



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.15.14.27-TDI

**CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE
FAVORÁVEIS À OCORRÊNCIA DE RESSACAS EM
SANTOS, SP, E TENDÊNCIAS PARA O CLIMA
FUTURO**

Marcelly Sondermann da Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Chou Sin Chan, aprovada em 18
de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44BF9KL>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.15.14.27-TDI

**CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE
FAVORÁVEIS À OCORRÊNCIA DE RESSACAS EM
SANTOS, SP, E TENDÊNCIAS PARA O CLIMA
FUTURO**

Marcelly Sondermann da Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pela Dra.
Chou Sin Chan, aprovada em 18
de fevereiro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44BF9KL>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Marceley Sondermann da.
Si38c Condições atmosféricas em superfície favoráveis à ocorrência de
ressacas em Santos, SP, e tendências para o clima futuro / Marceley
Sondermann da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xxiv + 83 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/03.15.14.27-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadora : Dra. Chou Sin Chan.

1. Projeções climáticas. 2. Ciclones extratropicais. 3. Alta
resolução. I.Título.

CDU 551.515.2(815.6)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Secretaria de Pós Graduação

Meteorologia

ATA DE REUNIÃO

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE MARCELY SONDERMANN DA SILVA

No dia 18 de fevereiro, às 10h00, por videoconferência, a aluna mencionada acima defendeu seu trabalho final, intitulado **“CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE FAVORÁVEIS À OCORRÊNCIA DE RESSACAS E TENDÊNCIAS PARA O CLIMA FUTURO.”**, (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. A aluna foi **APROVADA** pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

A banca sugere incorporar as observações dos membros na dissertação, bem como mudança do título para:

Título: “CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE FAVORÁVEIS À OCORRÊNCIA DE RESSACAS EM SANTOS, SP, E TENDÊNCIAS PARA O CLIMA FUTURO.”

Eu, Paulo Nobre, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Membros da Banca

Dr. Paulo Nobre - **Presidente**- CPTEC/INPE

Dra. Chou Sin Chan - **Orientadora** - CPTEC/INPE

Dr. Claudine Dereczynski - **Membro Externo** - Universidade Federal do Rio de Janeiro



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Nobre, Pesquisador**, em 19/02/2021, às 14:17 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **6542057** e o código CRC **8C5A5865**.

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho para vocês, diz o Senhor. Planos de fazê-los prosperar e não de causar dano, planos de dar a vocês esperança e um futuro”.

Jeremias 29:11

À minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Mais uma etapa de um grande sonho foi conquistada. E, primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por todas as bênçãos e proteção derramadas sobre mim.

Agradeço a minha família por ser minha base e pelo suporte que me dão para tornar esse sonho possível. Sou muito grata por ter vocês na minha vida!

À minha orientadora Dra Chou por todos os ensinamentos durante esses anos, desde a graduação até o mestrado. Agradeço pela dedicação, paciência e oportunidades.

O meu muito obrigada a toda a equipe do ProjEta (CPTEC/INPE), por compartilhar seu conhecimento e pela paciência.

Ao Gabriel que está sempre ao meu lado! Obrigada por dividir todos esses importantes momentos comigo. Te amo!

Aos meus amigos de infância, Joel, Thais e Kalyel que mesmo com a distância, damos um jeito de estarmos presentes um na vida do outro.

Aos meus grandes amigos, um obrigada especial a aqueles que sempre estiveram ao meu lado compartilhando não só as vitórias, mas também as dificuldades. Obrigada, Pedro, Ana, Judith, Larissa, Malu, Renata, Renan, João, Marcolino e todos aqueles que se fizeram presentes nessa caminhada!

Obrigada aos grandes mestres que passaram por minha vida dividindo seus conhecimentos e que contribuíram para a minha formação pessoal e profissional. Em especial a Prof^a Mary e ao Prof^o Jean Davi. Agradeço a presença e a disponibilidade e contribuição da minha banca: Prof^a Claudine e Prof^o Paulo Nobre.

Agradeço à Prof^a Célia e sua equipe pelo apoio e pela minha inserção no projeto de pesquisa.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro durante todos os meses de mestrado.

Agradeço a todos vocês que estiveram presentes em minha vida durante esses anos. O mérito dessa conquista também pertence a vocês!

RESUMO

Eventos de ressaca em Santos, São Paulo, têm se tornado mais frequentes desde o final dos anos 90, conforme registrado por observações. Esses eventos podem provocar transtornos à navegação, às operações em plataformas de petróleo e destruições de áreas costeiras. O objetivo principal do presente trabalho é caracterizar as mudanças nas condições favoráveis à ocorrência das ressacas na cidade de Santos a partir de projeções climáticas futuras. A ressaca pode ser definida quando a altura significativa da onda que atinge a costa é igual ou superior a 2,5 metros e persiste por pelo menos 24 horas. Foram encontrados 89 dias de ressaca em Santos a partir dos dados de altura significativa de onda da Quinta Geração da Reanálise Atmosférica (ERA5) produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), para os meses de maio no período de 1981 a 2010. A partir do campo de pressão ao nível médio do mar e vento a 10 metros, os 89 casos de ressaca foram agrupados através da técnica de agrupamento K-means, resultando em 3 padrões meteorológicos favoráveis à ocorrência de ressacas. Para verificar a capacidade do modelo regional Eta, aninhado ao modelo global *Brazilian Earth System Model* (BESM) na resolução espacial de 20 km, em reproduzir esses padrões, comparou-se os campos meteorológicos diários do modelo com cada um dos três padrões favoráveis a ressacas obtidos da reanálise ERA5. Essa comparação foi realizada por meio de correlação espacial. Os resultados mostram que: 1) O Padrão 1, apresenta 10 casos e é caracterizado pela presença de um ciclone no litoral da cidade de Santos com ventos intensos e paralelos à costa; 2) O Padrão 2, com 22 casos, apresenta uma extensa pista de ventos intensos sobre o oceano, formada por um sistema de alta pressão ao sul e uma baixa pressão ao norte, em torno da latitude 30°S sobre o Oceano Atlântico Sul; 3) O Padrão 3 apresentou o maior número de eventos, 57 casos, e é caracterizado pela presença de ventos de sudoeste, provenientes de uma alta pressão sobre o continente e a presença de um cavado sobre o oceano. Os resultados mostraram que o Eta-BESM 20 km teve um bom desempenho em reproduzir os padrões favoráveis a ressacas. A distribuição de número de casos simulados entre os três padrões corresponde à distribuição encontrada na reanálise, apresentando mais casos no Padrão 3 e menos no Padrão 1. Em geral, o modelo apresentou ventos mais intensos sobre o oceano nos três padrões em comparação com a reanálise. A mesma comparação, utilizando a correlação espacial entre os campos dos padrões atmosféricos da reanálise e do modelo, foi realizada para a detecção de casos de ressacas no clima futuro, entre os anos de 2031 e 2060, utilizando dois cenários de emissão de gases do efeito estufa, RCP4.5 e RCP8.5. As projeções climáticas mostram que os padrões atmosféricos favoráveis a ressacas irão ocorrer com menor frequência no período futuro. Contudo, nota-se que os eventos poderão ser mais intensos, uma vez que ambos os cenários projetam ventos mais intensos para o Padrão 1. Para os outros padrões, não há mudanças evidentes. A fim de avaliar os impactos locais na zona costeira de Santos e obter um maior detalhamento dos dados e informações, é gerado o segundo *downscaling* do modelo Eta, alcançando a resolução espacial de 5 km. O segundo *downscaling* dinâmico, na resolução de 5 km, permitiu um maior detalhamento dos impactos locais das condições atmosféricas dos potenciais

dias de ressacas no litoral de Santos. As simulações do clima presente, período de 1976 a 2005, mostraram que a atuação de sistemas de escala sinótica nos eventos de ressacas, sobrepueram-se aos efeitos da circulação de mesoescala. As projeções futuras mostram maiores acumulados de chuva sobre o oceano no Padrão 1, que apesar da menor ocorrência em relação ao clima presente, tornou-se mais intenso, o que pode causar mais impactos negativos à cidade de Santos. Já os Padrões 2 e 3 no futuro, mostraram a precipitação concentrada ao longo de todo o litoral da Baixada Santista.

Palavras-chave: Projeções climáticas. Ciclones extratropicais. Alta resolução.

ATMOSPHERIC SURFACE CONDITIONS REQUIRED TO STORM SURGE OCCURRENCE IN SANTOS, SP, AND CLIMATE FUTURE CHANGES

ABSTRACT

According to observations, storm surge events in Santos have become more frequent since the 1990s. These events can disrupt navigation and operations on oil platforms and, destruction of coastal areas. The main goal of this work is to characterize the changes in atmospheric surface conditions required for storm surges in the city of Santos, SP, through projections of future climate. The storm surge can be defined when the significant wave height at the coast is equal to or greater than 2.5 meters and it remains for at least 24 hours. It was founded 89 storm surge days in Santos from significant wave height data from the Fifth Generation of Atmospheric Reanalysis (ERA5) conducted by the European Center for Medium-Term Meteorological Forecasts (ECMWF), in May to the period from 1981 to 2010. The 89 cases of storm surge were clustered using the K-means clustering technique. It resulted in 3 meteorological patterns favorable to the occurrence of storm surges. These patterns were based on fields of mean sea level pressure and wind at 10 meters. The capacity of the Eta regional model nested with the Brazilian Earth System Model (BESM) global model in the 20 km spatial resolution, in reproducing these patterns was verified. The daily meteorological fields were compared with each of the three patterns favorable to storm surges obtained from the ERA5 reanalysis. This comparison was made using spatial correlation. The results show that: 1) Pattern 1 shows 10 cases and it is characterized by the presence of a cyclone on the coast of the city of Santos with intense winds parallel to the coast of Santos; 2) Pattern 2, with 22 cases, shows a large wind fetch over the ocean, it is created by a system of high pressure in the south and low pressure in the north, around latitude 30°S over the South Atlantic Ocean; 3) Pattern 3 shows the largest number of events, 57 cases, and it is characterized by the presence of southwest winds, coming from high pressure on the continent and the presence of low pressure over the ocean. The results showed that the Eta-BESM 20 km performed well in reproducing patterns favorable to storm surges. The distribution of the simulated cases among the three patterns corresponds to the distribution founded in the reanalysis. There are more cases in Pattern 3 and fewer in Pattern 1. In general, the model presented more intense winds over the ocean in the three patterns compared to the reanalysis. The same comparison was made to the detection of storm surge cases in the future climate, between the years 2031 to 2060, using two scenarios of greenhouse gas emissions, RCP4.5 and RCP8.5. Climate projections show that atmospheric patterns favorable to storm surges will occur less frequently in the future period. However, the events may be more intense because both scenarios project more intense winds for Pattern 1. There are no evident changes in the other patterns. The second downscaling of the Eta model is generated with a spatial resolution of 5 km. It allowed for greater detail of the local impacts of the atmospheric conditions of the potential days of storm surges at the coast of

Santos. The simulations of the present climate, from 1976 to 1995, showed that the performance of synoptic-scale systems in the events of storm surges overlapped the effects of the mesoscale circulation. Future projections show more accumulated rainfall over the ocean in Pattern 1. Despite the lower occurrence with the present climate, Pattern 1 has become more intense. It may cause more negative impacts on the city of Santos. On the other hand, Patterns 2 and 3 in the future showed concentrated rainfall along the entire Baixada Santista coast.

Keywords: Climate projections. Storm surges. Extratropical cyclones. High resolution.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Distribuição anual da frequência do número de ciclogêneses.	6
Figura 2.2 – Densidade anual de ciclogêneses (10 – 4 km – 2) no período de 1990 a 1999.	8
Figura 2.3 – Padrões de trajetórias de ciclones: (A) Padrão I, (B) Padrão II, (C) Padrão III; e situação sinótica: (D) Padrão IV.....	10
Figura 3.1 – Domínio utilizado para (a) análises em grande escala e (b) avaliação dos impactos locais.	18
Figura 3.2 – Divisão de áreas da região de estudo. Área 1 (seleção em amarelo), compreende o litoral de Santos, e Área 2 (seleção em vermelho).	27
Figura 4.1 – Número de ocorrências de ressacas (dias) durante o período de 1981 a 2010 provenientes do banco de dados do estudo de Souza et al. (2019).....	33
Figura 4.2 – Número de eventos de ressacas em maio durante o período de 1981 a 2010.	37
Figura 4.3 – Duração média de eventos de ressacas (dias) e seus desvios padrão em maio durante o período de 1981 a 2010.....	37
Figura 4.4 – Intensidade e direção do vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas elaborados a partir dos dados da reanálise ERA5, em maio, durante o clima presente (1976-2005) para os padrões: (a) 1, (b) 2 e (c) 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.	40
Figura 4.5 – Número de eventos das condições FR simulados em maio durante o período de 1976 a 2005.	42
Figura 4.6 – Duração média das condições FR (dias) e seus desvios padrão (dias) em maio simulada durante o período de 1976 a 2005.	42
Figura 4.7 – Os três Padrões de intensidade e direção do vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas simulados pelo Eta-BESM 20 km, em maio, durante o	

clima presente (1976-2005): (a) Padrão 1; (b) Padrão 2 e (c) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.	44
Figura 4.8 – Número de eventos de condições FR em maio, durante o período futuro de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha azul) e o RCP8.5 (linha vermelha).....	46
Figura 4.9 – Duração média de condições FR (dias) e seus desvios padrão em maio, durante o período futuro de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha azul) e o RCP8.5 (linha vermelha).....	46
Figura 4.10 – Os três Padrões de intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetores, respectivamente) e PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas projetados pelo Eta-BESM 20 km, em maio, durante o clima futuro (2031-2060), utilizando o RCP4.5 (linha superior) e o RCP8.5 (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.	49
Figura 4.11 – Diferenças (Futuro – Presente) de intensidade do vento a 10 metros (sombreado) nos três padrões FR e a direção do vento a 10 metros (vetores) dos três padrões projetados, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha superior) e RCP8.5 (linha inferior), sobre a cidade de Santos: (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.....	50
Figura 4.12 – Topografia (metros) simulada pelo (a) Eta-BESM 20 km e pelo (b) Eta-BESM 5 km sobre a região Sudeste do Brasil.	53
Figura 4.13 – Intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) dos 3 padrões FR, em maio, durante o clima presente (1976-2005) sobre a região de Santos para os horários de 06Z (linha inferior) e 18Z (linha superior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.	56

Figura 4.14 – Os três Padrões de precipitação FR oriundos do MSWEP (1981-2000), simulados pelo Eta-BESM 5 km e 20 km (1976-2005), em maio sobre a cidade de Santos: (a), (d) e (g) Padrão 1; (b), (e) e (h) Padrão 2 e (c), (f) e (i) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média. 59

Figura 4.15 – Projeções dos três padrões da intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas projetados pelo Eta-BESM 5 km, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos para os horários de 06Z (linha superior) e 18Z (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média..... 62

Figura 4.16 – Diferenças (Futuro – Presente) de intensidade do vento a 10 metros (sombreado) nos três padrões FR e a direção do vento a 10 metros (vetores) dos três padrões projetados, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos para os horários de 06Z (linha superior) e 18Z (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média. 63

Figura 4.17 – Padrões de precipitação favoráveis à ocorrência de ressacas simulados pelo Eta-BESM 5 km, em maio, durante o período de 2031 a 2060 (clima futuro) utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos: (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média. 65

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Variáveis atmosféricas e oceânica utilizadas neste trabalho provenientes da reanálise ERA5.....	20
Tabela 3.2 – Variáveis atmosféricas utilizadas para a análise das simulações numéricas.....	29
Tabela 4.1 – Eventos de ressacas registrados por Souza et al. (2019) para o período de 1981 a 2010.	31
Tabela 4.2 – Datas que ocorreram ressaca nos meses de maio durante o período de 1981 a 2010, selecionadas a partir dos dados da reanálise ERA5 para o ponto de latitude 24°S e longitude 46°W. As datas em negrito são os mesmos eventos encontrados na base de dados observados.....	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AS	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
BAM	Modelo Atmosférico Global Brasileiro
BESM	<i>Brazilian Earth System Model</i>
CCI	<i>Soil Moisture Climate Change Initiative</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CHM	Centro Hidrográfico da Marinha
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño Oscilação Sul
ERA5	Quinta geração da reanálise europeia produzida pelo ECMWF
ESA	<i>European Space Agency</i>
FR	Favoráveis a ressacas
GFDL	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
HadGEM2-ES	<i>Hadley Global Environment Model 2 - Earth System</i>
HN	Hemisfério Norte
Hs	Altura Significativa
HS	Hemisfério Sul
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JJA	Junho, Julho e Agosto
MB	Marinha do Brasil
MCR	Modelo Climático Regional
MIROC	<i>Model for Interdisciplinary Research On Climate</i>
MOM4p1	<i>Modular Ocean Model version 4p1</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>

NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
PR	Potencial de ocorrência de ressacas
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RegCM4	<i>Regional Climate Model System</i>
SIS	<i>Sea Ice Simulator</i>
SMM	Serviço Meteorológico Marinho
SsiB	<i>Simplified Simple Biosphere Modes</i>
Tp	Tempo de permanência da onda
TSM	Temperatura da superfície do mar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Definições de ressaca.....	4
2.2	Áreas ciclogênicas na América do Sul.....	5
2.3	Condições atmosféricas à superfície FR	8
2.4	Simulações e projeções de ciclones.....	13
3	METODOLOGIA	17
3.1	Região de estudo	17
3.2	Dados observacionais	18
3.2.1	<i>Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)</i>	19
3.2.2	Reanálise ERA5	19
3.3	Modelos numéricos	20
3.3.1	Brazilian Earth System Model - Ocean-Atmosphere version 2.5 (BESM-OA2.5)	20
3.3.2	Modelo Regional Eta	22
3.3.3	Aninhamento do Modelo Eta ao Modelo Global	23
3.4	Identificação das condições FR	25
3.4.1	Seleção de casos de ressacas	25
3.4.2	Agrupamento dos padrões atmosféricos FR	25
3.4.3	Deteção dos padrões atmosféricos FR	27
3.5	Estudo das mudanças climáticas	28
4	RESULTADOS	30
4.1	Eventos observados de ressaca	30
4.2	Número de eventos e duração de ressacas.....	36
4.3	Os três padrões atmosféricos FR: observação.....	37
4.4	Padrões atmosféricos FR: simulação do clima presente	41
4.4.1	Número de eventos e duração das condições FR: simulação.....	41
4.5	Padrões atmosféricos FR: projeções no clima futuro.....	45
4.5.1	Número de eventos e duração das condições FR: projeções	45
4.5.2	Frequências projetadas dos três padrões atmosféricos FR	46

4.6	Impactos em escala local no entorno de Santos	51
4.6.1	Topografia	51
4.6.2	Simulação dos 3 padrões FR em escala local	54
4.6.3	Precipitação dos padrões FR	57
4.6.4	Projeções dos três padrões FR em escala local	60
4.6.5	Precipitação dos três padrões FR	64
5	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

1 INTRODUÇÃO

Ciclones extratropicais influenciam a circulação geral da atmosfera através do transporte de calor, umidade e momento. Esses sistemas de baixa pressão são exemplos de sumidouros de energia térmica e estão associados a sistemas frontais, onde há a presença de intenso gradiente horizontal de temperatura (ROCHA et al., 2016). Como consequência, esses ciclones extratropicais podem afetar as atividades humanas, devido às condições de mau tempo, como precipitação intensa, ventos fortes e mudanças bruscas na temperatura. Sobre o oceano, a troca de momento entre a atmosfera e o oceano é responsável pela agitação marítima que pode levar a eventos de ressacas e ondas gigantes provocando transtornos à navegação, operações em plataformas de petróleo e destruição de áreas costeiras (REBOITA, 2008).

A atividade ciclônica representa uma medida importante do estado da atmosfera. Informações sobre as características e trajetórias dos ciclones são importantes tanto para compreender as variações locais do tempo assim como a caracterização climática de determinada região (ULBRICH et al., 2009). Conhecendo as condições atmosféricas atuais é possível atribuir um maior grau de confiança nas previsões do comportamento futuro desses eventos, caracterizando sua frequência e intensidade.

O estudo desses sistemas de baixa pressão, assim como suas principais regiões de formação, bem como a frequência, trajetória e intensidade podem auxiliar no seu monitoramento, podendo minimizar perdas econômicas e humanas. Diversas pesquisas verificam a existência de padrões de trajetórias de ciclones associados a eventos de ressaca (REBOITA et al., 2005; MACHADO et al., 2010), uma vez que as ciclogêneses em latitudes médias contribuem para a intensificação das tempestades nos oceanos podendo causar eventos de ressaca.

As ressacas são conhecidas como o aumento significativo do nível médio do mar e estão associadas a ventos intensos e ao forte gradiente de pressão atmosférico, sendo os eventos mais intensos coincidentes com maré alta (PUGH, 1996). Esses fenômenos, algumas vezes, estão relacionados com a

presença de ciclone quase-estacionário ou de movimento lento próximos a costa do Sul e Sudeste do Brasil.

Segundo o *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (SROCC), as ressacas, conhecidas na literatura como “storm surges”, são o aumento temporário, em um determinado local, do nível do mar devido às condições meteorológicas extremas (baixa pressão atmosférica e/ou ventos intensos). Storm surge é definida como o excesso acima do nível esperado da variação de maré em um determinado tempo e lugar.

Eventos de ressaca têm se tornado mais frequentes desde o final dos anos 90, conforme registrado por observações ao longo da costa dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro (SOUZA et al., 2019). Modelos climáticos globais e regionais têm sido utilizados em alguns estudos para estimar as mudanças futuras das condições favoráveis a esse fenômeno. Esses estudos mostram forte variabilidade regional e sensibilidade à escolha do modelo climático. Tendências positivas observadas para o nível médio do mar, juntamente com os aumentos projetados até 2100, apresentam alta confiança e indicam que os sistemas costeiros experimentam cada vez mais elevação do mar e seus impactos adversos (SROCC, 2019).

As zonas costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais. Santos é uma importante cidade costeira do Estado de São Paulo, Brasil. A sua vulnerabilidade a variabilidade climática e às mudanças climáticas está relacionada a sua alta densidade populacional e às importantes atividades econômicas ali presentes, como por exemplo, a presença do maior porto da América Latina. Portanto, compreender os impactos das mudanças climáticas globais nessas regiões, torna-se imprescindível ao planejamento estratégico futuro e à tomada de decisões.

O presente trabalho consiste em responder as seguintes perguntas científicas: As condições favoráveis para ocorrência das ressacas que atingem a região de Santos sofrerão mudanças nos seus padrões com as mudanças climáticas globais? Como as mudanças climáticas podem estar afetando esses eventos: As condições atmosféricas à superfície favoráveis a ocorrências de ressacas estão se tornando mais intensas e frequentes?

1.1 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é caracterizar as mudanças nas condições atmosféricas favoráveis à ocorrência das ressacas a partir de projeções climáticas futuras.

Os objetivos específicos consistem em: desenvolver metodologia de detecção das condições atmosféricas favoráveis à ressaca (FR), avaliar as simulações climáticas na capacidade de detectar aquelas condições; conhecer a frequência e intensidade das mesmas sobre a região costeira da cidade de Santos; avaliar os impactos locais, na costa, das condições atmosféricas favoráveis aos casos de ressacas a partir do *downscaling* dinâmico de alta resolução.

Este trabalho está organizado de forma que no próximo capítulo, elaborase uma revisão dos trabalhos que tratam sobre a climatologia e projeção de ciclones, além da caracterização dos eventos de ressaca e as condições atmosféricas favoráveis para sua ocorrência. No Capítulo 3, encontram-se a metodologia e os dados utilizados neste trabalho. Os resultados esperados da avaliação do modelo Eta-BESM para simular o padrão atmosférico propício a formação de ressacas e suas projeções futuras estão apresentados no Capítulo 4. Por último, o Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, apresenta-se uma revisão de estudos que mostram diferentes definições para o termo “ressaca”. Na sequência, são apresentados estudos das áreas ciclogênicas na América do Sul e são levantados os resultados de padrões atmosféricos verificados em casos de ressaca. Por fim, são revisados trabalhos contendo simulações do clima presente e projeções do futuro de ciclones extratropicais para as regiões Sul e Sudeste do Brasil.

2.1 Definições de ressaca

Diversos estudos mostram diferentes definições para classificar “ressaca” no Brasil (MACHADO et al., 2020; MELO FILHO, 2017; BITENCOURT et al; 2002). Por outro lado, na literatura internacional a utilização do termo “*storm surge*” também é utilizado para definir o aumento temporário do nível do mar devido a condições extremas de tempo.

Segundo o Glossário do SROCC, o termo “*storm surge*” é apresentado como sendo o aumento temporário da altura do mar, em um local específico, devido às condições meteorológicas extremas, relacionadas com um baixa pressão atmosférica e/ou ventos intensos.

De acordo com estudo apresentado por Souza et al. (2019), *storm surge* é o aumento anormal do nível do mar durante uma tempestade próxima a costa, medida como a altura do nível da água acima da maré astronômica prevista, resultante do efeito combinado do cisalhamento do vento na superfície do mar e da redução da pressão atmosférica.

Segundo Melo Filho (2017), a palavra ressaca deve ser usada exclusivamente para identificar eventos de ondas “grandes” na costa. O limiar que separa ondas “grandes” de ondas “pequenas” deve ser definido usando a altura significativa (H_s) como parâmetro de medida de acordo com o clima de ondas do sítio em questão. Com essa definição, a palavra ressaca passaria a se referir apenas às condições de onda não tendo relação com mau tempo, tempestades e, principalmente, com variações de nível do mar de qualquer tipo, astronômicas ou não-astronômicas. De acordo com as Normas de Autoridade Marítima

(NORMAM-19) da Marinha do Brasil, a ressaca pode ser definida quando Hs que atinge a costa é igual ou maior que 2,5 metros. O estudo de Machado et al. (2020) seguiu as definições adotadas pela Marinha do Brasil e considerou ressaca todos os Avisos de Mau Tempo do Centro de Hidrografia da Marinha que continham “Aviso de Ressaca”.

Portanto, define-se ressaca quando a altura significativa da onda máxima diária em um ponto próximo a costa de Santos é maior ou igual a 2,5 metros.

2.2 Áreas ciclogênicas na América do Sul

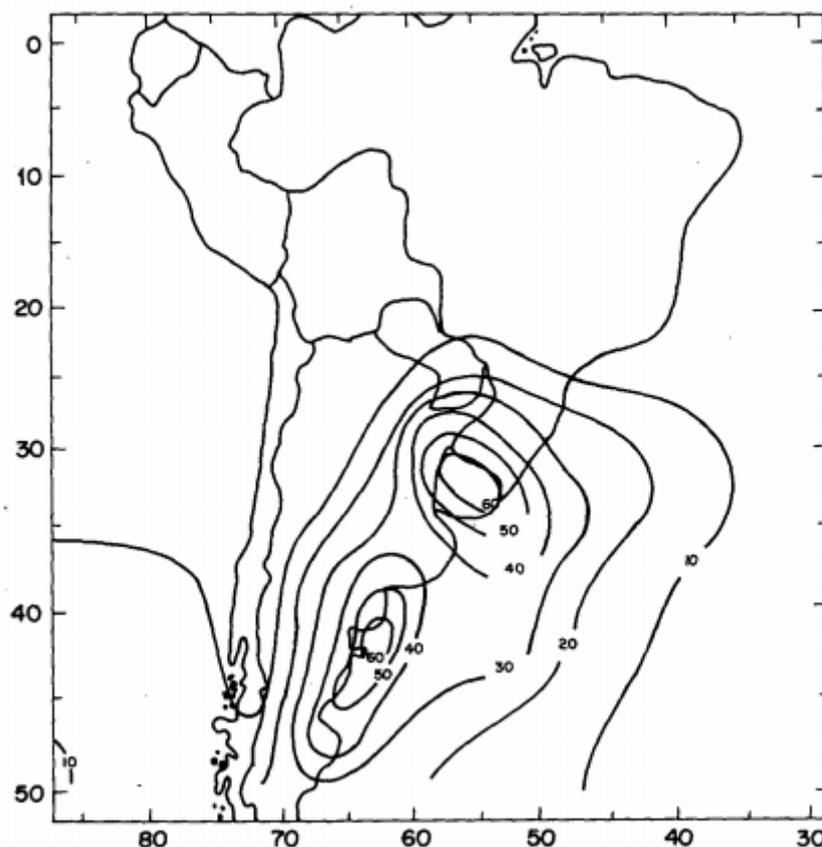
Muitos estudos foram realizados para definir as regiões preferenciais de formação e deslocamento de ciclones. Para o Hemisfério Norte, ressaltam-se estudos iniciais como Peterssen (1956), Palmen e Newton (1969), Whittaker e Horn (1981), entre outros. Já para o hemisfério sul, destacam-se algumas pesquisas envolvendo a climatologia de ciclogêneses como: Taljaard (1972), Necco (1982), Satyamurty et al. (1990), Gan e Rao (1991), Sinclair (1996), Hoskins e Hodges (2005), Reboita (2008) e Jantsch (2019).

Em Taljaard (1972), verifica-se o máximo de ciclogênese sobre o Uruguai. Necco (1982) identifica 119 centros ciclônicos, sendo que 70% desses centros são formados sobre uma região confinada entre 0°-90°W e 10°-55°S. Ressalta-se que os autores encontram que o verão é a estação de menor frequência de formação de ciclones sobre a América do Sul (AS).

Estudos climatológicos especificamente no HS mostram uma alta frequência de ciclones extratropicais sobre o setor sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Gan e Rao (1991) realizaram um estudo sobre a frequência da ocorrência de ciclogêneses sobre a AS, identificando 1091 casos durante o período de janeiro de 1979 até dezembro de 1988. Verifica-se uma maior frequência de ocorrência de ciclogêneses no inverno. Apesar disso, a maior frequência é encontrada no mês de maio (134 casos) e a menor em dezembro (71 casos). Os autores identificaram dois centros preferenciais de formação de ciclones: sobre o Uruguai e outra região próxima ao Golfo de São Matias na Argentina (Figura 2.1). Os valores das frequências nesses dois centros variam de acordo com a estação

do ano. Sobre o Uruguai, tem-se maior frequência de sistemas no inverno e sobre o segundo centro ciclogênético no verão.

Figura 2.1 – Distribuição anual da frequência do número de ciclogêneses.



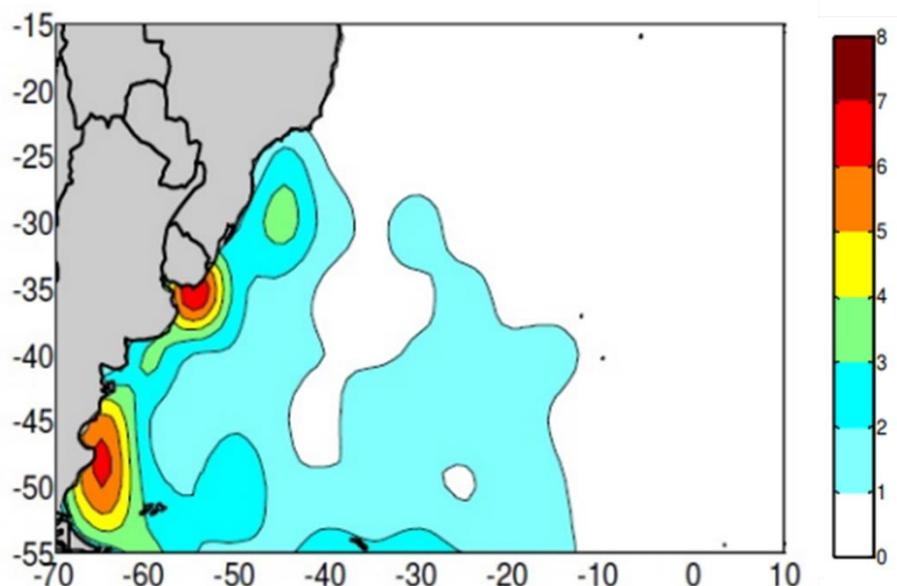
Fonte: Gan e Rao (1991).

Jantsch (2019) elabora uma climatologia dos ciclones extratropicais que ocorreram no Sul do Brasil entre os anos de 2000 a 2016, utilizando dados da reanálise do Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), assim como as variações das frequências anuais e das áreas de maior ocorrência. O autor destaca duas regiões de principais ocorrências, uma presente na região do Rio da Prata até a costa do Rio Grande do Sul e a segunda na costa do Sudeste do Brasil. No verão, há uma densidade maior de ocorrência nas proximidades da costa da Sudeste em relação a outros períodos do ano, porém, isso pode ser explicado pela maior disponibilidade de umidade na região nesses meses do ano, podendo ter influenciado na maior densidade de ciclones na área. O outono

é marcado pela redução da densidade na costa do Sudeste e aumento no litoral gaúcho e no Rio da Prata. No inverno, a densidade aumentou e se concentrou na costa do Rio grande do Sul e na região do Prata. Na primavera, a maior densidade novamente ocorreu na região do Rio da Prata e costa do Rio Grande do Sul, porém, com mais ciclones tendo sido registrados na costa do Sudeste do Brasil em relação ao inverno. Jantsch (2019) aponta que a primavera é a estação mais preocupante em relação aos impactos causados pelos ciclones, uma vez que é o período com maior formação de ciclones e possui a menor média dos valores de pressão atmosférica.

Outros estudos apontam para a presença de três núcleos ciclogênicos na costa da AS, sendo evidentes nos estudos realizados por Necco (1982), Sinclair (1996), Hoskins e Hodges (2005) e Reboita (2008). Reboita (2008) utiliza dados do NCEP e considera vorticidade relativa menor ou igual a $-1,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ para identificar as áreas preferenciais de ciclogêneses próximas à costa leste da AS. A partir disso, verifica-se a presença de três regiões (Figura 2.2): na costa sul da Argentina próximo a $48^{\circ}S$, com maior frequência no verão; no Uruguai, na região da desembocadura do rio da Prata ($35^{\circ}S$), com maior densidade de sistemas na primavera; e na costa das regiões sul e sudeste do Brasil, entre 25° e $30^{\circ}S$, com maior densidade de sistemas no verão.

Figura 2.2 – Densidade anual de ciclogêneses ($10^{-4} km^{-2}$) no período de 1990 a 1999.



Fonte: Reboita (2008).

2.3 Condições atmosféricas à superfície FR

As ressacas estão associadas a ventos intensos e a um centro de baixa pressão próximos à costa. Dessa forma, esses eventos podem causar impactos negativos sobre as regiões costeiras, podendo resultar em perdas humanas e materiais. Análises das condições atmosféricas associadas a eventos de ressaca são investigadas por diversos estudos, como Marone e Camargo (1994), Innocentini e Caetano Neto (1996), Rocha et al. (2003), Saraiva et al. (2003), Camargo e Campos (2006), Parise et al. (2009), Machado et al. (2010), Campos et al. (2010), Hernandez (2017), Souza et al. (2019).

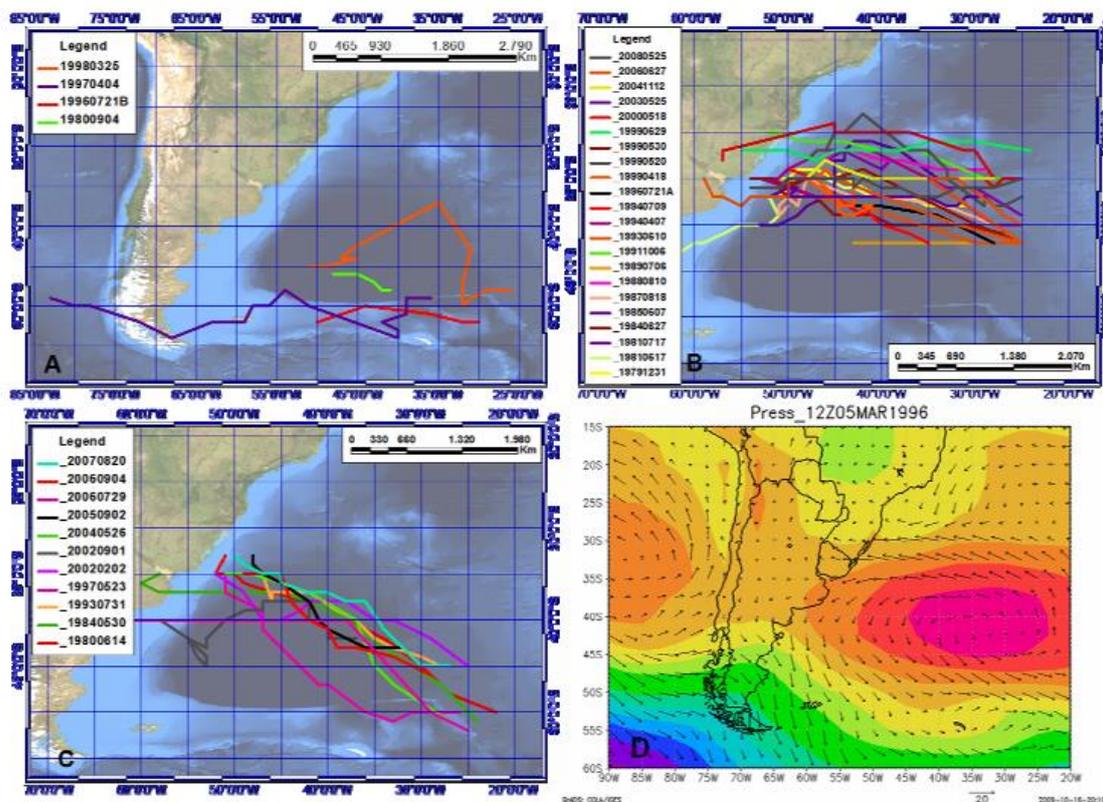
As ciclogêneses em latitudes médias contribuem para a intensificação das tempestades no Oceano Atlântico podendo causar agitação marítima. Diversas pesquisas verificam a existência de padrões de trajetórias de ciclones associados a eventos de ressaca (REBOITA et al., 2005; PARISE et al., 2009; MACHADO et al., 2010). Reboita et al. (2005) utilizam a metodologia de detecção de ciclones que consiste no método da vorticidade relativa, também empregado em Rocha et al. (2003). Parise et al. (2009) destacam a existência de três padrões de trajetória para os ciclones associados a 23 eventos de maré

meteorológica: o Padrão I consiste na ciclogênese ao sul da costa argentina com deslocamento para o leste e trajetória entre 47,5°S e 57,5°S; O Padrão II apresenta a ciclogênese ao sul da costa do Uruguai com deslocamento para leste e trajetória entre 35°S e 42,5°S; e o Padrão III consiste na ciclogênese ao sul da costa uruguaia com deslocamento para sudeste e trajetória entre 35°S e 57,5°S.

Hernandez (2017) avalia as condições meteorológicas e oceanográficas sobre uma praia em Santa Catarina. O autor conclui que as ondas e marés extremas são decorrentes de ciclones extratropicais formados, principalmente, sobre a Argentina e o Uruguai. As condições meteorológicas que geram ondas que aconteceram no período se enquadram dentro dos padrões propostos por Reboita et al. (2005). Apesar disso, em alguns casos ocorre a formação de um segundo ciclone no mesmo evento, aumentando a duração e intensidade dos eventos que chegam à costa, indicando a existência de mais padrões meteorológicos. A intensificação das alturas de ondas ocorrem ao longo da direção da pista de vento que é a distância na qual o vento possui velocidade e direção constantes. A anomalia positiva da maré meteorológica é decorrente de ventos provenientes das direções sudoeste e sul agindo na região da Argentina, não sendo necessário a tempestade chegar a região de estudo.

Outros padrões sinóticos geradores de ressacas são identificados por Machado et al. (2010) e apresentados na Figura 2.3. O Padrão I apresenta ciclogênese no sul da costa da Argentina com deslocamento para leste e sua trajetória entre 47,5°S e 57,5°S; O Padrão II consiste na ciclogênese no sul da costa do Uruguai com deslocamento para leste e sua trajetória entre 28°S e 43°S; O Padrão III apresenta ciclogênese no sul da costa do Uruguai com deslocamento para sudeste e sua trajetória entre 32°S e 57,5°S; O Padrão IV consiste em um centro de alta pressão gerando ventos de leste. Os autores identificaram 40 eventos com ondas acima de 6 m, dentre eles, 53,66% tiveram a trajetória do Padrão II e 26,82% estavam associados ao Padrão III, ambos representando 80% do total. Episódios de erosão costeira geralmente estão associados ao Padrão II. Já o Padrão III é responsável pela maior elevação do nível do mar no Sul do Brasil.

Figura 2.3 – Padrões de trajetórias de ciclones: (A) Padrão I, (B) Padrão II, (C) Padrão III; e situação sinótica: (D) Padrão IV.



Fonte: Machado et al. (2010).

Diversos estudos destacam que os eventos de ressacas estão associados a padrões espaciais de ciclones extratropicais sobre o oceano e anticiclones sobre o continente a sudoeste que intensifica o vento próximo à superfície (MARONE E CAMARGO, 1994; CAMARGO E CAMPOS, 2006; CAMPOS et al., 2010).

Marone e Camargo (1994) identificam as condições meteorológicas mais comuns durante a ocorrência de ressacas sobre a costa do estado do Paraná. Os autores apontam que existem duas possíveis condições atmosféricas que podem causar aumento do nível do mar: a intensificação de frentes frias sobre o oceano, acompanhada por forte ciclogênese, e a combinação de um centro de baixa pressão sobre o oceano com um centro de alta pressão sobre o continente, com ventos de quadrante sul sobre o oceano que mantém a água empilhada na costa.

Campos et al. (2010) mostram que as ressacas ocorrem devido à migração e à persistência de ciclones extratropicais sobre o oceano, deslocando-se do sul da AS, com ventos acima de 8 m/s agindo sobre o oceano, próximos à costa. Já Rocha et al. (2003) apresentam a intensidade do vento maior que 14 m/s no estágio maduro do ciclone, causando ondas elevadas que se propagam até o Sudeste brasileiro. Innocentini e Caetano Neto (1996) analisam um ciclone que causou forte ressaca e foi responsável por prejuízos econômicos e humanos no estado do Rio de Janeiro. Os autores mostram a presença de uma pista de ventos persistentes e extensa com velocidades maiores que 12 m/s, paralelos à costa.

A amplitude da maré também é influenciada localmente pela intensidade e duração do ventos, estes resultam da posição e extensão da pista, que é formada a partir da posição e da velocidade de deslocamento do ciclone extratropical em relação ao anticiclone sobre o continente Parise et al. (2009).

Saraiva et al. (2003) apontam que os ventos mais fortes associados às ressacas são de sudoeste, sul e sudeste, com velocidade de 16 a 24 m/s, sendo o vento predominante o de sudoeste (65% dos casos) associados aos ciclones próximos à costa do RS. Essas direções do vento são mais favoráveis a aumentar o nível do mar, pois junto com o efeito de Coriolis tendem a acumular água na costa. Em relação ao centro dos ciclones, os valores mínimos simulados por um modelo atmosférico global variam de 970 a 1005 hPa. A pista de vento foi formada em 80% dos eventos de ressaca estudados devido à interação entre os ciclones e anticiclones, com o máximo de extensão variando, aproximadamente, de 1700 a 3000 km. A direção, intensidade, duração e tamanho da pista, exercem diferentes efeitos sobre a maré. O efeito da costa influencia no tempo entre a formação do ciclone e o momento em que o nível do mar alcança o valor máximo. Os valores de vorticidade relativa em 1000 hPa próximos dos ciclone variam de $8 \times 10^{-5} s^{-1}$ até $16 \times 10^{-5} s^{-1}$. Os valores de vorticidade relativa concordam com Satyamurty et al (1990) para sistemas convectivos intensos.

As mudanças no oceano ocorrem mais lentamente que as mudanças na atmosfera. Dessa forma, existe um atraso entre a ação do vento e a resposta das marés meteorológicas (PARISE et al., 2009). Camargo e Campos (2006) destacam que esses eventos ocorrem um ou dois dias depois da atividade

meteorológica e dependem da persistência e propagação dos ciclones e anticiclones. Apesar disso, Saraiva et al. (2003) observam que 45% dos casos de ressaca, levam 24 horas para o efeito ser observado na costa. Enquanto que 30% dos eventos, 48 horas, 10% dos casos levam 36 horas e somente 6 horas em 10% dos casos. Os 5% restantes correspondem aos eventos que não podem ser explicados pelo método empregado nesse estudo.

O deslocamento de um sistema de baixa pressão associado a uma frente fria é observado por Campos et al. (2010). O sistema está posicionado sobre a costa entre Paraná e São Paulo; um dia antes, a frente fria passa sobre Santos, movendo-se em direção ao Rio de Janeiro; e no dia do evento de ressaca em Santos, a frente fria chega ao estado do Espírito Santo. O atraso da influência das condições atmosféricas sobre as marés pode ser explicado como sendo o tempo necessário para a transferência do momento da atmosfera para o oceano (PARISE et al., 2009).

Eventos meteorológicos-oceanográficos são influenciados por um conjunto de forçantes, como os ventos, as ondas, as marés, as fases da lua, a precipitação, circulação atmosférica e fenômenos climáticos. Souza et al. (2019) apresentam um grupo de sete indicadores que descrevem as condições de cada evento: duração/intervalo de evolução, fase lunar, altura da maré meteorológica, precipitação, direção e intensidade do vento, altura e direção significativa da onda e fases do El Niño - Oscilação Sul (ENOS). Os resultados apontam que cerca de 76,5% das ressacas ocorrem entre abril e setembro e, que as marés da primavera influenciaram 52,2% desses eventos. A precipitação acumulada máxima registrada durante o intervalo de duração das ressacas foi de 227,1 mm e a altura máxima das marés meteorológicas foi de 0,78 metros. A intensidade dos ventos atinge 20,6 m/s com predominância de ventos do quadrante sul e altura de ondas significativas atingem 7 metros.

Estudos concordam que o período de maior atividade de ressaca nas regiões Sul e Sudeste do Brasil ocorre entre o outono e inverno (PARISE et al., 2009; CAMPOS E CAMARGO, 2006; CAMPOS et al., 2010) e depende da intensificação, tamanho e posição do ciclone sobre o oceano junto a um anticiclone sobre o continente, com a presença intensa dos ventos de sudoeste, aproximadamente, paralelos à costa.

No inverno, a intensificação do anticiclone sobre o continente aumenta o gradiente de pressão responsável pelos intensos ventos de sudoeste (CAMPOS et al., 2010). Inversamente, na primavera e no verão, verifica-se uma redução na ocorrência desses eventos. Camargo e Campos (2006) concluem que os processos ciclogênicos e as intrusões de ar frio estão relacionadas com a maior ocorrência de eventos de ressaca no outono e no inverno.

Parise et al. (2009) verificam que os eventos de ressaca no Rio Grande do Sul foram mais frequentes no outono e inverno, com predominância de 35% em cada estação, seguidos da primavera (17%) e verão (13%). Essa frequência de eventos no outono e inverno estão associados aos ventos mais intensos no sul do Brasil nessa época. Os ventos de sudoeste ocorreram em 70% dos casos e foram fundamentais para a ocorrência do aumento do nível do mar. Apesar disso, Saraiva et al. (2003) destacam que 67% das ressacas ocorreram durante o outono, 15% na primavera, 15% no verão e 5% no inverno. A maré astronômica tem grande influência e intensidade no outono e primavera, o qual faz destas estações períodos favoráveis ao aumento do nível do mar ao longo da costa.

Assim como para a região Sul do Brasil, um estudo feito para a cidade de Santos, Campos et al. (2010) apresentam a distribuição da ocorrência de eventos de ressaca: 14,5% primavera, 13,4% no verão, 40,2% no outono e 30,8% no inverno. Os autores apontam para uma tendência de aumento de 13% no número de extremos positivos entre 1951 e 1980.

2.4 Simulações e projeções de ciclones

No contexto de mudanças climáticas globais, muitos estudos têm sido realizados a fim de avaliar a capacidade dos modelos numéricos globais e regionais em simular sistemas atmosféricos, como por exemplo ciclones extratropicais (GENG e SUGI, 2003; LIONELLO e GIORGI, 2007; REBOITA et al., 2010; KRÜGER et al., 2012; XIA et al., 2016; REBOITA et al., 2018).

Estudos climatológicos sobre o HS têm mostrado uma alta frequência desses ciclones sobre o setor sudoeste do Oceano Atlântico Sul (HOSKINS e HODGES, 2005; REBOITA et al., 2010, 2015; KRÜGER et al., 2012). Reboita et al. (2010) realizam uma climatologia de ciclogêneses sobre o Oceano Atlântico Sul

utilizando um modelo climático regional apresentando uma boa performance para representar a climatologia de ciclogêneses. Apesar disso, verifica-se uma grande subestimativa do modelo para sistemas intensos. Verifica-se que o ciclo anual da ciclogênese depende da sua intensidade inicial, para sistemas menos intensos, o ciclo anual é bem definido e a maior frequência ocorre no outono. Já os sistemas mais intensos são bem caracterizados com um alta frequência durante o inverno. Xia et al. (2016) avaliam a habilidade de um modelo global acoplado oceano-atmosfera em simular uma climatologia de ciclones extratropicais. Os resultados apontam para uma grande variabilidade anual na frequência dos ciclones, porém, não apresentam uma tendência evidente.

Mudanças futuras na intensidade e frequência dos ciclones também têm sido investigadas (LAMBERT e FYFE, 2006; BENGTSSON et al., 2009; KRÜGER et al., 2012; REBOITA et al., 2018; CHOU et al., 2019). É importante conhecer o comportamento desses fenômenos em diferentes cenários de aquecimento, uma vez que estes estão associados a condições severas de tempo, como fortes ventos e intensa precipitação, podendo causar impactos negativos nas regiões costeiras.

Projeções climáticas futuras utilizando cenários climáticos do IPCC de diferentes *Assessment Report* são realizadas para investigar o efeito do aquecimento climático global sobre o comportamento dos ciclones, analisando sua frequência e intensidade até o final do século. O AR5 concluiu que não se espera que o número global de ciclones extratropicais diminua mais do que poucos por centos devido às mudanças antropogênicas. O rastreamento de tempestades no Hemisfério Sul é projetado para ter uma pequena mudança em direção ao pólo, porém, a magnitude dessa mudança é dependente do modelo utilizado (CHRISTENSEN et al. 2013). Lambert e Fyfe (2006) mostram que para todos os cenários de mudanças climáticas, os modelos apresentam uma redução no número total de eventos de ciclones, com maior diminuição sobre o HS quando comparado ao Hemisfério Norte (HN). Na maioria dos experimentos, os modelos apontam para um aumento no número de eventos intensos. Em contrapartida, Bengtsson et al. (2009) apontam para uma pequena redução no número de ciclones, porém, não apresentam mudanças significativas nos extremos de vento e vortacidade dos ciclones extratropicais para os dois hemisférios. As maiores

mudanças ocorrem na precipitação, as quais apresentam um aumento significativo. Para a AS, Krüger et al. (2012) apresentam projeções que indicam uma redução no número total de ciclones variando de 4,5% a 7,2%. Em geral, verifica-se uma grande diminuição no número de ciclones no sul do Oceano Atlântico Sul devido à anomalia anticiclônica sobre esta região, entre 30-55°S. A redução é maior nos cenários com maiores concentrações de gases de efeito estufa.

Reboita et al. (2018) avaliam as projeções climáticas de ciclones extratropicais sobre o sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Para isso, os autores utilizam o Modelo Climático Regional versão 4 (RegCM4) aninhado ao modelo global Hadley Global Environment Model 2 - Earth System (HadGEM2-ES) utilizando o cenário RCP8.5. As análises são feitas para três períodos de tempo: o presente (1979-2005), futuro próximo (2020-2050) e futuro distante (2070-2098). Para avaliar a simulação do clima presente, os resultados obtidos pelo downscaling são comparados com um ensemble de cinco reanálises (ERA-40, ERA-Interim, NCEP-NCAR, NCEP-DOE e CFSR), obtendo um bom desempenho para representar a alta (baixa) frequência de ciclones no inverno (verão), o tempo de vida, a distância de deslocamento e a velocidade média dos ciclones. Além disso, o RegCM4 simula de forma mais realista, comparado com o ensemble das reanálises, o padrão espacial da densidade da ciclogênese sobre o Oceano Atlântico Sul. Para os períodos futuros, projeta-se uma redução da frequência anual de ciclones, que atinge -6,5% (-3,6%) em RegCM4 (HadGEM2-ES) no futuro próximo e -11,4% (-10,4%) no futuro distante. As projeções futuras não indicam mudanças na intensidade média dos ciclones. A tendência negativa da frequência do ciclone afeta a precipitação. Para o futuro distante, é projetada uma redução de aproximadamente 15% na precipitação associada aos ciclones.

Chou et al. (2019) avaliam as projeções das mudanças climáticas para a cidade de Santos, incluindo a tendência da temperatura, da precipitação, dos indicadores de extremos climáticos e de tempestades relacionadas a ciclones extratropicais. A avaliação é baseada no downscaling dinâmico, utilizando o modelo regional Eta com resoluções espaciais de 20 km e 5 km e dois modelos globais HadGEM2-ES e MIROC5 para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o período de 1961 a 2100. Distribuições de frequência de precipitação e temperatura mostram que a integração de 5 km aproxima-se melhor da

precipitação observada do que a resolução de 20 km. A avaliação de projeções de mudanças climáticas indicam que o aquecimento na região atinge cerca de 2°C até o final do século XXI, e a precipitação reduz em toda a região. Tendências dos indicadores de extremos climáticos mostram aumento de dias quentes, noites quentes, e na duração de dias secos consecutivos com o aumento da pressão atmosférica. Projeções da pressão mínima à superfície na costa do Sudeste do Brasil mostram uma tendência de enfraquecimento no cenário RCP8.5. Esses resultados podem contribuir para uma mudança no comportamento da intensidade e frequência dos eventos de ressaca nessa região.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se os dados observados e de reanálise utilizados, assim como as descrições do modelo Eta e do modelo global BESM, e os procedimentos para o aninhamento do modelo regional ao modelo global. A seguir, descreve-se as metodologias utilizadas para a detecção de ressacas na região costeira de Santos para o clima presente e futuro. A seleção de casos e a técnica de agrupamento utilizada para encontrar os padrões atmosféricos favoráveis à ocorrência de ressacas também são apresentados. Por fim, para avaliar a capacidade do modelo Eta em reproduzir as condições atmosféricas FR e, detectar a potencial ocorrência desse fenômeno no clima futuro para a zona costeira de Santos realiza-se a comparação de padrões a partir de correlação espacial.

3.1 Região de estudo

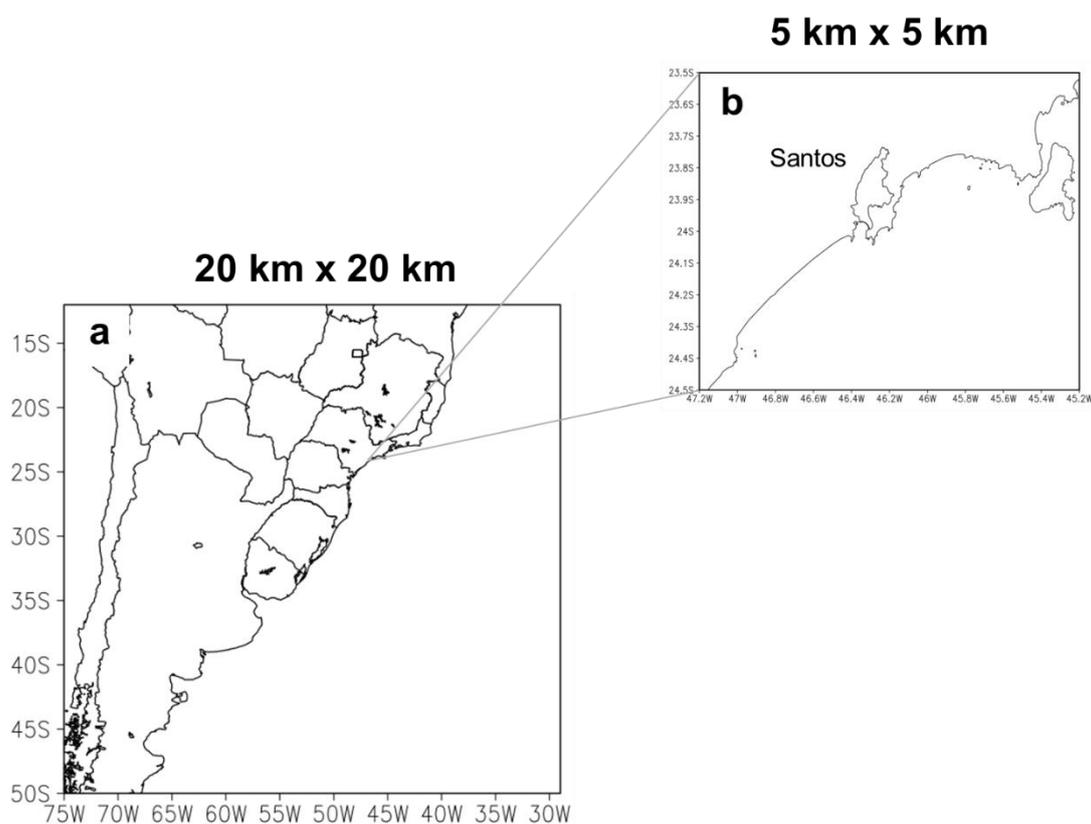
Santos é uma cidade costeira localizada no estado de São Paulo, no Sudeste do Brasil (Figura 3.1). Possui 432.957 habitantes (Censo 2018 - Instituto Brasileiro de Geografia Estatística/IBGE) e uma área de aproximadamente 280.000 km². A região é caracterizada pelas suas intensas atividades socioeconômicas, como por exemplo o turismo e a presença do maior porto da América Latina (RIBEIRO et al. 2019). A cidade e suas áreas adjacentes são um centro econômico estratégico para o Brasil, com uma grande concentração de indústrias localizadas ao longo da zona costeira. O porto de Santos é o principal ativo econômico do município, sendo responsável pelo transporte de produtos do maior parque industrial do Brasil e administra grande parte do comércio exterior do país.

A vulnerabilidade de Santos à variabilidade e mudança climática está relacionada à sua alta densidade populacional e às importantes atividades econômicas. As encostas das montanhas da Serra do Mar são suscetíveis a deslizamentos frequentes, além da ocorrência de intensas tempestades e ressacas (MARENGO et al. 2016). É importante conhecer as condições climáticas passadas e como será o seu comportamento no futuro a fim de auxiliar

estudos de impacto, vulnerabilidade e adaptação a mudanças climáticas em diferentes setores socioeconômicos da região.

Historicamente, Santos é vulnerável à ocorrência de eventos meteorológicos e oceanográficos extremos, causando inundações, deslizamentos de terra, raios e tempestades (SANTOS et al., 2018; ZANETTI et al., 2019). Nesta região, a principal causa de tempestades é a presença de ciclone extratropical associado a um sistema frontal, caracterizado por ventos de alta intensidade de sudoeste, paralelos à costa (SOUZA et al., 2019).

Figura 3.1 – Domínio utilizado para (a) análises em grande escala e (b) avaliação dos impactos locais.



3.2 Dados observacionais

Nesta seção são apresentados e descritos os dados observados e de reanálise utilizados no presente trabalho.

3.2.1 Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)

O *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP) é um conjunto de dados global de precipitação para o período de 1979 a 2015 e possui uma resolução temporal de 3 horas e espacial de 0,25°. O MSWEP (BECK et al., 2017) combina fontes de dados de alta qualidade disponíveis em função da escala de tempo e localização: dados de estações, satélite e reanálises.

Nesse trabalho, utiliza-se a precipitação diária (mm) na região de Santos para os meses de maio do período de 1981 a 2010.

3.2.2 Reanálise ERA5

ERA5 (HERSBACH E DEE, 2016) é a Quinta Geração da Reanálise Atmosférica produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A Reanálise ERA5 combina grandes quantidades de observações históricas em estimativas globais usando modelos avançados e sistemas de assimilação de dados.

A reanálise ERA5 fornece estimativas de hora em hora de um grande número de variáveis climáticas atmosféricas, terrestres e oceânicas. Os dados cobrem todo o globo com uma grade de, aproximadamente, 30 km na horizontal e resolvem a atmosfera utilizando 137 níveis da superfície até uma altura de 80 km.

Neste trabalho, são utilizadas as variáveis atmosféricas e oceânica apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Variáveis atmosféricas e oceânica utilizadas neste trabalho provenientes da reanálise ERA5.

	Variável	Unidade	Resolução Horizontal	Domínio
Variáveis Atmosféricas	Pressão ao nível médio do mar	hPa	0,25° x 0,25°	Latitude: 50°S – 12°S Longitude: 75°W – 29,5°W
	Componente zonal do vento a 10 metros	m/s	0,25° x 0,25°	Latitude: 50°S – 12°S Longitude: 75°W – 29,5°W
	Componente meridional do vento a 10 metros	m/s	0,25° x 0,25°	Latitude: 50°S – 12°S Longitude: 75°W – 29,5°W
Variável Oceânica	Altura significativa da onda	metros	0,50° x 0,50°	Latitude: 24°S Longitude: 46°W

3.3 Modelos numéricos

Nesta seção, apresenta-se a descrição do modelo global BESM e do modelo regional Eta, assim como o aninhamento do modelo regional ao modelo global.

3.3.1 Brazilian Earth System Model - Ocean-Atmosphere version 2.5 (BESM-OA2.5)

O modelo global BESM foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Consiste em um modelo de acoplamento terra-oceano-atmosfera que é alcançado através do acoplador FMS, uma ferramenta

desenvolvida no Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

BESM-OA2.5 (VEIGA et al., 2019) é uma atualização da versão de BESM-OA2.3 (NOBRE et al., 2013; GIAROLLA et al., 2015). Na nova versão foi incorporada como componente atmosférica o Modelo Atmosférico Global Brasileiro (BAM; FIGUEROA et al., 2016).

O modelo BAM é desenvolvido no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE). É um modelo de equações primitivas com representação espectral. Foi utilizado o truncamento triangular no número de onda 62 (correspondente a uma resolução de grade de aproximadamente $1,875^\circ \times 1,875^\circ$) e 28 níveis na vertical, com incrementos desiguais entre os níveis, ou seja, uma resolução T62L28.

A versão 2.5 do BESM, utiliza o BAM com a formulação apresentada em Jiménez et al. (2012) para representar o vento, a umidade e a temperatura na camada superficial. As parametrizações físicas para os processos continentais são baseadas no modelo de superfície terrestre do *Simplified Simple Biosphere Modes* (SSiB) (XUE et al., 1991), a radiação de ondas curtas é baseada no esquema CLIRAD (CHOU e SUAREZ, 1999; TARASOVA e FOMIN, 2000), a radiação de ondas longas é baseada no esquema Harshvardhan (HARSHVARDHAN, 1987), a microfísica de nuvens utiliza o esquema Ferrier (FERRIER et al., 2002), a difusão vertical utiliza o esquema MY2.0 modificado por (MELLOR e YAMADA, 1982), o esquema de arrasto de ondas de gravidade é baseado em Webster et al. (2003), o módulo de convecção profunda é baseado em Grell e Dévényi (2002), e o módulo de convecção superficial é baseado em Tiedtke (1983).

A componente oceânica é o *Modular Ocean Model version 4p1* (MOM4p1; GRIFFIES, 2009) desenvolvido no GFDL, que inclui o modelo de gelo embutido no *Sea Ice Simulator* (SIS) (WINTON, 2000). A resolução da grade horizontal na direção zonal é de 1° e na direção meridional, varia uniformemente de $1/4^\circ$ entre 10°S e 10°N , a 1° de resolução a partir de 45° e a 2° de resolução a 90° (nos dois hemisférios). Possui 50 níveis na vertical, com resolução de

aproximadamente 10 m de resolução até 220 m e aumentando gradualmente até cerca de 370 m em níveis mais profundos. O *spin-up* do modelo oceânico foi realizado de forma semelhante à de Nobre et al. (2013) e Giarolla et al. (2015). O estágio inicial de *spin-up* do modelo oceânico foi realizado para um período de 13 anos, forçado por campos atmosféricos climatológicos de vento, radiação solar, temperatura, umidade do ar e precipitação. O *spin-up* do modelo foi integrado por um período adicional de 58 anos, forçado pela variação interanual dos campos atmosféricos de Large e Yeager (2009), mantendo as descargas fluviais e as variáveis de gelo marinho em seus respectivos valores climatológicos médios mensais.

A partir do acoplamento dos modelos atmosférico e oceânico, o modelo atmosférico recebe dados da temperatura da superfície do mar (TSM) e do albedo do oceano dos modelos do oceano e do gelo do mar em incrementos de hora em hora. O modelo oceânico recebe informações sobre água doce (precipitação líquida e sólida), fluxos de momento (ventos a 10 m), umidade específica, calor, difusão vertical dos componentes de velocidade e pressão em superfície, em incrementos de hora em hora. Os campos de cisalhamento do vento foram computados no MOM4p1 usando o esquema de Monin-Obukhov (OBUKHOV, 1971).

3.3.2 Modelo Regional Eta

O Modelo Regional Eta do INPE (MESINGER et al., 2012) é um modelo de ponto de grade de área limitada. Uma de suas principais características é o uso da coordenada vertical eta (η) (MESINGER, 1984), a qual apresenta a topografia em degraus. Essa coordenada reduz erros dos cálculos das derivadas horizontais, em particular, a força do gradiente de pressão. Dessa forma, a coordenada η é vantajosa em regiões com forte inclinação topográfica, como por exemplo, as Cordilheiras dos Andes na AS.

A coordenada η é definida como:

$$\eta = \left[\frac{(p-p_t)}{(p_{sfc}-p_t)} \right] * \left[\frac{(p_{ref}(Z_{sfc})-p_t)}{(p_{ref}(0)-p_t)} \right] \quad (3.1)$$

Sendo p a pressão e Z a altura. Os índices t e sfc indicam o topo e a superfície do modelo, respectivamente. O índice ref é relativo aos valores de uma referência atmosférica.

Esse é um modelo com dinâmica e física completa. Inicialmente, a versão climática desenvolvida era operada somente para o modo hidrostático (PESQUERO et al., 2010; CHOU et al., 2012; MARENGO et al., 2012). A inclusão de processo não hidrostático segue Janjic et al., (2001), e resultados dessa versão foram avaliados por Lyra et al. (2018).

As equações do modelo são resolvidas na grade-E de Arakawa. A integração de tempo é split-explicit, usando o forward-backward e o esquema de Euler-backward modificado por Janjic (1979). A advecção horizontal segue a abordagem de Arakawa (JANJIC, 1984) e a advecção vertical utiliza o esquema piecewise-linear, o que o torna um modelo de volume finito completo. O modelo Eta utiliza o esquema de Betts-Miller (BETTS e MILLER, 1986) para parametrizar convecção de cúmulus rasos e profundos, enquanto que o esquema de Zhao (ZHAO e CARR, 1997) é utilizado para a parametrização de microfísica das nuvens. A componente de ondas longas da radiação é resolvida por Schwarzkopf e Fels (1991), e a componente de ondas curtas é resolvido por Lacis e Hansen (1974). A camada superficial é baseada no Monin-Obukhov teoria da similaridade e as funções de estabilidade de Paulson (PAULSON, 1970). Processos de transferência de energia na superfície terrestre são tratados utilizando o esquema NOAH (EK et al., 2003). Os parâmetros de turbulência seguem os valores propostos por Nakanishi e Niino (2009).

3.3.3 Aninhamento do Modelo Eta ao Modelo Global

As simulações de mudanças climáticas derivadas de modelos climáticos regionais são consideradas úteis para estudos de impacto devido à escala local dos padrões e à magnitude das mudanças. O aprimoramento da descrição da orografia e outras características da superfície da terra ajudam a detalhar a estrutura dos sistemas climáticos. No entanto, deve-se notar que o clima gerado

a partir de um modelo regional é fortemente dependente das condições de contorno lateral.

Neste trabalho, o modelo regional Eta é aninhado às condições de fronteira dos modelo global BESM (modelo climático regional Eta-BESM) rodados no INPE para o clima presente (1976-2005) sobre a América do Sul, com resolução espacial de 20 km, e sobre o Sudeste do Brasil, com resolução espacial de 5 km, no modo não hidrostático. Tal versão do modelo Eta é adaptada para mudanças climáticas (CHOU et al., 2014b; LYRA et al., 2017;).

Apesar do aumento da resolução espacial, modelos numéricos não são perfeitos e seus resultados podem conter erros sistemáticos (viés). A fim de reduzir os erros das simulações e das projeções, aplicou-se uma técnica da correção de erros sistemáticos para realizar algumas análises que não foram abordadas no presente estudo. Dessa forma, não foram apresentadas na dissertação de mestrado.

O modelo Eta com resolução horizontal de 5 km (Eta-5km), não hidrostático, é aninhado às condições laterais do Eta com resolução espacial de 20 km (Eta-20km). A rodada do Eta-20km utiliza as condições de contorno do modelo global BESM. Portanto, as rodadas do Eta-5km são originadas de um segundo aninhamento da integração do BESM (LYRA et al., 2018).

A temperatura da superfície do mar é proveniente do modelo oceânico acoplado, BESM, e é atualizada diariamente. A umidade inicial e a temperatura do solo são derivadas dos modelos globais. As condições de contorno laterais são atualizadas a cada 6 horas. O modelo foi configurado com 38 níveis verticais e seu topo foi definido em 25 hPa.

O clima de referência (clima presente) foi simulado para o período de 1976 a 2005, enquanto que o clima futuro compreende o período de 2031 a 2060, utilizando os cenários de emissão de gases do efeito estufa, RCP4.5 e RCP8.5.

3.4 Identificação das condições FR

Nesta seção são apresentadas as etapas para a identificação das condições FR na região costeira da cidade de Santos. Essas etapas consistem na seleção de casos de ressaca a partir da altura significativa da onda (H_s) para o clima presente, no agrupamento das condições atmosféricas dos dias que ocorreram ressaca, a fim de conhecer os padrões atmosféricos favoráveis à ocorrência do fenômeno, e na aplicação da correlação espacial entre os dados da reanálise e do Eta-BESM 20 km, verificando a capacidade do modelo em reproduzir esses padrões no clima presente e detectar as ressacas no futuro. Por fim, as condições atmosféricas geradas pelo Eta-BESM 20 km são confrontadas com as provenientes do Eta-BESM 5 km, para verificar se houve uma melhor discretização dos dados e informações.

3.4.1 Seleção de casos de ressacas

A ressaca pode ser definida quando H_s que atinge a costa é igual ou maior que 2,5 metros em um período de 24 horas (NORMAM-19, MARINHA DO BRASIL, 2018). Neste trabalho, para a seleção de casos de ressaca, utiliza-se o máximo valor diário de H_s , proveniente da reanálise ERA5, para o ponto de latitude 24°S e longitude 46°S, próximo ao litoral Santista, utilizando o período do clima presente de 1981 a 2010, apenas para os meses de maio. O mês de maio foi escolhido por ser o mês que apresenta o maior número de ressacas e está de acordo com os resultados obtidos por Souza et al. (2019). A partir disso, foram selecionados 44 eventos de ressaca, com duração superior ou igual a um dia, sendo 89 dias em que a altura significativa da onda foi maior ou igual a 2,5 metros, caracterizando-se como casos de ressaca. A tabela com as datas e suas respectivas H_s são apresentadas no Capítulo 4.

3.4.2 Agrupamento dos padrões atmosféricos FR

A fim de identificar quais são os padrões atmosféricos climáticos, em superfície, favoráveis aos eventos de ressaca, foi aplicada uma técnica de agrupamento

com base nas condições meteorológicas dos dias que ocorreram ressacas, selecionados pela reanálise ERA5 para os meses de maio, durante o período de 1981 a 2010.

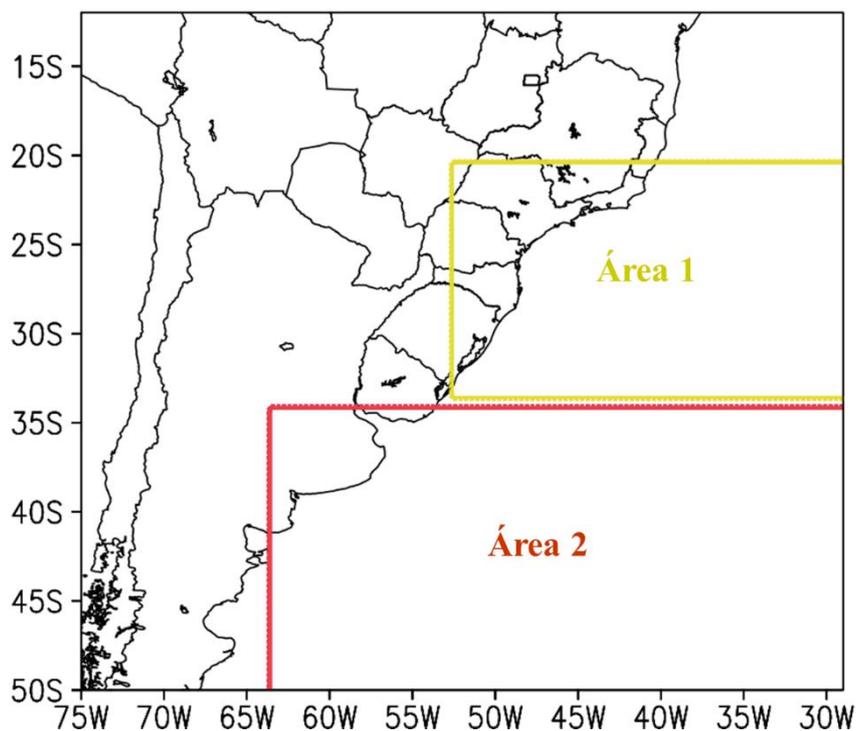
A técnica de agrupamento conhecida como K-mean (MACQUEEN, 1967) particiona n itens dentre k grupos onde cada item pertence ao grupo mais próximo da média. É um agrupamento não hierárquico cujo número de grupos é definido pelo usuário e possui aprendizado não supervisionado.

O método K-means agrupa objetos aos grupos com centróides (média) mais próximos e segue os seguintes passos:

- 1) Particiona os itens em k grupos aleatoriamente.
- 2) Calcula-se a distância Euclidiana dos itens com os centróides dos grupos. Realoca-se os itens para os grupos que apresentam a mínima distância.
- 3) Calcula-se novamente os centróides dos grupos que ganharam ou perderam itens.
- 4) Os passos 2 e 3 são repetidos até que não seja feita nenhuma realocação.

O agrupamento foi aplicado na série temporal de dias que ocorreram ressaca caracterizados pelas suas condições atmosféricas, baseadas no gradiente de pressão ao nível médio do mar médio entre as Áreas 1 e 2 (Figura 3.2), velocidade e intensidade do vento a 10 metros médias para Área 1 (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Divisão de áreas da região de estudo. Área 1 (seleção em amarelo), compreende o litoral de Santos, e Área 2 (seleção em vermelho).



3.4.3 Detecção dos padrões atmosféricos FR

Antes de caracterizar o comportamento das condições atmosféricas favoráveis aos eventos de ressacas no clima futuro, é necessário verificar se o Eta-BESM 20 km reproduz essas condições no clima presente. Para isso, compara-se os campos meteorológicos diários do modelo com os três padrões atmosféricos dos dados da reanálise ERA5, a partir da correlação espacial. Busca-se atribuir um grau de confiança as projeções futuras, conhecendo o desempenho das simulações do clima presente.

Assim como para o clima presente, também utiliza-se essa técnica de detecção dos padrões meteorológicos baseada na correlação espacial, para detectar os casos favoráveis à ocorrência de ressacas no clima futuro.

A correlação espacial (*scorr*) mede a relação espacial entre duas variáveis sobre uma área horizontal, variando de -1 a 1.

$$\left\{ \begin{array}{l} -1 \leq \textit{scorr} < 0 - \textit{Correlação negativa} \\ \textit{scorr} \approx 0 - \textit{Correlação nula} \\ 0 < \textit{scorr} \leq 1 - \textit{Correlação positiva} \end{array} \right.$$

Para o clima presente, compara-se a série de dados diários de maio durante o período de 1976 a 2005, proveniente do Eta-BESM 20 km, com os três padrões FR, oriundos da reanálise ERA5. Para esse propósito, a correlação espacial foi aplicada na pressão ao nível médio do mar, em todo o domínio constituído pelas Áreas 1 e 2, e nas componentes zonal e meridional do vento a 10 metros, sobre a Área 1. Considera-se que o dia tem potencial de ocorrência ressaca, ou seja, que tem as condições atmosféricas FR, quando a correlação das três variáveis atmosféricas for, simultaneamente, maior ou igual a 0,5. A partir disso, são detectados os possíveis dias com potencial de ressacas referente a cada padrão. Por fim, realiza-se a média desses dias para encontrar os padrões atmosféricos favoráveis às ressacas.

O mesmo foi realizado para detectar as condições favoráveis à ocorrência de ressacas no futuro, utilizando o período de 2031 a 2060, para os cenários de emissão, RCP4.5 e o RCP8.5.

3.5 Estudo das mudanças climáticas

A principal ferramenta para estudos das mudanças climáticas globais são os modelos globais do sistema terrestre. Apesar disso, os impactos em diferentes setores socioeconômicos ocorrem, geralmente, em escala local. A resolução desses modelos globais é considerada grosseira para estes estudos e, tem-se a necessidade da utilização de modelos climáticos regionais, com grade de cerca de 50 a 20 km, que buscam aprimorar o detalhamento da região de estudo. Contudo, essa resolução espacial ainda é considerada grosseira para análises de impactos em zonas costeiras urbanas. Apesar do grande esforço computacional, o Eta-BESM, com resolução espacial de 5 km, é mais adequado para a simulação da escala de cidades e regiões metropolitanas, como por exemplo, a região litorânea de Santos. Portanto, o refinamento produzido pelo

modelo climático regional em altíssima resolução é imprescindível para melhorar a qualidade dos dados e das informações, além da melhoria na discretização da linha da costa, o que é particularmente importante para o presente estudo.

As análises são baseadas na avaliação da detecção das condições atmosféricas FR reproduzidas pelo *downscaling* dinâmico utilizando o Eta nas resoluções espaciais de 20 km, para uma avaliação em escala sinótica, e 5 km, para verificar os impactos locais. Foram avaliados o clima presente (1976-2005) e futuro (2031-2060), baseando-se nos cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5.

Foram elaborados campos espaciais das variáveis atmosféricas mostradas na Tabela 3.2 para os dias de ressacas detectados a partir dos dados provenientes do Eta-BESM 20 km. Para uma avaliação dos impactos locais na zona costeira de Santos, assim como para apresentar a melhor reprodução e detalhamento das condições atmosféricas, os campos espaciais produzidos pelo Eta-BESM 5km são confrontados com os obtidos pelo Eta-BESM 20km.

Tabela 3.2 – Variáveis atmosféricas utilizadas para a análise das simulações numéricas.

Variável	Unidade	Nível
Pressão ao nível médio do mar	hPa	Superfície
Vento a 10 metros	m/s	Superfície
Precipitação	mm	Superfície

4 RESULTADOS

Os resultados estão organizados em 4 partes: 1) Análise dos eventos observados de ressacas por Souza et al. (2019) e os casos selecionados a partir da Hs da reanálise ERA5 e suas tendências de ocorrência e duração do evento; 2) Os três padrões atmosféricos FR, na região costeira de Santos, detectados pelo ERA5; 3) Avaliação da capacidade do modelo Eta-BESM 20 km em reproduzir os padrões meteorológicos no clima presente e as projeções climáticas futuras, com base nos dois cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5; 4) Análise dos impactos locais em Santos e do valor agregado às condições atmosféricas reproduzidas pelo Eta-BESM 5 km.

4.1 Eventos observados de ressaca

Souza et al. (2019) apresentam uma base de dados de eventos extremos que incluem casos de ressacas e inundações costeiras que causaram prejuízos econômicos e ao meio ambiente, nas cidades da Região Metropolitana da Baixada Santista, entre os anos de 1928 e 2016. Este estudo é baseado no método hemerográfico que considera notícias de jornais e outras publicações periódicas. Para o presente estudo, são selecionados apenas os eventos de ressaca que ocorreram durante o período de 1981 a 2010, listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Eventos de ressacas registrados por Souza et al. (2019) para o período de 1981 a 2010.

N° do Caso	Data de Início	Local mais Atingido	N° do Caso	Data de Início	Local mais Atingido
1	08/06/1981	São Vicente	41	26/04/2005	Santos
2	19/09/1982	Santos/São Vicente	42	21/05/2005	Santos/São Vicente
3	28/09/1982	São Vicente	43	06/07/2005	Santos
4	14/10/1982	São Vicente	44	11/02/2006	Santos
5	28/06/1984	Santos	45	28/06/2006	Santos
6	07/06/1985	Santos/São Vicente	46	30/07/2006	Guarujá
7	15/04/1986	Santos	47	21/08/2006	Guarujá
8	21/07/1986	Santos	48	04/09/2006	Santos/Guarujá
9	10/08/1988	Guarujá/São Vicente	49	09/11/2006	Santos
10	17/09/1989	Santos/São Vicente	50	27/04/2007	Guarujá
11	23/05/1990	Santos	51	25/05/2007	Santos
12	12/02/1996	Todo Litoral de São Paulo	52	28/05/2007	Santos
13	07/04/1997	Santos/São Vicente	53	28/07/2007	Santos
14	18/04/1999	São Vicente	54	17/11/2007	Santos
15	21/05/1999	Santos	55	16/06/2008	Santos/São Vicente
16	31/05/1999	Baixada Santista	56	03/01/2009	Santos
17	15/08/1999	Guarujá	57	25/02/2009	Baixada Santista
18	16/07/2000	Santos	58	11/04/2009	Santos/São Vicente/Guarujá
19	05/05/2001	São Vicente	59	16/04/2009	Santos
20	21/06/2001	Santos/Guarujá	60	03/06/2009	Santos
21	27/07/2001	Santos	61	20/07/2009	São Vicente

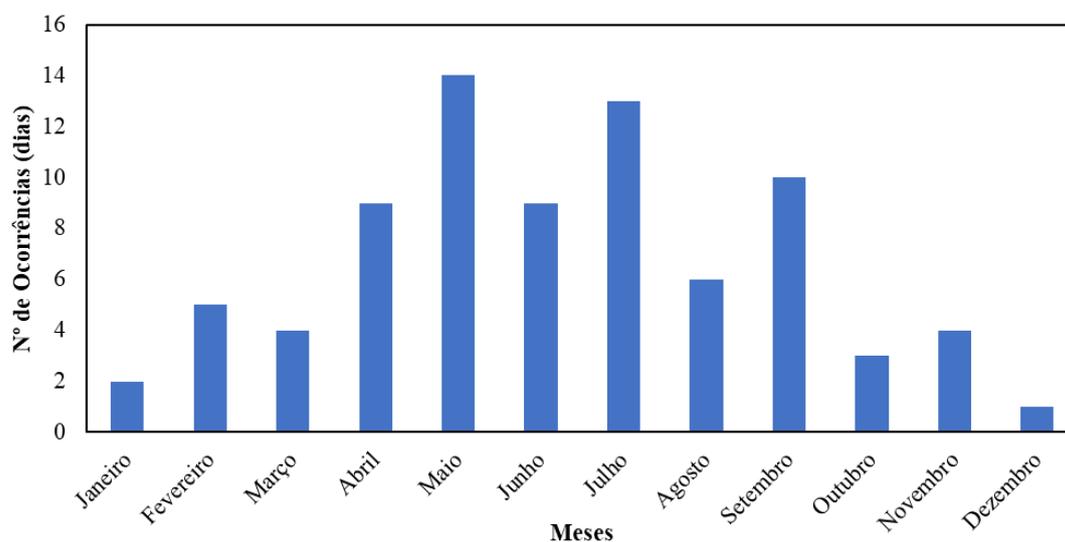
Continua

Tabela 4.1 – Conclusão.

22	17/09/2001	Todo Litoral de São Paulo	62	24/07/2009	São Vicente
23	16/01/2002	Santos	63	30/07/2009	São Vicente
24	21/03/2002	Santos/São Vicente	64	21/08/2009	São Vicente
25	22/05/2002	Santos/São Vicente	65	08/09/2009	Santos
26	17/06/2002	Santos	66	24/09/2009	Santos
27	10/07/2002	São Vicente	67	26/02/2010	Santos/São Vicente
28	02/09/2002	Santos	68	17/03/2010	São Vicente
29	07/11/2002	Santos/São Vicente	69	08/04/2010	Santos/São Vicente
30	21/03/2003	Santos	70	09/05/2010	Santos
31	12/04/2003	Santos	71	13/07/2010	Santos
32	25/05/2003	Santos	72	27/07/2010	Santos
33	12/07/2003	Santos/São Vicente	73	02/08/2010	Santos/Guarujá/São Vicente
34	29/02/2004	Santos/São Vicente/Guarujá	74	11/08/2010	Santos
35	07/05/2004	Santos/São Vicente/Guarujá	75	05/09/2010	Santos
36	12/05/2004	Santos	76	18/09/2010	Santos
37	21/05/2004	Santos	77	08/10/2010	Baixada Santista
38	28/05/2004	Santos	78	18/10/2010	Santos
39	12/06/2004	Santos/São Vicente	79	11/11/2010	Santos
40	22/03/2005	Santos	80	13/12/2010	Santos/Guarujá

A fim de identificar o mês de maior ocorrência de ressacas, a Figura 4.1 mostra que a temporada desse fenômeno ocorre entre os meses de abril a setembro. Destaca-se o mês de maio por apresentar o maior número de ocorrências (14 eventos) no ano, segundo o trabalho de Souza et. al (2019). No presente trabalho, baseado nessa predominância, os estudos de detecção das condições atmosféricas favoráveis aos eventos de ressacas são realizados para os meses de maio.

Figura 4.1 – Número de ocorrências de ressacas (dias) durante o período de 1981 a 2010 provenientes do banco de dados do estudo de Souza et al. (2019).



A Tabela 4.2 apresenta a seleção de casos (dias) de ressacas durante os meses de maio no período de 1981 a 2010. Essa seleção se baseou no critério da altura significativa da onda máxima diária, H_s , exceder 2,5 metros, proveniente do ponto de latitude 24°S e longitude 46°W , utilizando os dados da reanálise ERA5. A tabela indica 89 dias que ocorreram ressacas, ou seja, dias em que H_s é maior ou igual a 2,5 metros.

Os eventos de ressaca são definidos a partir do primeiro dia em que H_s é igual ou superior a 2,5 metros até o último dia seguido, ou com intervalo de até 72

horas, que a Hs esteve igual ou acima do limiar, por exemplo, se nos dias 12 e 13 de maio de 1981 a Hs permaneceu acima de 2,5 metros, considera-se um evento de ressaca com duração de dois dias. Nota-se um número maior de eventos detectados no ERA5 (44 eventos, sendo 89 dias que a Hs excedeu 2,5 metros) em relação à base de dados de Souza et al. (2019), isso pode ser justificado devido aos diferentes métodos aplicados para a seleção de eventos de ressacas. A partir do método hemerográfico utilizado por Souza et al. (2019), podem ocorrer subnotificações devido ao registro apenas de eventos que causaram grandes transtornos às cidades costeiras. O registro das ressacas do mar em jornais ocorre em função do nível de ocupação do litoral e da repercussão dos dramas sociais (MARENGO et al., 2016). Apesar disso, dentre os 14 eventos que foram registrados na base de dados de Souza et al. (2019) para os meses de maio, 6 eventos no ERA5 possuem as mesmas datas de ocorrência que o banco de dados de Souza et al. (2019) e os outros 8 eventos possuem datas de ocorrência próximas. Isso pode ocorrer devido ao atraso das notificações por jornais ou outras publicações periódicas.

Portanto, os critérios utilizados nesta pesquisa a partir dos dados do ERA5 apresentam correspondência com os eventos relatados por Souza et al. (2019), tornando a reanálise um bom conjunto de dados para reproduzir as condições atmosféricas de ressacas.

Tabela 4.2 – Datas que ocorreram ressaca nos meses de maio durante o período de 1981 a 2010, selecionadas a partir dos dados da reanálise ERA5 para o ponto de latitude 24°S e longitude 46°W. As datas em negrito são os mesmos eventos encontrados na base de dados observados.

N° do Caso	Data	Hs (m)	N° do Caso	Data	Hs (m)	N° do Caso	Data	Hs (m)	N° do Caso	Data	Hs (m)
1	16/05/1981	2,91	24	22/05/1990	2,90	47	20/05/1999	2,78	70	22/05/2005	2,91
2	17/05/1981	3,09	25	05/05/1992	2,88	48	21/05/1999	3,79	71	23/05/2005	2,64
3	18/05/1981	2,72	26	06/05/1992	2,50	49	22/05/1999	2,94	72	09/05/2007	3,49
4	01/05/1985	2,59	27	20/05/1992	2,52	50	30/05/1999	2,86	73	10/05/2007	3,32
5	14/05/1986	2,59	28	15/05/1993	3,10	51	31/05/1999	3,78	74	11/05/2007	2,55
6	15/05/1986	2,58	29	16/05/1993	2,63	52	28/05/2000	2,61	75	24/05/2007	2,93
7	31/05/1986	2,82	30	27/05/1993	2,69	53	29/05/2000	2,59	76	25/05/2007	2,56
8	09/05/1987	2,63	31	28/05/1993	3,34	54	05/05/2001	3,25	77	29/05/2007	2,69
9	10/05/1987	2,62	32	29/05/1993	2,61	55	06/05/2001	4,16	78	30/05/2007	2,96
10	11/05/1987	2,61	33	12/05/1994	3,35	56	07/05/2001	3,79	79	31/05/2007	2,78
11	12/05/1987	2,51	34	13/05/1994	3,00	57	08/05/2001	2,73	80	01/05/2008	2,66
12	25/05/1987	2,84	35	21/05/1995	2,83	58	16/05/2001	2,64	81	02/05/2008	2,74
13	26/05/1987	2,71	36	22/05/1995	2,81	59	17/05/2001	2,55	82	30/05/2008	2,85
14	29/05/1987	2,68	37	27/05/1995	2,65	60	18/05/2001	2,54	83	31/05/2008	3,10
15	30/05/1987	2,69	38	16/05/1997	2,54	61	22/05/2002	2,64	84	01/05/2009	2,60
16	06/05/1989	3,25	39	24/05/1997	2,64	62	03/05/2003	2,74	85	02/05/2009	2,70
17	07/05/1989	3,26	40	25/05/1997	2,96	63	09/05/2003	2,54	86	30/05/2009	2,68
18	26/05/1989	2,86	41	26/05/1997	2,59	64	05/05/2004	2,64	87	09/05/2010	2,62
19	27/05/1989	2,88	42	29/05/1997	2,51	65	06/05/2004	2,64	88	13/05/2010	2,62
20	28/05/1989	3,05	43	30/05/1997	2,69	66	16/05/2004	2,76	89	31/05/2010	2,84
21	29/05/1989	2,60	44	31/05/1997	2,94	67	27/05/2004	2,72			
22	19/05/1990	2,64	45	18/05/1998	2,62	68	28/05/2004	2,66			
23	20/05/1990	2,65	46	30/05/1998	2,76	69	29/05/2004	2,65			

4.2 Número de eventos e duração de ressacas

As zonas costeiras estão entre as áreas mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas globais. A vulnerabilidade de Santos à variabilidade climática e às mudanças climáticas está relacionada à alta densidade populacional e às importantes atividades econômicas ali presentes, como o Porto de Santos. Dessa forma, avalia-se a existência de tendências observadas do clima para ocorrência de ressaca na região costeira de Santos. Essas tendências foram calculadas através do estimador de tendência Sen (1968) e foram testadas quanto a sua significância estatística no intervalo de confiança de 95% estimados a partir dos valores tabulados em Kendall (1955).

A Figura 4.2 apresenta o número médio de eventos de ressaca por ano para os meses de maio durante o período de 1981 a 2010. A partir dos dados da reanálise ERA5, são encontrados 89 dias em que Hs excedeu 2,5 metros e são selecionados 44 eventos de ressaca de duração média entre 1 e 3,5 dias (Figura 4.3). Considera-se o mesmo evento de ressaca quando a Hs atinge o limiar de 2,5 metros em até 72 horas após o primeiro dia de evento. Por exemplo, se no dia 12 de maio de 1988, a Hs é maior ou igual a 2,5 metros e nos dias seguintes esteve menor que o limiar, porém, no dia 15 de maio de 1988 (72 horas depois) voltou a atingir o valor igual ou superior a 2,5 metros, considera-se o mesmo evento com duração de 4 dias.

Observa-se uma tendência decadal positiva e, estatisticamente significativa, no valor de 0,48 eventos de ressaca, indicando um aumento do número de eventos de ressaca durante esse período. Esses resultados concordam com aqueles obtidos por Souza et al. (2019) através de registros observacionais e também com os estudos realizados por Alfredini et al. (2014) que mostram aumentos significativos na frequência de ressacas durante o período de 1957 a 2002 em Santos. Portanto, nota-se que esse fenômeno têm se tornado mais frequente ao longo dos últimos anos.

A Figura 4.3 apresenta a duração média por ano dos eventos de ressaca. Nota-se que no ano de 1987, a série atinge seu pico com uma duração média de 5 dias. Contudo, a duração das condições de ressaca no litoral de Santos

apresenta uma tendência por década próxima de zero e sem significância estatística.

Figura 4.2 – Número de eventos de ressacas em maio durante o período de 1981 a 2010.

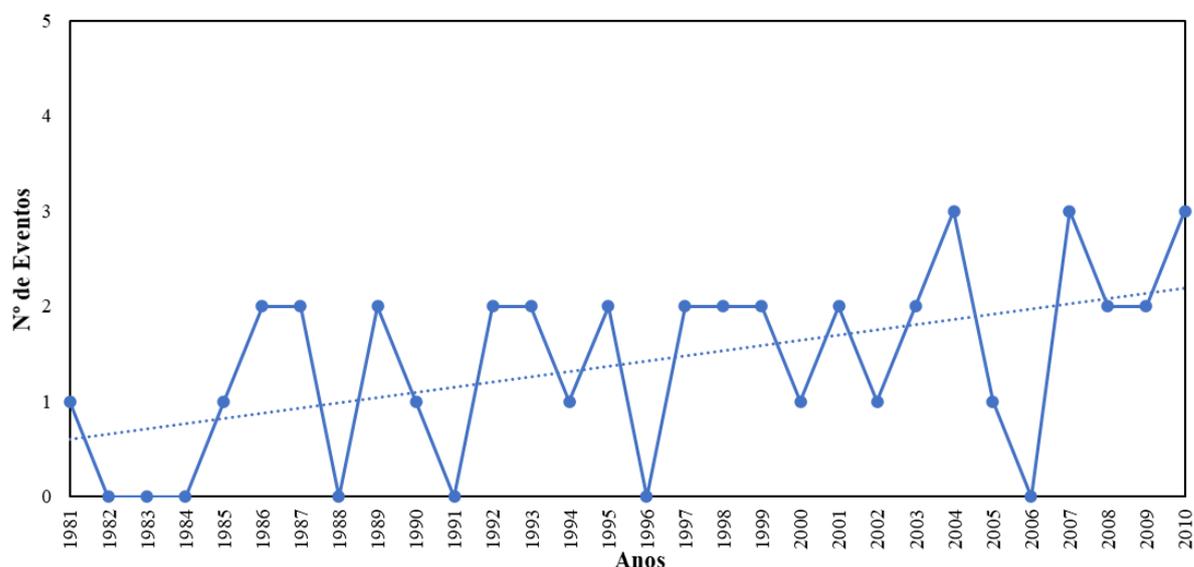
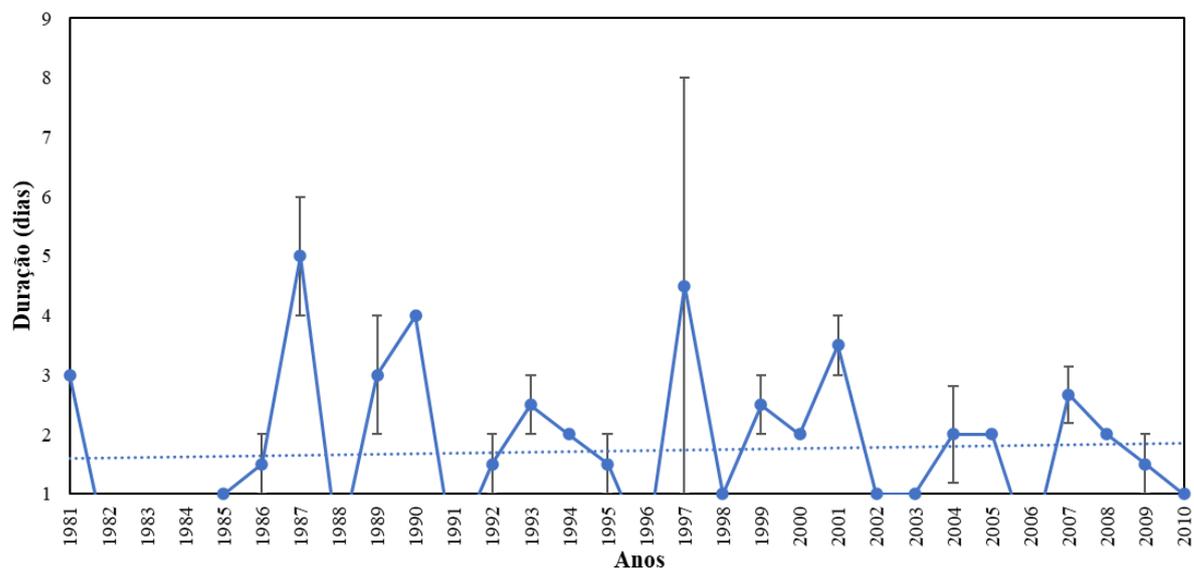


Figura 4.3 – Duração média de eventos de ressacas (dias) e seus desvios padrão em maio durante o período de 1981 a 2010.



4.3 Os três padrões atmosféricos FR: observação

Os 89 casos de ressacas (Tabela 4.2) encontrados a partir da reanálise ERA5, nos meses de maio durante o período de 1981 a 2010, foram agrupados em 3 categorias. A partir disso, realiza-se a média dos campos meteorológicos de

cada grupo, compostos pela PNMM, intensidade e direção do vento a 10 metros. Por fim, são identificados três padrões atmosféricos FR na região costeira de Santos. A escolha do número de grupos, baseou-se na análise qualitativa dos campos atmosféricos médios resultantes que concordam com os resultados de estudos anteriores.

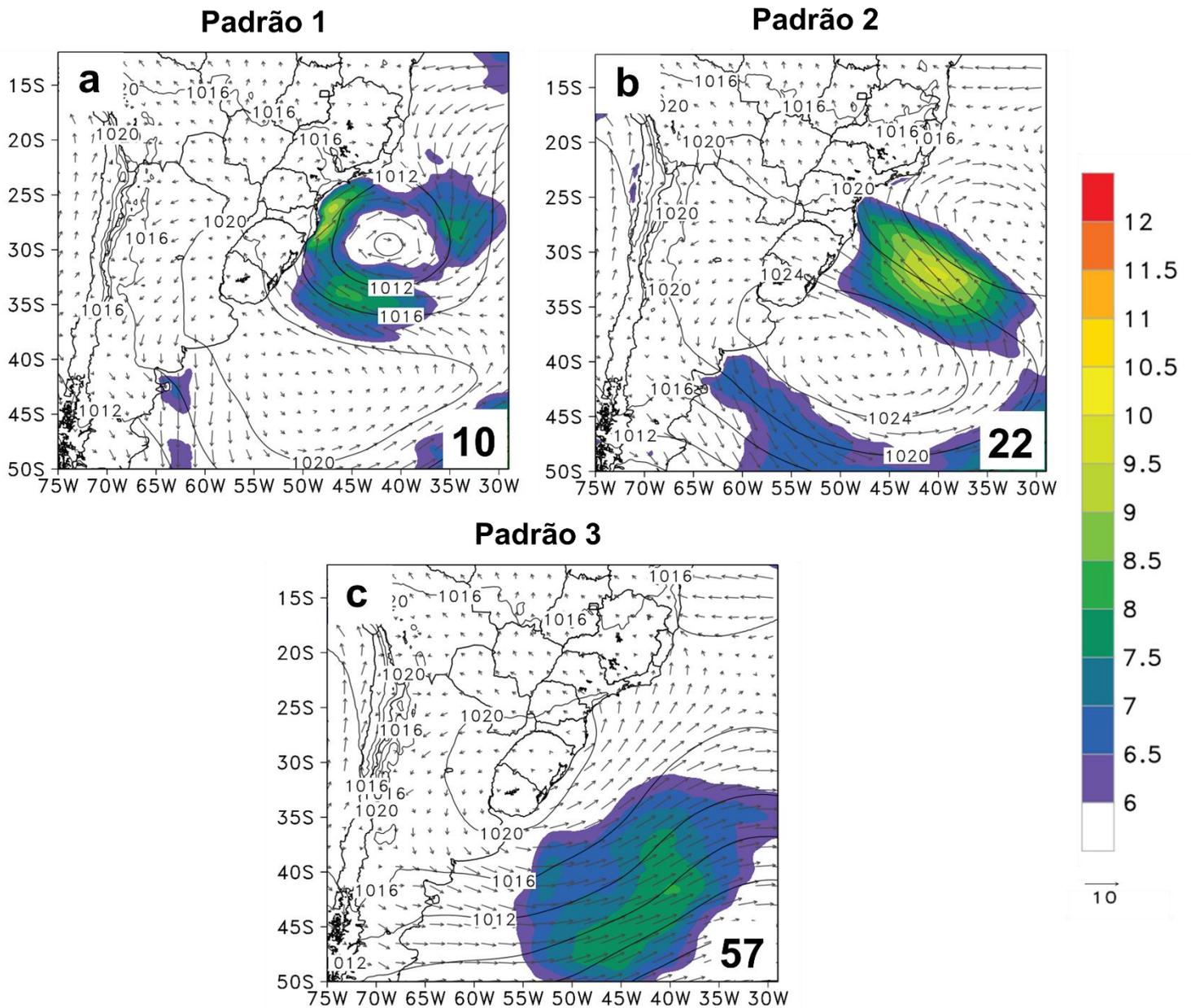
As ressacas estão associadas à direção, intensidade, duração e extensão da pista de ventos que são formados a partir da posição e da velocidade de ciclones e anticiclones. Os ventos provenientes das direções sudoeste são os mais favoráveis à ocorrência desses eventos, pois junto com o transporte de Ekman tendem a empilhar a água na costa, aumentando o nível do mar nessa região. Existem diferentes possíveis condições atmosféricas que podem causar ressacas, indicando a existência de mais de um padrão meteorológico, assim como o descrito por alguns estudos (MARONE e CAMARGO, 1994; CAMARGO e CAMPOS, 2006; CAMPOS et al., 2010).

O padrão denominado Padrão 1 (Figura 4.4a) é caracterizado pela presença de um ciclone no litoral da cidade de Santos com ventos intensos e paralelos à costa, vindos de sudoeste, com velocidade superior a 8 m/s. Foram identificados 10 casos pertencentes a este padrão nesse período. Esse resultado concorda com os obtidos por Campos et al. (2010), os autores mostram que as ressacas ocorrem devido à migração e à persistência de ciclones extratropicais com ventos acima de 8 m/s agindo sobre o oceano, próximos à costa.

Os dados do ERA5 possuem 22 ocorrências de ressaca para o do tipo Padrão 2 (Figura 4.4b) e apresenta uma extensa pista de ventos sobre o oceano, com intensidade superior a 8 m/s, formada por um sistema de alta pressão ao sul e uma baixa pressão ao norte no Oceano Atlântico Sul. Nesse caso, os ventos incidem perpendicular à costa de Santos, provenientes da direção sul. Esses resultados concordam com o estudo de Parise et al. (2009), que afirmam que a ressaca é influenciada pela intensidade e duração dos ventos resultantes da posição e extensão da pista, que é formada a partir da posição e da velocidade de deslocamento do ciclone extratropical em relação a um anticiclone, que nesse caso, encontra-se sobre o oceano.

O Padrão 3 (Figura 4.4c) apresenta o maior número de eventos (57 casos) e suas condições atmosféricas são encontradas na literatura mais frequentes (SARAIVA et al., 2003; CAMPOS e CAMARGO, 2006; CAMPOS et al., 2010). É caracterizado pela presença de ventos de sudoeste, provenientes de uma alta pressão sobre o continente e a presença de um cavado sobre o oceano.

Figura 4.4 – Intensidade e direção do vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas elaborados a partir dos dados da reanálise ERA5, em maio, durante o clima presente (1976-2005) para os padrões: (a) 1, (b) 2 e (c) 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.4 Padrões atmosféricos FR: simulação do clima presente

Nesta seção são apresentadas as tendências do número de eventos de ressacas e suas durações médias e, os três padrões meteorológicos FR, em superfície, simulados pelo modelo Eta-BESM 20 km para o clima presente (1976-2005). Esses resultados são provenientes da detecção das condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de ressacas que utiliza a correlação espacial entre os campos dos padrões atmosféricos encontrados a partir do ERA5 (Figura 4.4) e das saídas diárias do modelo.

4.4.1 Número de eventos e duração das condições FR: simulação

A Figura 4.5 apresenta o número de potenciais eventos de condições atmosféricas FR, simulados a partir do Eta-BESM 20 km. São encontrados um total de 73 potenciais eventos durante os meses de maio para o período de 1976 a 2005. Considera-se o mesmo evento de ressaca quando as condições atmosféricas favoráveis ocorrem em até 72 horas após o primeiro dia de evento. Nota-se que o modelo superestima o número de eventos em relação ao ERA5 que apresenta um total de 44 eventos para o período de 1981 a 2010.

Através do estimador de Sen e do teste de significância de Man-Kendall, verifica-se uma tendência decadal nula e sem significância estatística do número de eventos de condições atmosféricas FR, diferente do que é mostrado no observado que apresenta tendência positiva e estatisticamente significativa.

O gráfico da duração média dos potenciais eventos de condições FR simulados pelo Eta-BESM 20 km para o clima presente (1976-2005) e os seus respectivos desvios padrão são mostrados na Figura 4.6. Os resultados mostram uma tendência decadal nula e sem significância estatística, nesse aspecto, assemelha-se ao resultados obtidos pela reanálise. Nota-se um pico de duração em 1998 de 3,5 dias. Além disso, esse ano também apresenta o maior desvio padrão com 2,5 dias. Isso significa que os eventos que ocorreram tiveram duração dentro do intervalo de 1 e 6 dias.

Figura 4.5 – Número de eventos das condições FR simulados em maio durante o período de 1976 a 2005.

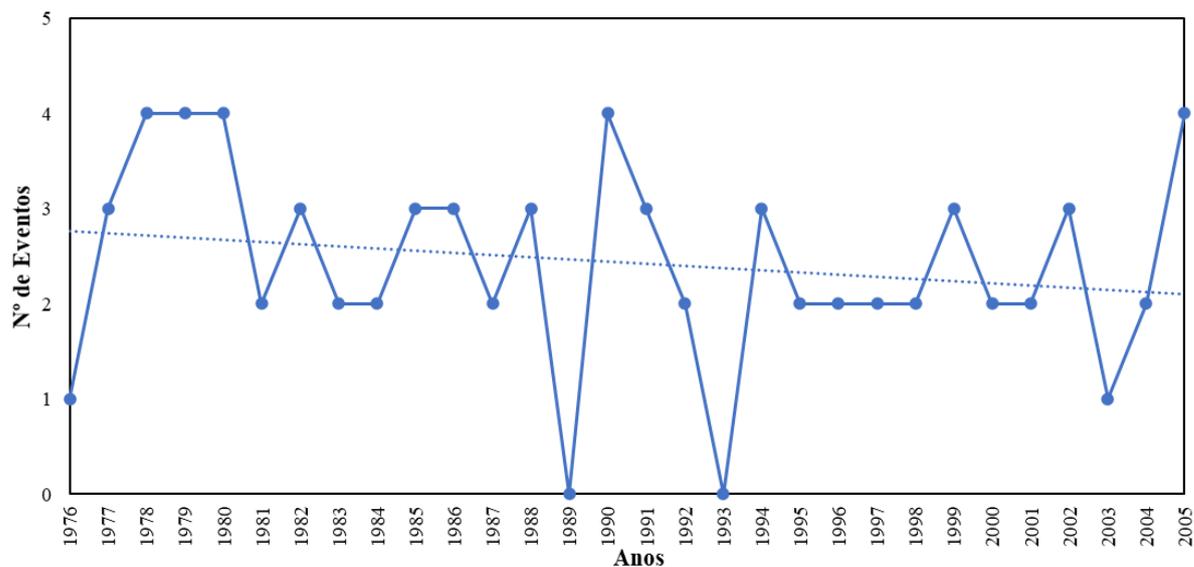
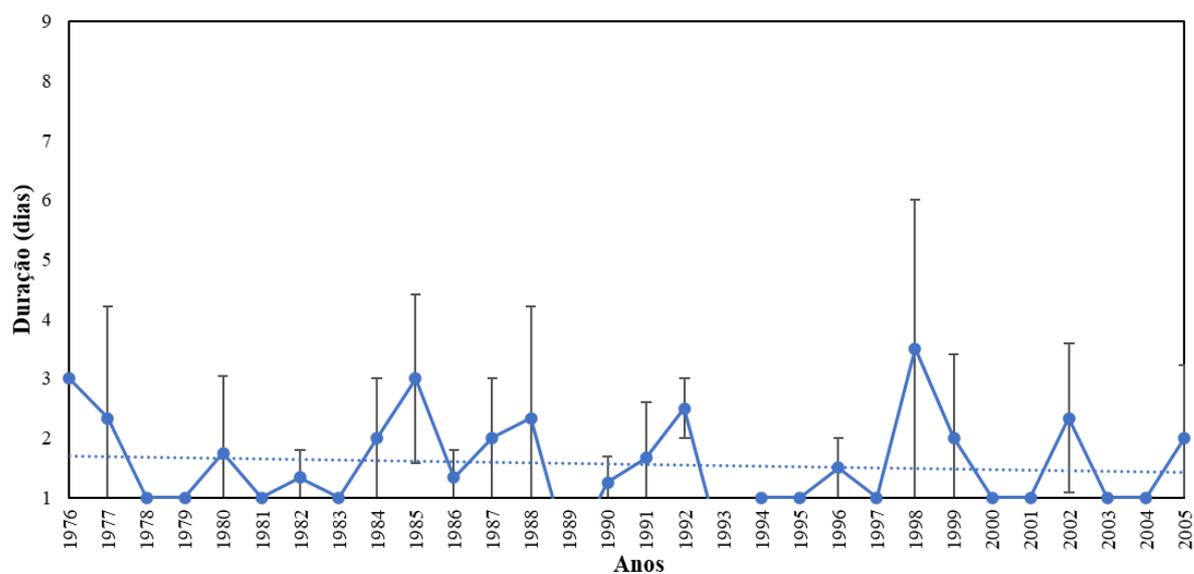


Figura 4.6 – Duração média das condições FR (dias) e seus desvios padrão (dias) em maio simulada durante o período de 1976 a 2005.



4.4.1.1 Frequências simuladas dos três padrões atmosféricos FR

Os 3 padrões meteorológicos FR simulados pelo Eta-BESM 20 km para o período 1976 a 2005 são apresentados na Figura 4.7. Em geral, a simulação da intensidade do vento a 10 metros é maior quando comparada aos resultados obtidos pelo ERA5.

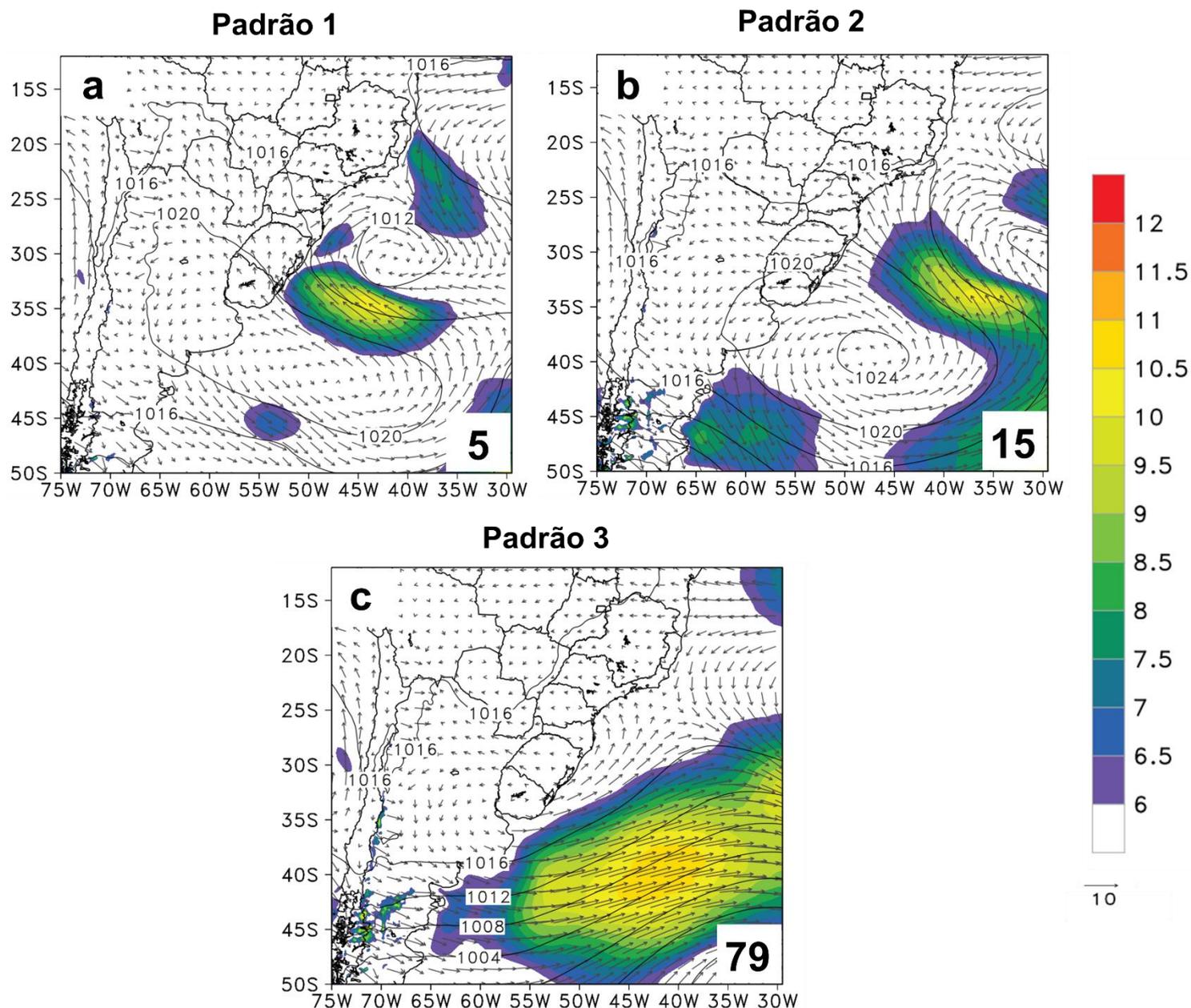
O Padrão 1 (Figura 4.7a) possui a presença de um centro de baixa pressão próximo ao litoral de Santos, com ventos de sudoeste, paralelos à costa. Apesar disso, a intensidade do vento no litoral é inferior a 6 m/s, diferente do que é mostrado no padrão reproduzido pela reanálise, onde os ventos possuem velocidade superior a 8 m/s. Esse é o padrão com menor número de dias potenciais de ressacas, a simulação produziu 5 casos. Portanto, subestimando o número de casos observados que é de 10.

O Padrão 2 (Figura 4.7b) reproduz 15 potenciais ocorrências de ressacas. Portanto, subestima o número de casos comparado com a reanálise ERA5 que é de 22 dias. O Padrão 2 possui uma pista extensa de ventos mais intensos, superiores a 11 m/s, quando comparada ao padrão reproduzido pelo ERA5 que apresenta velocidades de até 10 m/s. Essa pista de ventos é formada por um centro de alta pressão posicionada mais ao sul e um centro de baixa pressão mais ao norte do Oceano Atlântico Sul.

O Padrão 3 (Figura 4.7c) reproduz um maior número de casos do que os outros dois padrões, assim como na reanálise. Contudo, superestima o número de casos e apresenta 79 potenciais dias de ressaca contra os 57 casos do ERA5. Esse padrão apresenta ventos de sudoeste provenientes da alta pressão sobre o continente. Nota-se que a direção do vento a 10 metros se modifica ao se aproximar da região costeira de Santos. Além disso, destaca-se a presença de um cavado com ventos intensos, alcançando valores superiores a 14 m/s, sobre o oceano. Portanto, superestima a intensidade do vento sobre a região do cavado, uma vez que as velocidades mostradas no Padrão 3 do ERA5 apresentam valores de até 8 m/s.

A distribuição de número de casos simulados entre os três padrões, mais casos no Padrão 3 e menos no Padrão 1, corresponde à distribuição encontrada na reanálise. Esses resultados mostram um bom desempenho das simulações do Eta-BESM 20 km em reproduzir os padrões atmosféricos FR.

Figura 4.7 – Os três Padrões de intensidade e direção do vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas simulados pelo Eta-BESM 20 km, em maio, durante o clima presente (1976-2005): (a) Padrão 1; (b) Padrão 2 e (c) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.5 Padrões atmosféricos FR: projeções no clima futuro

Nesta seção são avaliadas as tendências dos possíveis eventos de ressacas e suas durações médias e, as condições atmosféricas FR projetadas pelo Eta-BESM 20 km para o clima futuro, no período de 2031 a 2060, utilizando os dois cenários de emissão de gases do efeito estufa, RCP4.5 e RCP8.5.

4.5.1 Número de eventos e duração das condições FR: projeções

Um aspecto importante na avaliação de vulnerabilidades em cidades costeiras do Brasil se refere a ter um maior conhecimento sobre tendências e projeções de tempestades e ressacas.

A Figura 4.8 mostra a tendência do número de possíveis PR detectados para o período futuro de 2031 a 2060 nos dois cenários de emissão, RCP4.5 e RCP8.5. Nota-se que os cenários apresentam números próximos de evento. O cenário RCP4.5 apresenta 65 eventos, enquanto que o RCP8.5 mostra 63 eventos. Ambos os cenários indicam uma tendência nula e sem significância estatística. Para os anos iniciais, entre 2031 e 2034, o número de eventos é no máximo 2, enquanto que para os últimos três anos, 2058 a 2060, alcança no máximo 3 eventos.

Ambas as projeções para o clima futuro, mostram uma duração média climatológica de 1,5 dias (Figura 4.9). O RCP4.5 apresenta uma tendência na duração média de 0,13 dias, enquanto que o RCP8.5 a tendência é nula. Ambas as tendências não possuem significância estatística.

Figura 4.8 – Número de eventos de condições FR em maio, durante o período futuro de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha azul) e o RCP8.5 (linha vermelha).

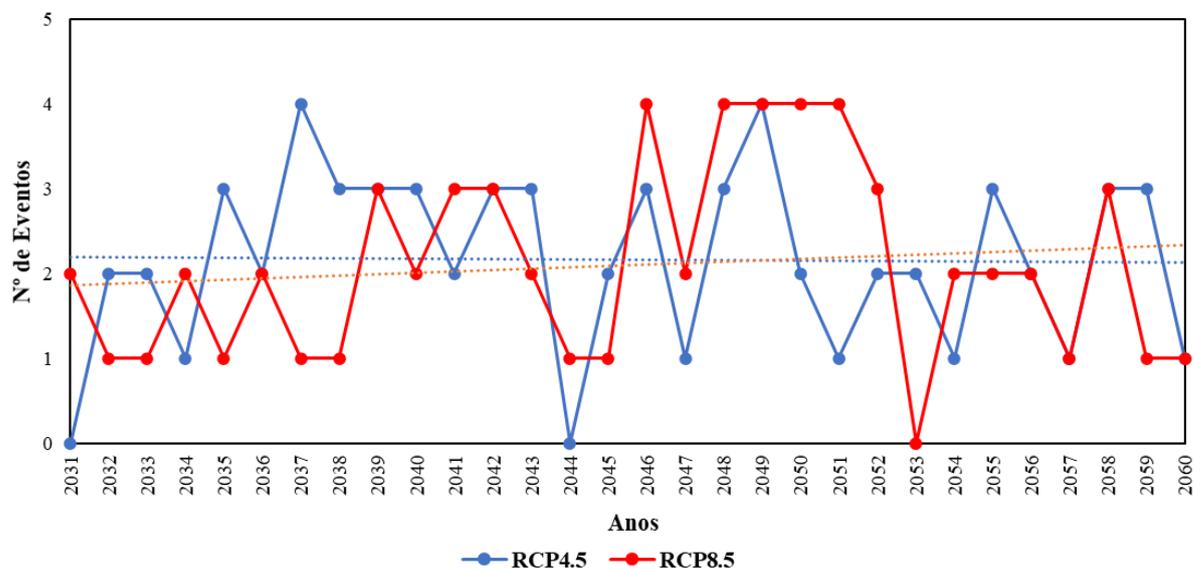
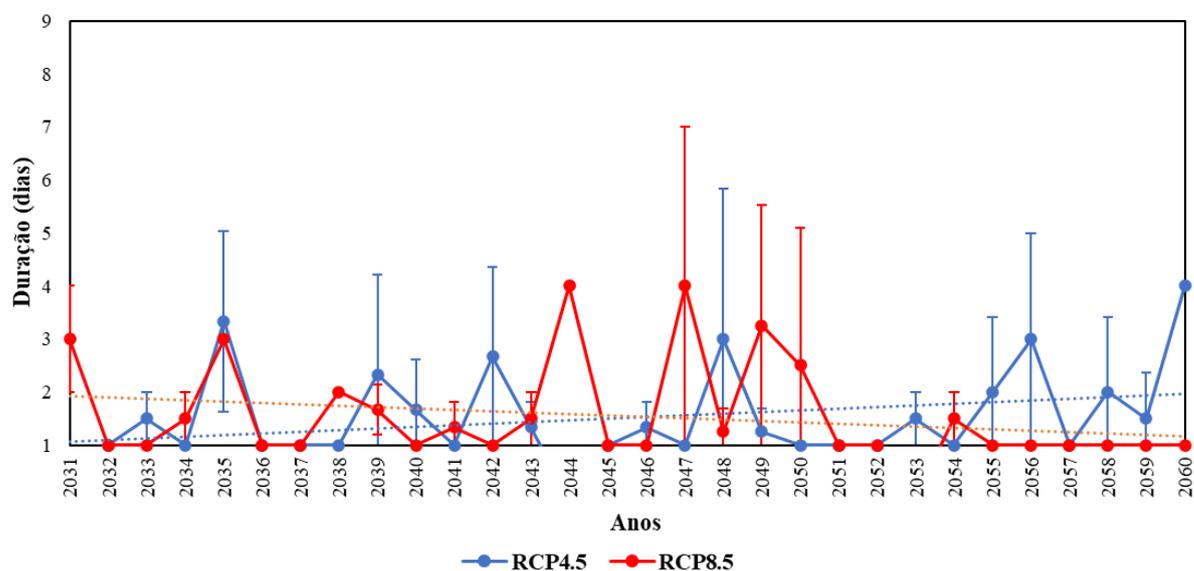


Figura 4.9 – Duração média de condições FR (dias) e seus desvios padrão em maio, durante o período futuro de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha azul) e o RCP8.5 (linha vermelha).



4.5.2 Frequências projetadas dos três padrões atmosféricos FR

A Figura 4.10 apresenta as projeções climáticas das condições atmosféricas em superfície FR, durante o período de 2031 a 2060, simuladas pelo Eta-BESM 20 km, utilizando os dois cenários de emissão de gases do efeito estufa, RCP4.5 e

RCP8.5. Enquanto que a Figura 4.11 apresenta as diferenças (Futuro – Presente) de intensidade do vento a 10 metros nos três padrões FR e a direção do vento a 10 metros dos três padrões projetados, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5, sobre a cidade de Santos.

São detectados, para os meses de maio, um total de 91 casos no cenário moderado (RCP4.5) e 84 casos no cenário mais pessimista (RCP8.5). Em ambos os cenários, nota-se uma redução dos potenciais casos de ressaca em relação ao clima presente.

O Padrão 1 (Figura 4.10a, d) detecta o menor número de potenciais casos nos dois cenários climáticos, com 5 casos no RCP4.5 e apenas 1 caso no RCP8.5. O cenário moderado projeta um centro de baixa pressão, próximo ao litoral, mais intenso do que no clima presente (Figura 4.11a) que apresenta valores de 1012 hPa. No RCP4.5, os valores de PNMM alcançam 1008 hPa e os ventos possuem intensidade superior a 15 m/s. Enquanto que no cenário RCP8.5, verifica-se um centro de baixa pressão de 1016 hPa e ventos fracos.

O Padrão 2 (Figura 4.10b, e) projetado pelo cenário moderado apresenta uma pista de ventos mais intensos, com valores superiores a 16 m/s, quando comparado ao cenário mais pessimista. Em ambos os cenários, nota-se redução na velocidade do vento em referência ao clima presente (Figura 4.11b, e). Os valores de PNMM simulados pelo RCP8.5 são mais altos em relação ao período do presente, ou seja, altas pressões mais intensas e baixas pressões menos intensas à superfície.

Os casos do Padrão 3 (Figura 4.10c, f), no RCP4.5, apresentam um centro de alta pressão de 1016 hPa sobre o continente, enquanto que no RCP8.5, os valores de pressão são de 1020 hPa, mostrando-se mais intensa em relação ao clima presente que era 1016 hPa (Figura 4.11c, f). Em ambos os cenários, os ventos se apresentam menos intensos no cavado sobre o oceano.

As projeções climáticas, em ambos os cenários, mostram números próximos de potenciais casos de ressaca para os Padrões 2 e 3. No RCP8.5 apresenta 6 e 77 casos nos Padrões 2 e 3, respectivamente, enquanto que no RCP4.5

apresenta 7 e 78 casos. Em geral, o RCP4.5 apresenta ventos mais intensos sobre a maior parte da região em comparação com o RCP8.5.

No que se refere ao clima presente (Figura 4.11), ambos os cenários projetam ventos mais intensos no Padrão 1 e ventos menos intensos nos Padrões 2 e 3.

Figura 4.10 – Os três Padrões de intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetores, respectivamente) e PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas projetados pelo Eta-BESM 20 km, em maio, durante o clima futuro (2031-2060), utilizando o RCP4.5 (linha superior) e o RCP8.5 (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.

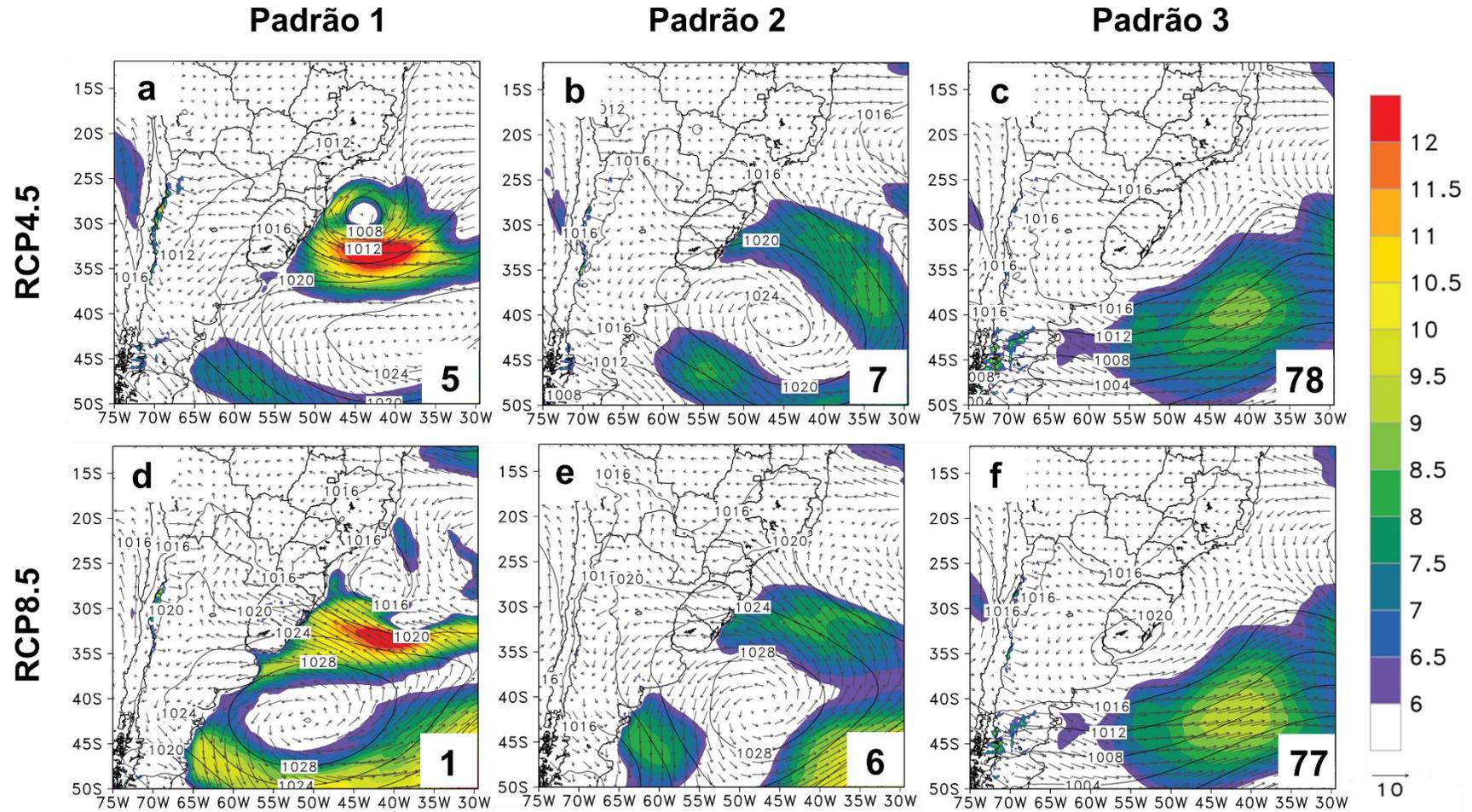
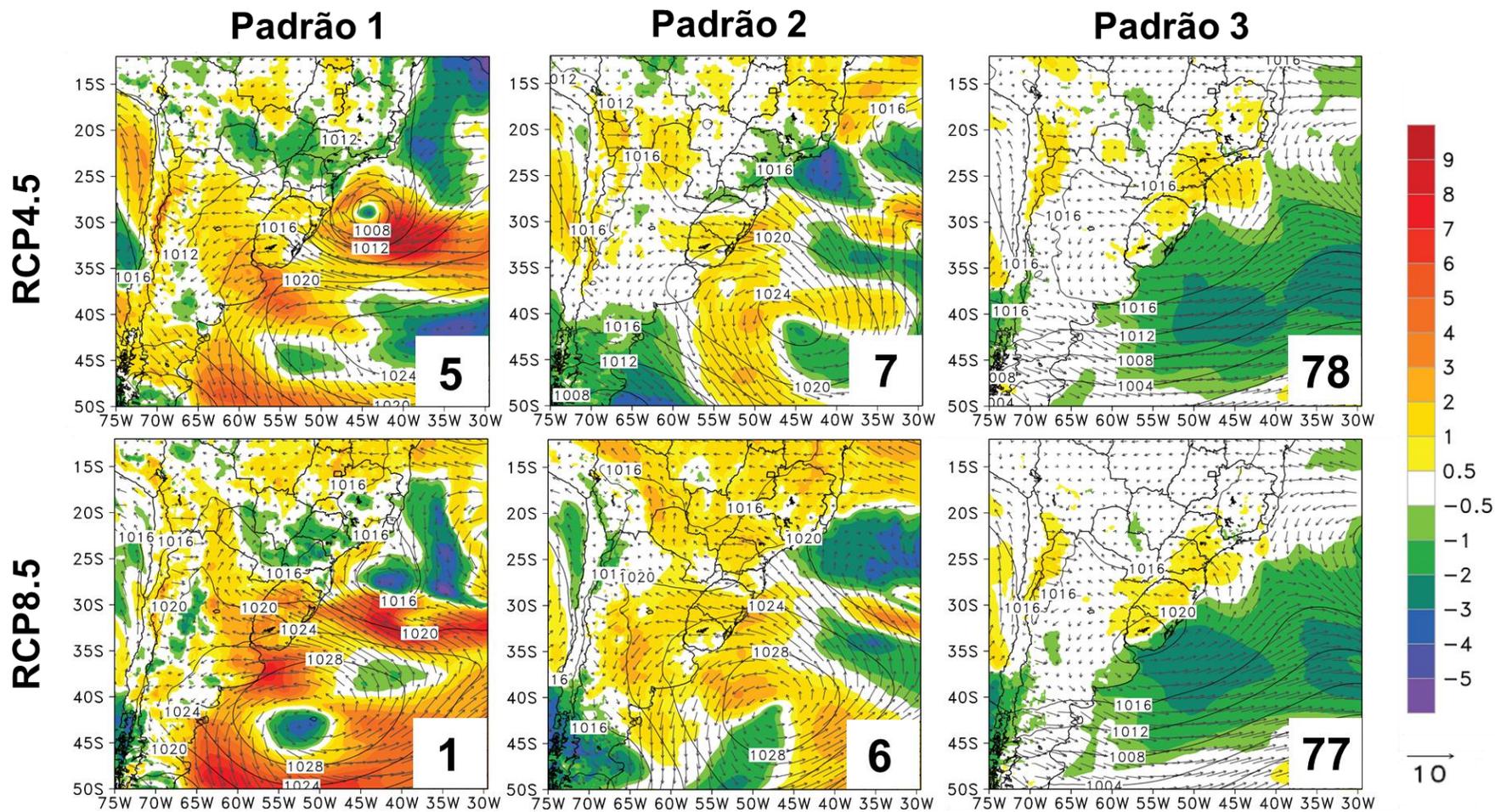


Figura 4.11 – Diferenças (Futuro – Presente) de intensidade do vento a 10 metros (sombreado) nos três padrões FR e a direção do vento a 10 metros (vetores) dos três padrões projetados, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando os cenários RCP4.5 (linha superior) e RCP8.5 (linha inferior), sobre a cidade de Santos: (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.6 Impactos em escala local no entorno de Santos

O estudo de impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas requer o uso de uma alta resolução espacial, pois os problemas relacionados a esse tema possuem características de escala local (CHOU et al., 2018). O *downscaling* dinâmico de alta resolução é utilizado com o objetivo de avaliar os impactos locais das condições atmosféricas dos potenciais dias de ressacas no litoral de Santos, encontrados a partir do método de detecção aplicado aos dados do Eta-BESM 20 km. A alta resolução proporciona um maior detalhamento dos dados e uma melhor discretização da topografia e da região costeira, capturando a variabilidade de escalas menores (LYRA et al., 2018).

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos pelo segundo *downscaling* do BESM, alcançando 5 km de resolução. Primeiramente, apresenta-se a comparação das topografias utilizadas pelo Eta-BESM nas resoluções de 20 km e 5km. Ademais, são mostrados os padrões meteorológicos em superfície FR, em escala local, para os horários de 06Z e 18Z, no período do clima presente (1976-2005) e no clima futuro (2031-2060), somente para o cenário mais pessimista, RCP8.5. Por fim, verifica-se o comportamento da precipitação para os três padrões FR.

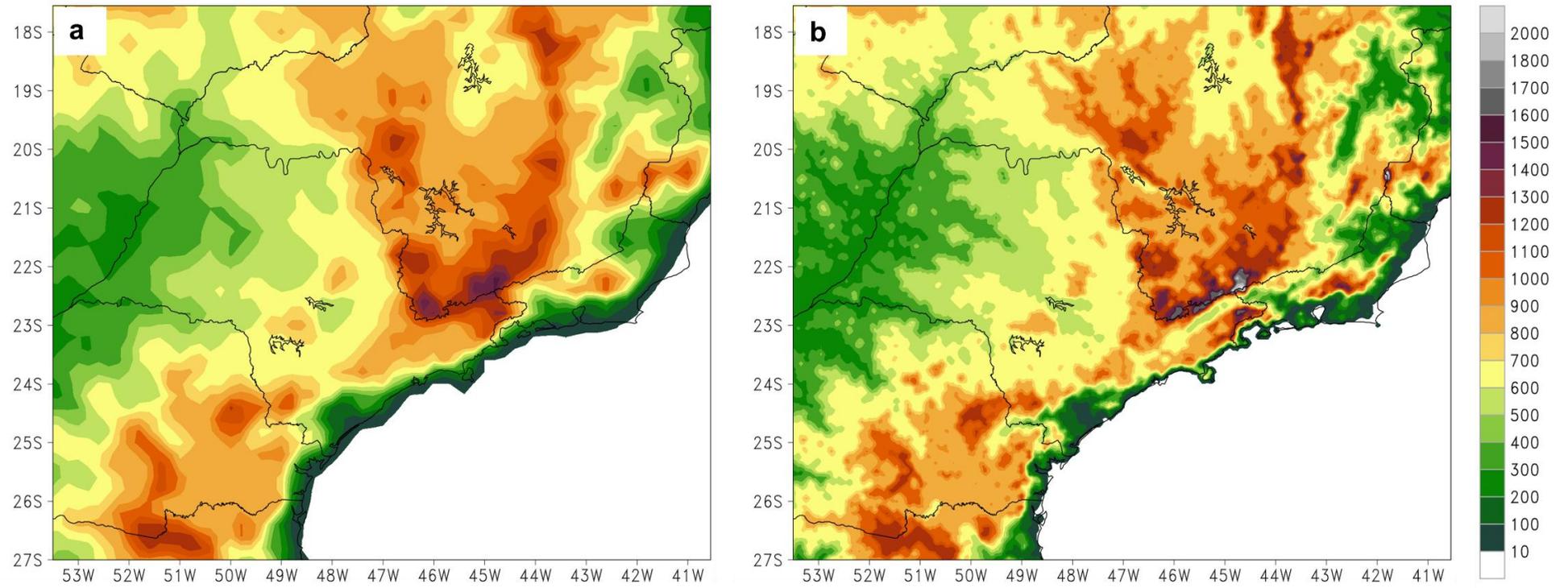
4.6.1 Topografia

Modelos climáticos globais, geralmente, adotam resoluções de, aproximadamente, 200 km x 200 km. Nestas resoluções, a topografia, a cobertura e o uso da terra são suavizados. Contudo, estudos de impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas futuras requerem conhecimento de escalas locais.

A Figura 4.12 permite comparar as topografias utilizadas pelo modelo Eta-BESM nas resoluções espaciais de 20 km e 5 km para a região Sudeste do Brasil. Verifica-se que a resolução espacial mais alta proporciona uma descrição mais detalhada da topografia e do desenho da linha da costa. Isto é necessário para capturar a variabilidade climática em menor escala.

Nota-se o maior detalhamento da linha da costa na topografia proveniente do Eta-BESM 5km, o que proporciona uma melhor representação de processos que são influenciados pelo contorno da região costeira, como os ventos. Além disso, o maior detalhamento da topografia auxilia na representação de fenômenos de mesoescala, como por exemplo as circulações de brisas e a precipitação local influenciada pela orografia. Estudos utilizando o modelo Eta na resolução de 5 km, como o de Mourão (2010), mostram um aumento das temperaturas em superfície sobre áreas urbanas e a intensificação da brisa marítima, vinda do oceano em direção à costa.

Figura 4.12 – Topografia (metros) simulada pelo (a) Eta-BESM 20 km e pelo (b) Eta-BESM 5 km sobre a região Sudeste do Brasil.



4.6.2 Simulação dos 3 padrões FR em escala local

A Figura 4.13 apresenta os três padrões meteorológicos FR, baseados na PNMM e na intensidade e direção do vento a 10 metros. Esses padrões são simulados a partir do Eta-BESM 5km para o período o clima presente (1976-2005).

A região de Santos é influenciada pela passagem de sistemas frontais, circulação de brisas, assim como pelo efeito orográfico (REBOITA et al., 2010). Na Figura 4.13 são mostrados os horários de 06Z e 18Z para destacar a circulação de brisa. No horário das 06Z, há a presença da brisa terrestre, o ar é advectado do continente para oceano, com a presença de altas pressões, em superfície, sobre o continente e pressões mais baixas sobre o oceano. Apesar disso, devido à atuação de sistemas de escala sinótica nos eventos de ressacas, como ciclones e anticiclones, os efeitos dessas circulações se sobrepõem a circulação da brisa. Portanto, no horário das 06Z, a forçante da circulação de mesoescala em superfície é contrária ao escoamento de grande escala, causando desaceleração dos ventos em direção ao litoral. Por outro lado, no horário das 18Z, verifica-se a presença da brisa marítima, o ar é advectado do oceano para o continente, os maiores valores de pressão sobre o mar e menores sobre o continente. Dessa forma, a forçante da circulação de brisa marítima em superfície favorece o escoamento de grande escala. Destaca-se que o escoamento de grande escala está relacionado com os três padrões atmosféricos FR.

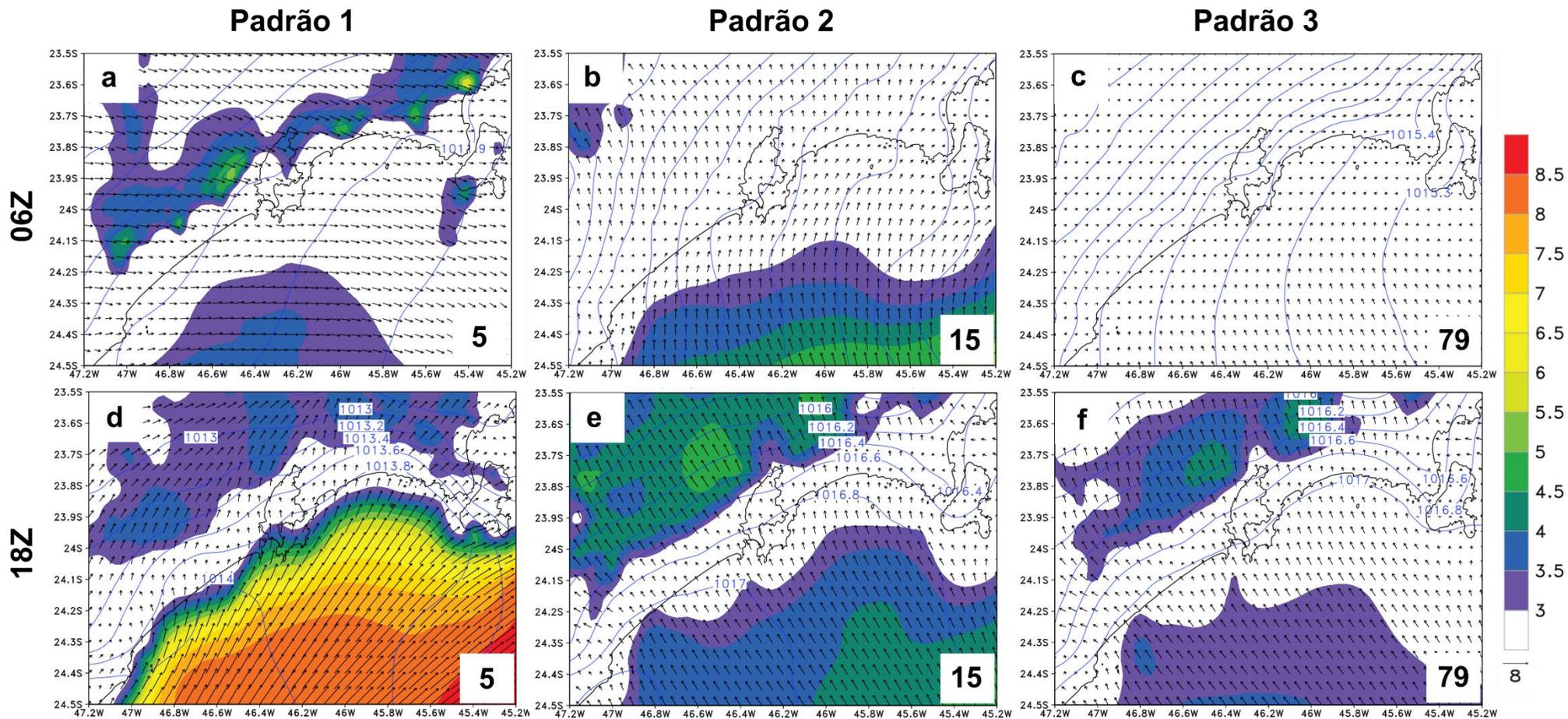
O Padrão 1 (Figuras 4.12a, d) é caracterizado, em escala sinótica, pela presença de um ciclone, sobre o oceano, com ventos paralelos à costa. A partir do *downscaling* dinâmico a 5 km, nota-se que no horário de 06Z, os ventos provenientes de sudoeste estão mais enfraquecidos, devido à forçante da circulação de brisa terrestre que apresenta ventos com direção contrária ao escoamento de grande escala. No horário de 18Z, verifica-se um centro de alta pressão na costa, contribuindo para a aceleração do escoamento em superfície, no sentido da região litorânea, acelerando os ventos que adentram ao continente.

Destaca-se o Padrão 2 (Figuras 4.12b, e) por apresentar uma intensa pista de ventos de sudeste, formada pela presença de um anticiclone e um ciclone sobre

o oceano, que se estende até a região costeira de Santos. O escoamento das 06Z mostra maiores intensidades do vento a 10 metros próximos à costa, alcançando valores superiores a 9 m/s. As direções dos ventos predominantes são de sul e sudeste, prevalecendo a atuação da circulação de grande escala.

O padrão 3, o mais frequente (Figuras 4.12c, f) e favorável à ocorrência de ressacas, é caracterizado por ventos paralelos à costa provenientes de um centro de alta pressão, em escala sinótica, sobre o continente. Em escala local, para o horário das 06Z, nota-se um enfraquecimento dos ventos de sudoeste ao se aproximarem da zona costeira, o que pode ocorrer devido à rugosidade da topografia que atua desacelerando-os. Já no horário das 18Z, os ventos são de sudeste e o escoamento é favorecido pela circulação de brisa marítima.

Figura 4.13 – Intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) dos 3 padrões FR, em maio, durante o clima presente (1976-2005) sobre a região de Santos para os horários de 06Z (linha inferior) e 18Z (linha superior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.6.3 Precipitação dos padrões FR

A relação entre chuvas intensas e eventos de ressacas é provável, uma vez que ambos os eventos são frequentemente resultantes de forçantes meteorológicas comuns. Os sistemas de baixa pressão, por exemplo, podem produzir ventos fortes e um efeito de barômetro invertido, causando ressacas, enquanto geram grandes volumes de chuva nas regiões costeiras adjacentes (ZHENG et al., 2013).

A precipitação (mm/dia) para os três Padrões atmosféricos FR no clima presente (1976-2005) é apresentada na Figura 4.14. A primeira linha mostra os valores observados oriundos dos dados do MSWEP, para os dias de ressacas selecionados a partir da reanálise ERA5, utilizando o período de 1981 a 2010. Enquanto que a segunda linha são os campos produzidos pelo Eta-BESM 5 km para os potenciais dias de ressacas detectados a partir do Eta-BESM 20 km. Por fim, a última linha apresenta os resultados obtidos pelo Eta-BESM 20 km.

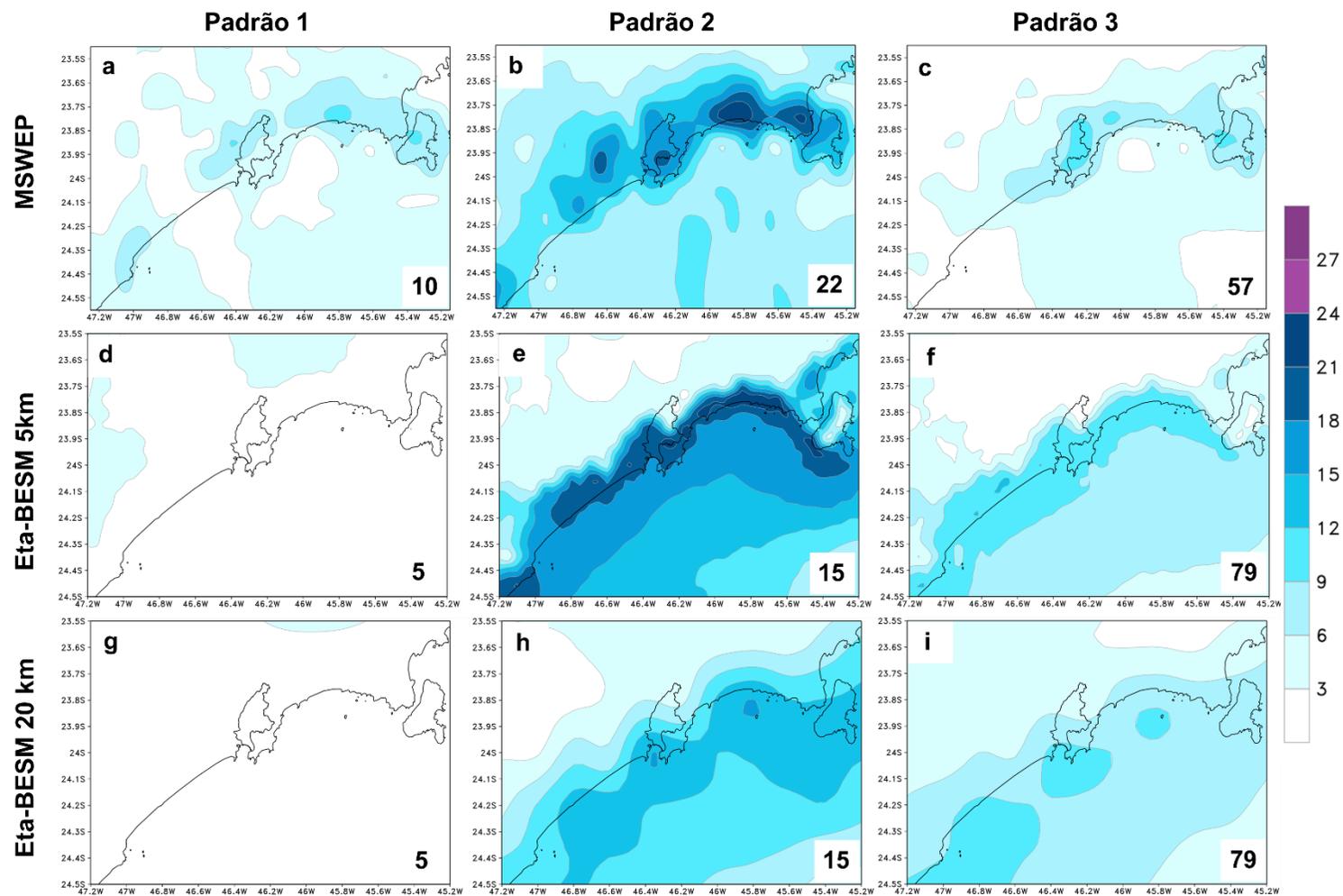
O Padrão 1 (Figura 4.14a, d, g) é marcado pela presença de um ciclone com ventos paralelos à costa de Santos, em grande escala. Apesar disso, nota-se que o Eta-BESM 5 km subestima a precipitação em relação ao observado, apresentando valores inferiores a 3 mm/dia na região costeira de Santos. Isso, possivelmente, ocorre devido a posição do ciclone sobre o oceano que concentra os maiores acumulados de chuva sobre a região oceânica. Além disso, faz-se necessária a verificação de precipitação nos dias anteriores ao evento de ressaca.

Para o Padrão 2 (Figuras 4.13b, e, h), a precipitação simulada pelo modelo de alta resolução é superestimada em relação ao observado. A simulação do Eta-BESM 5 km mostra valores superiores a 21 mm/dia ao longo da região costeira. Toda essa precipitação é resposta à extensa pista de ventos intensos, em grande escala, que se inicia sobre o oceano até o litoral de Santos, levando umidade até essa região e causando grandes volumes de chuva. A interação da brisa marítima com esse escoamento atmosférico pode favorecer a ocorrência de eventos de chuvas intensas (REBOITA et al., 2010).

Apesar de superestimar a chuva do observado, a simulação de precipitação do Padrão 3 (Figuras 4.13c, f, i) pelo Eta-BESM 5 km é a que mais se aproxima do observado quando comparado a simulação dos outros padrões. A simulação mostra chuvas acima de 12 mm/dia na faixa litorânea da Baixada Santista. Os maiores valores de precipitação nessa região podem estar relacionados aos ventos de sudoeste provenientes da alta pressão sobre o continente, mostrados no padrão de grande escala. Esse sistema está posicionado de forma a contribuir para o transporte de umidade em baixos níveis do oceano em direção a zona costeira.

Em relação ao Eta-BESM 20 km, verifica-se que as simulações do Eta-BESM 5 km apresentam mais acumulados de chuva sobre a região de Santos. Apesar disso, ambas as simulações concordam com a distribuição de chuvas nos padrões FR, pouca precipitação no Padrão 1 e mais chuvas no Padrão 2.

Figura 4.14 – Os três Padrões de precipitação FR oriundos do MSWEP (1981-2000), simulados pelo Eta-BESM 5 km e 20 km (1976-2005), em maio sobre a cidade de Santos: (a), (d) e (g) Padrão 1; (b), (e) e (h) Padrão 2 e (c), (f) e (i) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.6.4 Projeções dos três padrões FR em escala local

As projeções de clima futuro (2031-2060) apresentadas neste trabalho resultam da regionalização das projeções do modelo Eta-BESM 20 km, resultando no Eta-BESM na resolução horizontal de 5km, adotando o cenário mais pessimista, RCP8.5. A Figura 4.15 mostra as projeções dos 3 padrões atmosféricos FR, baseadas na PNMM, intensidade e direção do vento a 10 metros. A linha superior mostra as condições para o horário das 06Z, enquanto que a linha inferior mostra às 18Z. A Figura 4.16 apresenta a diferença (futuro – presente) da intensidade do vento dos três padrões atmosféricos FR para os horários de 06Z e 18Z, porém, a direção do vento corresponde a projeção do clima futuro, também apresentada na Figura 4.15.

Nos três padrões, nota-se a presença de ventos mais intensos no horário das 18Z. Isso ocorre devido à atuação da circulação da brisa marítima que é mais intensa que a brisa terrestre devido ao maior gradiente de temperatura entre o continente e oceano nesse horário (JORGETTI et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2017).

No Padrão 1 (Figura 4.15a, d), verifica-se a presença de menores valores de intensidade do vento próximos à costa e maiores sobre o oceano. Os ventos são, predominantemente, de sudoeste e formam uma pista paralela à costa, o que é a condição mais favorável à ocorrência de ressacas de acordo com a literatura.

No litoral, os ventos são de sudoeste em ambos os horários, o Padrão 1 (Figura 4.16a, d) às 06Z apresenta um aumento na velocidade em relação ao clima presente. Enquanto que às 18Z, nota-se uma redução.

O Padrão 2 (Figura 4.16b, e), no horário das 06Z, não apresenta mudanças claras em relação ao clima presente; enquanto que às 18Z, nota-se um aumento da velocidade dos ventos sobre oceano. Os ventos na costa de Santos são de sul e mais intensos em direção à região marítima, predominando escoamento de grande escala provenientes da extensa pista de ventos intensos formada por uma alta pressão ao sul e uma baixa pressão mais ao norte do Oceano Atlântico Sul.

Para o Padrão 3, não há mudanças claras na intensidade do vento às 06Z (Figura 4.16c). Nota-se a presença de ventos fracos na costa de sudoeste e sul. Para o horário de 18Z (Figura 4.16f), verifica-se a presença de ventos mais intensos, vindos de sudeste, provenientes da alta pressão sobre o continente em grande escala. Contudo, há poucas mudanças na intensidade do vento a 10 metros em relação ao presente.

Figura 4.15 – Projeções dos três padrões da intensidade e direção vento a 10 metros (sombreado e vetor, respectivamente) e da PNMM (isolinhas) favoráveis à ocorrência de ressacas projetados pelo Eta-BESM 5 km, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos para os horários de 06Z (linha superior) e 18Z (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.

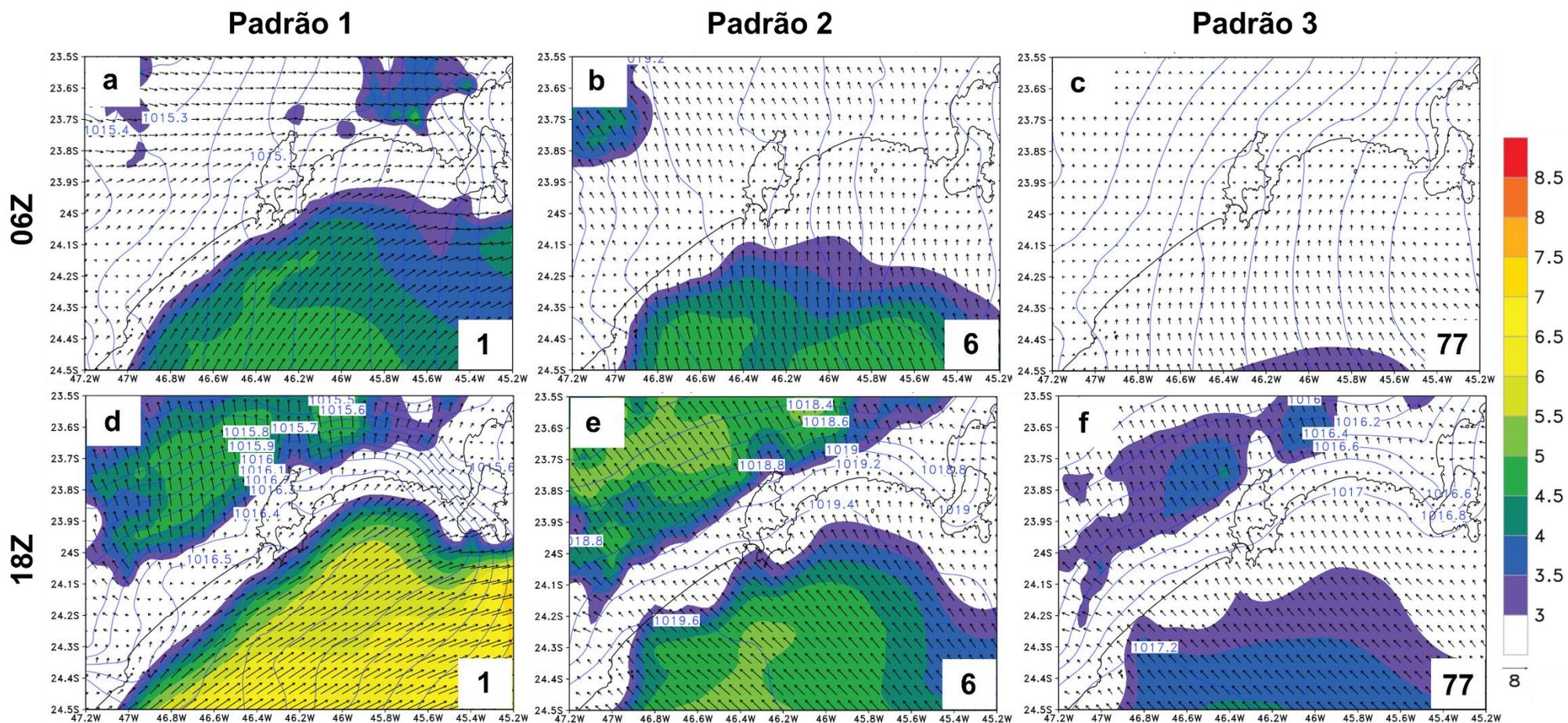
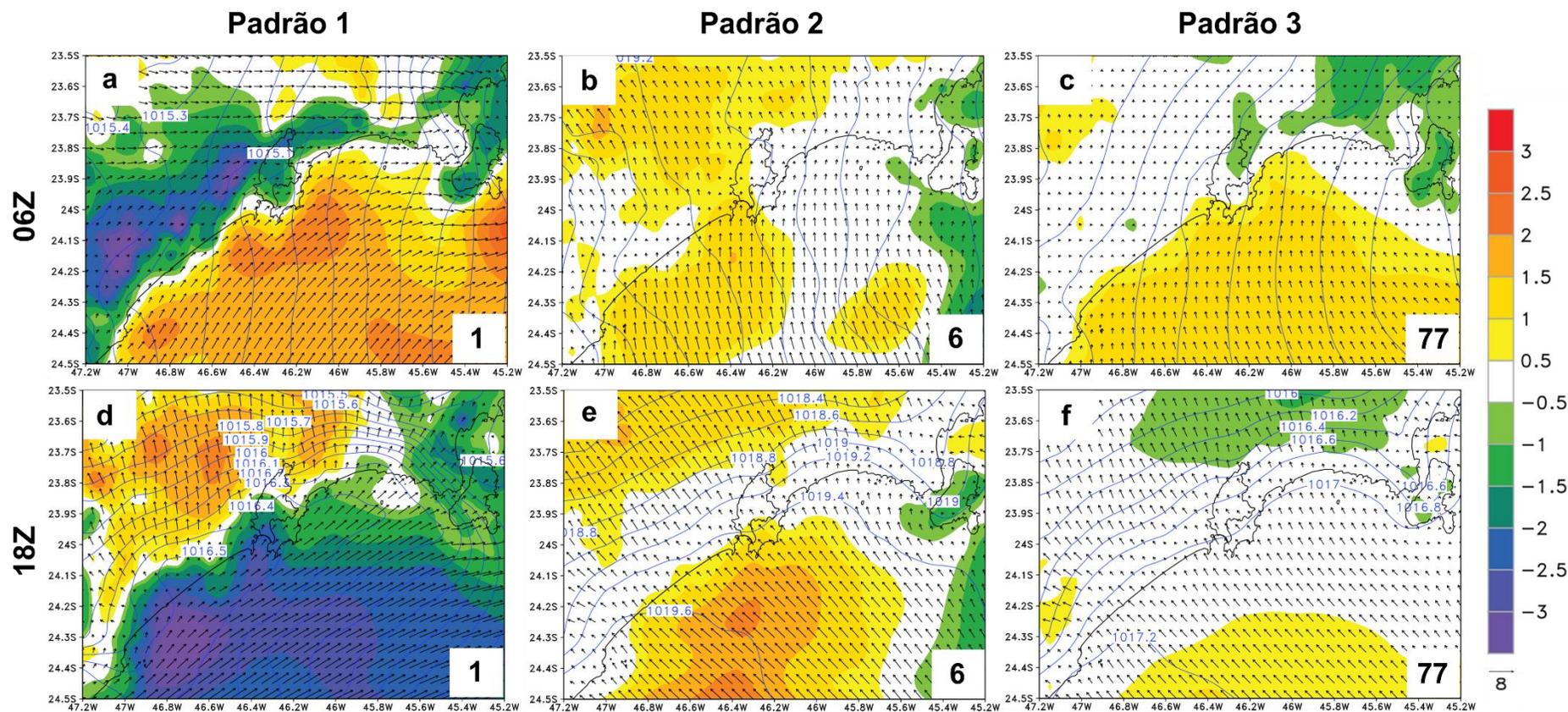


Figura 4.16 – Diferenças (Futuro – Presente) de intensidade do vento a 10 metros (sombreado) nos três padrões FR e a direção do vento a 10 metros (vetores) dos três padrões projetados, em maio, durante o período de 2031 a 2060, utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos para os horários de 06Z (linha superior) e 18Z (linha inferior): (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



4.6.5 Precipitação dos três padrões FR

Impactos observados das mudanças climáticas incluem o aumento da intensidade de chuvas que provocam instabilidades nas áreas costeiras que sofrem com inundações e deslizamentos. Em longo prazo, esse fenômeno, associados ao aumento das tempestades e ventos, pode resultar em maior intensidade de ressacas (MARENGO et al., 2016).

A Figura 4.17 apresenta a precipitação (mm/dia) para os três padrões FR, projetados pelo Eta-BESM 5 km para o clima futuro (2031-2060), utilizando o cenário de emissão RCP8.5.

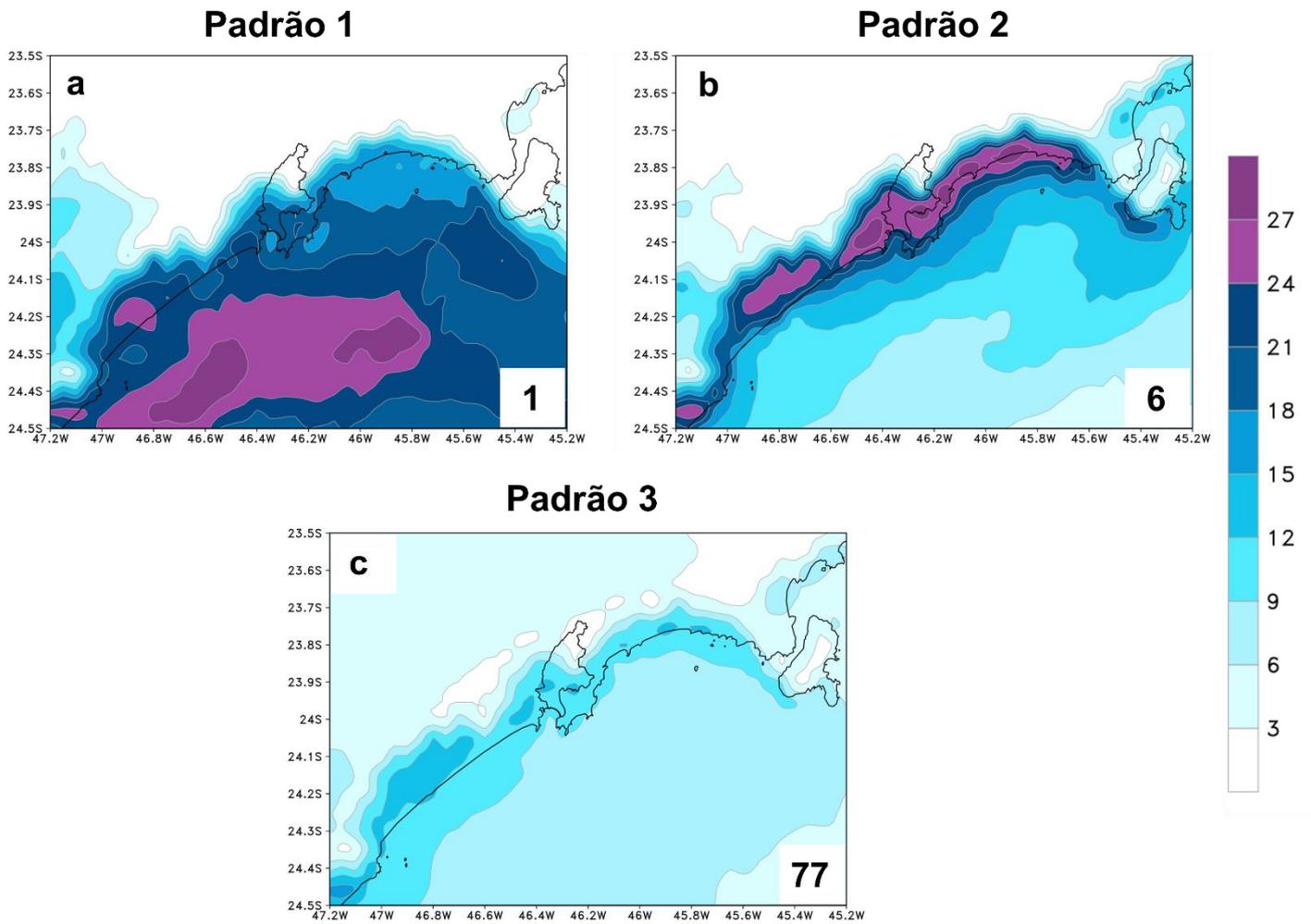
O Padrão 1 (Figura 4.17a), apesar de apresentar uma redução de casos em relação ao presente e possuir apenas 1 potencial caso de ressaca no futuro, está associado a chuvas mais intensas no clima futuro. Portanto, está propício a causar grandes prejuízos à cidade de Santos e à zona portuária. As projeções mostram que a precipitação é intensa em toda região costeira com valores entre 18 e 21 mm/dia. Os maiores valores de chuva são verificados no oceano, com valores superiores a 27 mm/dia.

Para o Padrão 2, verifica-se maior volume de chuva em direção ao continente. A precipitação está concentrada em todo o litoral da Baixada Santista, alcançando valores superiores a 27 mm/dia. Nota-se uma intensificação das chuvas em relação ao clima presente, deixando essa região ainda mais vulnerável a impactos como deslizamentos de terra e enchentes.

O Padrão 3, formado por 57 potenciais casos de ressacas, não mostra grandes mudanças. Nota-se um aumento da chuva em alguns pontos da região costeira e uma redução em direção ao oceano. Esse padrão, caracteriza-se por ser o de maior ocorrência, porém, o menos intenso em termos de precipitação.

Em geral, as projeções utilizando o cenário RCP8.5 mostram um aumento da precipitação para o clima futuro nos três padrões FR sobre toda a região litorânea.

Figura 4.17 – Padrões de precipitação favoráveis à ocorrência de ressacas simulados pelo Eta-BESM 5 km, em maio, durante o período de 2031 a 2060 (clima futuro) utilizando o cenário RCP8.5, sobre a cidade de Santos: (a) e (d) Padrão 1; (b) e (e) Padrão 2 e (c) e (f) Padrão 3. Os valores no canto inferior direito se referem ao número de dias encontrados de cada padrão e utilizado no cálculo da média.



5 CONCLUSÃO

A vulnerabilidade de Santos à variabilidade e às mudanças climáticas está relacionada à alta densidade populacional e a intensa atividade econômica devido, principalmente, à presença do maior Porto da América Latina. Dessa forma, a cidade costeira de Santos demanda investimentos e medidas de adaptação frente às mudanças climáticas, com foco na redução de riscos e minimização dos impactos ocasionados pelos eventos extremos climáticos e oceanográficos observados no presente e projetados para o futuro (MARENGO et al., 2016). Portanto, o objetivo principal do trabalho foi de caracterizar as mudanças nas condições meteorológicas favoráveis à ocorrência das ressacas a partir de projeções climáticas futuras para a cidade de Santos.

A ressaca foi definida quando a altura significativa da onda máxima diária é igual ou superior a 2,5 metros. Dessa forma, foram selecionados 89 casos de ressacas, em maio, durante o período de 1981 a 2010 utilizando os dados da Reanálise ERA5. Foram encontrados três padrões atmosféricos FR, de acordo com as condições atmosféricas dos 89 dias de ressaca. Para o Padrão 1 foram detectados 10 casos, em maio, no período de 1981 a 2010. Este Padrão foi caracterizado pela presença de um ciclone no litoral da cidade de Santos com ventos intensos e paralelos à costa, vindos de sudoeste, com velocidade superior a 8 m/s. No Padrão 2 foram detectados 22 casos de ressaca e apresentou uma extensa pista de ventos sobre o oceano, com intensidade superior a 8 m/s, formada por um sistema de alta pressão ao sul e uma baixa pressão ao norte no Oceano Atlântico Sul. Nesse caso, os ventos incidem perpendicular à costa de Santos, provenientes da direção sul. O Padrão 3 apresentou o maior número de eventos, 57 casos, e foi caracterizado pela presença de ventos de sudoeste, provenientes da alta pressão sobre o continente e a presença de um cavado sobre o oceano.

Foi encontrada uma tendência decadal positiva e estatisticamente significativa do número de eventos de ressaca nos meses de maio, durante o período de 1981 a 2010, indicando que os eventos de ressaca têm se tornado mais frequentes ao longo dos últimos anos e corroborando com Souza et al. (2019).

Porém, a duração média desses eventos apresentou uma tendência decadal nula e sem significância estatística.

Os resultados utilizando o esquema de detecção das condições FR, mostrou que as simulações do Eta-BESM 20 km subestimaram o número de casos do Padrão 1 e do Padrão 2. Entretanto, superestimaram o número de casos do Padrão 3. Em geral, o Eta-BESM 20 km apresentou ventos mais intensos sobre o oceano nos três padrões em comparação com a reanálise. Apesar disso, as condições atmosféricas dos três padrões foram configuradas espacialmente de forma adequada.

As projeções climáticas do Eta-BESM 20 km indicam que os padrões atmosféricos FR ocorrerão com menor frequência no futuro. Apesar disso, nota-se que os eventos do Padrão 1 se tornarão mais intensos. Enquanto que no Padrão 2, as maiores mudanças ocorrem próximo ao litoral. Para o Padrão 3, não há mudanças evidentes. Nos três padrões, no cenário RCP8.5, as projeções indicam valores mais altos de PNMM, ou seja, os centros de alta pressão em superfície estarão mais intensos e os de baixa pressão menos intensos em superfície em relação ao clima presente. Enquanto que para o RCP4.5, destaca-se a presença do centro de baixa pressão mais intenso próximo à costa de Santos no Padrão 1. Os outros padrões apresentam valores de PNMM próximos aos padrões da reanálise.

O segundo *downscaling* dinâmico, na resolução de 5 km, foi utilizado com o objetivo de permitir o detalhamento dos impactos locais das condições atmosféricas dos potenciais dias de ressacas no litoral de Santos. A alta resolução proporcionou um maior detalhamento dos dados e uma melhor discretização da topografia e da região costeira.

As simulações do Eta-BESM 5 km para o clima presente (1976-2005) mostraram que a atuação de sistemas de escala sinótica nos eventos de ressacas, como ciclones e anticiclones, sobrepuseram-se aos efeitos da circulação de brisa. Portanto, no horário das 06Z, a forçante da circulação de mesoescala (brisa terrestre) em superfície é contrária ao escoamento de grande escala, o que desacelera os ventos em direção à região costeira. Já no horário das 18Z

apresenta maiores valores de pressão sobre o mar, devido à presença da brisa marítima. Dessa forma, a força da circulação de brisa em superfície favorece o escoamento de grande escala.

As simulações de precipitação produzidas pelo Eta-BESM 5km, para o clima presente, dos Padrões 2 e 3 superestimaram a chuva na maior parte da Baixada Santista, em relação ao observado. Enquanto que as chuvas do Padrão 1 apresentaram subestimativas na região costeira de Santos, caracterizando-se como um padrão com pouca precipitação. Isso, possivelmente, ocorre devido a posição do ciclone sobre o oceano que concentra os maiores acumulados de chuva sobre a região oceânica. Além disso, faz-se necessária a verificação de precipitação nos dias anteriores ao evento de ressaca.

As projeções do Eta-BESM 5km, em geral, mostram a presença de ventos mais intensos no horário das 18Z, quando comparado com o horário das 06Z. Verificou-se um aumento (redução) na intensidade do vento sobre o oceano no horário das 06Z (18Z), no Padrão 1, em relação ao clima presente. O Padrão 2 apresentou um aumento da intensidade do vento sobre o oceano. Enquanto que no Padrão 3 não há mudanças evidentes próximo a costa de Santos.

Os impactos observados de mudanças climáticas incluem o aumento na intensidade de chuvas que provocam instabilidades nas áreas costeiras, inclusive cidades, que sofrem com inundações e deslizamentos. Em longo prazo, esse fenômeno, associado ao aumento das tempestades e ventos, pode resultar em maior intensidade de ressacas (MARENGO et al., 2016). As projeções do Eta-BESM 5 km mostraram uma precipitação intensa em toda região costeira. Os maiores valores de chuva são verificados sobre o oceano no Padrão 1, que apesar da menor ocorrência em relação ao clima presente, tornou-se mais intenso e pode causar grandes prejuízos à cidade de Santos. Nos padrões 2 e 3, a precipitação se concentrou em todo o litoral da Baixada Santista. Portanto, as projeções para o três padrões FR apontam para um aumento de chuva na região de Santos.

Portanto, a partir dos resultados encontrados no presente trabalho, pode-se inferir que as condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de ressacas que

atingem a região de Santos sofrerão mudanças nos seus padrões, como o aumento de precipitação. Apesar disso, as projeções futuras mostram que essas condições atmosféricas se tornarão menos frequentes. Dessa forma, faz-se necessária a realização de estudos futuros para analisar a ocorrência de ressacas em outros meses do ano e utilizando também outros cenários de emissão, uma vez que só foram utilizados os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Além disso, é importante que se faça a análise de outras variáveis atmosféricas e que sejam consideradas variáveis oceânicas, como a altura significativa da onda, que somente seria possível com o uso de um modelo de ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. T.; PEZZA, A. B.; BLACK, M. T. Explosive cyclogenesis: a global climatology comparing multiple reanalysis. **Journal of Climate**, v. 23, n. 24, p. 6468-6484, 2010.

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; DE ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 589–615, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BENGTSSON, L.; HODGES, K. I.; KEENLYSIDE, N. Will extratropical storms intensify in a warmer climate. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2276-2301, 2009.

BETTS, A. K.; MILLER, M. J. A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 473, p. 693-709, 1986.

BITENCOURT, D.P.; QUADRO, M.F.L.; CALBETI, N.O. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, p. 3910-3917, 2002.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994.

BLENDER, R.; SCHUBERT, M. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 2, p. 377-384, 2000.

CAMARGO, R.; CAMPOS, R. M. Composites of sea level pressure and surface winds in the western South Atlantic related to storm surge activity in Santos, Brazil. In: ICSHO, 8., 2006. **Proceedings...** 2006. p.3-5.

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R. Caracterização das condições sinóticas sobre o Atlântico Sudoeste associadas a marés meteorológicas no Porto de Santos.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2006, Florianópolis. **Anais...** 2006.

CAMPOS, R. M.; 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**, v. 25, n. 2, p. 175-184, 2010.

CHOU, M-D.; SUAREZ, M. J. **A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies**. [S.I.]: NASA, 1999. (NASA Tech. Memo, 10460).

CHOU, S. C.; MAREGO, J. A.; SILVA, A. J.; LYRA, A. A.; TAVARES, P.; SOUZA, C. R. G.; HARARI, J.; NUNES, L. H.; GRECO, R.; HOSOKAWA, E. K.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ALVES, L. M. Projections of climate change in the coastal area of Santos. In: GRECO, R.; MARENGO, J. A.; NUNES, L. H. (Ed.). **Climate change in Santos Brazil: projections, impacts and adaptation options**. [S.I.]: Springer, 2019. p. 59-73.

CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.; ALVES, L.M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D.; GOMES, J.L.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 3/4, p. 635-653, 2012.

CHOU, S.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 438, 2014.

DORMAN, J. L.; SELLERS, P. J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the simple biosphere model (SiB). **Journal of Applied Meteorology**, v. 28, n. 9, p. 833-855, 1989.

DOWDY, A. J.; MILLS, G. A.; TIMBAL, B.; WANG, Y. Fewer large waves projected for eastern Australia due to decreasing storminess. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 4, p. 283-286, 2014.

EICHLER, T. P.; GOTTSCHALCK, J. A comparison of Southern Hemisphere cyclone track climatology and interannual variability in coarse-gridded reanalysis datasets. **Advances in Meteorology**, v. 2013, 2013.

EICHLER, T.; HIGGINS, W. Climatology and ENSO-related variability of North American extratropical cyclone activity. **Journal of Climate**, v. 19, n. 10, p. 2076-2093, 2006.

EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D22, 2003.

FERRIER, B. S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, G. Implementation of a 527 new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model. In: CONFERENCE ON WEATHER ANALYSIS AND FORECASTING, 19., 2002. **Proceedings...** American Meteorological Society, 2002. p. 280–283.

FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P. Y.; GRELL, G. A.; MORRISON, H.; BARROS, S. R. M.; FERNANDEZ, J. P. R.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUZIA, G.; SILVA, J.; SILVA, J. R.; PENDAHARKAR, J.; CAPISTRANO, V. B.; ALVIM, D. S.; ENORÉ, D. P.; DINIZ, F. L. R.; SATYAMURTI, P.; CAVALCANTI, I. F. A.; NOBRE, P.; BARBOSA, H. M. J.; MENDES, C. L.; PANETTA, J. The Brazilian global atmospheric model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, n. 5, p. 1547-1572, 2016.

FYFE, J. C. Extratropical Southern Hemisphere cyclones: harbingers of climate change. **Journal of Climate**, v. 16, n. 17, p. 2802-2805, 2003.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GENG, Q.; SUGI, M. Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols: study with a high-resolution AGCM. **Journal of Climate**, v. 16, n. 13, p. 2262-2274, 2003.

GIAROLLA, E.; SIQUEIRA, L. S. P.; BOTTINO, M. J.; MALAGUTTI, M.; CAPISTRANO, V. B.; NOBRE, P. Equatorial Atlantic Ocean dynamics in a coupled ocean–atmosphere model simulation. **Ocean Dynamics**, v. 65, n. 6, p. 831-843, 2015.

GRAHAM, N. E.; DIAZ, H. F. Evidence for intensification of North Pacific winter cyclones since 1948. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 9, p. 1869-1894, 2001.

GRELL, G. A.; DÉVÉNYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 14, p. 38-1-38-4, 2002.

GRIEGER, J.; LECKEBUSCH, G. C.; DONAT, M. G.; SCHUSTER, M.; ULBRICH, U. Southern Hemisphere winter cyclone activity under recent and future climate conditions in multi-model AOGCM simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 12, p. 3400-3416, 2014.

GRIFFIES, S. M.; SCHMIDT, M.; HERZFELD, M. I. K. E. **Elements of mom4p1**. [S.I.]: GFDL, 2009.

HARSHVARDHAN, R. A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, p. 1009-1016, 1987.

HART, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 4, p. 585-616, 2003.

HERNANDEZ, A. O. **Eventos extremos de ondas e marés meteorológicas no norte de Santa Catarina**. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

HERSBACH, H.; DEE, D. J. E. N. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF Newsletter**, v. 147, n. 7, p. 5-6, 2016.

HODGES, K. I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 11, p. 2573-2586, 1994.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, v. 18, n. 20, p. 4108-4129, 2005.

INNOCENTINI, V.; CAETANO NETO, E. A case study of the 9 August 1988 South Atlantic storm: numerical simulations of the wave activity. **Weather and Forecasting**, v. 11, n. 1, p. 78-88, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA - IBGE – **Censo 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Brussels: IPCC, 2013.

JANJIC, Z. I. Forward-backward scheme modified to prevent two-grid-interval noise and its application in sigma coordinate models. **Contributions of Atmospheric Physics**, v. 52, p. 69-84, 1979.

JANJIC, Z. I. Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 6, p. 1234-1245, 1984.

JANJIC, Z. I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

JANJIC, Z. I.; GERRITY JUNIOR, J. P.; NICKOVIC, S. An alternative approach to nonhydrostatic modeling. **Monthly Weather Review**, v. 129, n. 5, p. 1164-1178, 2001.

JANTSCH, M. **Climatologia de ciclones extratropicais na região sul do Brasil de 2000 a 2016**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

JIMÉNEZ, P. A.; DUDHIA, J.; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F.; NAVARRO, J.; MONTÁVEZ, J. P.; GARCÍA-BUSTAMANTE, E. A revised scheme for the WRF surface layer formulation, **Monthly Weather Review**, v.140, p. 898–918, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>.

JONES, D. A.; SIMMONDS, I. A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. **Climate Dynamics**, v. 9, n. 3, p. 131-145, 1993.

JORGETTI, T.; CAMARGO, R.; JANUÁRIO, C. S. Caracterização da célula de brisa na região metropolitana de São Paulo através de observações simultâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** 2002.

KOUROUTZOGLU, J.; FLOCAS, H. A.; KEAY, K.; SIMMONDS, I.; HATZAKI, M. Climatological aspects of explosive cyclones in the Mediterranean. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 12, p. 1785-1802, 2011.

KRÜGER, L. F.; DA ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. **Climatic Change**, v. 113, n. 3/4, p. 599-621, 2012.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 1, p. 118-133, 1974.

LAMBERT, S. J. A cyclone climatology of the Canadian Climate Centre general circulation model. **Journal of Climate**, v. 1, n. 1, p. 109-115, 1988.

LAMBERT, S. J.; FYFE, J. C. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. **Climate Dynamics**, v. 26, n. 7/8, p. 713-728, 2006.

LARGE, W.; YEAGER, S. G. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. **Climate Dynamics**, v. 33, n. 2/3, p. 341-364, 2009.

LIM, E. P.; SIMMONDS, I. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 9, p. 2188-2209, 2002.

LIONELLO, P.; DALAN, F.; ELVINI, E. Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO2 climate scenarios. **Climate Research**, v. 22, n. 2, p. 147-159, 2002.

LIONELLO, P.; GIORGI, F. **Winter precipitation and cyclones in the Mediterranean region: future climate scenarios in a regional simulation.** Salerno: Università di Salerno, 2007.

LYRA, A. A.; TAVARES, P. S.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1/2, p. 663-682, 2018.

MACHADO, J. P.; MIRANDA, G. S. B.; GOZZO, L. F.; CUSTÓDIO, M. S. Condições Atmosféricas Associadas a Eventos de Ressaca no Litoral Sul e do Sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, p. 529-544, 2019.

MACHADO, A. A.; CALLIARI, L. J.; MELO, E.; KLEIN, A. H. F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v.5, n.2, p. 105-114, 2010.

MACQUEEN, J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In: BERKELY SYMPOSIUM ON MATHEMATICAL STATISTICS AND PROBABILITY, 5., 1967. **Proceedings...** 1967. p. 281-297.

MAHERAS, P.; FLOCAS, H.; PATRIKAS, I.; ANAGNOSTOPOULOU, C. A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 21, n. 1, p. 109-130, 2001.

MARENGO, J. A. et al. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. (Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC)).

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9/10, p. 1829-1848, 2012.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 49-54, 2016.

MARINHA DO BRASIL. **Normas de autoridade marítima para as atividades de meteorologia marítima** - Normam-19. Brasília, 2018.

MARONE, E.; CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, v. 8, n. 1/2, p. 73-85, 1994.

MELO FILHO, E. **Maré meteorológica na costa brasileira**. Tese (Professor Titular) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 2017.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, v. 20, n. 4, p. 851-875, 1982.

MENDES, D.; DE MOURA, R. G.; MENDES, M. C. D. M. Case study of extratropical cyclone over the South America: sensibility of analysis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 399-406, 2009.

MESINGER, F. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, n. 7, p. 1493-1518, 1988.

MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 3/4, p. 63-79, 2012.

MOURÃO, C.E.F. **Testes com o esquema Kain Fritsch de parametrização de convecção**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: application to January and July general circulation model simulations. **Australian Meteorological Magazine**, v. 39, n. 3, p. 167-180, 1991.

NECCO, G.V. Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el FGGE: ciclogenesi. **Meteorológica**, v. 8, p. 7, 1982.

NICHOLLS, R. J.; WONG, P. P.; BURKETT, V.; CODIGNOTTO, J.; HAY, J. Coastal systems and low-lying areas. In: LOSADA, P. P. et al (Ed.). **Climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

NOBRE, P.; SIQUEIRA, L. S. P.; DE ALMEIDA, R. A. F.; MALAGUTTI, M.; GIAROLLA, E.; CASTELÃO, G. P.; BOTTINO, M. J.; KUBOTA, P.; FIGUEROA, S. N.; COSTA, M. C.; BAPTISTA, M.; IRBER, L.; MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the Brazilian climate model. **Journal of Climate**, v. 26, p. 6716–6732, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00580.1>.

OBUKHOV, A. M. On invariant characteristics of systems of fluid mechanical type (Invariant characteristics of hydrodynamic systems with stationary boundaries, 3 degrees of freedom and second order nonlinear motion of Liouville type). In: SYMPOSIUM ON ADVANCED PROBLEMS AND METHODS IN FLUID MECHANICS, 9., 1971, Kazimierz, Poland. **Proceedings...** 1971. p. 193-199.

OKE, T. R.; CLEUGH, H. A. Urban heat storage derived as energy balance residuals. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 39, n. 3, p. 233-245, 1987.

OLIVEIRA, J. F.; DE BODAS TERASSI, P. M.; DE GOIS, G. Estudo da circulação dos ventos na Baía de Guanabara/RJ, entre 2003 e 2013. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017.

PALMÉN, E. H.; NEWTON, C. W. **Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation**. [S.l.]: Academic Press, 1969.

PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 3, p. 175-188, 2009.

- PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Journal of Applied Meteorology**, v. 9, n. 6, p. 857-861, 1970.
- PEIXOTO, J. P., OORT, A. H. Physics of climate. [S.l.]: MIT,1992.
- PEPLER, A. S.; DI LUCA, A. Impact of identification method on the inferred characteristics and variability of Australian East Coast Lows. **Monthly Weather Review**, v. 143, n. 3, p. 864-877, 2015.
- PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v.99, p.75–93, 2010.
doi:10.1007/s00704-009-0123-z
- PETERSEN, S. **Weather analysis and forecasting**: motions and motion systems. [S.l.]: McGraw Hill, 1956.
- PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T. Variability of Southern Hemisphere cyclone and anticyclone behavior: further analysis. **Journal of Climate**, v. 16, n. 7, p. 1075-1083, 2003.
- PINTO, J.G.; SPANGEHL, T.; ULBRICH, U.; SPETH, P. Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. **Meteorologische Zeitschrift**, v.14, p. 823–838, 2005.
- PUGH, D. T. **Tides, surges and mean sea-level**. [S.l.]: Wiley,1996.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DE SOUZA, M. R.; LLOPART, M. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 6, p. 2866-2879, 2018.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. In: CONGRESSO ARGENTINO DE METEOROLOGIA, 2005. **Anais...** 2005.

REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C.D. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 7/8, p. 1929-1944, 2015.

REBOITA, M. S. **Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade**. 2008. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

RIBEIRO, R. B.; SAMPAIO, A. F. P.; RUIZ, M. S.; LEITÃO, J. C.; LEITÃO, P. C. First approach of a storm surge early warning system for Santos region. In: NUNES L.; GRECO R.; MARENGO J. (Ed.). **Climate change in Santos Brazil: projections, impacts and adaptation options**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 135–157.

RICE, J. **The derivation of computer-based synoptic climatology of southern hemisphere extratropical cyclones**. hesis (PhD) - .University of Melbourne, 1982.

ROCHA, F. P.; ARAVÉQUIA, J. A.; ZANETTI, B. Estudo de ciclones e de padrões de circulação atmosférica no oceano Atlântico Sul próximo à costa das Regiões Sul e Sudeste do Brasil usando dados da reanálise do ERA-Interim. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 141-156, 2016.

ROCHA, R. P.;, SUGAHARA, S.; DA SILVEIRA, R. B. Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: hindcast and validation against altimeter data. **Weather and Forecasting**, v. 19, n. 2, p. 398-410, 2003.

SANTOS, B. B. O.; NUNES, L. H.; BANDINI, M. P. Rainfall episodes and local stability thresholds in Santos. In: NUNES L.; GRECO R.; MARENGO J. (Ed.). **Climate change in Santos Brazil: projections, impacts and adaptation options**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 161-175.

SARAIVA, J. M. B.; BEDRAN, C.; CARNEIRO, C. Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS, Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 323-331, 2003.

SATYAMURTY, P.; FERREIRA, C. C.; GAN, M. A. Cyclonic vortices over South America. **Tellus A**, v. 42, n. 1, p. 194-201, 1990.

SCHWARZKOPF, M. D.; FELLS, S. B. The simplified exchange method revisited: an accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 96, n. D5, p. 9075-9096, 1991.

SEILER, C.; ZWIERS, F.W.; HODGES, K.I.; SCINOCCA, J.F. How does dynamical downscaling affect model biases and future projections of explosive extratropical cyclones along North America's Atlantic coast? **Climate Dynamics**, v. 50, n. 1/2, p. 677-692, 2018.

SERREZE, M. C. Climatological aspects of cyclone development and decay in the Arctic. **Atmosphere-Ocean**, v. 33, n. 1, p. 1-23, 1995.

SINCLAIR, M. R. A climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 124, n. 2, p. 245-264, 1996.

SINCLAIR, M. R. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, n. 6, p. 1601-1619, 1995.

SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2239-2256, 1994.

SINCLAIR, M. R. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. **Weather and Forecasting**, v. 12, n. 3, p. 595-612, 1997.

SOUZA, C.R.G.; SOUZA, A.P.; HARARI, J. Long term analysis of meteorologicaloceanographic extreme events for the Baixada Santista region. In: NUNES L.; GRECO R.; MARENGO J. (Ed.) **Climate change in Santos**

Brazil: projections, impacts and adaptation options. [S.l.]: Springer, 2019. p. 97-134.

TALJAARD, J. J. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. In: KAROLY, D. J. (Ed.). **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston: American Meteorological Society, 1972. p. 139-213.

TARASOVA, T. A.; FOMIN, B. A. Solar radiation absorption due to water vapor: advanced broadband parameterizations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 1947–1951, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<1947:SRADTW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1947:SRADTW>2.0.CO;2).

TIEDTKE, M. The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model. In: WORKSHOP ON CONVECTION IN LARGE-SCALE MODELS, 1983. **Proceedings...** 1983.

ULBRICH, U.; LECKEBUSCH, G. C.; PINTO, J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 96, n. 1/2, p. 117-131, 2009.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A.L.; FIGUEROA, S.N.; BONATTI, J.P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C.A. The Brazilian Earth system model ocean–atmosphere (BESM-OA) version 2.5: evaluation of its CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, 2019.

VIEIRA, R.M.S.P.; ALVALÁ, R.C.S.; PONZONI, F.J.; FERRAZ NETO, S.; CANAVESI, V. **Mapa de uso e cobertura da terra do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 2010.

WEBSTER, S.; BROWN, A. R.; CAMERON, D. R.; JONES, P. C. Improvements to the representation of orography in the Met Office Unified Model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.129, p. 1989–2010, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1256/qj.02.133>.

WERNLI, H.; SCHWIERZ, C. Surface cyclones in the ERA-40 dataset (1958–2001). Part I: novel identification method and global climatology. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 63, n. 10, p. 2486-2507, 2006.

WHITTAKER, L. M.; HORN, L. H. Geographical and seasonal distribution of North American cyclogenesis, 1958–1977. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 11, p. 2312-2322, 1981.

WINTON, M. A reformulated three-layer sea ice model. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.17, p. 525–531, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/15200426\(2000\)017<0525:ARTLSI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200426(2000)017<0525:ARTLSI>2.0.CO;2).

XIA, L.; VON STORCH, H.; FESER, F.; WU, J.. A study of quasi-millennial extratropical winter cyclone activity over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 7/8, p. 2121-2138, 2016.

XUE, Y.; SELLERS, P.; KINTER, J.; SHUKLA, J. A simplified biosphere mModel for Global Climate Studies, *J. Climate*, 4, 345–364, [https://doi.org/10.1175/15200442\(1991\)004<0345:ASBMFG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200442(1991)004<0345:ASBMFG>2.0.CO;2), 1991.

ZANETTI, V. B., DE SOUSA JÚNIOR, W. C., HOSOKAWA, E. K. Vulnerability of Critical Infrastructure Under Climate Change Scenarios: The Case of Santos. In: **Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options**. Springer, Cham, 2019. p. 245-251.

ZHAO, Q., CARR, F. H. A prognostic cloud scheme for operational NWP models. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 8, p. 1931-1953, 1997.

ZOBLER, L. **A world soil file global climate modeling**. Washington: NASA, 1976. (NASA TM-32).

ZOLINA, O. GULEV, S. K. Improving the accuracy of mapping cyclone numbers and frequencies. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 3, p. 748-759, 2002.