



MARINHA DO BRASIL

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER
DE AQUINO

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS

BRUNO FRANCESCO FARINOLE DALL'ANTONIA

IMPACTOS DE EVENTOS *EL NIÑO*-OSCILAÇÃO SUL NA CONCENTRAÇÃO DE
GELO MARINHO EM ÁREAS DE OPERAÇÕES DA MARINHA DO BRASIL NA
ANTÁRTICA

Orientador: Rodrigo de Souza Barreto Mathias

Dall'Antonia, Bruno Francesco Farinole.

Impactos de Eventos El Niño-Oscilação Sul na Concentração de Gelo Marinho em Áreas de Operações da Marinha do Brasil na Antártica/ Bruno Francesco Farinole Dall'Antonia. – Rio de Janeiro: MB/CIAARA, 2022.

x, 80 f.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Rodrigo de Souza Barreto Mathias

Monografia – MB/CIAARA Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 75-80

1. Concentração de Gelo Marinho 2. *El Niño*-Oscilação Sul
3. OPERANTAR. I. Mathias, Rodrigo de Souza Barreto. II. Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, CIAARA, Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. III. Título.

IMPACTOS DE EVENTOS *EL NIÑO*-OSCILAÇÃO SUL NA CONCENTRAÇÃO DE
GELO MARINHO EM ÁREAS DE OPERAÇÕES DA MARINHA DO BRASIL NA
ANTÁRTICA

Bruno Francesco Farinole Dall'Antonia

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE E TÉCNICO DO
CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER
DE AQUINO DA MARINHA DO BRASIL (CIAARA/MB) COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
OFICIAL HIDRÓGRAFO.

Examinada por:

Capitão-Tenente (T) Rodrigo de Souza Barreto Mathias (Orientador)

Capitão de Fragata Daniel Peixoto de Carvalho

Professora Doutora Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

NITERÓI, RJ - BRASIL
OUTUBRO DE 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Alair e Victoria e à incansável paciência de ambos em comentarem e discutirem comigo as ideias, o desenvolvimento e os resultados deste trabalho. Faço ainda um merecido reconhecimento à inegável contribuição de vocês em minha vida acadêmica: primeiramente, por personificarem o meu modelo de pessoas dedicadas ao contínuo desenvolvimento pessoal profissional e de nossa família; em segundo lugar, pelo incentivo diuturno de ambos em minha aplicação nos estudos. Sem dúvidas, estes fatores não só me fizeram um indivíduo melhor, mas contribuíram no resultado deste trabalho.

Manifesto também minha profunda gratidão à minha namorada, amiga e parceira de todas as horas, Beatriz. Seu apoio constante, seus abraços compartilhados em meus momentos de cansaço e seus ouvidos atentos às minhas incontáveis reclamações e lamúrias, certamente me auxiliaram a transpassar as dificuldades do dia-a-dia com mais facilidade.

Ao meu orientador, expresso também meus mais sinceros agradecimentos pela incessante vontade e paciência em me auxiliar, em sanar minhas dúvidas e em revisar e corrigir meus escritos. Agradeço ainda pela confiança e autonomia que me foi conferida para desenvolver este trabalho, mas, sobretudo, reconheço e sou grato pela dedicação e pela disponibilidade do senhor em discutir o desenvolvimento e os resultados deste trabalho. Certamente, esta conjuntura propiciada pelo senhor contribuiu deveras não apenas com a construção do meu conhecimento sobre o tema em estudo, mas também com a consecução deste trabalho.

Ao meu amigo, Pedro Ainsworth, deixo meus agradecimentos pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho e pelos vários conselhos e conversas.

Meu reconhecimento ao Capitão de Mar e Guerra (RM1) Leonardo Mattos e ao Capitão de Mar e Guerra Walid, por despertarem minha curiosidade, interesse e paixão pelo continente antártico e todos os assuntos afetos a este.

Ao Capitão de Fragata Peixoto e a Dra. Ana Cristina pela honra e pelo prestígio de comporem a banca de avaliação deste trabalho.

Por fim, porém não menos importante, agradeço a Deus por tudo em minha vida.

IMPACTOS DE EVENTOS *EL NIÑO*-OSCILAÇÃO SUL NA CONCENTRAÇÃO DE
GELO MARINHO EM ÁREAS DE OPERAÇÕES DA MARINHA DO BRASIL NA
ANTÁRTICA

BRUNO FRANCESCO FARINOLE DALL'ANTONIA

Outubro/2022

Orientador: Rodrigo de Souza Barreto Mathias

Programa: Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais

Desde o descobrimento da Antártica em meados do século XIX até a atualidade, o comportamento da concentração do gelo marinho se mostrou uma problemática para a navegação, exploração e pesquisa nos oceanos e mares envolvendo o continente gelado. Os estudos realizados até os dias de hoje identificaram teleconexões importantes entre fenômenos de grande escala, como o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) e a cobertura de gelo marinho na Antártica. O presente trabalho tem por intuito ampliar os conhecimentos afetos ao ambiente antártico, examinando os impactos de eventos ENOS na concentração de gelo marinho sobre as áreas específicas de operações dos navios da Marinha do Brasil. Os resultados permitem concluir que a fase positiva do fenômeno (*El Niño*) está relacionada a anomalias positivas de concentração de gelo marinho nas áreas de interesse da OPERANTAR, podendo impactar o planejamento e a execução da operação. Durante o seu início, nos meses de outubro e novembro, as anomalias de gelo podem dificultar o acesso à Ilha Rei George e a realização de atividades no Mar de Weddell, Estreito de Gerlache e Estreito Antártico, e, no final da operação, no mês de março, pode haver a necessidade de antecipação do encerramento das atividades, sobretudo no Mar de Weddell e no Estreito de Bransfield.

Palavras-Chave: Concentração de gelo marinho. *El Niño*-Oscilação Sul. OPERANTAR

IMPACTS OF *EL NIÑO* SOUTHERN OSCILATION'S EVENTS ON THE SEA ICE
CONCENTRATION IN THE BRAZILIAN NAVY'S AREAS OF OPERATION IN
ANTARCTICA

BRUNO FRANCESCO FARINOLE DALL'ANTONIA

October/2022

Advisor: Rodrigo de Souza Barreto Mathias

Department: Hydrography Course for Officers

From the Antarctica's discovery in the 19th century until the present time, the sea ice concentration's behavior has proved to be a problem to the navigation, the exploration and even the survey in the oceans and seas involving the antarctic continent. The research developed up to the present days identified important teleconnections among large-scale phenomena, like the *El Niño* Southern Oscillation, and the sea ice cover in Antarctica. This thesis has the intention to enhance the knowledge related to the antarctic environment by examining the impacts of El Niño Southern Oscillation's events on the sea ice concentration, in the specific areas where the Brazilian Navy ships operate. The results of this study allowed to conclude the warm phase of this phenomenon (*El Niño*) is related to the positive anomalies on the sea ice concentration in the OPERANTAR's areas of interest, which can impact the planning and execution of this mission. During the beginning of the operation, in October and November, the sea-ice concentration anomalies can difficult not only the access to the King George Island, but also the development of activities and surveys in Weddell Sea and Gerlach and Antarctic straits. By the end of the OPERANTAR, during March, these sea-ice anomalies may cause the need to anticipate or even finish activities in the Antarctic Peninsula and vicinities, especially in the Weddell Sea and Bransfield Strait.

Key words: Sea Ice Concentration. *El Niño* Southern Oscillation. OPERANTAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estação Antártica Comandante Ferraz em (a) 1984 e (b) 2020.	14
Figura 2 - Navio Polar Almirante Maximiano (acima) e Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel.....	14
Figura 3 – Continente Antártico.	16
Figura 4 – Locais de interesse da OPERANTAR.....	17
Figura 5 - Modelo Tricelular da Circulação Geral da Atmosfera.....	18
Figura 6 – Perfil meridional do Modelo Tricelular da Circulação Geral da Atmosfera. É possível observar a formação da frente polar em torno de latitudes de 60°S.	18
Figura 7 – Distribuição de sistemas de pressão semipermanetes na Antártica.....	19
Figura 8 – Exposição ilustrativa (a) e por modelagem numérica (b) da Corrente Circumpolar Antártica.	21
Figura 9 – Ilustração da Corrente Costeira Antártica (em vermelho). O pontilhado refere-se à incerteza de localização desta corrente na porção ocidental do continente antártico.	21
Figura 10 – Ilustração da interação oceano-atmosfera na Célula de Walker durante a fase neutra do ENOS.	23
Figura 11 – Ilustração da circulação atmosférica resultante do <i>El Niño</i>	23
Figura 12 - Ilustração da circulação atmosférica resultante do <i>El Niño</i>	24
Figura 13 – Resultados obtidos a partir da análise trimestral dos dados de <i>El Niños</i> Canônicos durante o período de 1970 a 2005. A coluna da esquerda representa os campos de anomalia da TSM, e a coluna da direita representa a anomalia da velocidade do vento.	26
Figura 14 – Resultados obtidos a partir da análise trimestral dos dados de <i>El Niños Modoki</i> durante o período de 1970 a 2005. A coluna da esquerda representa os campos de anomalia da TSM, e a coluna da direita representa a anomalia da velocidade do vento.	27
Figura 15– Estações de medição da pressão atmosférica para o cálculo do IOS.	28
Figura 16 – Apresentação da divisão das regiões do Pacífico equatorial utilizadas para o monitoramento do ENOS.	29
Figura 17 - Média das extensões mínima (a) e máxima (b) da camada de gelo marinho antártico, para série temporal de 1981 a 2010, e a respectiva cobertura de gelo nos meses	

de fevereiro de 2022 e setembro de 2021.	33
Figura 18 - Posicionamento das Correntes de Jato Subtropical e Polar sobre o Oceano Pacífico e Atlântico Sul durante o <i>El Niño</i> , representados pelas linhas azuis. Anomalias da TSM indicadas pela paleta de cores.	35
Figura 19 - Alterações na circulação das componentes do sistema tricelular de circulação atmosférica, em decorrência do <i>El Niño</i>	36
Figura 20 – Pontos de interesse para a análise da concentração média mensal de gelo marinho.	40
Figura 21 – Índices ONI de cada mês.	41
Figura 22 - Médias da concentração de gelo marinho em fevereiro (a), março (b) e abril (c) (1981 a 2021).	45
Figura 23 – Variação média da concentração de gelo entre: fevereiro e março (a); e fevereiro e abril (b) (1981 a 2021).	45
Figura 24 - Médias da concentração de gelo em setembro (a), outubro (b) e novembro (c) (1981 a 2021).	46
Figura 25 - Variação média da concentração de gelo entre setembro e outubro (a) e entre setembro e novembro (b) (1981-2021).	47
Figura 26 – Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em setembro (1981-2021).	49
Figura 27 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em outubro (1981-2021).	50
Figura 28 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento <i>El Niño</i> (hachurado) em outubro (1981-2021).	52
Figura 29 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em novembro (1981-2021).	54
Figura 30 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento <i>El Niño</i> (hachurado) em novembro (1981-2021).	55
Figura 31 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em fevereiro (1981-2021).	58
Figura 32 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em março (1981-2021).	59
Figura 33 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da	

concentração em cada evento <i>El Niño</i> (hachurado) em março (1981-2021).....	60
Figura 34 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos <i>El Niño</i> (hachurado) em abril (1981-2021).	62
Figura 35 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento <i>El Niño</i> (hachurado) em abril (1981-2021).....	63
Figura 36 - Concentração média (linhas pretas) e respectivas anomalias médias da concentração de gelo durante eventos <i>La Niña</i> (hachurado) nos meses de outubro (a), novembro (b), março (c) e abril (d) (1981-2021).	65
Figura 37 – Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento <i>La Niña</i> (hachurado) em outubro (1981-2021).....	67
Figura 38 – Representação gráfica das correlações cruzadas entre índices ONI e a anomalia de gelo em cada ponto. O eixo das abscissas representa a defasagem temporal, em meses, do índice ONI com relação à concentração mensal. O eixo das ordenadas indica a magnitude da correlação.	72

LISTA DE ABREVIATURAS

AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CIRM	Comissão Interministerial para os Recursos do Mar
CCA	Corrente Circumpolar Antártica
ENOS	<i>El Niño</i> - Oscilação Sul
EACF	Estação Antártica Comandante Ferraz
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ERA5	<i>ECMWF Atmospheric ReAnalysis</i> – 5 ^a Geração
ERSSTv5	<i>Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (SST) Version 5</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
IOS	Índice de Oscilação Sul
ICOADS	<i>International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set</i>
MEI	<i>Multivariate Enso Index Version</i>
NOAA	<i>National Oceanographic and Atmospheric Administration</i>
ONI	<i>Ocean Niño Index</i>
OLR	<i>Outgoing Longwave Radiation</i>
OPERANTAR	Operação Antártica
PROANTAR	Programa Antártico Brasileiro
STA	Sistema do Tratado Antártico
TSM	Temperatura na Superfície do Mar

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1.	<i>Ambiente Antártico</i>	16
2.1.1.	Circulação Atmosférica	17
2.1.2.	Circulação Oceânica	20
2.2.	<i>El Niño/ Oscilação Sul (ENOS)</i>	22
2.2.1.	Tipos de <i>El Niño</i>	24
2.2.1.1.	<i>El Niño Canônico</i>	25
2.2.1.2.	<i>El Niño Modoki (ou do Pacífico Central)</i>	26
2.2.2.	Índices de Monitoramento	27
2.2.2.1.	<i>Índice de Oscilação Sul</i>	28
2.2.2.2.	<i>Índice Niño 1+2</i>	29
2.2.2.3.	<i>Índice Niño 3</i>	29
2.2.2.4.	<i>Índice Niño 3.4</i>	30
2.2.2.5.	<i>Índice Niño 4</i>	30
2.2.2.6.	<i>Ocean Niño Index (ONI)</i>	30
2.2.2.7.	<i>Outgoing Longwave Radiation (OLR)</i>	31
2.2.2.8.	<i>Multivariate Enso Index Version 2 (MEI.v2)</i>	31
2.3.	ENOS e Teleconexões Atmosféricas.....	31
2.4.	<i>Gelo Marinho</i>	32
2.5.	<i>ENOS as Anomalias de Gelo Marinho</i>	34
3.	OBJETIVOS.....	38
4.	DADOS E METODOLOGIA	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1.	<i>Climatologia da concentração de gelo marinho</i>	44

	12
5.2. <i>Anomalia da concentração de gelo - Eventos El Niño</i>	47
5.3. <i>Anomalia da concentração de gelo - Eventos La Niña</i>	65
5.4. <i>Correlações entre ONI e anomalias de gelo</i>	70
6. CONCLUSÃO.....	74
7. BIBLIOGRAFIA.....	77

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O continente antártico foi palco, desde seu descobrimento em meados do século XIX, de atritos diplomáticos, de indômitos anseios territorialistas e da exploração de recursos naturais (MATTOS, 2015; MATTOS, 2016). O firmamento do Tratado Antártico, em 1959, todavia, alterou diametralmente todo o paradigma geopolítico e diplomático atrelado à Antártica até aquele momento. A ascensão de uma cooperação e gestão territorial de caráter multipolar e internacional incorreu não apenas na desmilitarização e desarmamento do continente, mas na ocupação deste com a finalidade exclusiva da promoção do trabalho, da pesquisa da comunidade científica internacional e da preocupação com a conservação dos recursos naturais antárticos (CIRM, 2016).

Durante o transcurso dos anos, após a assinatura das tratativas firmadas na Convenção de Washington de 1959, observou-se a adesão de inúmeros Estados ao Sistema do Tratado Antártico (STA). Dentre estes, o Brasil, país sem vínculos históricos com o continente, mas influenciado pelas condições meteorológicas e oceanográficas da região. A discreta inserção brasileira ocorreu ao longo da década de 1970 e pautou-se essencialmente pela ratificação da tratativa acordada em 1959. Esta afiliação, todavia, tomou novos rumos a partir da década de 1980, quando o governo brasileiro criou o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).

A consecução do PROANTAR não serviu apenas como ferramenta para a política externa brasileira (ao garantir o status de Membro Consultivo no processo decisório do STA), mas formalizou e fomentou o desenvolvimento científico brasileiro no continente gelado (CIRM, 2016). A execução do Programa Antártico se fez possível através do estabelecimento, também em 1982, da Operação Antártica (OPERANTAR). A OPERANTAR passou a se suceder anualmente nos meses de verão do hemisfério sul, contando, a partir de 1984, com o estabelecimento de uma base brasileira permanente na Ilha Rei George, a Estação Antártica Comandante Ferraz – EACF (Figura 1). A partir de 1985, um contingente permanente passou a habitar a estação antártica.

Figura 1 - Estação Antártica Comandante Ferraz em (a) 1984 e (b) 2020.



Fonte: CIRM (2016).

O desenvolvimento do PROANTAR e da OPERANTAR se mantém de maneira descentralizada e com a colaboração multi-institucional, através da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM). A CIRM é composta por diferentes Ministérios do Poder Executivo brasileiro, sendo presidida pelo Comandante da Marinha e assessorada pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SeCIRM). Cabe ainda à Marinha a execução logística da OPERANTAR, desenvolvida através da disponibilização de meios navais e de pessoal, os quais assumem papel fundamental na consecução das pesquisas científicas brasileiras e no apoio à EACF. Atualmente, a Marinha do Brasil executa o apoio logístico por meio de 2 navios, o Navio Polar Almirante Maximiano e o Navio de Apoio Oceanográfico “Ary Rongel” (Figura 2).

Figura 2 - Navio Polar Almirante Maximiano (acima) e Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel.



Fonte: BRASIL (2020)

O planejamento logístico para cada OPERANTAR é realizado anualmente, contando com o apoio dos diversos Órgãos e instituições vinculadas à CIRM na

adequação, viabilização e inserção dos projetos científicos em cada uma das fases de pesquisa da operação. Em que pese o criterioso e cuidadoso planejamento, a execução logística de cada OPERANTAR é dependente direta das condições atmosféricas e oceânicas das altas latitudes, como a passagem de ciclones, a ocorrência de ventos fortes e agitação marítima no Estreito de Drake e a presença de campos de gelo marinho.

Esta dependência às variabilidades e às anomalias atmosféricas e oceânicas é exemplificada pelo ocorrido no início da OPERANTAR XXXIV, em outubro de 2015. À época, a presença incomum de gelo marinho se estendendo desde o continente antártico até o sul do Estreito de Drake, passando pela Ilha Rei George, onde se localiza a EACF, postergou a primeira travessia dos navios brasileiros pelo Estreito de Drake (CARDOSO, 2019). Esta anomalia de gelo marinho ocasionou um atraso de 15 dias no início efetivo da operação em território antártico, acarretando não somente em custos adicionais ao erário, mas no cancelamento de muitas pesquisas científicas e na alteração do cronograma planejado para aquela OPERANTAR (CARDOSO *et al.*, 2016).

Estas anomalias ambientais que ocorrem no ambiente antártico, todavia, não se devem tão somente às condições locais. De fato, alterações nos padrões climáticos em áreas remotas também influem nas condições atmosféricas e oceânicas da Antártica (CARDOSO, 2019). Exemplos destas interconexões demonstram-se principalmente em estudos prévios que apontam para a existência de teleconexões entre eventos *El Niño-Oscilação Sul* (ENOS) e anomalias na Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e na cobertura de gelo marinho da Antártica (YUAN, 2004; LIU *et al.*, 2004; DASH *et al.*, 2012; CARRASCO, 2018).

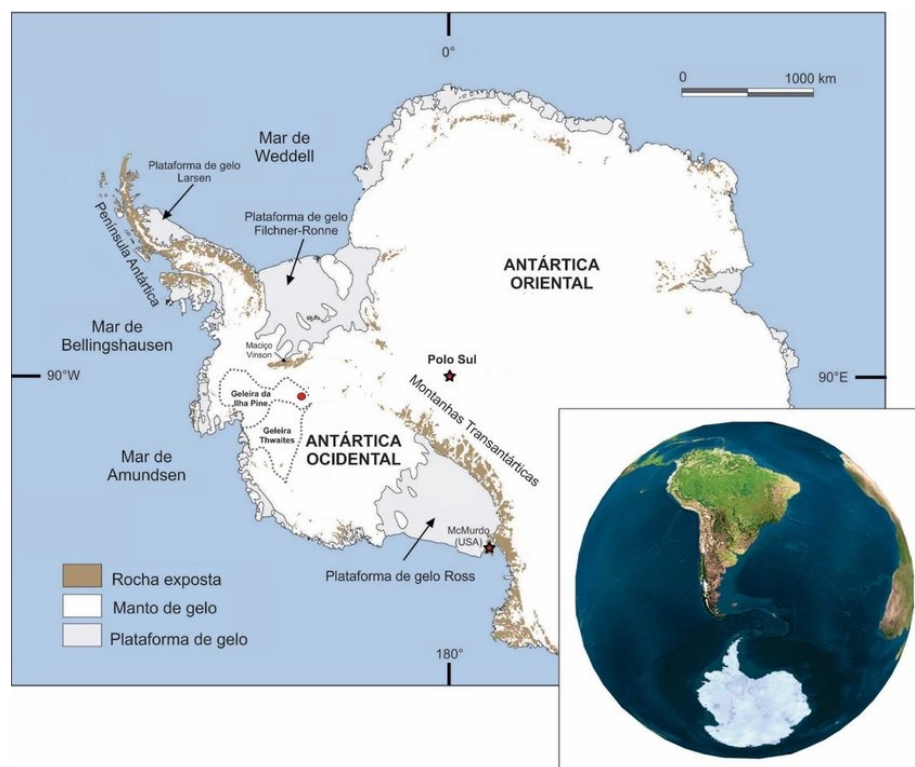
A evidente interconectividade entre fenômenos remotos e as condições ambientais antárticas remetem à necessidade da melhor compreensão e do consequente estudo destas relações, de maneira a facilitar os próximos planejamentos da OPERANTAR e a mitigar novos percalços logístico-operativos. Especial atenção se denota ao necessário aprofundamento do conhecimento das citadas teleconexões entre ENOS e gelo marinho e da influência destas sobre a região de atuação do PROANTAR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ambiente Antártico

O Continente Antártico (Figura 3) é reconhecido pela sua grande importância na manutenção do balanço energético do planeta e das circulações atmosférica e oceânica. Mais especificamente, a Antártica possui papel fundamental na regulação climática da América do Sul, denotado, principalmente, pela influência das massas de ar polares sobre este continente (BRASIL, 2006). Além da posição austral do continente gelado, fatores como a extensão geográfica, a característica altimétrica de seu relevo e o elevado albedo de sua superfície (decorrente de cobertura de gelo e neve) corroboram ainda mais para o caráter regulatório que a Antártica possui sobre o Hemisfério Sul (CARDOSO, 2019).

Figura 3 – Continente Antártico.

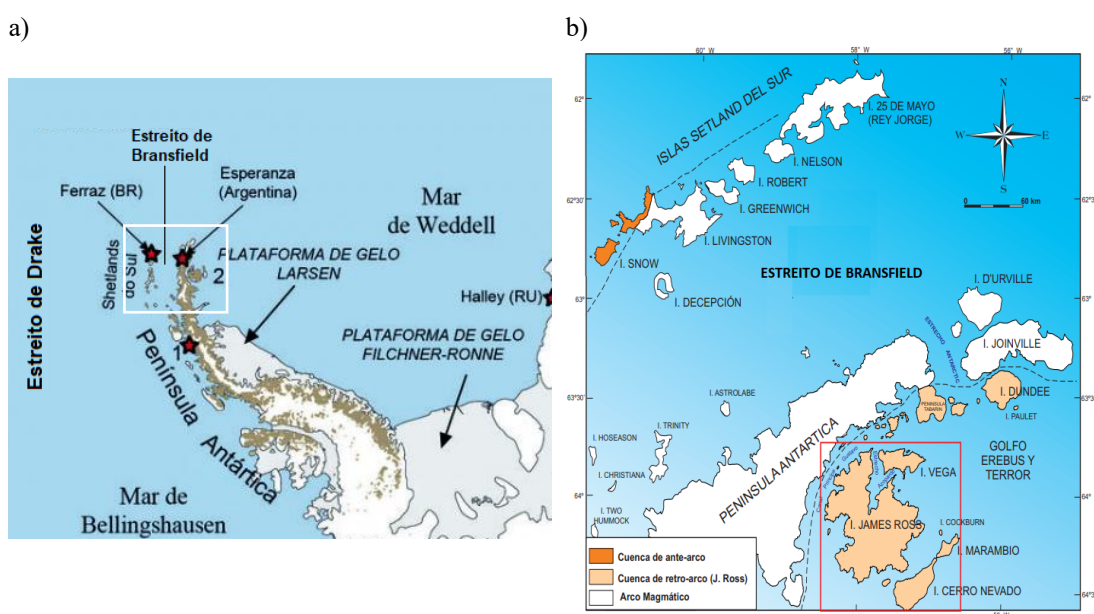


Fonte: adaptada de Simões (2011).

A grande extensão desse continente não será, todavia, abordada em sua completude por este trabalho. Dada a vastidão de aspectos que permeiam as interações da

Antártica com a atmosfera global, será apresentada uma exposição mais geral da circulação atmosférica e do oceano, buscando focar, sempre que possível, sobre as localidades correlatas à área de atuação da OPERANTAR. Dentre elas, destacam-se o Arquipélago das Ilhas Shetland do Sul, a Península Antártica, caracterizada por uma extensa cordilheira e pela intensa variabilidade meteorológica incidente, e os mares adjacentes, como o Estreito de Drake, o Estreito de Bransfield, o Mar de Weddell, e o Mar de Bellingshausen (Figura 4) (BRASIL, 2006; CARDOSO, 2019).

Figura 4 – Locais de interesse da OPERANTAR.



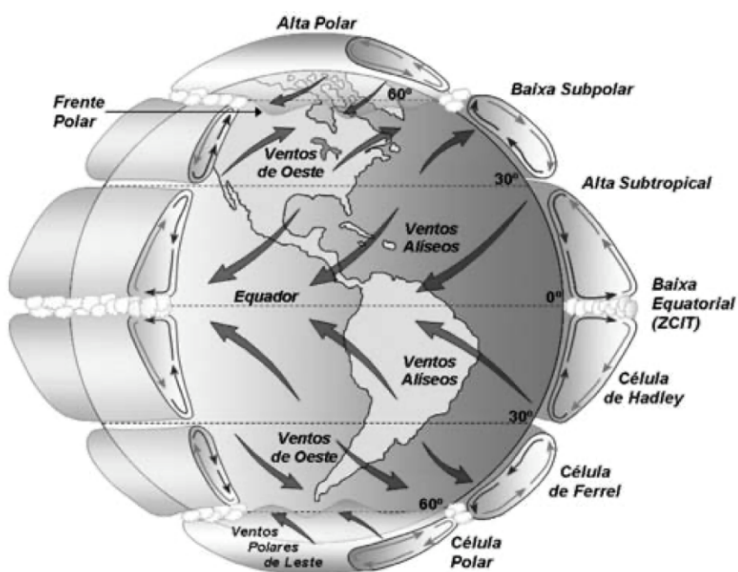
Fonte: a) CIRM (2022) e b) Adaptado de Marensi *et al* (2012).

2.1.1. Circulação Atmosférica

O deslocamento de massas de ar sobre o ambiente antártico é influenciado de diversas formas pelas estruturas atmosféricas descritas no sistema tricelular da circulação geral da atmosfera, sobretudo a célula polar e a célula de Ferrel (Figura 5). A posição geográfica da Antártica coincide com o ramo descendente da célula polar que atua sobre o continente, de tal forma que é possível observar um centro de alta pressão permanente sobre o platô antártico. O ar frio e seco, originário desta região de forte subsidência, flui na direção de regiões com menores pressões assumindo direção predominante de quadrante Leste, devido à influência da força aparente de Coriolis sobre o movimento (TURNER; PENDLEBURY, 2004).

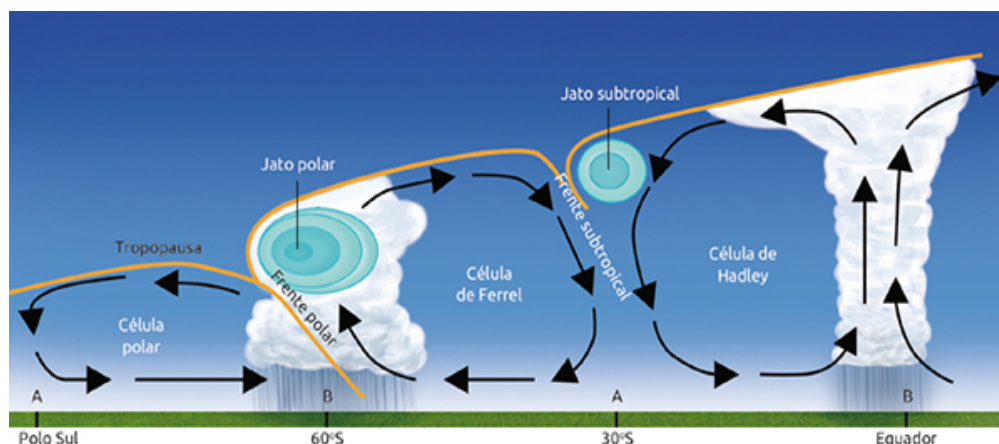
Estes ventos de Leste provenientes do continente convergem com os ventos predominantes de Oeste nas latitudes próximas a 60°S. A interação entre os ventos polares continentais e aqueles decorrentes da circulação na célula de Ferrel, mais quentes e úmidos, sobre os oceanos adjacentes ao continente antártico, leva à formação de um cinturão de baixas pressões com intensos contrastes de temperatura, denominada frente polar, a qual é altamente ciclogênica (TURNER; PENDLEBURY, 2004; MIGUENS, 2000) (Figura 6).

Figura 5 - Modelo Tricelular da Circulação Geral da Atmosfera.



Fonte: Martins *et al.* (2008).

Figura 6 – Perfil meridional do Modelo Tricelular da Circulação Geral da Atmosfera. É possível observar a formação da frente polar em torno de latitudes de 60°S.



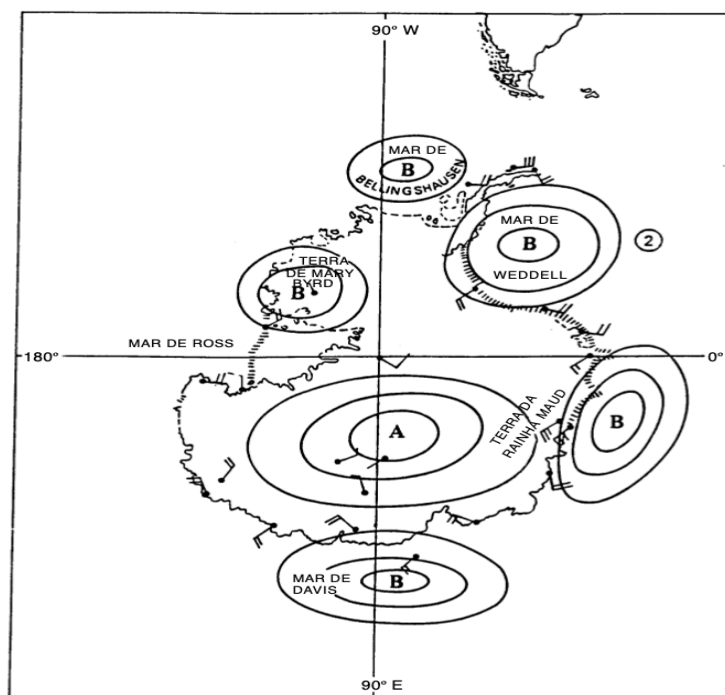
Fonte: Ynoue *et al.* (2017).

A região da frente polar origina a maioria dos ciclones atuantes no entorno das Ilhas Shetland do Sul, os quais têm a tendência de deslocamento para Leste, pois são transportados pelos ventos predominantes de Oeste na região. Os sistemas de baixa pressão também podem assumir movimento para Sudeste, quando já menos intensos, em direção às regiões de baixas pressões semipermanentes do cinturão (Figura 7) (MIGUENS, 2000).

As baixas geradas na região da frente polar também têm sua direção de deslocamento afetada fortemente pelas características morfológicas e altimétricas do continente antártico. Por este motivo, é possível observar o deslocamento das baixas e das massas de ar sobre as imediações do Estreito de Drake e da Península com componente Nordeste (TURNER; PENDLEBURY, 2004; MIGUENS, 2000).

Miguens (2000) explicita ainda a correlação entre frente polar e o limite do gelo marinho. Segundo o autor, anomalias positivas na camada de gelo resultam do deslocamento da região de maior vorticidade negativa e mais ciclogênética em direção a menores latitudes, acompanhando o limite exterior do gelo marinho (onde se percebem os maiores gradientes de temperatura).

Figura 7 – Distribuição de sistemas de pressão semipermanentes na Antártica.



Fonte: Miguens (2000)

2.1.2. Circulação Oceânica

A circulação dos oceanos ao redor do continente antártico é regida, essencialmente, pela ação de duas correntes: a Corrente Circumpolar Antártica e a Corrente Costeira Antártica. Ambas são influenciadas diretamente tanto pelas características morfológicas do fundo oceânico adjacente, quanto pelos padrões da circulação atmosférica nestas latitudes (BRASIL, 2006; TURNER; PENDLEBURY, 2004).

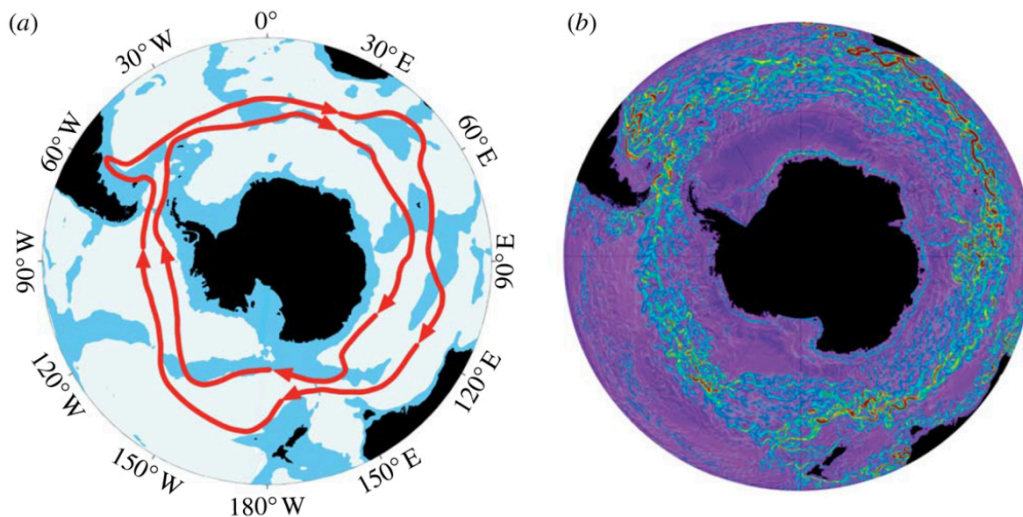
A Corrente Circumpolar Antártica (CCA) é uma das mais importantes correntes para a manutenção da climatologia do globo (THOMPSON, 2022), conectando os Oceanos Atlântico, Índico e Pacífico ao longo de seu giro no sentido Oeste-Leste. Seu fluxo, considerado intenso quando comparado a outras correntes do planeta, adquire ainda mais velocidade transitando sobre pontos de “estrangulamento geográfico”, como região do Estreito de Drake (BRASIL, 2006).

Outra característica importante a respeito do fluxo da CCA diz respeito ao seu comportamento similar a um conjunto de jatos de corrente (BRASIL, 2006; THOMPSON *et al.*, 2018; THOMPSON, 2022). Estes jatos seguem um padrão geral quase uniforme ao longo do giro da corrente, no entanto, podem apresentar comportamentos pontuais distintos, quando observadas variações zonais e meridionais da densidade da água (BRASIL, 2006). Tal fato, pode ser evidenciado através da Figura 8, em que se observa as Frentes Polar e Subantártica, componentes da CCA, e os comportamentos distintos de ambas nas proximidades do Estreito de Drake.

A Corrente Costeira Antártica (Figura 9), ou Deriva do Vento Oeste (MIGUENS, 2000), por sua vez, evidencia-se por sua menor intensidade e por seu giro no sentido Leste-Oeste, decorrente não apenas da influência do regime costeiro de ventos baixas com a topografia submarina e com a posição da plataforma continental, mas também da interação entre o núcleo de alta pressão e o cinturão de (BRASIL, 2006; MIGUENS, 2000; TURNER; PENDLEBURY, 2004). Diferentemente, da CCA, a Corrente Costeira não é totalmente circumpolar, uma vez que características geográficas do continente geram descontinuidades em seu fluxo.

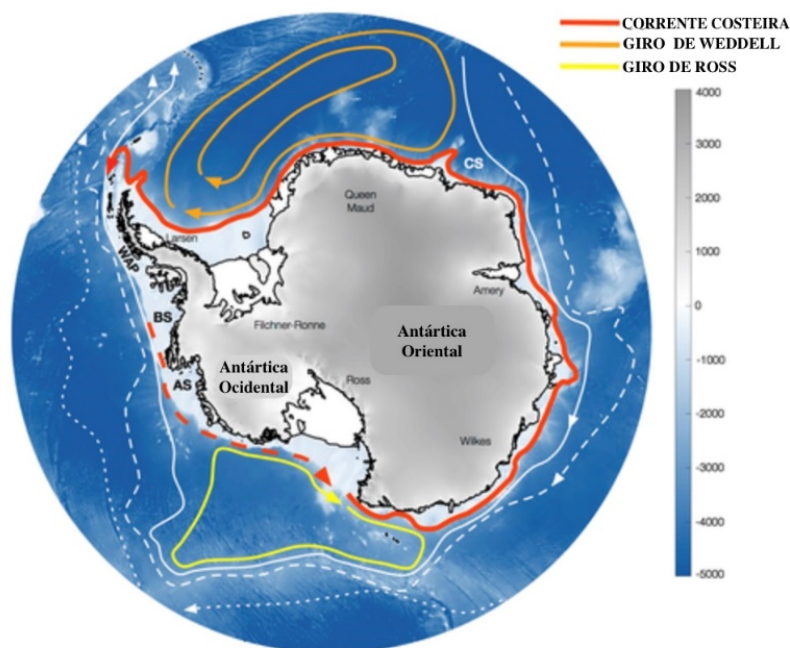
Figura 8 – Exposição ilustrativa (a) e por modelagem numérica (b) da Corrente Circumpolar Antártica.

Em (a) as setas vermelhas mais externa e mais interna representam respectivamente as Frentes Subantártica e Polar da CCA, enquanto as áreas em azul representam as regiões com profundidades inferiores a 3,5 quilômetros. Em (b) a escala de cores representa a intensidade da CCA, estando os maiores valores atrelados às cores mais quentes.



Fonte: Thompson (2022).

Figura 9 – Ilustração da Corrente Costeira Antártica (em vermelho). O pontilhado refere-se à incerteza de localização desta corrente na porção ocidental do continente antártico.



Fonte: Adaptado de Thompson *et al.* (2018)

Autores como Miguens (2000) elencam ainda a ocorrência de muitas correntes locais e regionais ao longo da costa antártica. Dentre estas há de se destacar o Giro de Weddell, cuja circulação no sentido horário ao longo da porção leste da Península

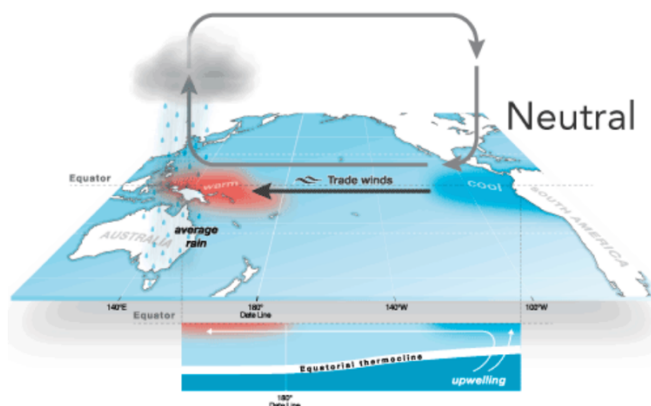
Antártica carrega águas mais frias advindas das geleiras ao sul do Mar de Weddell, contribuindo para a formação de gelo marinho na região (MIGUENS, 2000; THOMPSON *et al.*, 2018). Outras correntes locais/pontuais têm sua existência elencada, todavia a ausência de dados suficientes impossibilita especificar com exatidão a influência destas correntes sobre a área de estudo a que este trabalho se dedicará.

2.2. *El Niño/ Oscilação Sul (ENOS)*

O ENOS é compreendido qualitativamente como o fenômeno decorrente das interações entre atmosfera e oceano, caracterizado por flutuações de temperatura na superfície do mar (TSM) na porção centro-leste equatorial do Oceano Pacífico, acompanhadas de perturbações na atmosfera (WMO, 2014). As anomalias de temperatura observadas no oceano descrevem o processo “*El Niño*” (e seu antônimo “*La Niña*”). As variações atmosféricas, evidenciadas sobretudo por meio das flutuações da pressão atmosférica próximas à superfície, são denominadas “Oscilação Sul”.

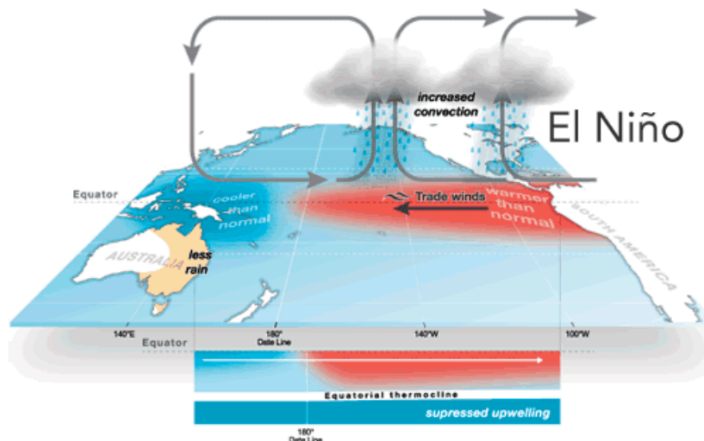
O “*El Niño-Oscilação Sul*” possui 3 fases distintas: *El Niño*; *La Niña*; e a fase neutra. A neutralidade do ENOS é caracterizada pela interação oceano-atmosfera que descreve a Célula de Walker (Figura 10). O *El Niño*, por sua vez, ocorre a partir do aquecimento em grande escala da água em superfície e subsuperfície na região centro-leste equatorial do Oceano Pacífico e do conseqüente enfraquecimento dos ventos alísios. Acompanham-se a este aquecimento as mudanças no campo de pressões ao longo do Pacífico tropical, as quais caracterizam a fase negativa da Oscilação Sul. Percebe-se, pois, o estabelecimento de uma região de alta pressão sobre a porção oeste deste oceano e de baixa pressão sobre a área centro-leste do Pacífico (WMO, 2014). Estas permutações do campo de pressões atmosféricas e da temperatura do oceano alteram os padrões de circulação atmosférica em baixos e altos níveis, modificando a Célula de Walker conforme exposto na Figura 11.

Figura 10 – Ilustração da interação oceano-atmosfera na Célula de Walker durante a fase neutra do ENOS.



Fonte: Australia (2022).

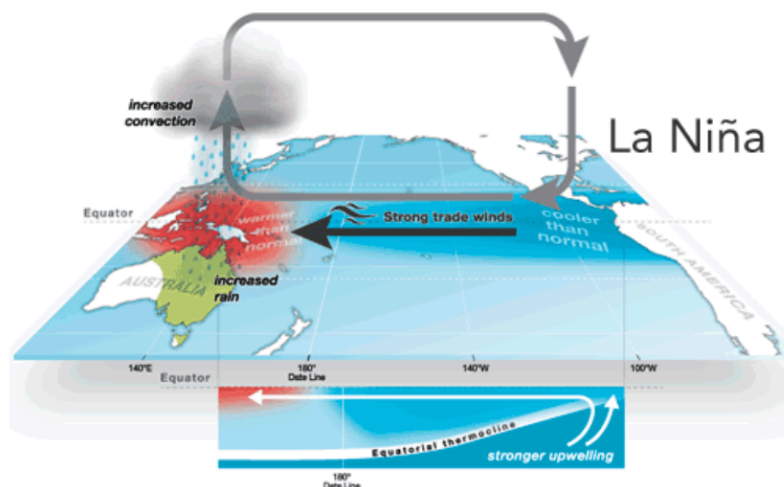
Figura 11 – Ilustração da circulação atmosférica resultante do *El Niño*.



Fonte: Australia (2022)

A ocorrência da *La Niña* é o oposto do *El Niño* no ciclo ENOS. Nesta fase, evidencia-se o inverso do descrito anteriormente: um resfriamento da mesma área oceânica do Oceano Pacífico equatorial, intensificando os ventos alísios da região. Esta anomalia é observada também nos campos de pressão atmosférica sobre o Oceano Pacífico Tropical, os quais apresentam uma amplificação das zonas de alta pressão sobre a região centro-leste do oceano, e de baixa pressão sobre a porção oeste do oceano (WMO, 2014). Estas variações geram, por consequência, uma intensificação da Célula de Walker, conforme apresenta a Figura 12.

Figura 12 - Ilustração da circulação atmosférica resultante do *El Niño*.



Fonte: Australia (2022).

Em que pese a descrição qualitativa do ENOS ser amplamente difundida, a descrição quantitativa dos parâmetros que caracterizam este fenômeno não é igualmente aceita por toda a comunidade científica. Trenberth (1997), por exemplo, sugere a caracterização do fenômeno a partir da observação de anomalias médias quinquentrais da TSM da região *Niño* 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W) iguais ou superiores a +0,4°C (ou iguais e inferiores a -0,4°C) ao longo de 6 meses consecutivos ou mais. Já a *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA) considera o início de um episódio do fenômeno ENOS com a observação de anomalias médias trimestrais da TSM da região *Niño* 3.4 superiores a +0,5°C (ou inferiores a -0,5°C) ao longo de 5 meses consecutivos (CPC, 2012; IRI, [2022]). Tais índices de monitoramento do ENOS serão abordados posteriormente.

2.2.1. Tipos de *El Niño*

Ao longo das últimas décadas de pesquisas acerca do fenômeno ENOS, a comunidade científica observou que cada *El Niño* obedecia a comportamentos diferentes, de acordo com os padrões de desenvolvimento das anomalias de temperatura da superfície do Oceano (KUG *et al.*, 2009). A análise temporal dos dados relativos ao ENOS permitiu descrever e classificar os fenômenos *El Niño* em duas tipificações básicas: Canônico e Modoki. Suas ocorrências são verificadas de acordo com a intensidade e a abrangência

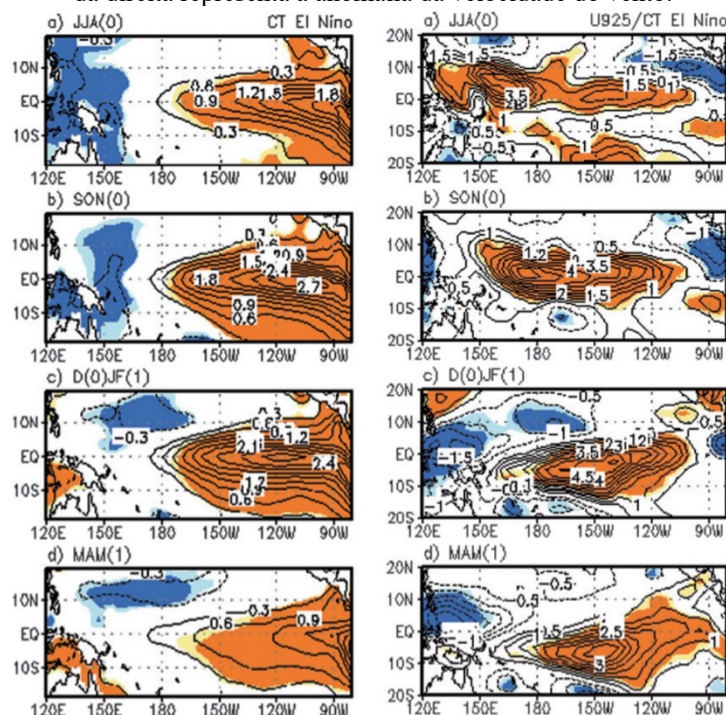
das anomalias da TSM. Estas alterações, no entanto, impactam a circulação atmosférica de modo diferenciado, conforme será exposto a seguir.

2.2.1.1. *El Niño Canônico*

O *El Niño* Canônico representa o tipo mais convencional do ENOS, correspondendo também àqueles casos de maior intensidade. Nestes episódios, verifica-se a ocorrência de maiores anomalias de TSM na região leste do Pacífico. A extensão deste campo de anomalias se amplia também para a região central deste oceano, ao longo do desenvolvimento destes eventos (KUG *et al.*, 2009).

Este padrão de anomalias da temperatura na superfície do mar induz alterações no campo de pressão atmosférica ao nível do mar, ocasionando anomalias negativas na porção centro-leste do Pacífico, enquanto a porção oeste deste oceano assume anomalias positivas. Essas alterações nos campos de pressões e na temperatura do oceano levam a anomalias nos campos de ventos zonais (Figura 13). A inversão das pressões nos extremos leste e oeste do Pacífico, concomitante à anomalia positiva da TSM em região anteriormente com disponibilidade de água fria, gera condições propícias para o desenvolvimento de ventos de Oeste, opostos ao sentido normal dos ventos alísios da região. Dependendo da intensidade das anomalias de pressão, estes ventos podem ultrapassar ou não a velocidade dos alísios, gerando resultantes de Leste com menor intensidade ou até no sentido contrário ao campo normal de alísios. Em ambos os casos, as perturbações alteram tanto o nível do mar no Pacífico como a circulação atmosférica preconizada por Walker, gerando o empilhamento de água e centros convectivos nas porções centro-leste do Pacífico (KUG *et al.*, 2009; IRI, [2022]).

Figura 13 – Resultados obtidos a partir da análise trimestral dos dados de *El Niños* Canônicos durante o período de 1970 a 2005. A coluna da esquerda representa os campos de anomalia da TSM, e a coluna da direita representa a anomalia da velocidade do vento.



Fonte: KUG *et al.* (2009)

2.2.1.2. *El Niño Modoki (ou do Pacífico Central)*

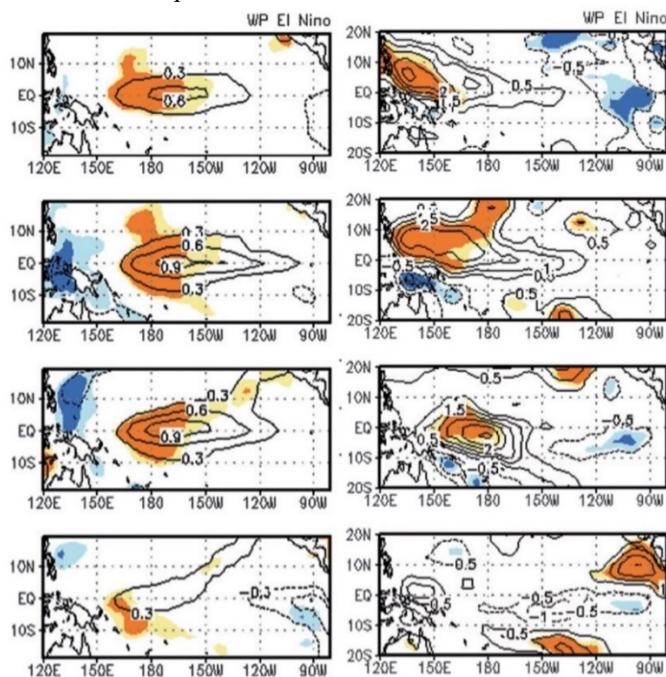
Essa classificação de *El Niño* corresponde a fenômenos de menor intensidade dentro do ciclo ENOS, cuja ocorrência só passou a receber atenção a partir da década de 1990. O desenvolvimento do tipo Modoki é caracterizado pelo aquecimento da água de superfície e subsuperfície essencialmente na porção central do Pacífico (Figura 14), com um gradiente inferior ao observado no Canônico (KUG *et al.* 2009).

Esta diferença tanto na intensidade quanto na abrangência da anomalia da TSM resulta em resposta de menor intensidade por parte da atmosfera. A variabilidade do campo de pressão, por exemplo, é observada predominantemente sobre a parte central do Pacífico, onde ocorrem anomalias negativas.

Igualmente, alterações no campo de vento (Figura 14) sobre a região apresentam menor intensidade, quando comparadas com o *El Niño* Canônico. As menores variações da TSM e do campo de pressões resultam em um enfraquecimento não tão intenso da Célula de Walker, de tal forma que anomalias positivas do vento zonal são notadas,

essencialmente, na porção oeste do oceano. Na porção leste, pequenas regiões surgem com anomalias negativas do vento zonal, contrárias aos ventos alísios (KUG *et al.*, 2009).

Figura 14 – Resultados obtidos a partir da análise trimestral dos dados de *El Niños Modoki* durante o período de 1970 a 2005. A coluna da esquerda representa os campos de anomalia da TSM, e a coluna da direita representa a anomalia da velocidade do vento.



Fonte: KUG *et al.* (2009)

2.2.2. Índices de Monitoramento

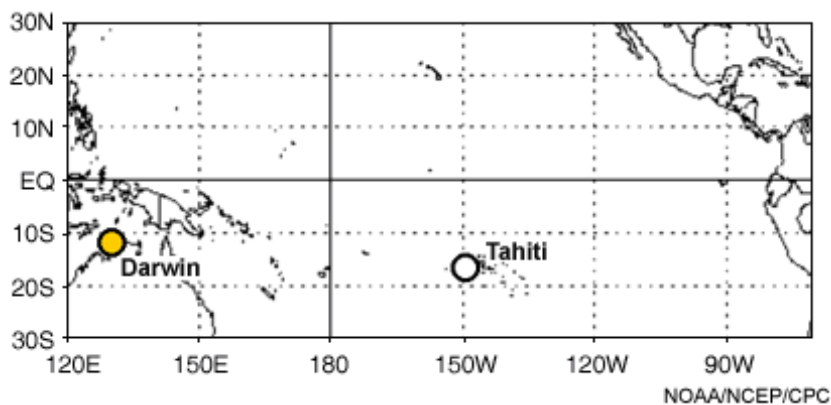
Ao longo do desenvolvimento dos estudos acerca do ENOS, a comunidade científica buscou estabelecer padrões e critérios que pudessem auxiliá-la não apenas a observar a ocorrência de um *El Niño/La Niña*, mas também a quantificar a intensidade destes fenômenos e a prever o seu desenvolvimento.

Desta forma, alguns índices são adotados por pesquisadores e centros de monitoramento para auxiliar nessas demandas. Parâmetros distintos são adotados, ou até mesmo a combinação de diferentes métricas, de forma a analisar o aspecto multifacetado do ENOS através de critérios mais objetivos (BARNSTON, 2021). A seguir serão elencados os principais indicadores.

2.2.2.1. Índice de Oscilação Sul

O Índice de Oscilação Sul (IOS), é o índice mais antigo existente para medição e avaliação do *El Niño*-Oscilação Sul. Este índice se baseia na avaliação da diferença da pressão atmosférica ao nível do mar em dois locais do globo diretamente influenciados pela célula de Walker, a cidade australiana de Darwin e a Ilha do Tahiti no Pacífico central (Figura 15). Devido ao histórico de dados coletados em ambas estações datando desde 1860, o IOS é um bom indicador em uma avaliação climática do ENOS (BARNSTON, 2021).

Figura 15– Estações de medição da pressão atmosférica para o cálculo do IOS.



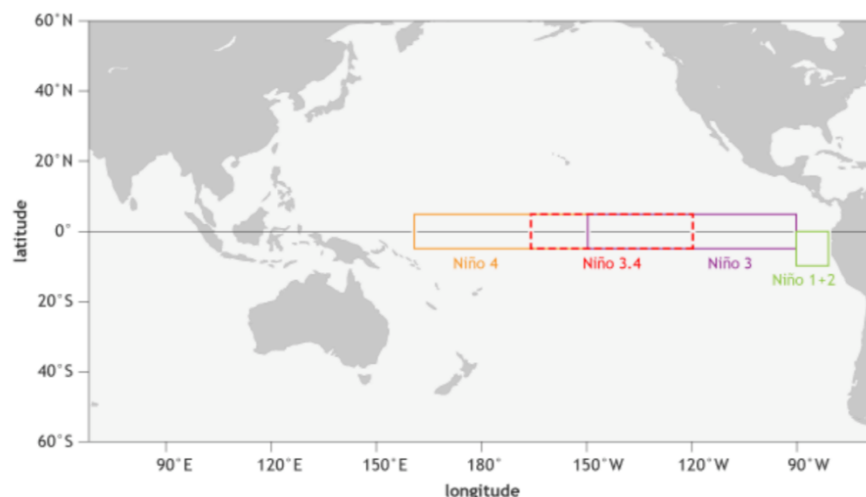
Fonte: PSL (2022).

A partir da variação da pressão nestes locais é possível verificar qual o tipo de comportamento que a Oscilação Sul está apresentando. Por exemplo, quando, por longos períodos, as estações do Tahiti e de Darwin medem, concomitantemente, pressões abaixo e acima da média, respectivamente, o IOS adotará valores negativos, representando a fase de *El Niño* do ENOS.

Apesar da representatividade histórica, este indicador apresenta dois fatores que podem prejudicar os valores e sua assertividade quanto ao fenômeno ENOS, ambos relacionados aos pontos de coleta de dados. O primeiro é o índice estar baseado em apenas duas estações. Este fato pode fazer com que variações regionais e sazonais sejam confundidas com a variabilidade interanual característica do “*El Niño*- Oscilação Sul”. O segundo fator refere-se à distância latitudinal de ambas as estações, mais ao sul, em relação ao eixo normal de ocorrência do ENOS, nas proximidades do Equador (BARNSTON, 2021).

Os índices a seguir se referem à identificação de anomalias de temperatura nas áreas apresentadas na Figura 16, conforme descrito por Souza e Reboita (2021).

Figura 16 – Apresentação da divisão das regiões do Pacífico equatorial utilizadas para o monitoramento do ENOS.



Fonte: PSL (2022)

2.2.2.2. Índice Niño 1+2

A região Niño 1 + 2 (0-10S, 090W-080W) é a menor e mais oriental das regiões avaliadas, e corresponde à região costeira da América do Sul, onde *El Niño* foi reconhecido pela primeira vez pela população local. Este índice tende a ter a maior variabilidade dos índices *Niño* devido à sua pequena abrangência e à grande disparidade das anomalias entre as fases positivas e negativas.

2.2.2.3. Índice Niño 3

Esta região (5N-5S, 150W-090W) já foi o foco principal do monitoramento do *El Niño*, mas percebeu-se mais tarde que a principal região para as interações oceano-atmosfera acopladas no ENOS fica mais a oeste (Trenberth, 1997). Conseqüentemente, os próximos índices a serem apresentados (o *Niño* 3.4 e o ONI) se tornaram os mais adequados para definir os eventos *El Niño* e *La Niña*.

2.2.2.4. Índice Niño 3.4

As anomalias na região *Niño* 3.4 (5N-5S, 170W-120W) podem ser consideradas como representantes da anomalia de TSM do Pacífico equatorial. O índice *Niño* 3.4 é calculado como uma média das anomalias de 5 meses consecutivos, e os eventos *El Niño* ou *La Niña* são definidos quando as TSM excedem +/- 0,4°C por um período de seis meses ou mais.

2.2.2.5. Índice Niño 4

O índice *Niño* 4 (5N-5S, 160E-150W) captura anomalias de TSM no Pacífico equatorial central. Esta região tende a ter a menor variabilidade dentre as outras regiões *Niño*.

2.2.2.6. Ocean Niño Index (ONI)

O ONI é o resultado da evolução do entendimento sobre o ENOS. Este índice se baseia no acompanhamento das anomalias de TSM no Pacífico Equatorial, na mesma área do *Niño* 3.4. Estudos e análises de séries históricas demonstraram que esta área é a mais afetada por anomalias de TSM relativas ao ENOS, sendo, portanto, a mais representativa (BARNSTON *et al.*, 1997).

O cálculo do ONI é feito por meio da média trimestral das anomalias da TSM registradas na área de “*Niño* 3.4”. As anomalias iguais ou superiores a 0,5°C, observadas por períodos maiores ou iguais a 5 meses, são identificadas como ocorrência de *El Niño*. A grande disponibilidade de dados da região que é analisada atribui a este índice significativa confiabilidade em suas representações. Não por acaso, este é o indicador utilizado oficialmente pela NOAA para a determinação de fenômenos ENOS, além de ser o mais comumente aplicado em trabalhos científicos que exijam a correlação de eventos atmosféricos com o fenômenos ENOS (BARNSTON, 2021).

Atualmente, além dos índices que avaliam apenas as anomalias de TSM, outros índices são utilizados em complemento, como o OLR e o MEI.

2.2.2.7. *Outgoing Longwave Radiation (OLR)*

O índice OLR é obtido por meio de dados de radiação de ondas longas observados a partir do instrumento *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)* a bordo de satélites de órbita polar da NOAA. Os dados são coletados no Pacífico equatorial de 160°E a 160°W de longitude. Os dados brutos são convertidos em um índice de anomalia padronizado. OLR negativo (positivo) é indicativo de convecção aumentada (suprimida) e, portanto, mais (menos) cobertura de nuvens típica de episódios de *El Niño (La Niña)* (EUA, 2022).

O índice OLR não apenas possibilita identificar atividade convectiva intensa nas áreas sob análise, mas também viabiliza, por meio da alteração nos componentes do sistema tricelular, a correlação do ENOS e das condições do Oceano Pacífico a outras regiões do globo, as chamadas teleconexões (BARNSTON, 2021). Mais detalhes a respeito destas mudanças que propiciam o estabelecimento de correlação são apresentadas no item 2.3 deste trabalho.

2.2.2.8. *Multivariate Enso Index Version 2 (MEI.v2)*

O MEI.v2 se refere a um índice bimensal que avalia cinco classes de dados (pressão ao nível do mar, TSM, componentes zonais e meridionais do vento de superfície e radiação de ondas longas) sobre a bacia tropical do Pacífico (30°S-30°N e 100°E-070°W).

2.3. ENOS e Teleconexões Atmosféricas

As teleconexões atmosféricas são descritas como correlações estatisticamente significativas ao longo do tempo entre dois parâmetros significativos, cada qual relativo a regiões remotamente distantes entre si (MO; WHITE, 1985). Trenberth (1991) complementa esta consideração estatística, referindo-se às teleconexões como a influência de fatores oceano-atmosférico remotos capazes de alterar os padrões da pressão e da circulação atmosférica global. Também denominada de modos de variabilidade de baixa frequência entre trópicos e extratropicos/pólos, as teleconexões não possuem

recorrência pré-estipulada e são vinculadas, normalmente, a processos de convecção tropical (LIMA, 2012).

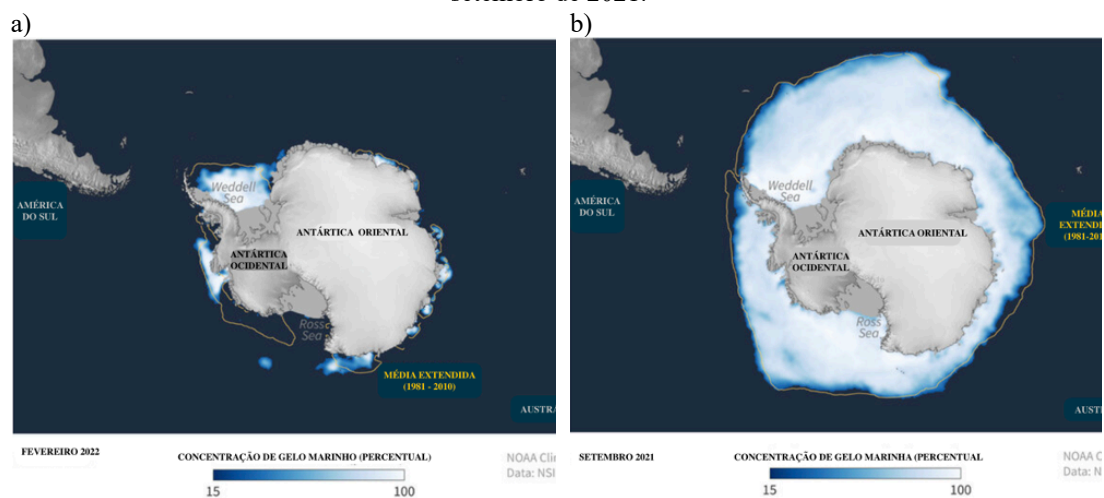
O estudo do fenômeno ENOS possibilitou à comunidade científica associar a ocorrência de diversas teleconexões atmosféricas entre os períodos de *El Niño/La Niña* e anomalias climáticas regionais e globais. Estas variabilidades de baixa frequência foram associadas à consequente intensificação do processo convectivo e do gradiente meridional de temperatura na região do Pacífico equatorial, ao longo do desenvolvimento da fase positiva do ENOS. O incremento da convecção equatorial intensifica a circulação na Célula de Hadley, especialmente em grandes altitudes. Esta anomalia na circulação de um dos componentes do sistema tricelular gera um desbalanço na circulação geral da atmosfera (MO; WHITE, 1985), alterando, por exemplo, a posição e intensidade das correntes de jatos em altitude.

2.4. Gelo Marinho

Elemento componente da Criosfera, o gelo marinho é considerado um dos fatores de maior relevância do ambiente marítimo antártico (KING; TURNER, 1997; CARDOSO, 2019). Esta importância é notada quando se analisa que, ao longo do inverno, o fluxo de calor proveniente de superfícies cobertas por gelo marinho é duas ordens de magnitude inferior que de superfícies livres de gelo (KING; TURNER, 1997; MAYKUT, 1978). Com a chegada das estações mais quentes, no entanto, o gelo começa a derreter, o que diminui o albedo, aumentando o fluxo de calor e contribuindo para alterações sazonais nas circulações atmosférica e oceânica (CARDOSO, 2019). Tais fatos evidenciam não apenas a função de isolante térmico do gelo marinho, mas também a sua influência sobre o clima.

Esta importância climática perceptível, todavia, não altera o fato desse elemento também ser fortemente influenciado por alterações climáticas de pequena a grande escala geográfica que variem desde períodos sinóticos a geológico (YUAN, 2004). De fato, o gelo marinho antártico, que chega a cobrir superfícies em latitudes próximas a 55°S e a se estender por 19 milhões de quilômetros quadrados (KING; TURNER, 1997), tem sua extensão drasticamente reduzida durante o chamado verão antártico (Figura 17).

Figura 17 - Média das extensões mínima (a) e máxima (b) da camada de gelo marinho antártico, para série temporal de 1981 a 2010, e a respectiva cobertura de gelo nos meses de fevereiro de 2022 e setembro de 2021.



Fonte: adaptado de NSIDC (2022a).

Esta sazonalidade da extensão da cobertura de gelo marinho na Antártica deve-se, dentre outros fatores, à maior possibilidade de deriva que ele possui, dado o próprio caráter de circulação circumpolar da CCA. O mesmo não é observado no Ártico, onde a movimentação do gelo marinho dispõe de menor liberdade (NSIDC, 2022b).

O gelo marinho, que não deve ser confundido com os *icebergs* (gelo de origem terrestre), é formado e dissipado essencialmente sobre o oceano. O desenvolvimento deste elemento da criosfera ocorre após o resfriamento da água em superfície atingir o limite do ponto de solidificação da água no oceano, especialmente ao longo dos meses de inverno no Hemisfério Sul, atingindo a máxima extensão da crosta de gelo em setembro. O derretimento das camadas de gelo ocorre ao longo do verão, com o mínimo de cobertura sendo alcançado em fevereiro (TURNER; PENDLEBURY, 2004).

Assim, é importante analisar mais detidamente o processo de formação do gelo marinho. O primeiro ponto, cuja exposição se mostra relevante, diz respeito à interferência dos sais dissolvidos no processo de congelamento da água marinha antártica. A presença destes sais contribui para a diminuição do ponto de solidificação da água para uma temperatura aproximada de $-1,8^{\circ}\text{C}$ (NSIDC, 2022). Esta condição altera significativamente o processo de mudança de fases no oceano, quando comparado à água doce (CARDOSO, 2019).

A água em superfície em contato prolongado com o ar polar, em temperatura abaixo de $-1,8^{\circ}\text{C}$, acaba cedendo calor para a atmosfera, atingindo assim seu ponto de

congelamento. Após o congelamento, o gelo marinho expelle progressivamente os sais residuais que permaneceram em sua estrutura cristalina em pequenos reservatórios preenchido por salmoura, contribuindo para o processo de aumento da salinidade da camada de água subjacente. Desta forma, o gelo se torna menos denso que a água na camada inferior a si, passando a formar uma fina crosta que boia sobre a superfície do mar (TURNER; PENDLEBURY, 2004).

Este processo de resfriamento da camada superficial do Oceano Antártico se inicia primeiramente nas adjacências do continente gelado, em especial nas localidades da costa com maiores latitudes e menores profundidades. Nestes locais, onde a temperatura atmosférica e a TSM se resfriam antes, observa-se a influência dos ventos provenientes da zona de alta pressão no continente sobre a formação do gelo marinho. Estes ventos frios agem como forçantes no transporte vertical de calor entre o oceano e atmosfera, acelerando o processo de congelamento da camada superficial do mar (CARDOSO, 2019; TURNER; PENDLEBURY, 2004).

Os ventos também terão participação, junto às correntes oceânicas polares, no processo de ampliação da crosta de gelo marinho. Esta camada de gelo superficial recém-formada será forçada pelos ventos continentais, derivando em direção ao mar aberto, e abrindo novos espaços livres de gelo junto à costa. Esta condição aumenta a extensão do gelo com o passar do tempo, uma vez que o movimento divergente do gelo marinho provê, de maneira cíclica, a reabertura de novos espaços de águas expostas, sujeitas ao processo de congelamento pelas trocas de calor com a atmosfera (TURNER; PENDLEBURY, 2004).

Além disso, a divergência em direção ao Norte, após o deslocamento do gelo por determinada distância, fará com que ele passe a ser influenciado pelo movimento e pelas baixas temperaturas das águas da CCA e dos ventos de Oeste decorrentes das frentes polares.

2.5. ENOS as Anomalias de Gelo Marinho

A influência do ENOS sobre anomalias atmosféricas ao redor de todo o globo vem sendo estudada e documentada pela comunidade científica. As teleconexões envolvendo o *El Niño* evidenciam correlações com diversos parâmetros atmosféricos e oceânicos,

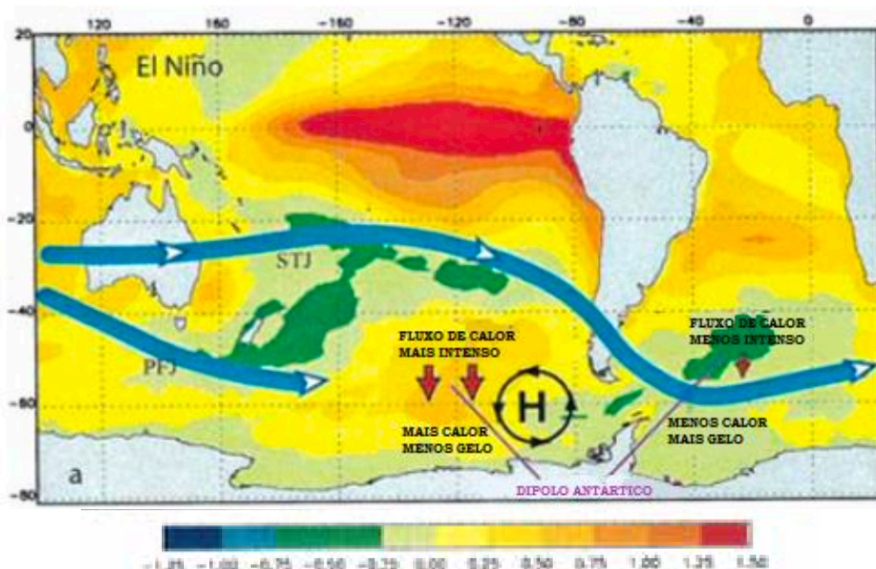
dentre os quais ressalta-se o gelo marinho antártico, foco deste estudo.

As observações destas variabilidades distinguem-se de acordo com a área observada no Continente Antártico. Carrasco (2018), por exemplo, identificou a correlação entre o aumento da concentração de gelo no setor norte do Mar de Bellingshausen (região adjacente à área da OPERANTAR) e o estabelecimento do *El Niño*.

A teleconexão entre as anomalias da cobertura de gelo marinho antártico e o ENOS está relacionada com as consequências do fortalecimento da célula de Hadley, descrito no item 2.3. Esta intensificação da circulação de Hadley não apenas reforça o Jato Subtropical, mas também fortalece a célula de Ferrel sobre o Pacífico Sul. A intensificação do Jato Subtropical, por sua vez, desloca a região de tempestades para uma região mais austral no Pacífico e enfraquece o Jato Polar (YUAN, 2004).

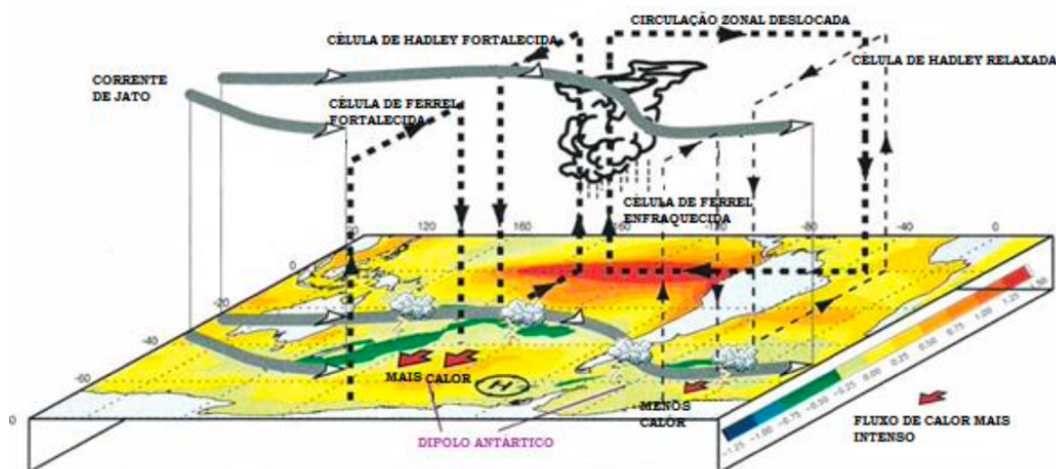
A nova condição do Jato Subtropical, ilustrada nas Figuras 18 e 19, altera também a circulação zonal, deslocando a célula de Walker mais para Leste. Como consequência dessas mudanças, ocorre a expansão da circulação da célula de Hadley no Oceano Atlântico Tropical Sul, relaxando-a e reduzindo a sua intensidade.

Figura 18 - Posicionamento das Correntes de Jato Subtropical e Polar sobre o Oceano Pacífico e Atlântico Sul durante o *El Niño*, representados pelas linhas azuis. Anomalias da TSM indicadas pela paleta de cores.



Fonte: Yuan (2004), adaptado por Cardoso (2019).

Figura 19 - Alterações na circulação das componentes do sistema tricelular de circulação atmosférica, em decorrência do *El Niño*.



Fonte: Yuan (2004), adaptado por Cardoso (2019).

O fortalecimento da célula de Ferrel sobre o Pacífico Sul traz uma resposta oposta na porção da célula localizada sobre o Atlântico Sul, enfraquecendo-a. Este rearranjo da circulação atmosférica causa alterações no fluxo de calor em superfície, fazendo com que haja mais (menos) calor sendo transportado para a região polar do Pacífico Sul (Atlântico Sul e Mar de Bellingshausen) (CARDOSO, 2019; TURNER, 2004; YUAN, 2004).

Esta mudança no transporte de calor nas regiões a Leste e Oeste da Península Antártica ocorre devido ao estabelecimento de um sistema de alta pressão anômalo sobre o mar de Bellingshausen (local onde ocorre, em condições normais, pressões relativamente mais baixas, evidenciadas pelo sistema de baixa pressão semipermanente apresentado na Figura 7). O novo regime de pressão nas proximidades do continente antártico gera uma circulação anti-horária, levando o ar quente de latitudes mais baixas para a região polar, e o ar frio continental para o mar de Weddell (CARDOSO, 2019), leste do Mar de Bellingshausen, Estreito de Drake e Península Antártica.

Esta anomalia dos campos de pressão e ventos antárticos é também conhecida como Dipolo Antártico, sendo maior responsável pela variabilidade interanual no campo de gelo marinho (YUAN; LI, 2008). Com o estabelecimento do dipolo no período de *El Niño* e a atuação do centro de pressão anômalo, direcionando os ventos frios continentais para a região mencionada, percebe-se a redução da TSM e também a deriva do gelo marinho formado em Bellingshausen em direção ao Drake e Atlântico Sul. As baixas temperaturas da água aceleram o processo de congelamento da água do mar ou dificultam o derretimento do gelo marinho já formado, gerando anomalias positivas de concentração

de gelo na região do Estreito de Drake e Mar de Weddell (CARDOSO, 2019; CARRASCO, 2018).

3. OBJETIVOS

O presente estudo tem por finalidade verificar e investigar possíveis impactos de eventos *El Niño* Oscilação Sul na concentração de gelo marinho sobre áreas de operações dos Navios da Marinha do Brasil na OPERANTAR. Esta pesquisa visa encontrar possíveis padrões e correlações entre a fase/intensidade do ENOS e a anomalia na concentração de gelo marinho nas regiões de interesse para a missão brasileira na Antártica. Desta forma, pretende-se contribuir com a ampliação dos conhecimentos sobre o ambiente antártico, de maneira a auxiliar os futuros planejamentos logísticos das OPERANTAR e mitigar eventuais percalços, como os observados em 2015.

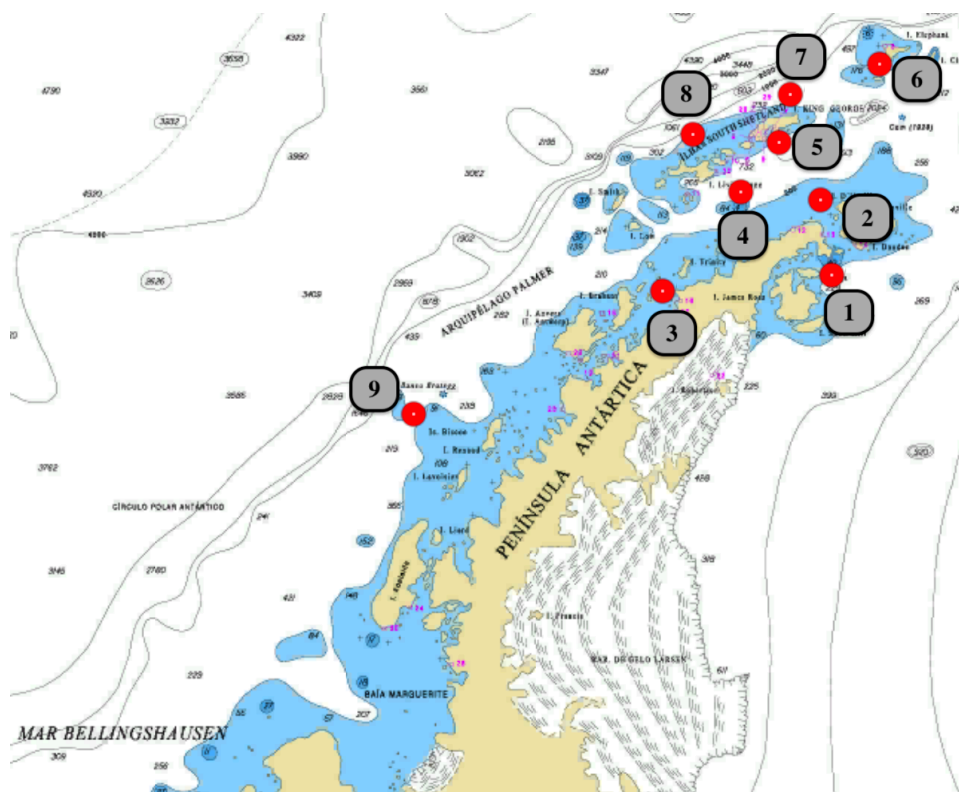
4. DADOS E METODOLOGIA

Para o estudo proposto foram utilizadas as concentrações médias mensais de gelo marinho (em décimos de gelo por unidade de área) obtidas pela reanálise do *ECMWF Atmospheric ReAnalysis – 5ª Geração (ERA5)* (HERSBACH *et al.*, 2018), do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, para um período de 41 anos (1981-2021).

A avaliação dos impactos da ocorrência de ENOS na concentração de gelo marinho foi realizada para os meses considerados como mais relevantes. A definição da relevância baseou-se, primeiramente, no período anual em que a atividade com navios normalmente se sucede na OPERANTAR. Neste caso, os meses que normalmente demarcam o início e o fim desta operação receberam maior destaque, em vista da importância e sensibilidade destes no planejamento logístico. Em um segundo plano, avaliou-se os períodos em que ocorrem as maiores variações espaciais e temporais das concentrações de gelo, ou seja, aqueles onde ocorrem o menor e a maior retração do gelo marinho em torno da Antártica. Com base nestes dois parâmetros, os meses de interesse definidos para este estudo foram setembro, outubro, novembro, fevereiro, março e abril.

A área de interesse analisada neste trabalho é delimitada pelas latitudes 70°S e 55°S e longitudes 070°W e 050°W, englobando a Península Antártica, o Arquipélago das Shetland do Sul e pelas águas adjacentes (Mares de Bellingshausen e de Weddell, Golfo de Erebus e Terror, e Estreitos de Drake e Bransfield), todas regiões relacionadas à atividade desenvolvida no âmbito do PROANTAR pelos navios brasileiros. A caracterização destes setores contou, ainda, com o estabelecimento de 9 pontos de verificação estatística (Figura 20), os quais representam locais de interesse para a OPERANTAR: proximidades de áreas onde são lançados acampamentos de pesquisadores; locais de recorrentes levantamentos hidrográficos e pesquisas embarcadas; e o Drake Sul, por onde são estabelecidas as rotas de acesso ao Continente Antártico. Também foi definido um ponto (Ponto 9), para acompanhamento da região nas proximidades do Mar de Bellingshausen, que apesar de não ser uma região de operação dos navios brasileiros, é uma área que pode ser fonte de gelo a derivar em direção às áreas de operação. As latitudes/longitudes de cada um dos pontos se encontram em seguida à Figura 20.

Figura 20 – Pontos de interesse para a análise da concentração média mensal de gelo marinho.



Fonte: CHM (2022)

Ponto 1: 64,0°S/057,0°W (Mar de Weddell, Golfo de Erebus e Terror)

Ponto 2: 64,0°S/057,0°W (Estreito de Bransfield, nas proximidades do Estreito Antártico)

Ponto 3: 64,0°S/061,5°W (Estreito de Gerlache)

Ponto 4: 63,0°S/059,0°W (Parte central do Estreito de Bransfield)

Ponto 5: 62,3°S/058,3°W (Proximidades da entrada da Baía do Almirantado)

Ponto 6: 61,0°S/056,0°W (Proximidades da Ilha Elefante)

Ponto 7: 61,5°S/058,0°W (Drake Sul 1)

Ponto 8: 62,0°S/061,0°W (Drake Sul 2)

Ponto 9: 65,5°S/068,0°W (Mar de Bellingshausen)

A fim de investigar os impactos dos eventos ENOS na concentração de gelo marinho nas regiões supracitadas, optou-se pela utilização do índice Oceanic Niño Index (ONI), para definição da fase e intensidade de fenômenos ENOS. A escolha do ONI baseou-se no fato deste ser o índice mais representativo na atualidade e mais utilizado em

pesquisas de correlação de evento ENOS com outros fenômenos atmosféricos, conforme concluído por Barnston *et al.* (1997). O Oceanic Niño Index é calculado mensalmente pela *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA), baseando-se no banco de dados NOAA *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* (SST) Version 5 (ERSSTv5) (HUANG *et al.*, 2017). O ERSSTv5 expressa o valor mensal da TSM global, calculada a partir de dados adquiridos do *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (ICOADS) (PSL, 2022). Os valores obtidos pela NOAA para o período estudado pelo presente trabalho encontram-se na Figura 21.

Figura 21 – Índices ONI de cada mês

1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1
1982	0.0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2.0	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1.0	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1.0	1.1
1995	1.0	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1.0	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0.0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.5	0.6	0.7	1.0	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0

Fonte: PSL (2022)

Os valores mensais do índice ONI fornecidos pela NOAA estão disponíveis, com resultados desde 1950 até a atualidade, no seguinte endereço eletrônico: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/enso.shtml>.

Conforme apresentado no item 2.2.2.6, o índice ONI é calculado mensalmente e expressa a média trimestral das anomalias da TSM na região conhecida com *Niño* 3.4. A *NOAA* considera condições de *El Niño*, quando os índices ONI assumem valores iguais ou superiores a +0,5 (anomalias positivas de TSM iguais ou superiores a 0,5°C). A ocorrência de *La Niña* será admitida quando o ONI apresentar valores inferiores a -0,5 (anomalias negativas de TSM iguais ou inferiores a -0,5°C).

Utilizando o programa *Grid Analysis and Display System* (GrADS) (DOTY; KINTER, 1995), na versão *Opengrads* para *Windows*, foram calculadas as médias climatológicas mensais, do período de 41 anos, das concentrações de gelo marinho no domínio de interesse.

Posteriormente, através da análise dos índices ONI, foram elaboradas composições das concentrações médias de gelo marinho para cada um dos meses de interesse, apenas para períodos em que se observou o desenvolvimento de ENOS. Assim, foram obtidos, em média, 10 a 13 eventos, representando aproximadamente 25% da amostragem de cada mês do ano na climatologia empregada neste estudo.

Comparando a climatologia dos 41 anos da concentração de gelo marinho com as composições mensais durante os eventos de *El Niño* e *La Niña*, foram elaboradas as anomalias mensais da concentração de gelo marinho durante esses eventos, com o intuito de se verificar o impacto do ENOS sobre a concentração do gelo marinho na área em estudo.

Também foi realizada uma verificação quantitativa de possíveis teleconexões entre a ocorrência e a intensidade do fenômeno ENOS e as anomalias na cobertura de gelo marinho nas áreas específicas. Para isso, foram calculadas as correlações entre as anomalias mensais de concentração de gelo nos 9 pontos de interesse, apresentados na Figura 20, e os valores do índice ONI.

A correlação calculada apoiou-se no procedimento estatístico conhecido como coeficiente de correlação de *Spearman*. O método de *Spearman* é uma correlação não paramétrica, a qual não adota a premissa de que as variáveis em lide se relacionam linearmente (SÁ, 2007). O conceito por detrás desta metodologia estatística se adequa à baixa linearidade observada no comportamento das variações dos índices da camada de gelo ao longo de todo o período em estudo, motivando assim a escolha deste coeficiente.

As análises estatísticas das anomalias obtidas pela reanálise e os índices ONI foram realizadas por meio de linguagem de programação Python, utilizando a biblioteca *pandas*.

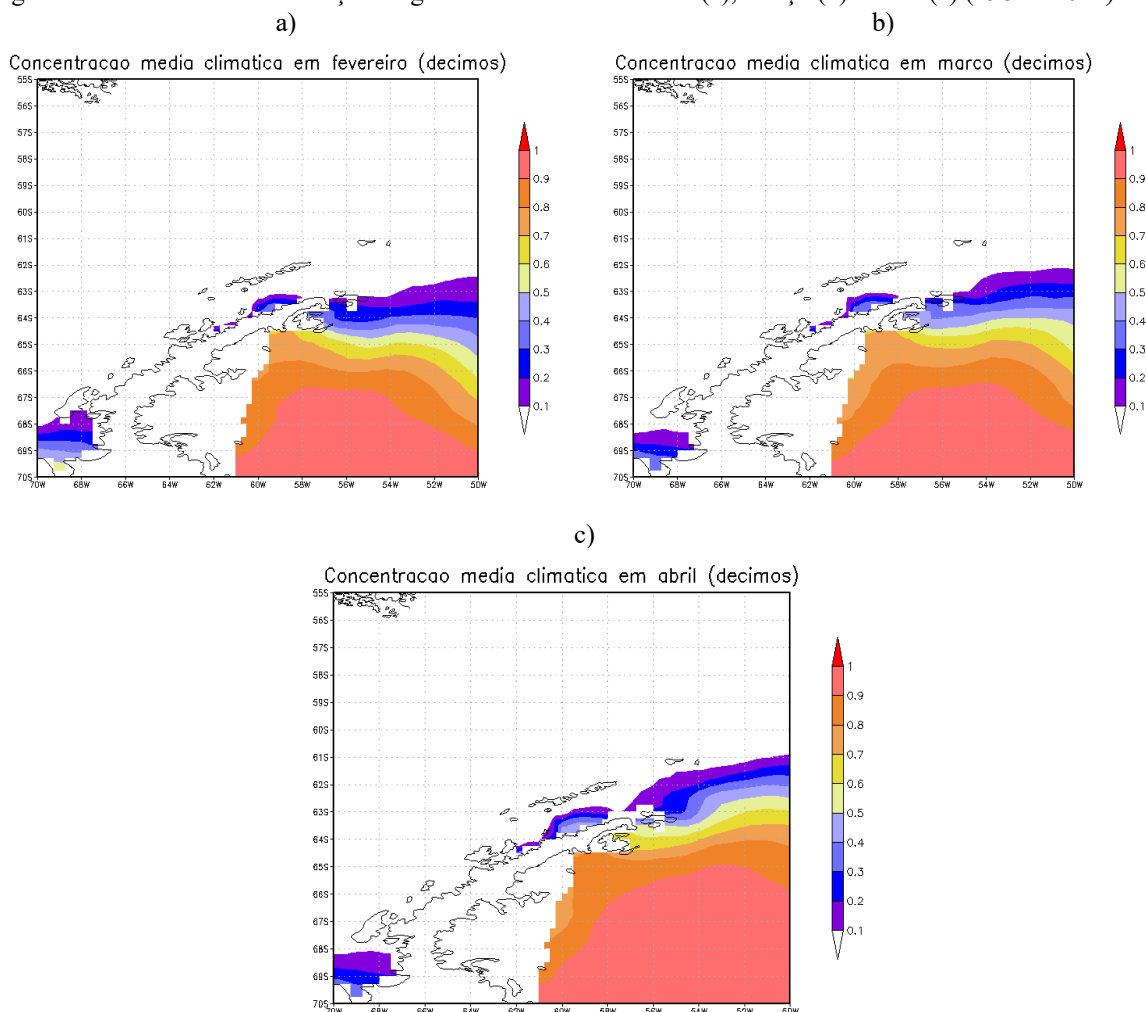
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. *Climatologia da concentração de gelo marinho*

Uma análise mês a mês da concentração média de gelo marinho permite observar o padrão de formação e derretimento do gelo (Figuras 22 e 24). Nos meses de fevereiro, março e abril (Figura 22) há o aumento progressivo da concentração de gelo marinho, na porção Leste da Península Antártica, ao norte do Mar de Weddell. Esse comportamento pode ser verificado na Figura 23, que apresenta a variação da concentração de gelo marinho entre os meses de fevereiro, março e abril, e possivelmente está associado à corrente do Giro de Weddell, que transporta águas mais frias do Sul para o Norte.

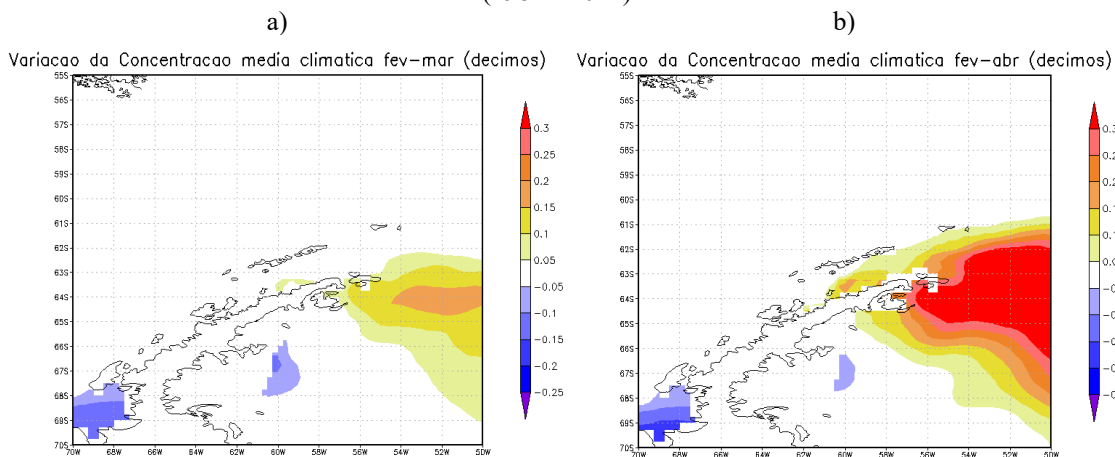
Ressalta-se ainda que semelhante comportamento de crescimento da concentração de gelo, no período de fevereiro a abril, não é observado na face oeste da Península Antártica. Nesse período, o gelo marinho ainda possui leve tendência de retração no Mar de Bellingshausen, a sudeste da Ilha Alexander. Tal constatação também parece estar relacionada a duas situações. A primeira é relativa às correntes oceânicas superficiais da região, que fluem de Norte para Sul no Giro de Ross, transportando águas mais aquecidas e contribuindo para o derretimento do gelo em Bellingshausen por período mais prolongado. A segunda parece se associar à própria topografia continental antártica que faz fronteira com o Mar de Bellingshausen e à consequente interação entre esta e as componentes atmosféricas. Diferentemente, da parcela continental que envolve o Mar de Weddell, cercado-o em grande parte, a porção Oeste da Península Antártica não circunda o Mar de Bellingshausen. Tal fato torna a própria circulação da água mais fluida e menos restrita, tendo a diminuir a suscetibilidade de um rebaixamento mais efetivo da TSM em decorrência à interação da água com geleiras e com ventos locais mais frios. Portanto, o congelamento da água do mar nos dois mares ao redor da Península Antártica, ao final do verão e início do outono, possui certa defasagem.

Figura 22 - Médias da concentração de gelo marinho em fevereiro (a), março (b) e abril (c) (1981 a 2021).



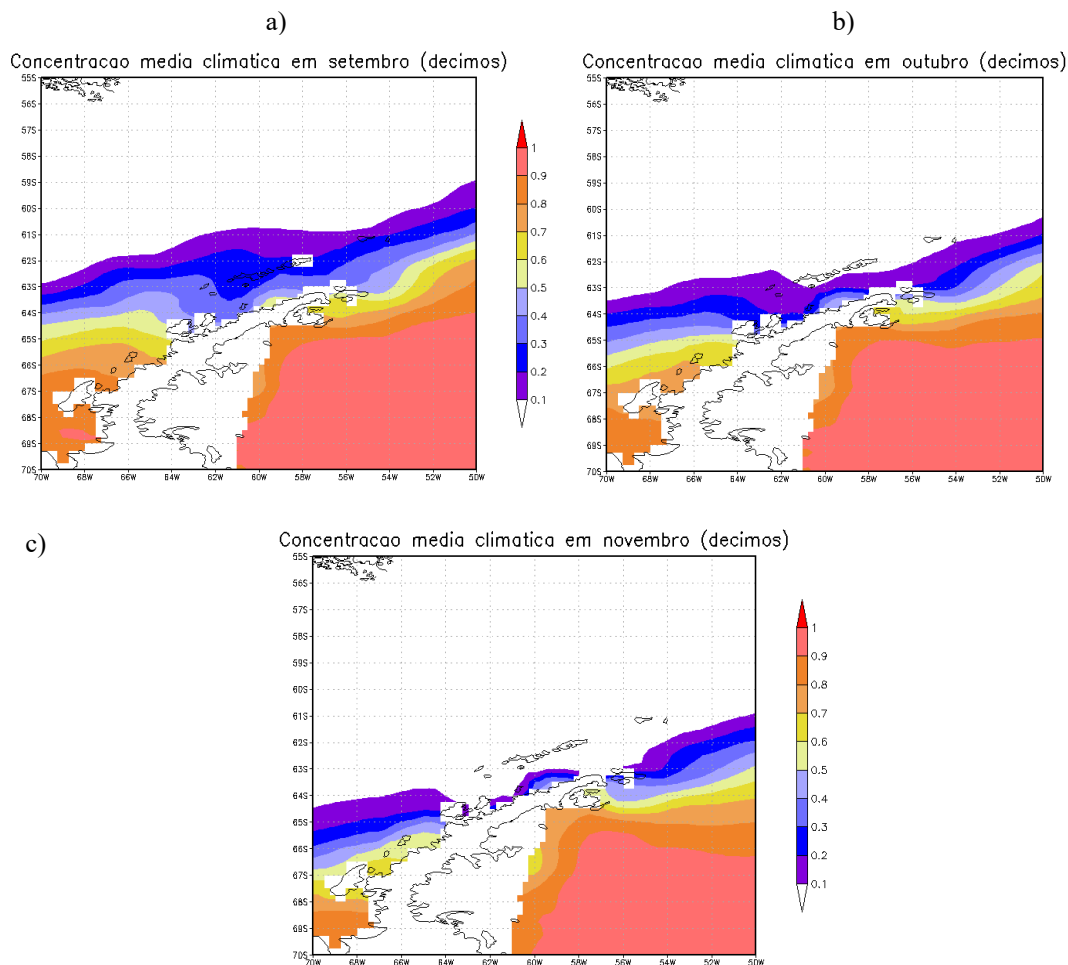
Fonte: o autor.

Figura 23 – Variação média da concentração de gelo entre: fevereiro e março (a); e fevereiro e abril (b) (1981 a 2021).



Fonte: o autor.

Figura 24 - Médias da concentração de gelo em setembro (a), outubro (b) e novembro (c) (1981 a 2021).



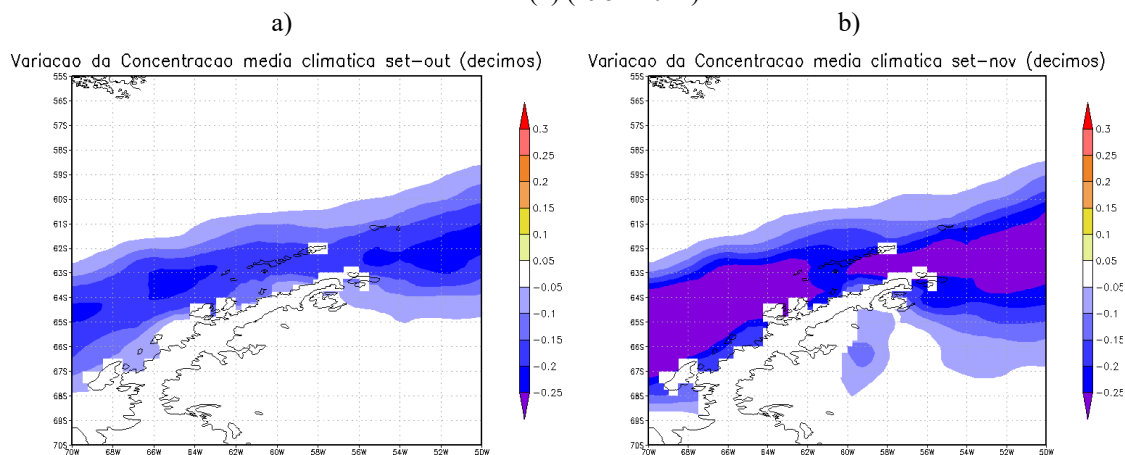
Fonte: o autor.

A Ilha Rei George, apresenta, em setembro (Figura 24), uma concentração média de gelo de 0,2 a 0,3, enquanto no mês de outubro uma média climatológica igual a zero. Esse comportamento se mantém ao longo do mês de novembro, naturalmente mais quente que o anterior. A região do Estreito Antártico, por sua vez, apresenta um padrão climatológico da concentração de gelo marinho que varia entre 0,4 e 0,5, em setembro, reduzindo para 0,2 a 0,3 até o mês de outubro.

Analisando a Figura 25, é possível notar que a tendência climatológica do processo de derretimento do gelo não possui a mesma defasagem observada durante o processo de formação do gelo marinho. Ao longo dos meses de setembro a novembro, a camada de gelo formada no inverno diminui gradualmente em ambos os lados da Península Antártica. Também se observa que a maior taxa de redução da concentração do gelo no Mar de Weddell, entre setembro e novembro, ocorre no extremo Norte da região,

enquanto no Mar de Bellingshausen, a maior taxa de redução estende-se mais ao Sul. Com isso, conclui-se que nesse período há maior variabilidade meridional da concentração do gelo marinho no Mar de Bellingshausen, quando comparado ao Mar de Weddell.

Figura 25 - Variação média da concentração de gelo entre setembro e outubro (a) e entre setembro e novembro (b) (1981-2021).



Fonte: o autor.

5.2. Anomalia da concentração de gelo - Eventos *El Niño*

A elaboração dos campos de anomalia da concentração de gelo marinho auxiliou na avaliação de possíveis impactos do fenômeno ENOS ao longo de toda a área de relevância para a OPERANTAR, de forma simultânea. O embasamento teórico para o desenvolvimento desta linha de investigação se baseou nas evidências da ocorrência de teleconexões entre o *El Niño* e variabilidades meteorológicas no Continente Antártico conforme apresentado por Carrasco (2018).

Foram elaborados campos mensais que exibem concomitantemente: a média climatológica da concentração de gelo marinho (linhas pretas contínuas); e a anomalia mensal correspondente à diferença entre as concentrações de gelo médias, segundo a climatologia, e as concentrações médias mensais apenas durante os eventos ENOS positivos (hachurado).

A fim de auxiliar o processo analítico, foram adotadas algumas considerações acerca do campo de anomalias. Neste processo, anomalias entre 0,05 a -0,05 foram consideradas irrelevantes, tendo em vista representarem menos da metade da menor escala de classificação da cobertura de gelo. Anomalias entre 0,05 e 0,15 e entre -0,05 e

-0,15 foram consideradas como sendo de baixa intensidade, enquanto anomalias de 0,15 a 0,25 e de -0,15 a -0,25 foram admitidas como de intensidade mediana. Por fim, as anomalias superiores a 0,25 e inferiores a -0,25 foram consideradas de grande intensidade.

A análise do campo de anomalias para os meses de setembro com ocorrência da fase positiva do ENOS (Figura 26) evidenciou uma anomalia positiva da concentração de gelo marinho ao longo de todas as áreas de interesse para a OPERANTAR, com destaque para as regiões de Bellingshausen, do Estreito Antártico e do Golfo de Erebus e Terror no extremo norte do Mar de Weddell. Observou-se que as anomalias levam à superfície do mar coberta quase que totalmente por gelo marinho, considerando a média climatológica do período. A exemplificação do exposto se observa no Golfo de Erebus e Terror (entre as Ilhas Joinville, Vega, James Ross e Marambio) e no Estreito Antártico, onde a cobertura de gelo anômala leva a concentrações entre 0,85 e 0,90 durante ENOS positivos.

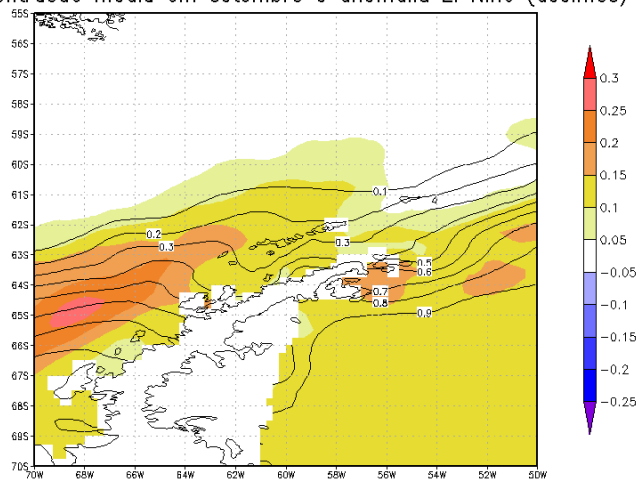
Este efeito constatado sobre o gelo marinho, sobretudo em Bellingshausen, corrobora o trabalho de Carrasco (2018), que mostra o aumento da concentração de gelo marinho em decorrência das teleconexões durante os eventos de *El Niño*.

Outros setores cujas concentrações de gelo marinho merecem destaque são os Estreitos de Bransfield e de Drake, os quais contornam as Ilhas Shetland do Sul. Nesta região observou-se por meio das anomalias positivas da concentração de gelo que há uma expansão da borda de gelo marinho para Norte. A Figura 26 mostra o gelo se estendendo no Drake Sul até o paralelo de 59°S, quase 2° de latitude ao Norte em relação à média climatológica.

A intensidade da anomalia na região, ainda que seja pequena, com valores positivos entre 0,10 e 0,15 circundando praticamente toda a Ilha Rei George, onde se localiza a Estação Antártica Comandante Ferraz, geram concentrações totais médias que variam entre 0,35 na face norte da Ilha e 0,45 na face sul em setembro.

Figura 26 – Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em setembro (1981-2021).

Concentração média em setembro e anomalia *El Niño* (decimos)



Fonte: o autor.

A avaliação do campo de gelo marinho para os meses de outubro com *El Niño*, expresso pela Figura 27, explicita de antemão não apenas a persistência, mas também o fortalecimento das anomalias em algumas das regiões de estudo. A primeira área de interesse cujos comportamentos anômalos se sobressaem é o Mar de Bellingshausen, onde se observa uma expansão espacial das anomalias de média e alta intensidade na cobertura de gelo. Exemplo disto se denota na faixa de anomalias de +0,25 a +0,30, que em setembro se restringia às longitudes de 069°W a 067°W e que em outubro passou a se estender desde o meridiano de 070°W até o de 064°W. A consequência disso é a manutenção das concentrações de gelo, em outubro, em níveis semelhantes aos encontrados em setembro.

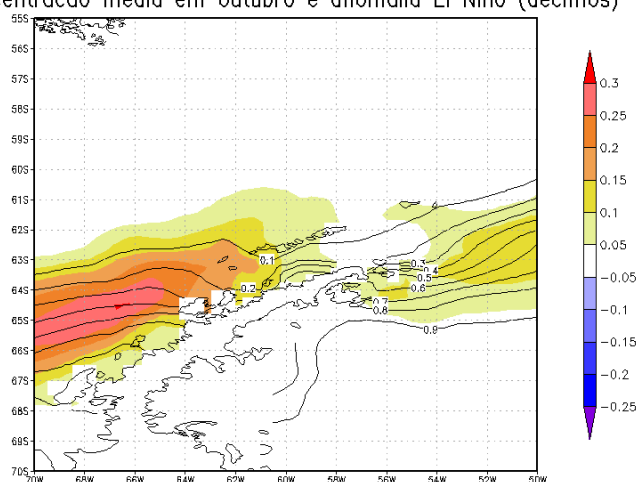
Sendo setembro o mês em que ocorre o auge da extensão e da concentração de gelo marinho em torno do continente antártico, espera-se que em outubro a taxa de derretimento de gelo marinho seja acelerada em virtude do aquecimento devido à transição das estações. Portanto, o incremento na intensidade da anomalia positiva de gelo observado no mês de outubro é uma evidência que o fenômeno *El Niño* retarde de forma significativa o derretimento do gelo marinho, principalmente no Mar de Bellingshausen, Estreito de Gerlache e oeste do Estreito de Bransfield.

Verifica-se que a anomalia da concentração de gelo persiste nas proximidades da Ilha Rei George, se estendendo até o paralelo de 61°S, todavia, com a redução da

intensidade (entre 0,05 e 0,1). Igualmente, torna-se clara a redução da intensidade da anomalia tanto no Estreito Antártico, quanto no Mar de Weddell. Porém, considerando que os campos apresentam as médias de anomalias de gelo, eventuais casos de *El Niño* (Figura 28) podem levar a maiores anomalias positivas de gelo na área, que, alinhadas com as altas concentrações médias da região nesse mês, inviabilizariam os trabalhos da OPERANTAR no Golfo de Erebus e Terror (Mar de Weddell) durante o mês de outubro.

Figura 27 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em outubro (1981-2021).

Concentração média em outubro e anomalia El Niño (decimos)



Fonte: o autor.

Os resultados da Figura 27, sobretudo nas adjacências das Ilhas Shetland do Sul, contrastaram com os valores das anomalias encontradas por Cardoso (2019), que abordou apenas o ano de 2015. Tal fato suscitou a necessidade de se realizar uma análise mais aprofundada das condições do gelo marinho em cada um dos eventos de *El Niño* considerados. Desta maneira, foram elaborados campos similares ao da Figura 27 para cada um dos 12 episódios de ENOS positivos em outubro. Estas representações gráficas (Figura 28) apresentam as isolinhas das médias climatológicas para outubro, bem como o campo de anomalias da concentração de gelo (calculado como a diferença entre a concentração de gelo em cada um dos episódios e a média climatológica dos 41 anos avaliados).

A comparação das anomalias transcorridas em cada um dos eventos apresentados na Figura 28 permite depreender alguns padrões. Primeiramente, fica evidente que, dentre os 12 episódios descritos, apenas 1 não apresenta anomalias positivas de grande

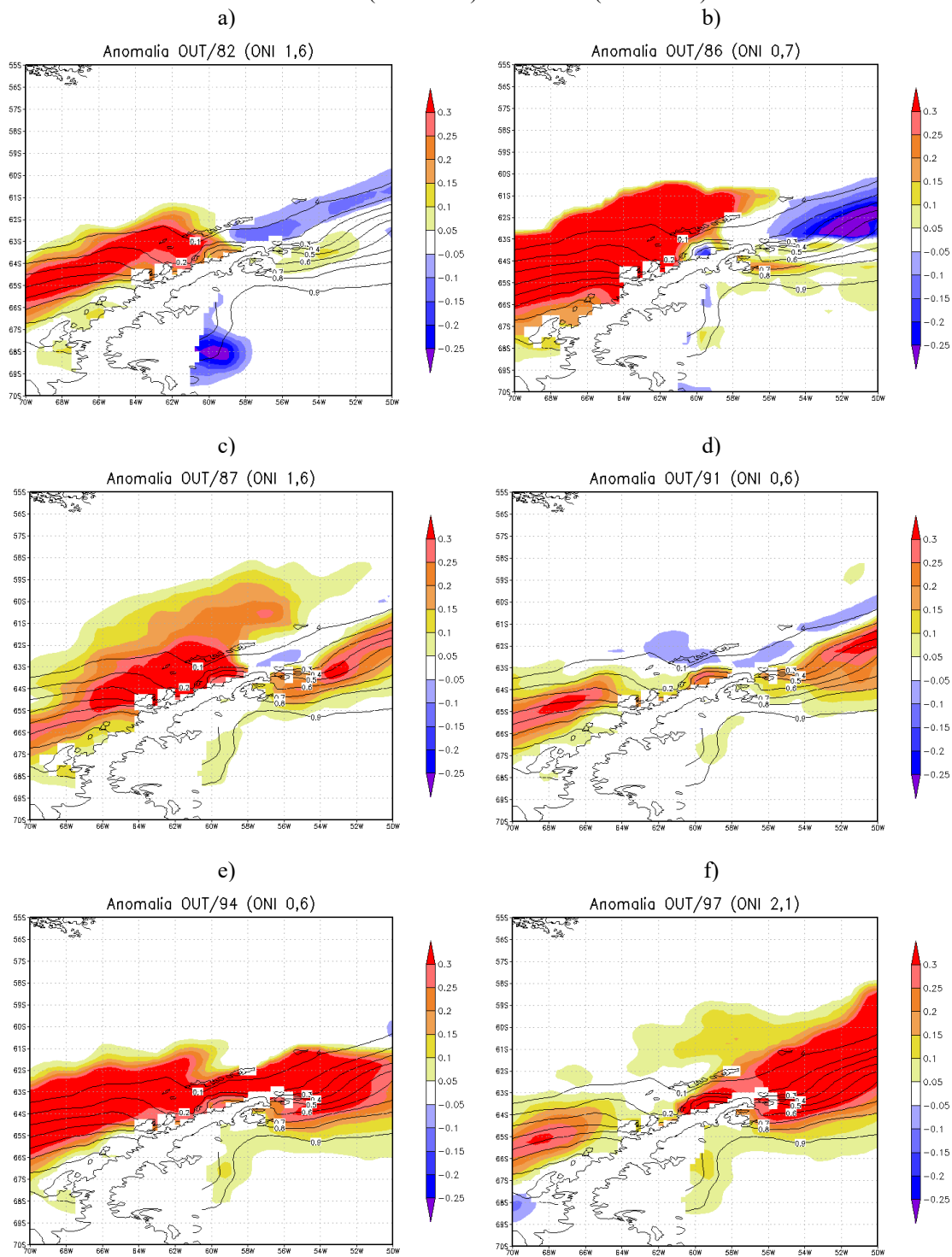
intensidade na concentração de gelo (superiores a 0,3) em torno da Península Antártica. O segundo ponto que se destaca é que não foi possível observar um padrão espacial para ocorrência das anomalias, de acordo com as intensidades dos eventos. No entanto, as anomalias mais intensas ocorreram majoritariamente durante eventos cujos índices ONI eram elevados (maior que 1).

Também foi possível notar que os 3 episódios em que as anomalias negativas tiveram maior desenvolvimento espacial ocorreram em momentos próximos a uma fase negativa ENOS e principalmente durante episódios de *El Niño* com pequena duração e intensidade (Figura 28 h, j, l).

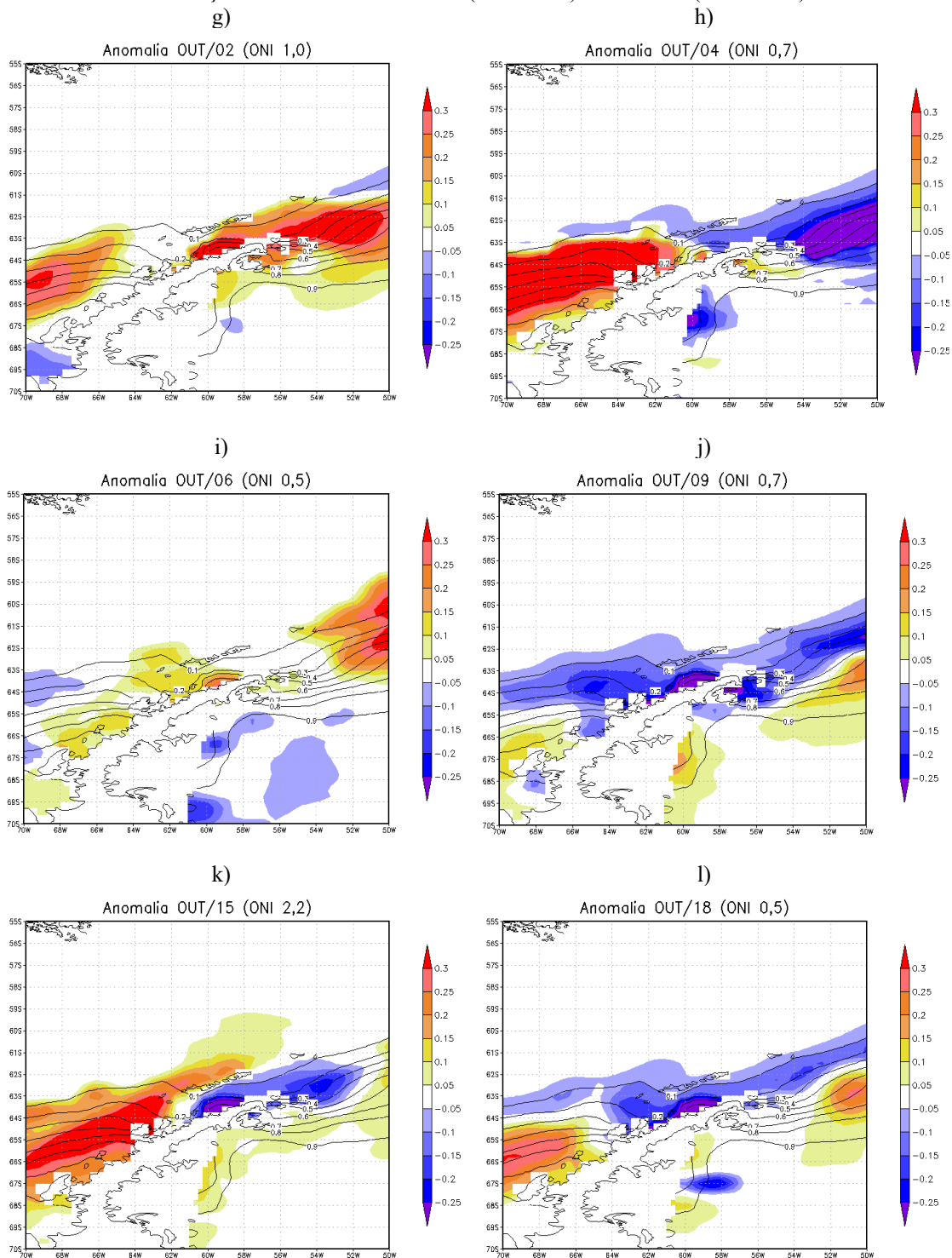
Quanto ao arquipélago das Shetland do Sul, observou-se a que a face norte das ilhas foi influenciada por variações anômalas positivas: de média ou grande intensidades (7 vezes); e de pequena intensidade (1 vez). As anomalias negativas ocorreram 4 vezes, todas com baixa intensidade. Em que pese o número de vezes e a intensidade dos desvios nas concentrações de gelo, percebe-se que as ocorrências nesta região apresentam grande variabilidade espacial ao longo de toda costa norte das ilhas. Ainda assim, é evidente que existe a tendência de se desenvolverem anomalias positivas relevantes na concentração de gelo em torno das Ilhas Shetland do Sul durante episódios de *El Niño* em outubro.

O Estreito de Bransfield apresentou 8 vezes anomalias superiores a 0,15. Diferentemente das Ilhas Shetland, a média da anomalia em Bransfield não foi reduzida tanto por conta da variabilidade espacial, mas, sim, pela ocorrência de 3 eventos de anomalias negativas de alta intensidade (menor que -0,25) (Figura 28 j, k, l). Em todos esses casos negativos, ocorreram, simultaneamente, anomalias negativas na região do Estreito Antártico e do Noroeste do Mar de Weddell, próximo à Ilha Joinville. Uma suposição plausível para esse comportamento é que o gelo marinho que se concentra na parte sul do Estreito de Bransfield provenha da região de Weddell, possivelmente sendo transportado pela corrente costeira que predomina de Leste para Oeste.

Figura 28 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em outubro (1981-2021).



Continuação da Figura 28 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em outubro (1981-2021).

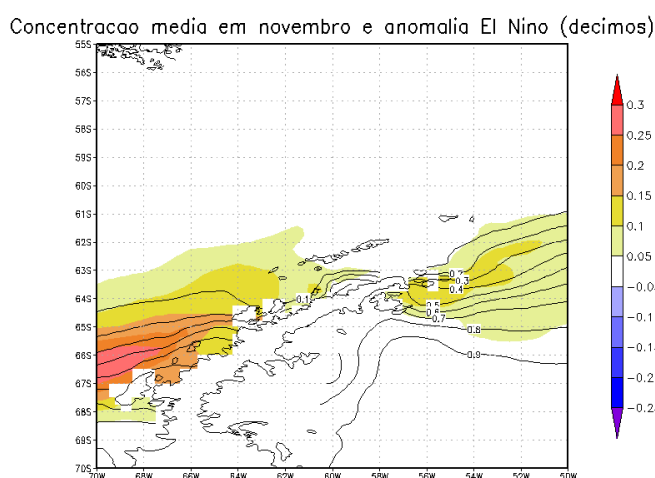


Fonte: o autor.

A Figura 29 apresenta o comportamento das anomalias da concentração de gelo nos meses de novembro em fase positiva do ENOS. Percebe-se, em um primeiro

momento, a persistência dos efeitos anômalos positivos de média e alta intensidade na região do Mar de Bellingshausen, onde anomalias na faixa de 0,25 a 0,30 permanecem entre os meridianos de 070°W e 067°W. A observação destas anomalias na área se estende com menor intensidade até a região centro-sul do Estreito de Bransfield. O resultado desta composição de anomalias evidencia que, mesmo após 2 meses do início da primavera, o gelo remanesce na porção Oeste do Estreito de Bransfield e no Estreito de Gerlache, onde a concentração total afetada pela anomalia ficaria entre 0,25 e 0,40.

Figura 29 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em novembro (1981-2021).



Fonte: o autor.

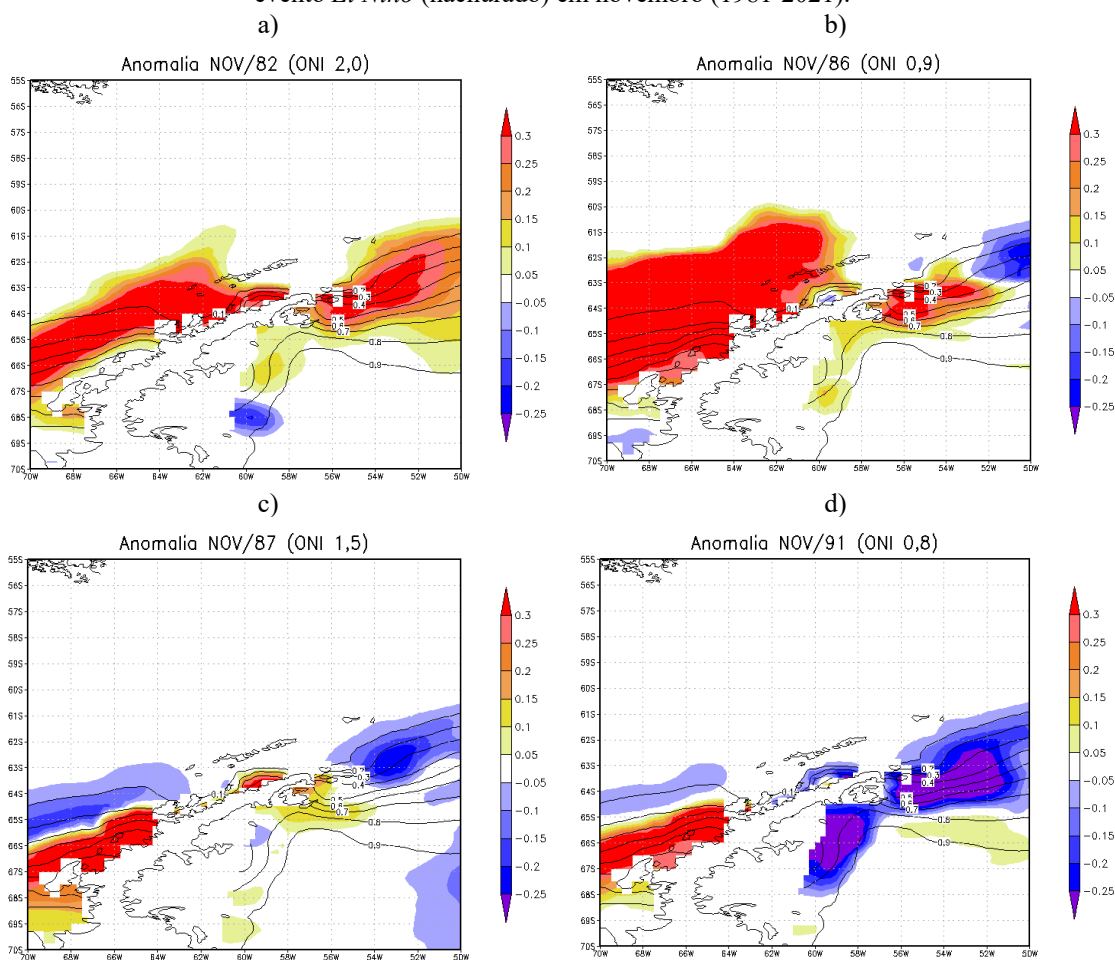
O quadro de anomalias também se estende para a porção leste da Península Antártica, onde se constata a permanência de anomalias positivas de pequena intensidade ao longo do Estreito Antártico e no norte do Mar de Weddell. Em que pese a faixa anômala apresentar pequena intensidade, a sua contribuição garante que a concentração de gelo marinho na área permaneça em uma faixa entre 0,30 e 0,65.

Da mesma forma que foi feito para outubro, foi realizada uma avaliação mais aprofundada caso a caso (Figura 30) dos episódios de *El Niño* em novembro. O primeiro resultado desta análise evidencia que, dentre os 13 episódios de ENOS positivos em novembro, 9 deles culminaram em anomalias positivas de grande intensidade (sendo 8 com anomalias superiores a 0,30). Dos eventos remanescentes, 3 apresentaram anomalias negativas intensas. Destes casos, os 2 mais fortes (Figura 30 i, m) ocorreram seguidamente ao término de um período de *La Niña*.

Outra avaliação que foi possível realizar se refere à concentração do gelo marinho

na região do Estreito de Bransfield. Observou-se que o comportamento da anomalia nesta área segue correlacionado com as anomalias a noroeste de Weddell, semelhante à análise de outubro. Através da avaliação dos anos em que as cercanias às ilhas Joinville e Elefante apresentaram anomalias negativas ou nenhuma anomalia (Figura 30 b, c, d, h, i, l, m), constata-se que ocorreram, respectivamente, anomalias negativas em Bransfield.

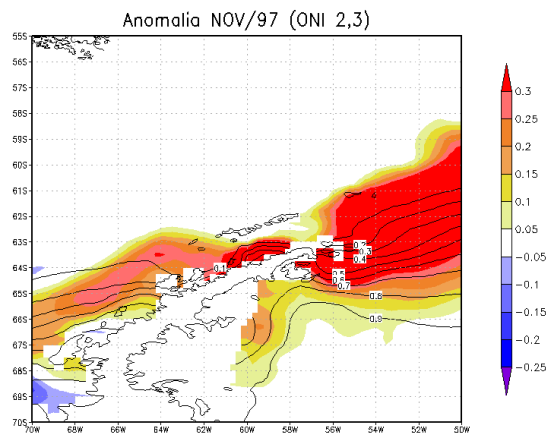
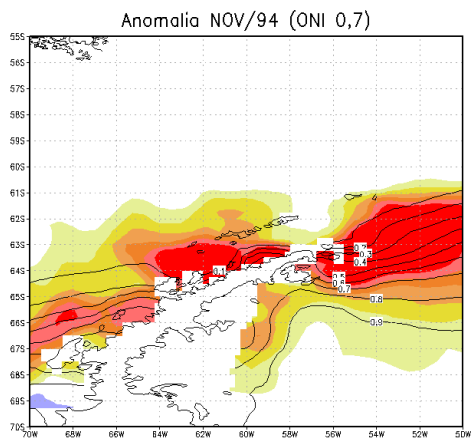
Figura 30 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em novembro (1981-2021).



Continuação da Figura 30 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em novembro (1981-2021).

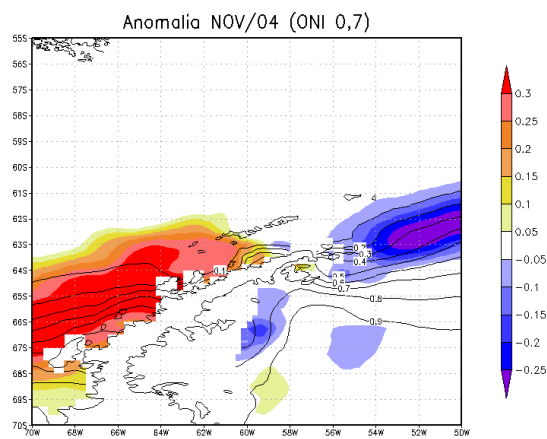
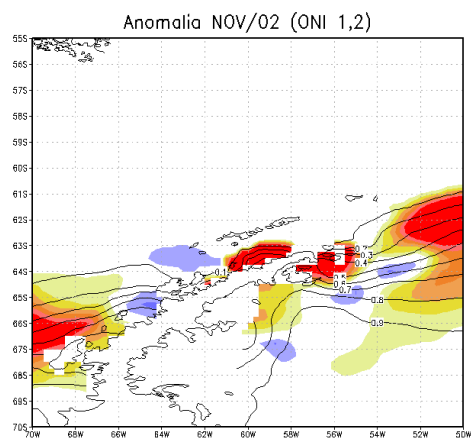
e)

f)



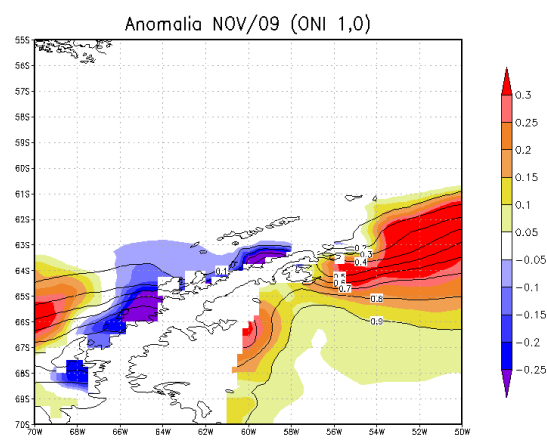
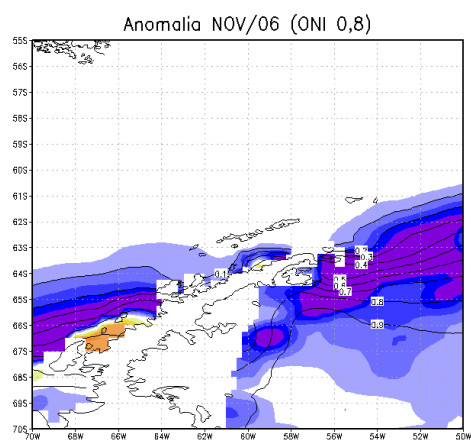
g)

h)

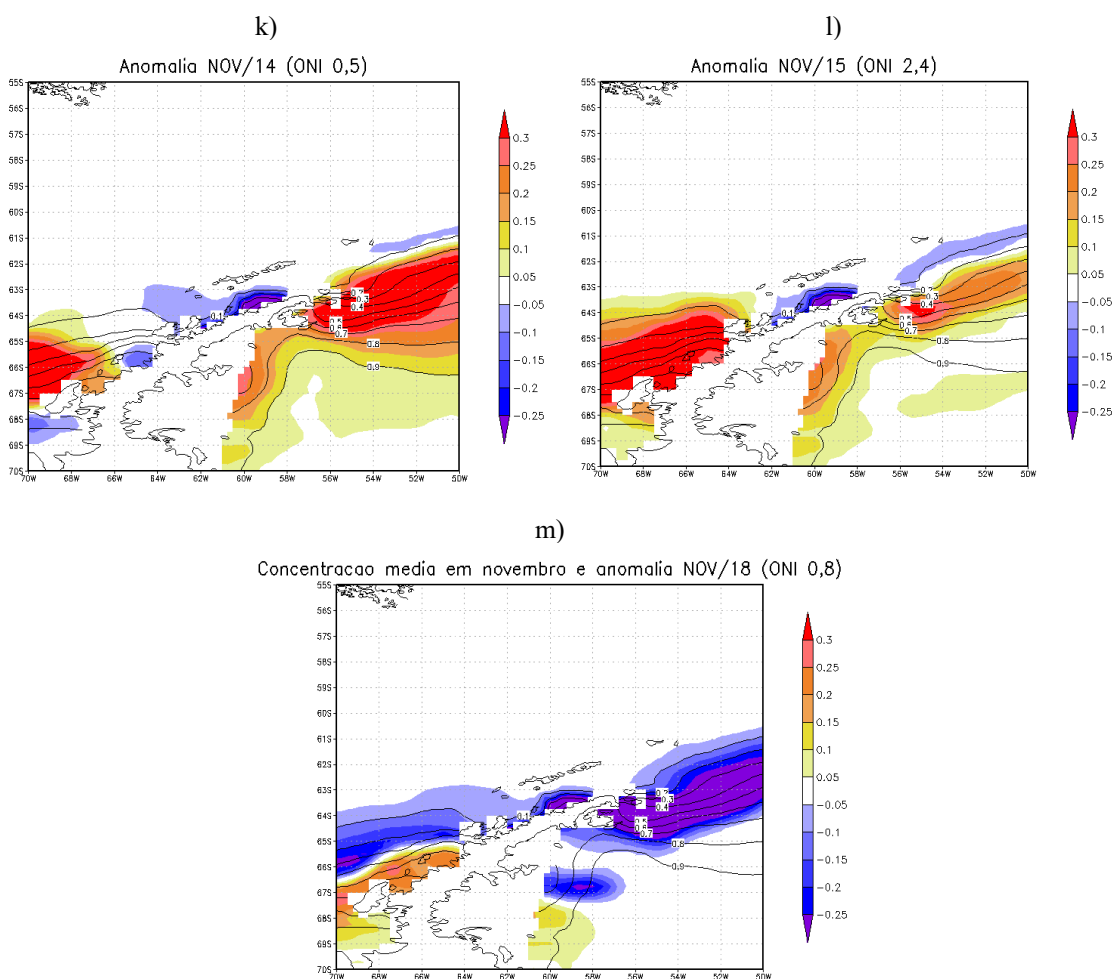


i)

j)



Continuação da Figura 30 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em novembro (1981-2021).

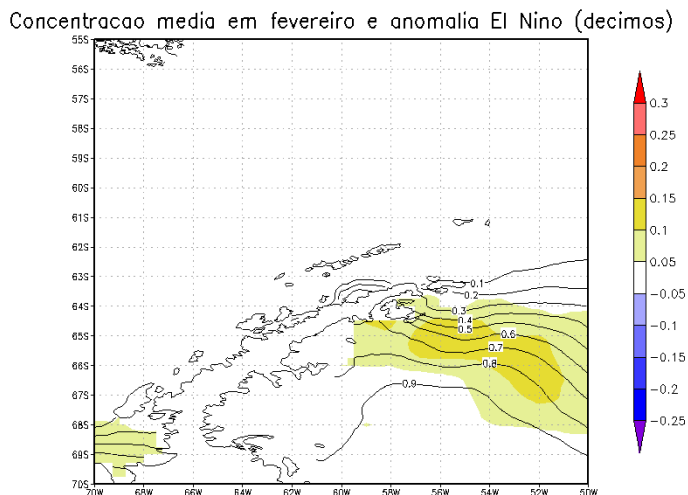


Fonte: o autor.

As avaliações subsequentes se referem ao quadro de anomalias na concentração de gelo constatadas ao longo de fevereiro, março e abril. Os meses em evidência não correspondem apenas ao período de término e transição do verão para o outono, mas também coincidem com o final das operações em águas polares pelos navios da OPERANTAR.

A Figura 31 apresenta o comportamento anômalo na concentração de gelo marinho durante os meses de fevereiro com fase positiva do ENOS.

Figura 31 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em fevereiro (1981-2021).

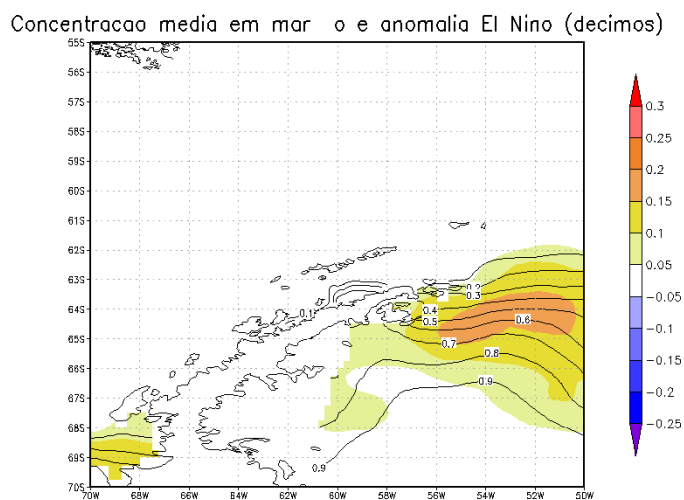


Fonte: o autor.

A análise da Figura 31 mostra que o desenvolvimento da anomalia positiva de concentração de gelo marinho ocorre principalmente no Mar de Weddell. As anomalias apresentam pequena intensidade e os valores mais significativos se localizam mais afastados da área da OPERANTAR. Apesar disso, há de se destacar a ocorrência dessas anomalias, uma vez que o mês em análise se encontra no verão.

Durante o mês de março com ocorrência de *El Niño*, há aumento da anomalia da concentração de gelo, tanto na intensidade quanto na abrangência espacial (Figura 32). Tal como observado em fevereiro, o desenvolvimento do campo de anomalias médias acompanha a área de formação do gelo, a leste da Península Antártica. Igualmente, observou-se que as variações anômalas mais significativas ocorrem a Sudeste do Golfo de Erebus e Terror. Há de se destacar, no entanto, que as anomalias de menor intensidade (de 0,10 a 0,15), verificadas no Golfo contribui para a elevação da concentração de gelo para valores entre 0,30 e 0,55. Concentrações de gelo marinho como esses possivelmente dificultam a execução de operações com navios, principalmente por se tratar de uma área com poucas áreas de acesso e saída e a presença de muitos *icebergs* de grandes proporções.

Figura 32 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em março (1981-2021).

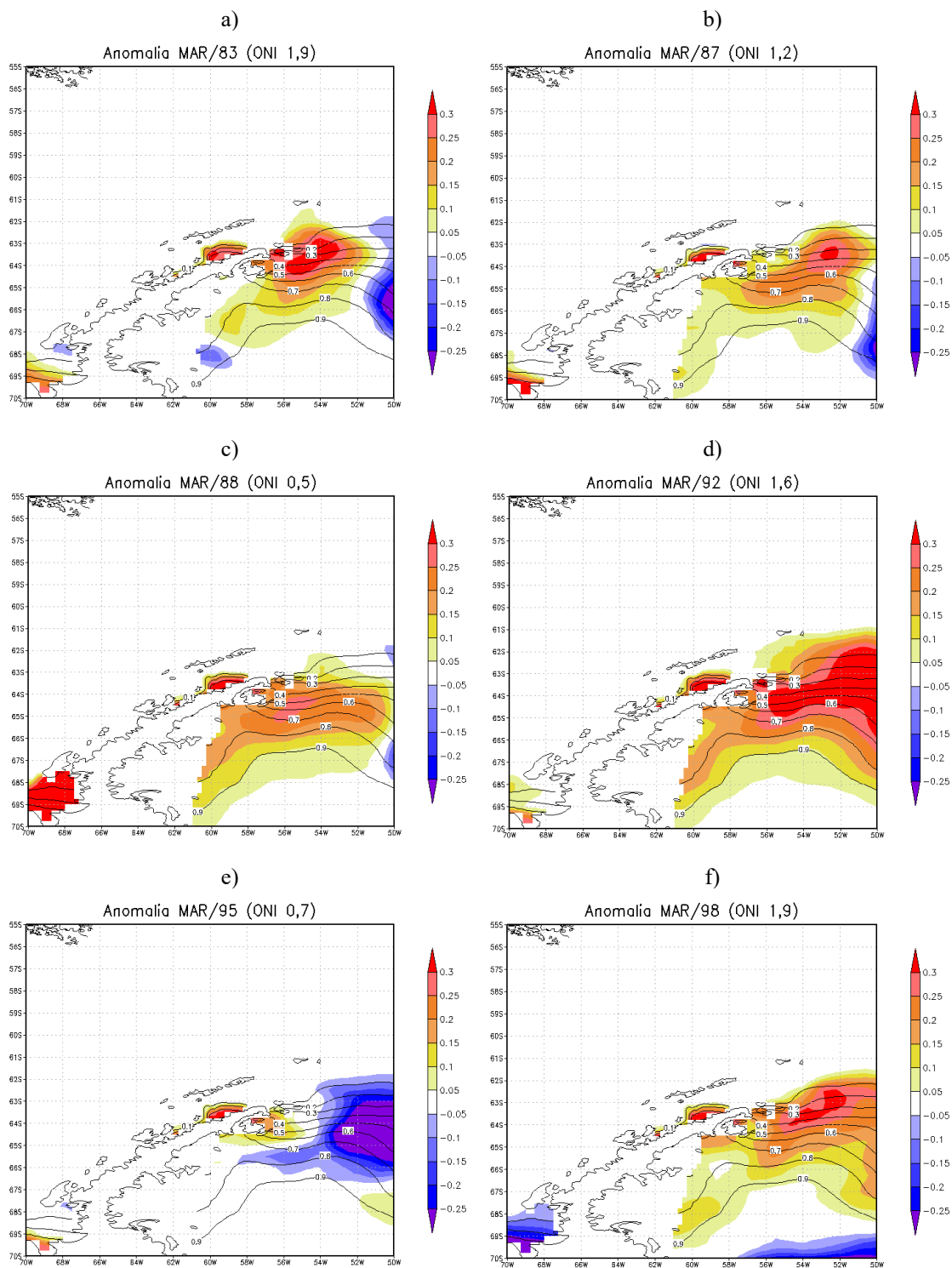


O estudo das anomalias encontradas ao longo de março ainda contou com uma análise mais detalhada (Figura 34), tal como as realizadas para os meses de outubro e novembro. A avaliação visual permitiu contabilizar, dentro dos 12 episódios de *El Niño*, a ocorrência de 9 anomalias positivas de média e grande intensidade nas proximidades do Estreito Antártico e Mar de Weddell.

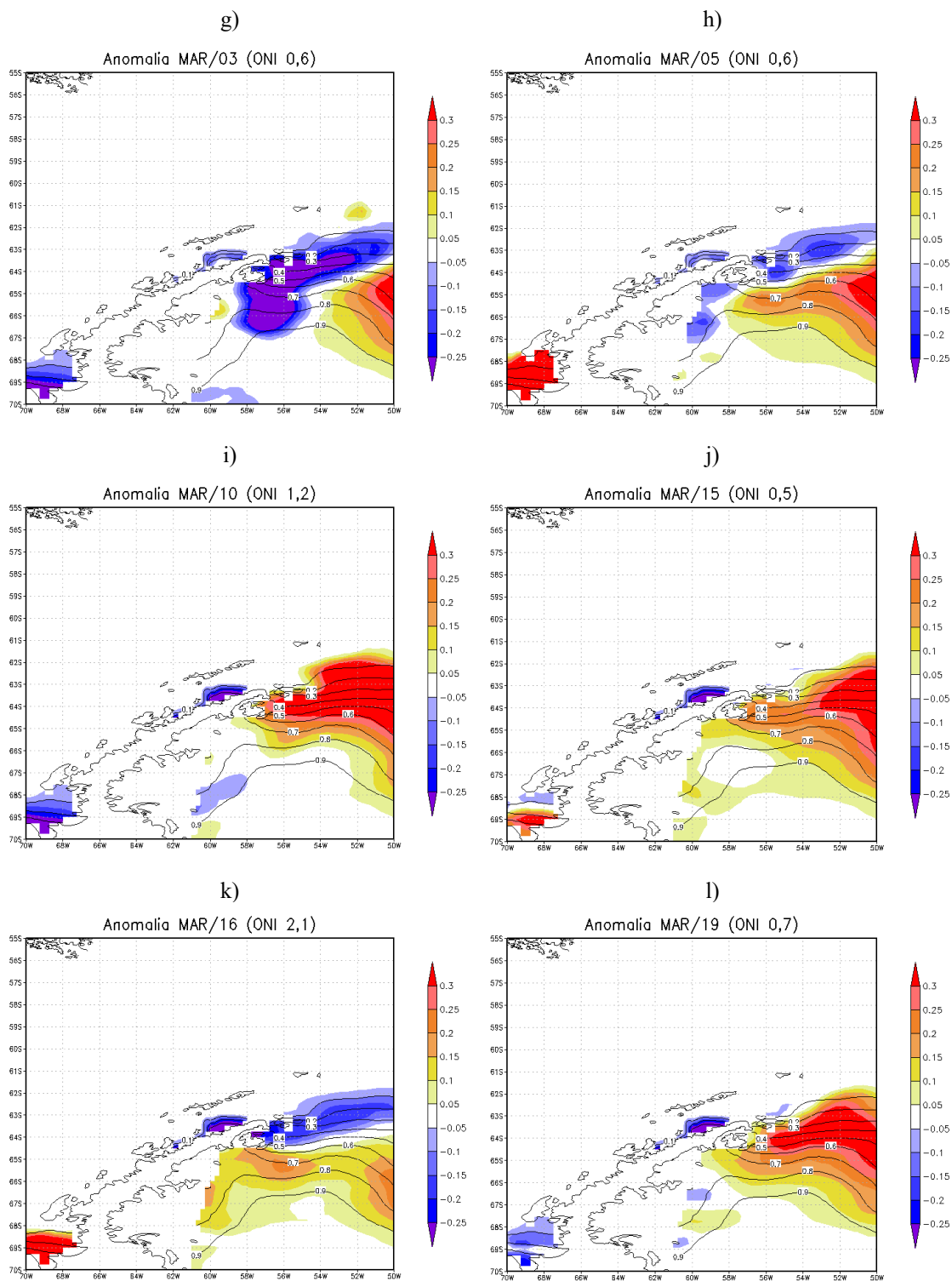
O Estreito de Bransfield também apresenta interessantes resultados, ainda que a média da anomalia em março seja nula nesta área. Analisando os eventos, percebeu-se que 6 destes apresentaram anomalias positivas de grande intensidade na região. Os demais casos apresentaram anomalias negativas de média (2 episódios) e alta intensidade (4 ocorrências). Dentre as variações negativas nesta área, 5 delas exibiram o mesmo comportamento de anomalia no norte do Mar de Weddell e no Estreito Antártico, semelhante ao padrão encontrado nas análises de outubro e novembro. Apenas o evento de 2010 não apresentou sinais de variações negativas no Norte de Weddell. Portanto, fica mais clara a conexão entre as anomalias de gelo, positivas ou negativas, entre o norte/noroeste de Weddell e o sul do Estreito de Bransfield.

Também foi possível notar que os eventos cujas anomalias negativas apresentaram maiores intensidades e extensão (Figura 34 e, g, h, k) ocorreram em meses próximos do fim de um período de *El Niño*. Evidenciou-se ainda que estes episódios de *El Niño* tiveram curta duração e/ou pequeno índice ONI.

Figura 33 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em março (1981-2021).



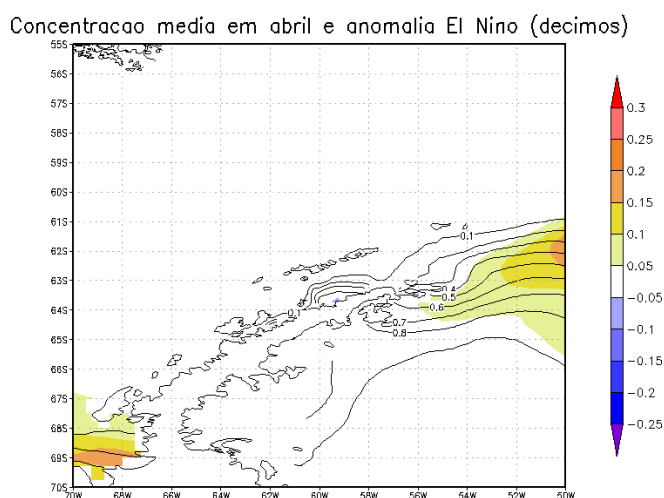
Continuação da Figura 33 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em março (1981-2021).



Fonte: o autor.

A análise do comportamento das anomalias de concentração em abril (Figura 34) mostra a ocorrência de anomalias no Mar de Weddell, afastadas da península Antártica, e no sul do Mar de Bellingshausen. Esta análise média, entretanto, apresenta comportamento bastante diferente das anomalias que ocorreram durante os episódios de *El Niño* durante o mês de abril (Figura 35).

Figura 34 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia média da concentração durante eventos *El Niño* (hachurado) em abril (1981-2021).



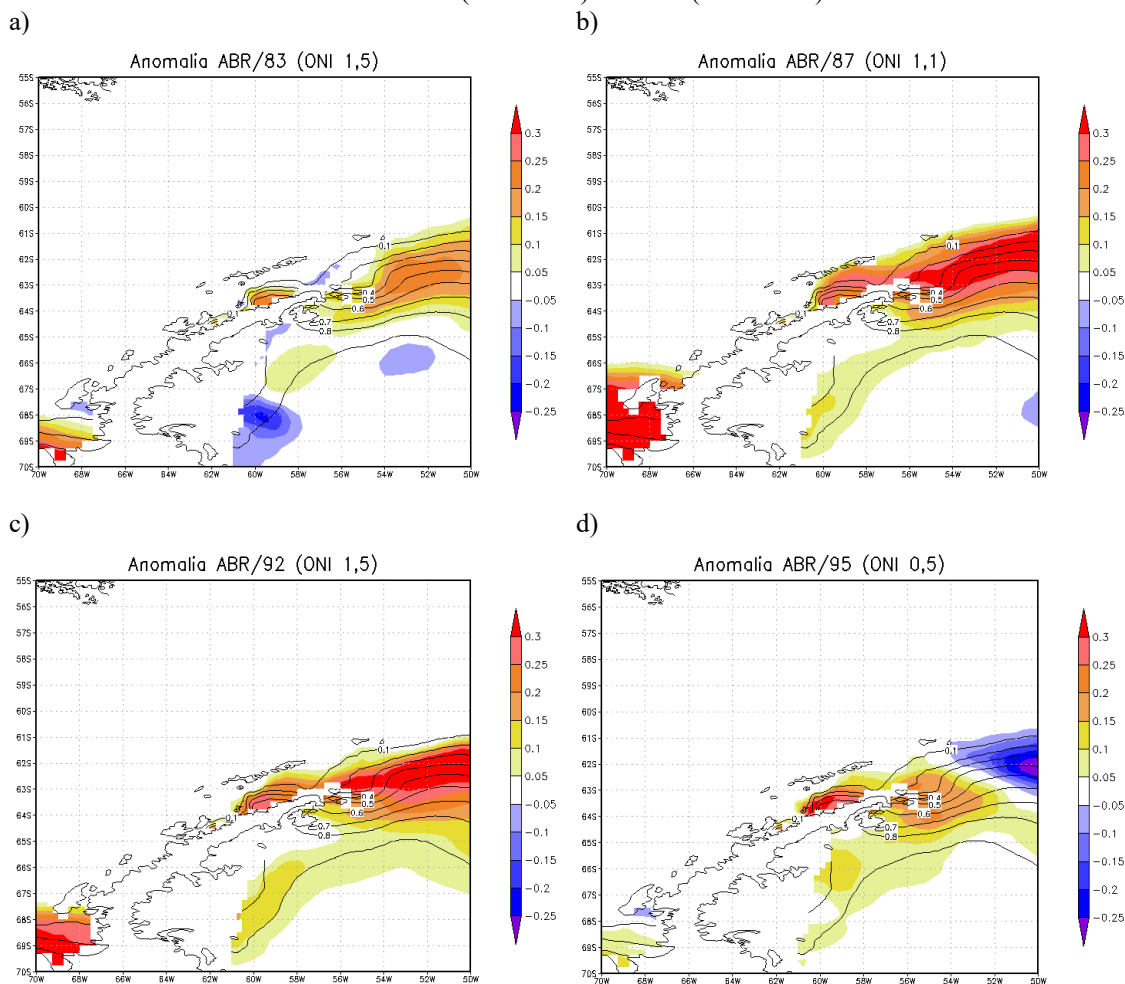
Fonte: o autor.

A análise da Figura 35 permite observar que, dentre os 9 episódios de *El Niño* em abril, 5 apresentaram anomalias positivas de média e/ou alta intensidade tanto no Estreito Antártico (e adjacências do Mar de Weddell), quanto no estreito de Bransfield. Os outros 4 eventos evidenciam anomalias negativas cuja intensidade é média e/ou elevada. Infere-se, portanto, que os valores próximos a zero nas regiões do mapa de anomalias médias em abril não significam a ausência de anomalias, mas refletem a variabilidade do sinal da anomalia. Esta imprecisão pode significar tanto uma região livre de gelo marinho, quanto uma cobertura de gelo que varia entre 0,35 e 0,80. Para um navegante nesta área, levar em consideração a possibilidade de grandes anomalias positivas em abril devido à ocorrência de *El Niño* pode significar um planejamento logístico efetivo e livre de intempéries.

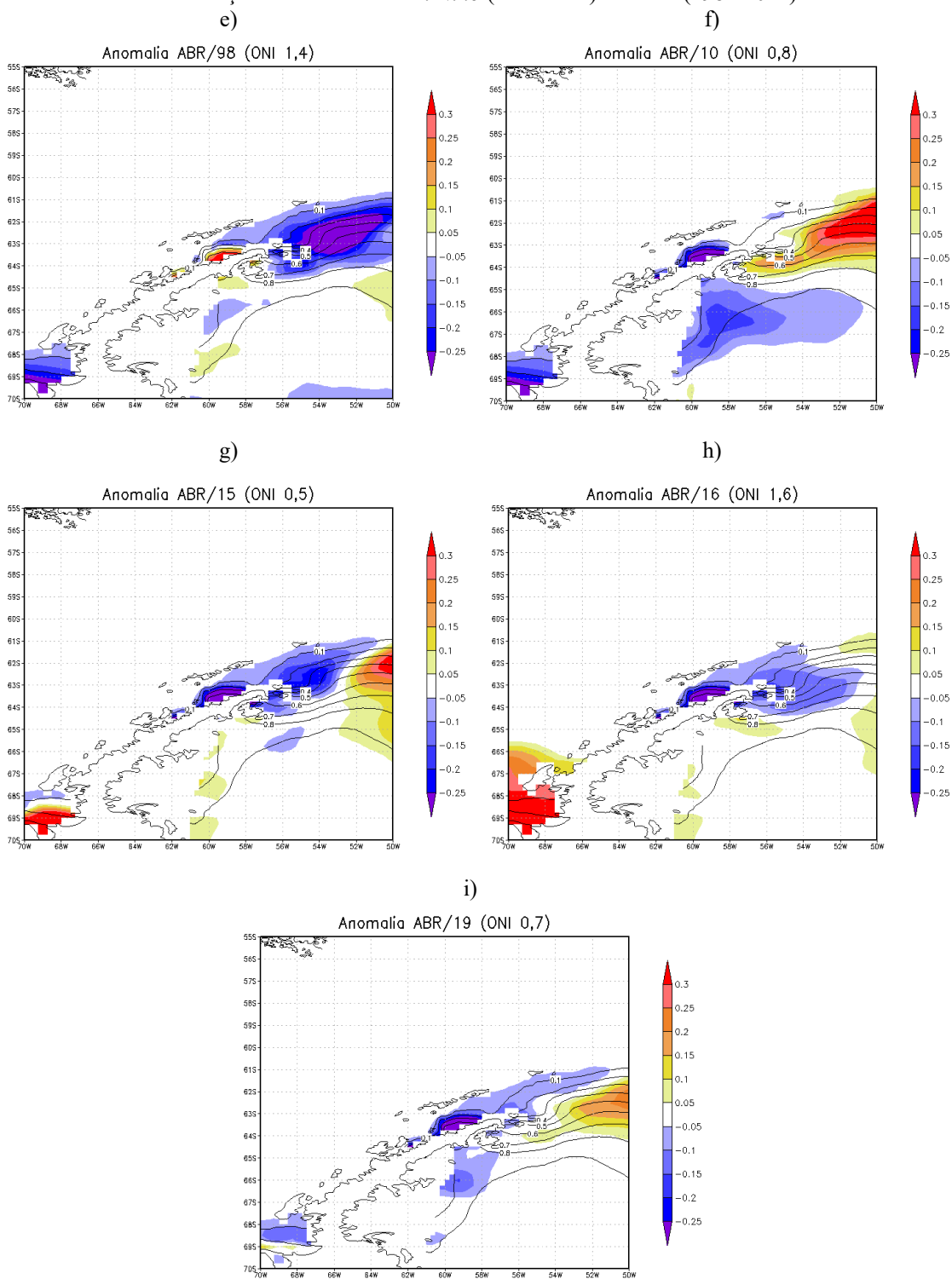
Duas observações a respeito das análises dos meses de abril com *El Niño* corroboram com constatações anteriores: anomalias negativas em Bransfield ocorrem

quando também são observadas anomalias negativas/ausência de anomalias na região entre as Ilhas Joinville e Elefante. Isso reforça a hipótese de que o comportamento das anomalias no Estreito de Bransfield esteja atrelado às condições de anomalia entre estas duas ilhas e a à deriva do gelo de Leste para Oeste neste Estreito; e eventos com anomalias negativas de maior intensidade e maior abrangência espacial, como os de 1998, 2010 e 2016 (Figura 35 e, f, h), ocorreram próximos ao final de um evento *El Niño* (e início de *La Niña*), ou, como os casos de 2010 e 2019 (Figura 35 f, i), correspondem a eventos de *El Niño* de pequena duração (inferior a 1 ano).

Figura 35 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em abril (1981-2021).



Continuação da Figura 35 - Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *El Niño* (hachurado) em abril (1981-2021).



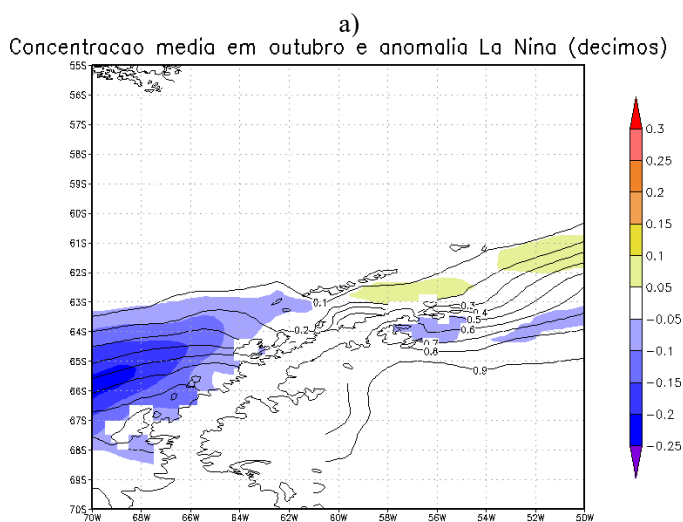
5.3. Anomalia da concentração de gelo - Eventos *La Niña*

Os resultados obtidos a partir das análises para concentração de gelo em meses de eventos ENOS positivos suscitaram o interesse de se avaliar também o comportamento da camada de gelo em períodos de *La Niña*.

Serão apresentados os casos de *La Niña* com padrão de anomalia de concentração de gelo marinho mais proeminente, que ocorreram nos meses de março, abril, outubro e novembro (Figura 36 e Figura 37).

Uma análise preliminar das anomalias médias para cada um dos meses em destaque apresenta um padrão de comportamento que tende a ser oposto ao retratado durante os eventos *El Niño*. Em outubro e novembro (Figura 36 a, b), por exemplo, evidenciam-se anomalias médias negativas de pequena, média e alta intensidades na concentração de gelo ao longo do Mar de Bellingshausen e na parte oeste do Estreito de Bransfield. Já em março e abril (Figura 36 c, d), as anomalias negativas predominam no norte do Mar de Weddell e no Estreito Antártico.

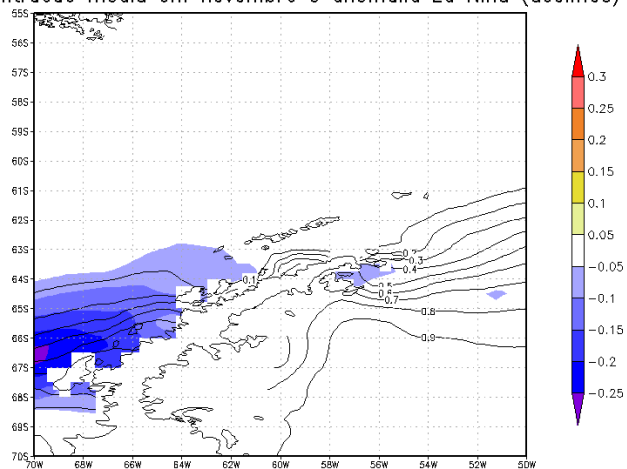
Figura 36 - Concentração média (linhas pretas) e respectivas anomalias médias da concentração de gelo durante eventos *La Niña* (hachurado) nos meses de outubro (a), novembro (b), março (c) e abril (d) (1981-2021).



Continuação da Figura 36

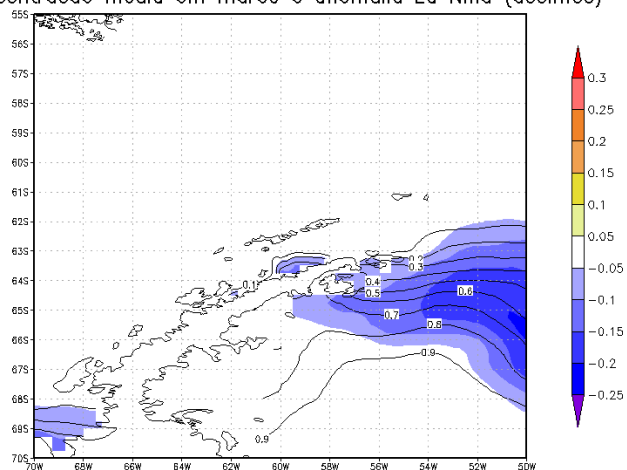
b)

Concentração média em novembro e anomalia La Nina (decimos)



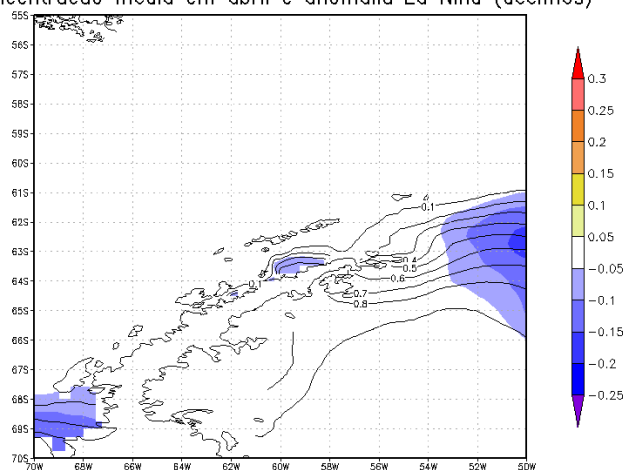
c)

Concentração média em março e anomalia La Nina (decimos)



d)

Concentração média em abril e anomalia La Nina (decimos)



Fonte: o autor

Em cada um desses pares de meses (outubro-novembro e março-abril), as áreas de

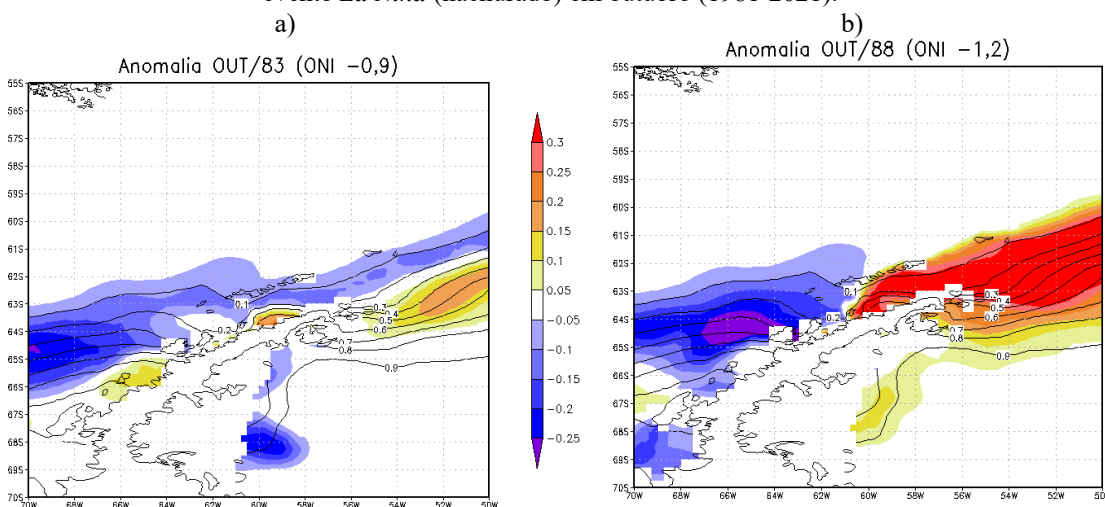
maior intensidade de anomalias negativas, durante os eventos *La Niña*, também representam as localidades cujas anomalias positivas tiveram maior abrangência e intensidade durante os eventos *El Niño*. Isso corrobora com os resultados de Carrasco (2019). Há de se ressaltar, todavia, que a ocorrência de uma anomalia média positiva de pequena intensidade ao longo do Estreito de Bransfield e da região a oeste da Ilha Elefante, durante o mês de outubro, não foi encontrada em trabalhos anteriores.

A constatação desse resultado, ligeiramente distinta das expectativas, ensejou a análise de cada caso de *La Niña*, tal como realizado no estudo acerca da influência do *El Niño*. Os 12 eventos de *La Niña* em outubro são apresentados na Figura 37.

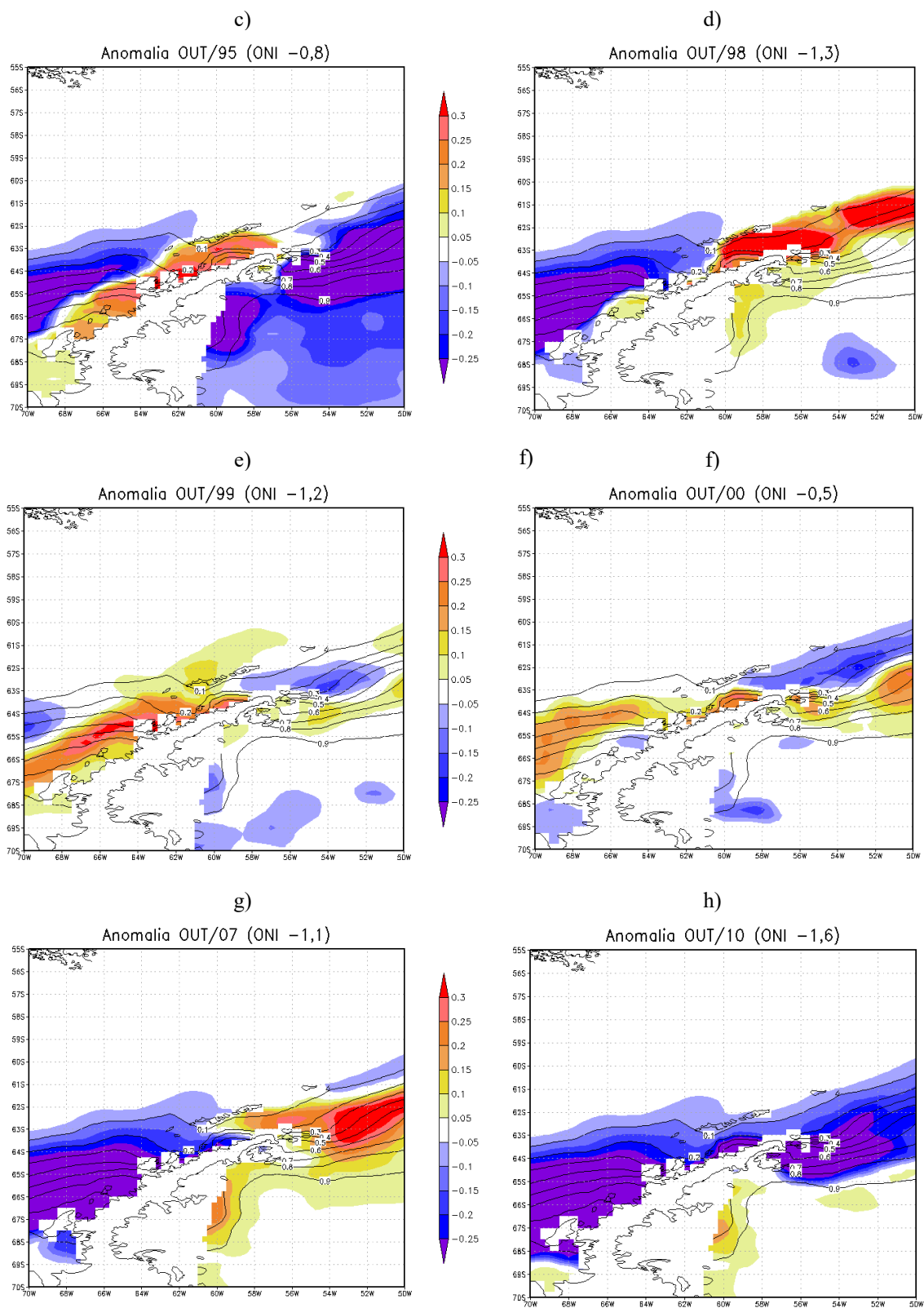
A primeira consideração que se pode tecer diz respeito ao número de vezes em que ocorreram anomalias positivas no Estreito de Bransfield, um total de 8 dos 12 casos. Desta totalidade, metade dos eventos apresentaram anomalias positivas de alta intensidade, enquanto a outra parcela mostrou anomalias moderadas. A região a norte do Mar de Weddell e a leste da Ilha Elefante também observou, em ao menos 7 eventos, anomalias positivas significativas, das quais 4 atingiram uma grande intensidade e 3 de intensidade mediana.

Estes casos positivos demonstraram que, mesmo durante períodos de *La Niña*, a cobertura de gelo ao sul das Ilhas Shetland do Sul alcançou, mais de uma vez, concentrações de até 0,4. Um percentual como este é de fato relevante, uma vez que pode dificultar o início das operações de pesquisa da OPERANTAR e do apoio logístico à Estação Antártica Comandante Ferraz.

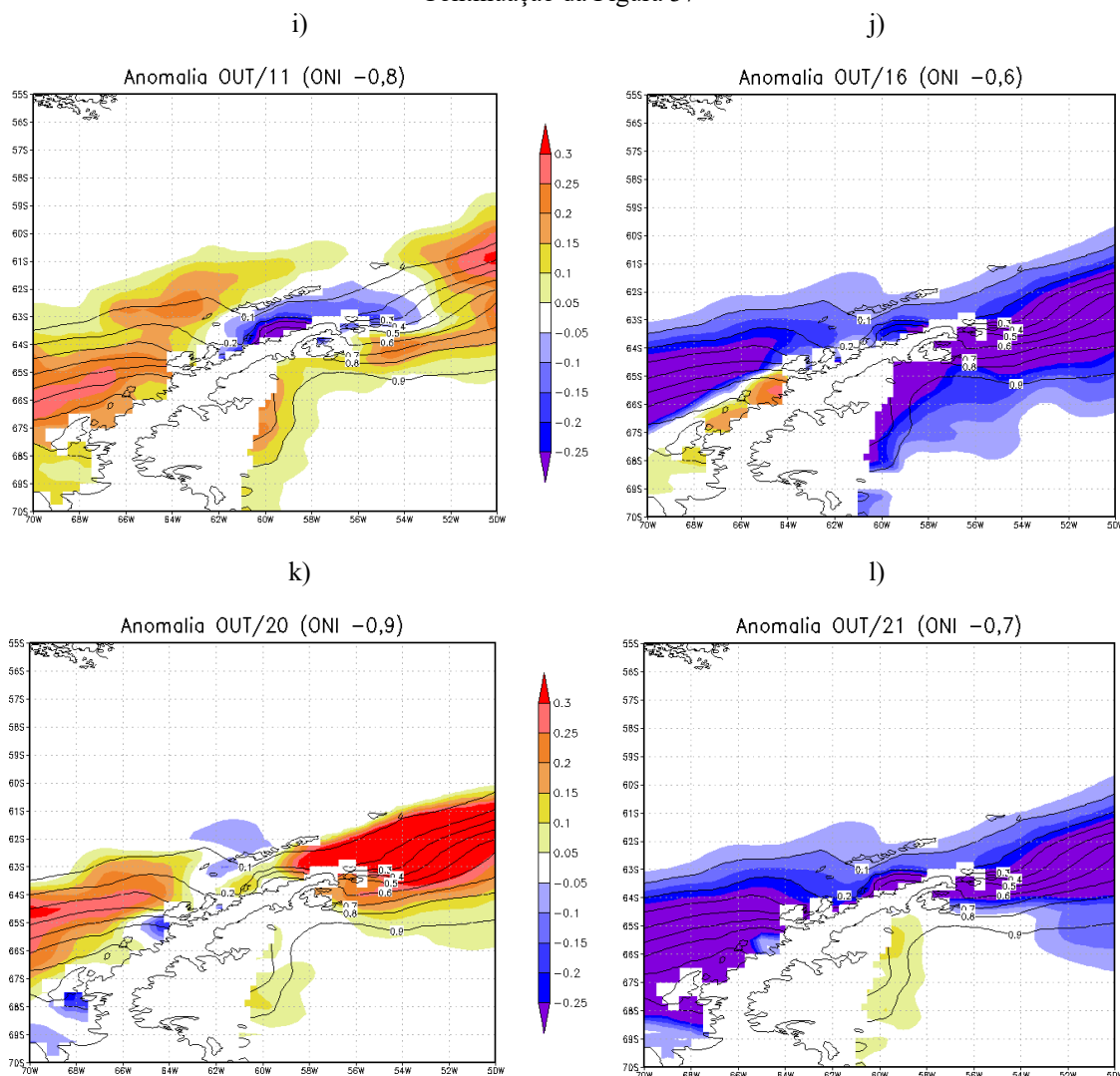
Figura 37 – Concentração média de gelo marinho (linhas pretas) e anomalia da concentração em cada evento *La Niña* (hachurado) em outubro (1981-2021).



Continuação da Figura 37



Continuação da Figura 37



Fonte: o autor

Em que pese a constatação das ocorrências de anomalias positivas na concentração de gelo marinho durante eventos *La Niña*, não foi possível realizar uma análise qualitativa desses casos. O estudo não conseguiu associar o desenvolvimento das anomalias neste mês à intensidade do índice ONI ou mesmo a duração de cada episódio de *La Niña*.

Esta impossibilidade de vinculação dos parâmetros em estudo torna presumível que fenômenos ENOS em fase negativa não possuem mesmo impacto que aqueles de fase positiva no que tange às teleconexões com a concentração de gelo. Desta forma, em períodos de *La Niña*, o gelo marinho aparentemente estaria mais suscetível a outros eventos e variáveis meteorológicas/climatológicas, cujo estudo se mostra interessante em

pesquisas futuras.

5.4. Correlações entre ONI e anomalias de gelo

A avaliação visual dos campos de anomalias da concentração de gelo durante a ocorrência de eventos ENOS de fase positiva e negativa, fomentou que este estudo buscasse também avaliar os impactos do *El Niño/La Niña* do ponto de vista estatístico. A análise buscou em um primeiro momento apreciar o grau de correlação existente entre o ENOS (índice ONI) e a concentração de gelo. Além disso, examinou-se a possibilidade de existir alguma defasagem temporal entre a intensidade do fenômeno e a resposta na concentração de gelo, por meio de correlações cruzadas entre a concentração de gelo em um determinado mês e os índices ONI calculados no próprio mês e nos meses anteriores e posteriores

O estudo avaliou a correlação em cada uma das posições, que representam as áreas de interesse da OPERANTAR, e que foram apresentadas no capítulo 4 deste trabalho (Figura 20).

Os resultados a partir desta análise correlacional, no entanto, não atingiram as expectativas tal como observado na análise dos campos de anomalias. Os gráficos obtidos para avaliação da correlação (Figura 38) demonstram que nenhum dos pontos apresenta uma correlação forte (acima de 0,7). Os pontos 1, 2, 4 e 5 (Figura 38 a, b, d, e), representando, respectivamente o Golfo de Erebus e Terror, o Estreito Antártico e o Estreito de Bransfield, apresentaram os menores índices de correlação, todos eles inferiores a 0,3. Uma possível justificativa para essa baixa correlação seria a condição geográfica dessas localidades, que são menores, mais estreitas e fechadas, que podem torná-las mais suscetíveis a variabilidades/fatores locais (meso e microescala), como as correntes marítimas, do que a efeitos de macroescala, relacionados às teleconexões.

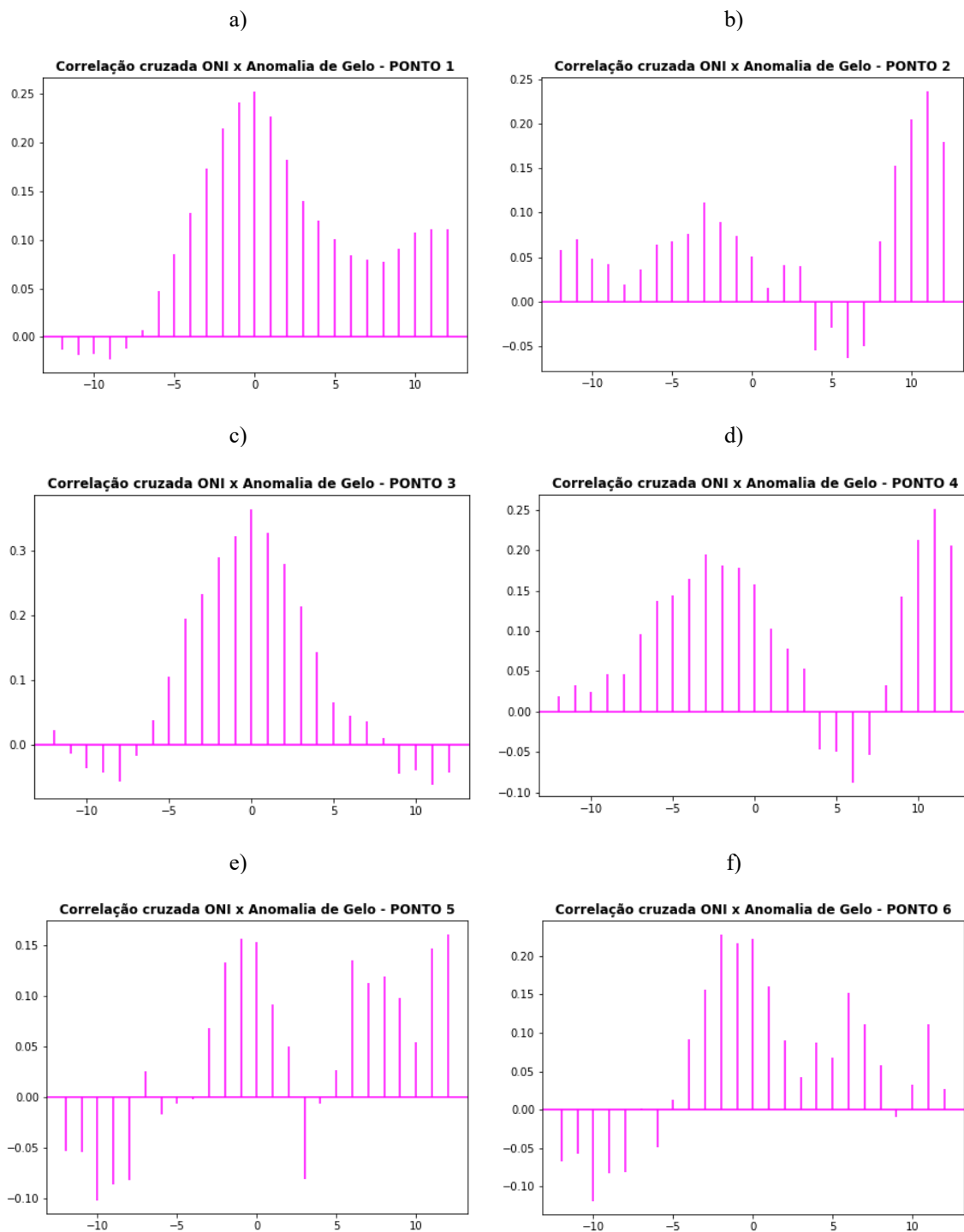
Os pontos 3, 6, 7 e 8 (Figura 38 c, f, g, h), por sua vez, apresentaram uma correlação um pouco melhor, apresentando valores entre 0,3 e 0,4. A análise destes pontos no sentido Leste-Oeste (6-7-8-3) permitiu a visualização de uma defasagem temporal entre o valor de ONI e as anomalias de gelo. Conforme os pontos se distanciam do Mar de Bellingshausen (em direção a Leste), ocorre um retardo entre a ocorrência do valor de ONI e a sua resposta na anomalia da concentração de gelo. Enquanto o ponto 6, mais a

leste, nas proximidades da Ilha Elefante, apresenta a maior correlação das anomalias de gelo com os índices ONI calculados 3 meses antes, os pontos 7 e 8, ao norte das Shetland do Sul, apresentam a mesma condição de magnitude da correlação com os índices defasados de 2 e 1 mês, nesta ordem. Por sua vez, o ponto 3, localizado no Estreito de Gerlache apresenta maior valor de correlação sem defasagem temporal, ou seja, a intensidade do ENOS tem resposta sobre a concentração do gelo marinho no mesmo mês em que ocorre.

O ponto 9 (Figura 38 i) se encontra posicionado na área do Mar de Bellingshausen onde foram verificadas anomalias positivas na concentração de gelo superiores a 0,3 durante os meses de outubro e novembro com ocorrência de *El Niño*. O cálculo da correlação para esta localidade foi o mais alto encontrado, sendo ligeiramente superior a 0,6. O valor, entretanto, atinge apenas um grau moderado de correlação. Nesse ponto também não se verificou defasagem temporal entre o índice (intensidade do fenômeno ENOS) e a resposta da concentração da camada de gelo.

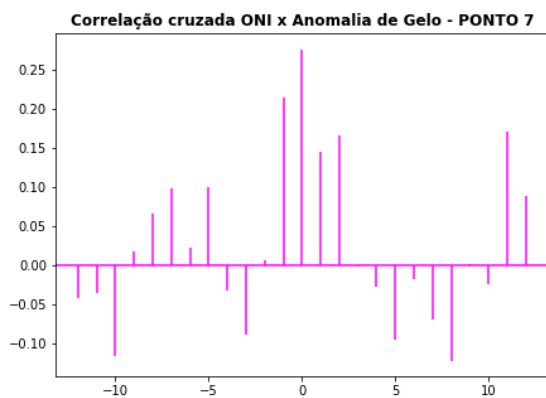
É possível que a alteração das condições amostrais deste procedimento estatístico, como a alteração da análise de pontos para áreas, venha a alterar a correlação. Todavia, há de se destacar que, através do viés analítico escolhido para o estudo, foi possível verificar a existência de certo grau de correlação positiva entre o fenômeno ENOS em suas diferentes fases e as anomalias de concentração de gelo nos pontos escolhidos. Além disso, os pequenos valores das correlações encontradas é um indicativo que o comportamento do gelo marinho nessa região pode ser afetado por outros fenômenos meteorológicos e oceanográficos, em diferentes escalas espaciais e temporais, cuja ocorrência pode ser simultânea aos eventos ENOS.

Figura 38 – Representação gráfica das correlações cruzadas entre índices ONI e a anomalia de gelo em cada ponto. O eixo das abscissas representa a defasagem temporal, em meses, do índice ONI com relação à concentração mensal. O eixo das ordenadas indica a magnitude da correlação.

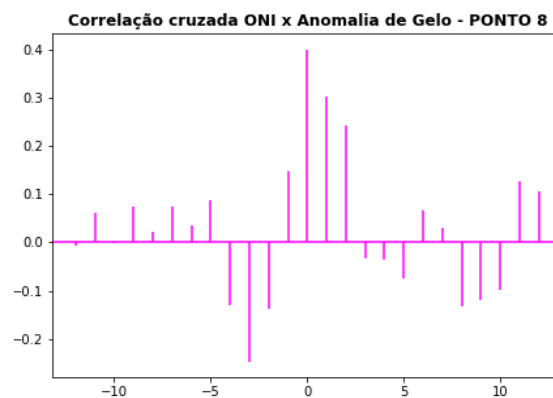


Continuação da Figura 38

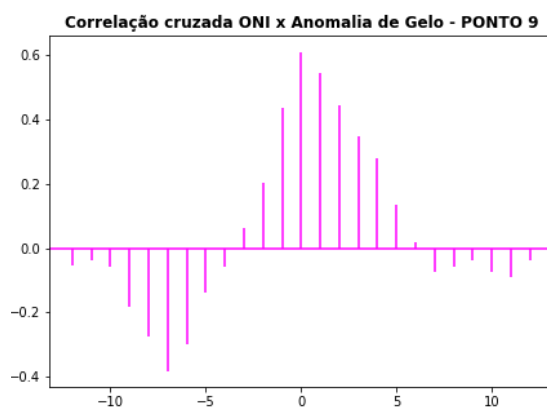
g)



h)



i)



Fonte: o autor.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou de maneira mais objetiva os impactos do fenômeno ENOS, por meio de teleconexões atmosféricas, sobre a concentração de gelo marinho nas áreas específicas de operações da Marinha no continente antártico. As análises desenvolvidas a partir dos campos de anomalias da concentração de gelo ao longo dos meses de interesse permitiram verificar, de maneira abrangente, os efeitos da ocorrência do fenômeno *El Niño/La Niña* sobre o ritmo anual de crescimento e redução do gelo, que se estabelece no entorno da Península Antártica.

Durante eventos *El Niño*, verificou-se que o mês de outubro, em média, possui forte tendência a apresentar grandes anomalias positivas de concentração de gelo marinho e a expansão dos campos de gelo em direção a menores latitudes, inclusive ao sul da Passagem de Drake. Todas as áreas ao redor da Península Antártica e nas proximidades das Ilhas Shetland do Sul apresentam retardo no derretimento do gelo marinho, principalmente no Mar de Bellingshausen, Estreito de Gerlache e oeste do Estreito de Bransfield. Em menor intensidade, o Golfo de Erebus e Terror, no mar de Weddell, e o Estreito Antártico também apresentam anomalias positivas de gelo. No entanto, é preciso destacar que o norte do Mar de Weddel, de acordo com a climatologia apresentada, normalmente possui médias a altas concentrações de gelo no mês de outubro. Portanto, pequenas anomalias positivas de gelo implicam em uma cobertura de gelo praticamente compacta, o que inviabilizaria qualquer trabalho a ser realizado nas Ilhas Joinville, Vega, James Ross e Marambio durante o mês de outubro com a ocorrência de *El Niño*.

Nos eventos *El Niño* em outubro, conforme os resultados apresentados para os anos de 1982, 1986, 1987, 1994 e 2015, o padrão de anomalias evidencia a ocorrência da deriva de gelo pela CCA, transportando o gelo do Mar de Bellingshausen, onde os eventos ENOS agem mais diretamente, em direção ao Drake Sul e o norte das Ilhas Shetland do Sul. Esse comportamento da deriva do gelo pode afetar o início da operação com navios, conforme ocorreu no ano de 2015, devido às altas concentrações de gelo observadas no Drake Sul e no entorno das Ilhas Shetland do Sul, dificultando o acesso à Ilha Rei George.

Meses de novembro sob influência de *El Niño* apresentam intensas anomalias positivas de gelo sobre o mar de Bellingshausen, porém mais retraídas em direção ao sul, o que reduziria o efeito de deriva do gelo pela Corrente Circumpolar Antártica em direção

ao Drake Sul. Em média, as regiões dos Estreitos de Gerlache e Antártico, o sul e oeste do Estreito de Bransfield e o Golfo de Erebus e Terror apresentam anomalias positivas médias. Estas condições anômalas podem continuar a interferir na consecução da OPERANTAR, principalmente no que tange ao lançamento de acampamentos e desenvolvimento de pesquisas nessas áreas, o que pode vir a levar ao adiamento dessas operações para os meses de dezembro em diante.

Nos meses de março e abril em fase positiva do ENOS, ocorrem anomalias positivas da concentração de gelo com maior intensidade sobre as regiões do Estreito Antártico, do Golfo de Erebus e Terror e no norte do Mar de Weddell. Também é possível destacar que metade dos eventos analisados também apresentam anomalias positivas no Estreito de Bransfield. As constatações de tendências de concentrações de gelo anômalas neste período podem auxiliar em planejamentos futuros da OPERANTAR. Isto porque estas condições de gelo podem inviabilizar as operações nessas regiões ou até mesmo dificultar a logística de retorno dos Navios, na fase final de operação em águas antárticas. Essa informação também pode auxiliar na programação do recolhimento antecipado de acampamentos em localidades do Estreito Antártico e do Golfo de Erebus e Terror, notadamente as Ilhas Vega, James Ross e Marambio.

As análises dos campos de gelo possibilitaram observar que a ocorrência de anomalias de gelo negativas (ou anomalias positivas de menor intensidade) durante eventos *El Niño* ocorrem próximos à mudança de fase ENOS, ou seja, após eventos *La Niña* recém-concluídos ou em vias de iniciar, especialmente durante *El Niño* de curta duração e pequena intensidade (baixos valores de ONI).

Também foi possível observar que as anomalias positivas de gelo marinho no Estreito de Bransfield parecem estar relacionadas à ocorrência de anomalias positivas na região entre as ilhas Elefante e Joinville. Isso indica a possibilidade do gelo anômalo observado no Estreito de Bransfield ser transportado por meio da deriva de um ramo da Corrente Costeira Antártica, de Leste para Oeste, proveniente de Weddell e que contorna a Ilha Joinville em um giro anti-horário.

A avaliação dos efeitos da *La Niña* sobre a região de estudo mostrou, de maneira geral, que o fenômeno contribui para a redução da concentração média de gelo marinho em todas as áreas, exceto em Bransfield. Todavia, nos meses de outubro sob influência da fase negativas do ENOS, foram observados eventos com anomalias positivas de grande

intensidade ao longo do Estreito de Bransfield e norte do Mar de Weddell, e de média intensidade no Estreito antártico e no Golfo de Erebus e Terror, o que pode estar relacionado à persistência dos efeitos da fase ENOS observada em meses anteriores.

Os impactos do ENOS sobre a concentração de gelo foram verificados ainda sobre a ótica da correlação entre a anomalia de gelo e o índice ONI. Os resultados alcançados, no entanto, não foram tão expressivos quanto aqueles obtidos pelos campos de gelo. Dentre os 9 pontos utilizados para se estabelecer a métrica estatística, observou-se que apenas 1 ponto apresentou correlação moderada (0,6), sem defasagem temporal entre a anomalia e ONI. Os demais pontos apresentaram uma correlação fraca, com aumento da diferença de fase entre a anomalia e o ONI, de até 3 meses, conforme os pontos estão mais afastados do Mar de Bellingshausen, o que corrobora a possibilidade da deriva de gelo em direção à Passagem de Drake. O efeito do ENOS atingiria primeiramente a área do Mar de Bellingshausen e a deriva do gelo por meio da Corrente Circumpolar Antártica propagaria a anomalia para Leste, ao norte das Ilhas Shetland do Sul.

Cabe observar que as pequenas correlações encontradas podem estar relacionadas ao tamanho das amostras analisadas e à ocorrência de outros fenômenos meteorológicos e oceanográficos simultâneos aos eventos ENOS analisados. Portanto, o ENOS é uma grande forçante para alterações na circulação atmosférica antártica, mas fenômenos atmosféricos com frequências mais altas e as especificidades da disposição do contorno dos continentes e ilhas, da batimetria e das correntes locais podem gerar comportamentos nem sempre homogêneos nas diversas áreas de operações, e que merecem investigação mais aprofundada. Além disso, a correlação pode não ser o melhor método estatístico para a verificação da teleconexão, pois a intensidade do ENOS, conforme apresentado em muitos casos deste trabalho, não tem uma resposta proporcional sobre a cobertura de gelo marinho, o que contribui para a redução da correlação.

O presente estudo mostrou que a ocorrência do fenômeno ENOS é relevante para condição da concentração do gelo marinho, constituindo um elemento a se considerar durante o planejamento da OPERANTAR. A compreensão do fenômeno *El Niño/La Niña* e os seus respectivos efeitos sobre a concentração de gelo marinho, aliado ao acompanhamento dos prognósticos climáticos da fase ENOS, poderá auxiliar os futuros planejamentos das operações antárticas a evitar percalços como os ocorridos no ano 2015.

7. BIBLIOGRAFIA

AUSTRALIA. Bureau Of Meteorology. **The three phases of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO)**. 2022. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/ln-2010-12/three-phases-of-ENSO.shtml>. Acesso em: 24 abr. 2022.

BARNSTON, Anthony *et al.* Documentation of a Highly ENSO-related SST Region in the Equatorial Pacific: research note. **Atmosphere-Ocean**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 367-383, set. 1997. Informa UK Limited.

BARNSTON, Anthony. **Why are there so many ENSO indexes, instead of just one?** 2021. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one>. Acesso em: 24 abr. 2022.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. **Antártica: ensino fundamental e ensino médio**. Coordenação de Maria Cordélia S. Machado; Tânia Brito. Brasília, 2006. 167 p. (Coleção explorando o ensino; v. 9).

BRASIL. Ministério da Defesa. Marinha do Brasil. **Missão Cumprida na 38ª Operação Antártica**. 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/noticias/missao-cumprida-na-38a-operacao-antartica>>. Acesso em: 07 out. 2022

CIRM (Comissão Interministerial para os Recursos do Mar). **Tratado da Antártica & Protocolo de Madri**. 2016. Disponível em: www.marinha.mil.br/secirm/sites/www.marinha.mil.br/secirm/files/tratado-protocolo-madri.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022.

CIRM (Comissão Interministerial para os Recursos do Mar). **A ANTÁRTICA: Sobre o Continente**. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br/proantar/a-antartica>>. Acesso em: 02 set. 2022.

CHM (Centro de Hidrografia da Marinha). **Do Rio de Janeiro Península Antártica**. 2022. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-cartas-raster-10>>. Acesso em: 02 set. 2022.

CARDOSO, M. R. *et al.* **Estudo da anomalia da cobertura de gelo marinho na região do Estreito de Drake sul durante o verão de 2015/2016.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2016.

CARDOSO, M. R. **Estudo da anomalia da cobertura de gelo marinho na região do Estreito de Drake.** 2019. 65 f. Monografia (Especialização) - Curso de Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CARRASCO, J. F. Señales atmosféricas y del hielo marino asociadas a ENOS en el sector norte de la península antártica. **Anales del Instituto de La Patagonia**, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 33-47, maio 2018. Universidad de Magallanes.

CPC (Climate Prediction Center). **Frequently Asked Questions About El Niño and La Niña.** 2012. Disponível em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensofaq.shtml#SOSCILL. Acesso em: 23 abr. 2022.

DASH, M. K. *et al.* Variability in the ENSO-induced southern hemispheric circulation and Antarctic Sea ice extent. **International Journal of Climatology**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 778-783, 11 abr. 2012

DOTY, B.E.; KINTER, J.L. **Visualization Techniques in Space and Atmospheric Sciences.** 1995. Geophysical Data Analysis and Visualization using GrADS. eds. E.P. Szuszcwicz and J.H. Bredekamp, NASA, Washington, D.C., 209-219.

EUA (Estados Unidos da América). National Centers for Environmental Information. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Outgoing Longwave Radiation (OLR).** 2022. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/olr>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

MO, Kingtse C.; WHITE, Glenn H.. Teleconnections in the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, [S.L.], v. 113, n. 1, p. 22-37, jan. 1985. American Meteorological Society.

PSL (Physical Sciences Laboratory). **El Niño Index Dashboard**. 2022. Disponível em: <<https://psl.noaa.gov/enso/dashboard.html>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., BIAVATI, G., HORÁNYI, A., MUÑOZ SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., ROZUM, I., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., DEE, D., THÉPAUT, J.-N. **ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)**. 2018.

HUANG, Boyin *et al.* NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5. **Noaa National Centers For Environmental Information.**, [S.L.], 2017.

IRI (International Research Institute For Climate And Society). **ENSO Essentials**. [2022]. Disponível em: <<https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/enso/enso-essentials/>>. Acesso em: 23 abr. 2022.

KING, J.C.; TURNER, J. **Antarctic Meteorology and Climatology** 5.ed. Cambridge: University Press, 1997. 409p.

KUG, Jong-Seong; JIN, Fei-Fei; AN, Soon-Il. Two Types of El Niño Events: cold tongue el niño and warm pool el niño. **Journal Of Climate**, [S.L.], v. 22, n. 6, p. 1499-1515, 15 mar. 2009. American Meteorological Society.

LIMA, F. U. F. **Interação Trópicos-Extratrópicos, relações com o Oceano Austral e impactos no gelo marinho antártico**. Tese – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LIU, J.; JUDITH, C.; MARTINSON, D. G. **Interpretation of recent Antarctic Sea ice variability**, *Geophysical Research Letters*, 31, 1029, 2004.

MARENSSI SA, SANTILLANA SN, BAUER M. **Estratigrafia, petrografia, sedimentaria y procedencia delas formaciones Sobral y Cross Valley (Paleoceno), isla Marambio (Seymour), Antártica**, *Andean Geol.*, 39, 67–91, 2012.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008.

MAYKUT, G. A. Energy exchange over young sea ice in the central Arctic. **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 83, n. 7, p. 3646-3658, 1978.

MATTOS, L. F. **O Brasil e a adesão ao tratado da Antártica: uma análise de política externa no governo Geisel**. 244 f. Dissertação (Mestrado em Estudos Estratégicos) – Instituto de Estudos Estratégicos, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

MATTOS, L. F. **A Antártica como parte do Entorno Estratégico Brasileiro: revisitando os interesses pelo Sexto Continente**. In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DE DEFESA, 9., 2016, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ENABED, 2016.

MIGUENS, Altineu Pires. **Navegação: A Ciência e a Arte**. Vol. 3: Navegação Eletrônica e em Condições Especiais. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Rio de Janeiro, 2000. 878p.

NSIDC (NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER) – **All about Sea Ice**. 2022a. Disponível em: <<https://nsidc.org>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

NSIDC (NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER) – **Sea Ice: Overview**. 2022b. Disponível em: <<https://nsidc.org/learn/parts-cryosphere/sea-ice>>. Acesso em: 03 nov. 2022.

SÁ, J. P. M. de. **Applied Statistics: using spss, statistica, matlab and r**. 2. ed. Porto: Springer Berlin, Heidelberg, 2007. 505 p.

SIMÕES, J.C. **O ambiente antártico: domínio de extremos**. In: *Antártica e as Mudanças Globais: um desafio para a humanidade*. São Paulo, Edgard Blucher, p. 15–27, 2011.

SOUZA, C. A. de; REBOITA, M. S. Ferramenta para o monitoramento dos padrões de teleconexão na América do Sul. **Terra e Didática**, Campinas, SP, v. 17, 2021.

THOMPSON, Andrew. **Antarctic Circumpolar Current**. 2022. Disponível em: <http://web.gps.caltech.edu/~andrewt/research/acc.html>. Acesso em: 22 abr. 2022.

THOMPSON, Andrew *et al.* The Antarctic Slope Current in a Changing Climate. **Reviews Of Geophysics**, [S.L.], v. 56, n. 4, p. 741-770, dez. 2018. American Geophysical Union (AGU).

TURNER, John. The El Niño-southern oscillation and Antarctica. **International Journal of Climatology**, [S.L.], v. 24, n. 1, p. 1-31, jan. 2004. Wiley

TURNER, J.; PENDLEBURY, S. **The International Antarctic Weather Forecasting Handbook**. 3. ed. -: British Antarctic Survey, 2004. 663 p. Disponível em: http://www.bom.gov.au/ant/handbook/handbook_16june04.pdf. Acesso em: 25 abr. 2022.

TRENBERTH, K. E. **General characteristics of El Nino-Southern Oscillation, in teleconnections linking worldwide climate anomalies**, edited by M. H. Glanz, R. W. Katz, and N. Nicholls, pp. 13–42, Cambridge Univ. Press, New York, 1991.

TRENBERTH, K. E. The Definiton of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, [S.L.], v. 78, n. 12, p. 2771-2777, dez. 1997.

WMO. **El Niño/ Southern Oscillation**: WMO-No. 1145. Genebra: Wmo, 2014. 8 p. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=7888. Acesso em: 25 abr. 2022.

YNOUE, R. Y. *et al.* Meteorologia – Noções Básicas. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017, 142p.

YUAN, X. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms. **Antarctic Science**, [S.L.], v. 16, n. 4, p. 415-425, 30 nov. 2004. Cambridge University Press (CUP).

YUAN, X.; LI, C. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic Sea ice. **Journal Of Geophysical Research**, [S.L.], v. 113, n. 6, p. 541-560, 18 jun. 2008.