).

### 2.2.1.2 GLONASS - Global Orbiting Navigation Satellite System

O GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) é o sistema russo de navegação por satélite, concebido na década de 1970 pela então União Soviética para fornecer posicionamento tridimensional (3D), velocidade e informações de tempo sob quaisquer condições climáticas, em nível local, regional e global (SLATER; MALYS, 1998). Atualmente, é desenvolvido e operado conjuntamente pela *State Corporation Roscosmos* e pelo Ministério da Defesa da Federação Russa, sendo oficialmente denominado *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (<https://www.roscosmos.ru/>) (Visitado em 19/10/2025). Assim como o GPS, o GLONASS é um sistema originalmente militar, mas foi disponibilizado para uso civil em nível global por diversas declarações do Governo Russo (SLATER; MALYS, 1998).

O segmento espacial do GLONASS é composto nominalmente por 24 satélites distribuídos em três planos orbitais separados por  $120^\circ$  e inclinados de  $64,8^\circ$ , com órbitas quase circulares a cerca de 19 100 km de altitude e período orbital de aproximadamente 11 h 15 min. Atualmente, a constelação conta com 28 satélites em órbita, dos quais 24 estão operacionais, 2 sob verificação do contratante principal do satélite e 2 de reserva (<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php>) (Visitado em 19/10/2025). As órbitas são arranjadas de modo a evitar ressonância com a rotação terrestre, garantindo cobertura uniforme da superfície (MONICO, J. F. G., 2008). A Figura 2.12 ilustra a configuração da constelação.

Como consequência, para um observador na Terra, cada satélite passará pelo mesmo ponto no céu após cerca de oito dias siderais, e um dos satélites em cada plano orbital aparecerá na mesma posição no céu no mesmo tempo sideral a cada dia (KAPLAN; HEGARTY, 2017). Devido à maior inclinação orbital ( $64,8^\circ$ ) em comparação ao GPS ( $55^\circ$ ), o GLONASS oferece melhor cobertura em altas latitudes. Com o sistema completo, entre seis e onze satélites são visíveis em qualquer ponto da superfície terrestre (SEEBER, 2003).

O centro de controle é composto pelo sistema de controle central, pela central responsável pela sincronização do tempo GLONASS e pelas estações de rastreamento. O controle central está localizado na cidade de Moscou, e as estações de monitoramento, distribuídas de forma homogênea no território da antiga União Soviética (JEREZ; ALVES, 2018). Desde 2013, essas estações de monitoramento vem sendo ampliadas para outros países como parte do programa de modernização do sistema, visando maior estabilidade e precisão global

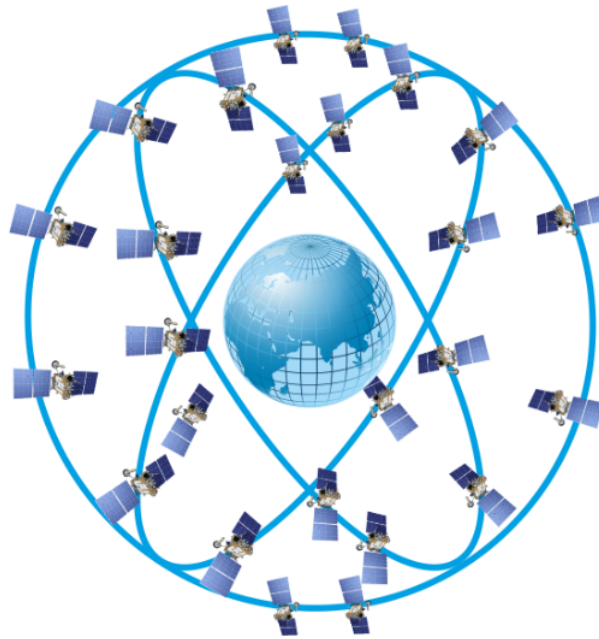


Figura 2.12: Configuração dos satélites GLONASS. Fonte: <https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php>

<https://www.roskosmos.ru/> (Visitado em 19/10/2025). Os parâmetros de navegação e controle são enviados duas vezes por dia para cada um dos satélites. A central de sincronização forma a hora do sistema GLONASS que está relacionada com o "sistema de controle de fase" (PCS), que monitora o tempo dos satélites e sinais de fase (SEEBER, 2003).

O sistema de tempo GLONASS é denominado *GLONASS Time (GLONASST)*, mantido pelo Instituto Russo de Tempo e Frequência (VNIIFTRI) e alinhado ao UTC(SU), com diferença inferior a  $1 \mu\text{s}$  <https://www.vniiftri.ru/en/> (Visitado em 19/10/2025). Diferentemente do GPS, o GLONASS considera os saltos de segundos, além de manter uma diferença constante de 3 horas, em virtude da diferença de fuso entre Moscou e Greenwich (MONICO, 2008).

Desde 2011, o sistema vem passando por um processo de modernização com o lançamento das gerações GLONASS-M, GLONASS-K e GLONASS-K2 (Figura 2.13), que ampliam a vida útil dos satélites, introduzem novas frequências civis (L1, L2 e L3) e aumentam a compatibilidade com outros sistemas GNSS globais, como GPS, Galileo e BeiDou <https://www.roskosmos.ru/> (Visitado em 19/10/2025).

Por fim, como as frequências do GPS e do GLONASS são relativamente próximas, é possível utilizar antenas combinadas e um amplificador comum no mesmo equipamento, o que facilita o desenvolvimento de receptores multifrequenciais capazes de rastrear satélites de ambos os sistemas simultaneamente, aumentando a precisão e a disponibilidade do posicionamento global (SEEBER, 2003).

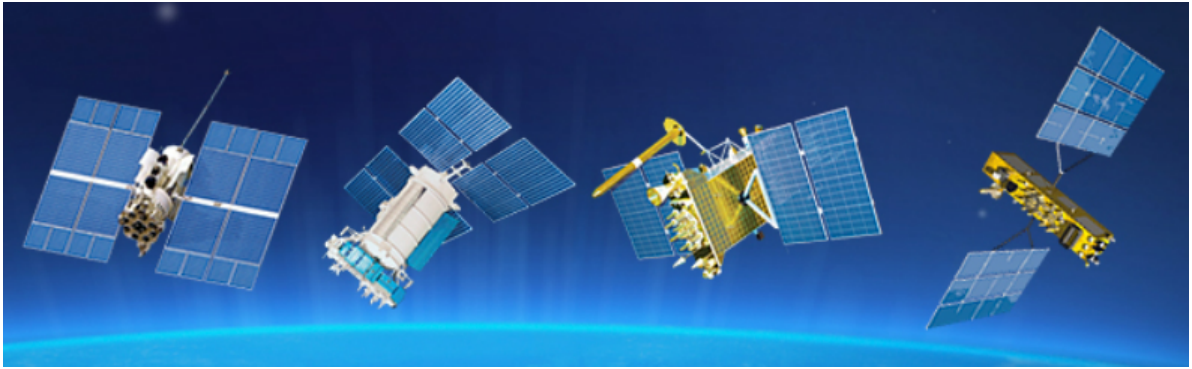


Figura 2.13: Evolução dos satélites GLONASS, de acordo com os tipos de naves espaciais: Glonass (1982-2005), Glonass-M (2003-2016), Glonass-K (2011-2018) e Glonass-K2 (a partir de 2017) Fonte: <https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php> (Visitado em 19/10/2025)

### 2.2.1.3 GALILEO - European Global Navigation Satellite System

O Galileo é o sistema global de navegação por satélite da Europa, que fornece um serviço de posicionamento global altamente preciso e garantido sob controle civil, além de interoperabilidade com os sistemas GPS e GLONASS [https://www.esa.int/Applications/Satellite\\_navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo/What_is_Galileo) (Visitado em 23/10/2025).

O desenvolvimento do sistema iniciou-se no final da década de 1990, com a fase de definição e validação em órbita concluída em 2011, e a disponibilização inicial de serviços em 2016. Atualmente, o programa é gerido pela *European Union Agency for the Space Programme* (EUSPA), em cooperação com a ESA e a Comissão Europeia <https://www.euspa.europa.eu/> (Visitado em 21/10/2025).

O segmento espacial do Galileo é baseado em 30 satélites de órbita média (MEO), distribuídos em três planos orbitais circulares. A altitude é da ordem de 23.600 km, com inclinação de 56° em relação ao plano equatorial e o período orbital é de aproximadamente 14 horas e 04 minutos (MONICO, J. F. G., 2008). Em 2025, a constelação conta com 28 satélites em órbita, dos quais 24 estão operacionais, 2 em manutenção e 2 em reserva ativa <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information> (Visitado em 21/10/2025).

A Figura 2.14 ilustra a configuração atual da constelação.

O segmento de controle aproveita ao máximo a estrutura disponível para o EGNOS, com o acréscimo de algumas estações, em razão de sua abrangência global. Ao todo, são aproximadamente 30 estações distribuídas globalmente (*Galileo Sensor Stations - GSS*) dão apoio a determinação de órbitas e sincronização de tempo. Essas estações proporcionam os dados para os dois GCCs (*Galileo Control Centers*). Um desses centros é responsável pela geração das mensagens de navegação e sistema de tempo, enquanto o outro é res-

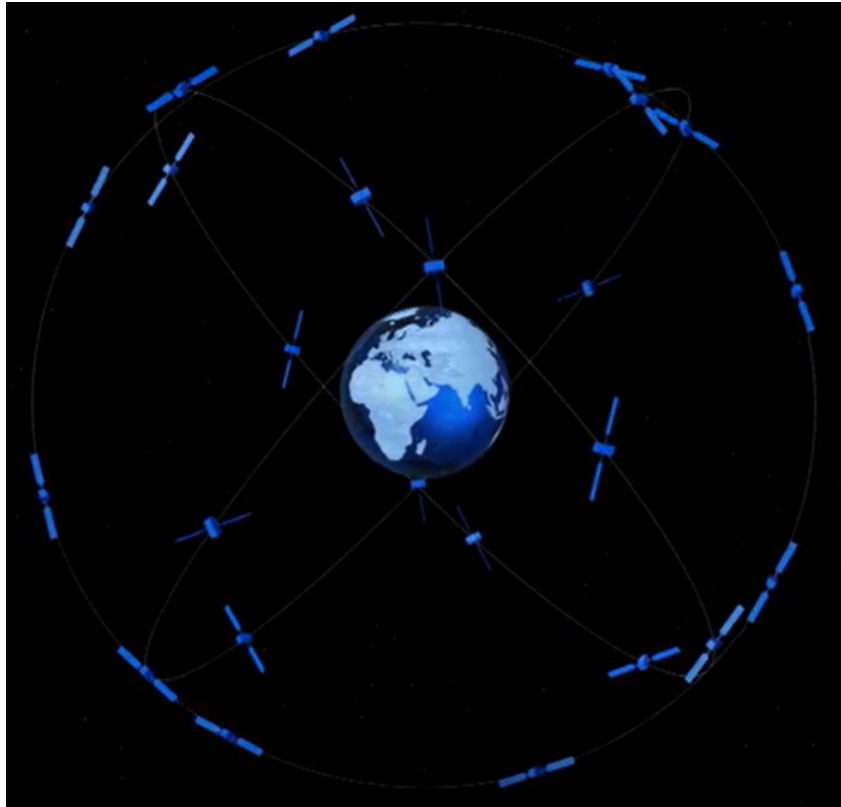


Figura 2.14: Configuração dos satélites GALILEO. Fonte: Adaptado de [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2016/12/Galileo\\_Initial\\_Services](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/12/Galileo_Initial_Services)

ponsável pelo controle de integridade (MONICO, J. F. G., 2008). O controle operacional é atualmente supervisionado pela EUSPA e ESA em cooperação com a indústria europeia, visando alta resiliência e segurança cibernética <https://www.euspa.europa.eu/>.

O sistema de referência de tempo gera o GST (*Galileo System Time*), gerado pela PTF (*Precision Time Facility*), composta por um conjunto de relógios atômicos (H-maser, césio etc.), onde o GST tem duas funções principais (MONICO, J. F. G., 2008):

- manutenção do tempo para navegação, função crítica, necessária para a determinação das órbitas dos satélites e para a sincronização do tempo;
- manutenção do tempo para fins de metrologia, que, embora não seja uma função crítica, é necessária para que o GST esteja vinculado ao TAI e proporcione a disseminação do TUC para os usuários.

Atualmente, o GST é gerido pelo *Galileo Time Service Provider*, sediado em Tcheboksary (República Tcheca), garantindo interoperabilidade temporal com outros sistemas GNSS <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Galileo-System-Time>.

O processo de modernização inclui o desenvolvimento da nova geração de satélites Galileo



Figura 2.15: Segunda geração de satélites Galileo (G2). Fonte: ESA em [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2021/05/Galileo\\_Second\\_Generation](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/05/Galileo_Second_Generation) (Visitado em 24/10/2025)

Second Generation (G2) (Figura 2.15), com lançamento previsto para 2026. Os satélites G2 trarão melhorias em capacidade de transmissão, segurança dos sinais, precisão temporal e sustentabilidade, utilizando propulsão elétrica e tecnologia digital de carga útil. Essa evolução visa assegurar interoperabilidade total e robustez frente a perturbações orbitais e ameaças de interferência [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Second\\_Generation](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/Second_Generation).

#### 2.2.1.4 BEIDOU - Chinese Global Navigation Satellite System

O Sistema de Navegação por Satélite BeiDou (BDS) foi construído e operado de forma independente pela China, visando às necessidades de segurança nacional e ao desenvolvimento econômico e social do país. Como uma infraestrutura temporal e espacial de importância nacional, o BDS fornece serviços de posicionamento, navegação e cronometragem em tempo real, em todas as condições meteorológicas e de alta precisão para usuários globais <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (Visitado em 26/10/2025).

A China formulou uma estratégia gradual de desenvolvimento em três etapas: a primeira em 2000, chamada de BDS-1, foi concluída para fornecer serviços à China; a segunda em 2012, chamada de BDS-2, foi concluída para fornecer serviços à região da Ásia-Pacífico; e a terceira, BDS-3, para fornecer serviços em todo o mundo a partir de 2020 <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (Visitado em 26/10/2025).

O segmento espacial do BDS-3 é composto por 30 satélites — sendo 24 em órbitas médias (MEO), 3 em órbitas geossíncronas inclinadas (IGSO) e 3 geoestacionários (GEO). O segmento terrestre consiste em várias estações terrestres, incluindo estações de controle mestre, estações de sincronização de tempo e estações de monitoramento (Figura 2.16) [BeiDou Navigation Satellite System Development](#). O gerenciamento e a operação das estações de controle são conduzidos pelo Centro de Controle de Satélites de Xi'an, com suporte de uma rede mundial de estações de monitoramento e calibração temporal (<https://www.cnsa.gov.cn/english/>) (Visitado em 26/10/2025).

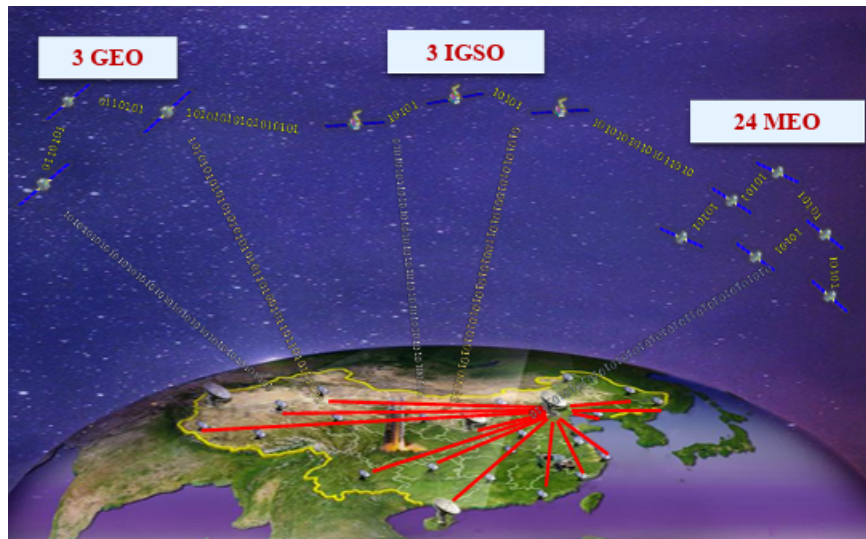


Figura 2.16: Componentes do Sistema BeiDou (BDS-3). Fonte: [BeiDou Navigation Satellite System Development](#)

O BDS tem uma escala de tempo própria (BDT - *Beidou Navigation Satellite System Time*), próxima do UTC, sendo iniciado a 0 hora do dia 1 de janeiro de 2006 do tempo universal coordenado (UTC) e relaciona-se com o UTC através do UTC(NTSC), sendo controlado e mantido pelo *National Time Service Center*, da Academia de Ciências da China (MENDES, 2013).

O sinal Beidou é composto de ondas portadoras, códigos e mensagem de navegação, transmitindo múltiplos sinais em diferentes bandas de frequência. O B1, por exemplo, disponibilizado para fins civis, é constituído pela soma de 2 canais, um quadratura (canal I e canal Q), com as mesmas características, sendo o canal Q reservado. O sinal B2 também é constituído por 2 canais (canal I e canal Q), sendo canal Q reservado. A portadora é modulada com código e mensagem de navegação, usando a técnica de modulação por deslocamento de fase em quadratura (QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying*). Os diferentes códigos são transmitidos usando acesso múltiplo por divisão de código (CDMA - *Code Division Multiple Access*) (MENDES, 2013).

O sistema oferece diversos serviços: o *Open Service* (OS), de uso livre e global; o *Regional Short Message Communication Service* (RSMC), que permite envio bidirecional de

mensagens curtas em áreas cobertas por satélites GEO; o *Satellite-Based Augmentation Service* (BDSBAS), voltado à aviação civil e navegação marítima; e o *Precise Point Positioning Service* (PPP), com acurácia centimétrica para aplicações científicas e industriais (<https://www.caac.gov.cn/>) (Visitado em 26/10/2025).

### 2.2.2 RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

Seguindo a tendência mundial do estabelecimento de redes GNSS permanentes, o IBGE, em colaboração com o Fundo Nacional de Meio Ambiente (FNMA) e com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), iniciou, em 1996, o estabelecimento da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) (FORTES, 1997).

Consiste em um conjunto de estações geodésicas distribuídas nacionalmente (Figura 2.17) e equipadas com receptores GNSS geodésicos e, em alguns casos, também com sensores meteorológicos, coletando informações continuamente. No uso da RBMC está implícito o método de posicionamento relativo, onde a estação desta rede desempenha a função de estação base, cabendo ao usuário ocupar apenas os pontos de seu interesse (IBGE, 2017).

Nas estações da RBMC a coleta das observações GNSS é executada 24 horas por dia, todos os dias do ano. Os dados derivados das observações são coletados uma vez a cada 15 segundos e, quando possível, são enviados de hora em hora de forma automática para o servidor de armazenamento e tratamento de dados do Centro de Controle da RBMC (CCRBMC). Após o seu recebimento, os dados são padronizados (organização e controle de qualidade) e armazenados para só então serem disponibilizados no servidor de dados do IBGE, para que qualquer usuário possa utilizá-lo gratuitamente.

No contexto do Projeto de Ampliação e Modernização da RBMC, a partir de 01/01/2020 a RBMC passou a disponibilizar, gradativamente, dados com intervalo de rastreamento de 1 segundo, no formato RINEX 3 (equipamentos multiconstelação), contemplando todas as capitais brasileiras e mais a estação de FURNAS. Maiores detalhes podem ser encontrados na página da RBMC, em: [Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS](#) (Visitada em 03/08/2022). Atualmente, são 151 estações, onde pouco mais de 60 já rastreiam a uma taxa de 1 segundo, com previsão de se chegar a aproximadamente 80 estações até o final de 2025.



Figura 2.17: Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo. Fonte: IBGE

O conjunto dessas observações estão referenciados a um sistema único de referência (SIR-GAS), criado a partir de uma cooperação entre os países da América do Sul, representados por suas agências nacionais, e instituições internacionais, sob o patrocínio da Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy – IAG*), Instituto Pan-americano de Geografia e História (IPGH) e *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA), com o principal objetivo de estabelecer um sistema de referência geocêntrico para todo o continente, fundamentado nas atuais tecnologias de posicionamento e nas

materializações dos sistemas de referência terrestre, denominadas de *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF), estabelecidas pelo *International Earth Rotation Service* (IERS) (IBGE, 2017).

A materialização dessas estações se dá através de pilares cilíndricos diretamente no terreno ou, em sua grande maioria, engastados na superfície das edificações de instituições parceiras que abrigam as estações e apoiam o projeto RBMC, conforme visualizado na Figura 2.18.



Figura 2.18: Exemplo de Estação GNSS integrante a RBMC. Fonte: IBGE

Contudo, sua implantação nas proximidades de uma estação maregráfica servirá não só como estação base para métodos de posicionamento relativo, mas também como monitoramento geocêntrico dessas estações, uma vez que torna possível avaliar possíveis movimentos verticais da crosta, denominado internacionalmente como VLM (*Vertical Land Motion*) (WÖPPELMANN; MARCOS, 2016).

O ideal é que o equipamento GNSS fosse instalado na mesma estrutura de suporte dos sensores maregráficos, pois a correção do VLM nas observações maregráficas seriam obtidas diretamente dos resultados do processamento das observações GNSS. Estes, por existir requisitos próprios de instalação, raramente é possível.

Estudos realizados em estações da RBMC na região amazônica, no qual ocorrem grandes movimentações de massa d'água devido a sua hidrologia continental, verificou-se que na estação de Manaus (NAUS), por exemplo, ocorrem variações na crosta na ordem de 7 a 8 cm (COSTA et al., 2012b). Mais recentemente, Calado (2023) analisou o VLM em torno das estações maregráficas brasileiras controladas pelo IBGE e constatou que cinco das seis estações ativas atualmente sofrem com problemas de subsidência. Esses exemplos tornam ainda mais evidente a necessidade de detectar, quantificar e remover esses

movimentos verticais (VLM) das séries temporais maregráficas, como afirma [Cazenave e Cozannet \(2014\)](#), fazendo com que possíveis processos de subsidência ou de soerguimento não reflitam erroneamente num aumento ou diminuição do NMM.

## 2.3 Métodos Estatísticos

A estatística constitui uma das áreas centrais do conhecimento científico moderno, sendo definida como a ciência que se ocupa da coleta, organização, análise e interpretação de dados a fim de subsidiar a tomada de decisões ([PINTO; SAADI, 2013](#)). Suas aplicações estendem-se por praticamente todos os campos do conhecimento, incluindo ciências naturais, engenharias, economia, saúde, ciências sociais e ambientais, sendo indispensável em estudos que envolvem variabilidade, incerteza e processos dinâmicos, conforme defendido por ([BOX et al., 2015](#)).

No campo das geociências, a estatística desempenha papel fundamental na análise de dados geofísicos, geodésicos, oceanográficos, climatológicos e ambientais, auxiliando na compreensão de fenômenos complexos como variações do nível do mar, mudanças climáticas, deformações crustais, processos hidrológicos e dinâmica atmosférica. Tais fenômenos são caracterizados por forte dependência temporal, espacial e multiescalar, exigindo ferramentas analíticas capazes de lidar com estruturas de dados complexas, não estacionárias e frequentemente ruidosas ([KANTELHARDT et al., 2002](#)).

Neste contexto, a investigação proposta fundamenta-se na análise de séries temporais provenientes da rede de monitoramento maregráfico instalada ao longo da costa brasileira, complementadas por informações geodésicas e ambientais.

### 2.3.1 Séries temporais

De acordo com [Prates \(2017\)](#), uma série estatística consiste num conjunto organizado de observações referentes a uma mesma variável em função da época, do local ou do fenômeno. Quando essas observações são indexadas explicitamente pelo caráter variável do fator cronológico, temos a chamada série temporal, formalmente representada por ([MORETTIN; TOLOI, 2018](#)):

$$\{Z_t, t = 1, 2, \dots, N\} \quad (2.3)$$

em que  $Z_t$  denota o valor da variável observada no instante  $t$ .

São exemplos de séries temporais os valores diários de poluição na cidade de São Paulo, valores mensais de temperatura na cidade de Cananéia-SP, índices diários da Bolsa de Valores de São Paulo, precipitação anual da cidade de Fortaleza, número médio anual de manchas solares ou até mesmo os registros de marés no porto de Santos (MORETTIN; TOLOI, 2018). O objetivo central da análise de séries temporais é compreender a dinâmica do processo gerador dos dados, identificar padrões estruturais, investigar dependências internas, detectar periodicidades e fornecer subsídios para previsões de curto, médio e longo prazo (BOX et al., 2015).

De modo geral, uma série temporal pode ser decomposta nos seguintes componentes fundamentais:

$$Z_t = T_t + S_t + a_t, \quad (2.4)$$

onde  $T_t$  e  $S_t$  representam a tendência e a sazonalidade, respectivamente, enquanto  $a_t$  uma componente aleatória (MORETTIN; TOLOI, 2018).

### 2.3.2 Previsibilidade em séries temporais

A teoria da informação constitui um dos pilares conceituais para a análise quantitativa de dados e sistemas complexos. Formalmente estabelecida por Shannon (1948), essa teoria fundamenta-se em uma abordagem probabilística para descrever fontes de informação, processos de comunicação e mecanismos de codificação, permitindo quantificar, de maneira rigorosa, conceitos como incerteza, conteúdo informacional e eficiência na representação de dados. Sua aplicabilidade transcende o campo das telecomunicações, estendendo-se a diversas áreas do conhecimento, como estatística, física, biologia e economia, o que a consolida como uma base teórica essencial para a modelagem de processos estocásticos e a interpretação de fenômenos naturais (FIGUEIREDO, 2007; RIOUL, 2018).

Nesse contexto, emerge o conceito de entropia, introduzido por Shannon como a principal medida da incerteza associada a uma variável aleatória. Ela quantifica o grau de desordem ou a quantidade de informação necessária para descrever um determinado conjunto de dados (SHANNON, 1948). Sua forma mais usual, a de Shannon, é dada por (ANTENEODO, 2004):

$$S(X) = - \int dx f(x) \ln f(x) \quad (2.5)$$

Há vários métodos capazes de quantificar a entropia. Entretanto, a escolha entre os métodos depende de fatores como o tamanho da série temporal, o nível de ruído, a necessidade de desempenho computacional e a sensibilidade aos parâmetros. O *Sample Entropy* (SampEn) (RICHMAN; MOORMAN, 2000), por exemplo, é mais sensível ao tamanho da janela (parâmetro  $m$ ) e ao raio de tolerância ( $r$ ). Para séries altamente ruidosas ou curtas, o método pode produzir valores instáveis. Já o *Fast Sample Entropy* (FastSampEn) (PAN et al., 2011), embora mantenha a robustez conceitual do SampEn, a implementação rápida pode ser sensível à distribuição dos dados.

Nesta pesquisa foi utilizado o método *FastApEn*, uma evolução do *ApEn*. O método *ApEn* (*Approximate Entropy*) foi proposto por Pincus (1991) como uma medida da regularidade e previsibilidade de séries temporais ruidosas. Sua principal vantagem reside na capacidade de lidar com séries de tamanho relativamente pequeno, sendo menos exigente computacionalmente em relação à complexidade estrutural da série (PINCUS, 1991; PINCUS; GOLDBERGER, 1994).

Seja  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  uma série temporal de comprimento  $N$ .

1. Para cada  $i = 1, \dots, N - m + 1$ , definimos o vetor:

$$\mathbf{u}(i) = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}\}$$

2. A distância entre dois vetores  $m$ -dimensionais é definida como:

$$d[\mathbf{u}(i), \mathbf{u}(j)] = \max_{k=1, \dots, m} |x_{i+k-1} - x_{j+k-1}|$$

3. Para uma tolerância  $r > 0$ , calculamos:

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{j=1}^{N-m+1} \Theta(r - d[\mathbf{u}(i), \mathbf{u}(j)])$$

em que  $\Theta(\cdot)$  é a função de Heaviside.

4. A entropia aproximada é dada por:

$$\text{ApEn}(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)$$

com:

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r)$$

Sendo:

- $m$ : Dimensão embutida (geralmente  $m = 2$ ).
- $r$ : Tolerância, usualmente uma fração do desvio padrão (DP) da série ( $r = 0.2 \times \text{DP}$ , por exemplo).
- $N$ : Tamanho da série (ou janela) considerada.

No entanto, o  $ApEn$  apresenta duas limitações importantes: a primeira é que depende fortemente do tamanho da amostra e dos parâmetros  $m$ ,  $r$  e  $\tau$ ; e a segunda é sua sensibilidade à inclusão de novos dados, uma vez que considera auto-comparações nas subsequências (PINCUS, 1991; PINCUS; GOLDBERGER, 1994).

O método  $FastApEn$  (*Fast Approximate Entropy*) (TOMĀALA, 2018a; TOMĀALA, 2021) é uma versão computacionalmente otimizada da  $ApEn$  (PINCUS, 1991). Seu cálculo é baseado no mesmo princípio da contagem de padrões similares, mas com simplificações que tornam sua execução mais eficiente para grandes volumes de dados. A principal vantagem é a melhoria significativa no desempenho computacional sem perda expressiva de precisão, o que o torna particularmente útil para grandes conjuntos de dados, como é o caso das séries avaliadas nesta pesquisa.

### 2.3.3 Estacionariedade em séries temporais

Uma questão importante para escolher o tipo de análise apropriado para uma série temporal é decidir se os dados são estacionários ou não (ANTENEODO, 2004). Em outras palavras, quando uma espécie de regularidade possa existir ao longo do tempo no comportamento de uma série temporal (SHUMWAY; STOFFER; STOFFER, 2000).

De acordo com Ferreira (2017), uma série temporal é dita estacionária se sua média e variância são constantes no tempo e sua autocovariância depende apenas da ordem de defasagem. Posto formalmente, um processo  $\{y_t\}$  é estacionário se:

$$\begin{aligned} E(y_t) &= E(y_{t-s}) \\ E[(y_t)^2] &= E[(y_{t-s})^2] \\ E[(y_t - \mu)(y_{t-s} - \mu)] &= E[(y_{t-j} - \mu)(y_{t-j-s} - \mu)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

para todo  $s$  e  $j$  e  $\mu = E(y_t)$  (FERREIRA, 2017).

Em sistemas reais, os dados raramente são estacionários. Se as médias e outras propriedades estatísticas não variam significativamente com o tempo, ou seja, não apresentam

tendências no longo prazo, se diz que os dados são quase-estacionários e na prática são tratados como sendo estacionários, já que esta hipótese leva a simplificações teóricas (ANTENEODO, 2004).

Com base em Granger e Newbold (1974), a presença de não estacionariedade compromete a aplicação direta de diversos métodos estatísticos clássicos, podendo levar a inferências equivocadas e correlações espúrias. Sua identificação constitui etapa essencial da análise de séries temporais.

Dentre os testes estatísticos mais utilizados destacam-se os testes de raiz unitária, como o Dickey–Fuller (DF) e o Augmented Dickey–Fuller (ADF) (DICKEY; FULLER, 1979; DICKEY; FULLER, 1981), o Phillips–Perron (PP) (PHILLIPS; PERRON, 1988), além do teste KPSS (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin) (KWIATKOWSKI et al., 1992b).

Segundo Ferreira (2017), um problema do teste ADF é seu pequeno poder estatístico, que posto de maneira simples torna o teste praticamente incapaz de diferenciar uma série com raiz unitária de uma com raiz “quase” unitária, o que gera um problema bastante sério dado que correção para uma série não estacionária é sua diferenciação, o que implica que se o teste falha, nos leva a diferenciar uma série estacionária e com isso perder muita informação a respeito do processo estudado.

Já o teste PP utiliza a mesma estrutura do teste DF com uma correção que normaliza a matriz de variância e covariância com base nos *clusters* de concentração dessas medidas, limitando o uso adequado do teste para grandes amostras (FERREIRA, 2017).

Dentre os testes alternativos, o mais conhecido é o KPSS (KWIATKOWSKI et al., 1992b). Segundo os autores, o frequente não rejeitar da raiz unitária nos testes ADF/PP pode não significar que a série realmente possui raiz unitária, mas que esses testes tem baixo poder estatístico contra alternativas próximas a raiz unitária, tornando essencial o teste inverso.

No teste KPSS, a série observada  $y_t$  é decomposta como:

$$y_t = \xi_t + r_t + \varepsilon_t \quad (2.7)$$

onde  $\xi_t$  é uma tendência determinística,  $r_t$  um passeio aleatório e  $\varepsilon_t$  um processo de erro estacionário, onde a hipótese nula é que o termo  $r_t$  seja nulo (KWIATKOWSKI et al., 1992b).

Neste estudo, o teste KPSS foi adotado como principal ferramenta para o diagnóstico

da estacionariedade das séries analisadas, fornecendo a base estatística necessária para a aplicação subsequente de métodos robustos capazes de lidar com não estacionariedade e estruturas multiescalares, como os métodos apresentados a seguir.

### 2.3.4 *Detrended Fluctuation Analysis (DFA)*

Tão importante quanto valores é saber como esta série se comporta ao longo do tempo. Ao modelar uma série temporal, o interesse pode estar em investigar o mecanismo gerador da série, fazer previsões de movimentos futuros a curto, médio e longo prazo, descrever o comportamento da série, procurar periodicidades relevantes (MORETTIN; TOLOI, 2018).

Anteneodo (2004) afirma que uma das propriedades mais importantes que se procura determinar ao analisar séries temporais é a denominada persistência, que se refere a memória ou correlação interna da série. Uma série é persistente se valores adjacentes estão correlacionados positivamente, e dita antipersistente se valores adjacentes estão correlacionados inversamente, ou seja, se existe a tendência de valores grandes serem seguidos por valores pequenos (ANTENEODO, 2004).

O método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*), idealizado por (PENG et al., 1994), pode ser aplicado para identificar e mensurar autocorrelação de longo alcance em séries temporais não estacionárias. Sua peculiaridade é permitir a identificação de auto-afinidade e identificação de autocorrelações de longo alcance em séries temporais com tendências (SILVA FILHO, A. M., 2014a).

Desde a sua idealização, é possível encontrar na literatura a aplicação do DFA em diferentes áreas do conhecimento: na física (ZHOU; LEUNG, 2010; GU; ZHOU, 2006; MOVAHED et al., 2006), na matemática (LINHARES, 2016; ZHOU; LEUNG, 2010), na engenharia (SRINIVASAN; SPINNER; RENGASWAMY, 2012; NAGARAJAN; KAVASSERI, 2005), na medicina (IHLEN; VEREIJKEN, 2014; HARDSTONE et al., 2012; IMAI; OKAMOTO, 2008), entre outros.

Sua modelagem se dá com os seguintes passos (SILVA FILHO, A. M., 2014a); (FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014):

Passo 1 – Calcula-se o desvio padrão de cada registro em relação à incidência média da série completa, integrando o sinal  $u_i$  (série original) e obtendo-se a série integrada  $y(k)$  pela seguinte expressão:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (u_i - \langle u \rangle); k = 1, 2, \dots, N \quad (2.8)$$

em que  $u$  denota o valor médio de  $u_i$ , e  $N$ , o total de pontos da série.

Passo 2 – Em seguida a série integrada  $y(k)$  é dividida em intervalos de igual tamanho  $n$  não sobrepostos. E para cada intervalo de tamanho  $n$ , é preciso ajustar um polinômio de grau maior ou igual a 1 a  $y(k)$ , denotado por  $y_n(k)$ . Essa estatística representa a tendência local na amplitude de tamanho  $n$ .

Passo 3 – Logo após, a série integrada  $y(k)$ , é subtraída de  $y_n(k)$  em cada intervalo de tamanho  $n$ , com base na seguinte expressão:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (2.9)$$

e o cálculo anterior é repetido sistematicamente para diferentes amplitudes de tamanho  $n$  variando de  $(4 \leq n \leq \frac{N}{4})$ .

A Figura 2.19 exemplifica bem os passos apresentados acima

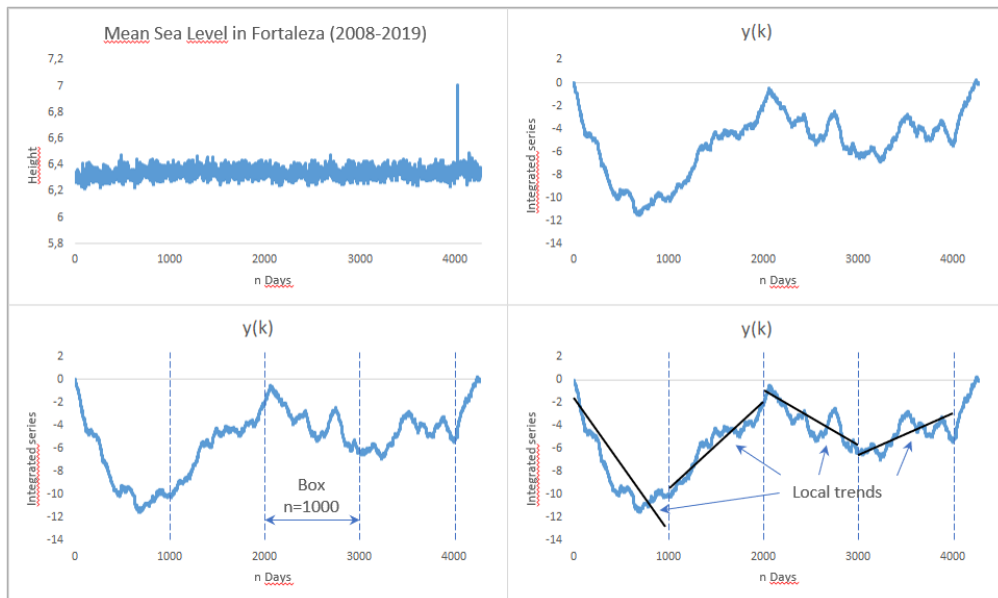


Figura 2.19: Representação gráfica dos passos 1, 2 e 3 do método DFA. Fonte: O autor

Passo 4 – Verificar se  $F_{DFA}(n)$  tem comportamento de acordo com a Eq. 2.10

$$F_{DFA}(n) \sim n^\alpha \quad (2.10)$$

Neste caso,  $\alpha_{DFA}$  representa o expoente de correlação de longo alcance.

$$F_{DFA}(n) \sim an^\alpha \quad (2.11)$$

Aplicando log na Eq. 2.11, tem-se:

$$\log F_{DFA}(n) = \log a + \alpha \log n \quad (2.12)$$

Através do expoente  $\alpha$  obtido por meio do algoritmo do DFA é possível avaliar em que medida a tendência observada na série temporal passada implica em manutenção do comportamento no futuro, indicando um efeito de memória de longa duração na série (SILVA FILHO, A. M., 2014a). No caso de séries temporais não correlacionadas, espera-se  $\alpha = 0,50$ , caso comum em séries sem memória. Se  $\alpha > 0,50$ , pode-se inferir que a série apresenta comportamento persistente de longo alcance. Caso  $\alpha < 0,50$ , espera-se um comportamento antipersistente, complementa o autor. E quando o  $\alpha \cong 1,00$  temos uma série temporal do tipo ruído rosa ( $\frac{1}{f}$  ruído), transição entre a imprevisibilidade do ruído branco e a paisagem muito mais suave do ruído browniano; quando  $\alpha > 1,00$  trata-se de uma série não estacionária, com caminhos aleatórios; quando  $\alpha \cong 1,50$  conclui-se que a série apresenta ruído do tipo browniano (PENG et al., 1994; FREITAS et al., 2009; ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017; RODRIGUES; FILHO; GUEDES, 2022; FERREIRA, 2021).

### 2.3.4.1 DFA com janelas deslizantes

O método de janelas deslizantes, utilizado inicialmente com o expoente de Hurst na avaliação temporal de série financeira (CARBONE; CASTELLI; STANLEY, 2004a), consiste num procedimento estatístico que pode ser sistematicamente repetido em uma ou mais séries temporais de tamanho  $N$ . O objetivo desta metodologia é ter uma visão dinâmica de uma medida estatística como uma função do tempo ( $t$ ) para uma janela de tamanho ( $w$ ) (DA SILVA FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021; SANTOS et al., 2022a). Com isso, é possível construir uma série temporal de expoentes da modelagem DFA (FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021), como visto na figura 2.20.

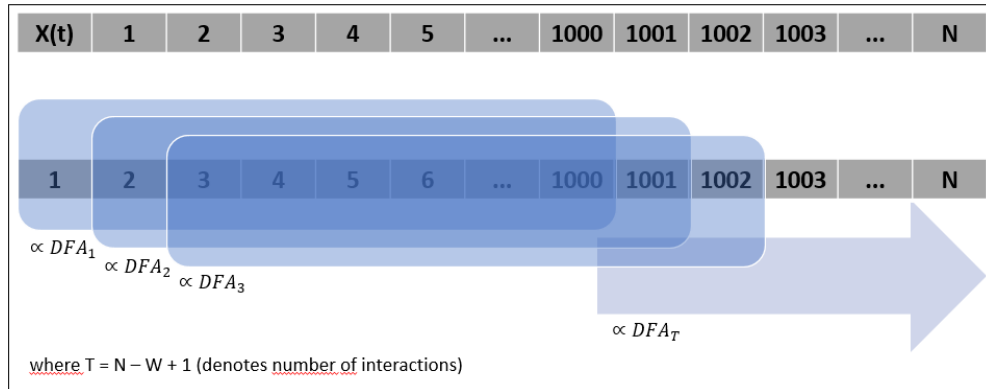


Figura 2.20: Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o DFA para  $W=1000$ .  
Fonte: O Autor

É possível encontrar na literatura a aplicação do DFA com janelas deslizantes em diferentes áreas do conhecimento: ciências exatas (SANTOS et al., 2022b; GUEDES et al., 2022b; DA SILVA FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021), nas ciências ambientais (NIKOLOPOULOS et al., 2021; LONGO et al., 2020), saúde (MERAZ et al., 2022), mercado financeiro (ZHANG; FANG, 2021), entre outros (QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2022; JIANG; WANG, 2024; XU; SONG; GUO, 2012).

### 2.3.5 Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA)

O DCCA (*Detrended Cross-Correlation Analysis*), idealizada por Podobnik e Stanley (2008), é uma generalização do método DFA, utilizado para identificar correlação cruzada entre duas séries temporais em regime não estacionário com o mesmo número de observações.

Assim como o DFA, também já tem sua aplicação consolidada, a citar alguns exemplos: (IQBAL et al., 2020; SHEN; LI; SI, 2015; SHI et al., 2014; ZHAO et al., 2013; ZEBENDE; FILHO, 2009). Embora neste estudo não tenha sido aplicado o DCCA diretamente, é importante citá-lo, uma vez que tanto o DFA quanto o DCCA são bases para o coeficiente de correlação cruzada sem tendência ( $\rho DCCA$ ).

Sua modelagem se dá com os seguintes passos (SILVA FILHO, A. M., 2014a):

Passo 1 - Integram-se duas séries  $\{y_i\}$  e  $\{y'_i\}$  por meio das seguintes expressões:

$$R_k = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_k \quad (2.13)$$

$$R'_k = y'_1 + y'_2 + y'_3 + \dots + y'_k \quad (2.14)$$

Em que  $K = 1, 2, \dots, N$ .

Passo 2 – Divide-se os sinais integrados  $R_k$  e  $R'_k$  em  $(N - n)$  boxes (com superposição) de tamanho  $n$ , cada um contendo  $n + 1$  valores. Para as duas séries temporais, em cada box (que inicia em  $i$  e termina em  $i + n$ ), calcula-se as tendências em cada box, isto é,  $\tilde{R}_{k,i}$  e  $\tilde{R}'_{k,i}$  como sendo a ordenada do ajuste linear (processo dos mínimos quadrados) da série somada.

Passo 3 – Calcula-se a partir do cálculo anterior a covariância dos resíduos em cada intervalo, ou seja,

$$f_{DCCA}^2(n, i) = \frac{1}{(n + 1)} \sum_{k=1}^{i+n} (R_k - \tilde{R}_{k,i})(R'_k - \tilde{R}'_{k,i}) \quad (2.15)$$

Passo 4 – Calcula-se a função de correlação expressa como:

$$F_{DCCA}^2(n) \equiv \frac{1}{N - n} \sum_{i=1}^{N-n} f_{DCCA}^2(n, i) \quad (2.16)$$

Se o procedimento anterior for repetido para diferentes tamanhos de  $n$  sistematicamente, é possível constatar a existência ou não de uma lei de potência em que  $\lambda$  quantifica a correlação cruzada, ou seja,

$$F_{DCCA} \sim n^\lambda \quad (2.17)$$

### 2.3.6 Detrended Cross-Correlation Coefficient ( $\rho$ DCCA)

O coeficiente de correlação cruzada sem tendência ( $\rho$ DCCA), foi modelado por [Zebende \(2011\)](#) e se trata de um coeficiente capaz de quantificar o nível de correlação cruzada, tendo como base o DFA ([PENG et al., 1994](#)) e o DCCA ([PODOBNIK; STANLEY, 2008](#)). Segundo o autor, destina-se a estimação do coeficiente de correlação cruzada em diferentes escalas de tamanho  $n$ , cujo coeficiente possui sua variação limitada entre  $-1$  e  $+1$ , onde  $-1$  representa anticorrelação perfeita e  $+1$  correlação perfeita. Define-se como a relação

entre a função de covariância sem tendência  $F_{DCCA}^2$  e a função de variância sem tendência  $F_{DFA}$ , conforme expresso abaixo:

$$\rho_{DCCA}(n) \cong \frac{F_{DCCA}^2(n)}{F_{DFA1}(n)F_{DFA2}(n)} \quad (2.18)$$

Uma de suas vantagens é a possibilidade de mensurar a correlação entre as séries em escalas diferentes de tempo e sua análise é feita sem a componente tendência que tende a mascarar as verdadeiras correlações (FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014).

De acordo com Kristoufek (2014) e Piao e Fu (2016), o coeficiente padrão de Pearson, amplamente utilizado para medir correlação de séries temporais (GHASEMIFAR et al., 2020; MUTTALIB; AMEEN; MAHMOOD, 2020; VIGNUDELLI et al., 2020), é praticamente inútil para o caso de séries temporais não estacionárias, ao que o DCCA é capaz de estimar o verdadeiro coeficiente de correlação entre as séries com precisão, independentemente da força de não-estacionariedade. Zhao, Shang e Huang (2017) afirmam que o coeficiente de correlação cruzada DCCA apresenta um desempenho mais robusto para séries temporais não estacionárias e apresenta também muitos detalhes sobre as forças de acoplamento em várias escalas de tempo. Para séries temporais contaminadas por tendências externas, o coeficiente de correlação cruzada DCCA é capaz de medir as correlações cruzadas intrínsecas em várias escalas de tempo. O coeficiente de Pearson não é robusto e pode ser enganador se os outliers estiverem presentes porque os registros do mundo real são caracterizados por um alto nível de heterogeneidade (WANG et al., 2013).

Segundo SILVA FILHO, A. M. (2014a), sua construção leva em consideração a ordem dos pares das séries temporais, o que não contraria o princípio básico da análise das séries que é a dependência temporal entre elas, fato que não está presente em alguns coeficientes de correlação cruzada, como o coeficiente de correlação de Pearson.

O coeficiente  $\rho_{DCCA}$  apresenta vasta aplicação documentada na literatura, a citar alguns exemplos: (ZEBENDE; SILVA; FILHO, 2013; FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014; ZEBENDE et al., 2018; GUEDES et al., 2018; JUNIOR et al., 2021a; FIGUEREDO et al., 2023; SANTOS et al., 2025).

### 2.3.7 Detrended Multiple Cross-Correlation ( $DMC_x^2$ )

Enquanto o  $\rho_{DCCA}$ , visto na seção 2.3.6, é utilizado para quantificar correlações bivariadas, com o  $DMC_x^2$  é possível avaliar correlações multivariadas, ou seja, correlações entre duas ou mais séries temporais.

O coeficiente  $DMC_x^2$ , idealizado por Zebende e Filho (2018), surge como uma generalização do  $\rho_{DCCA}$  e permite mensurar simultaneamente a correlação cruzada entre  $y$  e múltiplas variáveis independentes ( $x_1, x_2, x_3 \dots x_k$ ), se tornando uma boa alternativa para análise do nível do mar, uma vez que este sofre influências ou perturbações de vários outros fatores de origem geodésico-meteorológico.

O  $DMC_x^2$ , apesar de mais recente, já validou seu potencial tanto em simulações quanto em estudos empíricos (ZEBENDE; FILHO, 2018; FILHO et al., 2021), com aplicações que abrangem desde análise de crises financeiras (GUEDES et al., 2022a) até modelagem climática (BRITO; ARAÚJO; ZEBENDE, 2019; SOUSA et al., 2025a) e processamento biomédico (RIBEIRO et al., 2025).

De acordo com Zebende e Filho (2018), supõe-se que temos várias séries temporais ( $i + 1$ ) com  $N$  pontos cada, sendo  $\{y\}$  a variável dependente e  $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_i\}$  as variáveis independentes. Logo

$$DMC_x^2(n) \equiv \rho_{y,x_i}(n)^T \rho^{-1}(n) \rho_{y,x_i}(n) \quad (2.19)$$

Aqui

$$\rho_{y,x_i}(n)^T = [\rho_{y,x_1}(n), \rho_{y,x_2}(n), \dots, \rho_{y,x_i}(n)] \quad (2.20)$$

é o vetor de correlações cruzadas sem tendência entre as variáveis preditoras (variáveis independentes) e a variável alvo (variável dependente).  $\rho(n)$  é a matriz de correlação cruzada sem tendência,  $i \times j$ , das variáveis preditoras (variáveis independentes). Por definição,  $\rho_{x_i,x_j}(n) = \rho_{x_j,x_i}(n)$  e  $\rho_{x_i,x_i}(n) = 1$ , portanto:

$$\rho^{-1}(n) \equiv \begin{pmatrix} 1 & \rho_{x_1,x_2}(n) & \rho_{x_1,x_3}(n) & \dots & \rho_{x_1,x_i}(n) \\ \rho_{x_1,x_2}(n) & 1 & \rho_{x_2,x_3}(n) & \dots & \rho_{x_2,x_i}(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \rho_{x_1,x_i}(n) & \rho_{x_2,x_i}(n) & \rho_{x_3,x_i}(n) & \dots & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (2.21)$$

e refere-se a matriz inversa do coeficiente de correlação cruzada das variáveis independentes.

Considerando as correlações DCCA (*Detrended Cross-Correlation Analysis*) entre as variáveis analisadas, temos as seguintes relações:

- $\rho_{y,x_1}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_1$
- $\rho_{y,x_2}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_2$
- $\rho_{y,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_3$
- $\rho_{x_1,x_2}$ : coeficiente DCCA entre  $x_1$  e  $x_2$
- $\rho_{x_1,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $x_1$  e  $x_3$
- $\rho_{x_2,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $x_2$  e  $x_3$

Compreendido entre  $0 \leq DMC_x^2 \leq 1$ , o mesmo pode ser dividido em intervalos, propondo uma intensidade de correlação cruzada múltipla sem tendência, conforme tabela 2.2.

Tabela 2.2: Intensidade de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência

Intervalos $DMC_x^2$	Nível de Intensidade
0,0 $\mapsto$ 0,2	muito fraca
0,2 $\mapsto$ 0,4	fraca
0,4 $\mapsto$ 0,6	média
0,6 $\mapsto$ 0,8	forte
0,8 $\mapsto$ 1,0	muito forte

Fonte: Adaptado de [Zebende e Filho \(2018\)](#)

### 2.3.7.1 $DMC_x^2$ com janelas deslizantes

Seguindo o mesmo princípio do DFA com janelas deslizantes, apresentado na seção 2.3.4.1, o  $DMC_x^2$  com janelas deslizantes é utilizado para mensurar o grau de dependência temporal entre as séries de forma dinâmica.

De acordo com [Guedes, Filho e Zebende \(2021\)](#), um novo parâmetro é adicionado,  $w$ , como sendo o comprimento da janela, como pode ser visto na figura 2.21. Portanto, o coeficiente múltiplo será uma função do comprimento  $N$ , da escala de tempo  $n$ , e do comprimento da janela deslizante  $w$  (variando com o tempo). Ainda segundo os autores, as janelas deslizantes variam entre 1 e  $(N + 1 - w)$ , sendo esta variação o tempo  $\tau$ .

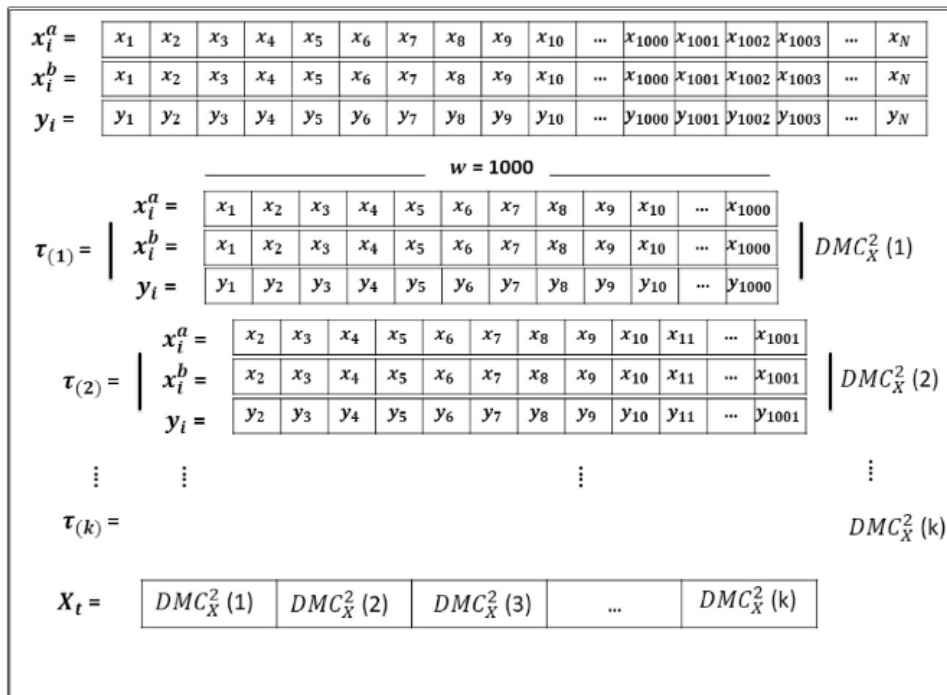


Figura 2.21: Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o  $DMC_x^2$ . Fonte: (GUEDES; FILHO; ZEBENDE, 2021)

---

## Resultados

---

Neste capítulo, são apresentados nas próximas três seções os resultados alcançados nesta tese de doutorado em formato de artigo, conforme já mencionado na seção 1.3.

Na seção 3.1 é apresentado o artigo intitulado ”**O avanço do nível do mar e suas relações com variáveis não oceânicas: uma análise bibliométrica**”, publicado na *Revista Brasileira de Cartografia* (DOI <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>), onde são apresentados por meio de técnicas bibliométricas um panorama geral de como o tema “nível do mar” vem sendo estudado ao longo do tempo e suas relações com seus fatores perturbadores, tais como a subsidência da terra e fatores climáticos, que técnicas estão sendo utilizadas e quais os principais achados.

Já na seção 3.2 é apresentado o artigo intitulado ”**O Nível do Mar no Litoral Brasileiro: Uma Abordagem com Janelas Deslizantes**”, publicado no *Journal of South American Earth Sciences* (DOI <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105360>), foram utilizadas as séries maregráficas de estações do litoral brasileiro gerenciadas pelo IBGE e aplicado o método de análise DFA com o procedimento das janelas deslizantes. O objetivo é avaliar as flutuações das séries temporais de cada uma das estações maregráficas do litoral brasileiro no período de 2002 a 2020 de forma dinâmica e fornecer respostas as mudanças de comportamento dos níveis do mar no Brasil em função do tempo, motivados principalmente pelas alterações de amplitude e de fatores climáticos ao longo de toda a costa brasileira.

Por fim, na seção 3.3 é apresentado o artigo intitulado ”**A influência de forças não oceânicas no nível médio do mar da costa brasileira: uma abordagem bivariada e multivariada**”, na qual foram utilizadas as mesmas séries maregráficas (com dados até 2023) e correlacionadas com outras variáveis de origem não oceânica (altimetria por GNSS para avaliar o comportamento da subsidência, além da precipitação e temperatura do ar) aplicando o método de análise  $DMC_x^2$ . Nesta mesma seção (3.3.3.2) também foram feitas análises de entropia para mensurar o grau de previsibilidade da série temporal.

### ***3.1 O avanço do nível do mar e suas relações com variáveis não oceânicas: uma análise bibliométrica***

#### **RESUMO**

Aproximadamente 70% do nosso planeta é ocupado por águas, que em sua grande maioria forma os nossos oceanos. Além de nos encantar com sua beleza, o mar com seu balé vertical rigorosamente regular, impulsionado pelas forças gravitacionais, vem sofrendo perturbações cada vez mais intensas, ocasionando sua elevação em virtude de diversos fatores, principalmente ambientais e climáticos. Parte integrante de um dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima), agenda mundial adotada durante a Cúpula das Nações Unidas, composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidas até 2030, o aumento do nível do mar vem preocupando autoridades governamentais, não governamentais e pesquisadores há algum tempo, principalmente quando os cenários futuros não são nem um pouco animadores. Esses riscos são ainda mais acentuados quando nos referimos as regiões costeiras, pois as consequências são sentidas de uma forma muito mais direta e acentuada, tais como: erosão das praias, inundações costeiras, perda de ecossistemas, entre outras, impactando tanto do ponto de vista social quanto econômico. Com o intuito de contribuir com pesquisas relacionadas ao tema, por meio de técnicas bibliométricas, o referente estudo analisou 35 artigos entre os anos de 2009 e 2021 extraídos da base de dados Scopus com a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos como forma de avaliar quantitativamente essas pesquisas, entre elas: tendências históricas e geográficas, principais periódicos e instituições, características de palavras-chave e análise de rede de citações. O objetivo é ter um panorama geral de como o tema “nível do mar” vem sendo estudado ao longo do tempo e suas relações com seus fatores perturbadores, tais como a subsidência da terra e fatores climáticos, que técnicas estão sendo utilizadas e quais os principais achados.

**Palavras-chave:** Nível Médio do Mar. GNSS. Séries Temporais.

#### **ABSTRACT**

Approximately 70% of our planet is occupied by water, which for the most part forms our oceans. In addition to enchanting us with its beauty, the sea with its strictly regular vertical ballet, driven by gravitational forces, has been suffering increasingly intense disturbances, causing its elevation due to several factors, mainly environmental and climatic. An integral part of one of the sustainable development objective (ODS 13 - Action against Global Climate Change), a global agenda adopted during the United Nations Summit, consisting of 17 goals and 169 targets to be achieved by 2030, the sea level rise has been worrying governmental, non-governmental and researchers for some time, especially when the future scenarios are not encouraging at all. These risks are even more accentuated when we refer to coastal regions, as the consequences are felt in a much more direct and

accentuated way, such as: erosion of beaches, coastal flooding, loss of ecosystems, among others, impacting both from the point of view of social as well as economic. In order to contribute to research related to the topic, through bibliometric techniques, the referring study analyzed 35 articles between the years 2009 and 2021 extracted from the Scopus database with the application of mathematical and statistical methods as a way of quantitatively evaluating these researches, among them: historical and geographic trends, main journals and institutions, keyword characteristics and citation network analysis. The objective is to have an overview of how the theme “sea level” has been studied over time and its relationship with its disturbing factors, such as the land subsidence and climatic factors, which techniques are being used and which are the main found.

**Keywords:** Mean Sea Level, GNSS, Time Series.

### 3.1.1 Introdução

O mar sempre nos encanta com sua beleza e com o seu “balé” vertical rigorosamente regular, impulsionado pelas forças de atração gravitacional entre a Terra, o Sol e a Lua, muito embora todo esse rigor venha sendo perturbado de uma forma cada vez mais intensa, ocasionando sua elevação em virtude de diversos fatores, mas principalmente, pela emissão de gases que ao chegar a atmosfera eleva a temperatura do planeta e, conseqüentemente, o volume dos oceanos.

Essa preocupação não é recente por parte das autoridades governamentais, não governamentais e pesquisadores no mundo inteiro. Publicação de setembro de 2013 da revista *National Geographic* (FOLGER, 2013), baseado no relatório da OECD (2008) sobre as 136 maiores cidades portuárias do mundo, afirma que com o planeta mais quente, a elevação do nível dos oceanos se acentua, em que estima-se que em 2070 150 milhões de pessoas nestas cidades estariam em risco e uma riqueza avaliada em 35 trilhões de dólares ameaçados. Esse aumento do nível do mar se daria principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis pela sociedade que ao liberar na atmosfera dióxido de carbono e outros gases do efeito estufa, aqueceram a Terra em mais de meio grau Celsius ao longo do século passado.

O quinto relatório apresentado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), mostra que a expansão térmica dos oceanos e o derretimento de geleiras têm sido os contribuintes dominantes para o aumento do nível médio do mar global do século 20. Observações desde 1971 indicam que esse aumento do nível médio do mar global vai continuar para além de 2100 (CHANGE; others, 2013).

Compreender os mecanismos de mudança do nível do mar é uma das maiores preocupações das geociências na era das mudanças climáticas, com conseqüências implícitas para os

ecossistemas costeiros e as sociedades humanas (SIMAV et al., 2012). Para Fenoglio-Marc et al. (2012), o aumento do nível do mar traz implicações importantes, tais como: erosão da praia, inundações de terras, aumento da salinização dos aquíferos costeiros, danos causados por tempestades e perda de ecossistema costeiro, sendo considerado também um excelente indicador de processos relacionados as mudanças climáticas (TSIMPLIS et al., 2011).

Desde o início de 1993, as variações do nível do mar são medidas com precisão por altimetria de satélite (FENOGLIO-MARC et al., 2012). Entretanto, as alterações do nível médio do mar global derivadas da modelagem não correspondem às medições reais do nível do mar e não devem ser confiáveis. Compilações de maregrafos individuais de qualidade e comprimento suficientes fornecem informações muito mais confiáveis e seguras para o monitoramento do nível do mar (PARKER; OLLIER, 2015). Por outro lado, vale lembrar que essas estações maregráficas registram o nível do mar em relação às rochas da crosta terrestre e, portanto, são afetados tanto pela variação absoluta do nível do mar quanto pelos movimentos verticais da crosta (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010).

Adicionalmente, Moghadam (2017) se utilizou das regras que regem uma rede neural artificial para identificar um conjunto de variáveis meteorológicas de grande escala que afetam significativamente a variabilidade do nível do mar.

Portanto, analisar outras componentes de variação altimétrica aliada a séries meteorológicas, tais como temperatura e precipitação, por exemplo, podem nos ajudar a entender melhor os resultados obtidos na análise histórica de tais séries maregráficas. Para tal, este estudo revisou 35 artigos entre os anos de 2009 e 2021 retirados da base de dados *Scopus*. Por meio da bibliometria, o objetivo é mapear a literatura sobre o nível médio do mar e suas relações com a altimetria por satélite e/ou fatores meteorológicos, organizando e identificando as principais linhas de pensamento, avaliando o impacto da produção científica de um país sobre o tema e a produção científica resultante de investimentos de pesquisa de agências de fomento, entre outros.

O artigo está estruturado em seções que visam esclarecer quais os métodos utilizados e seus critérios de seleção, além dos principais resultados encontrados e suas consequentes discussões que elucidam tais resultados.

### 3.1.2 Materiais e Métodos

#### 3.1.2.1 Métodos

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas técnicas de análise bibliométrica. Estas, são definidas como um conjunto de métodos para analisar quantitativamente as publicações acadêmicas por meio de técnicas estatísticas, com potencial para traçar as tendências de pesquisa e questões populares em nível global (SHI et al., 2020). Araújo (2006), define como técnica quantitativa e estatística para medir índices de produção e disseminação de conhecimento científico.

Fazendo um breve relato, o termo “*statistical bibliography*”, hoje Bibliometria, foi usado pela primeira vez em 1922 por Hulme, antecedendo à data a qual se atribui a formação da área de Ciência da Informação, com a conotação de esclarecimento dos processos científicos e tecnológicos, por meio da contagem de documentos. Posteriormente, foi utilizado por Gosnell em 1944, e Raisig em 1962, embora existisse um consenso que o termo não era de todo satisfatório (GUEDES; BORSCHIVER, 2005). Assim, o termo Bibliometria, ou *Bibliometrics*, é sugerido para denominar a área em questão (PRITCHARD, 1969).

Outros métodos de revisão poderiam ter sido utilizados, cada um com suas vantagens e limitações, mas a facilidade de busca sistematizada, a identificação de tendências e a criação de indicadores favoreceram a escolha da bibliometria. As abordagens bibliométricas, pelas quais a ciência pode ser retratada por meio dos resultados obtidos, baseiam-se na noção de que a essência da pesquisa científica é a manifestação constituinte desse conhecimento (OKUBO, 1997).

Para ajudar na sintetização dos dados e geração de gráficos e/ou tabelas, foi utilizada também a ferramenta “Bibliometrix” (ARIA; CUCCURULLO, 2017), pacote desenvolvido em R que fornece rotinas para as análises bibliométricas e construções das redes de có-citação, acoplamento, análise de colaboração científica e de palavras-chaves, entre outros (mais detalhes em: <https://www.bibliometrix.org/index.html>).

#### 3.1.2.2 Critérios de Seleção

Inicialmente, dentre várias bases de dados (*Web of Science, Scopus, Google Scholar, etc.*), definimos por utilizar a base de dados *Scopus* por ser o maior banco de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, oferecendo uma visão abrangente da produção de pesquisa do mundo em diversas áreas do conhecimento, além de ferramentas inteligentes para rastrear, analisar e visualizar pesquisas (mais detalhes em: <https://service.elsevier>

.com/app/home/supporthub/scopus/)).

Posteriormente, a escolha dos termos-chave é dada como uma etapa fundamental no processo de revisão porque terá uma influência direta nos resultados da análise. Neste momento, por se tratar de temas bem específicos, ser muito rígido na escolha dos termos poderia restringir demais a consulta, inviabilizando a revisão.

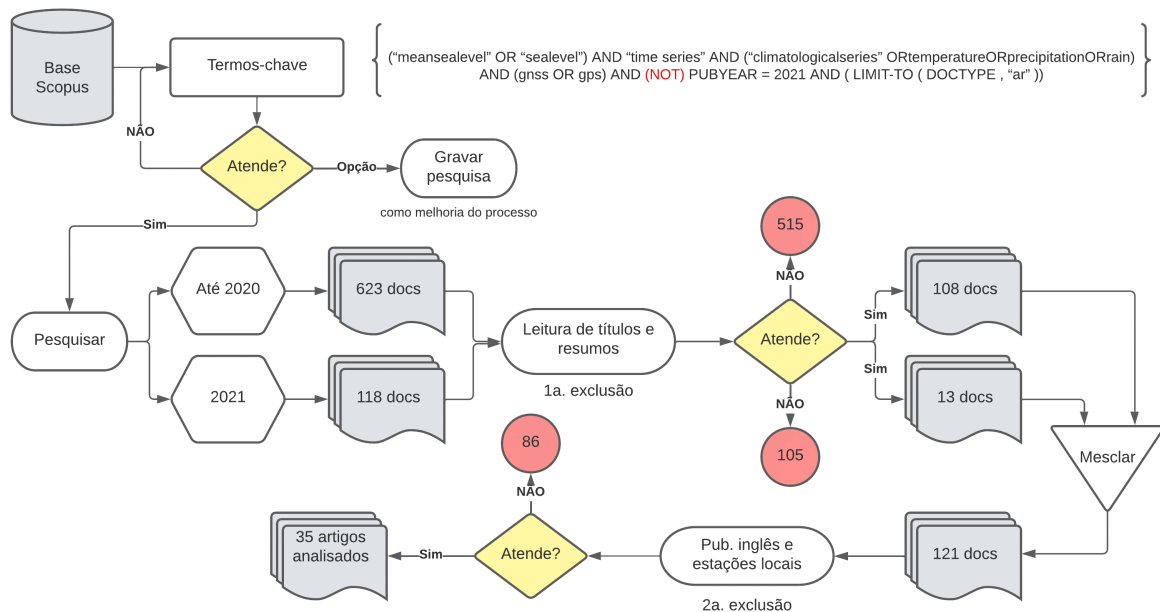


Figura 3.1: Fluxograma do processo de seleção dos artigos relacionadas ao tema nível do mar, 2009 – 2021. Fonte: Lucidchart. Nota: Elaborado pelos autores

Como esta revisão teve como foco a avaliação do nível médio do mar e suas relações com variáveis altimétricas e meteorológicas, foram utilizados os termos “*mean sea level*” ou simplesmente “*sea level*”, em adição a “*climatological series*” ou “*temperature*” ou “*precipitation*” ou “*rain*”, em adição ao termo “gnss” ou “gps”. A primeira consulta foi realizada em outubro de 2021 e limitou-se apenas as publicações dos anos anteriores e do tipo artigo, resultando em 623 publicações. Já em 2022, repetiu-se os mesmos termos utilizados anteriormente, desta vez inserindo o ano de 2021, resultando mais 118 artigos.

Tal como apresentado no fluxograma da figura 3.1, o primeiro critério de exclusão foi com base na leitura dos títulos e, em muitos casos, de seus resumos, resultando 121 documentos. Nestas exclusões, além das publicações desconectadas que sempre contaminam o processo de seleção, boa parte desses artigos referiam-se apenas a missões altimétricas por satélite, a exemplo, as missões Jason 1, Jason 2 e Topex/Poseidon.

De uma forma mais criteriosa, num segundo critério de exclusão, foram eliminados outros 86 documentos. Neste momento, interessava-se apenas as publicações na língua inglesa

e aquelas que analisaram as flutuações do nível médio do mar por meio de estações maregráficas locais. A explicação é óbvia, uma vez que essas estações maregráficas trazem a situação real do local, ao contrário das missões altimétricas.

Por fim, após os critérios de inclusão e exclusão, foram analisadas nesta revisão 35 publicações totais entre os anos de 2009 e 2021. Um ponto positivo a se destacar é que não foram feitas porcentagens de seleção para o resultado final. Os artigos foram analisados um a um, diminuindo consideravelmente ou até mesmo eliminando possíveis vieses na análise equivocada do estudo.

### 3.1.3 Resultados e Discussões

#### 3.1.3.1 Visão Geral

Nesta pesquisa, foram selecionados 35 documentos entre os anos de 2009 e 2021, sendo todos do tipo artigo científico, de acordo com os próprios critérios de seleção. Com esses números, foram obtidos uma média de 2,7 publicações e 58,5 citações anualmente, sendo 21,7 a média de citações por documento. De acordo com a figura 3.2, podemos ver a quantidade de publicações ao longo dos anos, assim como o número de citações relacionadas as respectivas publicações, o que não significa dizer que a citação ocorreu no mesmo ano de sua publicação.

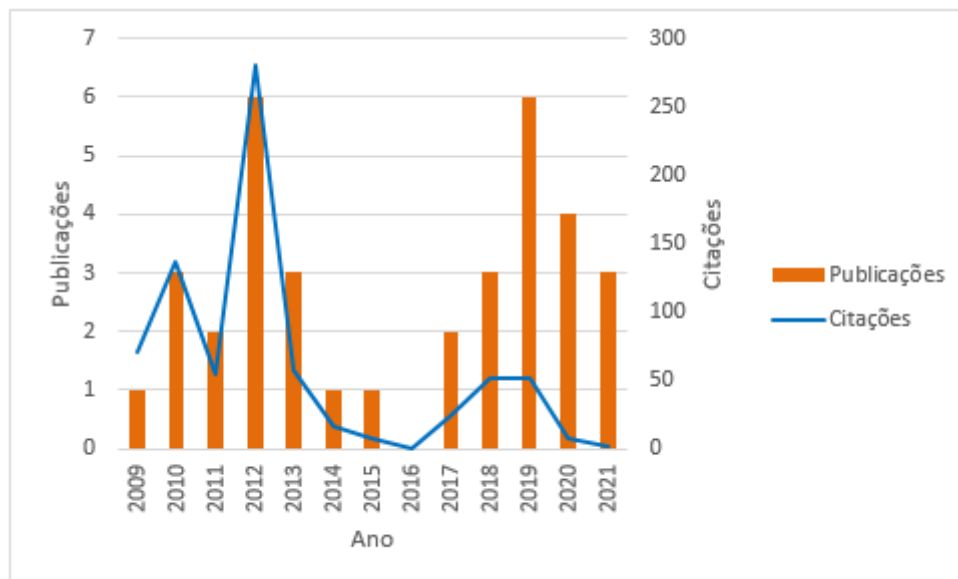


Figura 3.2: Quantidade de publicações anuais e respectivas citações relacionadas ao tema nível do mar, 2009 – 2021. Fonte: Scopus. Nota: Elaborado pelos autores

Ainda com relação a figura 3.2, é notório ver a alta variabilidade das publicações e citações

(68% e 131% de variação em torno da média, respectivamente), inviabilizando qualquer tentativa de tendência. No tocante as publicações percebemos um comportamento atípico, chegando a zerar em 2016 e dois picos em 2012 e 2019. Achar uma resposta para tal cenário não é uma tarefa fácil, mas o fato de termos relatórios do IPCC em anos posteriores podem ajudar a compreender tal cenário.

Outra questão é o porquê de as publicações só terem iniciado em 2009, visto que as obtenções de coordenadas por satélite originaram-se ainda na década de 50. A primeira resposta é que as primeiras estações GPS contínuas começaram a operar perto de marégrafos só a partir de 1994 (SCHÖNE; SCHÖN; THALLER, 2009) e que só então as mesmas passaram a atingir um nível de maturidade adequado para a comparação de campos de velocidade vertical de alta precisão (FADIL et al., 2011); a segunda, é que a seleção foi muito específica, relacionando dados mareográficos com dados GNSS e dados meteorológicos.

Com relação as citações, percebe-se uma grande quantidade em 2012, em que 2/3 destas referem-se a apenas 2 das 6 publicações do ano em questão (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2012); (WÖPPELMANN; MARCOS, 2012). Como esperado, a partir de 2012 a quantidade de citações vai diminuindo, visto que quanto mais recente for, menor é a quantidade de pessoas que leram as respectivas publicações.

Adicionalmente, 397 palavras-chave foram utilizadas por 113 autores. Destes, 4 foram de autoria única e outros 109 compartilhados.

### 3.1.3.2 Principais Países

Embora estejamos falando aqui dos principais países, na verdade estamos nos referindo a nacionalidade de seus principais autores. A figura 3.3 mostra a França, os Estados Unidos e a China como os países mais influentes, seguido de Austrália, Alemanha, Holanda, Itália, Nova Zelândia, Peru e Reino Unido fechando o grupo dos 10 principais, de modo que juntos contribuem com quase 88% das publicações totais. Quase metade refere-se apenas as três primeiras: França com 27,2%, Estados Unidos com 12,8% e a China com 9,6, totalizando 49,6%. Com relação as citações, a França permanece liderando com 331 (44,9%), seguida pela Alemanha com 128 citações (17,4%), sendo ambas responsáveis por quase 2/3 da quantidade de citações totais. Na sequência, temos: Estados Unidos com 12,9%, Reino Unido com 8,6%, Holanda com 5,7%, Austrália com 5%, Nova Zelândia com 2,7% e Tailândia com 1,9%, o que juntas somam mais de 99% de todas as citações.

Como relatado anteriormente, o aumento do nível do mar é uma preocupação mundial, em que a expansão térmica dos oceanos e o derretimento de geleiras como principais

## Country Scientific Production

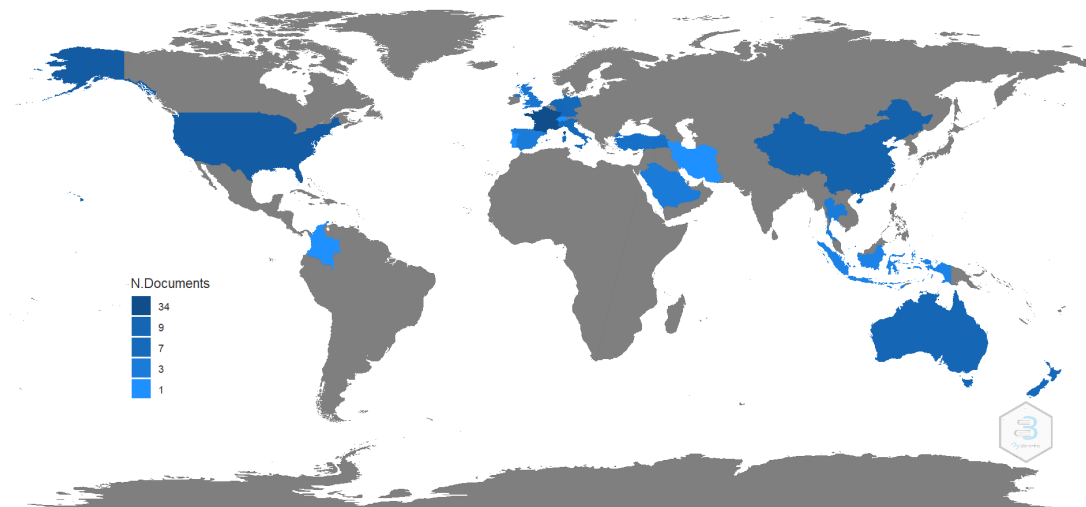


Figura 3.3: Publicações por países de origem relacionadas ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny

contribuintes (CHANGE; others, 2013). Percebemos uma grande quantidade de autores que se utilizam de dados maregráficos fornecidos principalmente pelo “*Permanent Service for Mean Sea Level*” ou Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar (PSMSL) para analisar o comportamento do nível do mar nas escalas globais (SCHÖNE; SCHÖN; THALLER, 2009); (RAY; BECKLEY; LEMOINE, 2010); (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2012); (KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018a), mas há também aqueles que focam nas análises mais pontuais (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010); (TSIMPLIS et al., 2011); (SARAMUL; EZER, 2014); (PARKER, 2018); (DODET et al., 2019); (BORETTI, 2021), se preocupando principalmente com as regiões costeiras dos países que podem trazer implicações importantes, como erosão da praia, inundação de terras, aumento da salinização dos aquíferos costeiros, e que podem trazer impactos diretos aos povos que ali habitam, tanto do ponto de vista social quanto econômico (FENOGLIO-MARC et al., 2012).

### 3.1.3.3 Palavras-Chave

Conforme dito anteriormente, 397 palavras-chave foram utilizadas por 113 autores. Desse total, as 12 palavras mais relevantes foram em número de ocorrências: “*sea level change*” (25), “*tide gauge*” (24), “*sea level*” (23), “*satellite altimetry*” (18), “*tide gages*” (16), “*gps*” (15), “*subsidence*” (13), “*tide gauges*” (10), “*mediterranean sea*” (8) e “*glogal positioning system*” (7), “*sea level rise*” (7) e “*atlantic ocean*” (6). Rapidamente podemos observar que existe alguns sinônimos nesse grupo, sabendo que estas são extraídas de

forma automática das publicações e traduzem a realidade de que cada autor quer dizer no momento, podendo ser diferenciadas pelo simples fato de num momento estar no singular e em outro no plural, por exemplo. Alguns programas permitem a utilização de banco de dados de palavras com o intuito de agruparmos aquelas com significados semelhantes, também conhecidas como “thesaurus”, mas não conseguimos encontrar uma possibilidade de utilizarmos deste artifício dentro do bibliometrix. Se possível fosse, as 12 palavras mais utilizadas poderiam ser apenas 7, tais como: “*sea level*” (“*sea level change*”, “*sea level*” e “*sea level rise*”), “*tide gauge*” (“*tide gauge*”, “*tide gages*” e “*tide gauges*”), “*satellite altimetry*”, “*gps*” (“*gps*” e “*global positioning system*”), “*subsidence*”, “*mediterranean sea*” e “*atlantic ocean*”, contabilizando 55 ocorrências (31,98%), 50 (29,07%), 18 (10,47%), 22 (12,79%), 13 (7,56%), 8 (4,65%) e 6 (3,49%), respectivamente.

A nuvem de palavras da figura 3.4 destacam bem as palavras-chave supracitadas.

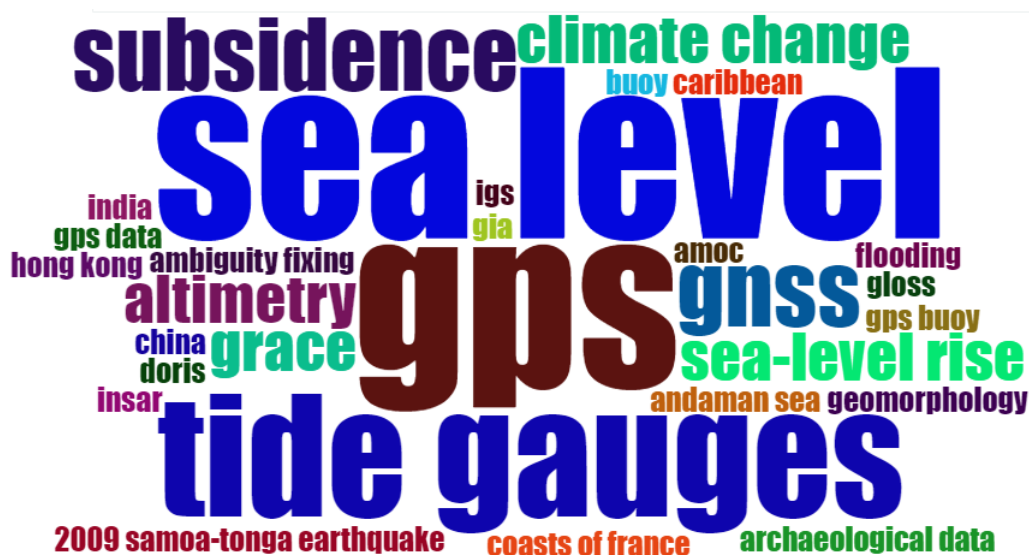


Figura 3.4: Nuvem de palavras-chave relacionadas ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny

Curiosamente, as 8 palavras seguintes de maior relevância não trazem essa característica de agrupamento visualizado nas 12 primeiras, a saber: “*atmospheric pressure*” (6), “*time series*” (6), “*uncertainty analysis*” (6), “*climate change*” (5), “*glacial geology*” (5), “*trend analysis*” (5), “*China*” (4), a exceção de “*sea level change*” com outras 5 ocorrências a se juntar ao grupo “*sea level*”.

As palavras-chave também se relacionam e a isto dá-se o nome de có-ocorrência, ou seja, a frequência com que duas palavras são usadas juntas em artigos. Para cada palavra, sua có-ocorrência com outra palavra é analisada, junto com sua frequência (OKUBO, 1997). Ainda segundo o autor, o pressuposto subjacente ao método é que có-palavras podem ser utilizadas para identificar e representar redes específicas de um determinado tipo de pesquisa.

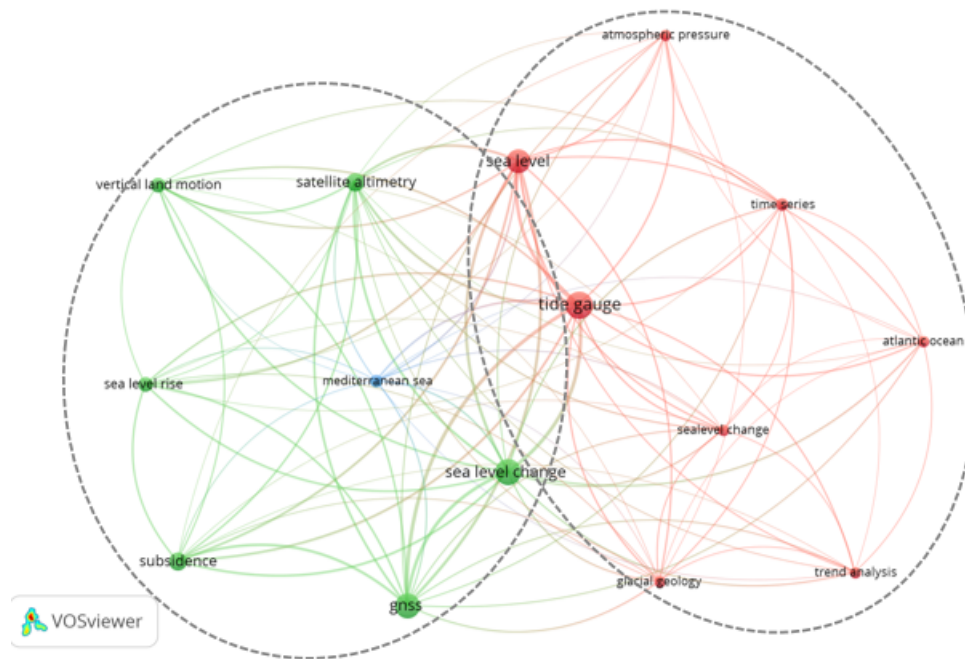


Figura 3.5: Rede de có-ocorrência de palavras-chave. Fonte: Vosviewer. Adaptado pelos autores

Percebemos esta realidade na figura 3.5, criada a partir do Vosviewer, software utilizado como ferramenta para construção e visualização de redes bibliométricas. O conjunto de palavras podem ser divididos em dois “clusters”, circulado em preto pontilhado, que nos mostram de um lado (vermelho) o nível do mar, as estações maregráficas e séries temporais basicamente, e o outro lado (verde) que apontam para o estudo da variação da superfície da terra e seus sensores e satélites aos quais tem condições de mensurar tal variação. Em outras palavras, o *cluster* dos movimentos absolutos. Na figura 3.5, as palavras-chave são representadas por nós e os arcos são suas ligações com outros nós ou outras palavras-chave. Os tamanhos de cada nó indicam a importância de cada palavra-chave. Percebemos, portanto, que as estações maregráficas se relacionam com o nível do mar, aos quais são responsáveis pelo seu monitoramento, e que esses dados são correlacionados com séries oriundas da altimetria por satélite e das séries GNSS para correção ou eliminação do movimento vertical da terra, correlações estas vistas em quase todos os artigos da pesquisa.

#### 3.1.3.4 Periódicos mais relevantes

Para divulgar pesquisas relacionadas ao tema avanço do nível do mar e suas relações com variáveis não oceânicas foram utilizados 20 periódicos entre os anos de 2009 a 2021. Destes, os 7 mais relevantes com duas ou mais publicações são: *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *Advances in Space Research*, *Global and Planetary Change*, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *Journal of Coastal Research*, *Nonlinear Engineering* e

*Ocean and Coastal Management*. Os três primeiros são responsáveis por 16 dos 35 artigos, o que corresponde a quase metade de todas as publicações (45,71%).

Segundo [MATHANKAR \(2018\)](#), o número de artigos é um indicador que reflete a produção científica, medida pela contagem de “papers”, enquanto que o número de citações pode ser considerado uma medida do impacto dos artigos citados, bem como de sua atualidade e utilidade. Presume-se que um artigo deve ter uma certa qualidade para ter impacto na comunidade científica ([MATHANKAR, 2018](#)).

Quem mais publica ou quem mais gera produção científica não significa dizer que necessariamente será o mais citado. Um exemplo disto é que o *Journal of Geophysical Research: Oceans* é o periódico que teve mais publicações, sendo cinco ao todo. No entanto, no quesito citação o referido periódico só aparece na quinta colocação com 37 citações, dividindo a posição com o *Geophysical Journal International* e superado pelo *Geophysical Research Letters* com 44, *Journal of Geophysical Research* com 99 e *Geophysical Research Letters* com 111 citações, conforme pode ser visto na figura 3.6.

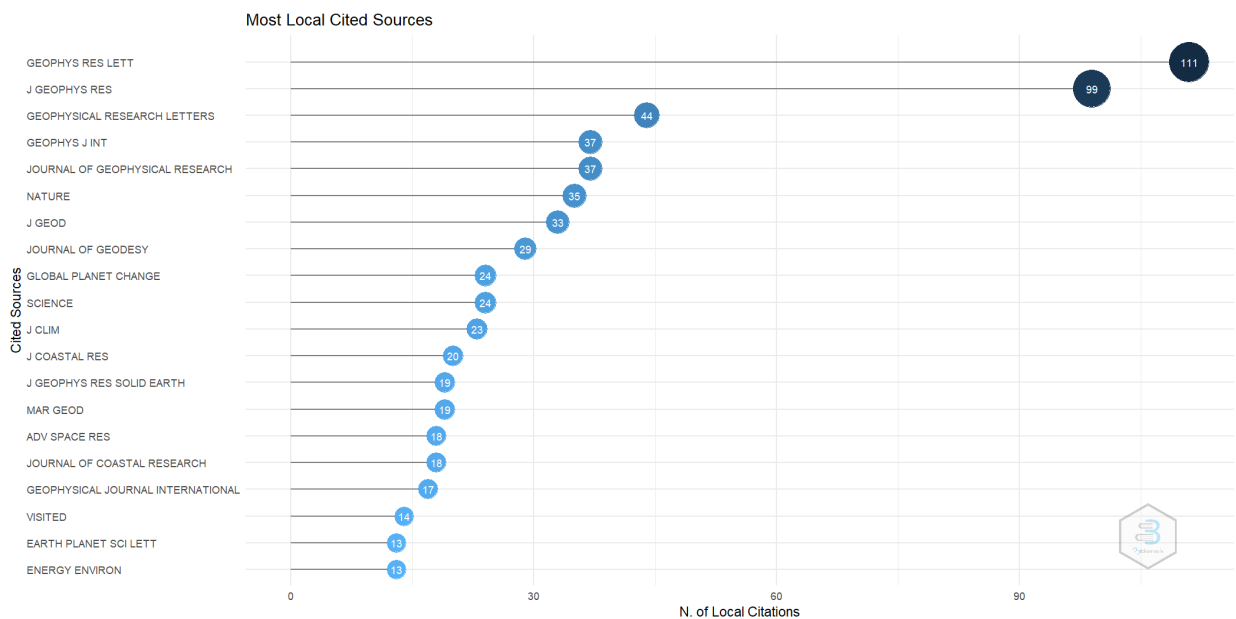


Figura 3.6: Periódicos mais citados relacionados ao tema nível do mar. 2009 - 2021. Fonte: Biblioshiny

Ainda com relação a periódicos, Samuel Bradford formulou em 1934 a lei de dispersão para descrever a distribuição de artigos sobre um determinado assunto em diferentes periódicos, concluindo que estes poderiam ser categorizados em 3 grupos separados, a saber ([MATHANKAR, 2018](#)):

1. Aqueles que produzem mais de quatro referências no ano (Zona 1);
2. Aqueles que produzem entre duas a quatro referências por ano (Zona 2);

3. Aqueles que possuem uma ou menos referências em um ano (Zona 3).

De acordo com a Lei de Bradford, a tabela 3.1 classifica os periódicos e suas respectivas zonas.

Tabela 3.1: Classificação dos periódicos segundo a Lei de Bradford

<b>Periódico</b>	<b>Rank</b>	<b>Freq</b>	<b>Freq Acum</b>	<b>Zona</b>
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: OCEANS	1	5	5	Zone 1
ADVANCES IN SPACE RESEARCH	2	4	9	Zone 1
GLOBAL AND PLANETARY CHANGE	3	4	13	Zone 1
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH	4	3	16	Zone 2
JOURNAL OF COASTAL RESEARCH	5	2	18	Zone 2
NONLINEAR ENGINEERING	6	2	20	Zone 2
OCEAN AND COASTAL MANAGEMENT	7	2	22	Zone 2
ACTA OCEANOLOGICA SINICA	8	1	23	Zone 2
ARABIAN JOURNAL OF GEOSCIENCES	9	1	24	Zone 2
COMPTES RENDUS - GEOSCIENCE	10	1	25	Zone 3
GEOPHYSICAL JOURNAL INTERNATIONAL	11	1	26	Zone 3
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS	12	1	27	Zone 3
JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING	13	1	28	Zone 3
JOURNAL OF GEODESY	14	1	29	Zone 3
JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING	15	1	30	Zone 3
MARINE GEODESY	16	1	31	Zone 3
OCEAN SCIENCE	17	1	32	Zone 3
PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EARTH	18	1	33	Zone 3
STUDIA GEOPHYSICA ET GEODAEITICA	19	1	34	Zone 3
WATER (SWITZERLAND)	20	1	35	Zone 3

Fonte: Biblioshiny

### 3.1.3.5 Instituições de destaque – país de origem

Vale mencionar que o sucesso de um país na pesquisa está diretamente ligado a capacidade de publicação de seus contribuintes institucionais. A exemplo disso é a França que lidera o ranking às custas de suas instituições ou afiliações, no qual aparecem 6 vezes no roll das que mais publicam. Nesse mesmo raciocínio temos a China com dois grandes centros de peso, o *National Ocean Technology Center* e o *Institute of Earthquake Forecasting*. Por outro lado, a Holanda que aparece como o quinto país que mais publica deve-se a *Delft University of Technology*, que lidera o ranking das afiliações que mais publicaram, sendo 8 no total. Há de se entender que a Holanda seja um país forte nesse tema, tendo em vista que parte de seu território se encontra abaixo do nível do mar e que já sofreu

muito na década de 50, quando centenas de pessoas morreram e milhares de casas foram destruídas por enchentes. Além da *Delft University of Technology*, as outras 4 instituições ou afiliações que mais publicaram estão assim dispostas: a francesa *University of La Rochelle/CNRS* com 7, a chinesa *National Ocean Technology Center* e a alemã *Technical University Darmstadt* com 5 e a também chinesa *Institute of Earthquake Forecasting* com 4.

### 3.1.3.6 Autores

Talvez este seja o tópico mais importante do estudo. Afinal, para cada artigo analisado temos um ou mais autores responsáveis pela sua elaboração e que depois irá se refletir nas suas afiliações e nos seus países de origem. Seguindo a mesma estrutura que vem sendo apresentada nos tópicos anteriores, os autores que mais publicaram dentre os 35 artigos em estudo foram: Wöppelmann com 5 publicações, Boretti e Testut, ambos com 3 publicações e, com 2 publicações cada, seguem: Becker, Fenoglio-Marc, Frederikse, Gravelle, Marcos, Parker e Riva. Essa métrica de publicações fez com que Lotka (1926), propusesse uma lei do inverso do quadrado da produtividade da ciência ([MATHANKAR, 2018](#)). Foi um dos primeiros a vincular a noção de produtividade à contagem, observando que o número de artigos publicados não era distribuído de maneira uniforme e que a produtividade tendia a se concentrar em um número limitado de pesquisadores ([OKUBO, 1997](#)). Em outras palavras, Lotka encontrou a produtividade dos cientistas confirmada à lei do inverso do quadrado de tal forma que para cada 100 autores contribuindo com um artigo, 25 contribuirão com dois artigos, 11 contribuem com três, 6 contribuirão com quatro e 4 contribuirão com cinco artigos ([MATHANKAR, 2018](#)). A figura 3.7 mostra a distribuição de frequência da produtividade científica proposta por Lotka.

Para este caso, significa dizer que 90% dos autores irão produzir apenas 1 artigo, 7% produzirão 2 artigos, menos de 2% produzirão 3 artigos, pouco mais de 1% produzirão 4 artigos e menos de 1% produzirão 5 artigos ou mais.

No tocante as citações, Wöppelmann também lidera disparado com 11 citações ao todo. Segundo [Okubo \(1997\)](#), as citações de um artigo científico são uma indicação da importância que a comunidade atribui a pesquisa. Assim, as citações podem ser consideradas um critério para selecionar as revistas científicas mais conceituadas com base nos artigos que contêm ([OKUBO, 1997](#)). A sequência é seguida por Marcos com 6 citações e Collilieux, Gravelle, Guichard, Míguez, Santamaría-Gómez e Tiphaneau com 5 citações cada um. A figura 3.8 a seguir mostra a produção dos autores ao longo do período estudado. A linha corresponde ao período ativo do autor, o tamanho dos círculos indica a quantidade de publicações e sua intensidade indicam a quantidade de citações anuais. Com isso, a figura também nos ajudar a perceber quem foram os autores que aparecem

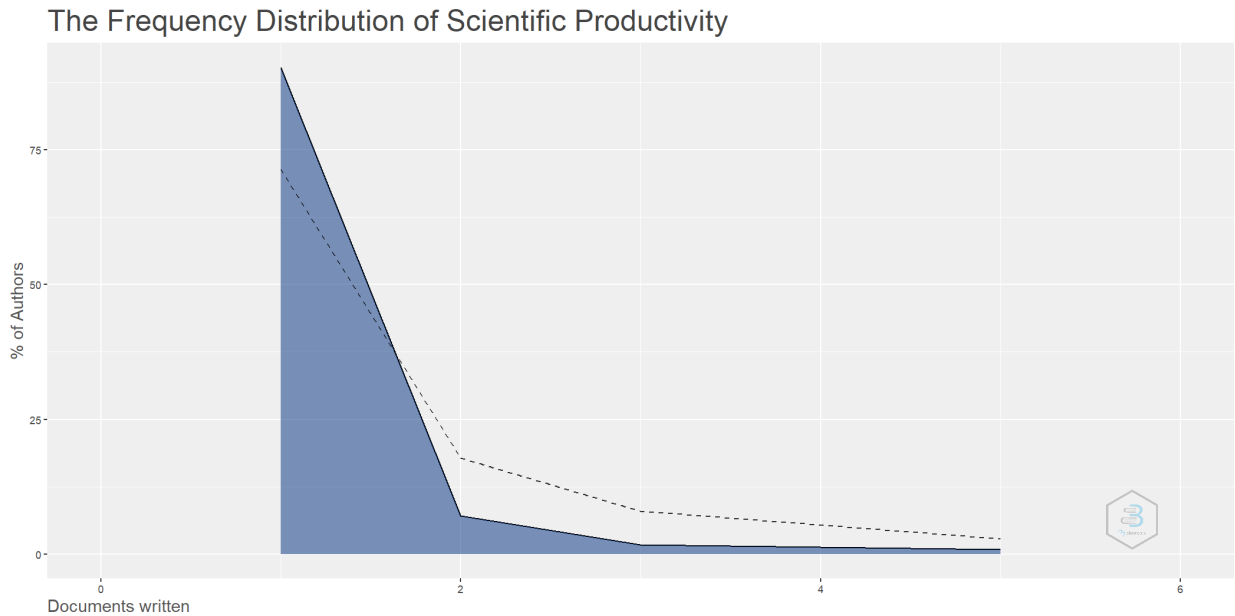


Figura 3.7: Lei de Lotka (Distribuição de frequência da produtividade científica). Fonte: Biblioshiny

na primeira metade do período de estudo (Marcos, Schöne, Barriot, Beckley e Bennett) como aqueles que apareceram depois (Frederikse, Parker, Riva, Bouchette, entre outros). Além disso, é possível ver quem são mais constantes, tais como: Gravelle, Becker, Testut e, principalmente, Wöppelmann, o que justifica estar tanto tempo na ativa e ter o maior número de citações entre os autores. Por outro lado, as citações também podem ter conotação negativa, ou seja, quando o autor pode ser citado por pesquisa de natureza controversa ou por erro de metodologia (OKUBO, 1997). Verificamos isso no artigo que estudou a variabilidade do nível do mar a partir de marégrafos com mais de 100 anos de observação na região do Delta do Rio das Pérolas, na China. Seu objetivo era discutir a aceleração do nível do mar na área, mostrando que os níveis não estão acelerando, mas apenas subindo na mesma taxa, contrariando assim diversos estudos, inclusive o IPCC (PARKER, 2018).

É possível que dois artigos sejam citados simultaneamente no mesmo artigo, ao qual chamamos de có-citação. Este indicador ilustra redes temáticas e a influência e impacto dos autores, representando de uma certa forma as reações da comunidade científica aos resultados da pesquisa (OKUBO, 1997). Por outro lado, ressalta ainda o autor que o método se limita a descrever apenas uma parte do processo de montagem do conhecimento, pois fornece uma análise altamente seletiva da ciência, que se refere muito mais à literatura científica do que à literatura tecnológica. A figura 3.9 mostra a rede de có-citações para o estudo em questão.

Assim como na có-ocorrência de palavras, a formação dos *clusters* ocorre não só por

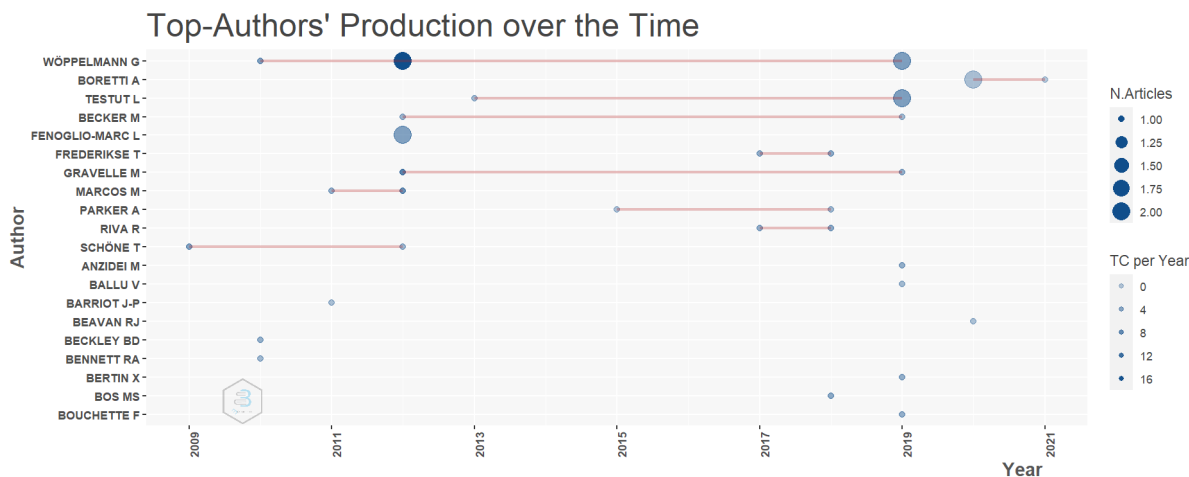


Figura 3.8: Produção dos autores ao longo do tempo. Fonte: Biblioshiny

estarem discutindo um mesmo objeto de estudo, obviamente, mas também por compartilharem a mesma linha de pensamento, sendo influências fortes Wöppelmann, Douglas e Blewitt, assim como Peltier e Church e Woodworth e Cazenave em seus respectivos grupos.

### 3.1.4 Relações entre artigos

Avaliar o comportamento do nível do mar é uma tarefa complexa, pois envolve vários fatores de forçantes independentes, cada um produzindo sinais que só podem ser separados com base em frequências e escalas temporais e espaciais (TSIMPLIS et al., 2011). Isso faz com que a variação do nível do mar deixe de ser homogênea e tenha comportamentos distintos de um lugar para o outro. Talvez por conta disso alguns autores preferam deixar de lado a visão holística e passe a analisar casos locais de forma isolada, a exemplos de estudos do Mar Adriático (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010), do Mar Mediterrâneo (TSIMPLIS et al., 2011), da Tailândia (SARAMUL; EZER, 2014), da China (PARKER, 2018), da França (DODET et al., 2019) e da Oceania (BORETTI, 2020).

Faz mister mencionar que a forma de se monitorar o comportamento do nível do mar não mudou ao longo da história, exceto a incorporação de novas tecnologias que ajudaram, ou tornaram ainda mais complexas, as análises como um todo. É o caso de receptores GPS que passaram a operar perto de estações maregráficas a partir do ano de 1994 (SCHÖNE; SCHÖN; THALLER, 2009) e que posteriormente se tornaram multissatelitais (GNSS). Soma-se ainda a este conjunto tecnológico as missões altimétricas por satélite, tais como o Jason e o Topex/Poseidon.

Independentemente do nível de abrangência do estudo, os resultados encontrados nunca

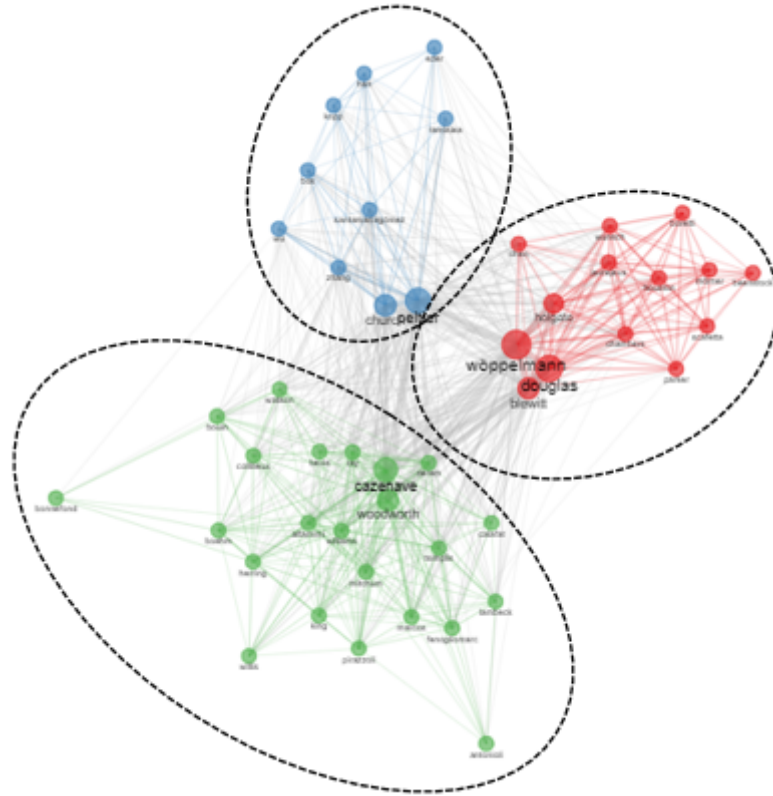


Figura 3.9: Rede de có-citações entre autores. Fonte: Biblioshiny

são iguais, apesar de muitos utilizarem os mesmos artifícios estatísticos no cálculo de seus achados, a exemplo das diferenças simples entre sensores e dos modelos de regressões lineares (BOUIN; WÖPPELMANN, 2010); (FENOGLIO-MARC et al., 2012); (TORRES; TSIMPLIS, 2013). Aliás, o modelo de regressão linear em parte é até contestado por ser um modelo inadequado para a estimativa do nível do mar por não fornecer nenhuma instrução temporal de aceleração, dadas as suposições inerentes de velocidade constante e aceleração zero (WATSON, 2019).

Por outro lado, há quem se propôs a se utilizar de modelos estatísticos mais robustos, como o modelo proposto por Sjoberg, que usa diferenças de medidores de maré para inferir taxas relativas de elevação de terras seculares (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010). Em outro estudo, utilizou-se técnicas avançadas de comparação dos dados maregráficos com a altimetria por satélite, em substituição a carência de estações maregráficas com GPS acoplado (WÖPPELMANN; MARCOS, 2012). Houve casos também que se utilizaram de valores máximo e mínimo, além de valores médios (BORETTI, 2020), uso das medianas das tendências GNSS como melhor concordância com as tendências do medidor de altimetria diferenciada (KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018a) e até mesmo o uso de redes neurais para identificar um conjunto de variáveis meteorológicas que afetam as anomalias (velocidade do vento zonal e meridional, precipitação, umidade relativa e temperatura do ar) e descobrir que mais da metade da variabilidade prevista era manifestada por padrões zonais de vento (MOGHADAM, 2017).

A questão climática, inclusive, foi um dos critérios de busca desta pesquisa e está presente em outros artigos. Para o Oceano Ártico, por exemplo, observou-se que os efeitos estéricos (temperatura do oceano e variações de salinidade) e a pressão atmosférica contribuíram com 35% e 30% do aumento do nível do mar, respectivamente (HENRY et al., 2012). Nesse mesmo sentido, também se avaliou as questões climáticas no Mar do Caribe (TORRES; TSIMPLIS, 2013), no Hawaí (YANG; FRANCIS, 2019) e na região de Hong Kong (ZOU et al., 2021).

Aproveitando-se das novas tecnologias e dos sistemas GNSS cada vez mais consolidados, novas ideias vão surgindo, tal como o uso de boias acopladas a receptores GNSS para monitorar o movimento absoluto do nível do mar (FUND et al., 2013); (DODET et al., 2019); (ZHAI et al., 2020), mas esse método que se utiliza de observações diferenciais ainda precisa avançar muito na questão da precisão.

### 3.1.5 Conclusões

A mudança do nível do mar tem impactos ambientais, sociais e econômicos significativos, podendo ser usado para diagnóstico como indicador de processos relacionados as mudanças climáticas (TSIMPLIS et al., 2011).

Entretanto, pesquisar os vários processos que contribuem para a mudança relativa do nível do mar em um determinado local é uma tarefa desafiadora, envolvendo o exame científico de vários fatores de forçantes independentes, cada um produzindo sinais que só podem ser separados com base em frequências, escalas temporais e espaciais (TSIMPLIS et al., 2011). As forçantes são conhecidas por processos astronômicos (marés), atmosféricos (ondas e ventos marítimos) oceânicos (ondas e correntes) e terrestres sólidos (movimentos terrestres) (DODET et al., 2019); (WATSON, 2019), tornando a previsão do nível do mar uma tarefa complexa.

Simav et al. (2012) já afirmavam que compreender os mecanismos de mudança do nível do mar é uma das maiores preocupações das geociências na era das mudanças climáticas, com consequências implícitas para os ecossistemas costeiros e as sociedades humanas.

Neste estudo, através da bibliometria, foram utilizadas técnicas estatísticas como métodos para analisar quantitativamente as principais publicações acadêmicas referentes ao tema entre os anos de 2009 e 2021. Percebemos uma forte variabilidade na quantidade de publicações e citações, assim como a França, os Estados Unidos e a China sendo os países mais influentes, fato que se deve as suas instituições contribuintes ou afiliações e, principalmente, aos autores. Este último, destaque para Wöppelmann, tanto do ponto de vista de publicações quanto de citações.

Assim como as palavras-chave em suas redes de có-ocorrência, os autores também se relacionam entre si como uma indicação da importância que a comunidade atribui a pesquisa, podendo ser considerado um critério para selecionar as revistas científicas mais conceituadas. Alguns desses autores contribuindo com análises globais, outros com análises mais regionais, mas todos preocupados com os impactos que o aumento do nível do mar pode trazer para a sociedade como um todo.

No item anterior, vimos que a metodologia para o monitoramento do nível do mar pouco mudou, historicamente falando, exceto o incremento de novas tecnologias como GNSS e altimetria por satélite. O problema está na forte dependência de modelos globais que não tem nem como levar em consideração fenômenos que acontecem em regime local. Um exemplo é o GIA (modelo de ajuste isostático global) que fornecem apenas resolução de escala mais ampla, não detectando processos locais associados a tectônica, vulcanismo, compactação de sedimento, subsidência por extração de água, etc. (WATSON, 2019); (BORETTI, 2021). Denys et al. (2020) afirmam ainda que é muito bem aceito para regiões de latitudes elevadas, mas fora delas, as taxas verticais GIA são uma pequena fração do movimento vertical da terra medido pelas estações GNSS.

Se pararmos para analisar, a estatística não foi importante apenas nessa análise bibliométrica, ela é fundamental e indispensável também na própria compreensão do comportamento do nível do mar e de suas forçantes. Uma boa parte dos estudos se utilizam da estatística elementar para o cálculo de médias, medianas e tendências e uma pequena parcela vai um pouco mais além quando se utilizam de métodos estatísticos mais robustos. Tendo como alicerce os resultados da presente pesquisa é possível afirmar que a estatística pode contribuir significativamente no tocante ao monitoramento do nível do mar.

## **3.2 O Nível do Mar no Litoral Brasileiro: Uma Abordagem com Janelas Deslizantes**

### **RESUMO**

O objetivo deste artigo é avaliar as flutuações das séries temporais das estações maregráficas do litoral brasileiro no período de 2002 a 2020 de forma dinâmica. Foram utilizadas séries temporais de 6 estações gerenciadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE): Santana/AP, Fortaleza/CE, Salvador/BA, Macaé/RJ, Arraial do Cabo/RJ e Imbituba/SC, tendo como principal método de análise o *Detrended Flutuaction Analysis* (DFA) com o procedimento das janelas deslizantes. Descritivamente as estações de Fortaleza e Santana foram as que apresentaram mais estabilidade nas flutuações. Com a exceção de Fortaleza e Salvador, as estações apresentaram comportamento persistente

( $\alpha > 0,5$ ) para todas as séries estudadas (mínimo, mediano, média e máximo). Belém, Fortaleza, Imbituba, Macaé e Salvador apresentaram por meio do teste de estacionariedade uma leve tendência de variação da média a longo prazo. Espera-se com os achados dessa pesquisa fornecer respostas as mudanças de comportamento dos níveis do mar no Brasil em função do tempo, motivados principalmente pelas alterações de amplitude e de fatores climáticos ao longo de toda a costa brasileira.

**Palavras-chave:** Nível Médio do Mar. Séries Temporais. Janelas Deslizantes. Análise Dinâmica.

## ABSTRACT

The objective of this article is to dynamically evaluate the fluctuations of time series from tide gauge stations on the Brazilian coast between 2002 and 2020. Time series from 6 stations managed by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) were used: Santana/AP, Fortaleza/CE, Salvador/BA, Macaé/RJ, Arraial do Cabo/RJ and Imbituba/SC, having as its main analysis method the Detrended Fluctuation Analysis (DFA) with the sliding window procedure. Descriptively, the Fortaleza and Santana stations were the ones that presented the most stability in the fluctuations. With the exception of Fortaleza and Salvador, the stations presented persistent behavior ( $\alpha > 0,5$ ) for all series studied (minimum, median, mean, and maximum). Belém, Fortaleza, Imbituba, Macaé, and Salvador showed a slight tendency of variation of the long-term mean for the stationarity test. The findings of this research are expected to provide answers to changes in the behavior of sea levels in Brazil as a function of time, mainly motivated by changes in amplitude and climatic factors along the entire Brazilian coast.

**Keywords:** Mean Sea Level. Time Series. Sliding Windows. Dynamic Analysis.

### 3.2.1 Introdução

O mar sempre nos encanta com sua beleza e com o seu “balé” vertical rigorosamente regular, impulsionado pelas forças de atração gravitacional entre a Terra, o Sol e a Lua. No entanto, todo esse rigor vem sendo perturbado de uma forma cada vez mais intensa, ocasionando sua elevação em virtude de diversos fatores, mas principalmente, pela emissão de gases que ao chegar a atmosfera eleva a temperatura do planeta e, conseqüentemente, o volume dos oceanos ([CHANGE; others, 2013](#); [LEGG, 2021](#)).

O nível do mar é uma das variáveis climáticas mais importantes e monitoradas atualmente, sendo considerado também um excelente indicador de processos relacionados as mudanças climáticas ([TSIMPLIS et al., 2011](#)).

Compreender os mecanismos de mudança do nível do mar é uma das maiores preocupações

das geociências na era das mudanças climáticas, com consequências implícitas para os ecossistemas costeiros e para humanidade (SIMAV et al., 2012). Para Fenoglio-Marc et al. (2012), o aumento do nível do mar traz implicações relevantes, tais como: erosão da praia, inundações de terras, aumento da salinização dos aquíferos costeiros, danos causados por tempestades e perda de ecossistema costeiro.

O nível do mar tem sido estudado por diversos pesquisadores, em função do tempo. Entre essas pesquisas é possível citar aquelas que analisaram o comportamento do nível do mar nas escalas globais (SCHÖNE; SCHÖN; THALLER, 2009; RAY; BECKLEY; LEMOINE, 2010; SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2012; KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018a), mas há também aqueles que focaram em análises mais pontuais, como é o caso de Buble, Bennett e Hreinsdóttir que analisaram o movimento da crosta e o aumento do nível do mar no leste adriático (BUBLE; BENNETT; HREINSDÓTTIR, 2010), Tsimplis e outros que analisaram as tendências multi-decais do Mar Mediterrâneo (TSIMPLIS et al., 2011), Saramul e Ezel que estudaram as variações ao longo da costa da Tailândia e os impactos de subsidência extrema (SARAMUL; EZER, 2014), Parker que pesquisou as oscilações do nível do mar no Japão e na China desde o século 20 e suas consequências para o gerenciamento costeiro (PARKER, 2018), Dodet e outros que caracterizaram as variações do nível do mar ao longo da costa metropolitana da França (DODET et al., 2019), Boretti que analisou a costa leste da América do Norte (BORETTI, 2021), Ribas Junior e outros que trabalharam com análises e correlações para um controle geodésico do nível do mar em Salvador, primeira capital do Brasil (JUNIOR et al., 2021c), entre tantos outros, se preocupando principalmente com as regiões costeiras que podem trazer implicações importantes já mencionadas, assim como impactos diretos aos povos que ali habitam, tanto do ponto de vista social quanto econômico (FENOGLIO-MARC et al., 2012).

Na presente pesquisa será utilizado o DFA, idealizado por Peng et al. (PENG et al., 1994) para mensurar autocorrelação em séries não estacionárias em diferentes escalas de tempo. Aqui o DFA será modelado com o procedimento das janelas deslizantes. Janelas deslizante consiste em uma metodologia que divide a série temporal em segmentos de tamanho fixo (janela de tamanho  $w$ ) para obtenção de uma característica da série temporal de forma dinâmica (média, variabilidade, assimetria, autocorrelação e correlação cruzada) (CARBONE; CASTELLI; STANLEY, 2004a; FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021).

É possível encontrar na literatura a aplicação do DFA com janelas deslizantes em diferentes áreas do conhecimento: ciências exatas (SANTOS et al., 2022b; GUEDES et al., 2022b; DA SILVA FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021), nas ciências ambientais (NIKOLOPOULOS et al., 2021; LONGO et al., 2020), saúde (MERAZ et al., 2022), mercado financeiro (ZHANG; FANG, 2021), entre outros (QUINTINO; BURNQUIST; FERREIRA, 2022; JIANG; WANG, 2024; XU; SONG; GUO, 2012), mas até o momento não foi identificado

a aplicação desta metodologia com dados relativos ao nível do mar, o que revela o caráter inovador deste estudo.

Esse artigo está estruturado em quatro seções, a saber: Introdução (3.2.1), Metodologia (3.2.2), Resultados e Discussões (3.2.3) e Conclusões (3.2.4), buscando esclarecer o método utilizado, a seleção dos dados e principais achados.

## 3.2.2 Metodologia

### 3.2.2.1 Área de estudo

Aproximadamente 8500 km do litoral brasileiro é monitorado por estações maregráficas que registram o comportamento do nível do mar ao longo da costa, sendo a maioria destas controladas pelos portos para atender suas necessidades específicas, tais como: redução de sondagens para auxiliar ou ampliar sua capacidade ou até mesmo para o controle de calado de grandes embarcações.

Em especial, seis destas estações (Figura 3.10) são controladas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e as séries históricas correspondentes são disponibilizadas publicamente em seu portal.

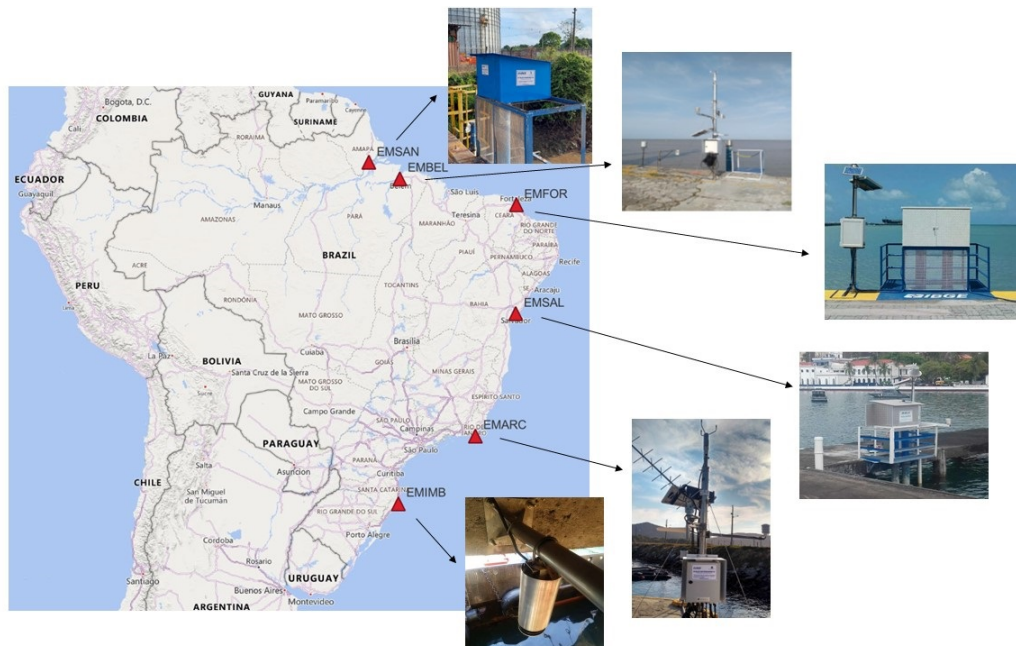


Figura 3.10: Estações Maregráficas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor

As características de cada uma das estações e seus respectivos períodos e taxas de coleta

são descritos a seguir:

- A Estação Meteorológica de Santana (EMMSAN) está localizada na companhia Docas de Santana (CDSA) e encontra-se em operação desde junho de 2005, sendo 2005 a 2017 com sensor de nível de pressão com taxa de coleta de 5 min e desde 2017 com sensores de nível Radar e Encoder com taxa de coleta de 1 min;
- A Estação Maregráfica de Fortaleza (EMFOR) localiza-se na Companhia Docas do Ceará (CDC), em operação desde 2007 com marégrafo convencional (já desativado) e desde 2008 com sensores de nível Radar e Encoder a uma taxa de coleta de 1 min e 5 min, respectivamente;
- A Estação Maregráfica de Salvador (EMSAL) fica situada na Capitania dos Portos de Salvador e está em operação desde 2002, sendo que de 2002 a 2019 com marégrafo convencional (já desativado) e desde 2008 com sensores de nível Radar e Encoder e uma taxa de coleta de 1 min e 5 min, respectivamente;
- A Estação Meteorológica de Arraial do Cabo (EMMARC) está localizada no Porto do Forno, em Arraial do Cabo-RJ, e encontra-se em operação desde 2017 com sensores de nível Radar e Encoder e taxa de coleta de 1 min;
- A Estação Meteorológica de Imbituba (EMMIMB) localiza-se no Porto de Imbituba e está em operação desde 1998 com marégrafo convencional e desde 2001 com marégrafo digital, sendo de 2001 a 2016 com sensor de nível de pressão e taxa de coleta de 5 min, 2013 a 2019 com sensor de nível Encoder e uma taxa de coleta de 5 min, desde 2016 com sensor de nível de Radar e taxa de coleta de 15 min e desde 2019 com sensores mais recentes de nível de Radar e Encoder com taxas de coleta de 1 min;
- A Estação Meteorológica de Belém (EMMBEL) fica situada na Companhia Docas do Pará (CDP), em operação desde 2019 com sensores de nível Radar e Encoder e taxa de coleta de 1 min.

Adicionalmente, a tabela 3.2 mostra as coordenadas geográficas de todas as estações acima citadas.

Maiores detalhes, bem como as características de cada uma das estações e seus respectivos períodos e taxas de coleta, podem ser encontrados acessando a página do IBGE em: [Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia](#) (Visitado em 01/07/2022).

Tabela 3.2: Coordenadas das Estações Maregráficas

Estação	Latitude	Longitude
EMMSAN	00° 03' 41" S	51° 09' 57" O
EMFOR	03° 42' 53" S	38° 28' 37" O
EMSAL	12° 58' 26" S	38° 31' 02" O
EMMARC	22° 58' 21" S	42° 00' 49" O
EMMIMB	28° 13' 52" S	48° 39' 01" O
EMMBEL	01° 26' 32" S	48° 29' 47" O
EMMAC	22° 23' 08" S	41° 46' 10" O

Fonte: IBGE

### 3.2.2.2 Dados

É possível verificar a partir da seção 3.2.2.1 a variabilidade dos dados no que diz respeito aos tipos de sensores, assim como o período e a taxa de coleta de cada um deles. Entretanto, o IBGE disponibiliza todos esses dados em seu portal em arquivos condensados por valores médios horários, estruturados da seguinte forma: a data no formato dd/mm/aaaa na primeira coluna, a hora no formato hh:mm na segunda coluna, seguida nas colunas subsequentes do valor do nível d'água observado em metros, o valor da previsão astronômica também em metros e o valor da observação aplicado o filtro de 168 horas.

Para análise e modelagem dos dados foram utilizados os valores do nível d'água observado e calculados seus valores mínimo, máximo, médio e mediano de cada estação maregráfica para cada dia (Ver figura 3.11), ressaltando que estes valores são relativos, ou seja, utilizam um referencial próprio do IBGE e apenas as variações é que devem ser consideradas como informações absolutas.

A média, devido as suas propriedades, é uma das medidas descritivas mais utilizadas no monitoramento do nível do mar, embora as demais tenham suas aplicações. A máxima, por exemplo, é relevante no monitoramento de regiões costeiras vulneráveis a inundações (SILVEIRA et al., 2021; HIERONYMUS, 2022); a mínima é fundamental para os portos, no que diz respeito aos calados dos navios (STANISLAWCZYK; KOWALSKA; MYKITA, 2009); a mediana em alguns estudos é utilizada como medida de posição padrão, por ser resistente a variabilidade dos dados. Neste caso, é possível citar a pesquisa de Kleinherenbrink et al. que aplicaram a mediana para comparar a tendência de movimento vertical oriunda do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e da altimetria por marégrafos (KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018a). É importante relatar que, nos casos de dados aproximadamente simétricos, a mediana tende a se aproximar do valor da média (TRIOLA, 2008). Ainda nesta figura, é possível verificar que os dados foram escalonados para uma melhor visualização, não servindo portanto como meio de comparação visual.

A tabela 3.3 apresenta o espaço temporal utilizado em cada estação maregráfica com seus

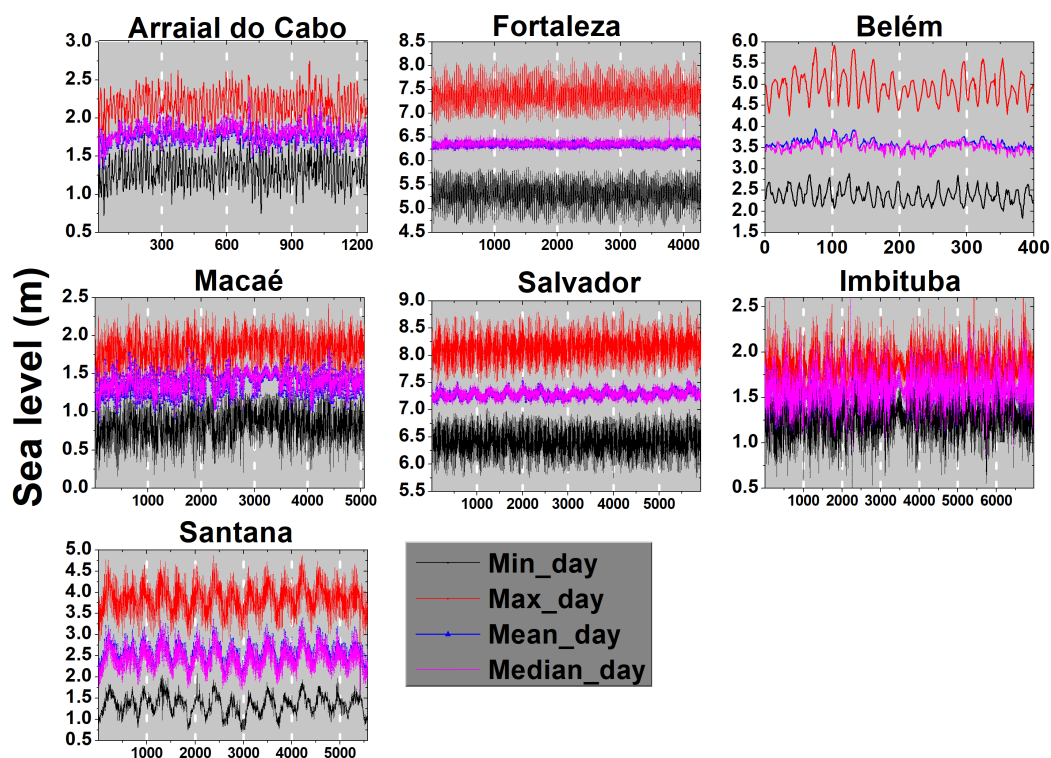


Figura 3.11: Séries Originais das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE. Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor

respectivos número de observações.

Tabela 3.3: Resumo dos dados utilizados

Estação	Data inicial	Data final	N
EMMSAN	02/10/2005	31/12/2020	133680
EMFOR	19/04/2008	31/12/2019	102576
EMSAL	16/10/2004	31/12/2020	142104
EMMARC	02/08/2017	31/12/2020	29952
EMMIMB	02/12/2001	31/12/2020	167280
EMMBEL	30/11/2019	31/12/2020	9552
EMMAC	14/07/2001	30/05/2015	121656

Fonte: IBGE

Os dados da Estação Maregráfica de Belém (EMMBEL) não foram utilizados na aplicação das janelas deslizantes por insuficiência de dados em virtude de ser uma estação recente.

### 3.2.2.3 Métodos

O método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*), idealizado por Peng et al. (PENG et al., 1994), pode ser aplicado para identificar e mensurar autocorrelação de longo alcance em séries temporais não estacionárias. Sua peculiaridade é permitir a identificação de auto-afinidade e autocorrelação de longo alcance em séries temporais com tendências

(SILVA FILHO, A. M., 2014a). Sua modelagem se dá com os seguintes passos (PENG et al., 1994; SILVA FILHO, A. M., 2014a; FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014):

Passo 1: Calcula-se o desvio de cada registro em relação à incidência média da série completa, integrando o sinal  $u_i$  (série original) e obtendo-se a série integrada  $y(k)$  pela seguinte expressão:

$$y(k) = \sum_{i=1}^k (u_i - \langle u \rangle); k = 1, 2, \dots, N \quad (3.1)$$

em que  $u$  denota o valor médio de  $u_i$ , e  $N$ , o total de pontos da série.

Passo 2: Em seguida a série integrada  $y(k)$  é dividida em intervalos de igual tamanho  $n$  não sobrepostos. E para cada intervalo de tamanho  $n$ , é preciso ajustar um polinômio de grau maior ou igual a 1 a  $y(k)$ , denotado por  $y_n(k)$ . Essa estatística representa a tendência local na amplitude de tamanho  $n$ . Na presente pesquisa foi utilizado o polinômio de grau 1.

Passo 3: Logo após, a série integrada  $y(k)$ , é subtraída de  $y_n(k)$  em cada intervalo de tamanho  $n$ , com base na seguinte expressão:

$$F_{DFA}(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (3.2)$$

e o cálculo anterior é repetido sistematicamente para diferentes amplitudes de tamanho  $n$  variando de  $(4 \leq n \leq \frac{N}{4})$ .

A Figura 3.12 exemplifica bem os passos apresentados acima

Passo 4: Verificar se  $F_{DFA}(n)$  tem comportamento de acordo com a equação 3.8

$$F_{DFA}(n) \sim n^\alpha \quad (3.3)$$

Neste caso,  $\alpha_{DFA}$  representa o expoente de autocorrelação de longo alcance.

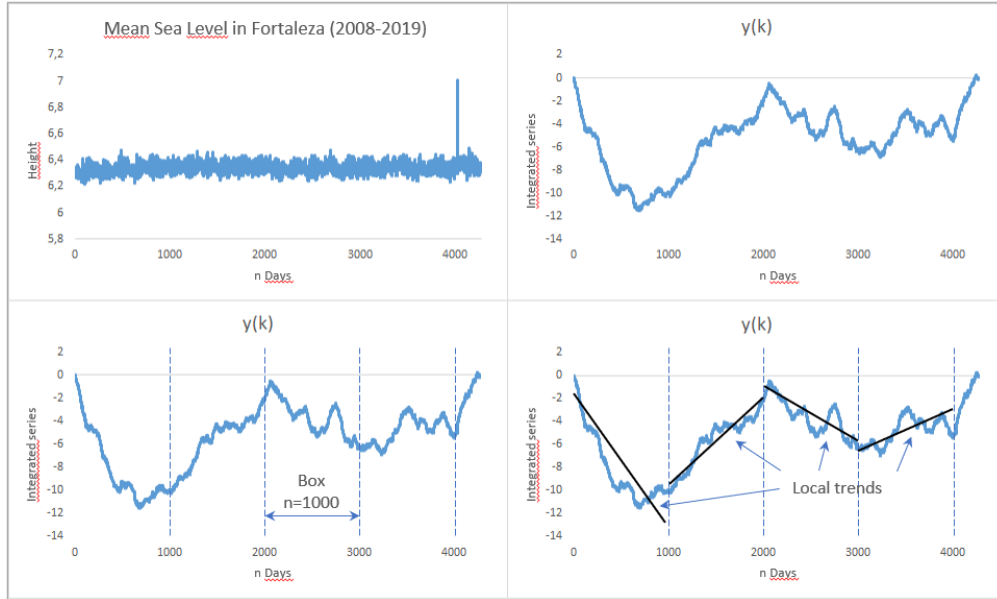


Figura 3.12: Representação gráfica dos passos 1, 2 e 3 do método DFA. Fonte: O autor

$$F_{DFA}(n) \sim an^\alpha \quad (3.4)$$

Aplicando log na equação 3.9, tem-se:

$$\log F_{DFA}(n) = \log a + \alpha \log n \quad (3.5)$$

Através do expoente  $\alpha$  obtido por meio do algoritmo do DFA é possível avaliar em que medida a tendência observada na série temporal passada implica em manutenção do comportamento no futuro, indicando um efeito de memória de longa duração na série (SILVA FILHO, A. M., 2014a). No caso de séries temporais não correlacionadas, espera-se  $\alpha = 0,50$ , caso comum em séries sem memória. Se  $\alpha > 0,50$ , pode-se inferir que a série apresenta comportamento persistente de longo alcance. Caso  $\alpha < 0,50$ , espera-se um comportamento antipersistente, complementa o autor. E quando o  $\alpha \cong 1,00$  temos uma série temporal do tipo ruído rosa ( $\frac{1}{f}$  ruído), transição entre a imprevisibilidade do ruído branco e a paisagem muito mais suave do ruído browniano; quando  $\alpha > 1,00$  trata-se de uma série não estacionária, com caminhos aleatórios; quando  $\alpha \cong 1,50$  conclui-se que a série apresenta ruído do tipo browniano (PENG et al., 1994; FREITAS et al., 2009; ZEBENDE; FERNANDEZ; PEREIRA, 2017; RODRIGUES; FILHO; GUEDES, 2022; FERREIRA, 2021).

O método de janelas deslizantes, utilizado inicialmente com o expoente de Hurst na avaliação temporal de série financeira, consiste na escolha de uma janela de tamanho  $W$ ,

usualmente de 1000 observações, que é o número mais adequado para o caso (CARBONE; CASTELLI; STANLEY, 2004b). Com isso, é possível construir uma série temporal de expoentes da modelagem DFA (FILHO; ZEBENDE; GUEDES, 2021).

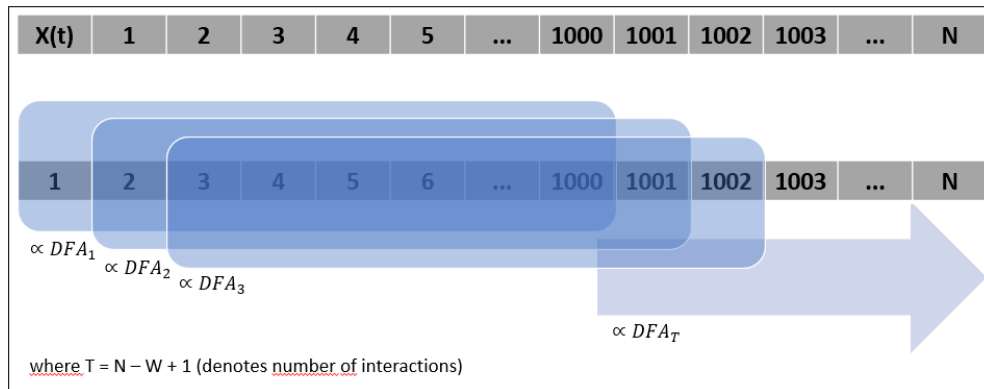


Figura 3.13: Ilustração do procedimento das janelas deslizantes com o DFA para  $W=1000$ . Fonte: O Autor

Com a abordagem do DFA com janelas deslizantes é possível mensurar o grau de dependência temporal do nível do mar em função do tempo de forma dinâmica. Nesta pesquisa o procedimento de janelas deslizantes foi executado com auxílio da linguagem R (R Core Team, 2014) por meio do pacote “*sliding windows*”, desenvolvido por Guedes et al (GUEDES et al., 2021a). Na seção subsequente serão apresentados os resultados e discussões da pesquisa.

### 3.2.3 Resultados e Discussões

#### 3.2.3.1 Análise Exploratória dos Dados

A tabela 3.4 apresenta os valores da média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e o p-valor do teste da raiz unitária (KSPP) para as séries temporais dos níveis do mar registrados diariamente pelas estações maregráficas do Brasil: mínimo, máximo, médio e mediano. Entre as estações maregráficas avaliadas, a que apresentou maiores coeficientes de variação relativa nas séries temporais dos níveis do mar (mínimo, médio, mediano e máximo) foi a estação Imbituba e os menores foram registrados na estação Fortaleza. Imbituba é referencial altimétrico oficial do Brasil, estabelecido pelo IBGE (ALENCAR, 1990) e segundo Mesquita (1997) é também a estação de menor amplitude de variação, corroborado pela proximidade de um ponto anfidrômico. Com relação à assimetria, com exceção da estação Macaé, ocorreu predominância de comportamento assimétrico positivo, o que denota concentração de valores abaixo da média nas séries temporais dessas estações (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Estatística Descritiva das Estações Maregráficas

<b>Arraial do Cabo (2018 a 2020)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	1,30	0,184	14,14	-0,048	0,10
Máxima	2,18	0,182	8,36	0,501	0,10
Média	1,78	0,114	6,42	0,343	0,10
Mediana	1,79	0,119	6,62	0,405	0,10
<b>Belém - 2020</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	2,37	0,193	8,14	0,296	0,07
Máxima	4,96	0,340	6,86	0,356	0,10
Média	3,60	0,103	2,87	0,874	0,01
Mediana	3,53	0,113	3,19	0,213	0,02
<b>Fortaleza (2008 a 2019)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	5,27	0,277	5,24	-0,084	0,10
Máxima	7,39	0,287	3,88	0,198	0,10
Média	6,34	0,039	0,62	0,181	0,04
Mediana	6,36	0,071	1,11	0,280	0,05
<b>Imbituba (2001 a 2020)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	1,28	0,208	16,25	0,145	0,01
Máxima	1,85	0,193	10,46	0,154	0,01
Média	1,58	0,171	10,81	0,260	0,01
Mediana	1,59	0,174	10,93	0,247	0,01
<b>Macaé (2001 a 2015)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	0,82	0,213	25,96	-0,063	0,01
Máxima	1,83	0,202	11,02	-0,118	0,01
Média	1,37	0,129	9,42	-0,210	0,01
Mediana	1,39	0,134	9,64	-0,201	0,01
<b>Santana (2005 a 2020)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	1,35	0,231	17,05	0,134	0,02
Máxima	3,85	0,362	9,41	-0,101	0,08
Média	2,54	0,267	10,48	0,110	0,07
Mediana	2,46	0,273	11,11	0,151	0,09
<b>Salvador (2005 a 2020)</b>					
<b>Série</b>	<b>Média</b>	<b>DP</b>	<b>CV</b>	<b>AS</b>	<b>p-valor (KSPP)</b>
Mínima	6,39	0,264	4,14	0,047	0,10
Máxima	8,15	0,267	3,28	0,007	0,01
Média	7,29	0,079	1,08	0,139	0,01
Mediana	7,29	0,079	1,08	0,139	0,01

Fonte: IBGE Nota: Elaborado pelos autores

Com exceção de Macaé e Imbituba, todas as estações apresentaram comportamento estacionário em pelo menos uma das séries temporais avaliadas ( $p\text{-valor} > 0,05$ ), segundo

o teste KSPP com 95% de confiança. Quando é analisado apenas a média, destaca-se Arraial do Cabo e Santana com valores estacionários. Em outras palavras, significa que essas estações apresentam uma espécie de regularidade ao longo do tempo com relação ao comportamento da série temporal. Ao contrário destas, Belém, Fortaleza, Imbituba, Macaé e Salvador apresentaram um comportamento de não estacionariedade ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), evidenciando que a média dessas estações estão variando com o tempo. (Tabela 3.4)

Nossos achados relacionados com a variabilidade no comportamento das séries temporais deve-se a uma combinação de fatores geográficos, climáticos e oceanográficos (Figura 3.11). A grande extensão do litoral brasileiro faz com que o mar em cada região reflita as diferentes condições naturais e processos específicos de cada região, a começar pelos próprios regimes de marés, onde nas regiões norte e nordeste prevalecem as marés semi-diurnas, caracterizada por duas preamares e duas baixa-mares num dia lunar, enquanto na região sul prevalece as marés diurnas ou mistas, caracterizadas por produzir uma preamar e uma baixamar por dia (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021). Além disso, os ventos, por exemplo, nas regiões norte e nordeste tendem a vir do leste para o oeste, de acordo com os ventos alísios. Já na costa sul e sudeste os ventos são paralelos a costa em direção ao sul, tendo uma variabilidade maior na região sudeste, o que pode ser atribuído a frentes frias e aos centros de pressão abaixo da zona tropical (MORENO; TANNURI; COZMAN, 2023). Machado et al. afirmam ainda que pode ser observado na região mais ao sul um intenso gradiente de pressão, resultando em fortes ventos de oeste que persistem ao longo da costa (MACHADO et al., 2024).

É provável que o comportamento do mar em Imbituba esteja sendo influenciado por diferentes padrões climáticos, fazendo com que as marés sejam mais influenciadas por correntes frias e condições oceanográficas distintas, o que não acontece com Fortaleza que é atingida por ventos alísios que são mais constantes e ajudam, portanto, num comportamento mais estável do nível do mar nessa região.

### 3.2.3.2 Análise pelas janelas deslizantes

A figura 3.14 apresenta os registros médios diários do nível do mar das estações maregráficas contempladas pela presente pesquisa utilizando a metodologia das janelas deslizantes com uma janela de 1000 dias ( $w=1000$ ).

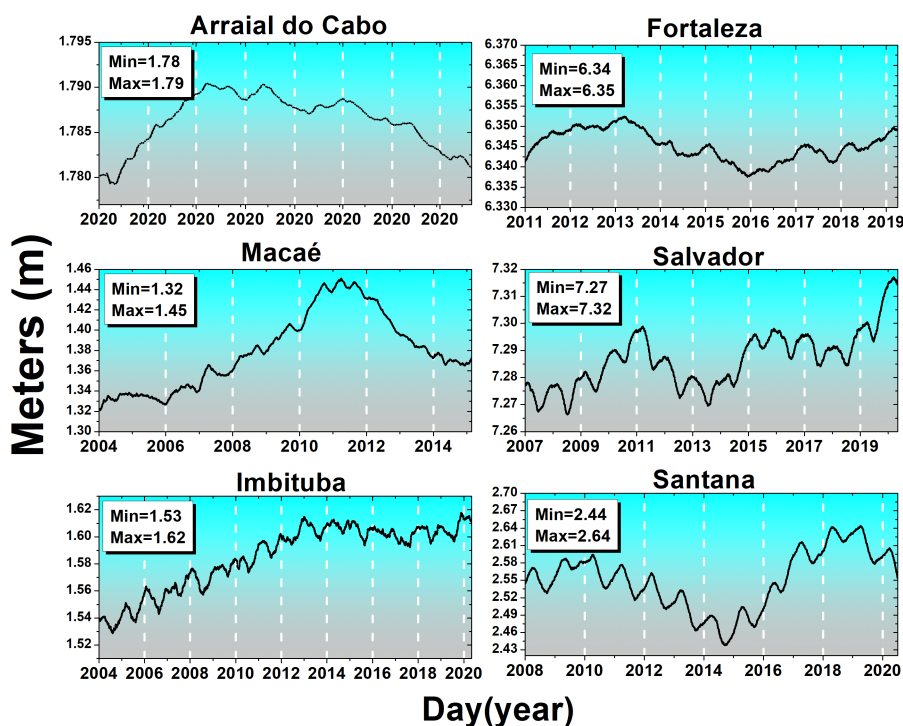


Figura 3.14: Média deslizante das séries temporais do nível médio do mar das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE para uma janela de 1000 dias ( $w=1000$ ). Fonte: IBGE. Nota: Dados processado pelo autor

De acordo com a figura 3.14, observa-se as estações de Imbituba e Macaé como sendo as séries temporais mais antigas, embora Macaé tenha sido descontinuada em 2015, dando lugar a recente estação de Arraial do Cabo. Fortaleza foi a estação que apresentou maior estabilidade na média ao longo de todo o período, variando apenas 0,01m, seguida da recente Arraial do Cabo com a mesma variação. Já a que apresenta a maior variação na média é a estação de Santana, uma das únicas, juntamente com Belém, que analisa o comportamento de rio e não de mar como as demais, com o valor de 0,20m. Segundo Harari, sabe-se que os rios afetam tanto os sistemas de correntes oceânicas como também as distribuições de salinidade e, conseqüentemente, de densidade em estuários e regiões costeiras (HARARI; MESQUITA; CAMARGO, 2021), um indicador para essa variação.

A estação de Santana, juntamente com Salvador e Imbituba, é possível verificar uma sazonalidade anual da média, muito provavelmente por influência das chuvas. Além da sazonalidade anual, verifica-se ainda em Santana uma sazonalidade maior, por volta de 4 a 5 anos, que pode ser atribuído aos fenômenos do El Niño e La Niña. De acordo com Christopherson (2012), o intervalo esperado de recorrência desses fenômenos são de 3 a 5 anos, não sendo necessariamente uma regra. Ainda com relação a Santana, por ser um ambiente de rio, os períodos de seca e de enchentes tornam-se muito mais perceptíveis e acentuados se comparados com as demais estações que registram as variações do nível do

mar. Se retirado o efeito de sazonalidade, observa-se em Imbituba um aumento constante do nível médio até 2014 e uma menor flutuação da série a partir deste período.

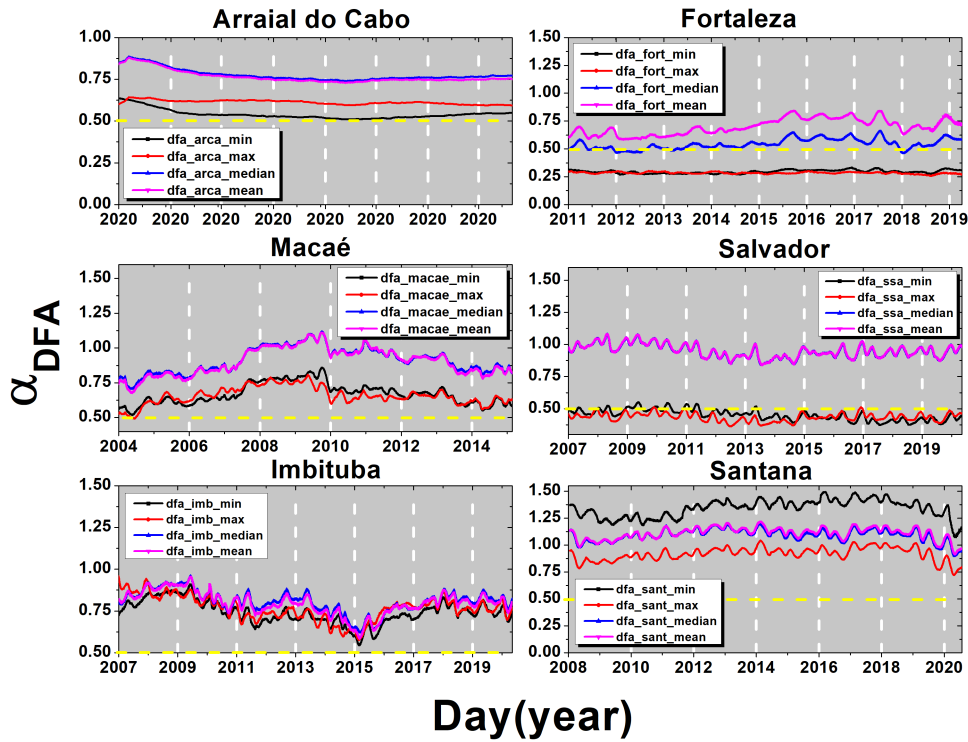


Figura 3.15: DFA deslizante das séries temporais diárias do nível mar (mínimo, máximo, mediano e médio) das Estações Maregráficas controladas pelo IBGE para uma janela de 1000 dias ( $w=1000$ ). Fonte: IBGE. Nota: Elaborado pelo autor

No tocante ao DFA com janelas deslizantes (Figura 3.15), observa-se que todas as estações avaliadas apresentaram comportamento persistente para a média e mediana do nível do mar, tendo ainda Arraial do Cabo, Macaé, Imbituba e Santana apresentando comportamento semelhante também para as demais séries (mínimo e máximo) ( $\alpha_{DFA} > 0,50$ ). Significa dizer que, caso exista uma tendência de crescimento ou decrescimento, esse comportamento tende a se repetir por um longo prazo nessas estações.

Ainda com relação a figura 3.15, é possível identificar com o procedimento das janelas deslizes autocorrelação semelhante entre as séries temporais do nível médio e mediano do mar, o que permite utilizar qualquer uma das medidas descritivas (média ou mediana) para avaliar a memória da série temporal do nível do mar, como já visto por Kleinherenbrink, Riva e Frederikse na comparação de métodos para estimar a tendência de movimento vertical da Terra por GNSS e altimetria em estações maregráficas (KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018a).

Vale ressaltar que é possível encontrar outros trabalhos que utilizaram DFA para análise de

série temporal do nível do mar, como é o caso do próprio autor que analisou autocorrelação de longo alcance na estação maregráfica de Salvador no período de 2009 a 2015 (JUNIOR et al., 2021b), ou na análise multiescala e previsão do nível do mar no norte da China Meridional por Yang e outros, utilizando-se de dados de três marégrafos ao longo da costa de Hong Kong (YANG et al., 2023), ou até mesmo sobre os impactos da dinâmica global do nível do mar por Varotsos e outros (VAROTSOS et al., 2024).

Embora os estudos supracitados tenham convergido em alguns aspectos, no que diz respeito aos achados relativos a autocorrelação. No primeiro, os autores utilizaram o DFA para caracterizar as séries temporais ano a ano do nível do mar com uma abordagem monofractal. E os demais aplicaram o MF-DFA, que é uma extensão do DFA para analisar propriedades multifractais de séries temporais não estacionárias. Entretanto, nenhuma das pesquisas citadas utilizaram o DFA com janelas deslizantes, o que evidencia o ineditismo da presente pesquisa que proporcionou uma visão mais detalhada de como as propriedades das séries mudam ao longo do tempo.

### 3.2.4 Conclusões

O nível médio do mar é uma das variáveis climáticas mais importantes e monitoradas atualmente, considerada também um excelente indicador de processos relacionados as mudanças climáticas (TSIMPLIS et al., 2011). Com intuito de contribuir com pesquisas relacionadas ao tema, neste artigo foi avaliada as flutuações das séries temporais das estações maregráficas do litoral brasileiro controladas pelo IBGE no período de 2002 a 2020 com o procedimento das janelas deslizantes.

Nossa pesquisa não teve a pretensão de esgotar as explicações relacionadas a variabilidade dos dados, seja do ponto de vista geológico, geomorfológico, oceanográfico ou outro qualquer, mas entender as flutuações temporais nos dados do nível do mar e suas implicações. Uma delas, por exemplo, pode ser a complexidade para determinação do datum oficial do país, onde são necessários alguns anos de acompanhamento do nível médio do mar para que seja possível definir um valor de referência.

Os resultados da análise descritiva mostraram que a estação de Macaé foi a que apresentou maior concentração de valores acima da média e o maior coeficiente de variação entre as estações, juntamente com Imbituba, o que evidencia uma maior influência das instabilidades climáticas no sul e sudeste do país. Contrariamente, tem-se Fortaleza e Salvador com as menores variabilidades, sendo Fortaleza a estação mais estável.

O aspecto da sazonalidade foi facilmente percebido nas estações de Santana, Salvador e Imbituba de escala anual, ocasionado provavelmente por influência das chuvas. Além

disto, observou-se em Santana uma segunda sazonalidade de 4 a 5 anos que pode ser atribuído aos fenômenos do El Niño e La Niña, salientando que a estação em questão está localizada em ambiente de rio, onde os períodos de seca e de enchentes tornam-se muito mais perceptíveis e acentuados, se comparados com as demais estações que registram o nível do mar.

O DFA com o procedimento das janelas deslizantes identificou comportamento persistente para todas as estações, evidenciando uma continuidade na linha de tendência por um longo período.

Considerando a metodologia executada nesta pesquisa e nossos achados acreditamos estar oferecendo aos interessados mais uma forma de avaliar dados relativos ao nível do mar em função do tempo e espaço geográfico.

### **3.3 A influência de forças não oceânicas no nível médio do mar da costa brasileira: uma abordagem bivariada e multivariada**

#### **RESUMO**

O comportamento do nível médio do mar (NMM) consiste num indicador relevante para o monitoramento de mudanças climáticas e processos costeiros. Historicamente, sua oscilação tem sido estudada com base em observações maregráficas e altimétricas. No entanto, variações locais e regionais, como subsidência do solo, regime de chuvas e temperatura do ar, podem influenciar significativamente a interpretação dessas medições. Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo principal mensurar a correlação entre as séries temporais do NMM (variável dependente) e três variáveis independentes (*altimetria GNSS*, *precipitação* e *temperatura do ar*) ao longo da costa brasileira, utilizando os coeficientes  $\rho_{DCCA}$  (Detrended Cross-Correlation Analysis) e o  $DMC_x^2$  (Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient). O  $\rho_{DCCA}$  foi aplicado para medir o nível da correlação cruzada entre pares de séries temporais, enquanto o  $DMC_x^2$  avaliou a influência conjunta das variáveis independentes sobre o NMM (Correlação múltipla). Nossos achados identificaram que a *altimetria GNSS* apresentou correlações mais fortes e mais estáveis com o NMM, especialmente em Salvador (EMSAL) e Santana (EMSAN), sugerindo concordância com os movimentos verticais da crosta. Em contrapartida, as correlações com *precipitação* foram mais fracas e com maiores oscilações ao longo do tempo, possivelmente influenciadas por fatores hidrológicos locais. Já a *temperatura do ar* mostrou padrões mais persistentes de correlação positiva, particularmente em Arraial do Cabo (EMARC) e Belém (EMBEL), em consonância com o efeito da expansão térmica dos oceanos. De

modo geral, a correlação cruzada múltipla ( $DMC_x^2$ ), com exceção de EMIMB, apresentou valores mais elevados para escalas maiores ( $n > 100$ ). A análise com janelas deslizantes permitiu identificar padrões regionais dinâmicos e eventos extremos sazonais, como observado em Fortaleza (EMFOR) em 2021. Esses achados reforçam a complexidade dos fatores que controlam o NMM e evidenciam a eficácia dos métodos utilizados na identificação de padrões multivariados, oferecendo subsídios importantes para o planejamento costeiro e a avaliação de riscos relacionados às mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Nível Médio do Mar. Séries Temporais. Correlação Cruzada Múltipla.

## ABSTRACT

Mean sea level (MSL) behavior is a relevant indicator for monitoring climate change and coastal processes. Historically, its fluctuation has been studied based on tide gauge and altimetric observations. However, local and regional variations, such as land subsidence, rainfall patterns, and air temperature, can significantly influence the interpretation of these measurements. In this context, the main objective of this research is to measure the correlation between the MSL time series (dependent variable) and three independent variables (GNSS altimetry, precipitation, and air temperature) along the Brazilian coast, using the  $\rho_{DCCA}$  (Detrended Cross-Correlation Analysis) and the  $DMC_x^2$  (Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient) coefficients.  $\rho_{DCCA}$  was applied to measure the level of cross-correlation between pairs of time series, while the  $DMC_x^2$  assessed the joint influence of the independent variables on MSL (Multiple Correlation). Our findings identified that GNSS altimetry showed stronger and more stable correlations with MSL, especially in Salvador (EMSAL) and Santana (EMSAN), suggesting concordance with vertical crustal movements. In contrast, correlations with precipitation were weaker and showed greater fluctuations over time, possibly influenced by local hydrological factors. Air temperature showed more persistent patterns of positive correlation, particularly in Arraial do Cabo (EMARC) and Belém (EMBEL), consistent with the effect of ocean thermal expansion. In general, the multiple cross-correlation ( $DMC_x^2$ ), with the exception of EMIMB, showed higher values for larger scales ( $n > 100$ ). Sliding window analysis allowed the identification of dynamic regional patterns and seasonal extreme events, as observed in Fortaleza (EMFOR) in 2021. These findings reinforce the complexity of the factors controlling the MSL and demonstrate the effectiveness of the methods used in identifying multivariate patterns, offering important insights for coastal planning and the assessment of risks related to climate change.

**Keywords:** Mean Sea Level. Time Series. Multiple Cross-Correlation.

### 3.3.1 Introdução

Desde os primórdios da civilização os movimentos das águas dos oceanos despertaram a atenção de estudiosos e daqueles que vivem próximo ao mar. Entre os fenômenos que mais intrigaram os habitantes das regiões costeiras do globo, o movimento oscilatório do nível do mar merece destaque, por sua periodicidade regular (CAMARGO; HARARI, 2015).

Essa oscilação vertical da superfície do mar ou outra grande massa d'água sobre a Terra é chamada de Maré, causada primariamente pelas diferenças na atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol sobre os diversos pontos da Terra (MIGUENS, A. P., 1996).

A caracterização das variações temporais da maré mediante análise estatística (médias, extremos e amplitude) fornece subsídios técnicos imprescindíveis para: (i) segurança náutica, (ii) dimensionamento de obras portuárias, e (iii) gestão costeira integrada, assegurando precisão operacional e resiliência ambiental.

De acordo com Dalazoana (DALAZOANA, 2005), a principal referência para dados de maré no litoral brasileiro são as Tábuas de Marés (TM), publicadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha (DHN). Esses registros utilizam como referência o Nível de Redução (NR) - um nível mínimo definido localmente de forma que não haja valores negativos de altura de maré (IBGE, 2009).

Outro nível de referência utilizado se dá através da observação do nível do mar para determinação de um valor médio, sendo para a geodésia a superfície de referência altimétrica, também chamada de geóide. Esta é a superfície de nível do campo de gravidade que melhor se adapta ao nível médio do mar (NMM), e pode se estender para dentro do corpo sólido da Terra (TORGE; MÜLLER, 2012). É essa superfície de nível ideal que corresponde a superfície de equilíbrio, de que se tem ideia observando as águas do mar, supondo-as em tranquilidade absoluta (COMASTRI; TULLER, 2005; ALENCAR, 1990).

De acordo com Marmer (MARMER, 1927), 19 anos de análise de dados representa o período ideal de observações para a obtenção dos *data* altimétricos, necessários para que sejam reduzidos os efeitos das variações periódicas provocadas pelas influências astronômicas. Entretanto, isso não é bem uma regra e vai depender das condições encontradas em cada país. Na Venezuela, por exemplo, o datum foi estabelecido com base em 19 anos de observações maregráficas em La Guaira entre 1953 e 1971 (HERNÁNDEZ et al., 2002). Na Colômbia, foi estabelecido com base em 18 anos de observações maregráficas em Buenaventura entre os anos de 1951 e 1968 (SÁNCHEZ; MARTÍNEZ, 2002). No Brasil, o Datum Vertical Brasileiro (DVB) foi determinado inicialmente em Torres/RS (Latitude: 29°20'07"S; Longitude: 49°43'36"W) de maneira provisória com apenas um

ano de observações (1919-1920), sendo substituído em 1958 pelo Datum de Imbituba com uma série temporal de observações do nível do mar mais longa (1949-1957) (ALENCAR, 1990).

Os referenciais atualmente utilizados derivam de medições realizadas há décadas, apresentando limitações significativas para a monitorização contemporânea, uma vez que o nível do mar serve como parâmetro fundamental para avaliar as mudanças climáticas (TSIMPLIS *et al.*, 2011). Essa relevância torna-se ainda mais evidente quando consideramos que a expansão térmica dos oceanos e o derretimento de geleiras são processos que contribuíram substancialmente para o aumento do nível médio do mar observado ao longo do século XX (CHANGE; others, 2013).

A expansão térmica do nível do mar tem sido amplamente documentada em estudos globais, abrangendo diversas áreas do conhecimento. Pesquisas nas ciências da Terra (BRADLEY; HEWITT, 2024; JOHNSON *et al.*, 2023; TYLER, 2021; BRYAN, 1996), ciências ambientais (LENANTON *et al.*, 2017; GOSLING, 2013) e até mesmo nas ciências de decisão (SUTAWIDJAYA; NAWANGSARI; NOR, 2021) corroboram esse fenômeno. Embora o aumento do nível do mar seja comumente vinculado às mudanças climáticas e ao derretimento das geleiras, conforme mencionado anteriormente, é crucial considerar que fatores locais e regionais podem distorcer essas medições, criando tanto a impressão de um falso aumento quanto a amplificação das variações observadas. Entre esses fatores, destaca-se a subsidência costeira, ou seja, o afundamento natural de terrenos litorâneos. Esse processo pode criar a falsa impressão de um aumento acelerado do nível do mar, mesmo quando a elevação global permanece estável. Exemplos emblemáticos incluem o Estuário do Rio Saigon-Dong Nai e a Costa do Delta do Mekong (NGUYEN; SCHWARZER; RICKLEFS, 2023), além da Costa do Texas (LIU *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2021). No contexto brasileiro, Salvador apresenta significativa tendência à subsidência, condição explicada pela localização da estação de monitoramento sobre a falha geológica que divide a cidade alta da baixa. Esta estrutura geológica está associada à formação da Bacia Sedimentar do Recôncavo e, posteriormente, à invasão marinha que originou a Baía de Todos os Santos (FILHO, 2010).

Fatores climáticos também exercem influência relevante na elevação do nível do mar. Mimura destaca que o aquecimento oceânico promove significativa expansão térmica, elevando o nível médio das águas (MIMURA, 2013). Vermeer e Rahmstorf propõem uma associação direta entre variações do nível do mar e a temperatura média global, utilizando dados históricos para modelar essa conexão (VERMEER; RAHMSTORF, 2009). O próprio IPCC ressalta que mais de 90% do excesso de calor no sistema climático foi absorvido pelos oceanos desde 1970 (IPCC, 2019). Quanto às contribuições pluviométricas, embora menos expressivas que outros mecanismos, Milly, Wetherald, Dunne e Delworth alertam que seu impacto não deve ser subestimado, particularmente em escalas interanuais

e decadais (MILLY et al., 2002). Evidências dessa influência são observadas em estudos regionais, como na costa de Bangladesh, onde a precipitação continental mostrou-se determinante na variabilidade de extremos do nível do mar (ISLAM; SATO, 2021).

Este estudo investiga as relações de dependência entre as séries temporais do nível do mar no litoral brasileiro e variáveis geodésico-meteorológicas em diferentes escalas temporais, empregando abordagens de correlação cruzada. Para análises bivariadas, utilizou-se o coeficiente  $\rho_{DCCA}$  (ZEBENDE, 2011) para quantificar as correlações entre o nível médio do mar (variável dependente  $y$ ) e cada variável independente individualmente - altimetria por GNSS ( $x_1$ ), precipitação ( $x_2$ ) e temperatura ( $x_3$ ). Para avaliações multivariadas, adotou-se o coeficiente  $DMC_x^2$  (ZEBENDE; FILHO, 2018), que generaliza o  $\rho_{DCCA}$  ao mensurar simultaneamente a correlação cruzada entre  $y$  e múltiplas variáveis independentes ( $x_1, x_2, x_3 \dots x_k$ ). A seleção metodológica definiu o nível médio do mar como variável resposta, enquanto altimetria, precipitação e temperatura foram estabelecidas como preditoras, permitindo assim uma análise integrada dos fatores influenciadores.

O coeficiente  $\rho_{DCCA}$  apresenta vasta aplicação documentada na literatura (FIGUEREDO et al., 2023; JUNIOR et al., 2021a; GUEDES et al., 2018; ZEBENDE et al., 2018; FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014; ZEBENDE; SILVA; FILHO, 2013). Já o  $DMC_x^2$ , apesar de mais recente, já validou seu potencial tanto em simulações quanto em estudos empíricos (ZEBENDE; FILHO, 2018; FILHO et al., 2021), com aplicações que abrangem desde análise de crises financeiras (GUEDES et al., 2022a) até modelagem climática (BRITO; ARAÚJO; ZEBENDE, 2019) e processamento biomédico (RIBEIRO et al., 2025). Entretanto, uma revisão sistemática na base Scopus (período 2018–2025) <sup>1</sup> revelou uma lacuna metodológica significativa: não foram identificados estudos que aplicassem o  $DMC_x^2$  para modelar, em múltiplas escalas temporais, a relação entre o nível do mar ( $y$ ) e o conjunto integrado de variáveis independentes aqui investigadas (precipitação, temperatura do ar e altimetria por GNSS). Esta constatação, corroborada pela ausência de publicações que combinem os descritores "DMC coefficient", "sea level" e "multiscale analysis" nos últimos cinco anos, confirma o caráter pioneiro da presente abordagem.

Dessa forma, enquanto abordagens bivariadas, como o coeficiente  $\rho_{DCCA}$ , são ferramentas valiosas para diagnosticar relações multiescalares entre duas variáveis, elas são intrinsecamente limitadas para isolar o efeito combinado e potencialmente interativo de múltiplos forçantes que atuam simultaneamente sobre o NMM. Por outro lado, técnicas multivariadas tradicionais, muitas vezes baseadas em suposições de estacionariedade, falham em capturar as dependências de escala que são fundamentais para processos geofísicos. O coeficiente  $DMC_x^2$  resolve essa dupla limitação ao generalizar a análise de correlação cruzada sem tendência para múltiplas variáveis, preservando simultaneamente a propriedade

<sup>1</sup>Consulta realizada em 15/10/2023 na Scopus com os operadores (TITLE-ABS-KEY("DMC coefficient" AND "sea level") AND PUBYEAR < 2018), retornando 0 resultados relevantes para a combinação proposta

multiescalar e a robustez frente a não-estacionariedades. Portanto, sua aplicação neste trabalho representa uma abordagem metodológica inovadora e particularmente adequada para desvendar a contribuição integrada e dependente da escala de forçantes geodésicas (GNSS), hidrológicas (precipitação) e térmicas (temperatura) na variabilidade do nível do mar costeiro.

Além dos coeficientes mencionados, este estudo utilizou a entropia para analisar as flutuações nas séries temporais do nível do mar, a fim de quantificar seu grau de previsibilidade. Valores baixos de entropia indicam padrões regulares, associados a alta capacidade de previsão, enquanto valores elevados refletem comportamentos caóticos ou influenciados por ruído, que dificultam a antecipação de tendências. Essa métrica é consolidada em pesquisas envolvendo séries temporais, com aplicações em meteorologia (MEDEIROS, 2019), medicina (FILHO et al., 2025) e estudos costeiros (LI; LI; LENG, 2015; OH et al., 2018; JIN et al., 2023), incluindo análises do nível do mar.

Este artigo estrutura-se em cinco seções: (i) Introdução, que contextualiza a pesquisa e seus objetivos; (ii) Métodos, detalhando a seleção de dados e procedimentos analíticos; (iii) Resultados, apresentando os principais achados; (iv) Discussões, interpretando os resultados; além da conclusão (v). Essa organização busca esclarecer tanto os fundamentos quanto as descobertas da investigação, garantindo transparência metodológica.

### 3.3.2 Métodos

#### 3.3.2.1 Área de Estudo

Toda e qualquer estação maregráfica consiste numa estrutura ou equipamento instalado em áreas costeiras, portos ou estuários e servem para registrar as variações do nível d'água ao longo do tempo. Para Keyzers (KEYSERS et al., 2013), suas informações podem ser úteis também em diversas aplicações, tais como: redução de sondagens para conservação e ampliação da capacidade de portos e vias navegáveis, implantação de infraestrutura em regiões litorâneas e estudo de possíveis medidas de adaptação e mitigação dos impactos de elevação global do nível do mar.

Essas estações estão espalhadas pelo mundo inteiro e no Brasil não é diferente. Em especial, sete delas, sendo uma já desativada, são controladas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Figura 3.16), através da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia (RMPG) e seus dados são disponíveis gratuitamente no portal do instituto.



Figura 3.16: Estações Maregráficas controladas pelo IBGE e objeto de estudo da pesquisa. Fonte: (JUNIOR et al., 2025)

### 3.3.2.2 Tratamento dos Dados

Neste estudo, adotou-se o nível médio do mar como variável dependente, enquanto a temperatura do ar, a precipitação e a altimetria por GNSS foram consideradas variáveis independentes. A Figura 3.17 ilustra as etapas metodológicas empregadas para a análise de correlação entre os dados modelados.

Para os dados do nível médio do mar foram utilizadas as séries temporais do IBGE para cada uma das estações da rede maregráfica permanente para a geodésia (RMPG), estruturadas da seguinte forma: a data no formato dd/mm/aaaa na primeira coluna, a hora no formato hh:mm na segunda coluna, o valor do nível d'água observado em metros, o valor da previsão astronômica também em metros e o valor da observação aplicado o filtro de 168 horas. O período analisado foi definido em função da disponibilidade de dados das estações maregráficas, compreendendo o intervalo entre 2002 e 2023. As características de cada uma das estações e seus respectivos períodos e taxas de coleta podem ser encontrados acessando a página do IBGE em: [Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia](#) (Visitado em 01/07/2022)

Para os dados de temperatura do ar e precipitação, foram utilizadas as estações meteorológicas automáticas mais próximas de cada estação maregráfica e que tivessem um conjunto satisfatório de informações, mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Além das variáveis de temperatura do ar e precipitação, os arquivos disponibi-

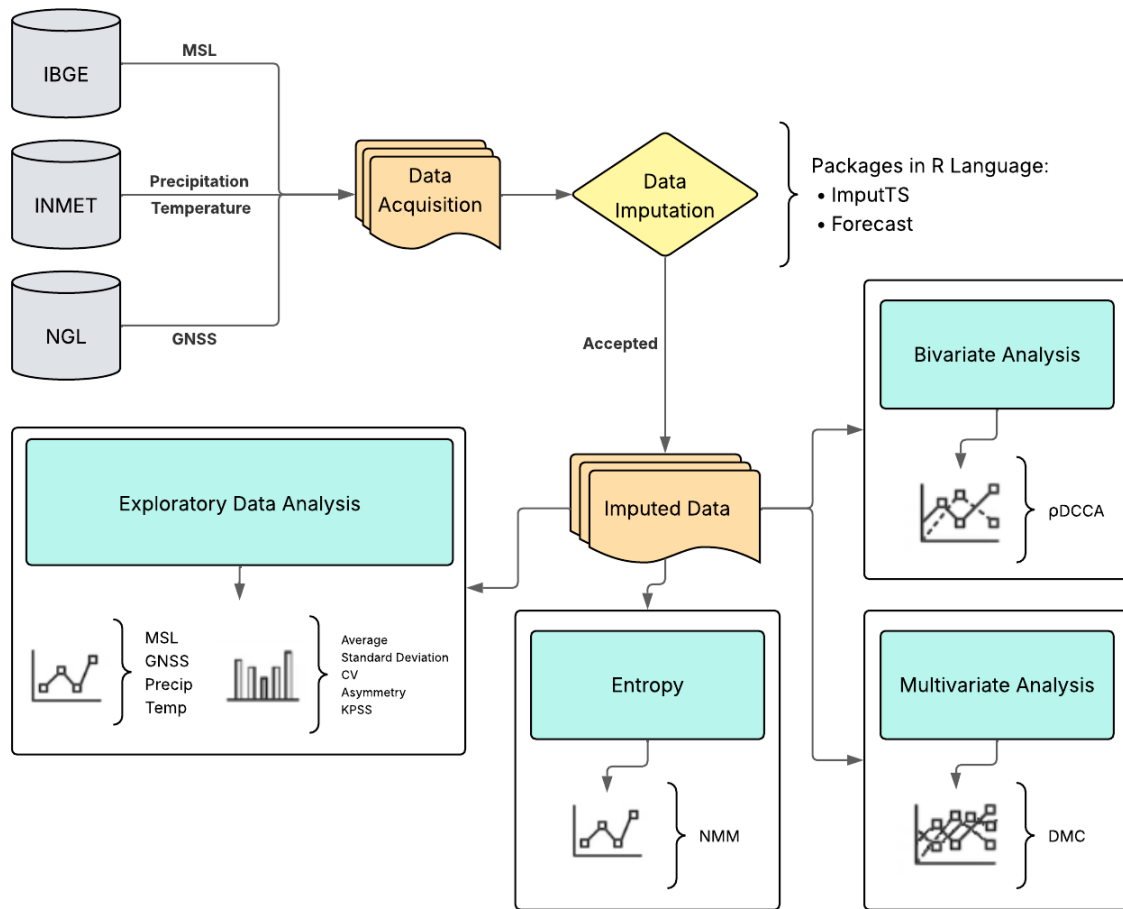


Figura 3.17: Fluxograma metodológico da análise das flutuações da série temporal do nível médio do mar (variável dependente) e das variáveis independentes (temperatura do ar, precipitação e altimetria por satélite). As etapas incluem: (1) aquisição, pré-processamento dos dados, (2) Imputação, (3) Análise exploratória das séries temporais, (4) Determinação da entropia da série do nível médio do mar (5) Aplicação dos métodos de mensuração do nível de correlação cruzada sem tendência, (6) Resultados. Fonte: Elaborado pelos autores.

lizados pelo INMET incluem outros parâmetros meteorológicos, organizados da seguinte forma: data da medição no formato aaaa-mm-dd, hora no formato hhmm, seguida dos valores de precipitação total, pressão atmosférica ao nível da estação, pressão atmosférica reduzida ao nível do mar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página do INMET em: [INMET: Instituto Nacional de Meteorologia](#) (Visitado em 20/03/2025).

Seguindo o mesmo critério de proximidade, para a altimetria por GNSS foram utilizados os dados disponibilizados pelo NGL (*Nevada Geodetic Laboratory*) e não pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do IBGE (RBMC). Esta escolha foi motivada pela necessidade prioritária de homogeneidade e consistência interna das séries temporais, fatores críticos para a robustez das análises de correlação subsequentes. O NGL processa dados globalmente, em base diária, dentro de um referencial geodésico único e estável

(IGS14), empregando uma estratégia de processamento uniforme para todas as estações. Em contraste, séries derivadas da RBMC, embora de grande valor para a geodésia nacional, podem conter descontinuidades (saltos) da ordem de alguns milímetros associadas a mudanças no referencial de processamento ao longo do tempo. Adicionalmente, a utilização de um único centro processador (NGL) evita a introdução de vieses sistemáticos ou discrepâncias nas estimativas de velocidade vertical que podem surgir da combinação de estratégias de processamento heterogêneas (ex.: diferentes *softwares*, modelos e seleção de estações de referência). Tais vieses, tipicamente na faixa de mm/ano, têm magnitude comparável ao sinal de interesse (movimento vertical da crosta) e poderiam obscurecer ou falsear os sinais de correlação cruzada com o nível do mar. Portanto, o conjunto de dados homogêneo fornecido pelo NGL constitui uma fonte mais confiável e consistente para os movimentos verticais da crosta em cada local das estações maregráficas.

A formatação dos arquivos fornecidos pelo NGL segue a seguinte estrutura: código da estação, data no formato aammmdd, ano decimal, dia juliano modificado, semana gps, dia da semana gps, longitude do meridiano de referência (em graus), parte inteira e fracionada das ordenadas leste, norte e altura, altura da antena assumida no cabeçário rinex, o sigma das ordenadas leste, norte e altura e a latitude, longitude e altura nominal da estação. Maiores detalhes podem ser encontrados acessando a página do NGL em: [Nevada Geodetic Laboratory](#) (Visitado em 10/03/2025).

Tabela 3.5: Distância aproximada entre as estações utilizadas

Estação Maregráfica	Estação GNSS	Distância (km)	Estação meteorológica	Distância (km)
Arraial do Cabo (EMARC)	Rio de Janeiro (ONRJ)	124,48	Arraial do Cabo (A606)	0,85
Belém (EMBEL)	Belém (BELE)	5,28	Belém (A201)	7,20
Fortaleza (EMFOR)	Eusébio (CEEU)	18,91	Fortaleza (A305)	13,11
Imbituba (EMIMB)	Imbituba (IMBT)	0,77	Urussanga (A814)	73,21
Macaé (EMMAC)	Rio de Janeiro (ONRJ)	159,86	Macaé (A608)	4,50
Salvador (EMSAL)	Salvador (SSA1)	0,16	Salvador (A401)	3,71
Santana (EMSAN)	Santana (APS1)	0,25	Macapá (A249)	13,81

Fonte: Elaborado pelos autores

A tabela 3.5 apresenta as distâncias aproximadas entre cada uma das estações maregráficas e suas estações geodésicas e meteorológicas mais próximas utilizadas.

Antes das análises exploratória e análises bivariada e multivariada, todo o conjunto de dados maregráficos, geodésicos e meteorológicos passaram pelo processo de imputação para preenchimento dos valores faltantes, utilizando-se dos pacotes *ImputTS* e *Forecast*,

apresentados na seção 3.3.3.

### 3.3.2.3 Métodos Estatísticos

O monitoramento do nível do mar tem diversas aplicações, como já mencionado neste texto. Devido essa realidade, pode existir por parte do pesquisador o interesse de correlacionar as flutuações do nível do mar com demais variáveis climáticas ou/e ambientais (NGUYEN; SCHWARZER; RICKLEFS, 2023; LIU et al., 2020; ZHOU et al., 2021; MIMURA, 2013; VERMEER; RAHMSTORF, 2009; MILLY et al., 2002; ISLAM; SATO, 2021).

Um dos coeficientes utilizados para mensurar correlação entre as flutuações de dois sinais em função do tempo é o Coeficiente de Pearson (GHASEMIFAR et al., 2020; MUTTALIB; AMEEN; MAHMOOD, 2020; VIGNUDELLI et al., 2020), muito embora há quem questione a eficiência do método para séries temporais não estacionárias (KRISTOUFEK, 2014; PIAO; FU, 2016).

Uma boa opção é a utilização do  $\rho_{DCCA}$ , modelado por Zebende em 2011 (ZEBENDE, 2011), é um coeficiente capaz de quantificar o nível de correlação cruzada, tendo como base o DFA-*Detrended Fluctuation Analysis* (PENG et al., 1994) e o DCCA-*Detrended Cross-Correlation Analysis* (PODOBNIK; STANLEY, 2008), destinando-se a estimação do coeficiente de correlação cruzada em diferentes escalas de tamanho  $n$ . Define-se como a relação entre a função de covariância sem tendência  $F_{DCCA}^2$  e a função de variância sem tendência  $F_{DFA}$ , conforme expresso na equação 3.6 (ZEBENDE, 2011):

$$\rho_{DCCA}(n) \approx \frac{F_{DCCA}^2(n)}{F_{DFA_1}(n) \cdot F_{DFA_2}(n)} \quad (3.6)$$

Uma de suas vantagens é a possibilidade de mensurar a correlação entre as séries em escalas diferentes de tempo e sua análise é feita sem a componente tendência que tende a mascarar as verdadeiras correlações (FILHO; SILVA; ZEBENDE, 2014). Adicionalmente, sua construção leva em consideração a ordem dos pares das séries temporais, o que não contraria o princípio básico da análise das séries que é a dependência temporal entre elas, fato que não está presente em alguns coeficientes de correlação cruzada, como o coeficiente de correlação de Pearson (SILVA FILHO, A. M., 2014b).

Independentemente de utilizar o coeficiente padrão de Pearson ou  $\rho_{DCCA}$ , é que os mesmos limitam-se a correlacionar apenas duas variáveis. Como uma generalização do  $\rho_{DCCA}$ , surge o  $DMC_x^2$  (*Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient*), idealizado por Ze-

bende e da Silva Filho (ZEBENDE; FILHO, 2018), capaz de mensurar o nível de correlação cruzada entre uma variável dependente e duas ou mais variáveis independentes.

De acordo com Zebende e da Silva Filho (ZEBENDE; FILHO, 2018), supõe-se que temos várias séries temporais  $(i + 1)$  com  $N$  pontos cada, sendo  $\{y\}$  a variável dependente e  $\{x_1\}, \{x_2\}, \dots, \{x_i\}$  as variáveis independentes. Logo

$$DMC_x^2(n) \equiv \rho_{y,x_i}(n)^T \rho^{-1}(n) \rho_{y,x_i}(n) \quad (3.7)$$

Aqui

$$\rho_{y,x_i}(n)^T = [\rho_{y,x_1}(n), \rho_{y,x_2}(n), \dots, \rho_{y,x_i}(n)] \quad (3.8)$$

é o vetor de correlações cruzadas sem tendência entre as variáveis preditoras (variáveis independentes) e a variável alvo (variável dependente).  $\rho(n)$  é a matriz de correlação cruzada sem tendência,  $i \times j$ , das variáveis preditoras (variáveis independentes). Por definição,  $\rho_{x_i,x_j}(n) = \rho_{x_j,x_i}(n)$  e  $\rho_{x_i,x_i}(n) = 1$ , portanto:

$$\rho^{-1}(n) \equiv \begin{pmatrix} 1 & \rho_{x_1,x_2}(n) & \rho_{x_1,x_3}(n) & \dots & \rho_{x_1,x_i}(n) \\ \rho_{x_1,x_2}(n) & 1 & \rho_{x_2,x_3}(n) & \dots & \rho_{x_2,x_i}(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \rho_{x_1,x_i}(n) & \rho_{x_2,x_i}(n) & \rho_{x_3,x_i}(n) & \dots & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (3.9)$$

Considerando as correlações DCCA (*Detrended Cross-Correlation Analysis*) entre as variáveis analisadas, temos as seguintes relações:

- $\rho_{y,x_1}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_1$
- $\rho_{y,x_2}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_2$
- $\rho_{y,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $y$  e  $x_3$
- $\rho_{x_1,x_2}$ : coeficiente DCCA entre  $x_1$  e  $x_2$
- $\rho_{x_1,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $x_1$  e  $x_3$
- $\rho_{x_2,x_3}$ : coeficiente DCCA entre  $x_2$  e  $x_3$

No caso específico deste estudo tem-se a variável dependente  $y$  como sendo o nível médio

do mar e as três variáveis independentes a altimetria por GNSS ( $x_1$ ), a precipitação ( $x_2$ ) e a temperatura do ar ( $x_3$ ), de modo que a expressão reduzida pode ser expressa da seguinte forma:

$$DMC_x^2(n) = \frac{1}{1 - \rho_{x_1,x_2}^2 - \rho_{x_1,x_3}^2 - \rho_{x_2,x_3}^2 + 2\rho_{x_1,x_2}\rho_{x_1,x_3}\rho_{x_2,x_3}} \times \left[ \begin{aligned} &\rho_{y,x_1}^2(1 - \rho_{x_2,x_3}^2) + \rho_{y,x_2}^2(1 - \rho_{x_1,x_3}^2) + \rho_{y,x_3}^2(1 - \rho_{x_1,x_2}^2) \\ &- 2\rho_{y,x_1}\rho_{y,x_2}(\rho_{x_1,x_2} - \rho_{x_1,x_3}\rho_{x_2,x_3}) \\ &- 2\rho_{y,x_1}\rho_{y,x_3}(\rho_{x_1,x_3} - \rho_{x_1,x_2}\rho_{x_2,x_3}) \\ &- 2\rho_{y,x_2}\rho_{y,x_3}(\rho_{x_2,x_3} - \rho_{x_1,x_2}\rho_{x_1,x_3}) \end{aligned} \right]. \quad (3.10)$$

O **numerador** representando a soma das correlações individuais ao quadrado entre  $y$  e cada  $x_i$ , penalizada pelas interdependências entre os preditores. O **denominador** ajusta pela colinearidade entre os preditores. Quanto maior a correlação entre  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , menor o valor do denominador. O coeficiente  $DMC_x^2$  também depende da escala  $n$ , herdando o caráter multiescala da análise DCCA. Em outras palavras, o **denominador** ajusta a influência das correlações entre os preditores. Quanto maior a multicolinearidade entre  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , menor será o denominador.

Para validar a equivalência entre a formulação matricial completa do coeficiente (Equação 3.7) e sua expressão reduzida (Equação 3.10), foi conduzida uma análise comparativa direta. O objetivo foi provar numericamente a similaridade das duas abordagens, assegurando que a simplificação do modelo não comprometeria sua acurácia. A diferença residual absoluta entre as previsões do modelo matricial ( $DMC_{mat}$ ) e do modelo reduzido ( $DMC_{red}$ ) foi calculada para toda a série temporal, conforme definido por:

$$Dif = DMC_{mat} - DMC_{red} \quad (3.11)$$

em que  $Dif$  representa a diferença entre as duas abordagens.

A análise do gráfico resultante (Figura ??) fornece a evidência quantitativa necessária. As discrepâncias entre os modelos são da ordem de  $10^{-16}$ , magnitudes que estão no limiar da precisão numérica de ponto flutuante do sistema computacional utilizado. Portanto, os resultados comprovam numericamente a equivalência entre as duas formulações.

Para qualquer caso,  $0 \leq DMC_x^2 \leq 1$ , podendo ser dividido em intervalos, propondo uma

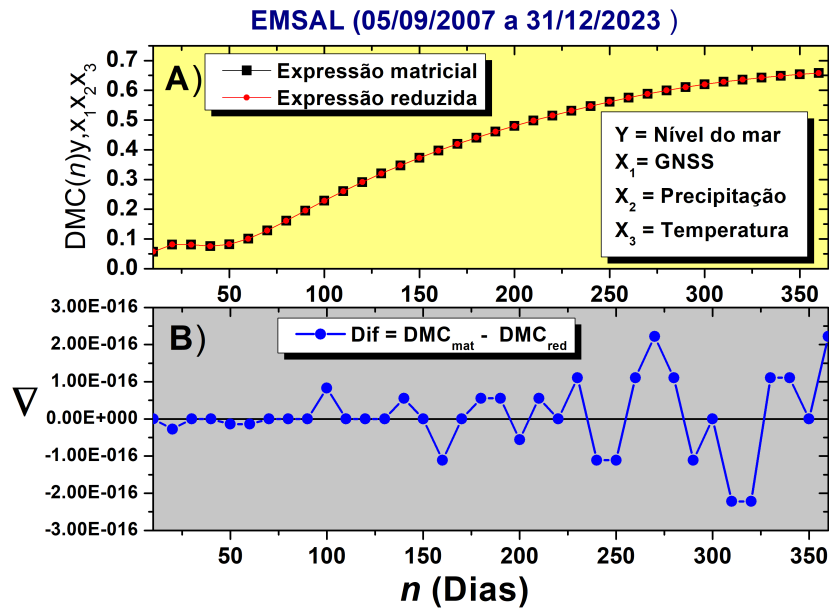


Figura 3.18: A - Coeficiente DMC para diferentes escalas temporais de tamanho  $n$  para séries temporais da EMSAL (maio/2007 a dezembro/2023) definidas pela expressão reduzida (Equação ??) e pelo método matricial (Equação 2.19). B - Diferença pelo método matricial e pela expressão reduzida. Fonte: Elaborada pelos autores.

intensidade de correlação cruzada múltipla sem tendência, conforme tabela 3.6.

Tabela 3.6: Intensidade de Correlação Cruzada Múltipla sem Tendência

Intervalos $DMC_x^2$	Nível de Intensidade
0,0 $\mapsto$ 0,2	muito fraca
0,2 $\mapsto$ 0,4	fraca
0,4 $\mapsto$ 0,6	média
0,6 $\mapsto$ 0,8	forte
0,8 $\mapsto$ 1,0	muito forte

Fonte: Adaptado de Zebende e da Silva Filho (ZEBENDE; FILHO, 2018)

Especificamente para o  $DMC_x^2$ , foi utilizado o procedimento das janelas deslizante (GUEDES; ZEBENDE, 2019; GUEDES; SILVA-FILHO; ZEBENDE, 2021). Este, utilizado inicialmente com o expoente de Hurst na avaliação temporal de série financeira, consiste na escolha de uma janela de tamanho  $W$ , usualmente de 1000 observações (CARBONE; CASTELLI; STANLEY, 2004c), mas é possível encontrar análises com 365 pontos ((FILHO et al., 2024; SANTOS et al., 2022a)). Com isso, é possível mensurar o grau de dependência temporal do nível do mar com as demais variáveis (altimetria por GNSS, precipitação e temperatura do ar) em função do tempo de forma dinâmica.

Nesta pesquisa o procedimento de janelas deslizantes foi executado com auxílio da linguagem R (R Core Team, 2014), utilizando escalas específicas para  $n$  iguais a 7, 15, 30 e 60 dias.

Adicionalmente, foi utilizada a entropia para medir o nível de incerteza, aleatoriedade ou imprevisibilidade associada a variável nível médio do mar. Inspirada pela teoria da informação, desenvolvida por Claude Shannon (1948), ela quantifica o grau de desordem ou a quantidade de informação necessária para descrever um determinado conjunto de dados (SHANNON, 1948).

Entre os métodos para mensurar entropia, nesta pesquisa foi utilizado o método *FastApEn*, uma evolução do *ApEn*. O método *ApEn* (*Approximate Entropy*) foi proposto por Pincus (1991) como uma medida da regularidade e previsibilidade de séries temporais ruidosas. Sua principal vantagem reside na capacidade de lidar com séries de tamanho relativamente pequeno, sendo menos exigente computacionalmente em relação à complexidade estrutural da série (PINCUS, 1991; PINCUS; GOLDBERGER, 1994).

Seja  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  uma série temporal de comprimento  $N$ .

1. Para cada  $i = 1, \dots, N - m + 1$ , definimos o vetor:

$$\mathbf{u}(i) = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1}\}$$

2. A distância entre dois vetores  $m$ -dimensionais é definida como:

$$d[\mathbf{u}(i), \mathbf{u}(j)] = \max_{k=1, \dots, m} |x_{i+k-1} - x_{j+k-1}|$$

3. Para uma tolerância  $r > 0$ , calculamos:

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{j=1}^{N-m+1} \Theta(r - d[\mathbf{u}(i), \mathbf{u}(j)])$$

em que  $\Theta(\cdot)$  é a função de Heaviside.

4. A entropia aproximada é dada por:

$$\text{ApEn}(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)$$

com:

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r)$$

Sendo:

- $m$ : Dimensão embutida (geralmente  $m = 2$ ).

- $r$ : Tolerância, usualmente uma fração do desvio padrão (DP) da série ( $r = 0.2 \times \text{DP}$ , por exemplo).
- $N$ : Tamanho da série (ou janela) considerada.

No entanto, o  $ApEn$  apresenta duas limitações importantes: a primeira é que depende fortemente do tamanho da amostra e dos parâmetros  $m$ ,  $r$  e  $\tau$ ; e a segunda é sua sensibilidade à inclusão de novos dados, uma vez que considera auto-comparações nas subsequências (PINCUS, 1991; PINCUS; GOLDBERGER, 1994).

O método  $FastApEn$  (*Fast Approximate Entropy*) (TOMĀLA, 2018a; TOMĀLA, 2021) é uma versão computacionalmente otimizada da  $ApEn$  (PINCUS, 1991). Seu cálculo é baseado no mesmo princípio da contagem de padrões similares, mas com simplificações que tornam sua execução mais eficiente para grandes volumes de dados. A principal vantagem é a melhoria significativa no desempenho computacional sem perda expressiva de precisão, o que o torna particularmente útil para grandes conjuntos de dados, como é o caso das séries avaliadas nesta pesquisa.

Para facilitar a interpretação e a comparação entre diferentes janelas, escalas e/ou séries, as medidas de entropia foram normalizadas para serem compreendidas no intervalo de 0 a 1 inclusive, através da equação 3.12.

$$E_{norm} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3.12)$$

Na equação 3.12,  $x_i$  denota entropia para uma determinada série temporal no ponto  $i$  e  $\min(x_i)$  o valor mínimo da entropia observado na série temporal e  $\max(x_i)$  o valor máximo de entropia observado na série temporal objeto de estudo.

### 3.3.3 Resultados

#### 3.3.3.1 Análise Exploratória dos Dados

A Tabela 3.7 apresenta as estatísticas descritivas (média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e os resultados do teste de estacionariedade KSP) referentes às séries temporais do nível médio do mar, altimetria obtida por GNSS, precipitação e temperatura do ar, nas sete estações maregráficas analisadas. Além disso, é informado o percentual de dados imputados em cada uma das séries consideradas.

Tabela 3.7: Análise Exploratória das Séries Temporais e percentual de Imputação

Estação	Variável	N	Média	DP	CV (%)	Ass	KPSS	Imputação (%)
Arraial do Cabo (EMARC)	NMM	2254	1,78	0,11	6,04	0,39	0,10	0,00
	GNSS	2254	35,63	0,01	0,02	-0,05	0,09	3,77
	Precip	2254	2,46	9,77	396,73	10,08	0,10	7,49
	Temp	2254	23,66	1,88	7,93	-0,13	0,01	1,93
Belém (EMBEL)	NMM	1493	3,62	0,13	3,54	1,06	0,01	5,90
	GNSS	1493	9,06	0,01	0,10	0,74	0,01	11,59
	Precip	1493	10,45	15,12	144,64	2,76	0,01	3,05
	Temp	1493	27,03	1,11	4,10	-0,68	0,01	3,06
Fortaleza (EMFOR)	NMM	5735	5,86	0,04	0,72	0,23	0,01	0,00
	GNSS	5735	21,73	0,01	0,03	0,13	0,01	5,34
	Precip	5735	4,04	10,37	256,70	5,32	0,08	15,30
	Temp	5735	27,26	0,87	3,18	-0,63	0,01	13,98
Imbituba (EMIMB)	NMM	5018	1,59	0,18	11,08	0,20	0,01	13,80
	GNSS	5018	31,37	0,01	0,02	-0,02	0,01	3,83
	Precip	5018	4,82	10,44	216,40	4,11	0,10	9,46
	Temp	5018	20,06	4,21	20,98	-0,32	0,10	8,73
Macaé (EMMAC)	NMM	2983	1,35	0,12	8,53	0,36	0,03	33,20
	GNSS	2983	35,61	0,01	0,03	-0,07	0,01	2,04
	Precip	2983	3,51	10,56	300,43	6,61	0,05	5,45
	Temp	2983	23,28	2,53	10,87	-0,04	0,03	5,45
Salvador (EMSAL)	NMM	5962	7,29	0,06	0,85	0,42	0,01	1,60
	GNSS	5962	-2,10	0,01	-0,31	-0,16	0,01	1,61
	Precip	5962	4,30	10,56	245,60	5,54	0,01	6,72
	Temp	5962	25,70	1,47	5,70	-0,18	0,03	5,08
Santana (EMSAN)	NMM	2896	2,598	0,27	10,21	0,11	0,02	10,50
	GNSS	2896	-12,721	0,01	-0,09	-0,09	0,01	4,90
	Precip	2896	6,978	12,74	182,58	4,29	0,10	21,41
	Temp	2896	27,200	1,21	4,43	-0,04	0,03	19,30

Fonte: Elaborado pelos autores. Nota: NMM denota nível médio do Mar, GNSS denota altimetria por satélite, Precip denota o acumulado de chuva no dia e Temp a temperatura média diária

Vale ressaltar que a média na variável NMM utiliza um referencial próprio do IBGE e apenas as suas variações é que devem ser consideradas como informações absolutas. Já o coeficiente de variação revela padrões distintos de estabilidade e variabilidade que ajudam a compreender melhor o comportamento climático e oceanográfico local. Em resumo, o NMM apresenta baixos coeficientes de variação (CV) em todas as estações, com destaque para EMFOR (0,72%) e EMSAL (0,85%), indicando alta estabilidade nessas séries temporais. Mesmo em locais como EMARC (6,04%) e EMMAC (8,53%), o CV permanece relativamente baixo, o que é esperado para essa variável analisada.

A análise dos coeficientes de variação (CV) revela padrões distintos entre as variáveis investigadas. A altimetria por GNSS apresenta notável estabilidade, com CVs inferiores a 0,4% em todas as estações, confirmando sua precisão para monitoramento geodésico e adequação como referência confiável na detecção de variações reais do nível do mar. Em

oposição, a precipitação demonstra a maior variabilidade, com CVs superiores a 100% em todas as estações - alcançando extremos de 396,73% na EMARC e 256,70% na EMFOR, o que reflete sua natureza intermitente e acentuada sazonalidade no litoral brasileiro, marcada pela alternância entre períodos secos e eventos pluviométricos intensos (INPE, 2024; NETO; SANTOS, 2024; LAZZARI et al., 2024). A temperatura do ar exibe comportamento intermediário, com CVs entre 3,18% (EMFOR) e 20,98% (EMIMB), indicando relativa estabilidade térmica, embora com flutuações sazonais discerníveis (Tabela 3.7). Esses achados são consistentes com os resultados do teste KPSS (KWIATKOWSKI et al., 1992a), que identificou não estacionariedade nesta variável na maioria das estações, sugerindo a presença de tendências, ciclos sazonais, heterocedasticidade ou dependência temporal de longo prazo.

Os dados faltantes nas séries temporais (Tabela 3.7) foram imputados mediante uma abordagem combinada que utilizou o filtro de Kalman, implementado através do pacote R `imputeTS` (MORITZ; BARTZ-BEIELSTEIN, 2017), e a decomposição sazonal, realizada com o pacote `forecast` (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021). Essa estratégia dual foi adotada considerando as características específicas das séries temporais analisadas, onde métodos convencionais de imputação, normalmente baseados em correlações entre atributos, se mostram inadequados. Como demonstrado por Pereira et al. em estudo com dados do INMET (PEREIRA et al., 2024), séries temporais univariadas requerem algoritmos capazes de explorar dependências temporais intrínsecas, como os métodos aqui empregados. A escolha por combinar o filtro de Kalman com a decomposição sazonal justifica-se pela capacidade do primeiro em capturar padrões temporais subjacentes, enquanto o segundo isola eficientemente componentes de tendência e sazonalidade. A validação prévia dessas técnicas em contextos similares (PEREIRA et al., 2024) atesta a robustez da metodologia de imputação adotada neste estudo.

Todas as séries temporais apresentaram valores faltantes, que variaram de 0,00% a 33,20%, sendo de 4,9% a 21,41% para Santana, 3,05% a 11,59% para Belém, 0,00% a 15,30% para Fortaleza, 1,60% a 6,72% para Salvador, 0,00% a 7,49% para Arraial do Cabo, 2,04% a 33,20% para Macaé e 3,83% a 13,80% para Imbituba (Tabela 3.7).

A seção seguinte apresenta os resultados da análise de entropia aplicada às séries temporais do nível do mar, com o objetivo principal de quantificar o grau de previsibilidade do comportamento maregráfico nas estações costeiras estudadas. Esta abordagem permitirá uma avaliação comparativa da complexidade dinâmica entre os diferentes locais analisados, bem como a caracterização dos padrões de variabilidade temporal observados. Adicionalmente, os resultados fornecerão subsídios para investigar possíveis relações entre os valores de entropia obtidos e os fatores oceanográficos locais específicos de cada estação.

### 3.3.3.2 Entropia

Antes de correlacionar a série maregráfica com as demais variáveis estudadas (altimetria por GNSS, precipitação e temperatura do ar), realizou-se uma análise de entropia do nível médio do mar em cada estação (Arraial do Cabo, Belém, Fortaleza, Imbituba, Macaé, Salvador e Santana) para quantificar a incerteza associada a esta variável. Para esse cálculo, adotou-se o método FastApEn (TOMÉALA, 2018a; TOMÉALA, 2021), uma versão computacionalmente otimizada do ApEn (PINCUS, 1991), aplicando uma janela deslizante de 30 dias ( $w = 30$ ), período que corresponde ao ciclo sinódico lunar (29,5 dias) (PUGH; WOODWORTH; WOODWORTH, 2014; SILVEIRA, 2001). Os resultados estão apresentados na Figura 3.19, enquanto a Tabela 3.8 exibe as estatísticas descritivas da análise, com valores normalizados no intervalo  $[0, 1]$ .

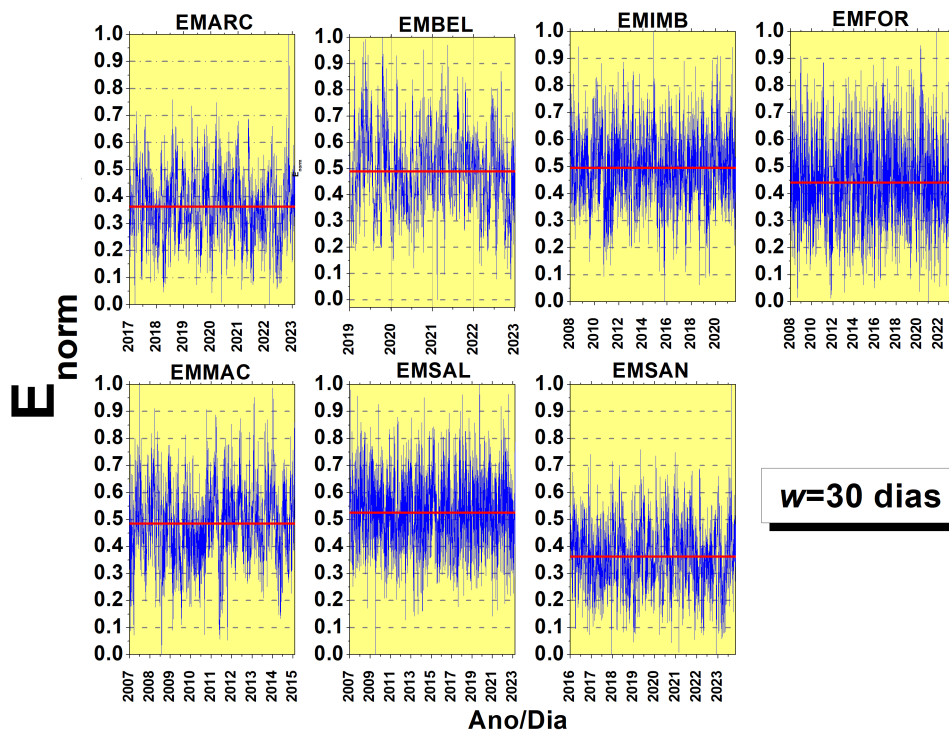


Figura 3.19: Entropia da séries temporal do nível médio do mar das estações maregráficas do litoral brasileiro para uma janela de 30 dias ( $w=30$ ). Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas e os valores de entropia foram normalizados entre 0 e 1, sendo a linha vermelha horizontal dos gráficos correspondentes a média da entropia no período. Fonte: Elaborado pelos autores

A análise dos resultados revela que a estação de Salvador apresentou o maior valor de entropia média (0,5262 em escala normalizada 0-1) entre todas as estações estudadas, indicando a maior complexidade dinâmica e, conseqüentemente, um comportamento menos previsível em sua série temporal. Paralelamente, Salvador destacou-se pelo menor coeficiente de variação (23,27%), demonstrando que, apesar da alta complexidade, seus padrões dinâmicos mantêm uma notável estabilidade temporal. Esses achados são vi-

Tabela 3.8: Entropia do Nível Médio do Mar das Estações Maregráficas do litoral brasileiro pelo método FastApEn normalizado para uma janela deslizante de 30 dias ( $w=30$ )

Estação	E_norm					
	Mínimo	Máximo	Média	DP	Coef_Var	Assimetria
Arraial do Cabo (EMARC)	0	1	0,452	0,146	32,25	0,255
Belém (EMBEL)	0	1	0,489	0,154	31,58	0,231
Fortaleza (EMFOR)	0	1	0,442	0,143	32,35	0,210
Imbituba (EMIMB)	0	1	0,496	0,126	25,31	0,019
Macaé (EMMAC)	0	1	0,485	0,140	28,82	0,084
Salvador (EMSAL)	0	1	0,526	0,122	23,27	0,179
Santana (EMSAN)	0	1	0,363	0,120	32,98	0,176

Fonte: Elaborado pelos autores. Nota: Aqui os valores da entropia foram obtidos com o algoritmo FastApEn com os pacotes SlidingWindows (GUEDES et al., 2021b) e TSEntropies (TOMĀALA, 2018b).

sualmente corroborados pela Figura 3.19, que mostra flutuações de entropia dentro de uma faixa relativamente estreita ao longo da série temporal analisada com janela de 30 dias ( $w=30$ ). A combinação desses fatores sugere um sistema hidrodinâmico com características não-lineares marcantes, porém com uma estrutura subjacente que se mantém consistentemente estável durante o período de observação.

A estação de Imbituba apresentou alta entropia média (0,496), combinada com um dos menores coeficientes de variação (25,31%) e a menor assimetria entre todas as estações (0,019). Esses resultados sugerem que Imbituba possui um sistema com dinâmica complexa, porém estável, caracterizado por uma distribuição aproximadamente simétrica dos valores de entropia ao longo do período analisado ( $w = 30$ ). Em contraste, a estação de Santana mostrou a menor entropia média (0,3631) e o maior coeficiente de variação (32,98%), indicando um comportamento mais previsível, mas com maior variabilidade temporal na complexidade do sistema. Esses padrões distintos entre Imbituba e Santana foram consistentemente capturados pela análise com janela móvel de 30 dias ( $w = 30$ ), que, nesta pesquisa, foi adequada para caracterizar a variabilidade temporal dos sistemas costeiros.

As estações de Arraial do Cabo, Belém e Fortaleza apresentaram valores médios de entropia relativamente baixos (0,4415 a 0,4890 em janelas de 30 dias -  $w=30$ ), combinados com coeficientes de variação superiores a 31,0%. Esses resultados indicam uma dinâmica intermediária, tanto em complexidade quanto em estabilidade temporal para o período analisado. Adicionalmente, essas estações mostraram os maiores valores de assimetria (0,2549, 0,2312 e 0,2105, respectivamente), sugerindo a ocorrência de eventos esporádicos de maior complexidade, potencialmente associados a fenômenos meteorológicos ou oceanográficos pontuais durante o ciclo de análise. Em contraste, Macaé apresentou uma média de entropia de 0,4852 ( $w=30$ ), com coeficiente de variação de 28,82% e assimetria relativamente baixa (0,0837). Esses valores revelam uma distribuição levemente as-

simétrica, com tendência a comportamentos mais estáveis ao longo das janelas de análise de 30 dias.

A próxima seção investiga as correlações cruzadas bivariadas entre as séries de nível do mar e as variáveis climáticas (altimetria GNSS, precipitação e temperatura do ar) em múltiplas escalas temporais ( $n$  dias). Esta análise permitirá caracterizar a evolução das relações de dependência, considerando a escala temporal.

### 3.3.3.3 Coeficiente de Correlação Cruzada

A análise da correlação cruzada entre o nível médio do mar e cada variável independente (altimetria GNSS, precipitação e temperatura do ar) foi realizada utilizando o coeficiente  $\rho_{DCCA}$  em múltiplas escalas temporais ( $n$  dias), conforme apresentado nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22.

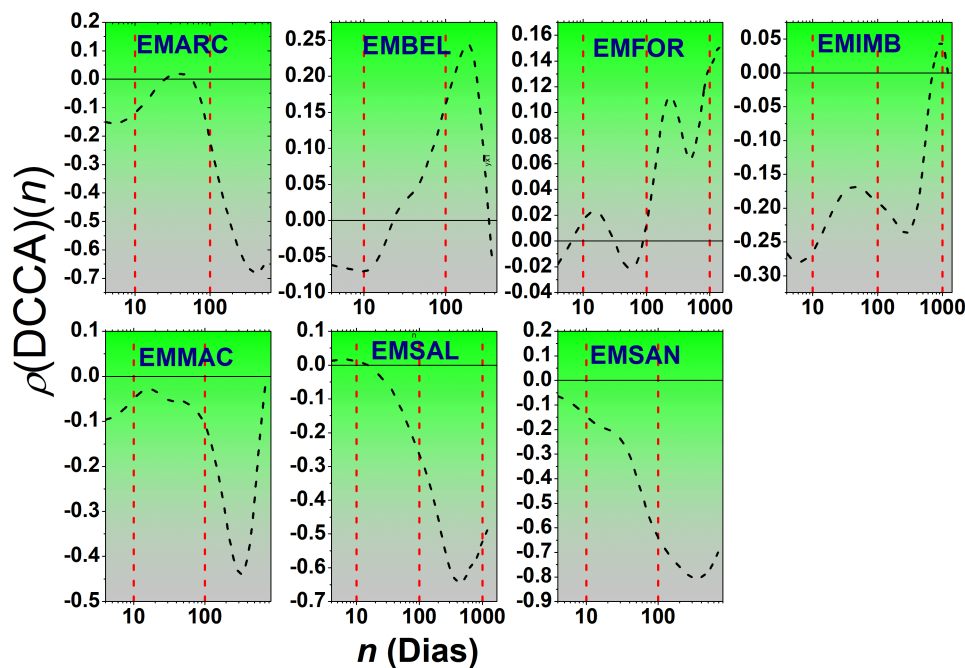


Figura 3.20: Coeficiente  $\rho_{DCCA}$  do nível médio do mar vs altimetria GNSS das estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 3.20 apresenta a análise de correlação cruzada ( $\rho_{DCCA}$ ) entre o nível médio do mar e a altimetria por GNSS, revelando padrões distintos entre as estações costeiras analisadas. As estações de Belém e Fortaleza destacam-se por exibir correlações positivas significativas em escalas temporais maiores ( $n > 100$  dias), enquanto Arraiial do Cabo,

Macaé, Salvador, Santana e Imbituba apresentam valores predominantemente negativos. Particularmente, Salvador e Santana mostram as anticorrelações mais pronunciadas, resultado consistente com o efeito esperado de movimentações verticais do solo sobre as medições do nível médio do mar.

Esses resultados evidenciam a marcante heterogeneidade na dinâmica costeira ao longo do litoral brasileiro. Os padrões distintos observados sugerem que, além dos movimentos crustais, outros fatores locais e regionais, como características geomorfológicas, padrões de circulação oceânica e variações na plataforma continental, influenciam significativamente a relação entre a altimetria por GNSS e o nível médio do mar registrado em cada estação. A análise em múltiplas escalas temporais ( $n$  dias) permitiu capturar essas diferenças regionais de forma mais abrangente.

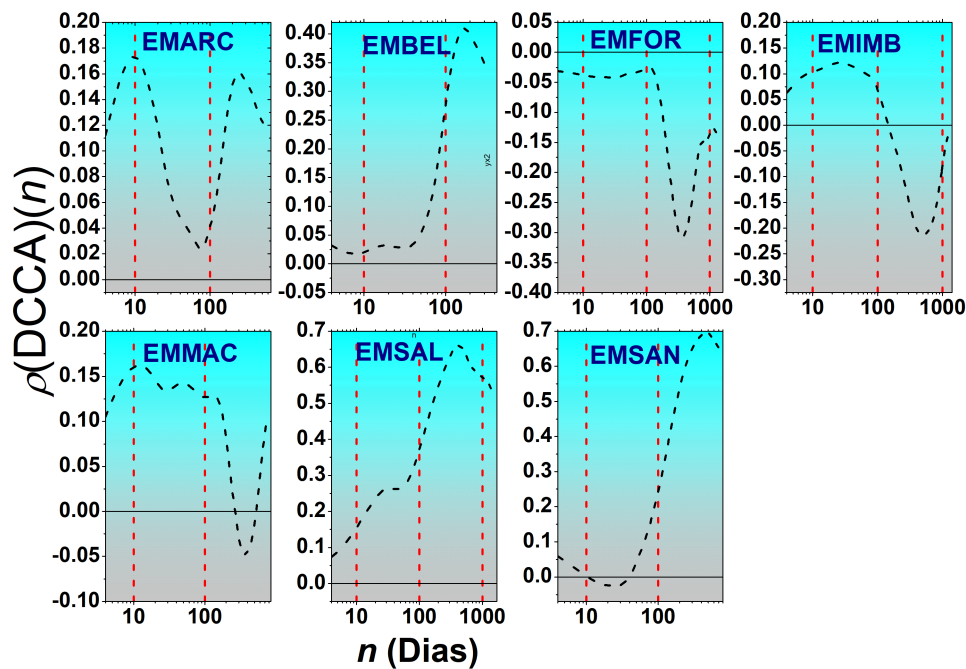


Figura 3.21: Coeficiente  $\rho_{DCCA}$  do nível médio do mar vs precipitação nas estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 3.21 apresenta a correlação cruzada entre o nível do mar e a precipitação acumulada diária, revelando padrões distintos entre as estações analisadas. Salvador e Santana destacam-se pelos valores mais elevados de correlação positiva ( $\rho_{DCCA}$  superior a 0,6) em escalas superiores a 200 dias, enquanto Belém mostra tendência moderada ( $\rho_{DCCA}$  aproximadamente 0,4) nessas mesmas escalas, resultado que pode estar atenuado pela influência da dinâmica fluvial amazônica e das grandes amplitudes de maré locais. Fortaleza e Imbi-

tuba apresentam comportamento mais variável, com alternância entre valores positivos e negativos ao longo das diferentes escalas temporais, sugerindo uma relação menos estável entre precipitação e nível do mar. Já Macaé e Arraial do Cabo exibem correlações positivas, porém de menor magnitude ( $\rho_{DCCA}$  inferior a 0,2), indicando possível influência mais pontual ou indireta da precipitação. Esses resultados reforçam a necessidade de considerar tanto as escalas temporais quanto as particularidades regionais na avaliação das interações oceano-atmosféricas.

A Figura 3.22 apresenta as correlações cruzadas entre o nível médio do mar e a temperatura do ar, revelando padrões distintos entre as estações analisadas. De maneira geral, predominam correlações negativas em diversas escalas temporais, porém com importantes variações regionais: Arraial do Cabo (EMARC) destaca-se como exceção notável, apresentando correlação positiva crescente que ultrapassa 0,3 em escalas acima de 100 dias, sugerindo uma influência significativa da temperatura sobre o nível do mar nesta região específica. Fortaleza e Belém também exibem correlações positivas, porém restritas a escalas intermediárias (30 a 100 dias), seguidas por declínios acentuados em escalas maiores. Em contraste, Imbituba, Santana e Salvador mostram forte correlação negativa, indicando uma relação inversa entre os fenômenos analisados. Macaé apresenta o padrão mais complexo, com correlações oscilantes sem tendência definida, o que aponta para uma dinâmica local particularmente complexa entre temperatura superficial e nível do mar.

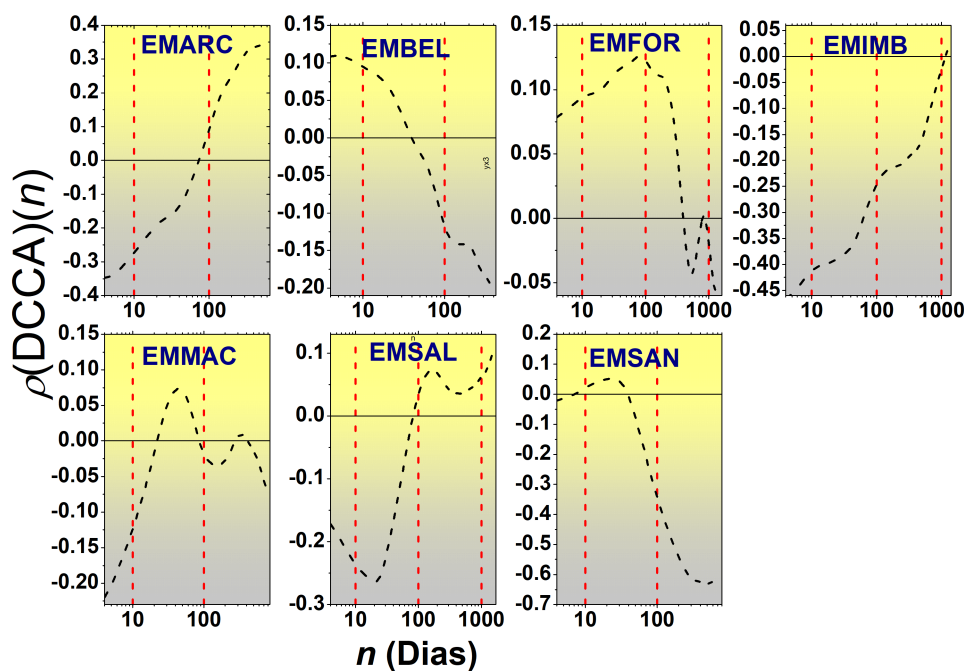


Figura 3.22: Coeficiente  $\rho_{DCCA}$  do nível médio do mar vs temperatura do ar nas estações maregráficas do litoral brasileiro. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores

A próxima seção apresenta os resultados da análise de correlação cruzada múltipla entre o nível do mar e demais variáveis, utilizando como método de análise o *Detrended Multiple Cross-Correlation* -  $DMC_x^2$  sem e com procedimento de janelas deslizantes.

### 3.3.3.4 *Detrended Multiple Cross-Correlation*

Nesta seção, apresenta-se o nível de correlação múltipla entre a variável dependente ( $y$ ), representada pelo nível médio do mar, e as variáveis independentes: altimetria por GNSS ( $x_1$ ), precipitação ( $x_2$ ) e temperatura do ar ( $x_3$ ) (Figura 3.23). Para avaliar a dinâmica temporal dessas correlações, aplicou-se o método  $DMC_x^2$  com uma janela de 365 dias ( $w=365$ ), permitindo analisar variações diárias ao longo do período estudado para escalas específicas (Figura 3.24). Vale ressaltar que o tamanho da janela levou em consideração estudos anteriores que utilizaram o coeficiente de correlação cruzada para analisar variáveis similares (SOUSA et al., 2025b; SANTOS et al., 2022a).

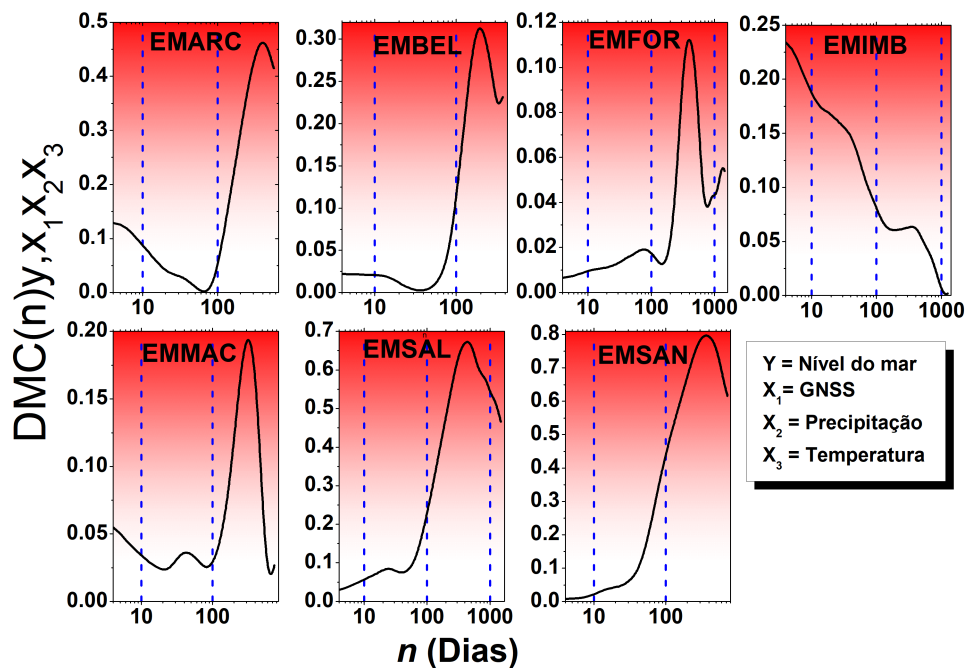


Figura 3.23:  $DMC_x^2$  do nível médio do mar com altimetria por gnss, precipitação e temperatura do ar. Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas e o  $n$  corresponde a escala temporal. Fonte: Elaborado pelos autores

É possível observar na figura 3.23 que estações como Arraial do Cabo, Belém, Fortaleza, Salvador, Macaé e Santana apresentam picos de correlação significativos em escalas superiores a 100 dias. Esse comportamento pode significar uma influência cumulativa das variáveis independentes sobre o nível médio do mar em escalas sazonais a interanu-

ais, o que corrobora com estudos anteriores que identificam que tendências climáticas e a variabilidade interanual da temperatura afetam significativamente os níveis do mar (STAMMER et al., 2013; DANGENDORF et al., 2014). Já Imbituba, os valores apresentados no  $DMC_x^2$  são mais expressivos em janelas temporais curtas, o que pode estar relacionado a efeitos locais mais imediatistas, como eventos de chuva intensa afetando temporariamente o nível do mar (FANG et al., 2021; ROTH et al., 2024; YUAN; XU et al., 2017). Um destaque para Salvador e Santana que apresentam valores mais altos em praticamente todas as escalas, indicando uma relação mais persistente entre as variáveis climáticas e geodésicas com o nível médio do mar. Uma possibilidade é que esses locais possam ser mais sensíveis a efeitos combinados de subsidência e variações climáticas (WÖPPELMANN et al., 2009).

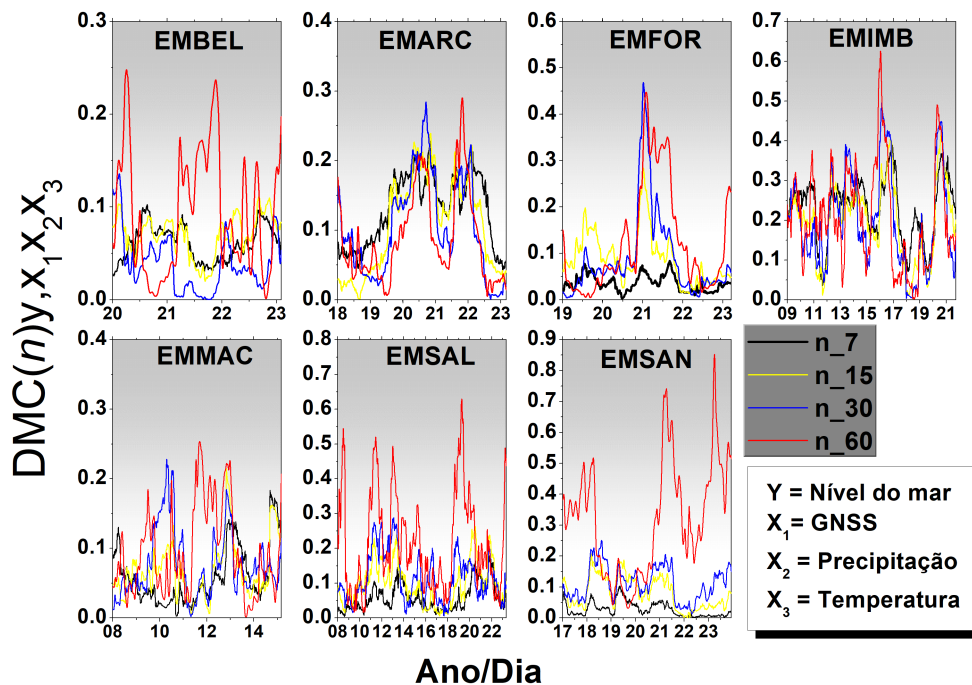


Figura 3.24: Correlação múltipla sem tendência para escalas temporais específicas ( $n = 7$ ,  $n = 15$ ,  $n = 30$  e  $n = 60$  dias) entre nível médio do mar ( $y$ ), altimetria por GNSS ( $x_1$ ), precipitação ( $x_2$ ) e temperatura do ar ( $x_3$ ) para janela de 365 dias ( $w = 365$ ). Nota: EMARC, EMBEL, EMIMB, EMFOR, EMMAC, EMSAL e EMSAN referem-se as estações maregráficas analisadas. Fonte: Elaborado pelos autores

Na figura 3.24 são apresentadas o nível de correlação múltipla entre o nível médio do mar como variável dependente e a altimetria por GNSS, precipitação e temperatura do ar como variáveis independentes, com a abordagem das janelas deslizantes. Visualmente, já é possível perceber a grande variação das estações ao longo dos anos, o que evidencia a natureza não estacionária da relação entre o nível médio do mar e as forçantes ambientais

(CALAFAT; CHAMBERS; TSIMPLIS, 2013; STAMMER et al., 2013). As estações de Salvador e Santana apresentam valores mais altos para janelas de 60 dias, o que está relacionado a uma ação mais forte das variáveis independentes sobre o nível médio do mar em escalas mensais. Dangendorf em 2014 já destacava a resposta retardada do nível do mar a processos hidrometeorológicos (DANGENDORF et al., 2014). Essas mesmas estações apresentam as maiores amplitudes do  $DMC_x^2$  (próximos a 0,8), indicando uma sensibilidade maior da variável dependente com as forçantes ambientais, possivelmente devido a variações sazonais mais intensas. Contrariamente, Belém e Macaé apresentam valores mais modestos, o que denota estar associado a regiões menos sujeitas aos efeitos combinados das variáveis independentes. Embora o gráfico não discrimine qual variável está mais correlacionada, é possível que a temperatura e precipitação desempenhem um papel importante em escalas de 30 e 60 dias, como já observado em outros estudos sobre forçantes oceânicas e atmosféricas (WÖPPELMANN et al., 2009). Picos abruptos nas curvas, como é o caso de Fortaleza em 2021, pode estar relacionado a eventos extremos, como chuvas intensas ou ondas de calor, comum nessa região.

### 3.3.4 Discussões

Os resultados da análise exploratória indicam que o NMM apresenta alta estabilidade em todas as estações analisadas, com coeficientes de variação consistentemente baixos, característica de séries maregráficas e indicativa de que as variações detectadas refletem processos físicos de maior escala, e não ruídos de medição. A maior estabilidade identificada em EMFOR e EMSAL, por exemplo, pode estar associada a menor influência de regimes hidrodinâmicos de alta energia ou de correntes costeiras variáveis, enquanto valores um pouco mais elevados em EMARC e EMMAC podem refletir maior exposição a oscilações meteorológicas regionais e interações oceano-atmosfera mais complexas.

Na altimetria por GNSS manteve-se CVs inferiores a 0,4% em todas as estações, associado a literatura sobre movimentos verticais da superfície terrestre (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2017; ALMEIDA et al., 2016; COSTA et al., 2012a; ALBARICI et al., 2019a), só evidencia sua confiabilidade como referência geodésica para detecção de variações reais no nível do mar.

Por outro lado, a precipitação apresentou elevada variabilidade, refletindo sua natureza intermitente e sazonal no litoral brasileiro, o que é coerente com a literatura sobre regimes pluviométricos tropicais e subtropicais (CHRISTOPERSON, 2013; LUIZ-SILVA et al., 2021; CÓRDOVA; CÉLLERI; DELDEN, 2022; HOUNSOU-GBO et al., 2015; SCHOSSLER et al., 2018). É importante atentar a essa instabilidade pluviométrica, no sentido de influenciar indiretamente no comportamento do NMM, sobretudo em regiões estuarinas ou próximas a desembocaduras de rios, onde fluxos de água doce pode induzir variações

temporárias no nível do mar.

A temperatura do ar apresentou uma estabilidade intermediária, evidenciada pelos CVs moderados, sugerindo que esta variável é mais previsível do que a precipitação, mas ainda sujeita a flutuações sazonais bem definidas. Mesmo assim, a detecção de não estacionariedade pelo teste KPSS em grande parte das séries reforça a necessidade de considerar tendências e ciclos de longo prazo na modelagem desta variável.

A imputação de dados faltantes, embora necessária para permitir análises de séries temporais contínuas, introduz potenciais vieses que devem ser considerados. Porcentagens elevadas de imputação (exemplo de Macaé com 33,2% para a variável NMM) podem impactar os resultados de duas maneiras principais. Primeiro, para a análise de entropia, algoritmos como o Filtro de Kalman tendem a gerar séries mais suaves, o que pode subestimar a complexidade dinâmica real, particularmente nas estações com as maiores taxas de dados faltantes (EMMAC, EMSAN). Segundo, para as análises de correlação sem tendência ( $\rho_{DCCA}$  e  $DMC_x^2$ ), a imputação pode inflacionar artificialmente a autocorrelação de curto prazo, potencialmente afetando os coeficientes em escalas temporais menores. No entanto, os achados centrais deste estudo demonstram robustez por várias razões: as correlações mais fortes e fisicamente interpretáveis emergem em escalas temporais longas ( $n > 100$  dias), onde o efeito da imputação de alta frequência é minimizado; os padrões espaciais coerentes observados, como o contraste marcante na correlação da temperatura entre Arraial do Cabo e Imbituba, estão alinhados com processos geofísicos conhecidos e são improváveis de serem artefatos de imputação; e estações com baixas taxas de imputação (EMSAL, EMARC) apresentam sinais consistentes e plausíveis. Assim, embora os resultados para séries com alta imputação devam ser interpretados com cautela, as conclusões principais sobre a influência relativa e integrada das variáveis investigadas permanecem válidas.

Portanto, a abordagem combinada de imputação, unindo o filtro de Kalman, implementado através do pacote R `imputeTS` (MORITZ; BARTZ-BEIELSTEIN, 2017), e a decomposição sazonal, realizada com o pacote `forecast` (HYNDMAN; ATHANASOPOULOS, 2021), do ponto de vista metodológico, mostrou-se adequada para lidar com as diferentes naturezas de variabilidades observadas, garantindo coerência estatística das séries reconstruídas e preservando suas estruturas temporais.

A análise de entropia reforçou que as dinâmicas das séries maregráficas não são homogêneas entre as localidades, refletindo influências de características locais, como regime de ventos, sistemas meteorológicos e correntes costeiras. A combinação de alta entropia e baixa variabilidade, observada em Salvador e Imbituba, sugere a presença de processos caóticos estruturados, enquanto a menor entropia associada a maior variabilidade, como em Santana, indica uma maior influência de componentes determinísticos ou periódicos.

Esses resultados evidenciam que o NMM responde a múltiplas forçantes e que a previsibilidade da sua dinâmica depende tanto da escala temporal quanto do contexto oceanográfico e meteorológico regional (STAMMER et al., 2013; CALAFAT et al., 2013).

As análises cruzadas por meio do coeficiente  $\rho_{DCCA}$  revelaram padrões distintos de correlação entre o nível médio do mar e as variáveis avaliadas (altimetria GNSS, precipitação e temperatura do ar) nas sete estações costeiras estudadas. A comparação entre as séries de altimetria GNSS e nível médio do mar apresentou, em geral, correlações mais intensas e consistentes, especialmente nas estações de Salvador e Santana, onde foram observados valores de  $\rho_{DCCA}$  superiores a 0,6 em escalas temporais mais longas, indicando uma boa concordância entre as variáveis.

Em contraste, a relação entre o nível do mar e a precipitação mostrou-se mais fraca e variável entre as localidades. Embora Arraial do Cabo e Fortaleza tenham apresentado correlações positivas em escalas intermediárias, estações como Imbituba e Santana exibiram correlações negativas em escalas mais longas, sugerindo que o efeito da precipitação sobre o nível do mar pode ser indireto, o que pode ser provocado por fatores como o escoamento superficial, o regime hidrológico local e a topografia da região costeira (PIECUCH; WADEHRA, 2020).

Com relação a temperatura do ar as estações apresentaram contrastes mais acentuados. Arraial do Cabo destacou-se com correlação positiva crescente ao longo das escalas analisadas, sugerindo uma influência consistente (WOODWORTH et al., 2019; LI; XU, 2020; ROYSTON; BINGHAM; BAMBER, 2022), enquanto outras estações como Imbituba e Santana revelaram correlações negativas expressivas. Esses padrões podem estar associados a processos oceano-atmosféricos locais, como ressurgência ou variações na salinidade e densidade da água (PONTE, 1999; STRUB, 1998).

Os padrões estatísticos revelados pelas análises de  $\rho_{DCCA}$  e  $DMC_x^2$  encontram explicações coerentes nos contextos oceanográficos, hidrológicos e geológicos específicos de cada região estudada.

As fortes anticorrelações entre a altimetria GNSS e o NMM em Salvador (EMSAL) e Santana (EMSAN) (Figura 3.20) fornecem evidência estatística robusta da predominância de movimentos verticais da crosta (VLM) nestas localidades. Em Salvador, este sinal é atribuído à subsidência diferencial ao longo da falha geológica do Graben do Recôncavo, uma estrutura associada à bacia sedimentar (FILHO, 2010). Em Santana, localizada sobre a espessa Bacia Sedimentar da Foz do Amazonas, o VLM provavelmente decorre da compactação isostática dos sedimentos. Nestes casos, o maregráfo registra uma elevação relativa do nível do mar que é amplificada ou mesmo dominada pelo afundamento do solo, destacando a necessidade crítica de correções geodésicas para se obter o verdadeiro sinal

oceânico.

As correlações geralmente fracas e instáveis com a precipitação (Figura 3.21) refletem a natureza complexa e multi-escala do forçante hidrológico. A precipitação influencia o NMM costeiro através de mecanismos que atuam em sentidos opostos e em diferentes escalas de tempo: o aporte direto de água doce (elevando o NMM) e o carregamento elástico da crosta por aumento do armazenamento hídrico continental (reduzindo o NMM relativo). A concorrência e o cancelamento parcial entre estes efeitos, somados à alta variabilidade espacial da chuva, explicam os baixos valores de  $\rho_{DCCA}$  e a contribuição variável da precipitação para o  $DMC_x^2$  ao longo do tempo (Figura 3.24).

Os contrastes regionais nas correlações com a temperatura do ar (Figura 3.22) mapeiam diretamente diferentes regimes oceanográficos. A correlação positiva forte e persistente em Arraial do Cabo (EMARC) é a assinatura estatística clara da expansão térmica (efeito estérico) como controlador principal do NMM local. Em contraste, as correlações negativas em Imbituba (EMIMB) e Santana (EMSAN) sugerem o domínio de processos dinâmicos. Na região de Imbituba, temos o sistema de ressurgência do Cabo Santa Marta que traz águas frias e densas à superfície (SILVA, 2020; CAMPOS et al., 2013), o que pode estar associado a elevações dinâmicas do nível do mar devido a ajustes geostroficados na Corrente do Brasil, gerando a relação inversa observada. Em Santana, a dinâmica da Pluma do Amazonas governa as variações de altura dinâmica do oceano de forma independente da temperatura local do ar (VARONA et al., 2019; MOROZOV et al., 2024).

A força superior da correlação múltipla ( $DMC_x^2$ ) em escalas longas (Figura 3.23) encapsula estatisticamente a integração de processos de baixa frequência. Em escalas sazonais a interanuais, os efeitos da expansão térmica integrada, do carregamento hidrológico continental e dos movimentos crustais contínuos atuam em sinergia, explicando uma parcela maior da variância do NMM do que qualquer fator isolado. A análise dinâmica com janela deslizante (Figura 3.24) vai além, capturando a não-estacionariedade destas relações. Picos agudos, como o observado em Fortaleza em 2021, são prováveis assinaturas de eventos extremos compostos, onde anomalias de calor, precipitação e possíveis cargas atmosféricas atuaram concomitantemente para produzir uma anomalia extrema de NMM, cuja variância é excepcionalmente bem predita pelo coeficiente multivariado.

### 3.3.4.1 Limitações do Estudo

Este estudo apresenta limitações que devem ser reconhecidas para uma interpretação adequada dos resultados e para orientar pesquisas futuras.

Em relação aos dados, a presença de valores faltantes e o subsequente processo de im-

putação podem ter subestimado a complexidade (entropia) real das séries e influenciado as estimativas de correlação em escalas de tempo mais curtas.

Adicionalmente, o descasamento espacial entre as estações maregráficas e suas correspondentes estações geodésicas e meteorológicas também é um fator limitante e pode introduzir incertezas, o que deve ser analisado com cautela.

Embora as distâncias entre algumas estações maregráficas e suas correspondentes estações GNSS sejam relativamente elevadas, em especial em Arraial do Cabo e Macaé, tal limitação reflete a distribuição espacial real da infraestrutura geodésica disponível no Brasil. Ainda assim, estudos anteriores demonstram que sinais regionais de movimento vertical da crosta apresentam coerência espacial em escalas de centenas de quilômetros, especialmente quando analisados em séries temporais longas, como as utilizadas neste trabalho (OELSMANN et al., 2021; KLEINHERENBRINK; RIVA; FREDERIKSE, 2018b; OELSMANN et al., 2024). Além disso, a consistência interna das séries do NGL e a natureza multiescala das análises aplicadas contribuem para mitigar os efeitos dessa limitação, assegurando a robustez das correlações identificadas.

Já as distâncias entre as estações maregráficas e as estações meteorológicas são mais críticas, com distâncias que variam de 0,85 km a aproximadamente 73,21 km (Tabela 3.5), principalmente no tocante a variável precipitação pela já conhecida alta variabilidade em microescala. Tal separação pode introduzir ruído nas correlações bivariadas de alta frequência entre precipitação e NMM, contribuindo possivelmente para a maior instabilidade observada nos valores de  $\rho_{DCCA}$  para esta análise (Figura 3.21). No entanto, a análise multiescalar e multivariada que constitui o cerne deste trabalho mitiga em parte essa limitação. Os resultados mais robustos e interpretáveis, como os altos valores de  $DMC_x^2$  em escalas sazonais e interanuais, dependem da variabilidade climática de grande escala, que é capturada de forma mais consistente mesmo por estações mais distantes. Ademais, os padrões regionais distintos observados sugerem que os processos físicos de grande escala predominam na relação integrada. Estudos futuros poderiam se beneficiar do uso de produtos de reanálise com interpolação espacial ou de redes de sensores mais densas para isolar com maior precisão os efeitos estritamente locais.

Do ponto de vista metodológico e de escopo, a análise foi limitada a três forçantes não-ocênicas selecionadas. Outras variáveis importantes na análise do nível do mar costeiro, como a pressão atmosférica (efeito barométrico inverso), o estresse do vento (forçante dinâmica) e as variações das correntes oceânicas de larga escala, não foram incluídos. Consequentemente, uma parcela da variância do NMM permanece não explicada pela metodologia aplicada. É importante também ressaltar que os métodos estatísticos empregados ( $\rho_{DCCA}$  e  $DMC_x^2$ ) são ferramentas de correlação e não estabelecem, por si só, relações de causalidade. As interpretações físicas foram inferidas a partir do conhecimento

geofísico estabelecido. Por fim, os resultados são representativos dos pontos específicos de monitoramento e sua extrapolação espacial requer cautela, especialmente em regiões costeiras heterogêneas.

Apesar dessas limitações, a consistência dos padrões espaciais revelados com processos físicos conhecidos, a robustez dos achados em escalas temporais longas (menos suscetíveis a ruídos de alta frequência) e o caráter inovador da abordagem multivariada e multiescalar conferem validade às conclusões principais. Trabalhos futuros poderão superar em parte estas limitações através da utilização de séries temporais mais longas e completas, da incorporação de outras variáveis relevantes, da aplicação de métodos de descoberta causal em estruturas multiescala, e da integração de dados de sensoriamento remoto para uma cobertura espacial mais abrangente.

### 3.3.5 Conclusões

Este estudo investigou, por meio de uma abordagem bivariada, multivariada e multiescala, as relações de dependência entre o nível médio do mar (NMM) e variáveis geodésico-meteorológicas (altimetria GNSS, precipitação e temperatura do ar) ao longo da costa brasileira. A aplicação combinada dos coeficientes  $\rho_{DCCA}$  e  $DMC_x^2$ , complementada por análises de entropia e o uso de janelas deslizantes, permitiu concluir que a altimetria GNSS constitui a variável preditora mais estável e com correlação cruzada mais forte com o NMM. Os padrões de anticorrelação identificados, especialmente pronunciados em Salvador (EMSAL) e Santana (EMSAN), fornecem evidência robusta da influência de movimentos verticais da crosta nas medições maregráficas, reforçando a necessidade crítica de incorporar correções geodésicas para discriminar entre variações reais do nível do mar e movimentos do terreno.

Em contraste, a precipitação apresentou uma relação mais fraca e instável com o NMM, com correlações que variaram significativamente entre estações e escalas temporais. Sua alta variabilidade intrínseca e os padrões de correlação por vezes negativos sugerem uma influência indireta, modulada por fatores locais como topografia e regime hidrológico. Já a temperatura do ar exibiu comportamento distintamente regional, com a correlação positiva em Arraial do Cabo (EMARC) alinhada ao mecanismo de expansão térmica, enquanto as correlações negativas em Imbituba (EMIMB) e Santana (EMSAN) apontam para processos oceano-atmosféricos locais complexos.

A correlação cruzada múltipla ( $DMC_x^2$ ) demonstrou ser ferramenta superior para capturar a influência conjunta das variáveis, com valores mais elevados em escalas temporais maiores ( $n > 100$  dias) na maioria das estações, indicando que os efeitos combinados são cumulativos e mais perceptíveis em escalas sazonais a interanuais. A análise dinâmica

com janelas deslizantes validou a natureza não estacionária dessas relações, capturando flutuações temporais e eventos extremos específicos. Complementarmente, a análise de entropia revelou um espectro de complexidade dinâmica ao longo do litoral, desde sistemas caóticos estruturados em Salvador e Imbituba até comportamentos mais previsíveis em Santana.

Em síntese, esta pesquisa demonstrou a eficácia e o caráter inovador da aplicação do coeficiente  $DMC_x^2$  em estudos costeiros, preenchendo lacuna metodológica identificada na literatura. Os achados reforçam que as variações do NMM no litoral brasileiro são regidas por complexa interação de fatores, onde influências geodésicas e climáticas mostram-se predominantes, mas com pesos e comportamentos distintos em cada região. As implicações destes resultados são diretas para o planejamento costeiro e a avaliação de riscos associados às mudanças climáticas, fornecendo subsídios vitais para políticas públicas mais assertivas e para a calibração de modelos de previsão. Como perspectivas futuras, sugere-se a inclusão de outras variáveis forçantes e a aplicação desta metodologia a séries temporais mais longas, visando discriminar com maior clareza os efeitos das mudanças climáticas de longo prazo da variabilidade natural em múltiplas escalas.

---

## Considerações Finais

---

A presente tese teve como objetivo central modelar e analisar a dinâmica temporal e pontual do nível médio do mar (NMM) ao longo do litoral brasileiro, correlacionando-a com variáveis altimétricas e climatológicas (precipitação e temperatura do ar), entre os anos de 2002 e 2023. O estudo partiu do reconhecimento de que o aumento do nível do mar é um dos mais relevantes indicadores das mudanças climáticas globais, possuindo implicações diretas sobre os ecossistemas costeiros, a ocupação urbana e a própria manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), que tem no NMM o seu principal referencial altimétrico.

Do ponto de vista metodológico, a tese foi estruturada em formato de artigos científicos, onde cada um abordou uma dimensão específica do problema de pesquisa delineado na Introdução (seção 1). Essa estrutura sequencial permitiu que o trabalho evoluísse da revisão e compreensão teórica sobre o tema até as análises aplicadas e correlações multivariadas entre variáveis oceanográficas, geodésicas e climatológicas. Desta forma, cada artigo representou uma etapa do processo de investigação científica que buscou responder às perguntas de pesquisa e testar a hipótese proposta, ou seja, de que as variações do NMM no litoral brasileiro apresentam tendência crescente e que estas são influenciadas também por fatores altimétricos e climatológicos, de modo que movimentos verticais da crosta terrestre (subsidência), precipitação e temperatura do ar contribuem significativamente para a dinâmica observada nas séries temporais maregráficas.

No primeiro artigo (seção 3.1), seu foco principal foi analisar a evolução científica e conceitual do tema “nível do mar” e suas relações com variáveis não oceânicas, a partir de uma abordagem bibliométrica. Foram examinadas 35 publicações indexadas na base Scopus entre 2009 e 2021, permitindo identificar tendências históricas e geográficas, principais países e instituições envolvidas, e os métodos mais recorrentes utilizados em estudos sobre o NMM. Os resultados mostraram uma concentração de publicações nos últimos dez anos, reflexo direto do aumento da preocupação com as mudanças climáticas e da relevância do tema nos fóruns científicos internacionais. Verificou-se também um crescimento expressivo de estudos que associam o comportamento do NMM a fatores locais, como subsidência da crosta, por exemplo, demonstrando que a dinâmica do nível do mar não pode ser compreendida apenas sob a ótica oceânica.

No segundo artigo (seção 3.2), representou o primeiro esforço da pesquisa em compreender a dinâmica espaço temporal do NMM, ao avaliar as flutuações temporais das séries maregráficas do litoral brasileiro. Foram analisadas sete estações da Rede Maregráfica

Permanente para a Geodésia (RMPG), sendo seis delas ativas, aplicando-se o método DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*) com o procedimento das janelas deslizantes. Os resultados mostraram que, embora as estações apresentem variações distintas em função de suas localizações e regimes oceânicos, há predomínio de comportamento persistente ( $\alpha > 0,5$ ) em praticamente todas as séries avaliadas, indicando a existência de memória de longo prazo nas flutuações do nível do mar. Destaca-se as estações de Fortaleza e Santana que apresentaram as maiores estabilidades, enquanto Imbituba e Salvador registraram variações mais expressivas, associadas a fatores climáticos e, possivelmente, à subsidência local. Contudo, os achados do artigo em questão foram relevantes para confirmação que as variações do NMM não são sem memória, mas sim determinadas por padrões dinâmicos e dependentes do tempo, o que reforça a importância de abordagens não estacionárias e multiescalares na análise de séries temporais maregráficas.

O terceiro e último artigo (seção 3.3), ampliou a perspectiva de análise ao integrar variáveis de origem não oceânica, como altimetria derivada de observações GNSS e dados climatológicos de precipitação e temperatura do ar, às séries maregráficas utilizadas no artigo anterior, desta vez utilizando dados até o ano de 2023. Nessa etapa, foi aplicado o método  $DMC_x^2$  (*Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient*), que permitiu avaliar simultaneamente correlações cruzadas entre múltiplas variáveis. Os achados do terceiro artigo evidenciaram correlações em diferentes escalas de tempo entre o NMM e as variáveis altimétricas e climatológicas, com destaque para a subsidência vertical detectada por GNSS em Salvador, confirmando o impacto direto desse fenômeno sobre as medições maregráficas locais. As variáveis de precipitação e temperatura do ar também apresentaram influência relevante, embora em escalas temporais diferenciadas, sendo a precipitação com efeitos sazonais e a temperatura com tendências de longo prazo. Além disso, as análises de entropia foram fundamentais para indicar que as séries do nível do mar pode apresentar alta ou baixa previsibilidade, a depender da escala temporal avaliada, reforçando a natureza complexa provenientes dos diversos fatores que o regem. Essa constatação reforça que o NMM é resultado de um sistema dinâmico não linear, suscetível a perturbações e interações entre fatores oceanográficos, atmosféricos e geodinâmicos.

Ao longo da tese, os resultados dos três artigos convergem para a validação da hipótese de que o comportamento do nível médio do mar no litoral brasileiro é marcado por tendência crescente, embora não uniforme ao longo da costa, podendo ser influenciado tanto por fatores globais (expansão térmica e derretimento de geleiras), quanto por fatores locais e regionais (subsidência, variações pluviométricas e térmicas). O uso de métodos de análise de séries temporais que avaliam propriedades estatísticas em função da escala temporal, como o DFA, o  $\rho_{DCCA}$  e o  $DMC_x^2$ , mostrou-se adequado e inovador, permitindo explorar a dependência temporal e multivariada das variáveis envolvidas, superando as limitações de métodos lineares tradicionais.

É relevante mencionar que todos os objetivos da presente pesquisa foram atendidos com implementações de rotinas computacionais com auxílio da linguagem R, sendo possível identificar, principalmente, padrões de variabilidade, autocorrelação, correlação cruzada bivariada, correlação multivariada e entropia de forma dinâmica em função da escala temporal, comprovando como é imperativo a execução de abordagens integradas e adaptativas para o monitoramento costeiro.

Os achados da presente tese contribuem de forma significativa para a compreensão da dinâmica do nível médio do mar em território brasileiro, oferecendo subsídios científicos e metodológicos para o aprimoramento do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), ao destacar a necessidade de atualização contínua dos referenciais altimétricos em função da subsidiência local, a formulação de políticas públicas de gestão costeira, integrando informações geodésicas e meteorológicas e o desenvolvimento de novas abordagens de modelagem em geociências, baseadas em metodologias destinadas a avaliar propriedades de séries temporais em regime não estacionário em diferentes escalas de tempo (dia, mês e ano).

Além de preencher uma lacuna científica, a ausência de estudos multivariados sobre o NMM com base na integração de dados maregráficos, GNSS e climatológicos, a tese inaugura um caminho metodológico inovador para análises futuras, demonstrando a aplicabilidade dos coeficientes  $DMC_x^2$  e  $\rho_{DCCA}$  em estudos costeiros.

Como desdobramento natural desta pesquisa, espera-se concluir o desenvolvimento de um programa computacional voltado à análise e correção de séries temporais. Esse sistema, cujo desenvolvimento foi iniciado no doutorado, visa automatizar procedimentos de filtragem, interpolação, detecção de falhas e aplicação dos métodos de análise aqui descritos (DFA,  $\rho_{DCCA}$ ,  $DMC_x^2$  e entropia). Uma vez finalizado, o programa pode ser incorporado as rotinas de tratamento de séries maregráficas realizadas no IBGE ou até mesmo disponibilizado em código aberto, contribuindo para o avanço da modelagem ambiental e geodésica no Brasil.

Como perspectivas para trabalhos futuros, destaca-se a possibilidade de ampliação da presente investigação por meio da incorporação de outras variáveis climatológicas e oceanográficas, tais como temperatura da superfície do mar, pressão atmosférica, intensidade e direção do vento ou até mesmo índices climáticos de grande escala, a exemplo do ENSO e da Oscilação do Atlântico Sul. Muito embora algumas dessas variáveis não interfiram volumetricamente no nível dos oceanos, elas podem interferir consideravelmente do ponto de vista local ou até mesmo regional. Sendo assim, a inclusão dessas variáveis pode contribuir para uma compreensão mais abrangente dos mecanismos físicos associados às variações observadas no nível médio do mar e demais parâmetros analisados, bem como para o aprimoramento dos modelos estatísticos empregados.

Adicionalmente, recomenda-se a exploração sistemática do método de janelas deslizantes, considerando diferentes tamanhos de janela e graus de sobreposição temporal, com o objetivo de investigar a sensibilidade dos resultados às escalas de análise adotadas. Embora, nesta pesquisa, tenham sido empregados tamanhos de janelas padronizados com base na literatura especializada, do ponto de vista teórico espera-se que janelas de maior extensão temporal produzam estimativas mais globais e estáveis, enquanto janelas menores sejam mais adequadas à captura de comportamentos locais, transientes e variações de curto prazo. Essa abordagem permitiria avaliar, de forma mais robusta, a estabilidade temporal dos parâmetros estimados, a identificação de possíveis mudanças de regime e a presença de não estacionariedades nos sinais analisados, contribuindo, assim, para o refinamento metodológico e para a ampliação do escopo analítico da abordagem proposta nesta tese.

## A.1 Array DFA



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
MINISTÉRIO DA ECONOMIA  
**INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL**  
DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

**Certificado de Registro de Programa de Computador**

Processo Nº: **BR512022000280-9**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 01/02/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

**Titular:** Array DFA - Implementa o método DFA para uma matriz de séries temporais

**Data de publicação:** 01/02/2022

**Data de criação:** 01/02/2022

**Titular(es):** EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; JÉSSICA SUZARTE CARVALHO DE SOUZA; TAÍZE DA SILVA SOUSA; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; SAMUEL JOSÉ AMARAL DE JESUS; EDNA MARIA DE ARAÚJO

**Autor(es):** EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; JÉSSICA SUZARTE CARVALHO DE SOUZA; TAÍZE DA SILVA SOUSA; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; SAMUEL JOSÉ AMARAL DE JESUS; EDNA MARIA DE ARAÚJO

**Linguagem:** R

**Campo de aplicação:** MT-06

**Tipo de programa:** SM-01

**Algoritmo hash:** SHA-512

**Resumo digital hash:**  
EB297A092BF4713BF470AE72939B9E5DB38AB13D4D737EC8E900C7F827E754497AE5448AB4CD8FC26281DDA  
EFA67A14659F7D542BB9185DF322AF37B73B8D78

**Expedido em:** 15/02/2022

**Aprovado por:**  
Carlos Alexandre Fernandes Silva

Figura A.1: Array DFA - Implementa o método DFA para uma matriz de séries temporais

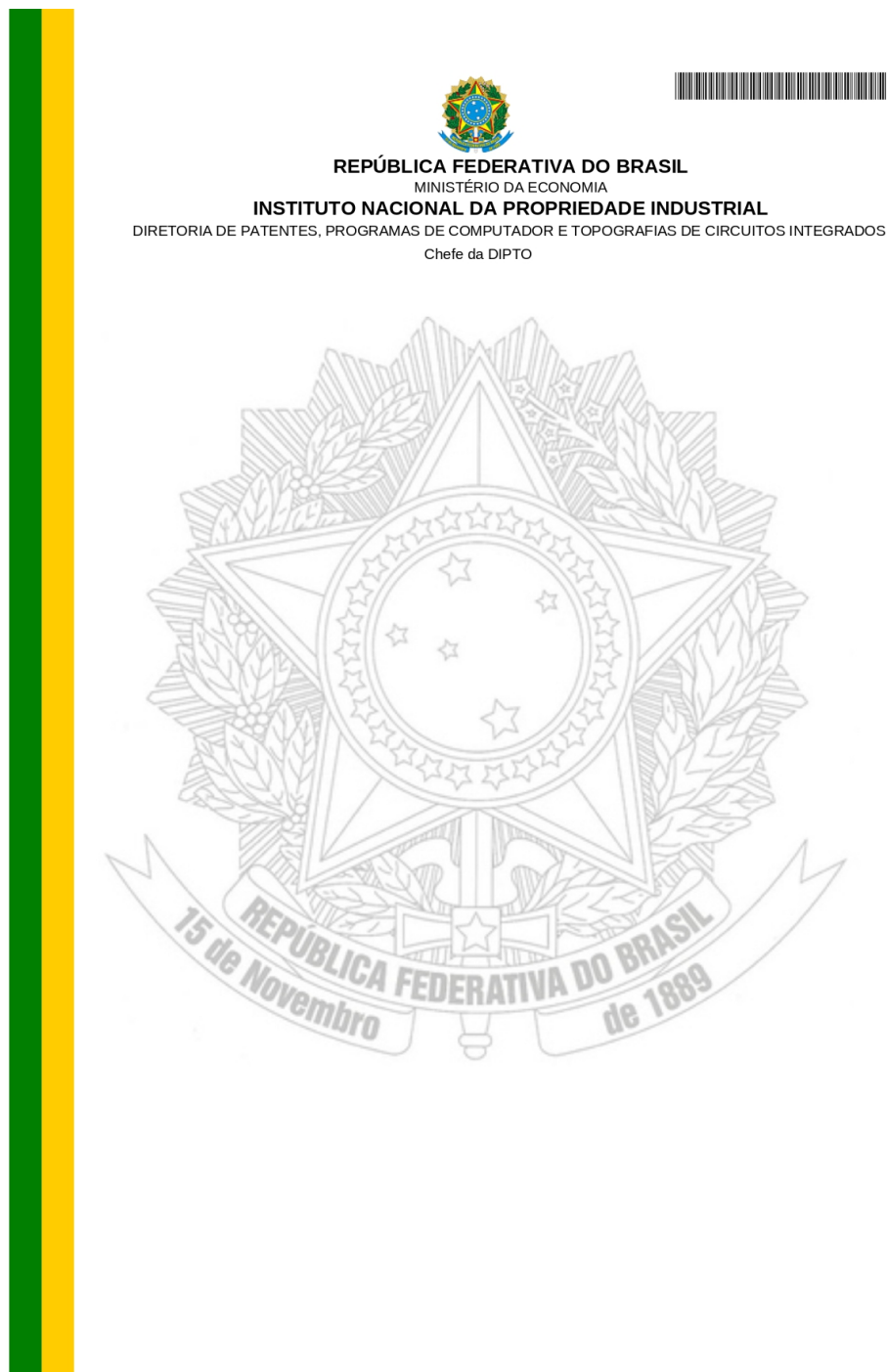


Figura A.2: Array DFA - Implementa o método DFA para uma matriz de séries temporais

## A.2 $DMC_x^2$ Deslizante







**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**  
 MINISTÉRIO DA ECONOMIA  
**INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL**  
 DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

### Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512022002394-6**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 30/08/2022, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

**Título:** DMC deslizante

**Data de publicação:** 30/08/2022

**Data de criação:** 30/08/2022

**Titular(es):** GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; JÉSSICA SUZARTE CARVALHO DE SOUZA; TAÍZE DA SILVA SOUSA; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; SAMUEL JOSÉ AMARAL DE JESUS; EDNA MARIA DE ARAÚJO; NAIARA DA SILVA LIMA; **ISABEL GUEDES DE SOUZA**

**Autor(es):** GILNEY FIGUEIRA ZEBENDE; EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; JÉSSICA SUZARTE CARVALHO DE SOUZA; TAÍZE DA SILVA SOUSA; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; SAMUEL JOSÉ AMARAL DE JESUS; EDNA MARIA DE ARAÚJO; NAIARA DA SILVA LIMA; **ISABEL GUEDES DE SOUZA**

**Linguagem:** R

**Campo de aplicação:** MT-06

**Tipo de programa:** SM-01

**Algoritmo hash:** SHA-512

**Resumo digital hash:**  
d93a08507455bb35331c9d179c45df05ad653cb7ec4027f33bd002237868a9ff41f774de40ef60336fdac4241104639f716d4c83c45c084b66a78f7fa97f7e01

**Expedido em:** 06/09/2022

**Aprovado por:**

Figura A.3: DMC Deslizante - Implementa o método DMC com a abordagem das janelas deslizantes



Figura A.4: DMC Deslizante - Implementa o método DMC com a abordagem das janelas deslizantes

## A.3 TS Imput







**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**  
 MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS  
**INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL**  
 DIRETORIA DE PATENTES, PROGRAMAS DE COMPUTADOR E TOPOGRAFIAS DE CIRCUITOS

### Certificado de Registro de Programa de Computador

Processo Nº: **BR512025002573-4**

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de registro de programa de computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de 13/06/2025, em conformidade com o §2º, art. 2º da Lei 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

**Título:** TS IMPUT

**Data de publicação:** 13/06/2025

**Titular(es):** ARLEYS PEREIRA NUNES DE CASTRO; EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; SAMUEL JOSÉ AMARAL DE JESUS; EDNA MARIA DE ARAÚJO; NEILON DUARTE DA SILVA; CARLOS ALBERTO LIMA DA SILVA; TAÍZE DA SILVA SOUSA DÓRIA; MEIRELLES OSCAR MUSTAFA

**Autor(es):** ARLEYS PEREIRA NUNES DE CASTRO; EVERALDO FREITAS GUEDES; ALOÍSIO MACHADO DA SILVA FILHO; FLORÊNCIO MENDES OLIVEIRA FILHO; ELVIRA CATIANA DE OLIVEIRA SANTOS; KATIA SANTANA FREITAS; NILTON DE SOUZA RIBAS JÚNIOR; EDNA MARIA DE ARAÚJO; NEILON DUARTE DA SILVA; CARLOS ALBERTO LIMA DA SILVA; TAÍZE DA SILVA SOUSA DÓRIA; MEIRELLES OSCAR MUSTAFA; JOSÉ AMARAL DE JESUS

**Linguagem:** R

**Campo de aplicação:** ME-03

**Tipo de programa:** GI-02; SO-02; TC-01; TI-02; UT-06

**Algoritmo hash:** SHA-256

**Resumo digital hash:** 66c080c856e46fb2516f94b158533675689852ae9cceb9ac03e2b45b99e4620a

**Expedido em:** 24/06/2025

**Aprovado por:**  
 Carlos Alexandre Fernandes Silva  
 Chefe da DIPTO

Figura A.5: TS Imput - Implementa rotina para imputação de dados

---

## Referências Bibliográficas

---

- ABBASI, M.; MALEKI, S. M. Iranian surface air temperature periodicities and correlations with the North Atlantic and Indian Ocean sea surface temperature variations. *Meteorological Applications*, v. 24, n. 2, p. 268–275, 2017. ISSN 13504827. Publisher: John Wiley and Sons Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85017325534&doi=10.1002%2fmet.1625&partnerID=40&md5=afb5ad7887c1fc97f0b60b64f3016232>. 2.2
- ALBARICI, F. L. et al. Modelagem dos efeitos geodinâmicos que afetam as medições maregráficas e gnss. *Rev. Bras. Cartogr*, v. 71, n. 1, p. 75–98, 2019. 3.3.4
- ALBARICI, F. L. et al. Modelagem dos Efeitos Geodinâmicos que afetam as Medições Maregráficas e GNSS. *Rev. Bras. Cartogr*, v. 71, n. 1, p. 75–98, 2019. 1
- ALENCAR, J. d. Datum altimétrico brasileiro. *Caderno de Geociências*, v. 5, p. 69–73, 1990. Publisher: Rio de Janeiro, Brasil. 1, 2.1.2, 2.1.2, 2.1.3.1, 3.2.3.1, 3.3.1
- ALMEIDA, C. de S. et al. Crustal sinking and the sea level at cananéia, sp, brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 34, n. 1, p. 5–12, 2016. 3.3.4
- ANTENEODO, C. *Processos estocásticos*. 2004. <http://mesonpi.cat.cbpf.br/e2004/docs/PG2-cban.pdf>. Acessado em 17/07/2022. 2.3.2, 2.3.3, 2.3.3, 2.3.4
- ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. *Em questão*, v. 12, n. 1, p. 11–32, 2006. 3.1.2.1
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix : An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017. ISSN 17511577. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157717300500>. 3.1.2.1
- BEVIS, M.; SCHERER, W.; MERRIFIELD, M. Technical issues and recommendations related to the installation of continuous GPS stations at tide gauges. *Marine Geodesy*, v. 25, n. 1-2, p. 87–99, 2002. Publisher: Taylor & Francis. 2
- BORETTI, A. Relative sea-level rise and land subsidence in Oceania from tide gauge and satellite GPS. *Nonlinear Engineering*, v. 9, n. 1, p. 175–193, 2020. ISSN 21928010. Publisher: De Gruyter Open Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85080098850&doi=10.1515%2fnleng-2020-0007&partnerID=40&md5=970c4ce3e319da3d55f1c2de97237750>. 2.2, 3.1.4
- BORETTI, A. Nonlinear absolute sea-level patterns in the long-term-trend tide gauges of the East Coast of North America. *Nonlinear Engineering*, v. 10, n. 1, p. 1–15, 2021. ISSN 21928010. Publisher: De Gruyter Open Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85101657871&doi=10.1515%2fnleng-2021-0001&partnerID=40&md5=5e95e3a124eb77ac81d4558513269629>. 2.2, 3.1.3.2, 3.1.5, 3.2.1

BOUIN, M.; WÖPPELMANN, G. Land motion estimates from GPS at tide gauges: A geophysical evaluation. *Geophysical Journal International*, v. 180, n. 1, p. 193–209, 2010. ISSN 0956540X. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-73049117095&doi=10.1111%2fj.1365-246X.2009.04411.x&partnerID=40&md5=244f44af33d26dd7231edbaa8fedaf79>. 3.1.4

BOX, G. E. P. et al. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2015. 2.3, 2.3.1

BRADLEY, A. T.; HEWITT, I. J. Tipping point in ice-sheet grounding-zone melting due to ocean water intrusion. *Nature Geoscience*, Nature Research, v. 17, n. 7, p. 631 ? 637, 2024. ISSN 17520894. Cited by: 5; All Open Access, Hybrid Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85196829293&doi=10.1038%2fs41561-024-01465-7&partnerID=40&md5=582dd73d4fd2eb2d6c824c4545351112>. 3.3.1

BRITO, A. d. A.; ARAÚJO, H. A. d.; ZEBENDE, G. F. Detrended multiple cross-correlation coefficient applied to solar radiation, air temperature and relative humidity. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, 2019. Cited by: 27; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077166636&doi=10.1038%2fs41598-019-56114-6&partnerID=40&md5=998a5429ad835a34db4858c538d0a66e>. 2.3.7, 3.3.1

BRYAN, K. The steric component of sea level rise associated with enhanced greenhouse warming: A model study. *Climate Dynamics*, Springer Verlag, v. 12, n. 8, p. 545 ? 555, 1996. ISSN 09307575. Cited by: 42. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030419101&doi=10.1007%2fBF00207938&partnerID=40&md5=7ca888ad8996d361740d60b39b7f2142>. 3.3.1

BUBLE, G.; BENNETT, R.; HREINSDÓTTIR, S. Tide gauge and GPS measurements of crustal motion and sea level rise along the eastern margin of Adria. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 115, n. 2, 2010. ISSN 21699313. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-76849116363&doi=10.1029%2f2008JB006155&partnerID=40&md5=a24f8d885b8f94fcb5a25c3beeafbbd>. 2.2, 3.1.1, 3.1.3.2, 3.1.4, 3.2.1

CALADO, L. G. L. P. *Estimativa do deslocamento vertical de estações maregráficas a partir da modelagem de séries temporais de coordenadas GNSS*. 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/253514>. 2.2.2

CALAFAT, F.; CHAMBERS, D.; TSIMPLIS, M. Inter-annual to decadal sea-level variability in the coastal zones of the norwegian and siberian seas: The role of atmospheric forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 118, n. 3, p. 1287–1301, 2013. 3.3.3.4

CALAFAT, F. M. et al. Coastal sea level rise in southern europe and the mediterranean sea: Past trends and future projections. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 3, p. 543–548, 2013. 3.3.4

CAMARGO, R.; HARARI, J. Marés. In: CASTELLO, J P AND KRUG, L C. *Introdução as Ciências do Mar*. [S.l.], 2015. 2.1.1, 2.1.1, 2.1.2, 3.3.1

CAMPOS, P. C. et al. Seasonal variability and coastal upwelling near cape santa marta (brazil). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 118, n. 3, p. 1420–1433, 2013. 3.3.4

- CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. Time-dependent Hurst exponent in financial time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 344, n. 1-2, p. 267–271, dez. 2004. ISSN 03784371. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437104009471>. 2.3.4.1, 3.2.1
- CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. Time-dependent hurst exponent in financial time series. *Physica A*, v. 344, p. 267–271, 2004. 3.2.2.3
- CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. E. Time-dependent hurst exponent in financial time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 344, n. 1-2, p. 267–271, 2004. 3.3.2.3
- CASTRO, A. L. P. d. Nivelamento através do GPS: avaliação e proposição de estratégias. 2002. Publisher: Universidade Estadual Paulista (Unesp). 2.2.1.1
- CAZENAVE, A.; COZANNET, G. L. Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, Wiley Online Library, v. 2, n. 2, p. 15–34, 2014. 2.2.2
- CHANGE, I. C.; others. IPCC, 2013: Climate Change 2013-The Physical Science Basis. *Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, v. 1535, p. 2013, 2013. Publisher: Cambridge. 1, 3.1.1, 3.1.3.2, 3.2.1, 3.3.1
- CHRISTOPERSON, R. *Geossistemas: Uma Introdução à Geografia Física*. 7<sup>ª</sup> edição. [S.l.]: Porto Alegre, RS, Brasil: Bookman, 2013. 3.3.4
- CHRISTOPHERSON, R. W. *Geossistemas-: Uma Introdução à Geografia Física*. [S.l.]: Bookman Editora, 2012. 3.2.3.2
- COMASTRI, J. A.; TULLER, J. *Topografia: altimetria*. 3.ed. ed. Viçosa: UFV, 2005. 2.1.2, 2.1.3.1, 3.3.1
- CÓRDOVA, M.; CÉLLERI, R.; DELDEN, A. van. Dynamics of precipitation anomalies in tropical south america. *Atmosphere*, MDPI, v. 13, n. 6, p. 972, 2022. 3.3.4
- COSTA, S. M. A. et al. Centro de análise sirgas-ibge: novas estratégias de processamento e combinação, e a influência da mudança do referencial global nos resultados. *Boletim de Ciências Geodésicas*, SciELO Brasil, v. 18, p. 63–85, 2012. 3.3.4
- COSTA, S. M. A. et al. Centro de Análise Sirgas-IBGE: novas estratégias de processamento e combinação, e a influência da mudança do referencial global nos resultados. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 18, p. 63–85, 2012. Publisher: SciELO Brasil. 2.2.2
- DA SILVA FILHO, A.; ZEBENDE, G.; GUEDES, E. Analysis of intentional lethal violent crimes: A sliding windows approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 567, p. 125653, 2021. 2.3.4.1, 2.3.4.1, 3.2.1
- DALAZOANA, R. *Estudos dirigidos à análise temporal do datum vertical brasileiro*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2005. Disponível em: [http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/3922/TESE\\_REGIANE\\_DALAZOANA.pdf?sequence=1](http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/3922/TESE_REGIANE_DALAZOANA.pdf?sequence=1) 2.1.2, 2.1.2, 3.3.1
- DANGENDORF, S. et al. Evidence for long-term memory in sea level. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 41, n. 15, p. 5530–5537, 2014. 3.3.3.4, 3.3.3.4

- DENYS, P. et al. Sea Level Rise in New Zealand: The Effect of Vertical Land Motion on Century-Long Tide Gauge Records in a Tectonically Active Region. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 125, n. 1, 2020. ISSN 21699313. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078770051&doi=10.1029%2f2019J B018055&partnerID=40&md5=8d85853eccc5821b13c4de9afae44c1>. 2.2, 3.1.5
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association*, v. 74, n. 366, p. 427–431, 1979. 2.3.3
- DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica: journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 1057–1072, 1981. 2.3.3
- DODET, G. et al. Characterization of Sea-level Variations Along the Metropolitan Coasts of France: Waves, Tides, Storm Surges and Long-term Changes. *Journal of Coastal Research*, v. 88, n. sp1, p. 10–24, 2019. ISSN 07490208. Publisher: Coastal Education Research Foundation Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85076623046&doi=10.2112%2fSI88-003.1&partnerID=40&md5=1d627c2f9aceb23b832c090b83ce3fc3>. 3.1.3.2, 3.1.4, 3.1.5, 3.2.1
- DREWES, H.-P. D.-I. H. Professional activities. *System (IHRS)*, 2017. 1
- FADIL, A. et al. Evidence for a slow subsidence of the Tahiti Island from GPS, DORIS, and combined satellite altimetry and tide gauge sea level records. *Comptes Rendus - Geoscience*, v. 343, n. 5, p. 331–341, 2011. ISSN 16310713. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79958729750&doi=10.1016%2fj.crte.2011.02.002&partnerID=40&md5=96e7567ec3548bbd80d41d8d1b597cc5>. 2.2, 3.1.3.1
- FANG, J. et al. Compound flood potential from storm surge and heavy precipitation in coastal china: dependence, drivers, and impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 25, n. 8, p. 4403–4416, 2021. 3.3.3.4
- FENOGLIO-MARC, L. et al. Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. *Marine Geodesy*, v. 35, n. SUPPL. 1, p. 137–150, 2012. ISSN 01490419. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84872315634&doi=10.1080%2f01490419.2012.718682&partnerID=40&md5=a188c70a519a62fcee56e64ea60a374e>. 3.1.1, 3.1.3.2, 3.1.4, 3.2.1
- FERREIRA, E. *MODELAGEM ESPAÇO-TEMPORAL DE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO ESTADO DA BAHIA: UMA ABORDAGEM COM JANELAS DESLIZANTES*. Tese (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual de Feira de Santana, 2021. 2.3.4, 3.2.2.3
- FERREIRA, P. C. *Análise de séries temporais*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2017. 2.3.3, 2.3.3
- FIGUEIREDO, M. A. T. *Elementos de Teoria da Informação*. Versão 1.5. Lisboa: [s.n.], 2007. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores. 2.3.2
- FIGUEREDO, M. B. et al. Analysis of the correlation between climatic variables and dengue cases in the city of alagoinhas/ba. *Scientific Reports*, Nature Publishing Group,

- v. 13, p. 7512, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-34349-8>. 2.3.6, 3.3.1
- FILHO, A. da S. et al. Statistical test for multiple detrended cross-correlation coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 562, p. 125285, 2021. 2.3.7, 3.3.1
- FILHO, A. M.; SILVA, M. D.; ZEBENDE, G. Autocorrelation and cross-correlation in time series of homicide and attempted homicide. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 400, p. 12–19, 2014. 2.3.4, 2.3.6, 3.2.2.3, 3.3.1, 3.3.2.3
- FILHO, A. M. d. S.; ZEBENDE, G. F.; GUEDES, E. F. Analysis of intentional lethal violent crimes: A sliding windows approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 567, p. 125653, 2021. ISSN 0378-4371. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437120309511>. 2.3.4.1, 3.2.1, 3.2.2.3
- FILHO, A. M. da S. et al. Dynamic analysis of vehicle robberies and thefts: An approach with sliding windows. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 18, n. 7, p. 1–30, 2024. 3.3.2.3
- FILHO, F. M. O. et al. Study of autocorrelations and uncertainties applied to patients with Parkinson's disease. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 10068, mar. 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-94252-2>. 3.3.1
- FILHO, R. A. d. S. História geológica da Bahia. *Salvador, Ba: CBPM*, 2010. 3.3.1, 3.3.4
- FOLGER, T. E se o mar subir? Miami vai virar uma ilha. As Maldivas vão sumir. *Revista National Geographic*, n. 162, 2013. 1, 3.1.1
- FORTES, L. P. S. Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). *Diss. Instituto Militar de Engenharia*, 1997. 2.2.2
- FREDERIKSE, T. et al. The sea-level budget along the Northwest Atlantic coast: GIA, mass changes, and large-scale ocean dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 122, n. 7, p. 5486–5501, 2017. ISSN 21699275. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85022206377&doi=10.1002%2f2017JC012699&partnerID=40&md5=3e3dc0354767521064bfb71ddfe23eea>. 2.2
- FREITAS, R. M. et al. Análise de anisotropia de imagens utilizando o método DFA: um estudo de caso na área de exploração de petróleo. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, n. XIV, p. 6463–6470, abr. 2009. 2.3.4, 3.2.2.3
- FUND, F. et al. An Integer Precise Point Positioning technique for sea surface observations using a GPS buoy. *Advances in Space Research*, v. 51, n. 8, p. 1311–1322, 2013. ISSN 02731177. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875278327&doi=10.1016%2fj.asr.2012.09.028&partnerID=40&md5=343fe6c7d5f12dc287961f7352bebf9c>. (document), 2.2, 2.9, 3.1.4
- GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. *Geodésia Celeste*. Curitiba: Ed. UFPR, 2004. 2.2, 2.2.1.1, 2.2.1.1

- GHASEMIFAR, E. et al. Long-term change of surface temperature in water bodies around iran?caspien sea, gulf of oman, and persian gulf?using 2001?2015 modis data. *Physical Geography*, v. 41, n. 1, p. 21 ? 35, 2020. Cited by: 14. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85067086155&doi=10.1080%2f02723646.2019.1618231&partnerID=40&md5=ef0065ed8aa70c8e2f41a36f5d382089>. 2.3.6, 3.3.2.3
- GIEHL, S.; DALAZOANA, R.; SANTANA, T. A. Absolute comparison between sentinel-3a satellite and tide gauges observations of rmpg in imbituba, arraial do cabo, salvador, fortaleza and santana. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 74, n. 4, p. 927 – 942, 2022. Cited by: 0; All Open Access; Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85146007658&doi=10.14393%2F2Frbcv74n4-67213&partnerID=40&md5=986df16e4393cac621945bebec018259>. 2.1.3.2
- GOSLING, S. N. The likelihood and potential impact of future change in the large-scale climate-earth system on ecosystem services. *Environmental Science and Policy*, Elsevier Ltd, v. 27, p. S15 ? S31, 2013. ISSN 14629011. Cited by: 31. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84862699292&doi=10.1016%2fj.envsci.2012.03.011&partnerID=40&md5=c2701c4ce8d33ec2ffbfa37acf23e6aa>. 3.3.1
- GRANGER, C. W. J.; NEWBOLD, P. Spurious regressions in econometrics. *Journal of Econometrics*, v. 2, n. 2, p. 111–120, 1974. 2.3.3
- GU, G.; ZHOU, W. Detrended fluctuation analysis for fractals and multifractals in higher dimensions. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, v. 74, n. 6, 2006. Cited by: 232; All Open Access; Green Accepted Open Access; Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33845448564&doi=10.1103%2FPhysRevE.74.061104&partnerID=40&md5=99ac427ed46f3bd7add3315c5b43abbc>. 2.3.4
- GUEDES, E. et al. Statistical test for  $\delta\rho_{dcca}$  cross-correlation coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, Elsevier, v. 501, p. 134–140, 2018. 2.3.6, 3.3.1
- GUEDES, E. et al.  $\Delta dmc_x^2$ : A new approach to measure contagion effect on financial crisis. *Fluctuation and Noise Letters*, v. 21, n. 4, 2022. Cited by: 3. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85124772488&doi=10.1142%2fS0219477522500262&partnerID=40&md5=4e6817a083c1ad70a9e519d6f06ecaac>. 2.3.7, 3.3.1
- GUEDES, E. et al. Efficiency and Long-Range Correlation in G-20 Stock Indexes: A Sliding Windows Approach. *Fluctuation and Noise Letters*, 2022. ISSN 02194775. Publisher: World Scientific. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85127046007&doi=10.1142%2fS021947752250033X&partnerID=40&md5=b503165ccd5b9b4fd8807f981469942c>. 2.3.4.1, 3.2.1
- GUEDES, E. F.; FILHO, A. M. d. S.; ZEBENDE, G. F. Detrended multiple cross-correlation coefficient with sliding windows approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 574, p. 125990, 2021. ISSN 0378-4371. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437121002624>. (document), 2.3.7.1, 2.21
- GUEDES, E. F. et al. Slidingwindows: Methods for time series analysis. 2021. R package version 0.2.0. 3.2.2.3

GUEDES, E. F. et al. *Sliding Windows: Methods for Time Series Analysis*. [S.l.], 2021. R package version 0.2.0. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=SlidingWindows>. 3.8

GUEDES, E. F.; SILVA-FILHO, A. M.; ZEBENDE, G. F. Detrended multiple cross-correlation coefficient with sliding windows approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 607, 2021. Utilizando janelas deslizantes para estimar o coeficiente DMC. 3.3.2.3

GUEDES, E. F.; ZEBENDE, G. F. Dcca cross-correlation coefficient with sliding windows approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 527, p. 121286, 2019. 3.3.2.3

GUEDES, V. L.; BORSCHIVER, S. Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação, de comunicação e de avaliação científica e tecnológica. *Encontro Nacional de Ciência da Informação*, v. 6, n. 1, p. 18, 2005. 3.1.2.1

HARARI, J.; MESQUITA, A. R. d.; CAMARGO, R. d. *Noções de Oceanografia*. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2021. (document), 2.1.1, 2.2, 2.1.1, 2.1.2, 3.2.3.1, 3.2.3.2

HARDSTONE, R. et al. Detrended fluctuation analysis: A scale-free view on neuronal oscillations. *Frontiers in Physiology*, v. 3 NOV, 2012. Cited by: 395; All Open Access; Gold Open Access; Green Final Open Access; Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84870917484&doi=10.3389%2Ffphys.2012.00450&partnerID=40&md5=b11da81ca0ce353f932505527444db90>. 2.3.4

HEIN, G. W. From gps and glonass via egnos to galileo–positioning and navigation in the third millennium. *GPS Solutions*, Springer, v. 3, n. 4, p. 39–47, 2000. 2.2

HENRY, O. et al. Tide gauge-based sea level variations since 1950 along the Norwegian and Russian coasts of the Arctic Ocean: Contribution of the steric and mass components. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 117, n. 6, 2012. ISSN 21699291. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84863450000&doi=10.1029%2F2011JC007706&partnerID=40&md5=84a03b6394f355089c3087454a199a3f>. 3.1.4

HERNÁNDEZ, J. N. et al. Connection of the Vertical Control Networks of Venezuela, Brazil and Colombia. In: Sansò, F. et al. (Ed.). *Vertical Reference Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. v. 124, p. 324–327. ISBN 978-3-642-07701-2 978-3-662-04683-8. Series Title: International Association of Geodesy Symposia. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04683-8\\_60](http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04683-8_60). 3.3.1

HIERONYMUS, M. A yearly maximum sea level simulator and its applications: A stockholm case study. *Ambio*, Springer Science and Business Media B.V., v. 51, n. 5, p. 1263–1274, 2022. ISSN 00447447. Cited by: 3; All Open Access, Green Open Access, Hybrid Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85119453131&doi=10.1007%2Fs13280-021-01661-4&partnerID=40&md5=93855b793e48d05a0c20d61b3d813391>. 3.2.2.2

HOUNSOU-GBO, G. A. et al. Tropical atlantic contributions to strong rainfall variability along the northeast brazilian coast. *Advances in meteorology*, Wiley Online Library, v. 2015, n. 1, p. 902084, 2015. 3.3.4

- HYNDMAN, R. J.; ATHANASOPOULOS, G. *forecast: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models*. [S.l.], 2021. R package version 8.16. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=forecast>. 3.3.3.1, 3.3.4
- IAG. *Resolution nº 1*. 2015. [https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions.2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions.2015.pdf). Acessado em 06/06/2019. 1
- IBGE. *Padronização de Marcos Geodésicos*. 2008. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default\\_normas.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default_normas.shtm). (document), 2.5
- IBGE. *Relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e outros Níveis Hidrográficos no Litoral Brasileiro*. 2009. Published: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/outros\\_documentos\\_tecnicos/rmpg/relacao\\_dvsgeb\\_nr\\_zh.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvsgeb_nr_zh.pdf). (document), 2.1.2, 2.3, 2.1.3.1, 3.3.1
- IBGE. *Instruções técnicas para Controle Geodésico de Estações Maregráficas - CGEM e sua vinculação vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro - SGB*. 2010. Published: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/mtg11.pdf>. 2.1.3.1
- IBGE. *Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - 2001-2012*. 2013. Published: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/RMPG/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2013\\_GRRV.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/RMPG/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf). 2.1.3.2
- IBGE. *Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia - RMPG 2001/2015*. 2016. Published: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2015\\_GRRV.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf). 2.1.3.2
- IBGE. *Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro*. 2017. Published: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/normas_levantamentos_geodesicos.pdf). 2.1.3.1, 2.2.2, 2.2.2
- IBGE. *Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais*. 2018. Published: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_altimetrica/relatorio/relatorio\\_REALT\\_2018.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_altimetrica/relatorio/relatorio_REALT_2018.pdf). 2.1.3.1
- IHLEN, E. A. F.; VEREIJKEN, B. Detection of co-regulation of local structure and magnitude of stride time variability using a new local detrended fluctuation analysis. *Gait and Posture*, v. 39, n. 1, p. 466 – 471, 2014. Cited by: 9. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84888300924&doi=10.1016%2Fj.gaitpost.2013.08.024&partnerID=40&md5=852f70057d44e64cc9d22955bf600823>. 2.3.4
- IMAI, R.; OKAMOTO, Y. Detection of mental task-induced changes in eeg patterns by detrended fluctuation analysis (dfa). *Rinsho byori. The Japanese journal of clinical pathology*, v. 56, n. 5, p. 383 – 386, 2008. Cited by: 1. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-48049110756&partnerID=40&md5=c702a1f38129919a2faf953424d7a603>. 2.3.4
- INPE. *Mais seca e altas temperaturas: estudo comprova que número de ondas de calor e dias sem chuva aumentaram no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/\protect\penalty\z@meio-ambiente/\protect\penalty\z@2024/\prote>

ct\penalty\z@09/\protect\penalty\z@mais-seca-e-altas-temperaturas-estudo-comprova-que-numero-de-ondas-de-calor-e-dias-sem-chuva-aumentaram-no-brasil). 3.3.3.1

IPCC. *Relatório Especial sobre o Oceano e a Criosfera em um Clima em Mudança (SROCC)*. 2019. Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Relat%C3%B3rio\\_Especial\\_sobre\\_Oceano\\_e\\_a\\_Criosfera\\_em\\_um\\_Clima\\_em\\_Mudan%C3%A7a](https://pt.wikipedia.org/wiki/Relat%C3%B3rio_Especial_sobre_Oceano_e_a_Criosfera_em_um_Clima_em_Mudan%C3%A7a)). 3.3.1

IQBAL, J. et al. Detrended cross correlation analysis (dcca) of radon, thoron, temperature and pressure time series data. *Physica Scripta*, v. 95, n. 8, 2020. Cited by: 10. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85088370429&doi=10.1088%2F1402-4896%2Fab9fb1&partnerID=40&md5=f895513a561d8ff4ec71d44249c8e13b>). 2.3.5

ISLAM, M. A.; SATO, T. Influence of terrestrial precipitation on the variability of extreme sea levels along the coast of bangladesh. *Water*, v. 13, n. 20, p. 2915, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/13/20/2915>). 3.3.1, 3.3.2.3

JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M. GLONASS: Revisão teórica e estado da arte. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 2, p. 155–173, 2018. 2.2.1.2

JIANG, W.; WANG, J. Classification of ecg signals based on local fractal feature. *Multimedia Tools and Applications*, Springer, v. 83, n. 18, p. 54773 ? 54789, 2024. ISSN 13807501. Cited by: 0. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85178885365&doi=10.1007%2Fs11042-023-17787-4&partnerID=40&md5=d9d21690715cbdeb520a459343b3081d>). 2.3.4.1, 3.2.1

JIN, C. et al. On evaluating the predictability of sea surface temperature using entropy. *Remote Sensing*, v. 15, n. 8, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15081956>). 3.3.1

JOHNSON, A. et al. Range of 21st century ice mass changes in the filchner-ronne region of antarctica. *Journal of Glaciology*, Cambridge University Press, v. 14, n. 2, 2023. ISSN 00221430. Cited by: 1; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85151458080&doi=10.1017%2Fjog.2023.10&partnerID=40&md5=1b04c4f5b742b135c530e834db71862b>). 3.3.1

JUNIOR, N. d. S. R. et al. Controle geodésico do nível do mar em salvador: análises e correlações. *Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*, 2021. 2.3.6, 3.3.1

JUNIOR, N. d. S. R. et al. Controle Geodésico do Nível do Mar em Salvador: Análises e Correlações. 2021. Publisher: Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento . . . . 1, 2.1.3.2, 3.2.3.2

JUNIOR, N. d. S. R. et al. Controle geod sico do n vel do mar em Salvador: An lises e correla es. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 73, n. 2, p. 470–488, abr. 2021. 3.2.1

JUNIOR, N. R. et al. Sea level on the brazilian coast: A sliding windows approach. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier, p. 105360, 2025. (document), 2.1.3.2, 3.16

KANTELHARDT, J. W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. *Physica A*, v. 316, n. 1–4, p. 87–114, 2002. 2.3

KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications*. [S.l.]: Artech house, 2017. 2.2.1.2

KEYSERS, J. et al. Vertical datum transformations across the litoral zone. *Relatório técnico, CRC for Spatial Information, Australia*, 2013. 3.3.2.1

KLEINHERENBRINK, M.; RIVA, R.; FREDERIKSE, T. A comparison of methods to estimate vertical land motion trends from GNSS and altimetry at tide gauge stations. *Ocean Science*, v. 14, n. 2, p. 187–204, 2018. ISSN 18120784. Publisher: Copernicus GmbH. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85044121271&doi=10.5194%2fos-14-187-2018&partnerID=40&md5=dbe85241ab9f3400fe3f655c42918079>. 3.1.3.2, 3.1.4, 3.2.1, 3.2.2.2, 3.2.3.2

KLEINHERENBRINK, M.; RIVA, R.; FREDERIKSE, T. A comparison of methods to estimate vertical land motion trends from gnss and altimetry at tide gauge stations. *Ocean Science*, Copernicus GmbH, v. 14, n. 2, p. 187–204, 2018. 3.3.4.1

KNOPPERS, B. et al. A interface terra-mar do brasil. *Biologia Marinha*, Interciência Rio de Janeiro, v. 2, p. 529–553, 2009. 2.1.1

KRISTOUFEK, L. Measuring correlations between non-stationary series with DCCA coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 402, p. 291–298, 2014. Publisher: Elsevier. 2.3.6, 3.3.2.3

KWIATKOWSKI, D. et al. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root: How sure are we that economic time series have a unit root? *Journal of Econometrics*, v. 54, n. 1, p. 159–178, 1992. ISSN 0304-4076. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030440769290104Y>. 3.3.3.1

KWIATKOWSKI, D. et al. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, v. 54, n. 1–3, p. 159–178, 1992. 2.3.3, 2.3.3

LAZZARI, D. et al. Identification of extreme weather events and impacts of the disasters in brazil. *arXiv preprint arXiv:2409.16309*, 2024. 3.3.3.1

LEGG, S. IPCC, 2021: Climate Change 2021-The Physical Science Basis. *Interaction*, v. 49, n. 4, p. 44–45, 2021. Publisher: Geography Teachers Association of Victoria Melbourne, Vic. 1, 3.2.1

LEMUS, J. L. C.; TORRES-GARCÍA, M. del P.; MONDRAGÓN, M. F. *El océano y sus recursos. II: las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química*. [S.l.]: Fondod de Cultura Económica, 1997. 2.1.1

LENANTON, R. et al. Potential influence of a marine heatwave on range extensions of tropical fishes in the eastern indian ocean?invaluable contributions from amateur observers. *Regional Studies in Marine Science*, Elsevier B.V., v. 13, p. 19 ? 31, 2017. ISSN 23524855. Cited by: 42; All Open Access, Hybrid Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85017275152&doi=10.1016%2fj.rsma.2017.03.005&partnerID=40&md5=eabd8687e5157490e1d30ed4384fe4ab>. 3.3.1

LI, M.; LI, Y.; LENG, J. Power-type functions of prediction error of sea level time series. *Entropy*, v. 17, n. 7, p. 4809–4837, jul. 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1099-4300/17/7/4809>. 3.3.1

LI, P.; XU, F. Understanding and reconstructing the coastal sea level variations along the western boundary of the north pacific. *Geoscience Letters*, Springer, v. 7, n. 1, p. 5, 2020. 3.3.4

LINHARES, R. R. Smoothed detrended fluctuation analysis. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, v. 86, n. 17, p. 3388 – 3397, 2016. Cited by: 6. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84959061154&doi=10.1080%2F00949655.2016.1154965&partnerID=40&md5=4418a0f4119ef32f8f4b91dddf3ead73>). 2.3.4

LIU, Y. et al. Land subsidence contributions to relative sea level rise at tide gauge galveston pier 21, texas. *Scientific Reports*, Nature Research, v. 10, n. 1, 2020. ISSN 20452322. Cited by: 33; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85093842419&doi=10.1038%2fs41598-020-74696-4&partnerID=40&md5=8b9b553a323c1ecb406d88132ea8835d>). 3.3.1, 3.3.2.3

LONGO, A. et al. Fractal Analysis of Data from Seismometer Array Monitoring Virgo Interferometer. *Pure and Applied Geophysics*, v. 177, n. 6, p. 2597–2603, 2020. ISSN 00334553. Publisher: Birkhauser. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85077068591&doi=10.1007%2fs00024-019-02395-x&partnerID=40&md5=6ee89b73b6c6deb87c78a10fff7e34a7>). 2.3.4.1, 3.2.1

LUIZ-SILVA, W. et al. An overview of precipitation climatology in brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems. *Hydrological Sciences Journal*, Taylor & Francis, v. 66, n. 2, p. 289–308, 2021. 3.3.4

LUZ, R. T. Estratégias para modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua integração ao SIRGAS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 14, n. 3, p. 453–455, 2008. Publisher: Universidade Federal do Paraná. 2.1.2, 2.1.3.1

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE. *Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CBCG)*, v. 3, 2003. 2.1.3.2

LUZ, R. T.; NEVES, C. F.; FREITAS, S. R. C. *Proposição e teste de metodologia para instalação e operação de uma rede maregráfica permanente com fins geodésicos*. 1996. Proposta submetida ao Departamento de Geodésia do IBGE. 2.1.3.2

MACHADO, R. M. et al. Analysis of the ocean?atmosphere interface in the brazil current region. 2024. ISSN 08998418. Publisher: John Wiley and Sons Ltd Type: Article. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85212511050&doi=10.1002%2fjoc.8721&partnerID=40&md5=c071e578028d7a91339943c59ff6fe97>). 3.2.3.1

MARMER, H. A. *Tidal datum planes*. [S.l.]: US Government Printing Office, 1927. 2.1.2, 3.3.1

MATHANKAR, A. R. Bibliometrics: An overview. *International Journal of Library & Information Science (IJLIS)*, v. 7, n. 3, 2018. 3.1.3.4, 3.1.3.4, 3.1.3.6

MEDEIROS, R. M. Entropia pluviométrica na grande metrópolis recife-pe, brasil. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, p. 031–047, jan. 2019. Atenção à acentuação: pluviométrica, metrópolis. Disponível em: <http://www.ead.codai.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/2147>). 3.3.1

MENDES, V. B. *BeiDou*. Lisboa, 2013. Relatório técnico interno. 2.2.1.4

MENEZES, R. R. V.; SOUZA, L. M. de; FERREIRA, I. O. Comparison of variations of mean sea level from satellite altimetry and tide gauge data in fortaleza – ce; comparação das variações do nível médio do mar a partir de dados de altimetria por satélites e maregrafia em fortaleza – ce. *Anuario do Instituto de Geociencias*, v. 44, n. 1, 2021. Cited by: 3; All Open Access; Gold Open Access. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106671406&doi=10.11137%2F1982-3908\\_2021\\_44\\_35347&partnerID=40&md5=7f0dd907102e9299a1415766e8ebe2ef](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85106671406&doi=10.11137%2F1982-3908_2021_44_35347&partnerID=40&md5=7f0dd907102e9299a1415766e8ebe2ef). 2.1.3.2

MERAZ, M. et al. A fractal scaling analysis of the SARS-CoV-2 genome sequence. *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 73, 2022. ISSN 17468094. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120913798&doi=10.1016%2Fj.bspc.2021.103433&partnerID=40&md5=ab601abcac233e4fbcab2a57b8bccb22>. 2.3.4.1, 3.2.1

MESQUITA, A. R. D. Marés, circulação e nível do mar na costa sudeste do brasil. *Laboratório MAPTO LAB (Laboratório de Marés e Processos Temporais Oceânicos)*: *www.mares.io.usp.br Ícone Marés*, 1997. 3.2.3.1

MIGUENS, A. P. *Navegação: A Ciência e a Arte*. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996. 2.1.1, 2.1.1, 3.3.1

MILLY, P. C. D. et al. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*, v. 415, n. 6871, p. 514–517, jan. 2002. ISSN 1476-4687. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/415514a>. 3.3.1, 3.3.2.3

MIMURA, N. Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, The Japan Academy, v. 89, n. 7, p. 281–301, 2013. 3.3.1, 3.3.2.3

MOGHADAM, F. Neural network-based approach for identification of meteorological factors affecting regional sea-level anomalies. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, n. 3, 2017. ISSN 10840699. Publisher: American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85014337374&doi=10.1061%2F%28ASCE%29HE.1943-5584.0001472&partnerID=40&md5=e46d32589459cfc98576fdf2a664869e>. 3.1.1, 3.1.4

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. UNESP, 2008. 2.2, 2.2.1.1, 2.2.1.1, 2.2.1.1, 2.2.1.2, 2.2.1.3, 2.2.1.3

MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Ed. UNESP, 2008. 2.2.1.2

MORENO, F. M.; TANNURI, E. A.; COZMAN, F. G. Automatic clustering of metocean conditions on the brazilian coast. v. 145, n. 4, p. 041202, 2023. ISSN 0892-7219, 1528-896X. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/offshoremechanics/article/145/4/041202/1155873/Automatic-Clustering-of-Metocean-Conditions-on-the>. 3.2.3.1

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. *Análise de séries temporais: modelos lineares univariados*. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. 2.3.1, 2.3.1, 2.3.1, 2.3.4

- MORITZ, S.; BARTZ-BEIELSTEIN, T. imputets: Time series missing value imputation in R. *The R Journal*, v. 9, n. 1, p. 207–218, 2017. Disponível em: <https://journal.r-project.org/archive/2017/RJ-2017-009/index.html>. 3.3.3.1, 3.3.4
- MOROZOV, E. G. et al. Amazon river plume in the western tropical north atlantic. *Journal of Marine Science and Engineering*, MDPI, v. 12, n. 6, p. 851, 2024. 3.3.4
- MOVAHED, S. M. S. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of sunspot time series. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, n. 2, 2006. Cited by: 302; All Open Access; Green Accepted Open Access; Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84856377010&doi=10.1088%2F1742-5468%2F2006%2F02%2FP02003&partnerID=40&md5=5c2c712e20511e217796b40a50709186>. 2.3.4
- MURRAY, K. D. et al. Coastal land subsidence accelerates timelines for future flood exposure in hawai'i. *Communications Earth and Environment*, v. 6, n. 1, 2025. Cited by: 1; All Open Access; Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85219689415&doi=10.1038%2Fs43247-025-02108-4&partnerID=40&md5=460ef46e98a055fe65b2f1e75b9509c4>. 2.2
- MUTTALIB, A. M. A.; AMEEN, S. M. M.; MAHMOOD, A. B. The impacts of the pacific southern oscillation and the indian ocean dipole on the mean sea level of the arabian gulf and the arabian sea. *Journal of King Abdulaziz University, Marine Science*, v. 30, n. 2, p. 17 ? 31, 2020. Cited by: 2; All Open Access, Bronze Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85126675019&doi=10.4197%2fMar.30-2.2&partnerID=40&md5=fe1e79664bb6aabe00da66d03f324e3a>. 2.3.6, 3.3.2.3
- NAGARAJAN, R.; KAVASSERI, R. G. Minimizing the effect of sinusoidal trends in detrended fluctuation analysis. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, v. 15, n. 5, p. 1767 – 1773, 2005. Cited by: 31; All Open Access; Green Accepted Open Access; Green Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-22144464844&doi=10.1142%2F021812740501279X&partnerID=40&md5=c205fad9995595faa5dca08e7d141da5>. 2.3.4
- NETO, G. M. d. S.; others. Impactos do aumento do nível médio do mar em algumas capitais do Nordeste brasileiro, e suas consequências ambientais. 2009. Publisher: Universidade Federal de Campina Grande. 1
- NETO, R. M. B.; SANTOS, C. A. G. The nift index: A new approach to assessing meteorological drought exposure. *Journal of Hydrology*, v. 632, p. 130857, 2024. ISSN 0022-1694. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169424002518>. 3.3.3.1
- NGUYEN, T. C.; SCHWARZER, K.; RICKLEFS, K. Water-level changes and subsidence rates along the saigon-dong nai river estuary and the east sea coastline of the mekong delta. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Academic Press, v. 283, 2023. ISSN 02727714. Cited by: 7; All Open Access, Hybrid Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85150370381&doi=10.1016%2fj.ecss.2023.108259&partnerID=40&md5=67fe5558d5c7311ff7483a733be5f211>. 3.3.1, 3.3.2.3
- NIKOLOPOULOS, D. et al. Long-memory traces in PM 10 time series in Athens, Greece: investigation through DFA and R/S analysis. *Meteorology and Atmospheric*

*Physics*, v. 133, n. 2, p. 261–279, 2021. ISSN 01777971. Publisher: Springer. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085613845&doi=10.1007%2fs00703-020-00744-3&partnerID=40&md5=396021a940de5c345b2ea9f54f7bfeeb>. 2.3.4.1, 3.2.1

OELSMANN, J. et al. Regional variations in relative sea-level changes influenced by nonlinear vertical land motion. *Nature Geoscience*, Nature Publishing Group UK London, v. 17, n. 2, p. 137–144, 2024. 3.3.4.1

OELSMANN, J. et al. The zone of influence: matching sea level variability from coastal altimetry and tide gauges for vertical land motion estimation. *Ocean Science*, Copernicus GmbH, v. 17, n. 1, p. 35–57, 2021. 3.3.4.1

OH, M. et al. Time series analysis of the antarctic circumpolar wave via symbolic transfer entropy. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 499, p. 233–240, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.12.019>. 3.3.1

OKUBO, Y. *Bibliometric Indicators and Analysis of Research Systems: Methods and Examples*. [S.l.], 1997. Series: OECD Science, Technology and Industry Working Papers Volume: 1997/01. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/208277770603>. 3.1.2.1, 3.1.3.3, 3.1.3.6, 3.1.3.6, 3.1.3.6

PAN, Y.-H. et al. Fast computation of sample entropy and approximate entropy in biomedicine. *Computer methods and programs in biomedicine*, Elsevier, v. 104, n. 3, p. 382–396, 2011. 2.3.2

PARKER, A. Sea level oscillations in Japan and China since the start of the 20th century and consequences for coastal management - Part 2: China pearl river delta region. *Ocean and Coastal Management*, v. 163, p. 456–465, 2018. ISSN 09645691. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85050910175&doi=10.1016%2fj.ocecoaman.2018.08.004&partnerID=40&md5=515712b52cdf7c98386475cfd04c078e>. 2.2, 3.1.3.2, 3.1.3.6, 3.1.4, 3.2.1

PARKER, A.; OLLIER, C. Sea level rise for India since the start of tide gauge records. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 9, p. 6483–6495, 2015. ISSN 18667511. Publisher: Springer Verlag. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84940440214&doi=10.1007%2fs12517-014-1739-6&partnerID=40&md5=e282072fe6139a92d78c6c21853542a7>. 3.1.1

PARRA, R. R. T.; LÓPEZ, J. C. G.; FRANCO, F. A. Variación del nivel medio del mar en el caribe colombiano. 2006. 1

PENG, C.-K. et al. Mosaic organization of DNA nucleotides. *Physical Review E*, v. 49, n. 2, p. 1685–1689, fev. 1994. ISSN 1063-651X, 1095-3787. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.49.1685>. 2.3.4, 2.3.4, 2.3.6, 3.2.1, 3.2.2.3, 3.2.2.3, 3.3.2.3

PEREIRA, A. R. B. et al. Preenchimento de falhas em séries de dados meteorológicos de estações automáticas. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 35, p. 22–44, 2024. 3.3.3.1

PHILLIPS, P. C. B.; PERRON, P. Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, v. 75, n. 2, p. 335–346, 1988. 2.3.3

- PIAO, L.; FU, Z. Quantifying distinct associations on different temporal scales: comparison of DCCA and Pearson methods. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2016. Publisher: Nature Publishing Group. 2.3.6, 3.3.2.3
- PIECUCH, C. G.; WADEHRA, R. Dynamic sea level variability due to seasonal river discharge: A preliminary global ocean model study. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, v. 47, n. 4, p. e2020GL086984, 2020. 3.3.4
- PINCUS, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the national academy of sciences*, v. 88, n. 6, p. 2297–2301, 1991. 2.3.2, 2.3.2, 3.3.2.3, 3.3.2.3, 3.3.3.2
- PINCUS, S. M.; GOLDBERGER, A. L. Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, American Physiological Society Bethesda, MD, v. 266, n. 4, p. H1643–H1656, 1994. 2.3.2, 2.3.2, 3.3.2.3, 3.3.2.3
- PINTO, S. S.; SAADI, A. d. S. Introdução à estatística. 2013. 2.3
- PODOBNIK, B.; STANLEY, H. E. Detrended Cross-Correlation Analysis: A new method for analyzing two non-stationary time series. *Physical Review Letters*, v. 100 N.8, p. 084102,, 2008. 2.3.5, 2.3.6, 3.3.2.3
- PONTE, R. M. A preliminary model study of the large-scale seasonal cycle in bottom pressure over the global ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 104, n. C1, p. 1289–1300, 1999. 3.3.4
- PRATES, W. O. *Estatísticas para ciências sociais aplicadas I*. [S.l.]: UFBA, Faculdade de Ciências Contábeis; Superintendência de Educação a Distância, 2017. 2.3.1
- PRITCHARD, A. Statistical bibliography or bibliometrics. *Journal of documentation*, v. 25, n. 4, p. 348–349, 1969. 3.1.2.1
- PUGH, D.; WOODWORTH, P. L.; WOODWORTH, P. *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014. 3.3.3.2
- PUGH, D. T. Tides, surges and mean sea-level (reprinted with corrections). 1996. Publisher: John Wiley & Sons Ltd. 2.1.1
- QUINTINO, D.; BURNQUIST, H.; FERREIRA, P. Relative Prices of Ethanol-Gasoline in the Major Brazilian Capitals: An Analysis to Support Public Policies. *Energies*, v. 15, n. 13, 2022. ISSN 19961073. Publisher: MDPI. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85133526377&doi=10.3390%2fen15134795&partnerID=40&md5=3b78d7e997538852b48e840e341e87a2>. 2.3.4.1, 3.2.1
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2014. Disponível em: <http://www.R-project.org/>. 3.2.2.3, 3.3.2.3
- RAY, R.; BECKLEY, B.; LEMOINE, F. Vertical crustal motion derived from satellite altimetry and tide gauges, and comparisons with DORIS measurements. *Advances in Space Research*, v. 45, n. 12, p. 1510–1522, 2010. ISSN 02731177. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956392698&doi=10.1016%2fj.asr.2010.02.020&partnerID=40&md5=155c9cd6bc73c7cfa81c0c9e5a4f59e9>. 2.2, 3.1.3.2, 3.2.1

RIBEIRO, F. F. et al. Dcca multi cross-correlation analysis applied on eeg signals to study motor activity (real/imaginary). *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 103, p. 107419, 2025. [2.3.7](#), [3.3.1](#)

RICHMAN, J. S.; MOORMAN, J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American journal of physiology-heart and circulatory physiology*, American Physiological Society Bethesda, MD, v. 278, n. 6, p. H2039–H2049, 2000. [2.3.2](#)

RIOUL, O. *Teoria da Informação e da Codificação*. Campinas; Brasília: Editora da Unicamp and Editora Universidade de Brasília, 2018. ISBN 978-85-268-1394-6. [2.3.2](#)

RODRIGUES, P.; FILHO, F. O.; GUEDES, E. *Networks Analysis Of Brazilian Climate Data Based On The DCCA Cross-Correlation Coefficient*. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1330103/v1>. [2.3.4](#), [3.2.2.3](#)

ROTH, S. et al. The compound impact of rainfall, river flow and sea level on a watercourse through a coastal city: Methodology in making. *City and Environment Interactions*, Elsevier, v. 23, p. 100153, 2024. [3.3.3.4](#)

ROYSTON, S.; BINGHAM, R. J.; BAMBER, J. L. Attributing decadal climate variability in coastal sea-level trends. *Ocean Science*, Copernicus GmbH, v. 18, n. 4, p. 1093–1107, 2022. [3.3.4](#)

SAMPAIO, A. C. F. et al. Oscilação do nível do mar no futuro e possíveis conseqüências no Brasil: pequeno ensaio. In: *XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA*. Belo Horizonte, MG. [S.l.: s.n.], 2003. [1](#)

SÁNCHEZ, L.; MARTÍNEZ, W. Approach to the New Vertical Reference System for Colombia. In: Sansò, F. et al. (Ed.). *Vertical Reference Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002. v. 124, p. 27–33. ISBN 978-3-642-07701-2 978-3-662-04683-8. Series Title: International Association of Geodesy Symposia. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04683-8\\_7](http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04683-8_7). [3.3.1](#)

SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. Vertical datum unification for the international height reference system (ihrs). *Geophysical Journal International*, Oxford University Press, v. 209, n. 2, p. 570–586, 2017. [1](#)

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Á. et al. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 473, p. 24–32, 2017. [3.3.4](#)

SANTAMARÍA-GÓMEZ, A. et al. Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field. *Global and Planetary Change*, v. 98-99, p. 6–17, 2012. ISSN 09218181. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84865614765&doi=10.1016%2fj.gloplacha.2012.07.007&partnerID=40&md5=52cd9467bf74a23106d530c95b0d76b2>. [2.2](#), [3.1.3.1](#), [3.1.3.2](#), [3.2.1](#)

SANTOS, E. et al. Autocorrelation of wind speed: A sliding window approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 607, p. 128213, 2022. ISSN 0378-4371. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437122007713>. [2.3.4.1](#), [3.3.2.3](#), [3.3.3.4](#)

SANTOS, E. et al. Autocorrelation of wind speed: A sliding window approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 607, 2022. ISSN 03784371. Publisher: Elsevier B.V. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85140266015&doi=10.1016%2fj.physa.2022.128213&partnerID=40&md5=d130b8c7fe990e6f5b6939c7c703c13e>. 2.3.4.1, 3.2.1

SANTOS, M. S. T. et al. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à elevação do Nível Médio do Mar (NMM) em escala local. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, p. 691–705, 2015. Publisher: SciELO Brasil. 1

SANTOS, T. A. O. D. et al. *Multi-scale dynamics of carbon dioxide flux and its environmental drivers in the Pantanal wetland*. Biogeophysics: Bioturbation, 2025. Disponível em: <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-4102/>. 2.3.6

SARAMUL, S.; EZER, T. Spatial variations of sea level along the coast of Thailand: Impacts of extreme land subsidence, earthquakes and the seasonal monsoon. *Global and Planetary Change*, v. 122, p. 70–81, 2014. ISSN 09218181. Publisher: Elsevier. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84906728583&doi=10.1016%2fj.gloplacha.2014.08.012&partnerID=40&md5=0d7af919af3cd28b64182fa6edf4d422>. 2.2, 3.1.3.2, 3.1.4, 3.2.1

SATIRAPOD, C. et al. Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling. *Advances in Space Research*, v. 51, n. 8, p. 1565–1571, 2013. ISSN 02731177. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875255781&doi=10.1016%2fj.asr.2012.04.030&partnerID=40&md5=fc33f932c58e6e8a6721624eafbd1e14>. 2.2

SCHMIEGELOW, J. M. M. O planeta azul: uma introdução às ciências marinhas. *Rio de Janeiro: Interciência*, 2004. 2.1.1, 2.1.2

SCHOSSLER, V. et al. Precipitation anomalies in the Brazilian southern coast related to the SAM and ENSO climate variability modes. *RBRH*, SciELO Brasil, v. 23, p. e14, 2018. 3.3.4

SCHUREMAN, P. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. [S.l.]: US Government Printing Office, 1958. 2.1.2, 2.1.2, 2.1.2, 2.1.2

SCHÖNE, T.; SCHÖN, N.; THALLER, D. IGS Tide Gauge Benchmark Monitoring Pilot Project (TIGA): Scientific benefits. *Journal of Geodesy*, v. 83, n. 3-4, p. 249–261, 2009. ISSN 09497714. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-61349164355&doi=10.1007%2fs00190-008-0269-y&partnerID=40&md5=b674e45f3f1c1623316e0c2144b469c3>. 3.1.3.1, 3.1.3.2, 3.1.4, 3.2.1

SEEBER, G. Satellite geodesy: foundations, methods and applications. *INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC REVIEW*, v. 4, n. 3, p. 92–93, 2003. 2.2.1.2, 2.2.1.2

SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell system technical journal*, Nokia Bell Labs, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948. 2.3.2, 3.3.2.3

SHEN, C.; LI, C.; SI, Y. A detrended cross-correlation analysis of meteorological and API data in Nanjing, China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 419, p. 417–428, 2015. Cited by: 51. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record>

.uri?eid=2-s2.0-84910661952&doi=10.1016%2Fj.physa.2014.10.058&partnerID=40&md5=7073392bdace2f7cf31da9d4a46d79d7). 2.3.5

SHI, W. et al. Multiscale multifractal detrended cross-correlation analysis of financial time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 403, p. 35 – 44, 2014. Cited by: 85. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84894645540&doi=10.1016%2Fj.physa.2014.02.023&partnerID=40&md5=4464fcd63032ac21918a96bebb5b3ae4>). 2.3.5

SHI, Y. et al. A literature review on accessibility using bibliometric analysis techniques. *Journal of transport geography*, v. 87, p. 102810, 2020. Publisher: Elsevier. 3.1.2.1

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S.; STOFFER, D. S. *Time series analysis and its applications*. [S.l.]: Springer, 2000. v. 3. 2.3.3

SILVA FILHO, A. M. *Autocorrelação e Correlação Cruzada: Teorias e Aplicações*. Tese (Tese de Doutorado) — SENAI CIMATEC, Salvador, 2014. 2.3.4, 2.3.4, 2.3.5, 2.3.6, 3.2.2.3, 3.2.2.3

SILVA FILHO, A. M. *Autocorrelação e Correlação Cruzada: Teorias e Aplicações*. Tese (Tese de Doutorado) — SENAI CIMATEC, Salvador, 2014. 3.3.2.3

SILVA, K. S. da; TANAJURA, E. L. X. Obtaining tide heights from historical series of the permanent tide network for geodesy – rmpg; obtenÇÃO de alturas de marÉ a partir de sÉries histÓricas da rede maregrÁfica permanente para geodÉsia – rmpg. *Geociencias*, v. 44, n. 1, p. 103 – 117, 2025. Cited by: 0; All Open Access; Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105001112775&doi=10.5016%2Fgeociencias.v44i1.18773&partnerID=40&md5=72b028532a4bfef4d3aef7d84c381313>). 2.1.3.2

SILVA, L. H. O. d. *A influência do dipolo subtropical do Atlântico sul na dinâmica de ressurgência costeira ao longo das costas sudeste-sul do Brasil e sudoeste da África*. Dissertação (Mestrado), 2020. 3.3.4

SILVEIRA, F. et al. Coastal floods induced by mean sea level rise?ecological and socioeconomic impacts on a mesotidal lagoon. *Journal of Marine Science and Engineering*, MDPI, v. 9, n. 12, 2021. ISSN 20771312. Cited by: 5; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85121740074&doi=10.3390%2Fjmse9121430&partnerID=40&md5=5ec947bbb70108ef60fc0cc3912816d3>). 3.2.2.2

SILVEIRA, F. L. d. Marés, fases principais da Lua e bebês. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 20, n. 1, p. 10–29, 2003. Publisher: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). (document), 2.1

SILVEIRA, F. L. da. As variações dos intervalos de tempo entre as fases principais da lua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 23, p. 300–307, 2001. 3.3.3.2

SIMAV, M. et al. Sea level variability at Antalya and Menteş tide gauges in Turkey: Atmospheric, steric and land motion contributions. *Studia Geophysica et Geodaetica*, v. 56, n. 1, p. 215–230, 2012. ISSN 00393169. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84857641944&doi=10.1007%2Ffs11200-010-0067-x&partnerID=40&md5=f3c850f463971b89f2a78c5211ab936c>). 3.1.1, 3.1.5, 3.2.1

SLATER, J. A.; MALYS, S. Wgs 84—past, present and future. In: *Advances in positioning and reference frames*. [S.l.]: Springer, 1998. p. 1–7. 2.2.1.2

SOUSA, T. d. S. et al. Análise temporal de variáveis climatológicas: uma abordagem com janelas deslizantes. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 37, n. 21, p. 493–531, out. 2025. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/19309>. 2.3.7

SOUSA, T. da S. et al. Análise temporal de variáveis climatológicas: uma abordagem com janelas deslizantes. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 37, p. 493–531, 2025. 3.3.3.4

SOUZA, L. M. de; DALAZOANA, R.; SANTANA, T. A. Estimates of average mean dynamic topography on the brazilian coast using satellite altimetry; estimativas da topografia do nível médio do mar na costa brasileira por meio da altimetria por satélites. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 11, n. 1, p. 922 – 935, 2025. Cited by: 0; All Open Access; Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105007448204&doi=10.21680%2F2447-3359.2025v11n1ID38308&partnerID=40&md5=5f531d703de8ffc464afba47fdd2c0e6>. 2.1.3.2

SRINIVASAN, B.; SPINNER, T.; RENGASWAMY, R. Control loop performance assessment using detrended fluctuation analysis (dfa). *Automatica*, v. 48, n. 7, p. 1359 – 1363, 2012. Cited by: 67. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84862863222&doi=10.1016%2Fj.automatica.2012.04.003&partnerID=40&md5=075309145b13910acc2fc3032ed91b44>. 2.3.4

STAMMER, D. et al. Causes for contemporary regional sea level changes. *Annual review of marine science*, Annual Reviews, v. 5, n. 1, p. 21–46, 2013. 3.3.3.4, 3.3.3.4, 3.3.4

STANISLAWCZYK, I.; KOWALSKA, B.; MYKITA, M. Low sea level occurrence of the southern baltic sea coast. In: . [s.n.], 2009. p. 473 ? 478. ISBN 978-041580479-0. Cited by: 0; Conference name: 8th International Navigational Symposium on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Trans-Nav 2009; Conference date: 17 June 2009 through 19 June 2009; Conference code: 89354. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84859884194&partnerID=40&md5=0de716d15b108a38b3d775de4b7aecfb>. 3.2.2.2

STRUB, P. T. Coastal ocean circulation off western south america. *The global coastal ocean. Regional studies and syntheses*, Wiley, p. 273–315, 1998. 3.3.4

SUTAWIDJAYA, A. H.; NAWANGSARI, L. C.; NOR, N. M. Life cycle assessment: Study linkage between environment supply chain management and sustainability of supply chain. *Uncertain Supply Chain Management*, Growing Science, v. 9, n. 1, p. 179 ? 186, 2021. ISSN 22916822. Cited by: 4; All Open Access, Gold Open Access. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85098681689&doi=10.5267%2Fj.uscm.2020.10.003&partnerID=40&md5=00613b1992988d090168b599f7079a44>. 3.3.1

TOCHO, C. N.; ANTOKOLETZ, E. D.; PIÑÓN, D. A. Towards the realization of the international height reference frame (ihrf) in argentina. In: . [S.l.]: Springer, 2020. 1

TOMČALA, J. Acceleration of time series entropy algorithms. *The Journal of Supercomputing*, Springer Science and Business Media LLC, v. 75, n. 3, p. 1692–1711, 2018. ISSN 1573-0484. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-018-2657-2>. 2.3.2, 3.3.2.3, 3.3.3.2

- TOMČALA, J. *TSEntropies: Time Series Entropies*. 2018. <https://CRAN.R-project.org/package=TSEntropies>. R package version 0.9. 3.8
- TOMČALA, J. *Real Time Series Analysis in Terms of Predictability, Entropy, and Chaos*. Tese (Tese de Doutorado) — VŠB – Technical University of Ostrava, Ostrava, Czech Republic, may 2021. 2.3.2, 3.3.2.3, 3.3.3.2
- TORGE, W.; MÜLLER, J. Geodesy. In: *Geodesy*. [S.l.]: de Gruyter, 2012. 2.1.2, 3.3.1
- TORRES, R.; TSIMPLIS, M. Sea-level trends and interannual variability in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 118, n. 6, p. 2934–2947, 2013. ISSN 21699291. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84882801607&doi=10.1002%2fjgrc.20229&partnerID=40&md5=4d0b5bf2cdab263afdf16bc815998b4a>. 3.1.4
- TRIOLA, M. *Introdu o Estat stica*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros T cnicos e Cient ficos, 2008. 3.2.2.2
- TSIMPLIS, M. et al. Multi-decadal sea level trends and land movements in the Mediterranean Sea with estimates of factors perturbing tide gauge data and cumulative uncertainties. *Global and Planetary Change*, v. 76, n. 1-2, p. 63–76, 2011. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79952313456&doi=10.1016%2fj.gloplacha.2010.12.002&partnerID=40&md5=1f739de945b1c121765cc6f318fe9929>. 3.1.1, 3.1.3.2, 3.1.4, 3.1.5, 3.2.1, 3.2.4, 3.3.1
- TYLER, R. H. A century of tidal variability in the north pacific extracted from hourly geomagnetic observatory measurements at honolulu. *Geophysical Research Letters*, John Wiley and Sons Inc, v. 48, n. 20, 2021. ISSN 00948276. Cited by: 4. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85118270821&doi=10.1029%2f2021GL094435&partnerID=40&md5=bd2138879f44966421b18afcb0fc62af>. 3.3.1
- VARONA, H. et al. Amazon river plume influence on western tropical atlantic dynamic variability. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Elsevier, v. 85, p. 1–15, 2019. 3.3.4
- VAROTSOS, C. et al. On the Impacts of the Global Sea Level Dynamics. *Fractal and Fractional*, v. 8, n. 1, p. 39, jan. 2024. ISSN 2504-3110. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3110/8/1/39>. 3.2.3.2
- VERMEER, M.; RAHMSTORF, S. Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 51, p. 21527–21532, 2009. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0907765106>. 3.3.1, 3.3.2.3
- VIGNUDELLI, S. et al. Sea level trends and variability in the adriatic sea and around venice. In: . [s.n.], 2020. v. 150, p. 65 ? 74. Cited by: 5. Disponível em: [https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074168150&doi=10.1007%2f1345\\_2018\\_51&partnerID=40&md5=3780766535fece2adc2913821a71f0b4](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074168150&doi=10.1007%2f1345_2018_51&partnerID=40&md5=3780766535fece2adc2913821a71f0b4). 2.3.6, 3.3.2.3
- WANG, G.-J. et al. Random matrix theory analysis of cross-correlations in the US stock market: Evidence from Pearson’s correlation coefficient and detrended cross-correlation coefficient. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, v. 392, n. 17, p. 3715–3730, 2013. Publisher: Elsevier. 2.3.6
- WATSON, P. Updated mean sea-level analysis: South Korea. *Journal of Coastal Research*, v. 35, n. 2, p. 241–250, 2019. ISSN 07490208. Publisher: Coastal Education Research Foundation Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?e>

id=2-s2.0-85062869902&doi=10.2112%2fJCOASTRES-D-18-00138.1&partnerID=40&md5=a60ed3de27c132efb16bac68c70a8daf). 2.2, 3.1.4, 3.1.5

WOODWORTH, P. L. et al. Forcing factors affecting sea level changes at the coast. *Surveys in Geophysics*, Springer, v. 40, n. 6, p. 1351–1397, 2019. 3.3.4

WÖPPELMANN, G. et al. Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. *Geophysical Research Letters*, v. 36, n. 12, 2009. 3.3.3.4, 3.3.3.4

WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M. Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v. 54, n. 1, p. 64–92, 2016. 2.2.2

WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M. Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 117, n. 1, 2012. ISSN 21699291. Publisher: Blackwell Publishing Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84855697031&doi=10.1029%2f2011JC007469&partnerID=40&md5=fa2e97c9f81675466c42032c4fd6e1bb>. 2.2, 3.1.3.1, 3.1.4

WÖPPELMANN, G.; TESTUT, L.; CRÉACH, R. The rise in ocean level by tide gauges and spatial geodesy: French contributions to a global problem [La montée du niveau des océans par marégraphie et géodésie spatiale: Contributions françaises á une problématique mondiale]. *Annales Hydrographiques*, v. 7, n. 777, 2011. ISSN 03733629. Publisher: Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84902385930&partnerID=40&md5=5736519a0236438b57abef529c13e43a>. 2.2

XU, L.; SONG, G.-H.; GUO, W.-W. Multifractal analysis on stock style asset returns based on sliding windows mf-dfa. *Xitong Gongcheng Lilun yu Shijian/System Engineering Theory and Practice*, v. 32, n. 9, p. 1891 ? 1899, 2012. ISSN 10006788. Cited by: 3. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84869121354&partnerID=40&md5=16d4dc325b073ac8fe4cd1758b3f8882>. 2.3.4.1, 3.2.1

YANG, L.; FRANCIS, O. Sea-level rise and vertical land motion on the Islands of Oahu and Hawaii, Hawaii. *Advances in Space Research*, v. 64, n. 11, p. 2221–2232, 2019. ISSN 02731177. Publisher: Elsevier Ltd. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85072191031&doi=10.1016%2fj.asr.2019.08.028&partnerID=40&md5=d993852d923e486c4c9028f209886a7c>. 3.1.4

YANG, Y. et al. Multiscale Analysis and Prediction of Sea Level in the Northern South China Sea Based on Tide Gauge and Satellite Data. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 6, p. 1203, jun. 2023. ISSN 2077-1312. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/6/1203>. 3.2.3.2

YUAN, Y.; XU, Y. et al. Flooding hazards and potential risks due to heavy rain and sea level change in shanghai, china. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, v. 48, n. 1, p. 102–108, 2017. 3.3.3.4

ZEBENDE, G. et al.  $\rho$ dcca applied between air temperature and relative humidity: An hour/hour view. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 494, p. 17–26, 2018. 2.3.6, 3.3.1

- ZEBENDE, G.; FILHO, A. D. S. Detrended Multiple Cross-Correlation Coefficient. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 510, p. 91–97, nov. 2018. ISSN 03784371. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437118308410>. 2.3.7, 2.2, 3.3.1, 3.3.2.3, 3.6
- ZEBENDE, G.; FILHO, A. M. Cross-correlation between time series of vehicles and passengers. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 388, n. 23, p. 4863–4866, dez. 2009. ISSN 03784371. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378437109006074>. 2.3.5
- ZEBENDE, G.; SILVA, M. D.; FILHO, A. M. Dcca cross-correlation coefficient differentiation: Theoretical and practical approaches. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 392, n. 8, p. 1756–1761, 2013. 2.3.6, 3.3.1
- ZEBENDE, G. F. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A*, v. 390, p. 614–618, 2011. 2.3.6, 3.3.1, 3.3.2.3
- ZEBENDE, G. F.; FERNANDEZ, B. F.; PEREIRA, M. G. Analysis of the variability in the sdB star KIC 10670103: DFA approach. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 464, n. 3, p. 2638–2642, jan. 2017. ISSN 0035-8711, 1365-2966. Disponível em: <https://academic.oup.com/mnras/article-lookup/doi/10.1093/mnras/stw2611>. 2.3.4, 3.2.2.3
- ZHAI, W. et al. Measurement of the sea surface using a GPS towing-body in Wanshan area. *Acta Oceanologica Sinica*, v. 39, n. 5, p. 123–132, 2020. ISSN 0253505X. Publisher: Springer Verlag. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85086101390&doi=10.1007%2fs13131-020-1599-8&partnerID=40&md5=6b41686c18c126364de9c2ef68ecebeb>. 2.2, 3.1.4
- ZHANG, S.; FANG, W. Multifractal behaviors of stock indices and their ability to improve forecasting in a volatility clustering period. *Entropy*, v. 23, n. 8, 2021. ISSN 10994300. Publisher: MDPI AG. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112375257&doi=10.3390%2fe23081018&partnerID=40&md5=b2874529e8a5dc6c16c8c2316774f0ae>. 2.3.4.1, 3.2.1
- ZHAO, J. et al. Detrended cross-correlation analysis of epilepsy electroencephalogram singals. *Advanced Materials Research*, v. 765-767, p. 2664 – 2667, 2013. Cited by: 7. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84885025987&doi=10.4028%2Fwww.scientific.net%2FAMR.765-767.2664&partnerID=40&md5=44fa693c3cac0fe653f8c7dc71427a48>. 2.3.5
- ZHAO, X.; SHANG, P.; HUANG, J. Several fundamental properties of DCCA cross-correlation coefficient. *Fractals*, v. 25, n. 02, p. 1750017, 2017. Publisher: World Scientific. 2.3.6
- ZHOU, X. et al. Rates of natural subsidence along the texas coast derived from gps and tide gauge measurements (1904-2020). *Journal of Surveying Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 147, n. 4, 2021. ISSN 07339453. Cited by: 24. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85111599064&doi=10.1061%2f%28ASCE%29SU.1943-5428.0000371&partnerID=40&md5=2a0693c55ba19607073bdf37071326c6>. 3.3.1, 3.3.2.3
- ZHOU, Y.; LEUNG, Y. F. Multifractal temporally weighted detrended fluctuation analysis and its application in the analysis of scaling behavior in temperature series.

*Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, v. 2010, n. 6, 2010. Cited by: 57. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77954169131&doi=10.1088%2F1742-5468%2F2010%2F06%2FP06021&partnerID=40&md5=d2ec57884a40032ee0bb8e1f0fd8ee03>. 2.3.4

ZOU, F. et al. The Sea-Level Changes in Hong Kong from Tide-Gauge Records and Remote Sensing Observations over the Last Seven Decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 14, p. 6777–6791, 2021. ISSN 19391404. Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85110701454&doi=10.1109%2FJSTARS.2021.3087263&partnerID=40&md5=d6daee12f958312a96a0ff85f7721364>. 3.1.4

*Modelagem Espaço Temporal de Variáveis Altimétricas e Climatológicas em Estações  
Maregráficas do Litoral Brasileiro: Uma Abordagem Estatística e Computacional*

Nilton de Souza Ribas Júnior

Feira de Santana, BA, Novembro de 2025.