

Victor Cesar Martins de Aguiar

Variabilidade Temporal de Ressacas na Plataforma Continental Sudeste

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto Oceanográfico da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de Bacharel
em Oceanografia.

Área de Concentração: Oceanografia Física

Orientador: Prof. Dr. Belmiro Mendes de
Castro Filho

São Paulo
2018

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Victor Cesar Martins de Aguiar

Variabilidade Temporal de Ressacas na Plataforma Continental
Sudeste

Novembro, 2018

Nome: Victor Cesar Martins de Aguiar

Título: Variabilidade Temporal de Ressacas na Plataforma Continental Sudeste

Monografia apresentada ao Instituto
Oceanográfico da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Bacharel em Oceanografia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Inúmeros são os agradecimentos às pessoas que de alguma maneira contribuíram para a elaboração deste trabalho. Faço questão de agradecer especialmente: À minha família, Irani, Eduardo e Diego, em primeiro lugar, por toda a luta e suporte durante todos esses anos de estudos. À minha avó paterna Luzia e meu avô paterno José, por todo apoio e ensinamentos. Incluo também aqui minha companheira, Mari Vanharanta, pelo seu carinho, compreensão e incentivo. Sem vocês eu com certeza não estaria redigindo hoje este documento. Dedico este trabalho também à minha avó materna, Ivany Tereza, que infelizmente realizou sua passagem sem que pudesse me ver formado. Você sempre me acompanhará.

Ao meu orientador, Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho, pela orientação e apoio científico ao longo dos quatro anos em que fui seu orientando. Seu conhecimento é minha inspiração.

Ao Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira, por todo o conhecimento, amizade e dedicação compartilhada comigo durante minha formação. Muito obrigado.

De modo semelhante, agradeço também os professores Dr. Ricardo de Camargo, Dr. Paulo Polito, Dr. Marcelo Dottori e Dr. Joseph Harari por todo auxílio e atenção durante meus anos como estudante de graduação. O amor e dedicação de vocês à ciência me motiva sempre a me construir.

Aos meus amigos da Turma XIII, em especial Daniel, Giovana, Pedro, Elias, Thales, Cristian, Douglas, Marcelo, Larissa e Vanessa. Sem vocês essa jornada teria sido muito mais árdua.

Aos meus colegas do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira, Danilo Silva, Carine Costa, Paulo Victor, Dalton Sasaki, José Roberto, Paula Birocchi, Juliana Mancio e Guilherme Seki pelas inúmeras contribuições científicas e pessoais, amizade e companheirismo ao longo desses anos.

Aos meus novos, mas valiosos colegas, Luana Borato e Ricardo Campos, por todas as discussões científicas, indicações de trabalhos e contribuições. Espero que possamos nos encontrar ao longo de nossas carreiras.

À todos os professores e funcionários do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo pela construção do meu conhecimento.

Aos meus amigos de São Paulo e Fortaleza. Em especial Eduardo Kozonoe, Pedro Henrique, Mardjorye Wignna, Jacqueline Simões e Renato Romano. Vocês certamente fazem parte deste trabalho também.

The Earth is the only world known so far to harbor life. There is nowhere else, at least in the near future, to which our species could migrate. Visit, yes. Settle, not yet. Like it or not, for the moment the Earth is where we make our stand.

Carl Sagan, *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Hipótese Científica e Objetivo	7
2	Dados e Métodos	8
2.1	Dados	8
2.2	Métodos	9
2.2.1	Edição de Dados	9
2.2.1.1	Reamostragem (<i>resampling</i>)	9
2.2.1.2	Preenchimento de <i>gaps</i>	9
2.2.1.3	Detecção e Correção de Valores Discrepantes	14
2.2.2	Análise de Séries Temporais	14
2.2.2.1	Análise Harmônica	14
2.2.2.2	Filtragem	15
2.2.2.3	Identificação dos Eventos de Maré Meteorológica Significativos	17
2.2.2.4	Identificação dos Eventos de Ressaca	18
2.2.2.5	Frequência e Elevação Máxima	18
2.2.2.6	Variabilidade e Tendência de Eventos	18
2.2.2.7	Intensidade e o Papel das Componentes	19
3	Resultados	21
3.1	Variabilidade Interanual	21
3.1.1	Frequência	21
3.1.2	Duração	24
3.1.3	Elevação Máxima	29
3.2	Variabilidade Sazonal	34
3.2.1	Frequência	34
3.2.2	Duração	35
3.2.3	Máxima Elevação	36
3.3	Período 1965 - 1980	37
3.4	Intensidade das Ressacas e o Papel de cada Componente	40
4	Discussão	43
5	Conclusões	54
6	Referências	57

Lista de Figuras

1	Série de nível do mar reproduzida com os dados horários da estação de Cananéia no ano de 1955. O painel superior ilustra a maré prevista, no painel intermediário o sinal observado e no painel inferior a diferença entre o intermediário e o superior, chamado de resíduo.	1
2	Região da Plataforma Continental Sudeste, onde a batimetria local é representada pelo mapa de cores tal que profundidade inferiores a 180 metros foram mascaradas com coloração homogênea azul. As linhas cheias negras representam as isóbatas de 50, 100 e 180 metros e cada símbolo representa uma estação maregráfica, sendo, de sul para norte, respectivamente: Cananéia, Santos, Ilha Fiscal.	2
3	Duração das séries de elevação do nível do mar em Ilha Fiscal (48 anos), Santos (46 anos) e Cananéia (52 anos).	8
4	Ondas senoides com frequências, fases e durações iguais, mas com amplitudes distintas. A curva laranja possui 15 unidades de amplitude e a azul 10.	11
5	Séries observadas com <i>gaps</i> inseridos artificialmente (painéis superiores) e comparação entre dados dos mesmos períodos das lacunas - linhas cheias esverdeadas - e seus respectivos modelos obtidos por previsão via SSA (<i>Forecast</i>) - linhas cheias rosáceas - (painéis inferiores). O Skill obtido é exibido no canto inferior direito de cada painel inferior. . . .	12
6	Espectros de amplitude do nível do mar observado (a) e previsto (b).	15
7	Espectros de amplitude da série observada de Santos antes (a) e depois (b) da aplicação do filtro.	16
8	Frequência relativa de elevações, em metros, referente à série filtrada de Santos. Linhas pretas tracejadas demarcam o valor de elevação residual igual a dois desvios padrões e o gradiente de cores representa a alteração de valores médios (região central - cor azul) para valores extremos (regiões caudais - cor vermelha).	17
9	Distribuição anual do número de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; as barras horizontais representam as médias do número de eventos de cada série: 3,94 eventos, 3,48 eventos e 2,46 eventos, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhada representam as retas de tendência linear ajustadas.	23
10	Distribuição anual de duração máxima de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; a barra horizontal representa a média de eventos: 38,2 horas, 40,2 horas e 41,75 horas, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhadas representam as retas de tendência linear ajustadas.	26
11	Distribuição anual de duração média de ressacas, em horas, em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; a barra horizontal representa a média de eventos: 23,96 horas, 26,47 horas e 29,67 horas, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhada representam as retas de tendência linear ajustadas.	28
12	Distribuição anual de elevação máxima, em metros, de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal. A barra horizontal representa a média de eventos: 1,02 m, 1,06 m e 0,76 m, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhadas representam as retas de tendência linear ajustadas.	31
13	Maré meteorológica do evento de ressaca do dia 14/04/1972, quando tal evento foi detectado primeiramente em Santos e depois em Cananéia. A defasagem de tempo entre as máximas elevações é de 31 horas e a máxima correlação entre o sinal de Cananéia e Santos (0,53) foi em 28 horas. Os sinais preto, amarelo e vermelho representam o sinal filtrado de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente.	39

14	Curvas de máxima correlação com <i>lag</i> encontradas para as estações de Cananéia e Santos (curva vermelha), Santos e Ilha Fiscal (curva rosácea) e entre Cananéia e Ilha Fiscal (curva amarela). Os pontos de correlação máxima são representados em suas respectivas curvas, onde, para Cananéia e Santos a correlação máxima (0,86) ocorreu em -4 horas (sinal verde), a correlação máxima entre Santos e Ilha Fiscal (0,71) ocorreu em -16 horas (sinal rosa) e a correlação máxima entre Cananéia e Ilha Fiscal (0,72) ocorreu em -20 horas (sinal preto). O sinal negativo indica o sentido de deslocamento do sinal da segunda curva com relação à primeira.	40
15	Estimativa de energia total (J) de ressacas (Obs. - linha cheia vermelha), da maré meteorológica significativa (Maré Meteo. - linha cheia amarela) e astronômica (Maré Astro. - linha cheia verde) associadas aos eventos, e a soma das duas (MM + MA), em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal.	41
16	Gráficos de dispersão entre energia [J] e duração [horas], coluna à esquerda, e entre energia total e máxima elevação [m], coluna à direita, para as estações de Cananéia (linha superior), Santos (linha intermediária) e Ilha Fiscal (linha inferior).	42
17	Espectro de amplitude [m] obtido através da diferença entre <i>high</i> e a maré astronômica. .	52

Lista de Tabelas

1	Comparação entre diferentes períodos considerados na Análise Espectral Singular (SSA)	13
2	Número de marés meteorológicas significativas durante todo o período de amostragem (MM), potenciais eventos de ressaca (PE), ressacas definidas segundo a metodologia (RR) e a relação entre RR e MM para as séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	21
3	Análise de tendência de frequência de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para: o coeficiente angular (eventos ano ⁻¹), a margem de erro e o nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do <i>gap</i> e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05	24
4	Duração máxima (D*), duração mínima (D'), duração média (\bar{D}) e desvio padrão (σ), em horas, das séries de duração para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	24
5	Análise de tendência para a duração máxima, em horas, de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: o coeficiente angular (horas ano ⁻¹), margem de erro e o nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do <i>gap</i> e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05	27
6	Análise de tendência para a duração média anual, em horas, de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: coeficiente angular (horas ano ⁻¹), margem de erro e nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do <i>gap</i> e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05.	29
7	Elevação máxima superior (E*), elevação máxima mínima (E'), elevação máxima média (\bar{E}^*) e desvio padrão (σ), em metros, das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	29
8	Análise de tendência de elevação máxima de ressacas, em metros, nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: coeficiente angular (m ano ⁻¹), margem de erro e nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do <i>gap</i> e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05	32
9	Número de eventos, duração média (\bar{D}), em horas, e elevação máxima média (\bar{E}^*), em metros, de ressacas observadas em cada fase do ENSO: neutra, <i>El Niño</i> e <i>La Niña</i> , nas estações de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	32
10	Distribuição sazonal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para as estações de primavera, verão, outono e inverno.	34
11	Distribuição mensal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	34
12	Distribuição sazonal de duração máxima de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	35
13	Distribuição mensal da duração máxima de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	35
14	Distribuição sazonal de duração média de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	36
15	Distribuição mensal da duração média de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	36
16	Variabilidade sazonal de elevação máxima de ressacas, em metros, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	36
17	Distribuição mensal de elevação máxima de ressacas, em metros, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.	37
18	Duração média (\bar{D}), em horas, e elevação máxima média (\bar{E}^*), em metros, para eventos observados exclusivamente nas estações (Exclus.), no eixo Cananéia - Santos (CS) e em todas as estações (CSI).	38
19	Variabilidade sazonal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para as estações de Primavera, Verão, outono e Inverno entre o período de 1965 e 1980. Estes eventos são exclusivos de cada estação.	38

20	Média estimada da energia total dos eventos de ressaca (ETM (J)), porcentagem média da contribuição de marés meteorológicas significativas (% MM), porcentagem média da contribuição da maré astronômica (% MA), e a soma de ambas (% MM + % MA), relativas à ETM (J).	40
----	--	----

Resumo

A região sul - sudeste brasileira é historicamente impactada por eventos de ressaca, desde seu suposto primeiro registro, em 1541, até os dias atuais. Empregando método de identificação objetivo, este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade temporal dos eventos de ressaca, mais especificamente sua frequência, duração e máxima elevação em escala interanual e sazonal, além de investigar também a tendência dos mesmos. Para isto, foram empregadas três séries históricas de elevação do nível do mar obtidas em estações ao longo da Plataforma Continental Sudeste (Cananéia, Santos e Ubatuba), abrangendo o período entre de 1945 a 2013. Definindo ressaca como a composição construtiva entre marés meteorológicas e preamares de maré de sizígia, identificou-se alta variabilidade de eventos, sendo estes predominantes, mais duradouros e com elevações superiores no outono e inverno, sendo os meses de abril a julho os mais significativos. Além disso, 90% dos eventos mais expressivos das séries ocorreram sob influência de *El Niño* e *La Niña*. A análise de tendência linear indicou um aumento da frequência, máxima elevação e duração apenas na estação de Cananéia, os quais parecem estar associados à elevação do nível médio do mar na região. Além da variabilidade temporal observada, os resultados também apontaram variabilidade espacial dos eventos, sendo a frequência e máxima elevação superiores na porção sul e duração superior na estação mais ao norte. Por último, mais de 60% da energia das ressacas é originada por marés meteorológicas e os eventos mais intensos apresentaram maior correlação com a duração das ressacas do que com a máxima elevação observada.

Descritores: ressaca, variabilidade, maré meteorológica, PCSE

Abstract

Southern - southeastern Brazilian region is historically damaged by storm tide events, since its first possible report, in 1541, until the present days. Applying an objective method of identification, this work aims to analyze storm tides' temporal variability, specifically its frequency, duration and maximum height. For that, it was used three sea level historical series from tide gauges located along the South Brazil Bight (Cananéia, Santos and Ilha Fiscal), which cover the period between 1945 and 2013. Defining storm tide as the constructive composition between storm surge and high level spring tide, it was found that such events present high interannual variability, but a clear seasonal pattern, being more frequent, lasting more and reaching greater levels during autumn and winter, specially along April and July. Furthermore, 90% of extreme active years occurred during *El Niño* and *La Niña* periods. Trend analysis revealed the increasing of events, duration and maximum height on Cananéia station, which is possibly due to the mean sea level rise observed in the region. Besides the temporal variability, spatial variability was also observed, which presented higher frequency and maximum height in southern stations whereas storm tides lasted more in the northern region. Lastly, it was found that more than 60% of storm tides total energy is composed by storm surge energy, and it is higher as longer the event.

Keywords: storm tide, variability, storm surge, SBB

1 Introdução

As oscilações maregráficas e submaregráficas da superfície do mar nas regiões costeiras são devidas, principalmente, à composição de dois processos físicos que têm origens diferentes. Primeiro, as oscilações periódicas, determinísticas, geradas por forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol, conhecidas como marés. O segundo tem origem nos processos de interação oceano-atmosfera e gera oscilações não periódicas. Essa composição abrange diferentes escalas temporais devido à variação espectral do segundo processo.

Na Figura 1, por exemplo, há a representação da oscilação do nível do mar relativo em Cananéia, litoral sul de São Paulo. Nesta, o painel superior exibe a variação devido à maré prevista, ou seja, considerando somente o papel das forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol. Em seguida, no painel intermediário, é exibido o sinal observado das oscilações do nível do mar. E por último, no painel inferior, está representada a componente residual, *i.e.*, não-astronômica em sua totalidade, em geral originada a partir dos processos de interação oceano-atmosfera.

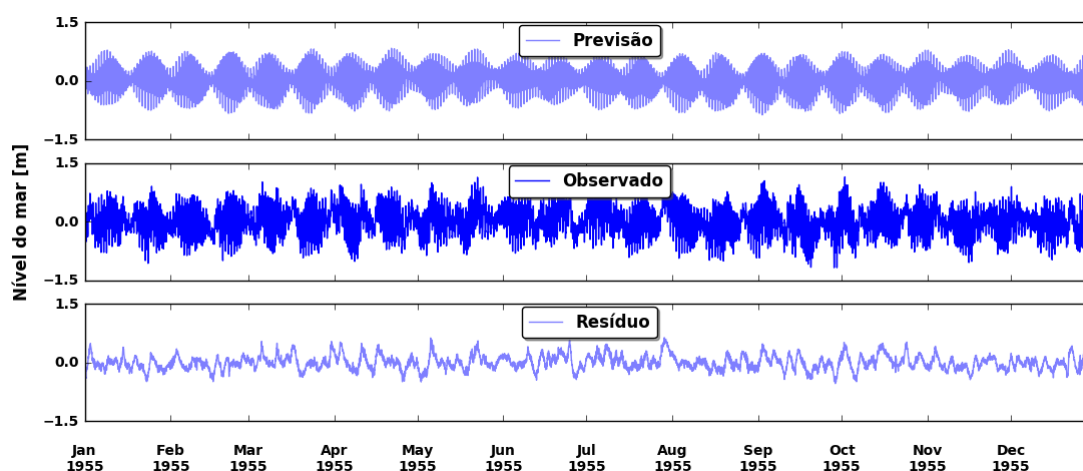


Figura 1: Série de nível do mar reproduzida com os dados horários da estação de Cananéia no ano de 1955. O painel superior ilustra a maré prevista, no painel intermediário o sinal observado e no painel inferior a diferença entre o intermediário e o superior, chamado de resíduo.

Inserir-se neste contexto o fenômeno amplamente conhecido por ressaca. No dicionário Caldas Aulete tal termo é apresentado como: "*Forte movimento das ondas do mar ao se chocarem contra o litoral*". Para a sociedade em geral, ressaca é associada a eventos de grandes ondas, mar bravio e condições de mau-tempo que causam destruição da orla, inundações costeiras e interrupção do tráfego marítimo. Logo, a definição apresentada por Caldas Aulete condiz com a visão pública sobre o fenômeno.

Sob a óptica da segurança pública, pode-se dizer que a difusão deste termo é de grande valia, tendo em vista que um alerta de ressaca emitido pelas autoridades competentes é entendido de igual forma pelos cidadãos. Entretanto, justamente por seu uso disseminado, grandes desinformações podem ser levadas adiante, como um caso vivenciado por esse autor após a ressaca observada ao longo da costa sudeste brasileira entre os dias 29 e 30 de outubro de 2016. Em uma conversa informal com um guarda-vidas no município costeiro de Peruíbe, em São Paulo, o mesmo relatou que a ressaca presenciada seria uma resposta do oceano frente à alteração do eixo de rotação da Terra devido a um evento de superlua ocorrido dias atrás.

Já com relação à comunidade científica, o uso do termo ressaca não apresenta um consenso amplo. Há a vertente que considera como ressaca o fenômeno como descrito pelo verbete do dicionário previamente citado, isto é, considerando o papel de ondas (p. ex. Melo ^{F01}), existe também o grupo que emprega o termo como sinônimo de *storm surge* (e.g. Camargo *et al.*²) e ainda há aquele que o considera como uma tradução do termo *storm tide*, descrito pela *National Oceanic and Atmospheric Administration*.

Doravante, será adotada a última interpretação que, sob este ponto de vista, em suma, define ressaca como a composição construtiva entre elevações da superfície do mar oriundas da interação oceano-atmosfera, conhecidas também por "marés meteorológicas", que neste trabalho possui o mesmo significado de *storm surge*, e elevações por marés de grandes amplitudes (sizígia). Em outras palavras, considera-se que eventos de ressacas ocorram quando há coincidência de ventos que promovam o empilhamento de água junto à costa e a preamar de marés de sizígia.

A Plataforma Continental Sudeste (PCSE) é a área de estudo deste trabalho. Situada na costa sudeste brasileira, é limitada ao norte por Cabo Frio (22,9°S), localizado no estado do Rio de Janeiro, e ao sul pelo Cabo de Santa Marta (28,6°S), no estado de Santa Catarina. Este embaixamento apresenta um formato característico de Lua Crescente, cuja largura varia entre 70 km nas regiões distais e 200 km na porção central. A topografia de fundo é relativamente suave, com isóbatas seguindo aproximadamente a linha de costa e a quebra da plataforma variando entre 150 e 180 m de profundidade³ (Figura 2).

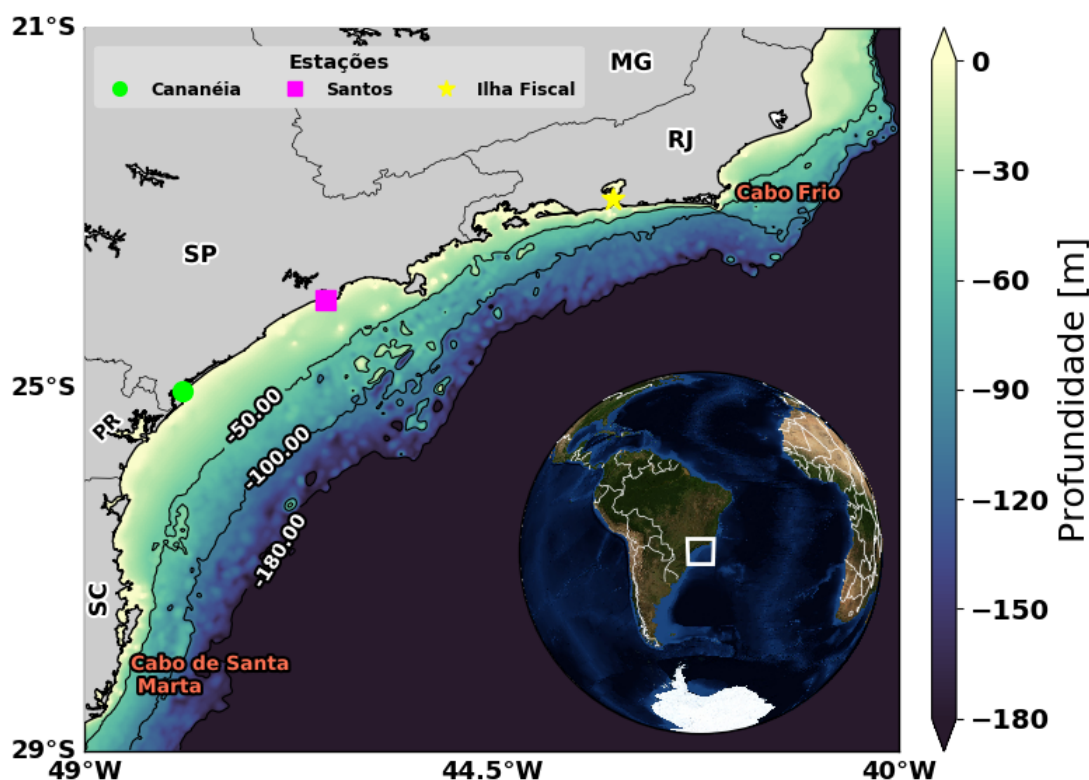


Figura 2: Região da Plataforma Continental Sudeste, onde a batimetria local é representada pelo mapa de cores tal que profundidade inferiores a 180 metros foram mascaradas com coloração homogênea azul. As linhas cheias negras representam as isóbatas de 50, 100 e 180 metros e cada símbolo representa uma estação mareográfica, sendo, de sul para norte, respectivamente: Cananéia, Santos, Ilha Fiscal.

Dos quatro estados brasileiros que margeiam a PCSE, o Estado de Santa Catarina (SC) é aquele que está localizado na porção mais meridional da área de estudo. Contando com 38 municípios costeiros, segundo o censo realizado em 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população catarinense litorânea é estimada em 2 milhões e 430 mil habitantes (cerca de 39 % da população estadual). Em seguida, ao norte de SC, há o Estado do Paraná (PR). Com 7 municípios costeiros, a zona litorânea conta com uma população de duzentos e sessenta e cinco mil habitantes, perfazendo um total de, aproximadamente 2.5 % da população do estado. Em seguida, o Estado de São Paulo (SP) apresenta, ao longo de sua costa, um total de 16 municípios costeiros que, somados, representam uma população de aproximadamente dois milhões e duzentos mil habitantes, isto é, aproximadamente 5% da população do estado. Por último, Rio de Janeiro (RJ), o Estado localizado na porção mais setentrional da PCSE, apresenta quase dez milhões de pessoas vivendo na região costeira, o equivalente à aproximadamente

65% da população do estado. Dessa forma, torna-se evidente que eventos energéticos como as ressacas podem impactar um número expressivo de cidadãos da PCSE.

É fato sabido que a zona costeira brasileira apresentou, e ainda apresenta, um papel deveras significativo no processo histórico de formação nacional, seja como a porta de entrada para a armada cabralina em 1500, bem como a criação das primeiras vilas, no desenvolvimento econômico e até no estabelecimento da família Real portuguesa em território além-mar. Consequentemente, a relação sociedade - mar é simultânea ao processo de ocupação litorânea, não somente no que se refere à pesca e navegação, mas também no que concerne aos impactos naturais causados do segundo sobre o primeiro.

Neste tocante, data-se de 1541 o registro mais antigo nacional conhecido de um evento altamente energético que se abateu sobre uma região costeira, a Vila de São Vicente, e que foi reportado pela primeira vez por Frei Gaspar da Madre de Deus⁴, em 1797. Segundo o relato do beneditino:

"Para Matriz, erigiu uma igreja, com o título de Nossa Senhora da Assunção: fêz cadeia, casa do Concelho e tôdas as mais obras públicas necessárias; foi porém muito breve a duração de seus edifícios, porque tudo levou o mar."

Mais adiante o autor relata:

"No ano de 1542, já não existia a casa do Concelho e a povoação tinha se mudado para o lugar onde hoje existe, segundo consta de alguns termos de Vereações dêsse tempo, nos quais acho que os Camaristas se congregaram na Igreja de Nossa Senhora da Praia em 1 de janeiro..."

Ambos trechos anteriores, retirados da obra do frei, não deixam dúvidas que um evento devastador ocorreu sobre a Vila de São Vicente. Tal ocorrido é abordado quase 200 anos depois pelo historiador Mário Neme⁵ ao discorrer sobre a decadência de S. Vicente e o progresso de Santos :

"Em fins de 1541 verifica-se a destruição pelas águas do mar de diversas construções da vila, entre as quais, com toda certeza, a conhecida 'casa de pedra' ou fortaleza, da qual não se volta mais a falar e não é encontrada dez anos depois por Tomé de Sousa, quando visita a capitania de São Vicente."

Posteriormente, o mesmo historiador supõe que a destruição da vila teria ocorrido devido à ação de um "maremoto". Entretanto, como apontado pelo geólogo e professor aposentado pela Universidade de Brasília, José Alberto Vivas Veloso, não há nenhum registro histórico que mencione a percepção de qualquer tremor de terra. Por conseguinte, o autor propõe que a razão mais provável de tal destruição tenha sido um evento de ressaca intenso⁶. Para o mesmo, é plausível que esse tenha sido o agente destrutivo, tendo em vista que a vila, que abrigava cerca de 150 habitantes e possuía majoritariamente construções não mais avançadas que cabanas de pau a pique, era muito vulnerável a eventos como os de ressaca.

Dos casos atuais, o mais emblemático da influência de ressacas sobre as cidades litorâneas do sudeste foram os eventos ocorridos na ciclovia Tim Maia, entre os bairros de São Conrado e a Barra da Tijuca, na zona sul do RJ. Além dos dois desabamentos, um em 2016, que culminou com a morte de duas pessoas, e outro em 2018, a ciclovia é constantemente interditada. Já na cidade de Santos, apesar dos eventos recentes não registrarem vítimas, há prejuízos financeiros tanto para o setor público quanto privado. Além das perdas causadas pelas avarias nas construções junto à orla, há também aquelas associadas à interrupção do tráfego marinho, especialmente com relação à atividade portuária. Como exemplo, o periódico *A Tribuna* relatou que, devido a um evento de ressaca em abril de 2016, o tráfego no canal de navegação do Porto de Santos foi paralisado por mais de trinta horas causando, assim, um prejuízo superior a US\$ 1 milhão.

Para se compreender cientificamente como esses fenômenos são formados, é necessário primeiramente avaliar a resposta do nível do mar relativo frente às forças atmosféricas e astronômicas.

O nível do mar junto à costa está intimamente correlacionado com a resposta oceânica frente às forças atmosféricas. Na PCSE, por exemplo, esta resposta pode se dar como um rebaixamento do nível do mar para as condições de "tempo bom", isto é, quando os ventos sopram majoritariamente de norte - nordeste, ou como um aumento relativo do nível do mar na região costeira devido à incursão de frentes frias, quando os ventos sopram de sul - sudoeste.

No Atlântico Sul, assim como nas outras bacias oceânicas, uma feição atmosférica de grande escala e semipermanente atua na dinâmica e clima local. Denominado Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS),

este sistema apresenta variações sazonais de intensidade e posição. Por exemplo, no mês de agosto ele se encontra mais intenso (1026 mbar) e mais próximo ao continente, e, entre dezembro e abril, está deslocado para leste e menos intenso (1021 mbar)⁷. Nesta estação, os ventos do quadrante leste são predominantes, tanto pela ação do ramo oeste da ASAS sobre a PCSE quanto pela formação de uma circulação de mesoescala de brisa marinha⁸. Em ambos os casos, a atuação desses escoamentos ocasiona um rebaixamento do nível do mar junto à costa.

Por outro lado, perturbações na forma de sistemas meteorológicos frontais são uma importante fonte de energia para os fenômenos costeiros, especialmente nos estudos de variação submaregráfica do nível do mar. Em suma, sistemas frontais são causados pela propagação de ondas de Rossby na atmosfera, as quais propiciam o surgimento de centros de alta e baixa pressão próximos da superfície e também movimentos verticais caracterizados pelas diferenças de densidade do ar. Estas feições produzem deformações nos campos horizontais e verticais de vento e de temperatura que evoluem no tempo e no espaço, caracterizando a passagem destes distúrbios atmosféricos.

Utilizando dados de pressão ao nível médio do mar (PNM) e da altura geopotencial em 500 hPa dos meses de maio a agosto, entre 1960 e 2002, Escobar⁹ avaliou os padrões sinóticos associados às incursões de frentes frias sobre o estado de São Paulo. Empregando a técnica de Padrões de Sequências Principais nos dados de PNM, o autor chegou no mesmo cenário encontrado em outros trabalhos (e.g. Vera e Vigliarolo¹⁰): um anticiclone sobre a costa chilena e um ciclone sobre o Atlântico. Já a análise da primeira componente da altura geopotencial em 500 hPa revelou a presença de uma crista associada à região de alta pressão em superfície e um cavado, com eixo orientado no sentido NW - SE, com sua região central sobre o S - SE brasileiro no dia da detecção da frente fria em São Paulo.

A PCSE, por exemplo, é atingida o ano todo por frentes frias que se propagam de sul para norte, algumas vezes quase paralelamente à linha de costa, e que alteram a circulação média da seguinte maneira: (1) com a aproximação do sistema, no setor quente, a componente meridional do vento é rotacionada anticiclonicamente de nordeste para noroeste; (2) imediatamente após a passagem da frente fria, em sua retaguarda, os ventos apresentam sentido totalmente oposto ao cenário do ASAS, isto é, sopram do quadrante sul; (3) aproximadamente um dia após a incursão do sistema meteorológico os ventos voltam a apresentar o cenário semipermanente de nordeste¹¹.

De maneira contraintuitiva, a primavera é a estação do ano que mais apresenta entrada de frentes frias sobre a PCSE: em média entre 11 e 12 eventos¹². Não obstante, é durante o inverno que a componente meridional dos ventos vindos de sul é mais intensa. Além disso, Rodrigues *et al.*¹³ identificaram um período médio de 8 dias entre a passagem de duas frentes frias consecutivas.

Castro e Lee¹⁴ analisaram a resposta submaregráfica do nível do mar forçado por ventos na região da PCSE e indicaram flutuações de baixa frequência em dois períodos distintos: predominância de perturbações entre 9 e 12 dias que se propagam em direção ao equador com velocidade entre 8 a 10 m s⁻¹ e perturbações entre 6 e 7 dias, menos intensas, que também se propagam em direção ao equador, com velocidade estimada em 10 m s⁻¹ e que acompanham o deslocamento de frentes frias. Ademais, os autores apontaram que tais perturbações no nível do mar em baixas frequências podem ser explicadas a partir da teoria de Ondas de Plataforma Continental, que são geradas tanto na região de estudo quanto em porções mais ao sul da PCSE.

Como demonstrado até o momento, o nível relativo do mar na PCSE é fortemente influenciado pelas condições atmosférica regionais, especialmente de acordo com qual cenário dinâmico ocorre em um determinado momento. Entretanto, a resposta do nível do mar pode também não estar em fase com a tensão de cisalhamento do vento. Isto é, há a contribuição de um vento local - onde o levantamento do nível do mar junto à costa possui uma defasagem de poucas horas - e de um vento remoto, que ocorre ao sul da estação de medição, onde a resposta da PCSE apresenta um retardo entre 10 e 15 horas⁸.

Em 2003, o então professor titular da Universidade Federal de Rio Grande, Prof. Dr. Eloi Melo Filho, relatou em sua Tese um evento que demonstra muito bem a influência de perturbações remotas na PCSE¹. Segue abaixo o trecho extraído do mesmo:

"... as condições de mar estavam bastante severas devido à passagem de um ciclone extra-tropical na costa do Uruguai e do Sul do Brasil, o qual provocou ventos muito intensos sobre o mar naquela região.

Além das ondas que bombardearam as praias que recebem a ondulação proveniente de Sul, o nível do mar na costa de Santa Catarina subiu bastante durante este evento. De acordo com as observações da velocidade de deriva da bóia (para o norte), a corrente que se desenvolveu na plataforma continental foi de uma intensidade muito forte, surpreendendo a todos. A velocidade estimada da deriva foi de cerca de 1.5 m s^{-1} ."

Durante o ocorrido, o autor se encontrava ao largo da ilha de Santa Catarina e, segundo o mesmo, os ventos na região não se intensificaram. Ainda de acordo com o Prof. Dr. Eloi, o ciclone extra-tropical se moveu em direção ao oceano aberto ainda ao largo da costa uruguaia / gaúcha, sendo esta a razão pela qual as condições atmosféricas não apresentaram mudanças significativas. Dessa maneira, torna-se clara a influência de forçantes remotas na hidrodinâmica costeira da PCSE, corroborando o trabalho de Castro e Lee¹⁴

O vento remoto influencia também regiões da plataforma continental média (profundidades entre 40 m e 100 m, tipicamente), e não requer grandes intensidades da componente da tensão de cisalhamento paralela à costa para que Ondas de Plataforma Continental¹⁵ sejam geradas e se propaguem ciclonicamente ao longo da costa.

Já a resposta ao vento local é típica de regimes altamente friccionais, isto é, quando a intensidade da componente do vento paralela à costa é grande e nas pequenas profundidades da plataforma continental interna ($< 40 \text{ m}$), onde a camada limite de fundo ocupa parte substancial da coluna de água. Quando o vento possui estrutura (variabilidade espacial) ao longo da costa, a resposta do nível do mar ocorre na forma de Onda Topográfica Aprisionada¹⁶.

Na PCSE, ambas as formas de resposta, ao vento local e ao vento remoto, têm sido observadas. Ondas de Plataforma Continental foram primeiramente detectadas na região por Castro⁸ e Castro e Lee¹⁴ em variações subinerciais da altura da superfície do mar. Posteriormente, Dottori e Castro¹⁷ observaram que a velocidade de propagação das OPCs na PCSE varia ao longo da região, sendo maior na porção sul ($10,4 \pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$) do que no norte ($7,7 \pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$). Campos *et al.*¹⁸ analisaram 40 anos de dados de variação subinercial da superfície do mar medidos em Santos, em conjunto com dados de ventos e de pressão atmosférica, concluindo que eventos extremos de elevação da superfície do mar não são caracterizados por respostas às tensões de cisalhamento do vento locais, mas dependem da evolução em escala temporal e persistência de ventos de quadrante sul ao longo da costa sul - sudeste do Brasil. Filippo *et al.*¹⁹ comprovaram a presença de ondas barotrópicas na PCSE, em continuação a processos coerentes que ocorreram na costa argentina.

Stech e Lorenzetti¹¹ verificaram através de experimentos de modelagem numérica que a resposta pode acompanhar o deslocamento da forçante, caracterizando a importância da forçante local da tensão de cisalhamento do vento num regime altamente friccional similar à Onda Topográfica Aprisionada. Por outro lado, Valentim *et al.*²⁰ verificaram que na região de Ubatuba o empilhamento do nível do mar junto à costa pelo vento apresentou alta correlação com a componente local paralela à costa do vento.

Dessa forma, fica evidente a estreita relação que a região possui com os ventos e sistemas transientes que se propagam ao longo dela. Tal sinergia é de suma importância no desenvolvimento deste trabalho, em especial no que concerne ao empilhamento de água junto à costa.

O segundo processo físico responsável pelo fenômeno de ressaca é a modulação quase quinzenal das marés semidiurnas. No jargão oceanográfico essas marés de grandes amplitudes, originadas durante as fases de Lua Cheia e Nova, são conhecidas como marés de sizígia. Na Plataforma Continental de São Paulo (PCSP), localizada na porção central da PCSE, as alturas de preamares de sizígia podem atingir valores superiores a 1 metro²¹. Nesta mesma região, as principais componentes semidiurnas de maré (M2 e S2) comportam-se quase como co-oscilantes com o oceano profundo, apresentando pequenas diferenças de fase ao longo da costa e elipses de correntes altamente polarizadas na direção perpendicular à costa^{22, 23}. Texto completo acerca do assunto pode ser encontrado no livro *The Analysis of Tides*, de Gabriel Godin²⁴.

Os estudos de variabilidade temporal de eventos de ressaca ainda são incipientes, de tal modo que grande parte das publicações se referem à variabilidade de marés meteorológicas que, com ressalvas, podem fornecer pistas sobre o quadro de ressacas. No Hemisfério Norte, empregando séries temporais de

elevação do nível do mar e dados de reanálise de ventos, Butler *et al.*²⁵ observaram uma forte tendência positiva na frequência e severidade dos eventos de *storm surge* na porção noroeste do Mar do Norte entre os anos de 1955 e 2000.

Ademais, em um estudo conduzido por Sweet e Zervas²⁶ durante a temporada fria (outubro à abril) na costa Leste dos Estados Unidos, revelou que a intensidade e o número de eventos de ressaca são maiores durante eventos de El Niño considerados fortes.

Na Nova Zelândia, de Lange e Gibb²⁷ apontam que a intensidade dos eventos de *storm surge* na região de Tauranga varia sazonalmente e em períodos decadais. Os autores ainda indicam que essa variabilidade responde às alterações atmosféricas possivelmente causadas por mudanças na frequência de tempestades ou pela distribuição regional dos sistemas de pressão. Ademais, com o emprego de ondaletas, demonstram que há componentes quase-periódicas na escala de 2 - 8 anos e 8 - 32 anos que podem estar associados às oscilações como El Niño Oscilação Sul (ENOS) e a Oscilação Interdecadal do Pacífico (IPO). Por último, assinalam que a mudança no regime de *storm surge* por volta da metade da década de 1970 pode estar associada com a alteração de fase da Oscilação Interdecadal do Pacífico.

Já na América do Sul, especificamente na região de Mar de Plata, Argentina, empregando uma série histórica de nível do mar (1956 - 2005), Fiore *et al.*²⁸ verificaram que na última década da série temporal (1996 - 2005), houve um aumento médio de 7% no número de eventos de maré meteorológica comparativamente à cada década predecessora. Ademais, os autores também observaram um aumento na intensidade e duração dos eventos: 8 centímetros superior nas duas últimas décadas e 2 horas a mais de duração (28 horas) do que nas três últimas décadas (26 horas).

No Brasil, os estudos sobre ressaca em grande parte se baseiam nas publicações de noticiários. Essa abordagem, apesar de apresentar a visão da sociedade com relação ao fenômeno, é suscetível às mudanças que ocorram no veículo de comunicação, que pode dar mais ou menos enfoque em um determinado tipo de notícia.

Por exemplo, Simó e Horn Filho²⁹ empregaram notícias de jornais de Santa Catarina, de *sites* especializados em assuntos marinhos e arquivos de órgãos públicos, para o levantamento de eventos de ressaca ocorridos entre os anos de 1991 e 2001 no referido estado. Segundo os autores, dos 18 casos registrados, todos apresentaram presença ou proximidade das Luas Cheia ou Nova.

De maneira similar, Vanz e Fernandes³⁰ utilizou matérias vinculadas à imprensa de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul (RS), bem como informações geradas pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (EPAGRI/CIRAM), em um levantamento de ressacas, afogamentos e acidentes com embarcações ocorridos em SC e no RS entre 2009 e 2010. Segundo os autores, dos 18 eventos noticiados, 10 ocorreram durante maré de sizígia (55,5 %).

Ainda na região sul do Brasil, Krueger³¹ realizou o levantamento de registros de ressaca através de reportagens de jornais *online* e impressos e por meio do Departamento Estadual de Defesa Civil do Estado de Santa Catarina. Entre o período de 2001 a 2010 a autora encontrou um total de 60 eventos registrados, donde, destes, 59% ocorreram em períodos de maré de sizígia e, em 14% dos casos, o cenário maregráfico observado era a conjuntura de maré de sizígia e perigeu lunar.

Fundespa³² empregou notícias de periódicos estabelecidos na região da Baixada Santista, no estado de São Paulo, entre os anos de 1960 e 2011, com o intuito de avaliar os padrões atmosféricos e oceanográficos associados à ocorrência do fenômeno, bem como sua variabilidade anual. Os resultados revelam que tais eventos se concentram nas estações de outono e inverno (40,4% e 36%, respectivamente), também encontrados por Campos *et al.*¹⁸. Além disso, as ressacas ocorreram majoritariamente durante marés de sizígia (49,4%) e em 69,7% dos casos era ano de El Niño.

Diferentemente dos trabalhos apresentados anteriormente, os quais se basearam em levantamentos de jornais e documentos públicos, este trabalho será conduzido sob outra óptica, utilizando um critério bem definido e mais objetivo do que os anteriores. Estes, apesar de se basearem na visão popular do fenômeno, podem apresentar fortes vieses justamente devido à esta abordagem. Como será apresentado posteriormente, o levantamento de ressaca através de jornais é suscetível às alterações editoriais e, consequentemente, às interpretações dos resultados também são sujeitas a essas mudanças. Dessa maneira,

este trabalho pretende contribuir de forma a complementar os estudos de ressaca na região, e seus resultados poderão ser utilizados para suportar outros estudos e até mesmo com a possibilidade de serem integrados a sistemas de alertas de condições de mar adversas.

1.1 Hipótese Científica e Objetivo

Define-se como hipótese deste trabalho que os eventos de ressaca na PCSE possuem variabilidade sazonal e interanual e que os eventos têm aumentado de frequência, elevação máxima e duração ao longo dos anos. Assim, estabelece-se então como objetivo o estudo das ressacas na costa da PCSE, analisando suas variabilidades temporais e a evolução dos fenômenos ao longo dos anos.

2 Dados e Métodos

2.1 Dados

Para a realização deste trabalho serão empregadas séries históricas de elevação nível do mar obtidas em três marégrafos distribuídos ao longo da costa dos estados de São Paulo (Cananéia e Santos) e Rio de Janeiro (Ilha Fiscal) (Figura 2).

A Figura 3 representa o comprimento de cada série temporal a ser empregada no trabalho. Organizadas de norte (Ilha Fiscal) para sul (Cananéia), elas apresentam, respectivamente, 48, 46 e 52 anos de dados.

As distâncias ao longo da costa entre as estações de Cananéia (CN) e Santos (SA) é de aproximadamente 200 km enquanto que entre CN e Ilha Fiscal (IF) corresponde a aproximadamente 545 km. Com exceção dos períodos recentes de Cananéia e Ilha Fiscal, a taxa de amostragem de todas as outras séries é de uma hora.

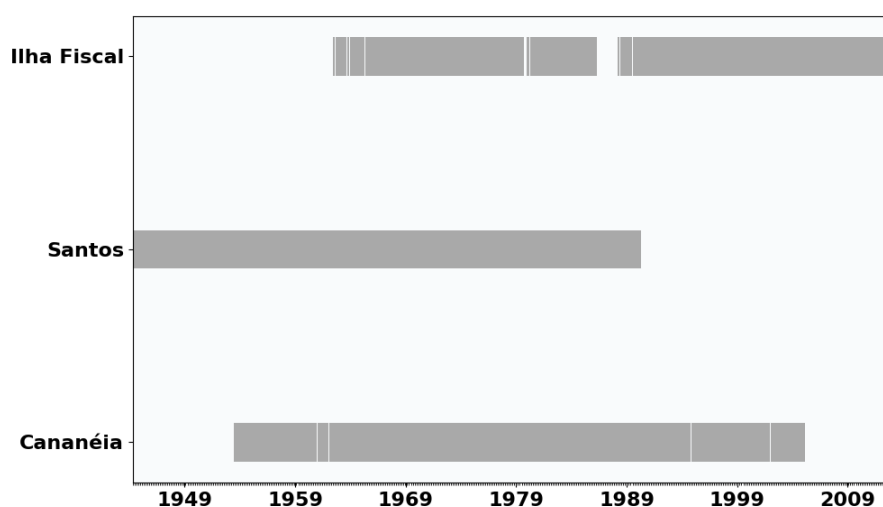


Figura 3: Duração das séries de elevação do nível do mar em Ilha Fiscal (48 anos), Santos (46 anos) e Cananéia (52 anos).

As séries de Cananéia, sob responsabilidade do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), e de Ilha Fiscal, mantida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, são as que exibem maior tempo de medições dentre os marégrafos brasileiros. Apesar de apresentarem, respectivamente, 52 e 48 anos de dados, ambas estações possuem diversas lacunas, impedindo assim análises contínuas de longo termo sobre determinado fenômeno. Ademais, em casos como o de Santos, muitas observações não perpetuam até os dias atuais, fazendo com que análises sejam restritas à décadas passadas.

Ademais, como é possível observar na Figura 3, com exceção da série de Santos, Cananéia e Ilha Fiscal apresentam lacunas de dados. Especificamente com relação à última, há um longo *gap* de 2 anos. Além destes observados com facilidade na figura, ausência de dados de menores comprimentos também estão presentes e serão abordados com maior profundidade na próxima seção.

As séries temporais de elevação do nível do mar de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal foram obtidas em fontes distintas. Para a primeira estação, tais dados foram adquiridos junto ao Laboratório de Dados Oceanográficos, pertencente ao IOUSP e passível de obtenção via requerimento através da página virtual do mesmo. No caso de Ilha Fiscal, a série temporal está disponível no sítio virtual do projeto *The Global Sea Level Observing System (GLOSS)*, de livre acesso e obtenção gratuita. Por último, a série de Santos foi cordialmente cedida pelo Prof. Dr. Ricardo de Camargo, do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo, e pelo Prof. Dr. Joseph Harari, do IOUSP.

Além disso, novamente com exceção da Série temporal de Santos, tanto a série de Cananéia quanto

a de Ilha Fiscal apresentam tendência positiva do nível médio do mar de, respectivamente, 40 cm por século e entre 30 - 40 cm por século^{33, 34}.

Para avaliar a variabilidade interanual e uma possível associação com a El Niño Oscilação Sul (ENSO), será empregado o Índice Niño Oceânico (ENSO). Este é o indicador primário utilizado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para identificar eventos de *El Niño* e *La Niña*, os quais juntos com a fase neutra compõem o ENSO. Utilizando como critério a temperatura da superfície do mar (SST) do Oceano Pacífico Leste, especificamente na chamada região Niño 3.4, situada entre 5°N - 5°S e 120°W - 170°W, define-se como um evento de *El Niño* quando a anomalia de SST nesta região excede em, no mínimo, +0,5°C em relação à média climatológica da área (fase neutra) por ao menos 5 composições consecutivas, onde cada composição é a média móvel considerando um período de três meses. Ou seja, para se calcular a anomalia de um mês é feita a média entre a anomalia do mês anterior, a do mês em questão e a do mês posterior. Por outro lado, é definido como um evento de *La Niña* quando a anomalia média de SST perdura por mais de 5 composições consecutivas apresentando valores iguais ou inferiores à -0,5°C. Os valores das médias móveis a cada 3 meses do ONI estão disponíveis no sítio virtual http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

Além disso, os eventos de *El Niño* e *La Niña* também são classificados em fraco (anomalia de SST entre $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 0,9^{\circ}\text{C}$), moderado ($\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1,4^{\circ}\text{C}$), forte ($\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 1,9^{\circ}\text{C}$) e muito forte ($> \pm 2^{\circ}\text{C}$). Neste tocante, tais eventos podem ser conferidos em <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>

2.2 Métodos

2.2.1 Edição de Dados

Nessa primeira etapa de processamento precedente à análise de séries temporais, denominada edição de dados, foram empregados métodos para reamostragem de dados, checagem e retirada de valores tidos como errôneos e preenchimento de lacunas nas séries temporais.

Além disso, deve-se observar que as três séries foram avaliadas em relação às suas anomalias. Em outras palavras, a média de cada respectiva série foi retirada dos valores observados. As médias de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal obtidos foram, respectivamente, 1,69 metros, 1,45 metros e 2,27 metros. Tal abordagem resulta também na retirada de um referencial maregráfico (*tidal datum*). Doravante, este sinal será referido como sinal observado.

2.2.1.1 Reamostragem (*resampling*) Para este trabalho, os períodos de amostragem foram padronizadas em 1 hora, de tal forma que é realizada uma média aritmética sobre cada intervalo a ser reamostrado³⁵.

2.2.1.2 Preenchimento de *gaps* Com exceção da série temporal de Santos, todas as outras apresentam hiatos, grandes (anos) ou pequenos (algumas horas). Levando em conta justamente esse fator, ou seja, o intervalo de duração de cada *gap* (I), será aplicada uma metodologia diferente para cada caso:

$I \leq 6$ horas: Como indicado por Emery e Thomson³⁵, o método de interpolação linear é o mais indicado para períodos curtos.

$6 \text{ horas} < I \leq 15$ dias: Neste intervalo, encontra-se o problema em aplicar um método adequado de interpolação. Diversas técnicas têm sido utilizadas na área de processamento de dados geofísicos para solucioná-lo³⁶.

Um método que tem se mostrado eficaz e poderoso é a Análise Espectral Singular (*Singular Spectrum Analysis* - SSA). A idéia básica por trás da SSA é reconstruir uma dada série temporal $Y(t)$ a partir da soma de suas componentes principais, as quais representam sinais como tendência, comportamento

oscilatório e ruídos. Além de seu papel no preenchimento de *gaps*, a SSA também pode ser empregada no alisamento de séries temporais, realização de previsões e extração de componentes sazonais.

Em suma, o método pode ser separado em dois estágios complementares, onde cada um é ainda dividido em outras duas etapas:

1. Decomposição:

- Incorporação;
- Decomposição em Valores Singulares (SVD);

2. Reconstrução:

- Agrupamento;
- Média Diagonal

Uma abordagem mais detalhada sobre cada etapa pode ser conferida em Esquivel *et al.*³⁷.

$I > 15$ dias: Como apontado por Emery e Thomson³⁵, é preferível trabalhar com pequenos fragmentos individuais de dados existentes do que forçar métodos de interpolação para além dos limites aceitáveis. Dessa maneira, optou-se então por não interpolar séries com lacunas maiores do que 15 dias.

O preenchimento de *gaps* por SSA neste trabalho será realizado empregando a técnica de previsão (*forecasting*), uma das ferramentas existentes no método de Análise Espectral Singular. Apesar de existir maneiras mais complexas de se adotar o *forecasting* no preenchimento de lacunas (*e.g* Mahmoudvand e Rodrigues³⁸), neste trabalho se optou pela forma mais elementar, devido à sua simplicidade de aplicação e resultados satisfatórios obtidos, como poderá ser visto adiante.

Para empregar este método foi utilizada a biblioteca pySSA, do ambiente Python, pública para uso e edição. Segundo o autor do código, o mesmo se baseou nos trabalhos da pesquisadora Nina Golyandina³⁹ para desenvolver a biblioteca.

Para realizar a interpolação é exigido um determinado período precedente ao *gap*, de tal forma que este será decomposto em suas principais componentes e depois estas serão reagrupadas e posteriormente avançadas no tempo para preencher a lacuna. Para este trabalho, um período de 2 meses precedente à cada *gap* será avaliado sob a luz da SSA para se realizar a previsão e, dessa maneira, o preenchimento das lacunas.

Tal metodologia foi aplicada aos dados do ano de 1955 da estação de Cananéia como uma forma de pré-avaliação do método. Para isso, inseriram-se lacunas artificiais com período de 15, 10 e 2 dias, em meses distintos, com o intuito de comparar a série reconstruída com os dados observados (Figura 4).

Um modo de avaliar a performance do resultado previsto com os dados observados é empregando o índice de Willmott (*Willmott Skill Score*)⁴⁰. Utilizado nos estudos de modelagem numérica e neste trabalho denotado como Skill, o índice varia entre 0 e 1, de tal maneira que o valor máximo (1) simboliza a concordância perfeita entre o modelo e os dados enquanto que o valor 0 representa total desacordo (Equação 1). O código em ambiente Python utilizado para o cálculo do Skill (d) foi cordialmente cedido pela MSc. Paula Birocchi⁴¹.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [|P_i^*| + |O_i^*|]^2} \quad (1)$$

onde P é a série modelada, O a série observada, $P^* = (P - \bar{O})$ e $O^* = (O - \bar{O})$, tal que \bar{O} é a média da série observada.

Um exemplo comparativo entre o Skill e a correlação de Pearson é dada a seguir. Considere dois sinais com fases, frequências e durações iguais mas com amplitudes diferentes (Figura 4).

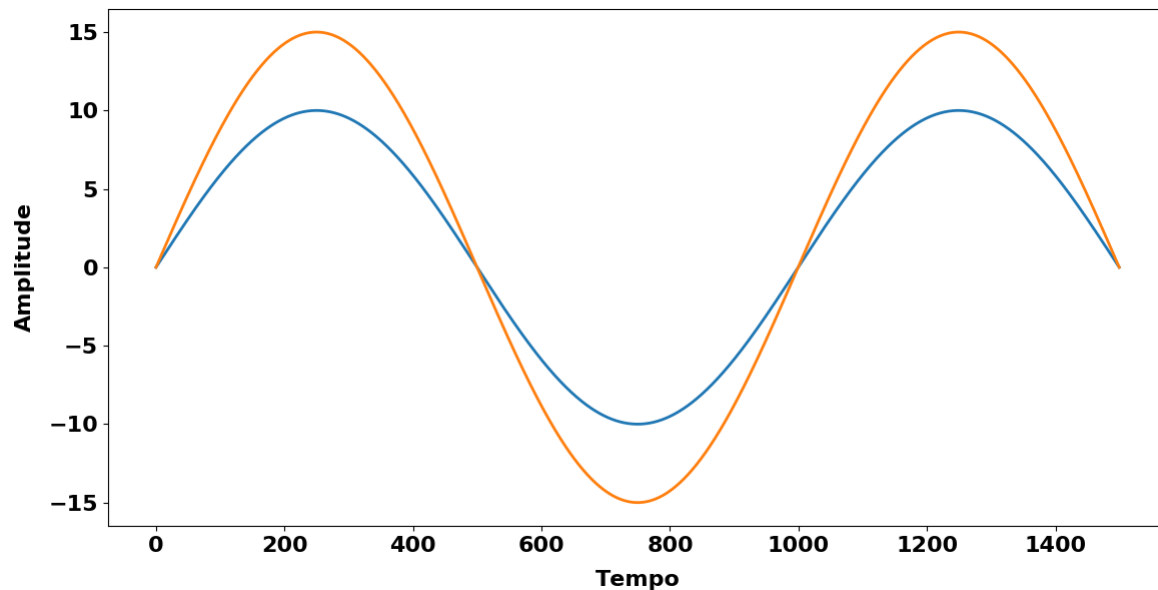
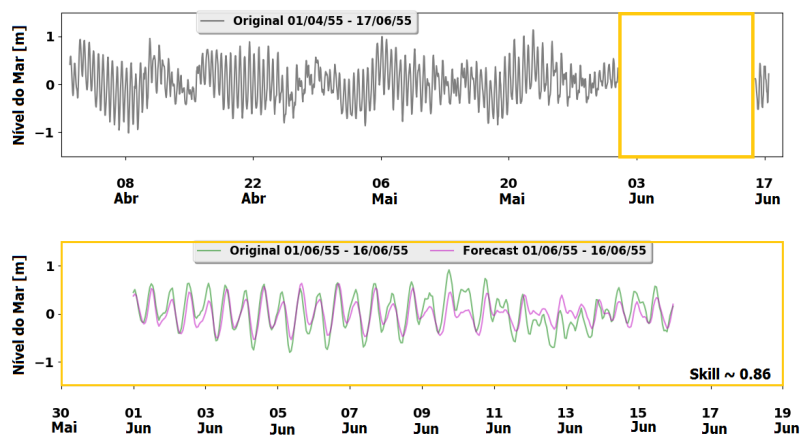
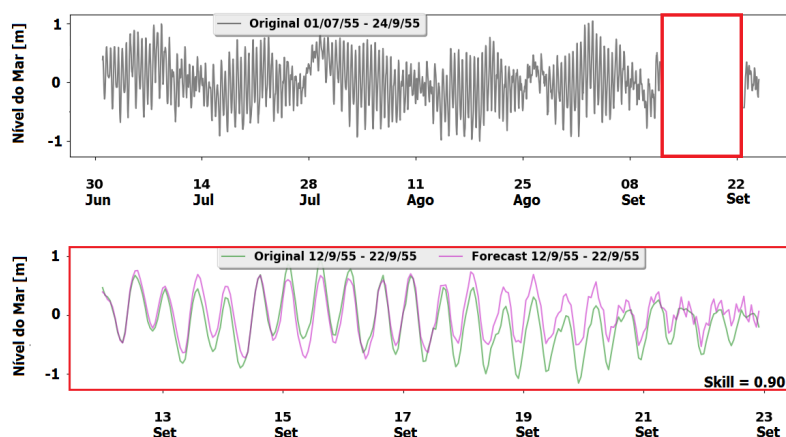


Figura 4: Ondas senoides com frequências, fases e durações iguais, mas com amplitudes distintas. A curva laranja possui 15 unidades de amplitude e a azul 10.

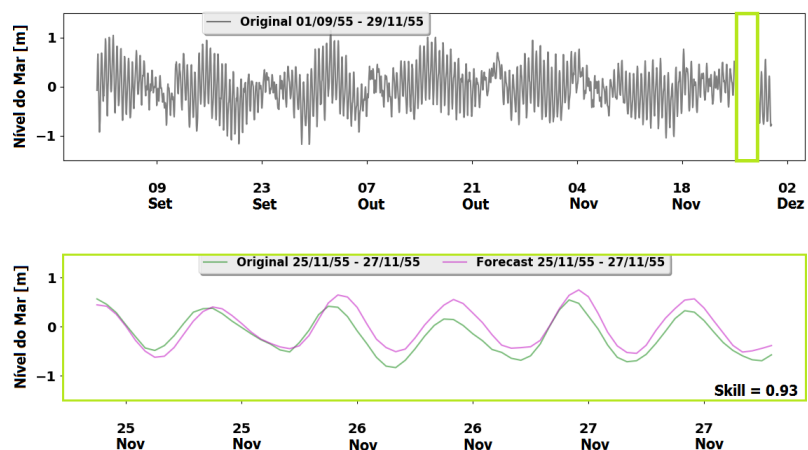
Evidentemente as curvas representadas na Figura 4 não são idênticas. Mesmo com a diferença de amplitude entre si, ao empregar o coeficiente de correlação de Pearson, o valor máximo de correlação é obtido. Tal resultado demonstra que este método não consegue identificar as diferenças de amplitude entre os dois sinais. Por outro lado, ao empregar o *Willmott Skill Score*, o valor obtido é de 0,956 indicando que, ao contrário do coeficiente de correlação de Pearson, o Skill consegue identificar a diferença de amplitude entre as séries.



(a) Série observada com *gap* de 15 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).



(b) Série observada com *gap* de 10 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).



(c) Série observada com *gap* de 2 dias artificialmente inserido (painel superior) e comparação entre dados do mesmo período da lacuna - linha cheia esverdeada - e o modelado - linha cheia rosácea - (painel inferior).

Figura 5: Séries observadas com *gaps* inseridos artificialmente (painéis superiores) e comparação entre dados dos mesmos períodos das lacunas - linhas cheias esverdeadas - e seus respectivos modelos obtidos por previsão via SSA (*Forecast*) - linhas cheias rosáceas - (painéis inferiores). O Skill obtido é exibido no canto inferior direito de cada painel inferior.

Pode-se observar na Figura 5 que para os períodos considerados, o Skill obtido é superior a 0,85. Além disso, é possível também observar que há melhoria no Skill conforme o tamanho da lacuna diminui. Tal resultado será discutido adiante.

Tal procedimento também foi realizado para as estações de Santos (SAN), nos meses de novembro, outubro e junho de 1960, e de Ilha Fiscal (IF) em março, junho e setembro de 2002. Os Skills obtidos foram de 0,78 (SAN) - 0,84 (IF), 0,91(SAN) - 0,84 (IF) e 0,95 (SAN) - 0,95 (IF) para 15, 10 e 2 dias, respectivamente. Não obstante, foi também verificado o Skill empregando 5 meses de dados precedentes ao *gap*, afim de investigar se há melhora nos resultados. O processo foi realizado para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para os mesmos períodos das lacunas inseridas anteriormente. O resultado pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre diferentes períodos considerados na Análise Espectral Singular (SSA)

Estações	2 meses 15 dias	5 meses 15 dias	2 meses 10 dias	5 meses 10 dias	2 meses 2 dias	5 meses 2 dias
Cananéia	0,86	0,87	0,90	0,89	0,93	0,92
Santos	0,78	0,81	0,91	0,95	0,95	0,98
Ilha Fiscal	0,84	0,92	0,84	0,89	0,95	0,98

A Tabela 1 demonstra que, em geral, o aumento do período precedente ao *gap* resultou em uma melhoria do Skill obtido. Entretanto, em alguns casos, o Skill encontrado após o prolongamento do período foi levemente inferior aos obtidos em primeira análise.

Apesar do método apresentar em geral Skills superiores a 0,8, em alguns casos foram encontrados também resultados não satisfatórios. Além do índice obtido para o *gap* de 15 dias de Santos (Skill de 0,78) em 1960, no ano de 1981 de Ilha Fiscal obteve-se um Skill de 0,69 para o mês de março. Além disso, também foi encontrado Skill para lacuna de 10 dias inferior à de 15 dias, 0,79 e 0,91, respectivamente. Ademais, observações sugerem que a precisão do método é sensível ao regime de maré, sendo mais preciso durante os períodos de sizígia do que de quadratura e que, em geral, períodos menores são mais bem interpolados que as lacunas maiores.

Já com relação às lacunas reais, na série temporal de Cananéia foram identificados 22 *gaps* sendo 4 deles com períodos maior do que quinze dias (não interpoláveis), 2 menores do que seis horas, 13 entre sete horas e dois dias, 2 de dez dias e 1 de quinze dias. Desse total, 16 foram preenchidos com o método de SSA e 2 por interpolação linear. Já para a série temporal de Ilha Fiscal, 13 lacunas foram identificadas sendo que 6 apresentaram ausência de dados maior do que 15 dias (não interpoláveis), 3 entre dois e quatro dias, 1 de oito dias e 3 entre 10 e 14 dias. Todos os 7 *gaps* foram preenchidos com o método de SSA.

Uma outra forma de se avaliar a interpolação é correlacionando o período preenchido com os dados observados nas estações vizinhas. Para isso, empregou-se a análise de correlação cruzada com *lag*³⁵.

Neste trabalho, optou-se por empregar tal técnica somente sobre os sinais obtidos através da interpolação por SSA. No caso das lacunas interpoladas na série de Cananéia, a correlação cruzada com *lag* foi realizada com a estação de Ilha Fiscal e os coeficientes de correlação obtidos foram separados em dois grupos: entre 7 horas e 2 dias (I), 13 eventos, e entre dez e quinze dias (II), 3 eventos. A escolha em correlacionar Cananéia com Ilha Fiscal se deve ao fato de que as interpolações só passaram a existir a partir de 1991, ano o qual já não há mais dados da estação de Santos.

De modo semelhante, as lacunas preenchidas em Ilha Fiscal foram comparadas aos dados observados de Cananéia. Aqui também separou-se em dois grupos: um onde os *gaps* preenchidos variam entre dois e quatro dias (III), 3 eventos, e o segundo com as interpolações realizadas nas lacunas entre 8 e 14 dias (IV), 4 eventos.

Vale ressaltar que, para ambos os casos, a correlação cruzada com *lag* foi feita exclusivamente entre dados observados e interpolados. Em outras palavras, não houve comparação entre duas lacunas preenchidas.

O valor médio das correlações calculadas em cada situação não foi executado via média aritmética direta, mas sim realizando a transformação dos coeficientes de correlação r de Pearson para valores z , via Transformação Z de Fisher, e depois retornando o valor z médio encontrado para o r médio⁴². Tal técnica foi empregada pois, devido ao fato da correlação cruzada com *lag* estar sendo realizada sobre dados observados e não sobre os filtrados, valores de correlação negativos foram obtidos. Logo, caso estes fossem empregados para realizar a média, não seria obtido um valor coerente.

Após a transformação abordada anteriormente, os valores de correlação média encontrados para as interpolações de Cananéia foram 0,92 (I) e 0,74 (II), enquanto que para Ilha Fiscal se obteve 0,92 (III) e 0,81 (IV). Tais resultados demonstram, como já apontado previamente, que *gaps* menores são preenchidos mais eficientemente do que *gaps* maiores e, por último, que o método apresentou resultados satisfatórios nas interpolações.

Como última observação, vale ressaltar que devido ao fato das correlações cruzadas com *lag* terem sido realizadas com as séries observadas, o valor inferior encontrado para lacunas mais longas remete, supostamente, às interferências dos sinais existentes nas bandas de baixa frequência. Devido à sua menor amplitude, esses sinais possivelmente não são bem resolvidos pela técnica e, por essa razão, para longos períodos, tal erro se acumula e se torna mais evidente do que quando comparado a períodos mais curtos. Além disso, possivelmente a técnica apresenta melhor resolução com sinais ditos determinísticos, como a maré, e pior com eventos ditos estocásticos, como as marés meteorológicas.

2.2.1.3 Detecção e Correção de Valores Discrepantes Fleming e Hill⁴³ apresentaram um procedimento objetivo baseado na sucessiva aplicação de diferenças finitas visando a detecção e correção de dados geofísicos. Para que um dado seja tomado como "errado" pelo programa desenvolvido baseado na pesquisa dos referidos autores, seu erro calculado deve ser maior que um nível de ruído pré-estabelecido o qual, para este trabalho, foi de 0,1.

O mesmo código utilizado por Castro⁸ também foi empregado nesta etapa do trabalho. Como há lacunas maiores do que 15 dias presentes na séries de Cananéia e Ilha Fiscal, ou seja, *gaps* não interpoláveis, ambas foram divididas em sub-séries contínuas.

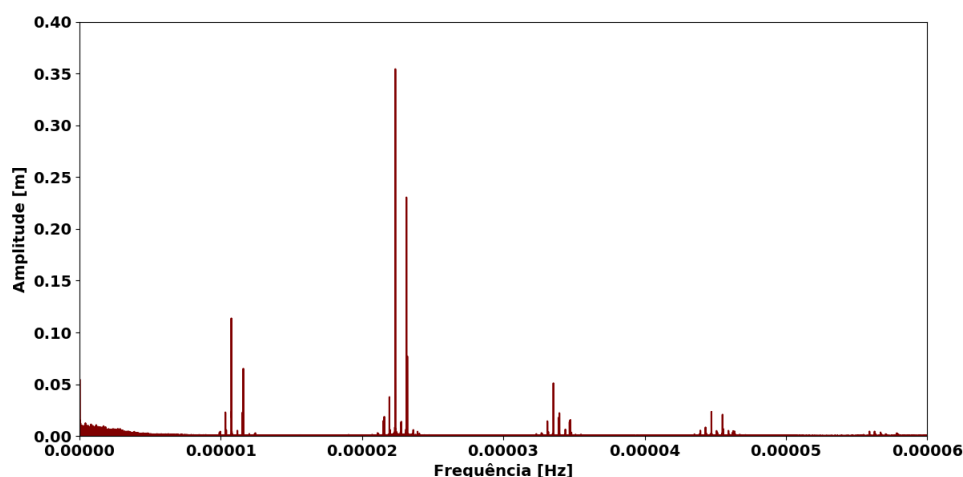
Por último, após tais procedimentos, o programa foi novamente aplicado sobre as séries corrigidas afim de verificar se as correções foram acertadamente realizadas. Para Cananéia, os dados corrigidos contabilizaram 0,58% do total da série enquanto que para Ilha Fiscal a porcentagem foi de 0,15%.

2.2.2 Análise de Séries Temporais

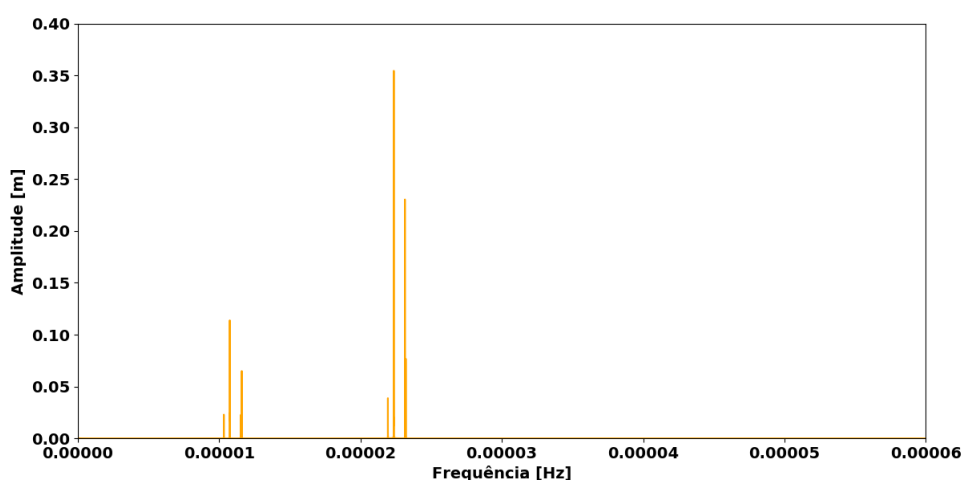
2.2.2.1 Análise Harmônica De acordo com a definição de ressacas utilizada nesse trabalho, para que os eventos sejam detectados é necessário que haja simultaneidade entre os eventos de preamares das marés de grandes amplitudes com os eventos de maré meteorológica. Para tanto, o primeiro passo necessário é determinar o sinal puramente mareográfico, o qual foi obtido através de análise harmônica sobre os dados observados.

A aplicação da Análise Harmônica sobre as séries observadas foi realizada empregando a versão em Python da biblioteca *Unified Tidal Analysis and Prediction*, escrita por Wesley Bowman e pública para uso. Para isso, optou-se por empregar 8 componentes de maré (Q1, O1, P1, K1, N2, S2, M2 e K2)²¹.

Após a realização da Análise Harmônica, a maré prevista foi comparada com o sinal observado. O Skill encontrado entre a série observada e a de maré prevista de Santos no período de 1945 - 1990 foi de 0,90. Os espectros de amplitudes no domínio da frequência (Hz) destes dois sinais podem ser observados na Figura 6.



(a) Espectro de amplitudes do sinal observado



(b) Espectro de amplitudes da maré prevista

Figura 6: Espectros de amplitude do nível do mar observado (a) e previsto (b).

Para Cananéia, entre o período de 1965 e 1980, o qual é o mais longo sem a presença de lacunas nesta série, o Skill encontrado entre a série observada e de maré prevista foi de 0,88. O resultado inferior do Skill de Cananéia comparado ao de Santos pode ser justificado pelo fato de que estações mais ao sul apresentam maior energia em frequências baixas, associadas às interações oceano-atmosfera, do que regiões mais ao norte^{1, 44}. Em outras palavras, uma série que apresente baixa influência atmosférica apresentará maior similaridade entre marés previsionadas e observadas.

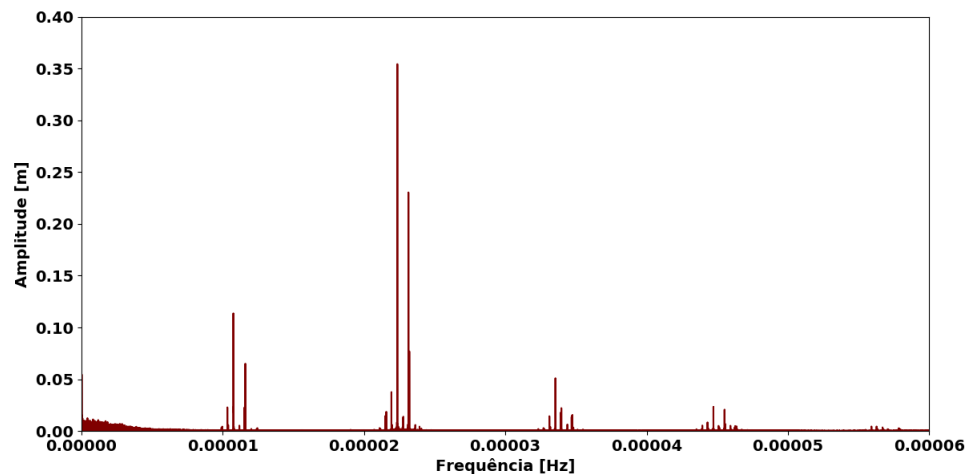
Com relação à série de Ilha Fiscal, devido à grande quantidade de *gaps* não foi possível realizar análise harmônica na mesma. Por essa forma, a obtenção da série de maré astronômica se deu a partir da subtração entre o sinal observado e o filtrado (apresentado na próxima subseção). Todavia, deve-se salientar que tal procedimento não implicará em erros na interpretações de resultados, uma vez que esta componente será utilizada somente como referência de sincronização das marés meteorológicas significativas.

2.2.2.2 Filtragem Como os eventos de ressaca em parte se caracterizam por uma variabilidade de frequência submaregráfica do nível do mar, é necessário que fenômenos em escala maregráfica (12h - 24h) e de alta frequência sejam retirados da série afim de encontrar as elevações máxima de maré meteorológica. Para isso, será aplicado um filtro cosseno quadrado de Lanczos com período de corte de 40 horas e 41 pontos (20 + 1 + 20)^{8, 14, 20}.

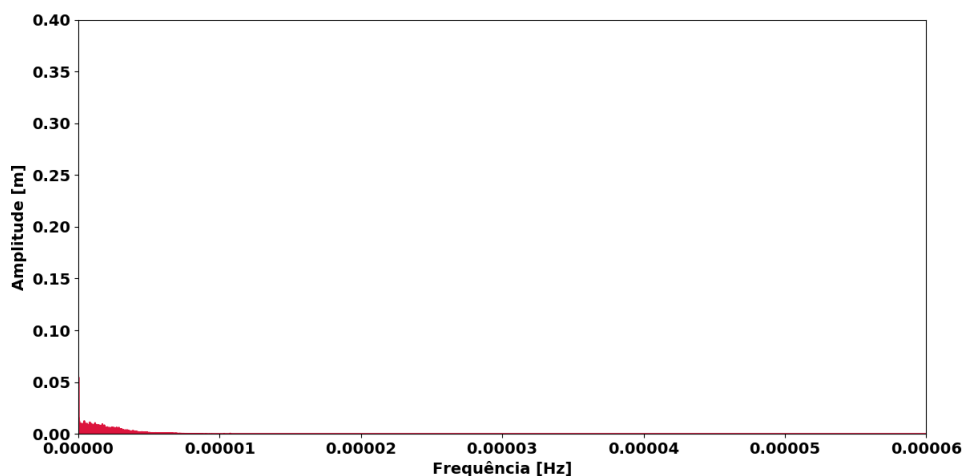
A escolha do filtro é baseada no trabalho de Walters e Heston⁴⁵, que compararam diversos filtros

passa-baixa e suas competências em atenuar as componentes de maré com o mínimo de efeito sobre as baixas frequências. Os autores concluíram que o filtro cosseno quadrado de Lanczos foi um dos dois melhores em realizar a tarefa. Assim como apontado por esses autores e constatado neste trabalho, uma única filtragem não retira completamente a energia das componentes diurnas, apresentando resquícios nos períodos de 26,86 horas, 25,81 horas e 23,93 horas, valores correspondentes aos das componentes Q1, O1 e K1, respectivamente²².

Após a segunda filtragem, o sinal obtido a partir da diferença entre o observado e o filtrado foi comparado com a maré prevista por análise harmônica. O Skill obtido para o período de 1945 - 1990 de Santos foi de 0,97. Para esta mesma série é apresentado na Figura 7 o espectro de amplitude da série observada e a filtrada, respectivamente.



(a) Espectro de amplitudes do sinal observado.



(b) Espectro de amplitudes do sinal pós filtragem.

Figura 7: Espectros de amplitude da série observada de Santos antes (a) e depois (b) da aplicação do filtro.

A filtragem realizada promoveu resultados semelhantes para as três estações. Para Cananéia e Ilha Fiscal, cerca de 76% da variância original foi retirada do sinal. Já para Santos, o valor alcançado foi levemente superior: 77%. De todo modo, tal procedimento demonstra que o sinal observado é majoritariamente composto pelas oscilações de maré. Resultados semelhantes foram obtidos por Castro¹⁴.

Fazendo uma observação em paralelo à subseção anterior, a de análise harmônica, um fato interessante observado é que ao se comparar nas séries de Santos e Cananéia, os sinais obtidos via análise harmônica e aqueles a partir da diferença entre sinal observado e o filtrado, o Skill encontrado para ambas estações foi de 0,97, demonstrando que tal aproximação para a série de Ilha Fiscal pode ser aplicada.

2.2.2.3 Identificação dos Eventos de Maré Meteorológica Significativos No início do trabalho foi definido, e ao longo do mesmo foi abordado, o papel de duas componentes na geração de ressacas: marés astronômicas e marés meteorológicas, ou também chamadas de *storm surges*. Entretanto, a amplitude que a segunda componente pode apresentar varia desde poucos centímetros até mais de um metro. Dessa forma, tendo em vista a magnitude de ressacas, é natural que sejam consideradas marés meteorológicas elevadas, superiores a um determinado limite. Neste tocante, pesquisadores costumam utilizar como limite inferior o valor de dois desvios padrões superiores à média da série filtrada ^{46, 18}. Neste trabalho será empregada tal definição e estes eventos de maré meteorológica superiores a dois desvios padrões com relação à média serão denominados daqui em diante como marés meteorológicas significativas ou como eventos de maré meteorológica significativas.

Tal abordagem se baseia no fato de que caso a maré meteorológica, conhecida também por sinal residual, apresente uma distribuição normal, os valores extremos são aqueles que estão mais distantes da média. Supondo um nível de significância de 0,05, 95% do conjunto de dados está situado entre $\pm 2\sigma$, onde σ é o desvio padrão da série. Como as ressacas são eventos extremos, e uma de suas componentes é a maré meteorológica, julga-se compreensível que estas também possuam este caráter.

Na Figura 8 é apresentado o histograma das elevação de maré meteorológica de Santos. Como é possível observar, a distribuição dos valores de elevação do sinal filtrado, ou residual, se mostra semelhante à curva com distribuição normal. Ademais, como abordado anteriormente, os valores de interesse para a identificação de marés meteorológicas extremas estão situados na calda positiva da distribuição, com magnitude igual ou superior a $+2\sigma$, limite representado pela linha preta tracejada positiva.

Caso fosse de interesse investigar o processo oposto aos de ressaca, ou seja, ao invés de ocorrer empilhamento de água junto à costa, fossem analisados eventos extremos de subelevações, interessariam valores opostos ao aqui considerados. Em outras palavras, valores iguais ou inferiores a -2σ seriam tomados. Um exemplo de estudo realizado neste tópico foi conduzido por Campos *et al.* ¹⁸.

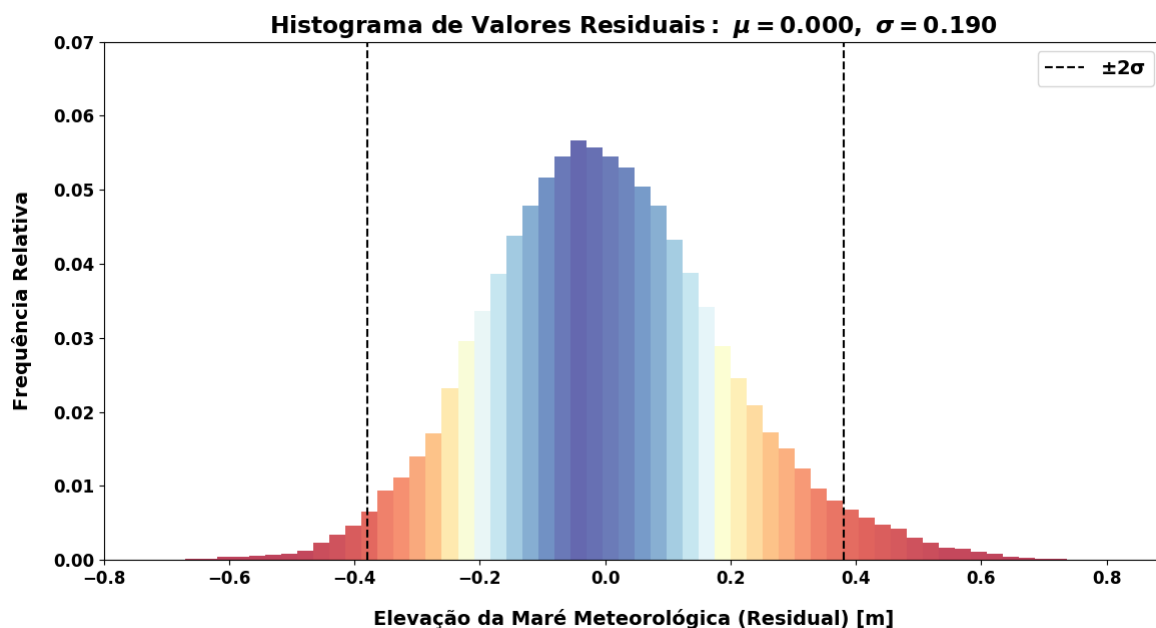


Figura 8: Frequência relativa de elevações, em metros, referente à série filtrada de Santos. Linhas pretas tracejadas demarcam o valor de elevação residual igual a dois desvios padrões e o gradiente de cores representa a alteração de valores médios (região central - cor azul) para valores extremos (regiões caudais - cor vermelha).

Em suma, eventos de maré meteorológica positivos extremos, neste trabalho denominados eventos de maré meteorológica significativos, representam 2,5 % do conjunto de dados e são aqueles que apresentam maiores elevações.

Cada série apresenta um valor base, um limite mínimo, a se considerar. Para Cananéia, onde o desvio padrão da série filtrada é de, aproximadamente, 0,198 m, serão tomados como eventos de maré meteorológica significativas aqueles que apresentarem valores superiores ou iguais a 0,396 m. Para Santos, serão tidos como eventos de maré meteorológica significativos aqueles que apresentarem elevação superior ou igual a 0,380 m e, para Ilha Fiscal, aqueles que forem igual ou superior a 0,330 m. Estes valores serão utilizados futuramente na seção de Discussão e serão referidos como limites da série filtrada.

2.2.2.4 Identificação dos Eventos de Ressaca Será interpretado como ressaca o evento composto pela composição construtiva de uma maré meteorológica significativa ocorrendo simultaneamente às preamaras de maré de sizígia.

Para isto, como as marés de sizígia estão intrinsecamente correlacionadas com os períodos de Lua Cheia e Nova, os pontos identificados como maré meteorológica significativas serão sincronizados com as fases da Lua e, aqueles que estiverem dentro do período entre as fases de Lua Nova e Lua Crescente ou entre Lua Cheia e Lua Minguante, serão tomados como potenciais eventos de ressaca. Para determinar as fases da Lua, será empregada a biblioteca Ephem do ambiente Python, pública para uso.

Os eventos de maré meteorológica significativas que apresentarem duração igual ou superior à aproximadamente 24 horas serão considerados eventos de ressaca, tendo em vista que necessariamente tais acontecimentos ocorreram durante ao menos uma preamar de maré de sizígia. Os episódios de maré meteorológica que apresentarem duração inferior à 24 serão avaliados individualmente e, caso suas durações ocorram inteiramente durante a baixamar de sizígia, serão desconsiderados.

Deve-se ressaltar algo extremamente importante: o que é definido como ressaca não é a maré meteorológica significativa em si, mas o sinal observado que é associado à ela. Portanto, se um evento de maré meteorológica apresenta, digamos, 30 horas de duração, a ressaca associada à ela também apresentará 30 horas. Uma vez que a maré meteorológica significativa deixa de exibir valores iguais ou superiores ao seu limite, a definição de ressaca é violada.

2.2.2.5 Frequência e Elevação Máxima Seguindo o método proposto por Zhang *et al.*⁴⁶, a frequência é então definida como a quantidade de eventos anuais ocorridos ao longo do período avaliado.

Considera-se como elevação máxima a maior elevação observada em um único evento de ressaca. Estes podem ser considerados únicos em um dado período ou como média das elevações máximas. Por exemplo, será apresentada na análise de variabilidade interanual a elevação máxima de 1980. A elevação máxima considerada para este ano é aquela que for a maior dentre todos os eventos de ressaca observados. No caso da elevação máxima média, como apresentado na comparação entre o período de 1965 e 1980 na seção Resultados, esta diz respeito à média das máximas elevações considerando todos os eventos de ressaca encontrados neste íterim. Tais considerações serão recapituladas adiante.

2.2.2.6 Variabilidade e Tendência de Eventos Em um contexto científico, o termo variabilidade temporal está relacionado a como um determinado fenômeno varia com o tempo, entre os anos, entre as estações (primavera, verão, outono e inverno) e entre os meses. Em específico, o termo variabilidade interanual usualmente remete às diferentes formas em que um fenômeno varia ao longo dos anos, seja entre dois anos consecutivos ou em frequências mais baixas, como decadal, interdecadal e até mesmo pentadecadal.

Muitos autores empregam análises espectrais sofisticadas para obter ciclos em que os fenômenos apresentam maior energia (*e.g.* de Lange e Gibb²⁷). Por outro lado, há também aqueles que adotam posições mais qualitativas, onde relacionam, por exemplo, aumento/diminuição do número de eventos com fases intensas de *El Niño* ou *La Niña*⁴⁷. Para este trabalho, será realizada uma abordagem semelhante ao segundo estudo para se avaliar a variabilidade interanual de eventos.

Para isto, será empregado o conjunto de dados do índice *Oceanic Niño Index* (ONI), descrito na seção Dados. Entre essa série e as anuais de frequência, será verificado quantos eventos ocorreram em cada fase do índice (*El Niño*, neutra, *La Niña*) e, além disso, tanto esta variável quanto a duração e

máxima elevação também serão confrontadas com as fases do índice. O intuito dessa análise é verificar quanto que cada fase do ENSO representa nas séries de dados.

Ademais, também será avaliado se valores discrepantes (os três mais significativos de cada série para cada estação) ocorreram em fases quentes ou frias do ENSO. Esta abordagem pode fornecer informações se anos atípicos possuem certa correlação com a presença da Oscilação.

Com relação à variabilidade sazonal, é fundamental que sejam definidos os períodos que compõem as estações de primavera, verão, outono e inverno. Neste trabalho será empregada a convenção astronômica, que considera:

Primavera: de 21 setembro até 20 dezembro

Verão: de 21 dezembro até 20 março

Outono: de 21 março até 20 junho

Inverno: de 21 junho até 20 setembro

Tal abordagem, baseada nos períodos de equinócio e solstício da Terra, foi adotada em detrimento da convenção meteorológica pelo fato de que o público em geral está mais familiarizado com essa definição do que comparativamente à segunda. Assim, idealiza-se que se torne mais natural a compreensão dos resultados de variabilidade sazonal de ressacas sob esta óptica.

Para verificar o aumento da frequência, duração e intensidade dos eventos será analisado, para cada caso, se há tendência positiva da série. Neste trabalho, para as séries anuais, será ajustada uma reta de tendência linear calculada a partir do Método dos Mínimos Quadrados. Diz-se linear pois o modelo ajustado ao conjunto de dados, ou seja, a reta ajustada na nuvem de pontos, possui a seguinte equação:

$$y(t) = \alpha + \beta t + \varepsilon \quad (2)$$

onde α é uma constante que representa o ponto onde a reta Y intercepta o eixo vertical; β é o coeficiente angular da reta, também uma constante; t a variável independente do problema, neste caso específico o tempo (em anos) e ε é o erro ou componente residual do modelo³⁵. Dentre as diversas curvas que teoricamente podem ser ajustadas ao conjunto de dados, certamente se busca aquela que melhor representa a distribuição da variável dependente $y(t)$, que neste trabalho será número de eventos, duração e máxima elevação, com relação à variável dependente. Em outras palavras, procura-se a reta em que a distância d entre o valor observado em um certo ponto tI e o valor modelado neste mesmo tempo seja mínima. Uma das formas de se minimizar a distância, e consequentemente o erro que não é explicado pelo modelo, é empregando o chamado Método dos Mínimos Quadrados. Este método visa minimizar a soma dos erros quadráticos (SSE), onde SSE é a variância total não explicada pelo modelo de regressão linear dado na Equação 2 (ε)³⁵. Isto é,

$$SSE = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^N [y(t)_i - (\alpha + \beta t_i)]^2 \quad (3)$$

Se é desejado que tal valor tenha sua soma minimizada, é necessário que as derivadas parciais de SSE com relação aos coeficientes α e β seja iguais à zero. A manipulação matemática deste problema, bem como um exemplo prático para encontrar os coeficientes e a melhor reta ajustada, podem ser conferidos em Emery e Thomson³⁵.

2.2.2.7 Intensidade e o Papel das Componentes Sendo as ressacas compostas por dois outros fenômenos, é natural tentar quantificar quanto que cada uma dessas componentes atua na geração dos eventos. Em um primeiro momento, havia sido considerado empregar o mesmo método utilizado por Zhang *et al.*⁴⁸, o qual é baseado na integração da área sob a curva de eventos de maré meteorológica. Entretanto, no caso deste trabalho, onde as ressacas e marés astronômicas oscilam ao redor do valor zero, tal aplicação se mostrou dificultosa.

Dessa forma, para se estimar a intensidade das ressacas, em termos energéticos, será adotada parte da equação que integra o chamado Teorema de Parseval, o qual é definido por:

$$\Delta t \sum_{n=1}^N |y_n|^2 = \Delta f \sum_{k=0}^{N-1} |Y_k|^2 \quad (4)$$

O Teorema de Parseval afirma que a energia total do sinal no domínio do tempo (y_n) é igual à energia total deste mesmo sinal no domínio da frequência (Y_k), onde n e k representam cada ponto da série, N o comprimento da série, Δt o intervalo de amostragem e $\Delta f = 1/(N\Delta t)$ ³⁵. Neste trabalho, a energia total de cada evento de ressaca será estimada utilizando a expressão à esquerda do sinal de igualdade da Equação 4. De maneira análoga, será também estimado o papel de cada componente, maré meteorológica significativa e astronômica, na energia total das ressacas.

3 Resultados

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados que confrontarão as hipóteses levantadas no início deste trabalho. Tais resultados, obtidos através dos métodos descritos anteriormente, representam a variabilidade interanual e sazonal da frequência, duração e elevação máxima observada de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. Além disso, são também exibidos os resultados da análise de tendência linear, proposta para verificar se há aumento de frequência, duração e elevação máxima ao longo do período avaliado.

Os resultados estão organizados da seguinte maneira: primeiramente é apresentado o número de ressacas encontrado para cada estação; em seguida, as variabilidades interanuais do número de eventos (frequência); após o número de eventos, apresenta-se a duração das ressacas, onde se investigou tanto a duração máxima quanto a duração anual média, em horas; por último, é exibida a variabilidade interanual das elevações máximas observadas, em metros. Ao fim da apresentação da variabilidade interanual de máxima elevação, é apresentado o papel do ENSO sobre as distribuições observadas.

Após a apresentação das variabilidades interanuais, são exibidas as variabilidades sazonais. Nesta subseção, as variáveis são dispostas analogamente às variabilidades interanuais, isto é: inicia-se por frequência de eventos por estações do ano, em seguida as durações e por último as máximas elevações. Além da apresentação por estações do ano, também são apresentadas as variabilidades mensais. Devido ao grande número de imagens que seriam acrescentadas e ao número limitado de páginas, optou-se pela apresentação destes resultados na forma de tabelas.

Além dos resultados necessários para confrontar as hipóteses inicialmente definidas, também será apresentado nesta seção a distribuição espacial dos eventos, considerando um período simultâneo entre as três estações (1965 até 1980) e a estimativa de energia dos eventos de ressaca bem como o papel de cada componente na mesma. Apesar de não compor o escopo essencial do trabalho, ao longo do desenvolvimento do mesmo foi identificado que este tópico extra se mostrou enriquecedor e, portanto, decidiu-se incluí-lo.

3.1 Variabilidade Interanual

3.1.1 Frequência

Primeiramente, é apresentado na Tabela 2 o número de marés meteorológicas significativas durante todo o período de amostragem (MM), a quantidade de potenciais eventos (PE) e também aqueles que foram definidos como ressacas (RR) após a aplicação dos métodos previamente citados. Entende-se como potenciais eventos aqueles que apresentaram maré meteorológica significativa, quando as mesmas ocorreram durante o período de maré de sizígia mas, como último critério, não ocorreram simultaneamente à uma preamar.

Tabela 2: Número de marés meteorológicas significativas durante todo o período de amostragem (MM), potenciais eventos de ressaca (PE), ressacas definidas segundo a metodologia (RR) e a relação entre RR e MM para as séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

Estação	MM	PE	RR	$(PE/MM) \times 100$	$(RR/MM) \times 100$
Cananéia	508	240	209	47 %	41,1 %
Santos	409	172	160	42 %	39,1 %
Ilha Fiscal	277	111	107	40 %	38,6 %

Como pode ser observado na Tabela 2, há diminuição no número de eventos, tanto de marés meteorológicas quanto de ressacas, conforme avançamos da estação mais ao sul (Cananéia) para a situada mais ao norte (Ilha Fiscal). Entre estas duas estações extremas, a redução no número de eventos da segunda

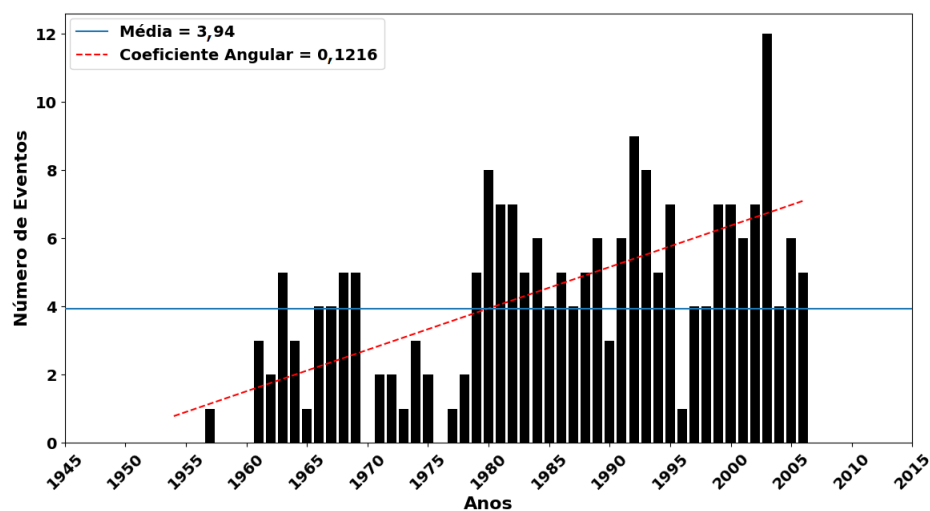
atinge quase 50%.

Um fato interessante de se notificar diz respeito ao ciclone tropical Catarina. Este furacão atingiu a costa sul - sudeste do Brasil entre os dias 24/03/2004 e 28/03/2004. O poder destrutivo destes sistemas é notoriamente conhecido ao redor do mundo. Surpreendentemente, a assinatura do ciclone Catarina não foi identificada nos marégrafos de Cananéia e Ilha Fiscal. Tal resultado será abordado com maior profundidade em Discussão.

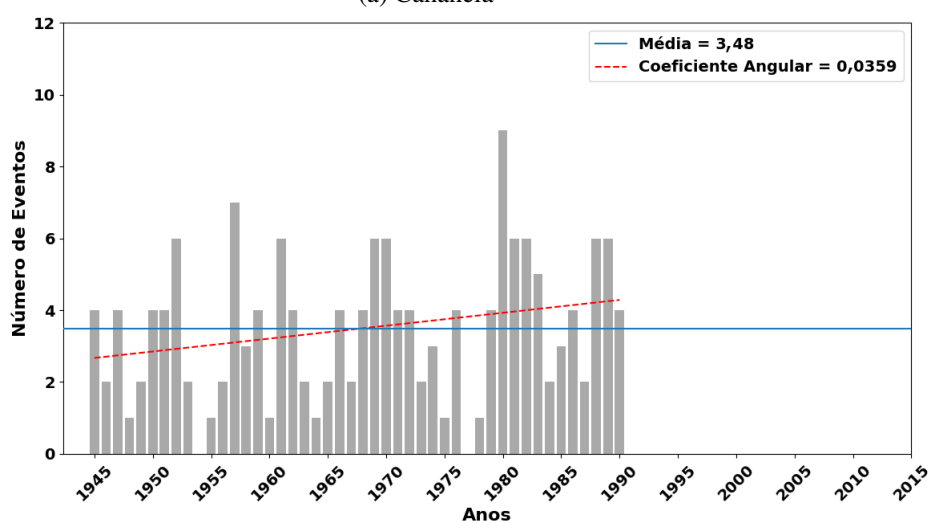
Dando continuidade, é exibida na Figura 9 a distribuição anual do número de ressacas para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. A média das séries é representada pelas retas horizontais cheias e as retas tracejadas e pontilhadas são as tendências ajustadas via Método dos Mínimos Quadrados. Deve-se ressaltar que existem anos onde ressacas não foram observadas como, por exemplo, o ano de 1960 de Cananéia. A não existência de eventos também é um dado e, como tal, foram incluídos tanto no cálculo das médias quanto na análise de tendências. Todavia, os anos de 1987 e 1988 de Ilha Fiscal são lacunas de dados e, diferentemente da ausência de eventos, nada se pode inferir neste caso. Portanto, nas séries de Ilha Fiscal são apresentadas duas retas ajustadas: uma anterior ao *gap* (linha tracejada) e outra posterior ao mesmo (linha pontilhada). Ademais, os valores médios encontrados foram calculados considerando, novamente, os valores anteriores e posteriores à lacuna.

No tocante à distribuição anual de eventos, obteve-se que Cananéia foi a estação com maior média de eventos por ano (3,94), seguida por Santos (3,47) e Ilha Fiscal (2,46). Estes resultados se assemelham ao exibido na Tabela 2. Ademais, Cananéia foi também a estação com o maior número de eventos em um único ano: 12 ressacas registradas em 2003. Para Santos o número máximo observado foi de 9 eventos, no ano de 1980, e em Ilha Fiscal o maior número observado foi de 7 eventos, no ano de 1973 (Figura 9). Além dos valores máximos, pode-se observar nesta mesma figura a quantidade de anos sem ressacas, especialmente na estação de Ilha Fiscal.

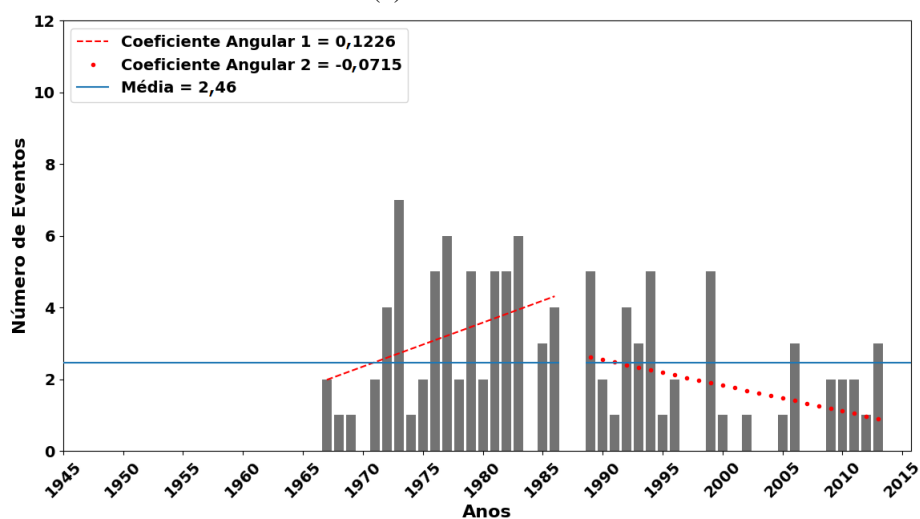
A Figura 9 também revela a alta variabilidade interanual associada à frequência de eventos. Além das grandes diferenças observáveis entre anos consecutivos, também é possível observar, especialmente no caso de Santos, que há períodos mais significativos que outros. Na série de Santos, por exemplo, entre os anos de 1961 e 1970 há uma queda e consecutiva ascensão de valores, sendo este padrão novamente observado entre 1970 e 1980. Ademais, o alto desvio padrão associado as séries são um indicativo da dispersão e consequente variabilidade observada da frequência de eventos. Os desvios padrões encontrados para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal foram, respectivamente, 2,75, 1,99 e 1,98.



(a) Cananéia



(b) Santos



(c) Ilha Fiscal

Figura 9: Distribuição anual do número de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; as barras horizontais representam as médias do número de eventos de cada série: 3,94 eventos, 3,48 eventos e 2,46 eventos, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhada representam as retas de tendência linear ajustadas.

Com relação à análise de tendência, os resultados encontrados diferem entre as estações (Tabela 3). Por apresentar ausência de dados entre 1987 e 1988, as tendências de Ilha Fiscal são apresentadas antes do *gap*, período representado por (1) na Tabela 3, e depois da lacuna, representado por (2) nesta mesma tabela. Visualmente, as séries de Cananéia, Santos e o período anterior ao *gap* apresentam tendência positiva. Entretanto, estatisticamente, dentre às quatro retas ajustadas, somente a de Cananéia possui significado estatístico ($p\text{-valor} < 0,05$). Com relação ao ajuste, foi encontrado que o coeficiente angular deste reta, ou seja a taxa de aumento por ano, é de 0,12 eventos por ano.

Tabela 3: Análise de tendência de frequência de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para: o coeficiente angular (eventos ano^{-1}), a margem de erro e o nível descritivo ($p\text{-valor}$) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do *gap* e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05

Estação	Coeficiente angular	Margem de Erro	p-valor
Cananéia	0,12	0,031	2,7E-8
Santos	0,035	0,037	0,110
Ilha Fiscal	(1): 0,122 e (2): - 0,075	(1): 0,13 e (2): 0,076	(1): 0,142 e (2): 0,123

3.1.2 Duração

São apresentadas na Tabela 4 os valores máximos, mínimos, médias e desvios padrões de duração de ressacas para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. Deve-se ressaltar que esses valores correspondem à estatística básica realizada sobre a série como um todo, sem que tenha sido feito qualquer agrupamento anual. Pode-se observar que tanto em termos extremos quanto em termo médio, a estação de Ilha Fiscal foi a que apresentou eventos mais duradouros. Outro ponto a se notar é o padrão de distribuição contrário ao encontrado na Tabela 2.

Tabela 4: Duração máxima (D^*), duração mínima (D'), duração média (\bar{D}) e desvio padrão (σ), em horas, das séries de duração para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

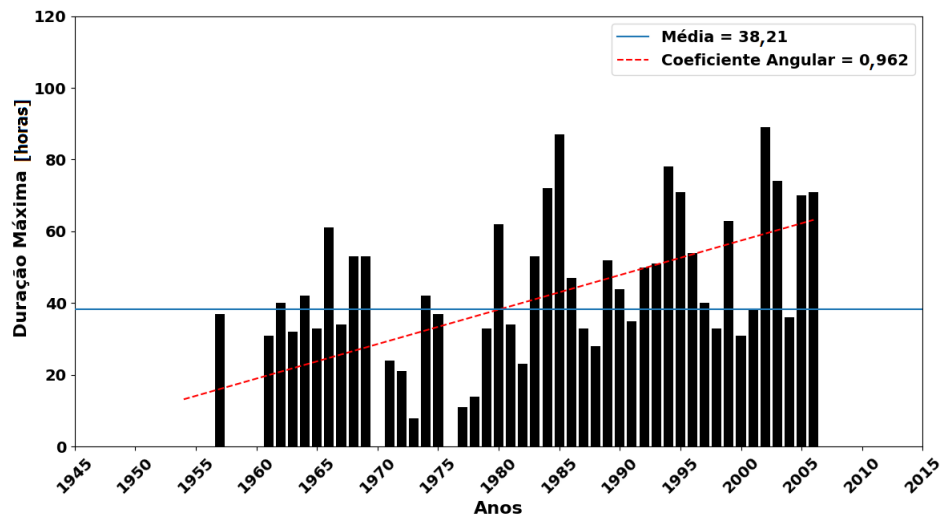
Estação	D^*	D'	\bar{D}	σ
Cananéia	89 horas	2 horas	28,92 horas	16,2 horas
Santos	99 horas	3 horas	29,07 horas	17,0 horas
Ilha Fiscal	110 horas	4 horas	34,46 horas	22,6 horas

Na Figura 10 é apresentada a distribuição anual de duração máxima de ressacas. Ou seja, em um determinado ano, para todos os eventos ocorridos neste, selecionou-se a ressaca que apresentou a maior duração. De modo similar à Figura 9, a variabilidade interanual também é intensa. Percebe-se a presença de eventos muito duradouros, como as ressacas de 1969 de Santos e 1980 de Ilha Fiscal que duraram, respectivamente 99 e 110 horas. Por outro lado, há também eventos que apresentaram curta duração, como a ressaca de 1955 de Santos e de 1977 de Cananéia. A média de cada série é representada pela linha azul horizontal e, novamente, Ilha Fiscal foi a estação que, em média, apresentou os eventos mais duradouros.

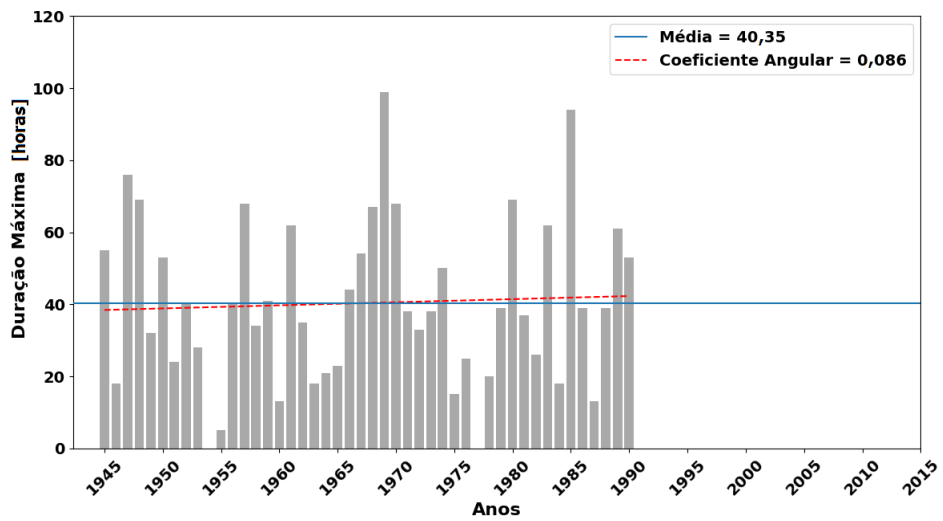
O desvio padrão da série de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal é, respectivamente, 23,96 horas, 22,74 horas e 28,2 horas. Deve-se ressaltar que tanto a média quanto o desvio padrão de Ilha Fiscal foi obtido através da média entre o período antecedente e posterior à lacuna.

Ademais, uma análise visual também indica que a série de Cananéia supostamente apresenta, especialmente após o ano de 1970, um aumento progressivo das durações máximas. De fato, a análise de

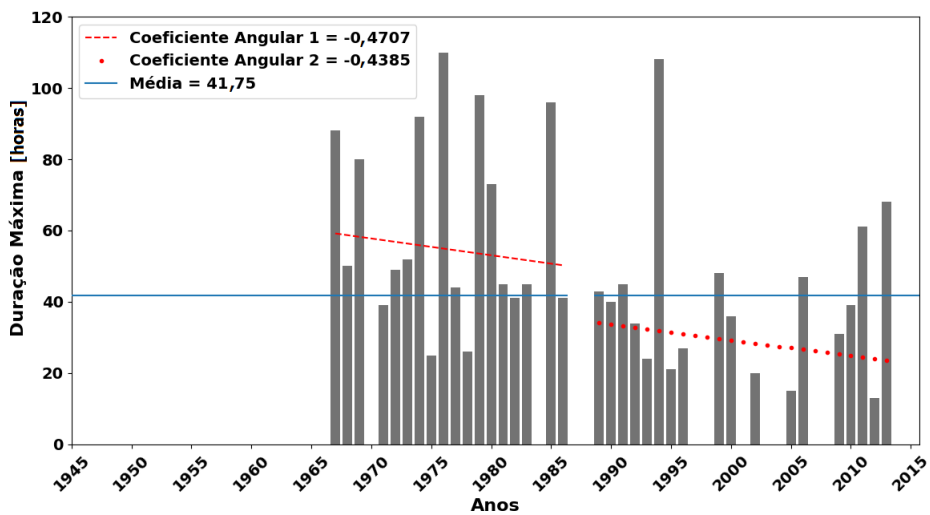
tendência apresentou resultados similares aos encontrados anteriormente. Isto é, para Cananéia foi observado novamente tendência linear positiva e estatisticamente significativa (Tabela 5). Por outro lado, Santos e Ilha Fiscal não apresentaram tendência estatisticamente significativa ($p\text{-valor} > 0,05$).



(a) Cananéia



(b) Santos



(c) Ilha Fiscal

Figura 10: Distribuição anual de duração máxima de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; a barra horizontal representa a média de eventos: 38,2 horas, 40,2 horas e 41,75 horas, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhadas representam as retas de tendência linear ajustadas.

Tabela 5: Análise de tendência para a duração máxima, em horas, de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: o coeficiente angular (horas ano⁻¹), margem de erro e o nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do *gap* e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05

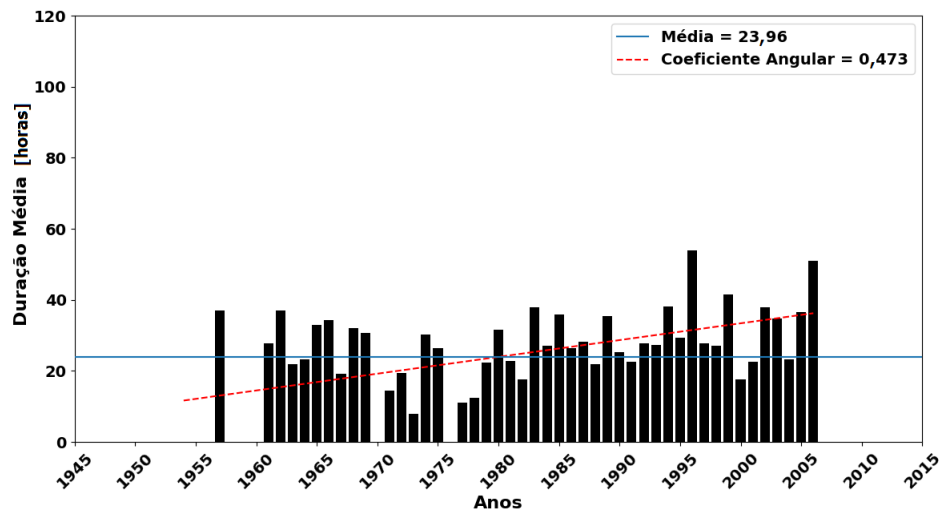
Estação	Coeficiente angular	Margem de Erro	p-valor
Cananéia	0,96	0,29	1,01E-6
Santos	0,08	0,43	0,74
Ilha Fiscal	(1): -0,47 e (2): -0,43	(1): 2,16 e (2): 1,27	(1): 0,71 e (2): 0,56

Além da duração máxima observada por ano, também se considerou necessário avaliar as durações em termos anuais médios. Entende-se como duração anual média neste trabalho o valor obtido ao se realizar a média de duração de todos os eventos presentes em um ano. Ou seja, diferentemente do caso anterior, onde era exclusivamente um único evento, aqui todos são considerados.

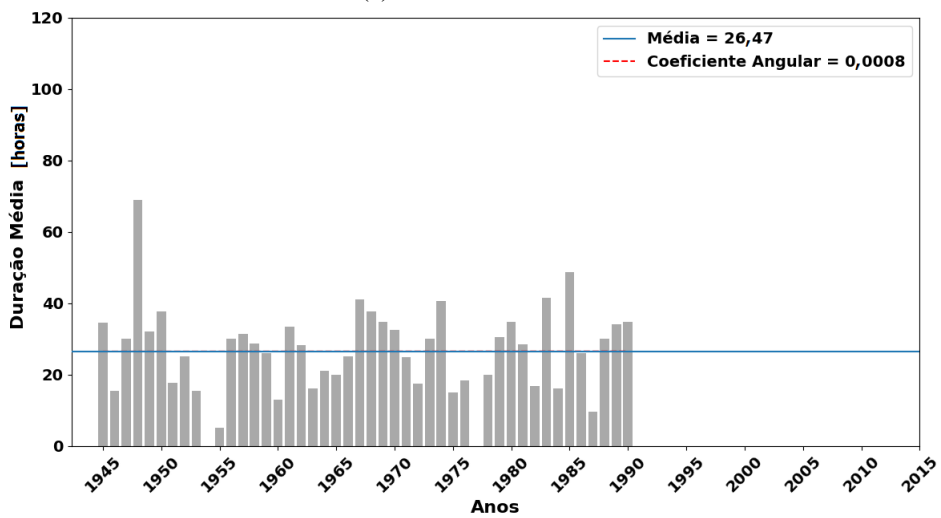
Neste tocante, é representada na Figura 11 a distribuição anual de durações anuais médias de ressaca. Pode-se observar nesta mesma figura que tal distribuição apresenta características semelhantes à Figura 10. Em termos gerais, novamente, há um gradiente de duração de sul para norte. Isto é, em termos médios, os eventos tendem a durar mais em Ilha Fiscal do que em Cananéia. Tais resultados podem ser igualmente comparados àqueles apresentados na Tabela 4 onde o mesmo padrão é observado.

A variabilidade internual se mostra ainda muito presente, especialmente entre anos consecutivos. Para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, o desvio padrão para cada um é, respectivamente, 13,2 horas, 12,4 horas e 20,3 horas.

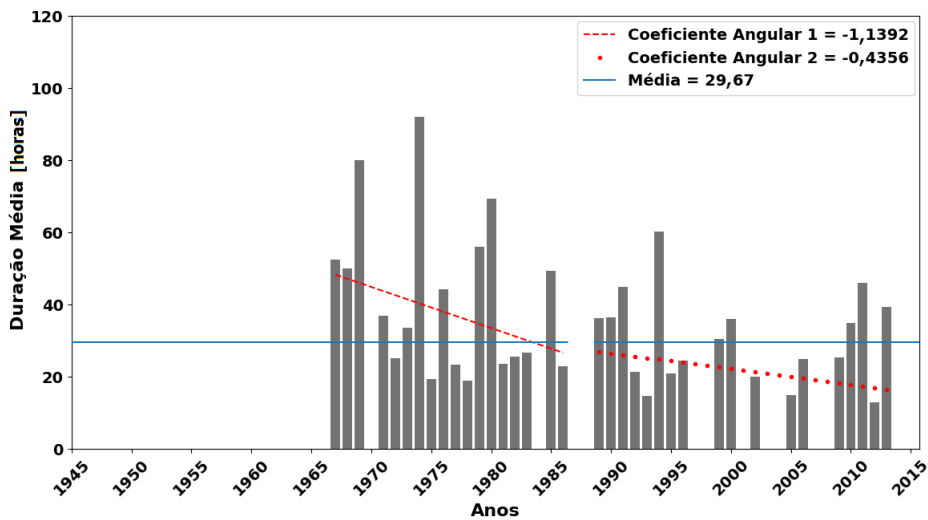
Ademais, a reta de tendência linear ajustada à série de dados revelou resposta semelhante às apresentadas e descritas anteriormente. Novamente, Cananéia apresentou tendência positiva e estatisticamente significativa enquanto que, por outro lado, Santos e Ilha Fiscal não apresentaram nível descritivo (p-valor) significativo. Vale observar que para a série de Santos, a reta de tendência ajustada apresentou posição quase igual à média traçada na Figura 11 (b), com baixo coeficiente angular (0,0008) (Tabela 6).



(a) Cananéia



(b) Santos



(c) Ilha Fiscal

Figura 11: Distribuição anual de duração média de ressacas, em horas, em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal; a barra horizontal representa a média de eventos: 23,96 horas, 26,47 horas e 29,67 horas, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhada representam as retas de tendência linear ajustadas.

Tabela 6: Análise de tendência para a duração média anual, em horas, de ressacas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: coeficiente angular (horas ano⁻¹), margem de erro e nível descritivo (p-valor) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do *gap* e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0,05.

Estação	Coeficiente angular	Margem de Erro	p-valor
Cananéia	0,47	0,17	2,42E-05
Santos	0,0008	0,23	0,99
Ilha Fiscal	(1): -1,13 e (2): -0,43	(1): 1,16 e (2): 0,83	(1): 0,23 e (2): 0,38

3.1.3 Elevação Máxima

De maneira análoga à duração, são apresentados na Tabela 7 os valores de elevação máxima superior (E^*), elevação máxima mínima (E'), elevação máxima média ($\overline{E^*}$) e desvio padrão (σ) para cada estação. Entende-se como elevação máxima o maior valor observado em um evento de ressaca. Logo, elevação máxima superior remete aos eventos com maiores elevações dentre todos de sua série e elevação máxima mínima é o oposto.

As elevações máximas observadas, diferentemente das distribuições de duração média e máxima, apresentaram padrão oposto ao exibido anteriormente. Neste presente caso, as elevações máximas se mostraram superiores em Santos, diminuíram levemente em Cananéia e significativamente em Ilha Fiscal.

Tabela 7: Elevação máxima superior (E^*), elevação máxima mínima (E'), elevação máxima média ($\overline{E^*}$) e desvio padrão (σ), em metros, das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

Estação	E^*	E'	$\overline{E^*}$	σ
Cananéia	1,51 m	0,58 m	1,03 m	0,17 m
Santos	1,44 m	0,49 m	0,95 m	0,18 m
Ilha Fiscal	1,17 m	0,53 m	0,85 m	0,13 m

Desta seção em diante, incluindo a Figura 11 e a análise de tendência, o termo elevação máxima corresponderá às maiores elevações observadas em um dado ano. Ou seja, não são valores médios, mas sim eventos únicos. Na Tabela 7, esta variável foi chamada de elevação máxima superior (E^*).

Em linhas gerais, as estações situadas na região mais ao sul exibem maiores valores de elevação do que aquela localizada na porção mais setentrional. No tocante à distribuição anual, Cananéia apresentou elevação máxima média de 1,02 m, Santos exibe um valor levemente superior, de 1,06 m e Ilha Fiscal 0,76 m. Uma observação que deve ser feita é que tais valores estão referenciados em relação à anomalia de cada série. Ou seja, se retornarmos as médias retiradas anteriormente, encontraremos elevações médias de 2,71 m, 2,51 m e 3 m para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente. Tais valores, com relação às suas respectivas séries, são superiores a dois desvios padrões, evidenciando que, de fato, também são eventos extremos.

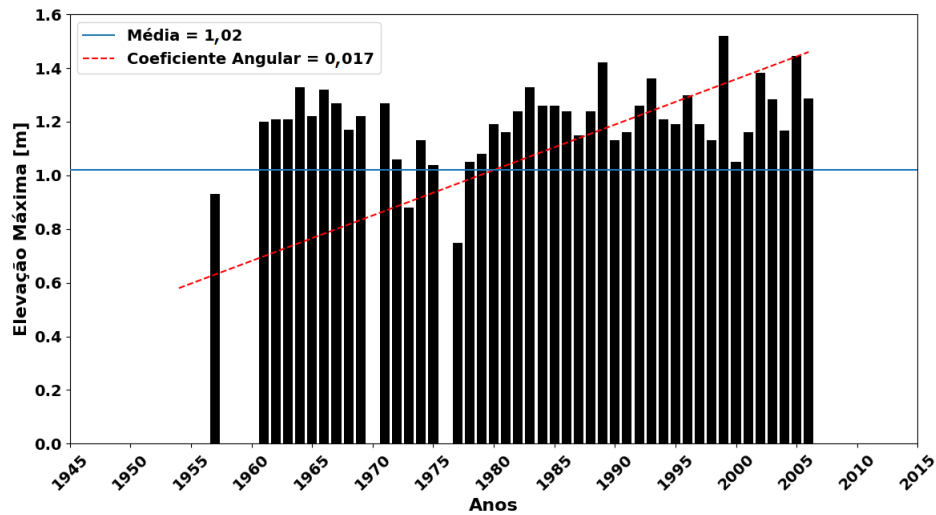
Ademais, as séries novamente apresentaram alta variabilidade interanual. Como exemplo, o ano de 1955 da série de Santos registrou um evento de, aproximadamente, 0,8 m e dois anos seguinte, a elevação máxima observada foi de quase 1,2 m, ou seja, quase 50% superior. Os desvios padrões de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal são, respectivamente, 0,44 m, 0,28 m e 0,41 m.

A característica mais marcante da distribuição da série de Cananéia é o aparente decréscimo de elevações máximas entre 1965 e 1976 e subsequente recuperação logo em 1977, quando apresentou aumento até 1982 e, daí em diante, apresentou apenas variabilidade interanual. É interessante observar

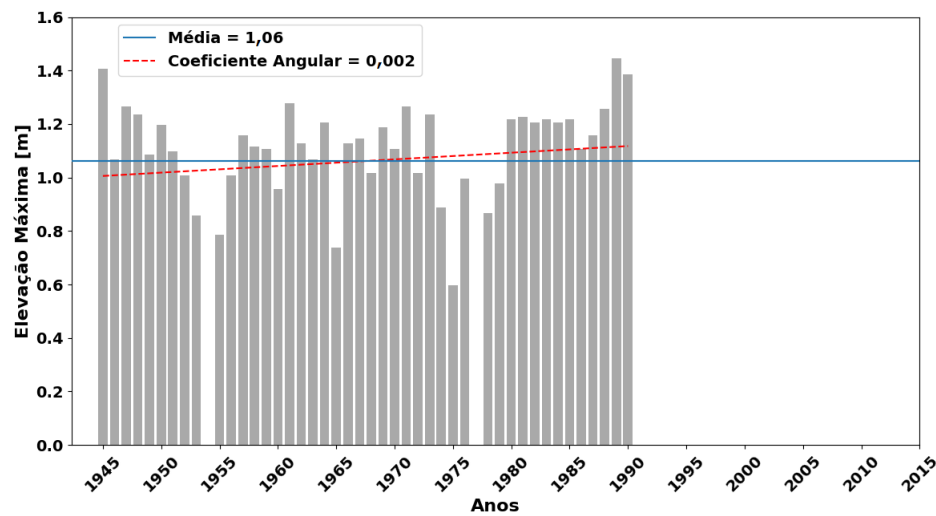
também que a série aparenta exibir também variabilidade de baixa frequência.

Um dos padrões distintos obtidos diz respeito à série de Santos. Entre 1945 e 1954, a mesma apresentou uma diminuição na elevação máxima de ressacas, sendo tal variação facilmente visualizada na Figura 11 (b). Após este período, a série apresentou variabilidade interanual de eventos, como era esperado, mas não há indícios visuais de uma suposta tendência até o ano de 1974, quando volta a ter uma leve diminuição nas elevações máximas. Após 1978, os valores voltam a aumentar até 1980, mantendo-se estáveis, decrescem levemente em 1986 e apresentam aumento até o fim da série. O começo e o fim da série, como relatado, exibem características opostas.

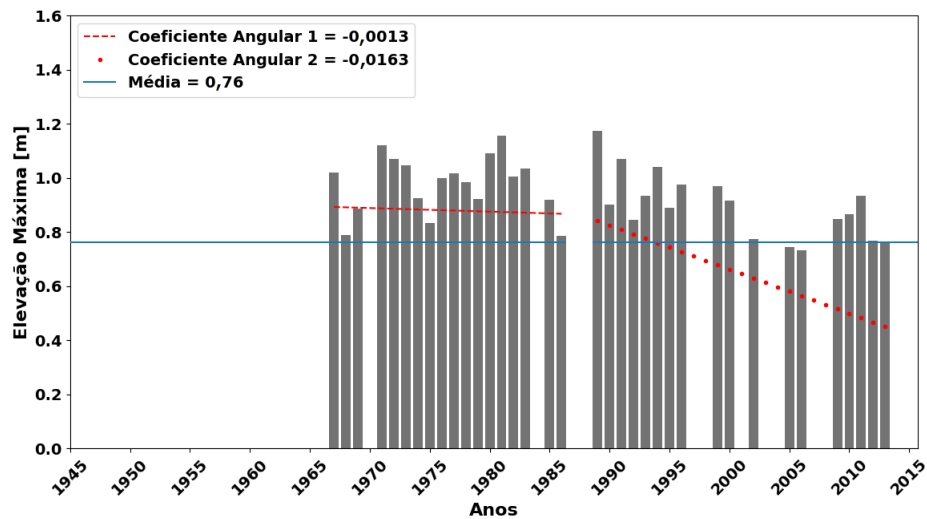
É necessário observar também que aqueles eventos que apresentaram elevação máxima entre 0,6 m e 0,8 m na série de Ilha Fiscal e Santos provavelmente ocorreram no fim do período de maré de sizígia, quando as amplitudes são inferiores em relação ao início da fase lunar.



(a) Cananéia



(b) Santos



(c) Ilha Fiscal

Figura 12: Distribuição anual de elevação máxima, em metros, de ressacas em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal. A barra horizontal representa a média de eventos: 1,02 m, 1,06 m e 0,76 m, respectivamente. As linhas tracejadas e pontilhadas representam as retas de tendência linear ajustadas.

No que concerne à análise de tendência, o mesmo padrão de distribuição observado anteriormente também foi constatado aqui. Ou seja, Cananéia apresentou tendência positiva estatisticamente significativa e Santos e Ilha Fiscal não apresentaram níveis descritivos significativos ($p\text{-valor} > 0,05$) (Tabela 8).

Tabela 8: Análise de tendência de elevação máxima de ressacas, em metros, nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal: coeficiente angular (m ano^{-1}), margem de erro e nível descritivo ($p\text{-valor}$) da análise. Para Ilha Fiscal, (1) representa o período antes do *gap* e (2) o período após o mesmo. Considera-se nível de significância de 0.05

Estação	Coeficiente angular	Margem de Erro	p-valor
Cananéia	0,017	0,005	6,12E-06
Santos	0,002	0,05	0,43
Ilha Fiscal	(1): -0,0013 e (2): -0,0163	(1): 0,02 e (2): 0,01	(1): 0,91 e (2): 0,17

Já com relação aos resultados obtidos entre a avaliação das variáveis número de eventos, duração média (\bar{D}), em horas, e elevação máxima média (\bar{E}^*), em metros, juntamente com as fases da ENSO, foi obtido que a fase neutra da oscilação foi aquela que apresentou o maior número de eventos (Tabela 9). O número de eventos na fase neutra representa 57,8% 51,8% e 60,7% das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente.

Nas estações de Cananéia e Santos o *El Niño* foi o segundo modo que apresentou maior quantidade de eventos, correspondendo a, respectivamente, 25,8% e 24,3% de suas respectivas séries. Ainda com relação a estas duas estações, o modo *La Niña* representou 16,2% e 15,6% do total de eventos em cada série, respectivamente. Em Ilha Fiscal se observou um padrão oposto: a fase *La Niña* foi a segunda com maior número de eventos, correspondendo à 25,2% do número total de ressacas, enquanto que o *El Niño* representou 14% da série.

Tabela 9: Número de eventos, duração média (\bar{D}), em horas, e elevação máxima média (\bar{E}^*), em metros, de ressacas observadas em cada fase do ENSO: neutra, *El Niño* e *La Niña*, nas estações de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

	Neutra			<i>El Niño</i>			<i>La Niña</i>		
	Eventos	\bar{D}	\bar{E}^*	Eventos	\bar{D}	\bar{E}^*	Eventos	\bar{D}	\bar{E}^*
Cananéia	121	29,7 horas	1,03 m	54	27,5 horas	1,03 m	34	28 horas	1,00 m
Santos*	83	29,7 horas	0,97 m	39	24,7 horas	0,92 m	25	31,9 horas	0,89 m
Ilha Fiscal	65	35,8 horas	0,85 m	15	25,7 horas	0,81 m	27	36,1 horas	0,89 m

(*): O índice ONI é contado a partir de 1950. Logo, todos os eventos de Santos anteriores a 1950 (13) foram desconsiderados.

No tocante à duração média, nas três estações essa variável apresenta maiores valores na fase neutra, diminui na fase quente do ENSO e volta a aumentar nos períodos de *La Niña*. Em termos quantitativos, para Cananéia a fase neutra apresentou duração média superior em, aproximadamente, 3% comparativamente à duração média geral (Tabela 4), enquanto que nas fases de *El Niño* e *La Niña* as durações são inferiores em 4,6% e 3% com relação à média geral da série, respectivamente. Já para Santos, a duração média na fase neutra foi 2,2% maior que a média geral da série, no *El Niño* a duração média encontrada foi inferior em 14,9% e na fase fria do ENSO a duração média é superior à média da série em 9,7%. Para Ilha Fiscal, a fase neutra apresentou aumento de 3,8% de duração com relação à média da série, o *El Niño* apresentou grande diminuição na duração média, cerca de 25,7%, e *La Niña* apresentou aumento de 4,7%.

Já com relação à elevação máxima média, há discordância entre as estações. Cananéia apresenta

valores médios semelhantes nas fases neutra e quente do ENSO, sendo estes muito próximos à média geral da série, e valor inferior quando em fase de *La Niña*, média inferior em 3% com relação à média geral. Por outro lado, Santos exibiu diminuição de elevação máxima média conforme se altera de fase neutra (2,2% maior), para *El Niño* (2,6% inferior) e fase fria do ENSO (5,5% inferior). Por fim, eventos de ressaca em Ilha Fiscal apresentaram elevações superiores quando estes ocorreram em períodos de *La Niña* (3,8% superior à média geral), inferior em períodos de *El Niño* (-5,5%) e se manteve igual quando em fase neutra.

Quando os três valores máximos de cada variável para cada série foram analisados, identificou-se um total de 47 anos que se enquadram dentro deste grupo. Vale salientar que dentro desses 3 valores máximos propostos para cada variável, mais do que três anos podem apresentar tais valores, caso este se repita. Por exemplo, os três valores máximos do número de eventos na série de Santos foram 6, 7 e 9 eventos donde, destes, oito anos apresentaram 6 eventos (1952, 1961, 1969, 1970, 1981, 1982, 1988 e 1989), um ano (1957) apresentou 7 eventos e um ano (1980) apresentou 9 eventos. Destes, cinco deles (50%) ocorreram em anos de *El Niño* (1952, 1957, 1969, 1980 e 1982); dois em anos de *La Niña*: 1970 e 1989; dois anos neutros: 1961 e 1981 e um ano sob a influência tanto da fase quente quanto da fase fria do ENSO: 1988. Ainda com relação a Santos, dos três eventos que apresentaram maiores durações (99 horas - 1969, 94 horas - 1985 e 69 horas - 1980), dois deles ocorreram em ano de *El Niño* (1969 e 1980, 66,6%) e um no ano de *La Niña*, 33,3%. Já para a duração média, um evento ocorreu durante a fase fria do ENSO (1985 - 48,6 horas), um em ano neutro (1967 - 41 horas) e um em ano que ambas as fases foram registradas (1983 - 41,6 horas). Por último, para a elevação máxima, dois dos três valores máximos ocorreram em anos neutros (1961 - 1,27 m e 1990 - 1,38 m) e um valor máximo ocorreu em ano de *La Niña*: 1,44 m - 1989.

Para o número de eventos em Cananéia, quatro anos (1980, 1992, 1993 e 2003) apresentaram os 3 valores superiores: 8 eventos, 9 eventos, 8 eventos e 12 eventos, respectivamente. Destes quatro anos, três (75%) ocorreram durante a fase quente do ENSO (1980, 1992 e 2003) e o ano de 1993 foi um ano neutro. Com relação à duração máxima, dois valores máximos ocorreram em anos de *El Niño* (1994 - 78 horas e 2002 - 89 horas) e um em ano de *La Niña* (1985 - 87 horas). Já para a duração média, os três valores discrepantes ocorreram na fase fria do ENSO: 1996 - 54 horas; 1999 - 41 horas e 2006 - 51 horas. No caso da elevação máxima, dois dos três valores máximos ocorreram em anos de *La Niña* (1989 - 1,41 m e 1999 - 1,51) e um em ano em que as duas fases do ENSO foram observadas: 2005 - 1,44 m.

Para Ilha Fiscal, 6 anos apresentaram os 3 maiores números de eventos donde, destes, 2 foram registrados *El Niño* (1977 e 1994); 2 anos (1989 e 1999) eram de *La Niña* e 2 anos as duas fases foram registradas (1973 e 1983). Para a duração máxima, dois anos eram anos da fase quente do ENSO (1979 - 98 horas e 1994 - 108 horas) e o outro ano ambas fases foram registradas (1976 - 110 horas). Para a duração média, dois dos três valores discrepantes ocorreram em ano de *El Niño* (1969 - 80 horas e 1980 - 69,5 horas) e o outro valor ocorreu em ano de *La Niña* (1974 - 92 horas). Por último, para elevação máxima, dois dos três maiores valores ocorreram em anos de *La Niña* (1971 - 1,12 m e 1989 - 1,17 m) e um em ano neutro (1981 - 1,15 m).

Dos 47 eventos discrepantes encontrados, em 18 deles (38,2%) ocorreram em ano de *El Niño*, em 16 deles a fase *La Niña* (34%) foi observada, em 6 ambas as fases foram identificadas (12,7%) e em 7 nenhuma das fases atuaram (14,8%). Em suma, em quase 90% dos três maiores valores observados, considerando todas as variáveis de todas as séries, constatou-se a presença de *El Niño* e/ou *La Niña*. Vale ressaltar que nesta análise, diferentemente da anterior, não se consideraram eventos individuais, mas sim se em determinado ano foi observado ou não a presença das fases quente e/ou fria do ENSO.

Sumarizando esta subseção, encontrou-se que os eventos de ressacas apresentaram variabilidade interanual em todas as variáveis consideradas, especialmente no número de eventos e duração máxima. Além disso, apenas a estação de Cananéia apresentou para todas as variáveis analisadas tendência positiva e significativa. Os eventos se concentraram majoritariamente na fase neutra do ENSO e diferenças significativas pontuais de duração média e máxima elevação média foram encontradas. Por fim, ao se considerar os três valores máximos de cada variável para cada série, isto é, considerando séries anuais

ao invés de eventos individuais, dos 47 anos que se encaixaram neste grupo "extremo", em quase 90% deles se observou a presença da fase quente e/ou fria do ENSO.

3.2 Variabilidade Sazonal

Nesta subseção é apresentada a variabilidade sazonal (primavera, verão, outono e inverno) das mesmas variáveis exibidas anteriormente. De modo análogo, a sequência de apresentação é composta por número de eventos (frequência), duração máxima, duração média e elevação máxima de ressacas encontradas nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. Deve-se lembrar que os períodos de estações do ano foram determinados utilizando a convenção astronômica.

3.2.1 Frequência

É apresentado na Tabela 10 o número de eventos por estações do ano observados em Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. Este resultado aponta que a estação de outono é aquela em que mais se observaram eventos de ressaca (aproximadamente 37,6 %). Após a esta, o inverno ocupa a segunda colocação, perfazendo um total de 143 ressacas que correspondem a cerca de 30% do número total de eventos. Por conseguinte, verão e primavera foram as estações em que menos se observou tal fenômeno, representando, respectivamente, 19,5% e 12,8% do número total de eventos. Tal distribuição, isto é, predominância de outono, seguida por inverno, verão e primavera foi encontrada, sem exceção, para as três séries.

Tabela 10: Distribuição sazonal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para as estações de primavera, verão, outono e inverno.

		Estações do Ano				
		Primavera	Verão	Outono	Inverno	Total
Estações	Cananéia	30	47	73	59	209
	Santos	24	30	58	48	160
	Ilha Fiscal	7	16	48	36	107
	Total	61	93	179	143	476

Ao se avaliar os meses que compõem cada estação do ano, encontrou-se que abril, maio, junho e julho foram, em todas as séries, aqueles que mais apresentaram eventos de ressaca (Tabela 11). Juntos, esses quatro meses correspondem a, aproximadamente, 53% dos casos observados. De fato, este resultado está de acordo com o apresentado anteriormente: as estações de outono e inverno são as que mais apresentam eventos.

Tabela 11: Distribuição mensal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Meses											
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Estações	Cananéia	14	18	17	22	25	26	29	15	11	10	11	11
	Santos	11	8	12	19	19	23	21	13	13	8	6	7
	Ilha Fiscal	4	8	7	17	15	18	17	8	8	2	2	1
	Total	29	34	36	58	59	67	67	36	32	20	19	19

Por outro lado, os meses de outubro, novembro, dezembro e janeiro foram aqueles que menos apresentaram casos de ressaca. Somados, estes meses perfazem somente 18% do total de eventos observados. Apesar da predominância desses quatro meses, os coeficientes de variação das séries apontam que há

alta dispersão de dados. Em outras palavras, a variabilidade mensal de eventos de ressaca é elevada. Os desvios padrões para as séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal são, respectivamente, 6,34, 5,58 e 6,04.

Como o inverno austral se inicia em 21 de junho, grande parte dos eventos são contabilizados ainda como outono, não como inverno. Caso a convenção meteorológica fosse empregada, os meses de inverno (junho, julho e agosto) apresentariam maior número de eventos e esta estação iria sobrepujar o outono (março, abril e maio). Caso tal convenção fosse considerada, ainda assim a primavera contaria com menos eventos que verão.

3.2.2 Duração

Com relação à distribuição sazonal de duração máxima de ressacas, o padrão encontrado é semelhante ao resultado obtido para o número de eventos, isto é, as estações de outono e inverno são aquelas que apresentaram os eventos mais duradouros das séries. No caso de Cananéia e Santos, outono foi a estação com evento mais longo, 90 e 100 horas, respectivamente. Para Ilha Fiscal, o inverno foi a estação que obteve o evento mais duradouro, de 110 horas (Tabela 12). Com exceção da primavera, nas outras três estações também foi encontrada a variabilidade espacial apresentada na subseção anterior, isto é, aumento da duração de eventos conforme se avança para o norte (Tabela 4).

Tabela 12: Distribuição sazonal de duração máxima de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Estações do Ano			
		Primavera	Verão	Outono	Inverno
Estações	Cananéia	65	53	89	78
	Santos	43	62	99	76
	Ilha Fiscal	46	66	98	110

De maneira análoga, a variabilidade mensal da duração máxima dos eventos de ressaca apresentou padrão de distribuição semelhante ao do número de eventos. Isto é, novamente, os meses de abril, maio, junho e julho apresentaram valores expressivos. Entretanto, diferentemente da distribuição do número de eventos por meses do ano, a duração máxima também se mostrou importante em meses como agosto, fevereiro e setembro (Tabela 13). Ademais, diferentemente do observado anteriormente, o valor máximo médio encontrado de duração não se deu em Ilha Fiscal, mas sim em Cananéia. Os desvios padrões são 15,44 horas, 18,55 horas e 26,42 horas, para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente.

Novamente, vale lembrar que esses valores não correspondem à médias, mas sim a eventos únicos. Por exemplo, para o mês de junho se considerou a duração máxima observada em uma ressaca dentre todas as presentes naquele período.

Tabela 13: Distribuição mensal da duração máxima de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Meses												
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Média
Estações	Cananéia	47	47	53	62	74	89	71	72	61	41	65	32	59,5
	Santos	43	40	62	68	67	99	76	69	44	36	39	43	57,1
	Ilha Fiscal	32	66	49	98	73	110	73	68	46	39	17	35	58,8

A variabilidade da duração média sazonal, semelhantemente às outras distribuições sazonais apresentadas, possui valores mais significativos no outono e inverno nas três séries consideradas, sendo a primeira majoritária em Cananéia e Santos e a segunda mais significativa em Ilha Fiscal. Ademais,

como já indicado na variabilidade anual de duração dos eventos, Ilha Fiscal foi a estação que apresentou, em média, eventos mais duradouros para todas as quatro estações do ano (Tabela 14).

Tabela 14: Distribuição sazonal de duração média de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Estações do Ano			
		Primavera	Verão	Outono	Inverno
Estações	Cananéia	23,6	24,6	33,7	29
	Santos	20,7	26,4	33,1	29,9
	Ilha Fiscal	30,4	30,5	34,8	36,5

Ao se analisar a variabilidade mensal da duração média de ressacas, o padrão encontrado não é tão evidente quanto o das distribuições apresentadas anteriormente. Na realidade, apesar dos meses frios terem apresentado ainda certa predominância, mais especificamente de abril à julho, outros meses também se mostram importantes como, por exemplo, março, agosto e setembro (Tabela 15). Os desvios padrões para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal são, respectivamente, 5,11 horas, 5,51 horas e 8,24 horas.

Tabela 15: Distribuição mensal da duração média de ressacas, em horas, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Meses												
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Média
Estações	Cananéia	21,8	26,4	28	29,8	35	35,9	26,1	35,4	27,6	24,9	26	17,4	27,9
	Santos	22	26,6	31,6	28,10	32,8	37,6	31	27,5	28,3	20,1	20,1	19,4	27
	Ilha Fiscal	23,7	27,8	33,7	29,8	35	46,8	34,6	34,8	33	35	10,5	35	31,6

3.2.3 Máxima Elevação

Como esperado e de maneira semelhante às outras variáveis investigadas anteriormente, as elevações máximas de ressaca são superiores nas estações frias do ano, isto é, outono e inverno. Entretanto, no caso de Ilha Fiscal, a primavera apresentou valor superior ao outono (Tabela 16).

Tabela 16: Variabilidade sazonal de elevação máxima de ressacas, em metros, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Estações do Ano			
		Primavera	Verão	Outono	Inverno
Estações	Cananéia	1,32	1,38	1,51	1,41
	Santos	1,26	1,27	1,40	1,44
	Ilha Fiscal	1,15	1,09	1,06	1,17

Ao analisar os meses que compõem as estações do ano, observa-se que a variabilidade mensal das elevações máximas não apresentaram predominância nos quatro meses mais significativos observados até o momento, isto é, abril, maio, junho e julho. Meses como setembro, outubro e março apresentaram valores tão importantes quanto abril, maio e junho (Tabela 17). Os desvios padrões para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal são, respectivamente, 0,083 metros, 0,150 metros e 0,088 metros.

Um resultado interessante que pode ser observado tanto na Tabela 16 quanto na Tabela 17 diz respeito à variabilidade espacial das elevações máximas. Com exceção do inverno (Tabela 16) e de três meses (junho, setembro e novembro - Tabela 17), todas as outras estações e meses apresentam um claro aumento de elevações máximas conforme se avança de Ilha Fiscal para Cananéia, de acordo com os resultados obtidos para a variabilidade interanual.

Tabela 17: Distribuição mensal de elevação máxima de ressacas, em metros, observada nas séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal.

		Meses												
		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Média
Estações	Cananéia	1,38	1,28	1,32	1,51	1,43	1,28	1,29	1,35	1,41	1,32	1,24	1,20	1,34
	Santos	1	1,18	1,27	1,40	1,25	1,38	1,24	1,23	1,44	1,26	0,97	1	1,22
	Ilha Fiscal	0,98	1,09	1,03	1,06	1,01	0,99	1,04	1,04	1,17	1,12	1,02	0,79	1,03

Sumarizando os resultados encontrados, foi observado que as ressacas possuem variabilidade sazonal bem definida para as três variáveis investigadas: frequência, duração e máxima elevação. As estações de outono e inverno foram as que apresentaram maior número de eventos, ressacas mais duradouras, tanto em termos máximos quanto em termos médios, e elevações máximas observadas. Ademais, a variabilidade mensal apontou que, em termos gerais, os meses de abril a julho foram aqueles que se sobressaíram.

3.3 Período 1965 - 1980

Conforme os resultados das variabilidades foram sendo obtidos no decorrer do estudo, observou-se que as variáveis investigadas aparentavam possuir certa variabilidade espacial. A primeira indicação de tal suposição se deu no número de eventos encontrados, onde a quantidade de ressacas observadas apresenta um gradiente de norte para sul. Em seguida, mas menos evidente, a duração demonstrou possuir um gradiente de Cananéia para Ilha Fiscal. Por último e semelhantemente ao número de eventos, as elevações máximas apresentaram decréscimo conforme se avança de sul para norte.

Além destes indícios, trabalhos realizados anteriormente apontam a propagação de oscilações de baixa frequência ao longo da PCSE^{14, 17}. Segundo esta última publicação previamente citada, tais oscilações submaregráficas apresentam velocidades de propagação diferentes ao longo da costa sudeste, sendo mais elevada na porção central ($10,4 \pm 0,5 \text{ m s}^{-1}$) do que na região mais ao norte ($7,7 \pm 0,3 \text{ m s}^{-1}$).

Sendo assim, considerou-se necessário também direcionar certo esforço na investigação da variabilidade espacial de ressacas na PCSE. Em específico, analisaram-se as ressacas presentes no período entre 01/01/1965 e 05/05/1980, simultâneo entre as três estações e sem *gaps*. Neste íterim, as estações de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal apresentaram, respectivamente, 39, 49 e 40 eventos. Foi constatado que 26 eventos ocorreram entre Cananéia e Santos e, destes, 11 também foram identificados em Ilha Fiscal.

Tendo isto em vista, ao avaliar a elevação máxima dos eventos, observou-se, em média, correspondência destes resultados com a distribuição apresentada anteriormente. Isto é, maiores valores em Cananéia (1,01 m), intermediário em Santos (0,9 m) e menores em Ilha Fiscal (0,88 m). Já para a duração, o padrão encontrado é semelhante ao descrito anteriormente: em média, há um gradiente de duração de sul para norte. Isto é, os eventos duram menos em Cananéia do que em Ilha Fiscal. Os valores médios encontrados para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal foram, respectivamente, 25,4 horas, 29,1 horas e 39,9 horas.

Ao analisar os eventos por grupos distintos, ou seja, um grupo formado por ressacas identificadas nas três estações (11), as que foram observadas em Cananéia e em Santos mas não em Ilha Fiscal (15) e aquelas que ocorreram exclusivamente em um local, diferentes padrões foram encontrados. Neste tocante, são exibidos na Tabela 18 os resultados de duração média (\bar{D}), em horas, e a elevação máxima

média ($\overline{E^*}$), em metros, obtidos em cada grupo distinto: os eventos exclusivos de cada estação (Exclus.), os observados tanto em Cananéia quanto em Santos (CS) e, por último, os identificados nas três estações (CSI). Com relação às ressacas "exclusivas", Cananéia apresentou 13 eventos, Santos 23 e Ilha Fiscal 23. O número esperado de eventos exclusivos de Ilha Fiscal seria 29 (40 - 11), entretanto, observou-se que 6 deles ocorreram simultaneamente à Santos ou Cananéia separadamente (3 em cada caso)

Tabela 18: Duração média (\overline{D}), em horas, e elevação máxima média ($\overline{E^*}$), em metros, para eventos observados exclusivamente nas estações (Exclus.), no eixo Cananéia - Santos (CS) e em todas as estações (CSI).

	Exclus.		CS		CSI	
	\overline{D}	$\overline{E^*}$	\overline{D}	$\overline{E^*}$	\overline{D}	$\overline{E^*}$
Cananéia	18,6 horas	1,01 m	28,66 horas	0,99 m	29,09 horas	1,02 m
Santos	24,9 horas	0,84 m	26,33 horas	0,92 m	41,63 horas	0,98 m
Ilha Fiscal	34,60 horas	0,86 m			59,18 horas	0,93 m

Em termos gerais, ao se analisar a Tabela 18 é possível verificar que, novamente, há indícios que tais resultados suportam a descrição realizada anteriormente. Ou seja, de que existe variabilidade espacial tanto da duração quanto da máxima elevação dos eventos.

Ademais, outro resultado observado foi a diferença presente entre os eventos que ocorreram no eixo Cananéia - Santos (CS) daqueles identificados nas três estações (CSI). Neste tocante, os eventos que foram observados ao longo da PCSE apresentaram valores mais elevados de duração média e elevação máxima média do que aqueles que ocorreram apenas na porção sul-central da região ou exclusivamente. Foi também verificada a variabilidade sazonal das ressacas considerando estes mesmos três grupos onde, dos 11 eventos identificados nas três estações, 7 ocorreram no outono, 2 no verão, 1 no inverno e 1 na primavera. Por outro lado, dos 15 eventos observados entre Cananéia e Santos, 6 ocorreram no verão, 4 na primavera, 3 no inverno e 1 no outono. Já para os eventos exclusivos, os resultados são exibidos na Tabela 16.

Tabela 19: Variabilidade sazonal de eventos de ressaca das séries de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal para as estações de Primavera, Verão, outono e Inverno entre o período de 1965 e 1980. Estes eventos são exclusivos de cada estação.

		Estações do Ano				
		Primavera	Verão	Outono	Inverno	Total
Estações	Cananéia	3	6	2	2	13
	Santos	4	4	9	6	23
	Ilha Fiscal	3	5	11	10	29
	Total	10	15	22	18	65

Por último, considerando as velocidades de propagação das oscilações de baixa frequência observadas por Dottori e Castro¹⁷ e as distâncias entre as estações apresentadas na subseção *Dados*, estimou-se o tempo necessário para uma oscilação submaregráfica se propagar de Cananéia até Santos (200 km) e de Cananéia até Ilha Fiscal (545 km). Empregando os referidos valores, encontrou-se que o intervalo de tempo é aproximado entre 5 horas e 5,5 horas para o primeiro trajeto (Cananéia à Santos) e entre 15 e 17 horas para o percurso total entre Cananéia e Ilha Fiscal.

Tendo empregado novamente o método de correlação com *lag*, só que dessa vez aplicado sobre o sinal residual, encontrou-se que, em média, a defasagem entre os 26 eventos detectados tanto em Cananéia quanto em Santos é de 5 horas. Este valor está de acordo com inferido anteriormente, baseado nas velocidades propostas por Dottori e Castro¹⁷.

Estes 26 eventos foram então decompostos em três grupos distintos:

1. Um grupo contendo os 15 eventos que foram identificados exclusivamente entre o eixo Cananéia - Santos;
2. Um segundo grupo contendo os 11 eventos que foram encontrados nas três estações, mas considerando somente as estações de Cananéia e Santos;
3. Um terceiro grupo contendo os 11 eventos que foram encontrados nas três estações, mas considerando somente as estações de Cananéia e Ilha Fiscal;

Para o primeiro grupo foi observada uma defasagem média de 4 horas. Já com relação ao segundo e terceiro grupos, a defasagem observada foi de 6,4 horas e 21,4 horas, respectivamente. Evidentemente estes resultados não são suportados perfeitamente pelos cálculos realizados anteriormente.

Apesar de serem valores diferentes do esperado, duas ressalvas devem ser feitas. A primeira delas é que a máxima correlação de um evento ocorreu para o *lag* 28 horas positivas, ou seja, o evento ocorreu antes em Santos do que em Cananéia (Figura 13). O outro evento com defasagem anômala se refere ao grupo 3, onde a correlação máxima com *lag* entre Cananéia e Ilha Fiscal se deu em 34 horas (figura não exibida). Caso estes fossem desconsiderados, a máxima correlação com *lag* para o segundo grupo seria de 4,25 horas e para o terceiro grupo de 20,19 horas.

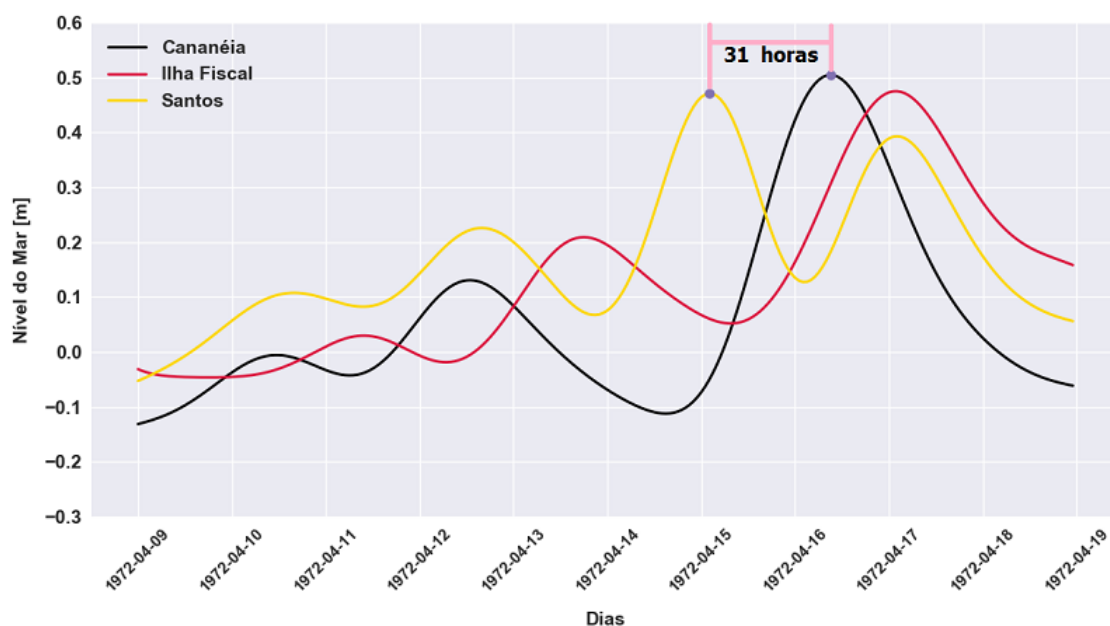


Figura 13: Maré meteorológica do evento de ressaca do dia 14/04/1972, quando tal evento foi detectado primeiramente em Santos e depois em Cananéia. A defasagem de tempo entre as máximas elevações é de 31 horas e a máxima correlação entre o sinal de Cananéia e Santos (0,53) foi em 28 horas. Os sinais preto, amarelo e vermelho representam o sinal filtrado de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente.

São apresentadas na Figura 14 as curvas de correlação com *lag* obtidas entre Cananéia e Santos, Santos e Ilha Fiscal e Cananéia e Ilha Fiscal. Ademais, nesta mesma figura são apresentados os pontos de maior correlação observados.

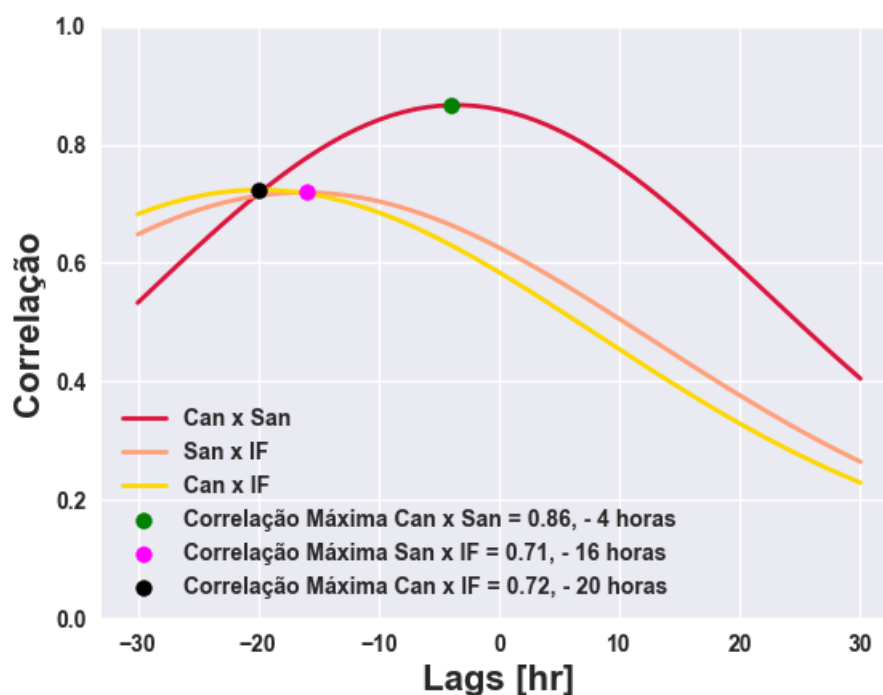


Figura 14: Curvas de máxima correlação com *lag* encontradas para as estações de Cananéia e Santos (curva vermelha), Santos e Ilha Fiscal (curva rosácea) e entre Cananéia e Ilha Fiscal (curva amarela). Os pontos de correlação máxima são representados em suas respectivas curvas, onde, para Cananéia e Santos a correlação máxima (0,86) ocorreu em -4 horas (sinal verde), a correlação máxima entre Santos e Ilha Fiscal (0,71) ocorreu em -16 horas (sinal rosa) e a correlção máxima entre Cananéia e Ilha Fiscal (0,72) ocorreu em -20 horas (sinal preto). O sinal negativo indica o sentido de deslocamento do sinal da segunda curva com relação à primeira.

3.4 Intensidade das Ressacas e o Papel de cada Componente

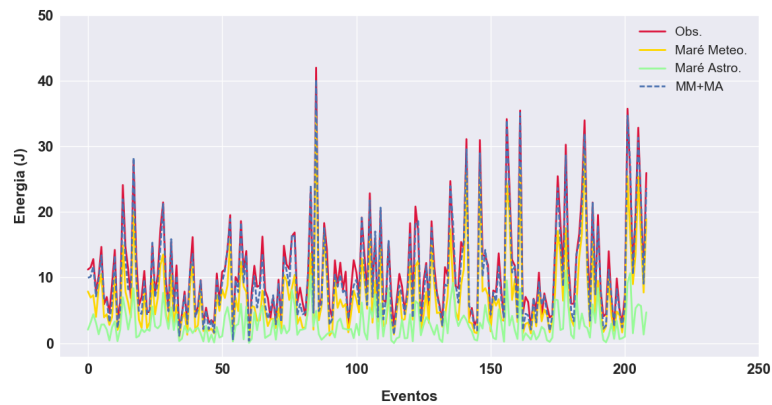
São exibidos na Tabela 20 os resultados de estimativa de energia (ETM) de ressacas bem como o papel de suas componentes nos eventos a partir do emprego de parte do Teorema de Parseval (Equação 4). Como é possível observar na Tabela 20, as marés meteorológicas significativas contribuíram com cerca de 65%, em média, da energia total dos eventos de ressaca registrados. Ademais, apesar do papel das marés meteorológicas significativas (MM) de Cananéia terem apresentado uma participação levemente superior às demais, o resultado mais evidente ocorre na distribuição espacial do papel da maré astronômica (MA), onde há um claro aumento de sul para norte e, conseqüentemente, as séries somadas (MM + MA) representam melhor o sinal observado estimado (ETM).

Tabela 20: Média estimada da energia total dos eventos de ressaca (ETM (J)), porcentagem média da contribuição de marés meteorológicas significativas (% MM), porcentagem média da contribuição da maré astronômica (% MA), e a soma de ambas (% MM + % MA), relativas à ETM (J).

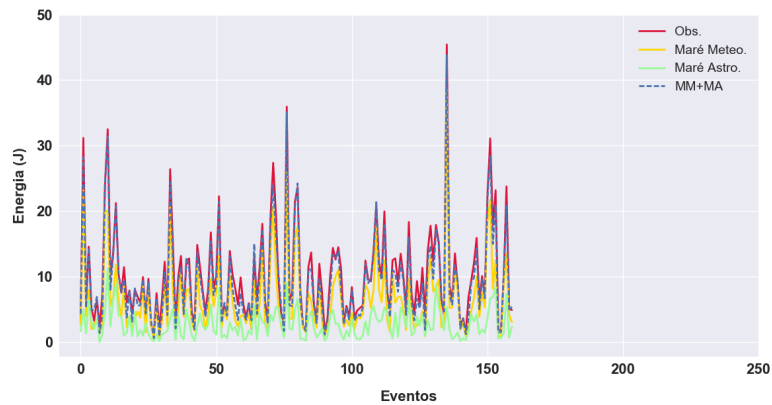
	ETM (J)	% MM	% MA	% MM + % MA
Cananéia	11,11	62,67	27,12	89,80
Santos	10,27	62,05	27,37	89,42
Ilha Fiscal	8,80	61,27	34,47	95,74

Na Figura 15 é exibida a energia total de cada evento de ressaca (Obs.), bem como a energia total de cada evento de maré meteorológica significativa (Maré Meteo. = MM) e maré astronômica (Maré Astro.

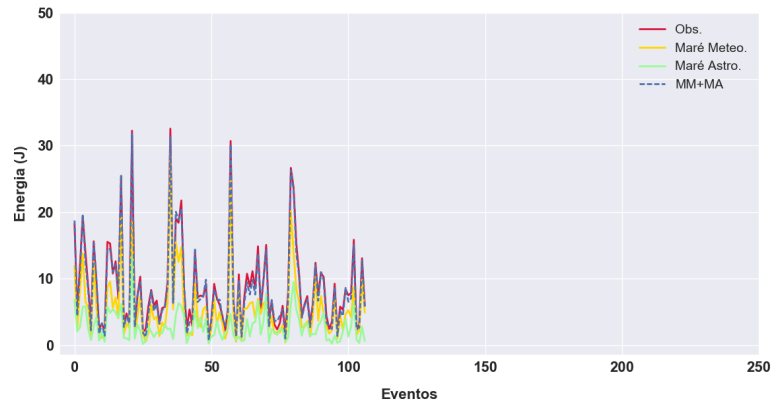
= MA). Ademais, a linha pontilhada azul representa a soma das energias totais de MA e MM. Os Skills obtidos entre a soma de MM + MA com a energia total observada de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal são, respectivamente, 0,989, 0,990 e 0,996.



(a) Cananéia



(b) Santos



(c) Ilha Fiscal

Figura 15: Estimativa de energia total (J) de ressacas (Obs. - linha cheia vermelha), da maré meteorológica significativa (Maré Meteo. - linha cheia amarela) e astronômica (Maré Astro. - linha cheia verde) associadas aos eventos, e a soma das duas (MM + MA), em (a) Cananéia, (b) Santos e (c) Ilha Fiscal.

Por último, são apresentados na Figura 16 gráficos de dispersão entre a energia total (J) obtida para cada série e a duração dos eventos e energia total com a máxima elevação observada.

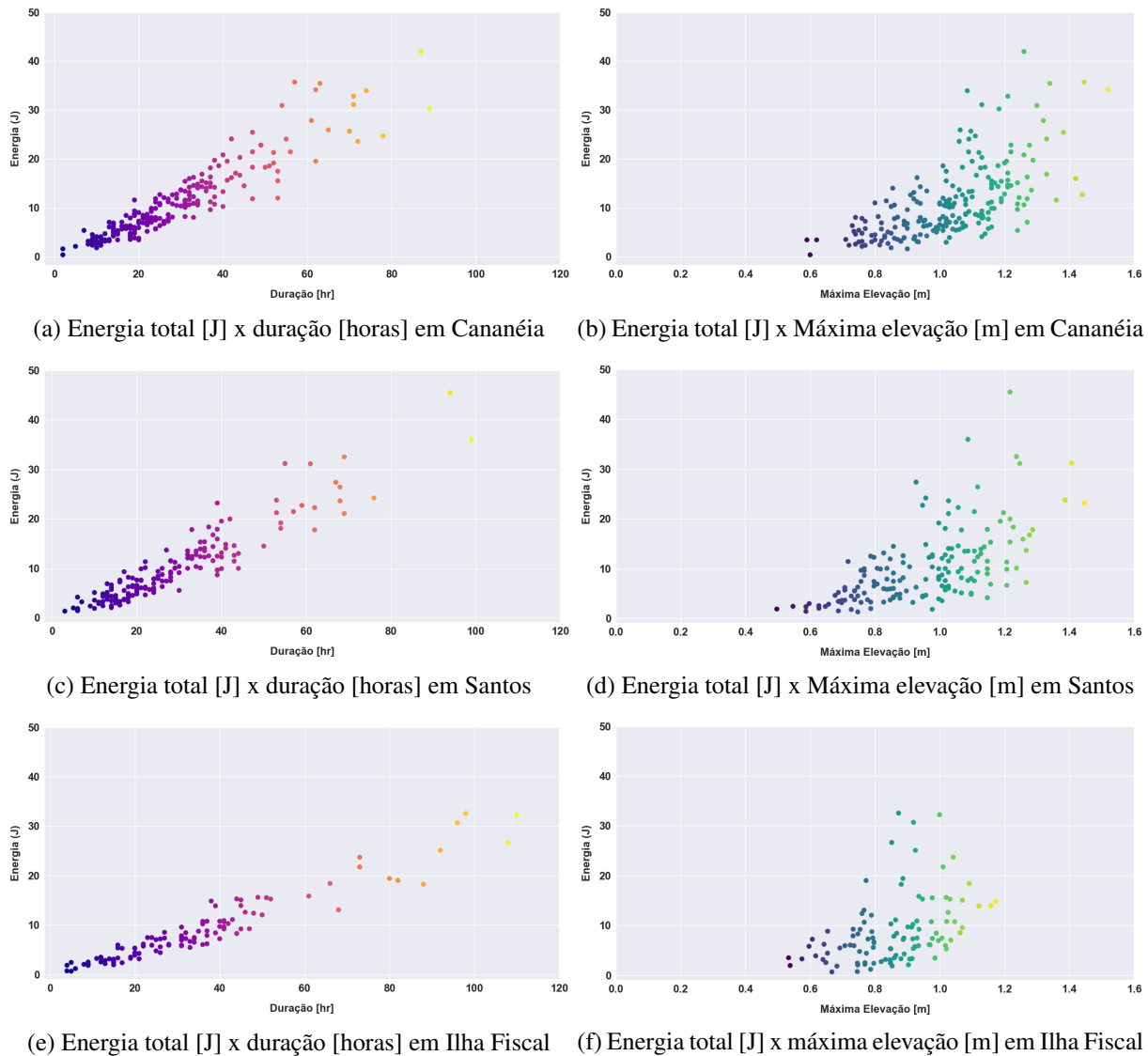


Figura 16: Gráficos de dispersão entre energia [J] e duração [horas], coluna à esquerda, e entre energia total e máxima elevação [m], coluna à direita, para as estações de Cananéia (linha superior), Santos (linha intermediária) e Ilha Fiscal (linha inferior).

Uma simples análise visual da Figura 16 pode indicar que a relação entre energia total das ressacas e duração de eventos é superior do que a relação entre energia total e máxima duração. Ao se calcular o coeficiente de correlação de Pearson, foi obtido que, de fato, tal suposição é real. No primeiro caso, apresentados na coluna situada à esquerda da Figura 16, os coeficientes calculados foram 0,92, 0,92 e 0,95 para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente. Já para a relação energia total x máxima elevação, os valores obtidos foram 0,64, 0,60 e 0,42, para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente.

4 Discussão

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos anteriormente. Trabalhos produzidos na região, os quais se baseiam majoritariamente em publicações de notícias de jornais ou documentos governamentais, serão comparados com os resultados encontrados neste estudo. Além destes, estudos conduzidos no exterior também serão utilizados para suportar os resultados encontrados aqui.

Primeiramente, antes de se iniciar verdadeiramente esta seção, deve ficar claro que a definição de ressaca aqui empregada tem por objetivo analisar tais eventos energéticos por meio das elevações do nível do mar junto à costa. Esta abordagem é uma das diversas maneiras de se estudar o fenômeno. Sendo assim, ao se comparar os resultados aqui encontrados com outras pesquisas que abordam o mesmo tema mas sob uma óptica distinta, tais resultados podem convergir ou não. Em outras palavras, um evento de ressaca observado por Fundespa³², por exemplo, pode também ser encontrado, ou não, neste estudo.

Dando de fato início à Discussão, julga-se propício começar pelo primeiro resultado apresentado no trabalho, isto é, o número de marés meteorológicas significativas e ressacas encontrado (Tabela 2). Alterando momentaneamente a ordem de apresentação das estações, Santos será a primeira estação a ser analisada. Como se pode observar na referida Tabela, na série de Santos foram identificados 409 eventos de marés meteorológicas significativas. Tal resultado é semelhante ao observado por Campos *et al.*¹⁸, onde foram identificados 477 eventos. Apesar de ser a mesma série de dados brutos empregada em ambos os estudos, neste presente trabalho a mesma foi analisada em sua totalidade, isto é, de 1945 até 1990, enquanto que na pesquisa previamente citada o período considerado foi de 1951 a 1990. O número inferior de eventos aqui observado, apesar do maior período analisado, provavelmente se relaciona ao método de filtragem empregado. Caso a frequência de corte aqui estabelecida (40 horas) fosse a mesma aplicada por Campos *et al.*¹⁸ (28 horas), o número de eventos observados em Santos seria de 642.

Com relação às ressacas, o número de eventos observados em Santos foi inferior aos de maré meteorológicas significativas (cerca de 39%). Este decréscimo já era esperado, tendo em vista que a sincronização destas últimas com as marés de sizígia acarretaria na desconsideração de alguns eventos. Uma forma de se avaliar tal sincronização é analisar quantas ressacas observadas em outros estudos ocorreram durante o período de marés de grandes amplitudes. Para trabalhos que se baseiam em notícias, tais eventos podem ocorrer também em marés de quadratura ou na transição entre os períodos, o que não se considera aqui. Apesar de sabidamente os métodos empregados serem distintos e que por essa razão ponderações devem ser estabelecidas, a maioria dos trabalhos encontrados durante o levantamento bibliográfico na região foram realizados a partir de levantamentos em jornais e/ou arquivos públicos.

Dito isto, no estudo realizado por Fundespa³², o número de ressacas encontradas em Santos durante o período de Lua Nova ou Cheia perfizeram 49,4% dos casos. Tanto neste estudo previamente citado quanto em outros (*e.g.* Souza *et al.*⁴⁹), a porcentagem de ressacas observadas durante maré de sizígia é superior à obtida neste trabalho. Tal diferença pode ser atribuída à definição de ressaca empregada diferentemente em cada trabalho. Aqui, por exemplo, a definição utilizada possui um caráter estatístico mais forte do que nos trabalhos citados, os quais se baseiam, em sua grande maioria, em artigos de jornais. Dessa forma, ao considerarmos marés meteorológicas significativas, a probabilidade de um evento como este estar presente em uma preamar de maré de sizígia é aproximadamente a mesma dele também estar presente em preamares de marés de quadratura ou na transição entre as fases. Por outro lado, como os jornais noticiam especialmente os eventos destrutivos e estes, por sua vez, necessitam de grandes elevações, ou seja, a conjunção entre marés meteorológicas significativas e preamares de sizígia, é natural que sob esta óptica sejam identificados mais eventos de ressaca durante as fases de Lua Nova ou Cheia.

Dando continuidade, para as duas outras estações analisadas, Cananéia e Ilha Fiscal, infelizmente não foram encontrados trabalhos que apontassem o número de marés meteorológicas significativas ou ressacas a fim de compará-las com os valores aqui identificados. Entretanto, o padrão de distribuição observado na Tabela 2, isto é, maior número de eventos encontrados na porção sul e diminuição dos mesmos conforme se avança para norte, é justificado pela gênese e pelo deslocamento das forçantes que geram as ressacas (Rodrigues *et al.*¹³). Distribuição semelhante foi encontrada por Camargo *et al.*⁴⁴.

No tocante a variabilidade espacial de frequência, máxima elevação e duração, foi mencionado diversas vezes na seção Resultados os gradientes que tais variáveis apresentam: de norte para sul, no caso da frequência e máxima elevação, e de sul para norte, no caso da duração. Para os dois primeiros, tal distribuição pode estar relacionada com a explanação realizada no parágrafo anterior, isto é, tais observações possivelmente podem ser atribuídas ao fato de que feições atmosféricas transientes adentram, usualmente, a PCSE pela região mais ao sul, não atingindo, necessariamente, porções mais setentrionais. Entretanto, no caso da duração, não foi identificada uma razão que embasasse tal distribuição observada.

Como apresentado inicialmente, as ressacas se relacionam fortemente com ventos que propiciam o empilhamento de água junto à costa, mais especificamente ventos de quadrante sul. De forma geral, estes escoamentos estão relacionados à passagem de sistemas atmosféricos na região como, por exemplo, frentes frias. Estas últimas são associadas a centros de alta e baixa pressão em superfície, tipicamente apresentam direção NW - SE e se deslocam com trajetória SW - NE ao longo da costa sul - sudeste brasileira. Os ventos que acompanham o deslocamento da mesma são do quadrante sul, ou seja, fundamentais para a origem de ressacas. Sua formação ocorre ao sul da área de estudo e geralmente se propagam até em torno de 20°S, quando começam a migrar para leste e dissipar¹³. Sendo assim, como a região sul do Brasil é tipicamente a "porta de entrada" desses sistemas, esperava-se então encontrar maior número de eventos de ressacas e marés meteorológicas significativas nessas localidades do que em regiões de latitudes mais baixas.

Retornando à série de Santos, e ainda discutindo o número de eventos encontrado na mesma, julga-se importante confrontar o método aqui aplicado com o empregado em trabalhos que identificam ressacas via notícias de jornais ou documentos governamentais. Como apresentado na seção Introdução, as ressacas apresentam, além da questão científica, fatores sociais e econômicos muito fortes nas zonas costeiras. Dessa maneira, além de responder às hipóteses científicas levantadas no trabalho, supõe-se que o método aqui empregado também deva auxiliar a sociedade na identificação de eventos.

Neste tocante, afortunadamente, o período entre 1961 e 1990 da série de Santos aqui utilizada é simultânea ao período analisado por Fundespa³². Comparando ambos, o número de ressacas encontrado é deveras desigual: enquanto aqui foram detectados 113 eventos, no trabalho citado este valor despenca para apenas 17. Destes, 15 foram identificados utilizando a metodologia aqui definida onde, dos quais, 7 (41%) deles ocorreram em marés de sizígia. Ou seja, dos 17 eventos identificados pelo trabalho previamente mencionado, 7 deles são tidos como ressacas em ambos estudos. Além disto, utilizando os dados observados neste trabalho, também foi observado que a elevação máxima média destas 7 ressacas é 10% superior à média da série e são, em média, 21% mais duradouros.

Uma análise mais detalhada revelou que dos 10 eventos restantes, isto é, aqueles que não ocorreram durante marés de sizígia, 7 deles aconteceram durante marés de quadratura, 1 entre quadratura e sizígia e 2 sequer apresentaram maré meteorológica significativa para serem considerados como potenciais eventos de ressaca. Em suma, o método aqui aplicado detectou 88% dos eventos energéticos tidos como ressacas pela população em geral. Ademais, observa-se que:

- Dentre os 113 casos detectados neste trabalho, no período entre 1961 e 1990, apenas 7 foram noticiados. Em outras palavras, aproximadamente 6% dos eventos foram energéticos o suficiente para também serem chamados de ressaca pelos noticiários locais;
- O método empregado neste presente estudo é capaz de detectar também eventos energéticos e ressacas observadas sob a óptica popular. Dessa forma, por sua sensibilidade, possivelmente pode ser também empregado para auxiliar emissões de avisos de condições de mar adversas;

Uma possível explicação da não identificação dos dois eventos remanescentes, aqueles que não apresentaram sequer maré meteorológica significativa, talvez seja um possível papel de ondas intensas geradas remotamente, de modo semelhante ao apresentado pelo Prof. Dr. Eloi Melo Filho¹. Obviamente isso não passa de especulação pois, infelizmente, o trabalho original que conduziu o levantamento dos dados não disponibilizou a caracterização meteo-oceanográfica associada à cada evento singular.

Agora considerando o período de 1962 a 1987, Fundespa³² apresentou 17 anos com ausência de ressacas, valor dezessete vezes superior ao contabilizado para a série de Santos neste estudo para o

mesmo período. Ademais, a média da série anual de eventos e o número máximo de ressacas detectadas em um ano também divergiram nos dois trabalhos. Como exemplo, é exibido um trecho retirado do próprio estudo previamente citado.

"Até 1998 o número máximo de eventos por ano jamais ultrapassou 3, número este atingido apenas em 1982"

Apesar da série empregada neste trabalho não perdurar até 1998, ao se observar a Figura 7 é evidente que diversos anos obtiveram valores iguais e até mesmo superiores a 3 eventos. Tal contraste pode estar associado, novamente, à diferença de métodos empregados. Como bem observado neste mesmo trabalho, o jornal *A Tribuna on line*, uma das principais fontes de notícias para o levantamento de seus eventos, começou a veicular também notícias de ressacas de menor magnitude em 1998, diferentemente do passado, durante a fase impressa, onde se publicavam eventos de ressaca somente quando havia danos ou transtornos mais significativos à população. Dessa forma, o aumento dos eventos após este ano pode estar relacionada à mudança do veículo de notícias.

Como apresentado em Resultados, eventos especiais reportados na bibliografia foram identificados - ou não - também neste trabalho. A motivação dessa abordagem foi demonstrar com casos de estudo que o método de identificação de ressacas aqui empregado é eficaz, apesar de não ser usualmente empregado nas pesquisas do gênero. Diferente da comparação realizada exclusivamente na série de Santos, esta discussão também considera Cananéia e Ilha Fiscal, provendo, assim, maior confiabilidade.

Durante o levantamento bibliográfico para a realização deste trabalho, identificaram-se pesquisas que averiguaram eventos excepcionais de ressacas e frentes frias nas regiões sul - sudeste brasileira. À exemplo do primeiro tópico, Marone e Camargo⁵⁰ investigaram um evento de ressaca que impactou fortemente as cidades litorâneas do Paraná. Analogamente, Bitencourt *et al.*⁵¹ avaliaram dois casos anômalos de ressaca observados durante o verão na região Sul do Brasil. Já com relação ao segundo tópico, o de frentes frias, há diversos estudos que apontam incursões de fortes sistemas frontais sobre a região (*e.g.* Fortune e Kousky⁵²; Marengo *et al.*⁵³) e estas, em tese, possuem capacidade de gerar ressacas. Por último, e como apresentado na seção Resultados, também se investigou o papel do furacão Catarina, observado no fim de março de 2004. Devido aos seus impactos em terra e ao sabido poder desses sistemas, esperava-se encontrar grandes elevações relacionadas à sua passagem.

No tocante aos três eventos de ressaca reportados na bibliografia, todos foram identificados neste trabalho. A configuração de centro de baixa pressão (circulação horária) em superfície associada à frente e um centro de alta pressão (circulação anti-horária) na retaguarda do sistema frontal foi identificada nos três casos.

Os casos de 18/08/1993⁵⁰ e o de 16/01/2002⁵¹, foram identificados somente na estação de Cananéia. Com relação ao primeiro evento, a duração foi 34% inferior à média geral da série enquanto que a máxima elevação apresentou valor 31% superior à média geral da estação. Já para o segundo evento, tanto elevação quanto duração foram superiores às médias gerais da série em 34% e 62% respectivamente.

Com relação à ressaca de 02/02/2002⁵¹, ambas estações, Cananéia e Ilha Fiscal, registraram o fenômeno. Além da identificação dos dois eventos de 2002, a extensão do fenômeno também converge com o reportado pelos autores, onde os mesmos observaram que o evento de fevereiro atingiu uma porção maior do litoral Sul enquanto que o evento de janeiro foi restrito ao litoral norte de Santa Catarina. Para a série de Cananéia, elevação máxima e duração do evento foram superiores à média da série em 8,6% e 28%, respectivamente. Por outro lado, a elevação máxima e duração da ressaca registrada em Ilha Fiscal apresentaram valores inferiores à média das séries em -10% e -42%, respectivamente.

No tocante às frentes frias, foram avaliados dois casos de geadas registrados no Brasil, um em 1979 e outro em 1981⁵². O primeiro ocorreu entre 31/05/1979 e 01/06/1979, onde tal período é considerado como fim de outono neste trabalho, e o segundo evento de geada ocorreu entre 20/07/1981 e 21/07/1981, registrado, então, no meio do inverno. Os danos associados à estes fenômenos atmosféricos, como apontado pelos autores, foram evidentes nas plantações de café. Ademais, apesar de não investigarem a questão oceânica, supõe-se que elevações significativas do mar junto à costa tenham sido originadas a partir da passagem dos sistemas frontais. Ao se analisar as séries empregadas neste estudo, observou-se que, de fato, ressacas foram registradas em Santos no evento de 1979 e em Cananéia e Santos na frente

fria de 1981. Com relação ao primeiro evento, este apresentou máxima elevação e duração inferiores às médias gerais da série em, respectivamente, -23% e -17%. Já para o segundo evento, para a estação de Santos, a elevação máxima apresentou valor superior (14,5%) e a duração inferior (-58%), ambos, em relação às médias de Santos. Ilha Fiscal apresentou padrão semelhante, isto é, valor de elevação máxima superior (3,7%) e a duração inferior (-34%) em relação às médias da série.

De maneira semelhante ao estudo abordado previamente, outros autores também investigaram a propagação de uma intensa frente fria registrada em 26/06/1994 na América do Sul⁵³. Como encontrado nos outros estudos, também foi observado em tal trabalho o padrão atmosférico de um centro de baixa pressão em superfície associado à frente fria e um centro de alta pressão em superfície na região pós-frontal. Ao que concerne os valores de duração e elevação máxima encontrados, estes foram superiores em 169% e 6,6% respectivamente, com relação às médias gerais da estação.

Por último, foi avaliada também a influência do ciclone tropical Catarina, presente na costa sul brasileira entre os dias 24/3 e 28/3/2008. O papel desses sistemas atmosféricos na geração de elevações significativas do mar junto à costa é amplamente conhecido (e.g. Ezer⁵⁴) e, por essa razão, esperava-se encontrar tal sinal registrado ao menos na estação de Cananéia, a qual, dentre as três consideradas neste estudo, é aquela que possui maior proximidade à região de atuação do furacão. Surpreendentemente, tal registro não foi observado. Apesar desse caráter distinto, estudos apontam que os impactos causados por ciclones tropicais são geralmente restritos à sua área de *landfall*, isto é, quando o sistema faz sua transição da água para terra firme. Por outro lado, ciclones extratropicais causam danos em uma porção maior da zona costeira⁴⁷.

Diante dessa discussão, o método aqui proposto se mostrou eficiente na detecção de eventos extremos, especialmente aqueles que possivelmente causaram forte impacto na sociedade. Além disso, apesar dos eventos observados relatados em outros trabalhos apresentarem variabilidade de máxima elevação e de duração, ora superiores, ora inferiores às suas respectivas médias, esta pareceu ser um limite de ressacas coerente. Ou seja, as elevações máximas médias aqui encontradas para as estações de Cananéia, Santos e Ilha Fiscal mostraram ser um limite razoável de ressacas.

Como apresentado diversas vezes ao longo do trabalho, os eventos de ressaca são gerados a partir da interação construtiva entre marés meteorológicas significativas e preamares de marés de sizígia. A segunda componente, por se tratar de um fenômeno determinístico, tem período de ocorrência muito bem definido e não influencia significativamente na variabilidade das ressacas. Por outro lado, a primeira componente é altamente dependente de processos atmosféricos e estes, por sua vez, não apresentam tal caráter determinístico. Dessa forma, marés meteorológicas significativas, e consequentemente as ressacas, são então correlatas às variabilidades e mudanças que ocorrem no clima.

Os estudos conduzidos internacionalmente, em sua grande maioria, avaliam a variabilidade de *storm surges* e não de ressacas, como definida neste trabalho. Entretanto, como já introduzido anteriormente e como será discutido mais adiante, as ressacas e marés meteorológicas significativas possuem estreita conexão, especialmente no que concerne à variabilidade.

Tendo isto em mente, muitos estudos associam as variabilidades interanuais com os chamados modos climáticos. Esses modos são oscilações climáticas naturais alternantes, observadas na forma de padrões, com períodos mais ou menos definidos e que, dependendo de qual fase se encontram (normalmente tidas como positiva, neutra e negativa), podem impactar climaticamente regiões próximas e/ou distantes. Uma célebre oscilação climática é a chamada El-Niño Oscilação Sul (ENOS ou ENSO), a qual apesar de possuir assinatura mais significativa no Oceano Pacífico também influencia regiões remotas.

No Brasil, por exemplo, Souza e Rodrigues⁵⁵ encontraram que 95% das ressacas observadas ocorreram durante fases quente e fria do ENSO. Em outro estudo, conduzido na mesma região do trabalho supracitado, foi observado que 92% dos eventos de ressaca ocorreram também sob atuação do *El Niño* e *La Niña*³². Tais relações também foram observadas para marés meteorológicas significativas na Nova Zelândia²⁷ e na costa leste dos Estados Unidos²⁶. Neste estudo, resultado semelhante foi encontrado quando se analisaram as séries anuais e os três valores mais significativos para cada variável em cada estação. Mais precisamente, em cerca de 90% destes anos se observou a presença de *El Niño* (38,2%), *La Niña* (34%) ou ambos (12,7%). Estes resultados podem ser um indicativo que anos extremos, tanto

em termos de número de eventos, quanto de duração máxima, duração média e máxima elevação, as fases quente e fria do ENSO desempenham papel significativo.

Vale ressaltar, todavia, que nos trabalhos de Fundespa³² e Souza e Rodrigues⁵⁵, não é mencionado qual índice climático foi utilizado para determinar as fases de ENSO (ONI, MEI, TNI, SOI ou outros) e nem qual método utilizaram, isto é, se consideraram a ocorrência de eventos singulares nas fases do ENSO ou análise entre anos com registros de ressaca e a presença das fases da Oscilação.

Por outro lado, quando os eventos foram avaliados individualmente, um a um, constatou-se que a fase neutra do ENSO é aquela em que mais ressacas foram observadas. Para Cananéia e Santos o *El Niño* foi a fase com a segunda maior quantidade de ressacas e para Ilha Fiscal o segundo lugar foi ocupado por *La Niña*. A concentração de eventos individuais na fase neutra em todas as séries já era de certa forma esperada, uma vez que esta é a que contém o maior número de anos registrados (é a média climatológica da oscilação). De modo semelhante, em comparação à análise feita anteriormente, que se analisou os eventos discrepantes com as fases quentes e frias do ENSO, também foi observado para Santos e Cananéia a predominância da fase de *El Niño* nos anos em que o número de eventos foi discrepante. Em outras palavras, aparentemente há certa correlação entre o número de eventos observados nas estações mais ao sul com tal fase do ENSO. De fato, é relatado na literatura que durante as fases quentes do ENSO, isto é, durante o *El Niño*, um número maior de ciclones consegue atingir latitudes mais baixas devido ao deslocamento do chamado jato subtropical em direção à região equatorial⁵⁶.

O que deve ficar claro é que, apesar dos resultados aqui encontrados serem embasados por outras pesquisas, outros fatores também podem atuar na variabilidade interanual do número de evento, duração e máxima elevação de ressacas, tais como a variabilidade interanual de frentes frias e de passagem de ciclones sobre a região e, também, outras oscilações climáticas, tais como o Modo Anular Sul⁵⁷ e Dipolo Subtropical do Atlântico Sul⁵⁸.

Inicialmente, ao se formular as hipóteses deste trabalho, baseadas nas pesquisas apresentadas anteriormente, suspeitava-se que de maneira similar ao encontrado por Fiore²⁸, por exemplo, os eventos de marés meteorológicas significativas e consequentemente os eventos de ressaca também estariam aumentando na região sudeste brasileira. Ou seja, supunha-se que a frequência, duração e máxima elevação observada de ressacas apresentariam tendência positiva.

Como pôde ser observado nos resultados apresentados, tal hipótese foi confirmada apenas na estação de Cananéia. Isto é, nas estações de Santos e Ilha Fiscal não foi identificada tendência positiva do número de eventos, nem da duração dos mesmos e sequer da máxima elevação observada. De fato, tais resultados podem se mostrar inusitados em um primeiro momento. Suspeitou-se, inclusive, que a sincronização dos eventos de maré meteorológica significativas com as fases de Lua Cheia e Nova teria, de alguma forma, falhado.

Neste tocante, afim de verificar tal sincronização, investigou-se a variabilidade interanual e a tendência dos eventos de marés meteorológicas significativas. Se essas análises apontassem resultados totalmente distintos dos encontrados para as ressacas, a sincronização entre as marés meteorológicas significativas e as marés de sizígia, de fato, haveria falhado. O que se encontrou é que a variabilidade interanual e a reta de tendência ajustada no conjunto de dados de marés meteorológicas são semelhantes aos resultados obtidos para as ressacas. Dessa maneira, apesar do número de ressacas ser inferior ao de marés meteorológicas, suas distribuições análogas à de marés meteorológicas significativas indicam que a sincronização entre as componentes foi feita corretamente.

Como dito anteriormente, dentre as três estações analisadas, Cananéia foi a única que apresentou tendência positiva estatisticamente significativa para todas as variáveis analisadas. Inicialmente, quando as hipóteses foram levantadas, esperava-se que esta região apresentasse este resultado. Tal expectativa reside no fato de que devido ao aumento do nível médio do mar na região³³, a geração, propagação e dissipação de marés meteorológicas significativas seriam afetadas. Resultados semelhantes foram obtidos em Buenos Aires, Argentina, onde os autores observaram aumento na frequência, elevação e duração de marés meteorológicas positivas significativas⁵⁹. Ademais, no Mar da Prata, também na costa argentina, foi identificado aumento do número de eventos, duração e elevação de marés meteorológicas significativas²⁸. Em ambos os trabalhos, a justificativa apontada pelos autores é que o aumento do nível

médio do mar nas regiões é o responsável por tais tendências positivas.

Ademais, um estudo conduzido na cidade de Nova Iorque, situada na costa leste dos Estados Unidos, apresentou um aparente paradoxo em seus resultados que pode suportar a influência do aumento do nível médio do mar na tendência positiva de ressacas. As inundações costeiras (*coastal flooding*) são geradas por marés meteorológicas intensas na região, associadas também à passagens de frentes frias ou, diferentemente da PCSE, pela atuação de ciclones tropicais. Os autores encontraram que apesar do número de *storm surges* estar diminuindo, a frequência de inundações costeiras está aumentando. Os autores também investigaram se tal resultado se manteria após a retirada da tendência positiva do nível médio do mar observado na região. Foi encontrado que após a remoção desta, a frequência de inundações costeiras já não apresentava mais aumento⁴⁷.

Também analisando a frequência de inundações costeiras associadas à *storm surges*, Ezer⁵⁴ encontrou tendência positiva de frequência e duração de eventos em Norfolk, Virgínia, EUA. Segundo o autor, quando o nível do mar atual é somado às marés meteorológicas, tempestades (frentes frias ou ciclones tropicais) menos intensas podem causar tanto danos quanto as tempestades mais energéticas registradas a 90 anos atrás.

Sendo assim, supõe-se que semelhantemente aos outros estudos, as tendências positivas encontradas em Cananéia sejam resultado do aumento do nível médio do mar na região. Entretanto, apesar dos resultados similares, indica-se também avaliar tais observações sob outras ópticas, por exemplo, com relação ao aumento de passagem de frentes frias ou de ciclones na região⁵⁶.

Com relação à análise de tendência obtida para Santos, onde se observou que o coeficiente angular é estatisticamente não significativo, tal resultado se contrapõe ao obtido por outros estudos feitos na região^{32, 49, 55}. Segundo esses autores, a frequência de eventos de ressaca na região apresenta tendência positiva significativa, onde o grande salto no número de eventos ocorreu em 1999. Entretanto, como já apresentado anteriormente, a partir do ano de 1998 uma das principais fontes de notícias utilizada por esses autores começou a divulgar também eventos de ressaca de menores magnitudes, o que pode ter gerado a suposta tendência observada pelos mesmos. Caso fosse considerado apenas o período simultâneo entre as séries, isto é, entre 1961 e 1990, os resultados nos três estudos aparentemente convergiriam para o que foi encontrado aqui. Isto evidencia que análises de tendências podem apresentar diferentes resultados dependendo do período considerado e dão abertura ao seguinte questionamento: caso a série de Santos aqui avaliada possuísse maior duração, uma tendência positiva poderia ser encontrada?

Como contraponto à tendência positiva encontrada por outros autores para Santos, de modo semelhante ao encontrado neste estudo, Zhang *et al.*⁴⁶ e Zhang *et al.*⁴⁸ também observaram em suas análises de tendência valores estatisticamente não significativos para marés meteorológicas significativas, os quais indicam que o número de eventos na costa leste dos Estados Unidos têm se mantido estável.

Semelhantemente à Santos, Ilha Fiscal também não apresentou tendência significativa para nenhuma das variáveis analisadas. Na realidade, esperava-se inicialmente que seu comportamento fosse correlato ao de Cananéia, tendo em vista que ambas apresentam tendência positiva do nível médio do mar³⁴. O que se supõe acerca deste resultado é que a lacuna de dois anos presente na série bruta dos dados tenha exercido grande papel. À título de curiosidade, testou-se quais resultados seriam obtidos caso nos anos de 1987 e 1988 nenhum evento fosse observado. Em outras palavras, inseriram-se propositalmente valores "zeros" nestes dois anos. Novamente, apenas à título de curiosidade, encontraram-se tendência negativa significativa para as três variáveis.

Esta discussão acerca da variabilidade interanual e das tendências encontradas revela a complexidade de análises de longo termo, sobretudo no que concerne à segunda parte. Neste sentido, mesmo apresentando pesquisas que sustentam os resultados encontrados, é clara a carência por estudos mais aprofundados ao longo da costa sul - sudeste brasileira.

Com relação à variabilidade sazonal de ressacas, mais especificamente no tocante ao número de eventos por estação do ano, é evidente o predomínio do outono e do inverno nas três séries consideradas no estudo, sendo estas seguidas por verão e primavera (Tabela 10). Resultado semelhante foi encontrado por Fundespa³², que também detectou concentração dos eventos de ressaca durante o outono e o inverno, de tal modo que o primeiro foi superior ao segundo período (40,4% e 36%, respectivamente).

Ainda, para os eventos registrados no litoral do estado de Santa Catarina, Krueger³¹ também observou predominância dos eventos na estação de outono (40%), sendo esta acompanhada pelo inverno (23%). Ademais, a autora observa que os eventos registrados durante os meses de outono apresentaram, em média, elevação de maré meteorológica e maré astronômica muito semelhantes (aprox. 0,2 metros). Para a variabilidade sazonal de elevação observada, esta autora encontrou resultado semelhante ao apresentado aqui neste estudo: maiores elevações observadas no outono, seguido pelo inverno, verão e, por último, primavera.

No Rio Grande do Sul, Parise *et al.*⁶⁰ encontraram também predominância de eventos de ressaca nas estações de outono (35%) e inverno (35%). Segundo os autores, essa maior frequência nas estações frias do ano se deve à maior intensidade dos ventos vindos de sul justamente no considerado período. Ademais, também no Rio Grande do Sul, Saraiva *et al.*⁶¹ identificaram predominância de ressacas na estação de outono (65%) mas, por outro lado, o inverno foi a que menos apresentou eventos (5%).

Tais descobertas, apesar de não exclusivas desse trabalho, mas em concordância com as pesquisas previamente citadas, apresentam uma informação contraintuitiva que ascende o seguinte questionamento: se a primavera é a estação que há mais entradas de frentes frias, por que o outono e o inverno são as estações que apresentam maior número de ressacas?

Uma primeira suposição poderia ser feita com relação à estrutura termohalina sazonal da região. Isto é, poderia ser questionado se tal mecanismo interno desempenhasse algum papel. Entretanto, como apresentado por Dottori e Castro⁶², a PCSE responde barotropicamente aos ventos nas porções interna e média da PCSE, indicando, assim, que o campo termohalino não atua neste fenômeno.

Na realidade, o provável motivo dessas estações apresentarem maior número de marés meteorológicas e, conseqüentemente, de ressacas, deve-se, supostamente, à forte ciclogênese e intensificação de centros de baixa pressão sobre o oceano os quais, em conjunto com a alta pressão sobre o continente, promovem ventos de sudoeste. Por conseguinte, devido à dinâmica de Ekman, estes ventos atuam de modo a empilhar água junto à costa, elevando, assim, o nível do mar na região¹⁸. Além disso, os autores apontam também a importância da intensidade do vento, permanência do sistema, área de atuação e até mesmo a batimetria local.

Entende-se como ciclogênese o processo de formação ou intensificação de um ciclone⁶³. Neste tocante, diversos trabalhos observaram que as estações de inverno e outono são aquelas que apresentam mais eventos de ciclogênese^{64, 56}. A dinâmica associada ao processo pode ser conferida em Reboita⁶³. Gan e Rao⁶⁴ encontraram duas regiões preferenciais de ciclogênese na leste da América do Sul: uma dela situada na costa sudeste da Argentina (aprox. 42°S) e a outra na costa uruguaia. Ademais, estes mesmos autores identificaram que a segunda região é mais intensa durante outono e inverno enquanto a primeira, localizada mais ao sul, apresenta maior frequência de eventos no verão. Os autores também relataram que um maior número de eventos de ciclogênese foi observado em anos de *El Niño* e o oposto foi observado durante os anos de fase fria do ENSO.

A razão pela qual o inverno contraintuitivamente não é a estação com maior número de passagem de frentes frias na região se relaciona, possivelmente, com a atuação de bloqueios atmosféricos no Atlântico, onde sua frequência aumenta de junho à setembro, sendo este último mês o pico observado. A atuação desses sistemas quase estacionários e que persistem por no mínimo 6 dias em uma região, atuam de modo a dissipar os sistemas sinóticos tais como as frentes frias, impedindo-as de propagarem até latitudes mais baixas. Sua influência é tamanha na PCSE que o número de marés meteorológicas negativas significativas na região é maior na primavera, quando justamente se observa a atuação máxima desses sistemas¹⁸.

Parise *et al.*⁶⁰ investigaram os padrões atmosféricos associados a 23 eventos de marés meteorológicas intensas registradas entre 2006 e 2007 na costa do Rio Grande do Sul. Os autores indicaram que todos os eventos registrados estavam associados à passagem de ciclones extratropicais. Além de indicarem as três regiões de ciclogênese e o deslocamento dos sistemas, também apontaram que dentre todos os eventos registrados, o mais intenso foi aquele que uma maré meteorológica significativa ocorreu em uma preamar de sizígia. No que concerne aos padrões meteorológicos, especificamente à ciclogênese, os autores identificaram três bandas latitudinais onde ocorreram as gerações e deslocamentos dos ciclones:

1. Ciclogênese ao sul da Argentina com deslocamento para leste e trajetória entre 47,5°S e 57,5°S;
2. Ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para leste e trajetória entre 35°S e 42,5°S;
3. Ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para sudeste e trajetória entre 35°S e 57,5°S.

Outro resultado apresentado por Parise *et al.*⁶⁰, o qual foi também observado por outros autores (*e.g.* Saraiva *et al.*⁶¹ e Campos *et al.*¹⁸), foi a defasagem de aproximadamente 24 horas entre a passagem do sistema frontal e a elevação máxima registrada.

Ainda com relação às forçantes atmosféricas, Marone e Camargo⁵⁰ também apontaram que para gerar marés meteorológicas significativas, uma conjunção entre dois fatores precisa ocorrer (i) Intensificação de uma frente ao alcançar o oceano, experimentando forte ciclogênese e cujos ventos associados possam causar empilhamento de água junto à costa ou (ii) a presença de um anticiclone situado sobre o continente e um ciclone sobre o mar, gerando uma pista de ventos de quadrante sul que também propiciam o empilhamento de água junto à costa.

Ainda sobre a análise sazonal, mas agora considerando a distribuição mensal, tal variabilidade aqui encontrada suporta a predominância dos eventos nos meses frios (entre abril e agosto). Resultado semelhante foi obtido por Fundespa³², com a diferença de que em tal estudo o mês em que mais se observou ressacas foi maio, ao invés de junho ou julho, como encontrado neste estudo. Ademais, ainda com relação ao trabalho previamente citado, setembro foi o terceiro mês com maior registro de casos, o que não foi observado neste presente estudo.

Analogamente, ressacas observadas nos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) entre os anos de 2009 e 2010 ocorreram preferencialmente nos meses de outono e inverno, sendo abril e maio os que apresentaram maior número de eventos registrados em SC, e fevereiro o mês em que mais se observaram ressacas no RS. Além disso, em 2010, o mês de junho também apresentou um valor expressivo na série de ressacas de RS³⁰.

Ainda na região sul do Brasil, Krueger³¹ observou que o mês de maio foi aquele que apresentou a maior porcentagem dos casos de ressaca ocorridos na ilha de Santa Catarina entre 2001 e 2010. Entretanto, diferentemente deste trabalho e da pesquisa anteriormente citada, os outros dois meses que mais registraram ocorrência de eventos foram setembro e outubro.

Conduzido de maneira similar ao trabalho realizado por Fundespa³², Souza *et al.*⁴⁹ também efetuaram um levantamento de eventos de ressaca registrados nos municípios do Estuário Santista (SP). A série de notícias compiladas abrangem o período de 1961 a 2011 e perfazem um total de 95 eventos registrados. Desses, 71 ocorreram durante os meses de outono e inverno, sendo maio (18) e julho (15) os que obtiveram maior destaque. Ademais, dos 95 casos observados, 46,3% ocorreram durante maré de sizígia.

Por último, Klumb-Oliveira⁶⁵ investigaram, também através de notícias de jornais, a variabilidade de ressacas no estado do Rio de Janeiro entre os anos de 1990 e 2009. Os autores observaram uma distribuição semelhante à encontrada neste trabalho: predominância dos eventos entre os meses de abril à setembro, sendo junho o mais expressivo.

Esta extensa discussão acerca dos resultados obtidos evidencia que apesar de diferentes métodos serem aplicados sobre um mesmo fenômeno há, em termos gerais, convergência dos resultados. No caso da variabilidade sazonal, por exemplo, comparando diversas outras pesquisas com este presente estudo, é evidente que há predominância de ressacas nas estações frias, isto é, outono e inverno, e que em geral estão associadas aos meses de maio, junho e julho. Obviamente há dissimilaridades também, como no caso da pesquisa produzida por Krueger³¹, onde se observou predominância de ressacas nos meses de setembro e outubro, resultado não encontrado aqui.

Além deste, é necessário de igual forma realçar o inesperado papel pouco significativo da estação primavera, onde se acreditava, *a priori*, que apresentaria maior número de ressacas, superior, inclusive, à estação de outono. Como apontado por Campos *et al.*¹⁸, onde também foi encontrado papel pouco expressivo das estações de primavera e verão, os autores apontam que é durante estas duas estações que os cavados atmosféricos associados à passagem de frentes frias e aos ventos de quadrante sul são

menos intensos. De fato, a climatologia de frentes frias definida por Rodrigues *et al.*¹³ aponta que os meses de outono e inverno foram aqueles que apresentaram ventos do quadrante sul mais intensos e persistentes, onde mantiveram esta direção até dois dias após a passagem da frente. Tais padrões também podem embasar os resultados encontrados de que eventos de ressaca observados nas estações de outono e inverno possuem, em geral, durações e máximas elevações superiores às aquelas identificadas nas estações quentes (Tabela 12, Tabela 14 e Tabela 16).

Foram apresentadas na Tabela 18 as características das ressacas quando separadas em grupos distintos. Tal desmembramento possibilitou a comparação entre os eventos que ocorreram apenas no eixo Cananéia - Santos (CS) com aqueles que foram identificados nas três estações (CSI). Os resultados apresentados apontam que ressacas ocorridas no primeiro grupo possuem duração média e elevação máxima média inferiores ao segundo grupo. Em outras palavras, em termos médios, eventos que ocorrem nas três estações são mais energéticos do que aqueles restritos às estações de Cananéia e Santos.

Outro resultado obtido neste estudo e que suporta tal suposição é a variabilidade sazonal encontrada das ressacas exclusivas. No caso dos eventos CSI, dos 11 casos observados, 8 ocorreram em outono e inverno. Já para as ressacas CS, dos 15 eventos identificados, 10 ocorreram em verão e primavera. Como apresentado por Rodrigues *et al.*¹³, ventos de quadrante sul, fundamentais para formação de ressacas, são mais intensos e perpetuam por mais tempo justamente nas estações de outono e inverno.

Já no caso das ressacas ditas exclusivas, uma análise minuciosa realizada evento a evento encontrou uma possível explicação. Tomemos como exemplo Cananéia. Foi exibido anteriormente que esta série apresentou 13 eventos exclusivos entre 1965 e 1980. Ao se avaliar as marés meteorológicas significativas associadas a estas 13 ressacas, observou-se que, para um mesmo período avaliado, os sinais de Santos e de Ilha Fiscal também estavam presentes em igual forma, mas em menor magnitude e com uma pequena defasagem temporal. Como cada série filtrada possui um valor específico, chamado anteriormente de limite da série filtrada (ver subseção 2.2.2.3), o qual determina se um evento de maré meteorológica será considerado ou não como significativo, um evento tido como significativo em Cananéia não será, necessariamente, considerado também em Santos ou em Ilha Fiscal. Consequentemente, de igual maneira, um evento de ressaca pode ocorrer em Cananéia mas não em Santos ou Ilha Fiscal. Assim, supõe-se que esses eventos exclusivos possuam relação com limites técnicos definidos anteriormente e não com eventos atmosféricos limitados à regiões específicas.

A sazonalidade do grupo de ressacas exclusivas revelou que os eventos observados em Cananéia ocorreram majoritariamente nas estações quentes (primavera - verão), diferentemente de Santos e Ilha Fiscal onde os eventos se concentraram no outono e inverno. Este resultado pode ser mais um indício de que os sistemas atmosféricos transientes nas estações quentes não possuem competência para gerar ressacas nas estações situadas mais ao norte, diferentemente das estações frias.

Por último, foi avaliada a propagação das marés meteorológicas significativas ao longo da PCSE. Os eventos foram separados em três grupos distintos:

1. Um grupo formado pelos 15 eventos que foram identificados somente entre Cananéia e Santos;
2. Um segundo grupo contendo as 11 ressacas identificadas nas três estações, mas considerando apenas os eventos que ocorreram entre Cananéia e Santos;
3. Um segundo grupo contendo as 11 ressacas identificadas nas três estações, mas considerando apenas os eventos que ocorreram entre Cananéia e Ilha Fiscal;

Deve ficar claro que os eventos dos dois primeiros grupos não são os mesmos. As ressacas do primeiro grupo foram identificadas exclusivamente entre Cananéia e Santos, isto é, não foram observadas em Ilha Fiscal. Já os eventos do segundo grupo, por outro lado, são aqueles que foram observados em Cananéia, Santos e Ilha Fiscal. Entretanto, para este segundo grupo, somente a primeira parte do percurso (Cananéia - Santos) foi considerada. Dessa forma, comparar esses dois grupos significa, em tese, comparar menos intensos (grupo 1) com eventos mais intensos (grupo 2) em uma mesma região.

O valor obtido para os grupos 1 e 2 é aproximadamente o mesmo, isto é, 4 horas para o primeiro e 4,25 horas para o segundo. Já para o grupo 3, a defasagem encontrada entre Cananéia e Ilha Fiscal foi

cerca de 20 horas. Estes valores são, respectivamente, inferiores e superiores aos estimados por Dottori e Castro¹⁷. Utilizando os valores encontrados pelos autores previamente citados, a defasagem deveria ser em torno de 5 horas entre Cananéia e Santos e entre 17 e 18 horas entre Cananéia e Ilha Fiscal. Melo F^o¹ encontrou resultados semelhantes aos observados pelos referidos autores.

Os resultados apresentados anteriormente, mais especificamente na Figura 14, deixam claro os valores de maior correlação com *lag* entre as estações. Entretanto, uma informação importante deve ser mencionada. Apesar de serem os valores máximos de correlação observadas, foi encontrado que estes, na realidade, diferem apenas na terceira casa decimal. Por exemplo, no caso da correlação cruzada com *lag* entre Cananéia e Ilha Fiscal, valores de correlação de 0,72 foram obtidos nas defasagens entre 17 e 22 horas, sendo que o máximo foi observado em 20 horas, com correlação de 0,7235. A correlação obtida no *lag* de 19 horas, também entre essas duas séries, foi de 0,7232. Já entre Cananéia e Santos, o intervalo de *lag* encontrado foi entre 1 hora e 6 horas. Dessa maneira, considera-se que as defasagens encontradas neste estudo são similares às obtidas em outros trabalhos.

Prosseguindo, no tocante à estimativa de cada componente na energia das ressacas, os resultados obtidos, especialmente no que diz respeito aos Skills apresentados, revelam uma boa aproximação média entre a energia total dos eventos e a soma das energia de maré meteorológica significativa e astronômica. Uma observação interessante diz respeito ao aumento de porcentagem alcançada e melhoria de Skill na estação de Ilha Fiscal com relação às demais. A razão deste resultado discrepante pode residir no fato de que no sinal de "maré astronômica" de Ilha Fiscal, este possui frequências ausentes nas outras duas séries, uma vez que a obtenção deste sinal não se deu por análise harmônica, mas sim pela diferença entre o sinal observado e o filtrado. A maré astronômica de Ilha Fiscal foi obtida através da diferença entre o sinal observado e o sinal filtrado (chamemos este sinal de *high*). Como apresentado anteriormente, o Skill obtido entre a maré astronômica e o sinal *high* para Cananéia e Santos foi de 0,97. Entretanto, ao se realizar a diferença entre *high* e a maré astronômica, é possível observar que há sinais de amplitude baixa, mas aparentemente significativos quando considerados nos cálculos de energia total (Figura 17).

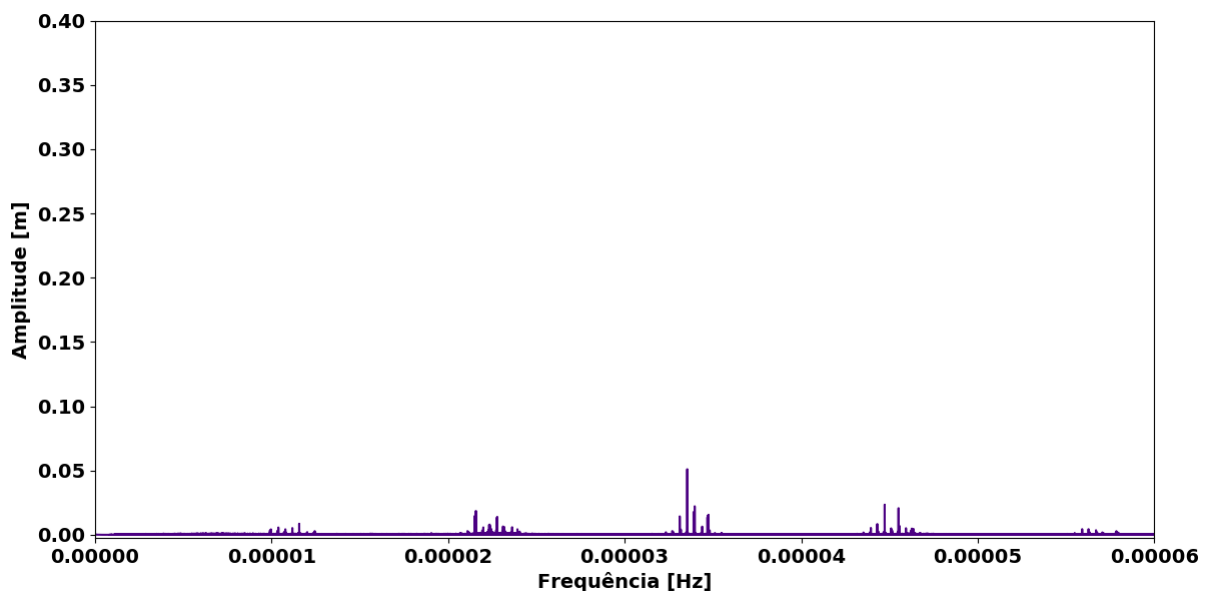


Figura 17: Espectro de amplitude [m] obtido através da diferença entre *high* e a maré astronômica.

Dessa forma, julga-se coerente supor que a inclusão de outras componentes na análise harmônica de marés pode melhorar significativamente a estimativa de energia total das marés astronômicas e consequentemente o Skill final.

Pot último, Parise *et al.*⁶⁰ identificaram que os eventos mais destrutivos, aqueles que causam maior erosão praial, não foram os que apresentaram elevações mais extremas, mas sim os mais duradouros.

Neste último caso específico, tal resultado pode suportar a relação observada neste estudo, apresentada na Figura 16, onde a correlação entre energia total e duração é superior do que a entre energia total e máxima elevação.

5 Conclusões

Este trabalho, como apresentado inicialmente, tratou de investigar as ressacas na costa da Plataforma Continental Sudeste, suas variabilidades temporais e a evolução dos fenômenos ao longo dos anos. Os resultados encontrados no decorrer desta pesquisa serão sumarizados nesta seção, bem como apresentação de sugestões para trabalhos futuros e considerações finais acerca do estudo.

Primeiramente, o método de interpolação via Análise Singular Espectral (SSA) apresentou, de maneira geral, bons resultados (Skill superior a 0,8 - Tabela 1). Entretanto, observou-se que para períodos longos (superiores a 10 dias) o Skill não se mantém estável. Possivelmente essa inconsistência se deva à maior influência das componentes não determinísticas, que por não serem tão bem resolvidas pela técnica, seus erros acabam se propagando e se tornam mais evidentes em lacunas mais longas. Assim, supõe-se que tal método apresenta grande potencial de aplicação, especialmente para lacunas entre 7 horas e 10 dias. Deve-se ressaltar ainda que a forma aqui empregada foi a mais trivial do método, isto é, há algoritmos mais complexos e robustos, como apresentado por Kondrashov e Ghil³⁶, que ao serem empregados podem gerar melhores interpolações.

Foi definido como ressaca o evento originado pela composição construtiva de uma maré meteorológica significativa ocorrendo simultaneamente às marés de sizígia. Ao aplicar tal definição, foram identificadas 209 ressacas em Cananéia, 160 em Santos e 107 em Ilha Fiscal (Tabela 2). Tal distribuição, isto é, maior número de ressacas na porção sul da PCSE (Cananéia) e diminuição conforme se avança para a estação mais ao norte (Ilha Fiscal), também foi encontrado por Camargo *et al.*⁴⁴. Neste tocante, padrão espacial semelhante foi encontrado para a máxima elevação observada, ou seja, maiores elevações em Cananéia (1,03 m) e menores em Ilha Fiscal (0,85 m) (Tabela 7). Por outro lado, a duração dos eventos apresentaram distribuição oposta, *i.e.*, as ressacas são mais duradouras em Ilha Fiscal (34,46 horas) e menos duradouras em Cananéia (28,92 horas) (Tabela 4).

Os eventos de ressaca detectados ao longo da Plataforma Continental Sudeste entre os anos de 1945 e 2013 apresentaram variabilidade interanual, em especial a duração e a frequência. Ademais, as fases quente e fria do ENSO aparentam influenciar os valores extremos da série, sendo o *El Niño*, dentre as duas, o que apresentou maior número de eventos.

A análise de tendência revelou resultados distintos para as três estações. Enquanto que Cananéia apresentou tendência estatisticamente positiva para as quatro variáveis analisadas (frequência, duração máxima, duração anual média e elevação máxima - Tabelas 3, 5, 6 e 8, respectivamente), Santos e Ilha Fiscal não apresentaram valores significativos. Apesar do aumento do nível médio do mar ser uma das possíveis causas dos aumentos observados em Cananéia, julga-se necessário estudos mais profundos acerca do assunto.

A análise de variabilidade sazonal revelou que as estações de outono e inverno foram aquelas que apresentaram os maiores números de eventos (Tabela 12), com máximas elevações superiores (Tabela 16) e ressacas mais duradouras (Tabela 14), caracterizando ocorrência de eventos mais intensos quando comparados àqueles observados nas estações de primavera e verão. Ademais, em termos gerais, observou-se que os meses de abril à julho foram os que se mostraram mais significativos. Tal variabilidade possivelmente está associada à intensificação de cavados e centros de baixa pressão durante o outono e inverno¹⁸.

A análise do período simultâneo entre as estações revelou que cerca de metade dos eventos que ocorrem entre Cananéia e Santos conseguem também se propagar para Ilha Fiscal. Neste tocante, os eventos que foram identificados nas três estações apresentaram elevações máximas e duração superiores, em média, aos eventos restritos ao eixo Cananéia - Santos (Tabela 18).

Já os eventos de ressaca ditos exclusivos para cada estação revelaram que a sazonalidade não é a mesma para todas as estações ao longo da costa: enquanto os eventos observados em Cananéia ocorreram majoritariamente nas estações de primavera-verão, para as estações de Santos e Ilha Fiscal o grupo outono-inverno prevaleceu. Entretanto, especialmente no que se refere à Ilha Fiscal, supõe-se que os eventos exclusivos ocorram não devido à forçantes atmosféricas restritas à um local, mas sim por conta dos diferentes limites das séries filtradas considerados neste estudo.

O método de identificação de ressaca aqui aplicado se mostrou capaz de identificar também os eventos observados sob a óptica popular, reportados em periódicos e em pesquisas científicas. Além disso, a elevação máxima observada nesses casos foi, em média, 10% superior à média encontrada das séries. Ou seja, utilizar este último valor como um limite mínimo de elevação para avisos de ressaca parece ser coerente. Deve-se lembrar, entretanto, que ondas de alta frequência não foram avaliadas neste trabalho apesar de sabidamente as mesmas serem fundamentais nos eventos de ressaca.

Ademais, a propagação das oscilações de baixa frequência ao longo da costa não apresentou variação quando separada em eventos mais e menos intensos e os valores encontrados apresentaram similaridades com trabalhos realizados anteriormente. Tal resultado pode auxiliar centros de pesquisa ou órgãos públicos em preparar previamente suas cidades aos impactos das ressacas. Além deste, outro fator que pode auxiliar a emissão de tais avisos é o *lag* de aproximadamente 24 horas entre a passagem da frente e a elevação máxima do nível do mar.

A energia das ressacas e de suas duas componentes (meteorológica e astronômica) foram estimadas a partir do emprego do Teorema de Parseval (Equação 4). Observou-se que, em termos médios, as ressacas são mais energéticas em Cananéia (11,11 J) e decresce conforme avançamos para norte, sendo a estação de Ilha Fiscal aquela que apresentou, em média, eventos menos energéticos (8,80 J). Além disso, como observado na Tabela 20, a maré meteorológica foi a componente que apresentou maior contribuição energética, atingindo, em média, 62% da energia observada contra aproximadamente 28% de contribuição da maré astronômica. O percentual restante provavelmente está associado às componentes de maré não consideradas na etapa de Análise Harmônica. Ademais, empregando o Skill de Willmott (Equação 1), verificou-se também que a curva originada a partir da soma das duas componentes supramencionadas, para as três estações, é muito similar à curva de energia estimada para os dados observados, sendo encontrados Skills de 0,989, 0,990 e 0,996 para Cananéia, Santos e Ilha Fiscal, respectivamente (Figura 15). Por último, a energia das ressacas parece estar mais correlacionada com a duração dos eventos (correlação de 0,92) do que a máxima elevação dos mesmos (correlação de 0,60) (Figura 16), corroborando com os resultados observados por Parise *et al.*⁶⁰.

Como apresentado ao longo deste trabalho, o litoral sul e sudeste é historicamente impactados por ressacas. Tais impactos se referem tanto à questão social, quanto biológica, sedimentar, econômica e de segurança pública. Ressalta-se que o método de identificação de ressacas aqui empregado apresenta viés mais objetivo do que a forma recorrente empregada nestes, a baseada no levantamento de jornais. Dessa forma, a subjetividade humana e jornalística inerente ao segundo caso não está presente aqui. Os resultados aqui encontrados poderão ser empregados para suportar projetos, pesquisas futuras e auxiliar sistemas responsáveis pela emissão de alerta de ressaca e avisos de condições adversas de mar.

Apesar de os resultados apresentados terem respondido às hipóteses levantadas inicialmente, sabe-se que estudos mais profundos podem ser realizados afim de complementar esta pesquisa. Como exemplo, sugere-se:

- Investigar quantitativamente a relação entre variabilidade interanual de ressacas e oscilações climáticas, tais como Modo Anular Sul e Dipolo Subtropical do Atlântico Sul e também com variabilidades interanuais de frentes frias;
- Investigar a razão pela qual ressacas em Ilha Fiscal são mais duradouras do que em Santos e Cananéia;
- Retirar a tendência do nível médio do mar de Cananéia, identificar os eventos de ressaca com o mesmo método aqui empregado e verificar se a nova distribuição apresenta tendência;
- Empregando modelagem numérica, simular ressacas intensas observadas no passado e empregando as mesmas condições atmosféricas, simular eventos nos dias atuais, considerando tanto um cenário com o aumento do nível médio do mar observado quanto sem este. Tais simulações e a

sugestão acima podem embasar mais fortemente o papel que a tendência positiva do nível médio do mar seja o fator principal no aumento do número, duração e máxima elevação de ressacas;

- Investigar as diferentes respostas do nível do mar frente às distintas feições atmosféricas que atuam sobre a região.

Além destas sugestões complementares à pesquisa desenvolvida, outros tópicos relevantes também se mostraram potenciais trabalhos futuros, sendo estes:

- Realizar o caminho inverso do procedido nesta pesquisa, isto é, ao invés de analisar inicialmente marés meteorológicas significativas ocorrendo concomitantemente aos picos de marés de sizígia, avaliar primeiramente o sinal observado, empregando um método estatístico robusto, como *Peaks Over Threshold*, para depois investigar as características de suas componentes.

6 Referências

Referências

1. Melo F^o E. Maré Meteorológica na Costa Brasileira. [Tese Livre-docência]. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande; 2017.
2. Camargo R, Harari J, Dias PLS. A storm surge modeling and forecast for the South-Western Atlantic Ocean. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 72(2):289; 2000.
3. Castro BM. Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight. *Continental Shelf Research*. 89:15 – 23; 2014.
4. Madre de Deus FGd. Memórias para a História da Capitania de São Vicente. EDUSP; 1975.
5. Neme M. Notas de Revisão da História de São Paulo. Anhambi; 1954.
6. Veloso JAV. Tsunamis no Brasil. *Revista USP*. 91:40 – 55; 2011.
7. Machel H, Kapala A, Flohn H. Behaviour of the Centres of Action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *International Journal of Climatology*. 18:1 – 22; 1998.
8. Castro BM. Subtidal response to wind forcing in the South Brazil Bight during winter. [PhD Thesis]. University of Miami Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science; 1985.
9. Escobar GCJ. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. *Rev bras meteorol*. 22(2):241 – 254; 2007.
10. Vera CS, Vigliarolo PK. A Diagnostic Study of Cold – Air Outbreaks over South America. *Mon Wea Revy*. 128(1):3 – 24; 2000.
11. Stech JL, Lorenzetti JA. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. *Journal of Geophysical Research*. 97(C6):9507–9520; 1992.
12. Cavalcanti IFA, Kousky VE. Climatology of South American cold fronts. In: VII international Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, 2003, Wellington. American Meteorological Society. VII international Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Massachusetts, USA; 2003.
13. Rodrigues MLG, Franco D, Sugahara S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Rev Bras Geof*. 22(2):135–151; 2004.
14. Castro BM, Lee TN. Wind-forced sea level variability on the southeast Brazilian shelf. *Journal of Geophysical Research*. 100(C8):16045–16056; 1995.
15. Gill AE, Schumann EH. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography*. 4:83 – 90; 1974.
16. Csanady GT. The Arrested Topographic Wave. *Journal of Physical Oceanography*. 8(1):47 – 62; 1978.
17. Dottori M, Castro BM. The role of remote wind forcing in the subinertial current variability in the central and northern parts of the South Brazil Bight. *Ocean Dynamics*. 68(6):677 – 688; 2018.
18. Campos RM, Camargo R, Harari J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 25(2):175 – 184; 2010.

19. Filippo A, Kjerfve B, Torres Jr AR, Fernandes AM. Low-frequency variability of sea level along the Mid-Atlantic Coast of South America, in 1983. *Revista Brasileira de Geofísica*. 30(1):5–14; 2012.
20. Valentim SS, Bernardes MEC, Dottori M, Cortezi M. Low-frequency physical variations in the coastal zone of Ubatuba, Northern Coast of Sao Paulo State, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*. 61(3):187–193; 2013.
21. Harari J, Camargo R. Simulação da propagação das nove principais componentes de maré na plataforma sudeste brasileira através de modelo numérico hidrodinâmico. *Boletim do Instituto Oceanográfico*. 42(1):35–54; 1994.
22. Harari J, Camargo R. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. *Revista Brasileira de Oceanografia*. 46(2):135 – 156; 1994.
23. Pereira AF, Castro BM, Calado L, Silveira ICA. Numerical simulation of M2 internal tides in the South Brazil Bight and their interaction with the Brazil Current. *Journal of Geophysical Research*. 112, C04009; 2007.
24. Godin G. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press; 1972.
25. Butler A, Heffernan JE, Tawn JA, Flather RA, Horsburgh KJ. Extreme value analysis of decadal variations in storm surge elevations. *Journal of Marine Systems*. 67:189 – 200; 2007.
26. Sweet WV, Zervas C. Cool-season sea level anomalies and storm surges along the U.S. East Coast: Climatology and comparison with the 2009/10 El Niño. *Mon Wea Rev*. 139:2290–2299; 2011.
27. de Lange WP, Gibb JG. Seasonal, interannual, and decadal variability of storm surges at Tauranga, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 34(3):419–434; 2000.
28. Fiore MME, D'Onofrio EE, Pousa JL, Schnack EJ, Bértola GR. Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*. 29:1643 – 1649; 2009.
29. Simó DH, Horn Filho NO. Caracterização e Distribuição Espacial das "Ressacas" e Áreas de Risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *GRAVEL*. 2:93 – 103; 2004.
30. Vanz A, Fernandes LG. Ressacas, Afogamentos e Acidentes com Embarcações no Sul do Brasil nos Anos de 2009 e 2010. *GRAVEL*. 10(1):47 – 57; 2012.
31. Krueger J. Análise dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos dos eventos de ressaca, ocorridos entre janeiro de 2001 à dezembro de 2010, no estado de Santa Catarina. [PhD Thesis]. UNIVALI, Itajaí, SC; 2011. Trabalho de Conclusão de Curso.
32. FUNDESPA. Plano básico ambiental da dragagem do Aprofundamento do Porto de Santos - Anexo - Análise Histórica dos Registros de Ressacas ocorridos na região da Baía e Estuário de Santos. FUNDESPA; 2014.
33. Mesquita AR, Franco AS, Harari J, França CAS. On Sea Level Along the Brazilian Coast. *Revista Brasileira de Geofísica*. 31:33 – 42; 2013.
34. Harari J, França CAS, Camargo R. Long-Term Variability of Tidal and Mean Sea Level Components on the Brazilian Coast. *Revista Brasileira de Geofísica*. 31:49 – 52; 2013.
35. Emery WJ, Thomson RE. *Data analysis methods in physical oceanography*. vol. 2. Elsevier; 1998.
36. Kondrashov D, Ghil M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Processes in Geophysics*. 13:151 – 159; 2006.

37. Esquivel RM, Senna V, Gomes GSS. Previsão em séries temporais via Singular Spectrum Analysis e técnicas clássicas: Aplicações com dados meteorológicos e simulados. 58 Reunião anual da RBRAS e 15º SEAGRO; 2013.
38. Mahmoudvand R, Rodrigues PC. Missing value imputation in time series using Singular Spectrum Analysis. *International Journal of Energy and Statistics*. 4(1):1650005–1 – 1650005–6; 2016.
39. Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A, Tibshirani R, Reid N, Isham V, et al. *Analysis of Time Series Structure: SSA and related techniques*. Chapman & Hall/CRC; 2001.
40. Willmott CJ. On the validation of models. *Phys Geogr*. 2:184 – 194; 1981.
41. Birocchi P. Estudo do impacto de efluentes dos emissários submarinos nas áreas adjacentes ao canal de São Sebastião, SP. [Master's Dissertation]. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo; 2018.
42. Silver CN, Dunlap WP. Averaging correlation coefficients: Should Fisher's transformation be used? *Journal of Applied Psychology*. 72(1):146 – 148; 1987.
43. Fleming HE, Hill ML. An objective procedure for detecting and correcting errors in geophysical data: 1. One-dimensional applications. *J Geophys Res*. 87(C9):7312 – 7324; 1982.
44. Camargo R, Harari A J Caruzzo. Basic statistics of storm surges over the south-western Atlantic. *Afro-America Gloss News*. 3(2); 1999.
45. Walters RA, Heston C. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filter. *Journal of Physical Oceanography*. 12:112 – 115; 1982.
46. Zhang K, Douglas BC, Leatherman SP. East Coast Storm Surges Provide Unique Climate Record. *EOS*. 78(37):389 – 400; 1997.
47. Colle BA, Rojowsky K. New York City Storm Surges: Climatology and an Analysis of the Wind and Cyclone Evolution. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*. 49:85 – 100; 2010.
48. Zhang K, Douglas BC, Leatherman SP. Twentieth-Century Storm Activity along the U.S. East Coast. *Journal of Climate*. 13:1748 – 1761; 2000.
49. Souza CRG, Rodrigues GSR, Constantino J, Rosa EG. Eventos de ressaca e “maré alta” na Baixada Santista (SP), entre 1961 e 2011;. XV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.
50. Marone E, Camargo R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Neritica*. 8(1-2):73 – 85; 1994.
51. Bitencourt PD, Quadro MFL, Calbete NO. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz de Iguaçu - PR:3910 – 3917; 2002.
52. Fortune MA, Kousky VE. Two severe freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. *Mon Wea Rev*. 111:181 – 196; 1983.
53. Marengo J, Cornejo A, Satyamurty P, Nobre C. Cold Surges in Tropical and Extratropical South America: The Strong Event in June 1994. *Mon Wea Rev*. 125:2759 – 2786; 1997.
54. Ezer T. The increased risk of flooding in Hampton Roads: On the roles of sea level rise, storm surges, hurricanes, and the Gulf Stream. *Marine Technology Society Journal*. 52(2):34 – 44; 2018.

55. Souza CRG, Rodrigues GSR. Condições de contorno de eventos meteo-oceanográficos extremos na Baixada Santista (SP), entre 1928 e 2016;. XVI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.
56. Reboita MS, da Rocha RP, Ambrizzi T, Gouveia CD. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. *Cli Dyn* 45: 1929; 2015.
57. Gong D, Wang S. Definition of Antarctic Oscillation index. *Geophys Res Lett*. 26:459 – 462; 1999.
58. Venegas SA, Mysak LA, Straub DN. Atmosphere–ocean coupled variability in the South Atlantic. *J Climate*. 10:2904 – 2920; 1997.
59. D’Onofrio EE, Fiore MME, Pousa JL. Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*. 24(1A):260 – 265; 2008.
60. Parise CK, Calliari LJ, Krusche N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. *Braz j oceanogr*. 57(3):175 – 188; 2009.
61. Saraiva JMB, Bedran C, Carneiro C. Monitoring of storm surges on Cassino Beach. *J coast Res*. 35, Special Issue:323 – 331; 2003.
62. Dottori M, Castro BM. The response of the São Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds. *Ocean Dyn*. v. 59, n. 4:603–614; 2009.
63. Reboita MS. Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. [PhD Thesis]. IAG - USP; 2008.
64. Gan MA, Rao VB. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*. 119(5):1293 – 1302; 1991.
65. Klumb-Oliveira LA, Lins-de Barros F, França R, Pereira NE. Avaliação histórica do registro de ocorrência de ressacas marinhas e o comportamento de onda correspondente no litoral do Rio de Janeiro;. XV Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário – ABEQUA.