

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS –DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

NOELE FRANCHI LEONARDO

DIAGNÓSTICOS DE INFLUÊNCIAS DO MODO ANULAR SUL E DA OSCILAÇÃO
SEMI-ANUAL NO OCEANO AUSTRAL

RIO DE JANEIRO

OUTUBRO 2013
DIAGNÓSTICOS DE INFLUÊNCIAS DO MODO ANULAR SUL E DA OSCILAÇÃO
SEMI-ANUAL NO OCEANO AUSTRAL

NOELE FRANCHI LEONARDO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências (área: Meteorologia).

Orientador: Isimar de Azevedo Santos

RIO DE JANEIRO

OUTUBRO 2013

Leonardo, Noele Franchi

Diagnósticos de Influências do Modo Anular Sul e da Oscilação Semi-Anual/Noele Franchi Leonardo – Rio de Janeiro:UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN, 2013.

XIV,65p,:il;29,7cm.

Orientador: Isimar de Azevedo Santos

Dissertação de Mestrado – UFRJ/PPGM/IGEO/CCMN
Programa de Pós-graduação Meteorologia, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 60-65.

1..Modo Anular Sul. 2Oscilação Semi-Anual. 3. Oceano Austral . 4. Oscilação Antártica. .II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, PPGM/IGEO/CCMN, Programa de Pós-graduação em Meteorologia. III. Título

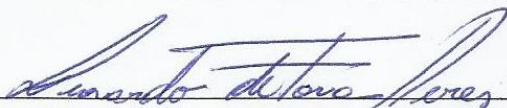
**“DIAGNÓSTICO DE INFLUÊNCIAS DO MODO ANULAR SUL E DA
OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL NA REGIÃO DO OCEANO AUSTRAL”**

NOELE FRANCHI LEONARDO

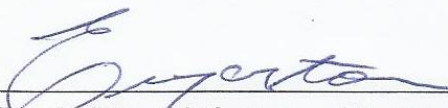
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA : METEOROLOGIA).



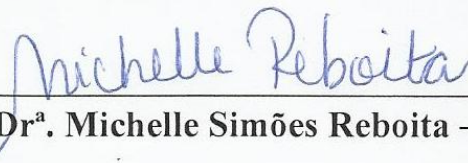
Prof. Dr. Isimar de Azevedo Santos – Depto. Meteorologia / UFRJ



Prof. Dr. Leonardo de Faria Peres - Depto. Meteorologia / UFRJ



Prof. Dr. Edilson Marton – Depto. Meteorologia / UFRJ



Prof.^a. Dr.^a. Michelle Simões Reboita – IRN / UNIFEI

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2013

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

DIAGNÓSTICOS DE INFLUÊNCIAS DO MODO ANULAR SUL E DA OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL NO OCEANO AUSTRAL

Noele Franchi Leonardo

Outubro/2013

Orientadores: Isimar de Azevedo Santos
Programa de Pós-graduação em Meteorologia

O presente estudo procurou fazer um diagnóstico da influência de dois modos de variabilidade característicos no Hemisfério Sul, conhecidos como Modo Anular Sul e Oscilação Semi-Anual, através da análise de compósitos de dados atmosféricos para o período de 1980 a 2010. Os resultados encontrados foram que o Modo Anular Sul realmente vem apresentando uma tendência de índices positivos ao longo dos anos e que essa tendência tem levado ao fortalecimento dos ventos de oeste circumpolares e com isso “protegendo” o continente Antártico com exceção da Península Antártica do aquecimento global reportado nos últimos anos. Esse aumento na intensidade dos ventos circumpolares tem modulado algumas características oceânicas, como o fortalecimento da Corrente Circumpolar Antártica, da Corrente Leste Australiana e da Corrente das Agulhas, provavelmente influenciando na Confluência Brasil-Malvinas. Foi encontrado também que o Modo Anular Sul, modula fortemente o sudoeste do oceano Pacífico, Península Antártica, sul da Austrália e Nova Zelândia, sul da África e América do Sul, englobando o oceano Austral por inteiro. A Oscilação Semi-Anual apresentou uma tendência de enfraquecimento no seu padrão, devido principalmente ao aumento das temperaturas tanto nas latitudes médias como altas, e esse enfraquecimento está possivelmente relacionado com a tendência positiva do Modo Anular Sul. A Oscilação Semi-Anual é um modo de acoplamento entre o oceano e a atmosfera. Portanto, ela atua tanto nos campos de vento como de temperatura da superfície do mar. A metodologia de compósitos apresentou valores inversos entre as fases de expansão e contração do cavado circumpolar.

Palavras chave: Modo Anular Sul, Oscilação Semi-Anual, Oceano Austral, Oscilação Antártica.

Abstract of Dissertation presented to PPGM/IGEO/CCMN/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIAGNOSIS OF INFLUENCE OF SOUTHERN ANNULAR MODE AND SEMI-ANNUAL OSCILLATION MODE IN SOUTHERN OCEAN

Noele Franchi Leonardo

October/2013

Advisor: Isimar de Azevedo Santos
Program: Graduation in Meteorology

This study make a diagnosis of the influence of two variability modes that characterize the Southern Hemisphere, known as Southern Annular Mode and Semi-Annual Oscillation, through the analysis of atmospheric data composites for the period 1980-2010. The results were that the Southern Annular Mode really has showing a positive trend over the past years and that this trend has led to the strengthening of the circumpolar westerlies thus “protecting” the Antarctic continent, with the exception of the Antarctic Peninsula, of the global warming reported in recent years. This increase in the intensity of the circumpolar westerlies has modulated some oceanic characteristics such as strengthening the flow of the Antarctic Circumpolar Current, the East Australian Current, the Agulhas Current and probably influencing the Brazil-Malvinas Confluence. It was found that the Southern Annular Mode strongly modulates the southwest sector of the Pacific Ocean, the Antarctic Peninsula, Southern Australia and New Zealand, South Africa and South America, encompassing the entire Southern Ocean. The Semi-Annual Oscillation showed a weakening trend, mainly due the rising temperatures both at mid- and high-latitudes, and possibly this is related to the positive trend of the South Annular Mode. The Semi-Annual Oscillation is a coupled mode between ocean and atmosphere. So it acts on the wind field and on sea surface temperature. The methodology of composites showed inverse values between the phases of expansion and contraction of the circumpolar trough.

Key-Words: Southern Annular Mode, Semi-Annual Oscillation, Southern Ocean, Antarctic Oscillation.

*Leve na sua memória, para o resto da vida,
as coisas boas que surgiram nas dificuldades.
Elas serão a prova de sua capacidade,
e lhe darão confiança diante de qualquer obstáculo.*

Phico Xavier

Dedico a meus pais: Luiz e Giquinha,

À vocês que me deram a vida, que me ensinaram a vivê-la com dignidade, que se doaram inteiro e renunciaram muitos de seus sonhos, para que, muitas vezes, pudesse realizar os meus. À vocês que sempre iluminaram o meu caminho com muita dedicação, para que eu seguisse sem medo e com muitos sonhos, não bastaria um muitíssimo obrigada. À vocês, MEUS pais, não bastaria dizer que não tenho palavras para agradecer por tudo isso, pois o que sinto jamais poderia ser traduzido em meras palavras.

De todo o meu coração dedico isso a vocês, pois sem vocês jamais sequer, eu teria conseguido.

AGRADECIMENTOS

Deixo meus sinceros agradecimentos.

- ◆ Aos meus familiares, Gica, Luiz, Adrielle e a minha Jujuzinha, por todos os momentos que passamos juntos, todas as brigas, conversas, brincadeiras, enfim, por vocês serem o que são. A MINHA FAMÍLIA.
- ◆ Ao meu irmão Eric e minha cunhada Isabel por me abrigarem no Rio de Janeiro e por todos excelentes momentos que passamos juntos. AMO VOCÊS
- ◆ Ao meu orientador Dr. Isimar de Azevedo Santos, por todo o ensinamento e dedicação a este trabalho, pelo incentivo, por me ajudar a entender o difícil mundo meteorológico e por me aguentar em momentos de crise.
- ◆ Para todos do departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pela receptividade, apoio técnico e administrativo.
- ◆ Ao Professor Dr. Pedro Leite da Silva Dias e a Janicarla do Laboratório Nacional de Computação Científica, pelo apoio financeiro através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).
- ◆ As minhas queridas amigas que fiz durante o mestrado: “Kyky” e “Thami” (Minhas Co-Orientadoras), esse trabalho foi realizado em grande parte graças a ajuda de vocês, muito obrigada por me aturarem, por sempre me incentivarem, por me acolherem com afeto e amizade, pelas valiosas discussões e sugestões e por todo o carinho. Eu realmente não poderia ter encontrado melhores amigas nesses últimos dois anos. MUITO OBRIGADA POR TUDO
- ◆ Os meus queridos roommates: Caleb, Marcos, Ju, Marthina, Sarinha, Ingrid, Gabriel, Claudinho e Rayssa, pela paciência nesses últimos dois anos, pelo carinho e amizade.
- ◆ Não posso deixar de agradecer aos meus roommates postiços: Mayu, Renas e Jun, sem vocês os meus finais de semana não teria a mínima graça!!!
- ◆ À todos os amigos que eu fiz no Rio de Janeiro
- ◆ Aos meus queridos amigos, que mesmo longe em distância, nunca estão longe do coração. AMO VOCÊS.

Como pode um homem satisfazer-se apenas em ter uma opinião e deleitar-se com ela?

*Henry David
Thoreau*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 2: REFERÊNCIAL TEÓRICO	3
2.1 A ANTÁRTICA E O OCEANO AUSTRAL	3
2.2 – EL NINÕ / OSCILAÇÃO SUL	6
2.3 DIPOLO ANTÁRTICO	7
2.4 ONDA CIRCUMPOLAR ANTÁRTICA	8
2.5 MODO ANULAR SUL	8
2.6 OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL	16
CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 DADOS	24
3.2 METODOLOGIA	25
3.2.1 <i>Modo Anular Sul</i>	25
3.2.2 <i>Oscilação Semi-Anual</i>	25
3.2.3 <i>Cálculo de Compósitos</i>	26
3.2.4 <i>Teste de Tendência de Mann-Kendall</i>	28
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	29
4.1 COMPORTAMENTO CLIMATOLÓGICO DO MODO ANULAR SUL	29
4.2 COMPÓSITOS PARA O MODO ANULAR SUL	30
4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO CLIMATOLÓGICO DA OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL	47
4.4 COMPÓSITOS PARA A OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL	52
CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES	57
CAPÍTULO 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2. 1 Mapa de Regressão da Altura Geopotencial em 700 hPa, apontando a gangorra leste - oeste e a diferença de pressão entre o continente Antártico e as latitudes médias, caracterizado pelo Modo Anular Sul/Oscilação Antártica. Adaptado de CPC/NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)..... 10
- Figura 2. 2 Anomalias do vento geostrófico médio zonal (ms-1) e da altura geopotencial em 850 hPa, nos baixos níveis com regressão no índice padrão do modo anular (desvio padrão do índice da série temporal), baseados em dados mensais de janeiro de 1958 a dezembro de 191997: (a) e (c) representam o Hemisfério Sul e (b) e (d) representam o Hemisfério Norte. Fonte: Thompson e Wallace (2000)..... 12
- Figura 2. 3 Localização das estações na costa da Antártica e contorno esquemático das mudanças na pressão e na circulação nas fases de expansão e contração da SAO. As setas pontilhadas conectam os locais das maiores mudanças na pressão, setas sólidas estão associadas com as mudanças na circulação. (Adaptada de Van den Broeke, 1998). 21
- Figura 2. 4 Mudança no gradiente para pós-1979 – pré1979 da temperatura em 500 hPa, Marion - Davis (linha sólida), para a média zonal da temperatura em 500 hPa para a reanálise do NCEP/NCAR (linha pontilhada) e para a média zonal da temperatura em superfície de Jone Jones (1994) para 47,5°S - 62,4°S (linha com traços longos), 52,5°S – 67,5°S (linha com traços curtos), e 52,5°S proveniente GISST2 – 67,5°S de Jones (1994) (linha com ponto e traço) - Adaptada de Meehl et al. (1998). 21
- Figura 3. 1 Área de trabalho, partindo de 30°S à 90°S abrangendo todo o Oceano Austral. Fonte: CPTEC/INPE.....23
- Figura 3. 2 Distribuição dos mares Antárticos. Os setores são: Mar de Weddell, Oceano Índico, Oceano Pacífico Oeste, Mar de Ross e Mares de Bellingshausen e Amundsen. Fonte: Adaptada de Cavalieri e Parkinson (2008).....24
- Figura 4. 1 Índice do Modo Anular Sul extraído do CPC/NCEP para 31 anos de dados (1980 – 2010).....30
- Figura 4. 2 Compósitos para a componente zonal do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.34

Figura 4. 3 Compósitos para a componente meridional do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.....	38
Figura 4. 4 Compósito para a temperatura da superfície do mar, calculados para o período entre 1980 e 2010 a partir de dados da reanálise CFSR do NCEP.....	41
Figura 4. 5 Compósitos para o fluxo de calor latente (w/m ²) calculados para o período entre 1980 e 2010 a partir de dados da reanálise CFSR do NCEP.....	42
Figura 4. 6 Compósitos para a componente zonal do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.	46
Figura 4. 7 Ciclo anual da média mensal da temperatura (°C) em 500 hPa em 50°S (linha contínua) e em 65°S (linha tracejada). Sobreposta para mostrar o mês do ano em média, onde o gradiente entre 50°S e 65°S se intensifica.	48
Figura 4. 8 Ciclo anual da diferença de temperatura (°C) em 500 hPa entre as latitudes de 50°S - 65°S.....	49
Figura 4. 9 Desvio padrão da diferença anual da temperatura (°C) em 500 hPa entre as latitudes de 50°S – 65°S.....	49
Figura 4. 10 Mapas da média mensal da pressão em nível do mar para os meses de março, junho, setembro e novembro. Indicando os meses mais intensos da Oscilação Semi-Anual. Fonte de dados NCEP/CFSR.....	51
Figura 4. 11 Compósitos para a componente zonal do vento nos meses de expansão e contração da Oscilação Semi-Anual.....	53
Figura 4. 12 Compósitos para a componente meridional do vento nos meses de expansão e contração da Oscilação Semi-Anual.....	55
Figura 4.13 Compósitos para a Temperatura da Superfície do Mar nos meses de contração e expansão as SAO.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 Padrões climáticos nas médias e altas latitudes do Hemisfério Sul. Adaptada de Yuan & Li (2008).	22
Tabela 4. 1 Nível de significância para as componentes zonal e meridional do vento, nos níveis atmosféricos de 1000, 850, 700, 500, 300 e 200 hPa.	32

LISTA DE ABREVIACOES

MAS – Modo Anular Sul

OSA – Oscilação Semi-Anual

NAM – Acrnimo de *North Annular Mode* – Referido como Modo Anular Norte

ENOS – El Niño / Oscilação Sul

PSA - Pacific South America

DA – Dipolo Antártico

OCA – Onda Circumpolar Antártica

AAO – Acrnimo de *Antartic Oscillation* – Referido como Oscilação Antártica

AO – Acrnimo de *Artic Oscillation* – Referido como Oscilação Antártica

HS – Hemisfério Sul

HN – Hemisfério Norte

CCA – Corrente Circumpolar Antártica

EAC – Acrnimo de *East Australian Current* – Referido como Corrente Leste Australiana

BMA – Baixa do Mar de Amundsen

HGT – Altura Geopotencial

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

CBM – Confluência Brasil-Malvinas

PA – Península Antártica

PMNM – Pressão Média a nível do Mar

DJF – Dezembro, Janeiro e Fevereiro

MAM – Março, Abril e Maio

JJA – Junho, Julho e Agosto

SON – Setembro, Outubro e Novembro

NCEP – National Centers for Environmental Prediction

CFSR – *Climate Forecast System Reanalysis*

AOI – Acrnimo de *Antartic Oscillation Index* – Referido como *ndice da Oscilação Antártica*

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

O sistema climático não depende apenas dos processos atmosféricos, mas também dos processos físicos, químicos, biológicos e oceanográficos, envolvendo assim todos os componentes do nosso planeta. As mudanças nesses processos são certamente as mais impactantes ameaças ambientais no globo, afetando tanto a biodiversidade marinha como a terrestre, resultando em impactos sobre a economia mundial.

As circulações tanto atmosféricas como oceânicas, são de fundamental importância no clima terrestre, consistindo assim em agentes moderadores do clima através principalmente de dois processos: reservatório de energia e distribuidor do calor de regiões com maior incidência de radiação solar (trópicos) para regiões de menor incidência (polos). No entanto os processos acontecem em escalas distintas entre a atmosfera e o oceano. O oceano armazena calor por mais tempo, devido a alta capacidade térmica da água, enquanto que na atmosfera as escalas variam da ordem de meses, a resposta nos oceanos se dá em escalas de milhares de anos.

Os estudos de tempo e clima na região do Oceano Austral e da Antártica, tanto como a sua variabilidade, não são recentes, porém ganharam uma atenção especial nas últimas duas décadas, principalmente por se tratar de uma região complexa para vários âmbitos na pesquisa. O Oceano Austral é de extrema importância no estudo climático, devido principalmente ao seu caráter circumpolar, conectando as 3 grandes bacias oceânicas: Oceano Atlântico, Índico e Pacífico. Promovendo assim a troca de energia, calor, massa e nutrientes entre os 3 grandes oceanos.

As principais diferenças no que rege as regiões polares norte e sul estão relacionadas com a cobertura geográfica. A região polar do Hemisfério Norte, consiste essencialmente em um oceano coberto por gelo e cercado por continentes, já a região do polar do Hemisfério Sul, apresenta uma grande área continental coberta por gelo e cercada pelo oceano. A principal consequência dessa diferença se dá no gradiente meridional de temperatura, no qual se torna maior no Hemisfério Sul (Parish & Bromwich, 2007). Assim a melhor compreensão entre as mudanças climáticas em ambos os hemisférios é fundamental para prever o impacto de eventos futuros, potencialmente forçados por mudanças antropogênicas dos gases-estufa e de aerossóis (Mayewski et al, 2009).

Nesse contexto de compreender e explorar as questões das mudanças globais e ambientais e principalmente o seu impacto na região da Antártica e Hemisfério Sul, procurou se entender os modos

de variabilidade que atuam no Hemisfério Sul, como o Modo Anular Sul, também conhecido como Oscilação Antártica e a Oscilação Semi-Anual.

1.1 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo fazer um diagnóstico de influência dos padrões de variabilidade de baixa frequência do Hemisfério Sul, conhecido como Modo Anular Sul (ou Oscilação Antártica), bem como analisar algumas formas de interação entre a atmosfera e oscilações no gelo marinho antártico, através da Oscilação Semi-Anual (OSA). A área escolhida está situado entre as latitudes de 90°S e 30°S, abrangendo o globo todo. As variáveis escolhidas para esse diagnóstico são: vento zonal, vento meridional, fluxo de calor latente, temperatura da superfície do mar e umidade específica. Essas variáveis foram escolhidas por terem a sua relação intrínseca com o oceano.

A partir daqui o Modo Anual Sul/ Oscilação Antártica, será referido por Modo Anular Sul ou MAS, seguindo os autores Thompson & Wallace, 2000 que definiram o MAS, como a componente principal (EOF-1) da altura geopotencial em 850 hPA, sobre a área ao sul de 20°S (série temporal corresponde a uma correlação de 0.99).

CAPÍTULO 2: REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 A ANTÁRTICA E O OCEANO AUSTRAL

O oceano Austral tem essencial importância para o estudo climático (Peterson & White, 1998; White, 2000) pois é o elo entre as 3 bacias oceânicas (Índico, Pacífico e Atlântico), onde as trocas de calor, energia, e massa possuem um significativo papel no controle do clima mundial. As trocas de calor são dependentes da quantidade de radiação solar que chega à Terra (atmosfera e oceanos), sendo essa radiação em função da latitude, diminuindo em direção aos polos. Sendo assim, a quantidade média de radiação recebida nas latitudes altas (próximo aos Polos) é menor do que aquela recebida nas baixas latitudes (próximo ao equador). O balanço de radiação no polo Antártico é negativo (Radok, 1981), ou seja, existe uma maior liberação de calor do que captação. A radiação que incide nas altas latitudes e as particularidades orográficas e geográficas do continente Antártico impactam diretamente sobre as temperaturas da atmosfera, podendo assim, ser o controlador do gelo marinho, da temperatura e do campo de vento próximo a superfície do mar durante o ano todo.

A Antártica como parte integrante do sistema climático global, é um dos principais controladores da circulação atmosférica e oceânica do planeta. O oceano Austral possui um papel crítico no sistema climático global, nesse contexto se insere a Corrente Circumpolar Antártica (CCA), contendo um forte fluxo de leste e é o elo unificador para trocas de massas de água, calor, momento, energia, água doce e nutrientes em todas as profundidades, para todas 3 bacias oceânicas: Atlântico, Índico e Pacífico. A CCA possui um padrão complexo, onde a circulação zonal interage com a circulação termohalina meridional (Carter et al., 2008). Essas águas mais frias e densas formadas em regiões polares preenchem as bacias mais profundas e são de grande importância para a circulação termohalina global, essas águas são exportadas para ocupar o fundo dos oceanos do globo, e a ocorrência do processo de formação e exportação dessas águas aos arredores do continente Antártico tem fundamental importância na manutenção do clima terrestre. A ocorrência de alterações anômalas nas características das águas subsuperficiais no Oceano Austral, podem ocasionar mudanças no interior do oceano, onde este é continuamente renovado por estas águas (Toggweiler & Russell, 2008). As profundas camadas de mistura no Oceano Austral e alta capacidade de armazenamento térmico nesta região, sugerem que o feedback oceano-atmosfera estende significativamente a persistente condução via variabilidade atmosférica (Sen Gupta et al. 2007).

Uma revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento do sistema climático da Antártica e do oceano Austral e a sua relação com o sistema climático global no último milênio foi proposta por um grupo de autores (Mayewski et al, 2009). Os autores apontam que o clima sobre o período presente e passado é evidenciado pelas mudanças abruptas na circulação atmosférica e na temperatura, que foram encontrados em “*cores*” do gelo Antártico. As duas mudanças mais proeminentes no clima, são caracterizadas pela intensificação dos ventos circumpolares de oeste (conhecido pelo efeito do Modo Anular Sul) entre aproximadamente 6000-5000 anos atrás. O oceano Austral é produtor de águas frias e densas que são de extrema importância para a manutenção da circulação global e por esse motivo é o maior produtor biológico do planeta. (Mayewski et al, 2009) ainda apontam que como a maioria das previsões numéricas sugerem, os crescentes níveis de gases do efeito estufa, possivelmente irá manter a tendência positiva do SAM. Isso resultará em pressões atmosféricas mais baixas (altas) sobre a Antártica (latitudes médias), com esse aumento do gradiente de pressão, haverá um maior aumento dos ventos de oeste no oceano Austral, isolando assim o centro do continente das massas de ar marítimas, onde sem esse isolamento, o aquecimento na região central da Antártica poderia ser bem mais elevado.

O oceano austral é limitado ao sul pelo continente Antártico e ao norte não há um limite continental, mas oceanográfico que se dá na região conhecida como convergência subtropical, em aproximadamente 35°S a 40°S. Esse termo está relacionado ao encontro de um regime oceânico subtropical e as águas subpolares na porção sudoeste do oceano Atlântico em latitudes próximas a 40°S. Essa é a região que compreende a Confluência Brasil-Malvinas, no qual as águas de origem subantártica proveniente da corrente das Malvinas e se encontram com as águas de origem tropical carregadas pela corrente do Brasil resultando em uma região de grande atividade oceânica de mesoescala, com a formação de inúmeros vórtices típicos na região (Pezzi & Souza, 2009). A corrente das Malvinas transporta águas frias e com baixa salinidade e é originada através de um ramo para norte da Corrente Circumpolar Antártica. A Corrente do Brasil é a corrente que leva águas mais quentes e com alta salinidade provenientes do Equador.

As condições climáticas mais sensíveis do continente Antártico são encontradas na península Antártica. A Península Antártica atua como uma barreira topográfica entre as condições “continentais” do seu lado oriental, o mar de Weddell, e as condições de mar do lado Ocidental, o setor do Pacífico. Turner et al (2005) apresenta que as séries temporais da temperatura do ar na região da península Antártica, tem apresentado um forte aquecimento sobre a Península Antártica e um leve resfriamento no interior do continente Antártico nas décadas recentes. Steig et al (2009) têm reportado que um significativo aquecimento tem se estendido ao longo da Península Antártica cobrindo a maior parte do

oeste Antártico com uma tendência de 0.1°C por década no inverno e na primavera sobre os últimos 50 anos.

Pereira et al (2004) estudaram a variabilidade climática do Oceano Austral e investigaram a presença da Onda Circumpolar Antártica (OCA). Para tal, eles utilizaram 150 anos de dados das variáveis (TSM, temperatura de subsuperfície 250m, pressão média a nível do mar e componente zonal do vento), resultantes de simulação do modelo numérico acoplado do NCAR/CCSM. Eles encontraram que a TSM possui um ciclo bem marcado no Oceano Austral, com um gradiente meridional da temperatura entre o continente Antártico e as latitudes subtropicais, com um padrão de isotermas ao sul de 30°S . Foi encontrado também a presença de águas mais frias na borda leste da América do Sul ($\sim 40^{\circ}\text{S}$ - $\sim 50^{\circ}\text{S}$) com uma inclinação das isotermas, mostrando assim a penetração da corrente das Malvinas. A pressão média a nível do mar, os autores encontraram um decréscimo monotônico com o aumento da latitude, chegando em 985 hPa em aproximadamente 70°S . Para o ciclo climatológico foi encontrado que no verão (inverno) entre as latitudes de 30°S e 40°S , a PMNM apresenta valores máximos de 1015 hPa (1020 hPa) nas bacias oceânicas do Índico, Pacífico e Atlântico (Atlântico e Índico). O vento acompanha as linhas da PMNM, a velocidade máxima da componente zonal do vento foi de 16 m/s entre 40°S - 55°S na bacia do Oceano Índico. O comportamento do vento zonal, apresenta sua máxima intensidade de 16 m/s, encontrada, praticamente, o ano inteiro entre as regiões de 50°E e 170°E em torno de 50°S , sendo predominantemente de oeste e entre as latitudes de 65°S - 70°S os ventos são predominantemente de leste.

O campo de vento no continente Antártico é uma de suas características mais marcantes, destacado pela circulação catabática. O desencadeamento desse processo é a altitude do domo de gelo Antártico, que ultrapassa os 4.000 metros na região do Platô. Esta elevada altitude, aliada à vasta cobertura de gelo permanente e temperaturas extremamente baixas, leva a formação de um centro de alta pressão sobre o continente Antártico, gerando assim, uma forte e persistente circulação catabática na baixa atmosfera, conduzindo o ar frio do interior em direção à costa. Os fortes ventos catabáticos, resultado da divergência em superfície, possuem uma resultante orientada para a esquerda, devido à força de Coriolis e adquirem uma forte componente de leste próxima à costa (Gibbs, 2002).

Alguns estudos recentes sobre a variabilidade climática na Antártica têm apontado o aquecimento acentuado observado no lado ocidental da Península (King, 1994; Vaughan et al 2001; Marshall et al 2002; Turner et al 2005:2012). O aquecimento nas altitudes mais baixas sobre o mar de Bellingshausen (costa ocidental) tem sido observado, a partir dos últimos 50 anos e em Faraday/Vernadsky, a temperatura superficial aumentou cerca de $2,5^{\circ}\text{C}$ desde 1950 Turner et al (2005).

King & Comiso (2003) indicam que a região de aquecimento acentuado em Faraday/Vernadsky é limitada e se restringe a parte sudoeste da ilha.

Turner et al (2005) consideraram as séries temporais do vento obtidas em estações meteorológicas nos últimos 50 anos da superfície Antártica. Os autores encontraram um aumento decadal entre 0,20 e 0,35 m/s para a primavera na estação de Bellingshausen (Ilha Rei George), sendo esta, limitada ao sul pelo estreito de Drake. Foi encontrado também um aumento entre 0,21 e 0,23 m/s para o verão na estação de Faraday/Vernadsky.

Além do Modo Anular Sul, as alterações no clima Antártico, tem sido associadas também ao modo do Pacífico Sul o PSA (*Pacific South American*). Mo & Ghil (1986) encontraram um trem de onda no Pacífico Central até a Argentina, com grandes amplitudes no setor do Pacífico Sul e nomeou de PSA (referido como modo PSA1). Szerdi & Karoly (1987a,b) encontraram outro padrão de trem de onda com defasagem de 90° longitude com o PSA1 (atualmente referido como modo PSA2). O PSA 1 tem sido identificado como uma resposta do HS ao ENOS e o padrão de PSA2 tem sido correlacionado com a oscilação quase-bienal (QB) nos trópicos (Mo & Peagle, 2001). Liu et al (2004) sugerem que as mudanças no gelo marinho associadas com o SAM e com o ENOS, não podem explicar as tendências do gelo marinho Antártico, e o PSA pode ser a explicação para essas tendências.

2.2 EL NINÕ / OSCILAÇÃO SUL

O índice da Oscilação Sul (IOS) é um fenômeno de grande escala caracterizado pela diferença de pressão entre Darwin (Austrália) e Taiti (Polinésia Francesa) e está associado ao enfraquecimento (intensificação) dos ventos alísios sobre o oceano Pacífico tropical, sendo estes, considerado positivo (negativo) na pressão no Taiti (Darwin).

O sinal do ENOS tem sido identificado na Antártica em alguns trabalhos. Harangozo (2000) buscou evidências da influência do ENOS na circulação atmosférica extratropical no Pacífico Sul e em temperaturas zonais na Península Antártica Ocidental durante o inverno Austral. O autor identificou dois modos de grande escala na TSM, relacionadas com a variabilidade da circulação atmosférica. O primeiro conhecido como gangorra de “Leste-Oeste”, com variações opostas da pressão ao nível do mar no Pacífico Sul subtropical e na Indonésia, estes se correlacionam fortemente com a TSM sazonal absoluta no Pacífico Tropical Central. O segundo é o padrão de trem de onda de Rossby no Pacífico Sul extratropical, análogo ao padrão da Pacific South American (PSA). Harangozo (2000) encontrou que o

ENOS possui influência indireta nas temperaturas de inverno na Península Antártica através das alterações na extensão de gelo local, onde por sua vez, é sensível as variações sazonais ocasionadas pelo ENOS nos fluxos de circulação meridional na região da Península Antártica Ocidental. Essa modificação na circulação sobre a Península Antártica Ocidental modula fortemente e indiretamente a temperatura da superfície do ar e mar, alterando assim a concentração de gelo na região. O autor conclui que de fato, os processos tropicais e as fases do ENOS, em particular, podem afetar a Península Antártica.

Turner et al (2005) observaram que nas últimas décadas os eventos de El-Niño foram mais frequentes e de maior intensidade, o que provavelmente aumentou a possibilidade de uma forçante tropical ter desempenhado o papel de algumas mudanças climáticas observadas na Península Antártica. Os autores observaram que o ENOS, em média, resulta em menos depressões com maiores bloqueios sobre o Mar de Bellingshausen, resultando assim em ventos mais ao sul. Os autores então sugerem que quando mais forte e mais frequente as fases do El Niño, tenderia a condições mais frias e não ao aquecimento observado, no entanto, o papel das forçantes tropicais sobre o clima na Antártica não são tão claros. O autor destaca que o aquecimento está mais localizado na parte sul da Península Antártica (setor Ocidental) e essa taxa de aquecimento tem diminuído conforme o afastamento dessa região em direção às ilhas Shetland do Sul onde está localizada a estação Brasileira (Comandante Ferraz).

Stammerjohn et al. (2008) através de comparação entre imagens de satélite da concentração de gelo marinho na Antártica e a variabilidade do SAM e do ENOS encontraram que, em geral o ENOS e o SAM são relatados nas anomalias da PMNM nas altas latitudes do Pacífico Sul (centrado em 130°W e 90°W), onde durante a fase negativa (positiva) da La Niña (El Niño) são relacionadas com a fase positiva (negativa) do SAM. No entanto os autores encontraram que a resposta do ENOS nas altas latitudes foi mais pronunciada em eventos de La Niña coincidente com a fase positiva do SAM (como encontrado por Fogt & Bromwich, 2006), no entanto o inverso não é necessariamente verdadeiro, como os autores que encontraram que a forte relação entre a atmosfera e o gelo marinho ocorrem durante a fase negativa do MAS, mas não em eventos de El Niño.

2.3 DIPOLO ANTÁRTICO

Um estudo sobre a variação do gelo marinho na Antártica e a sua relação com a variabilidade climática na região tropical foi elaborado por Yuan & Martinson (2001). Eles encontraram que a variação interanual no gelo marinho e da temperatura superficial do ar é organizada como uma onda quase-estacionária que é conhecida como Dipolo Antártico no Estreito do Mar de Drake (marcando a

separação entre a Antártica e a América do Sul, aproximadamente 55°S), sendo esta, a região onde a margem do gelo marinho é mais sensível à variabilidade climática. Os autores encontraram uma forte conexão circumpolar, caracterizada por um padrão do tipo dipolo, refletindo assim uma relação de fase entre o Pacífico e o Atlântico. Essa variação em grande escala foi chamada de Dipolo Antártico e existe fortemente nos campos de temperatura da superfície do ar e moderadamente nos campos de PMNM. Yuan & Martinson (2001) utilizaram dados de reanálise (NCEP/NCAR) e constaram que o dipolo consiste em dois modos: um forte e um fraco, com movimento de propagação nas calotas de gelo em cada bacia oceânica. O dipolo Antártico foi encontrado com o mesmo comprimento de onda da Onda Circumpolar Antártica, sendo o dipolo Antártico diretamente associado aos eventos do ENOS, podendo ser previsto por meio de regressão linear, envolvendo a temperatura da superfície do mar, com de dois a quatro meses de antecedência. Sua previsão tem um melhor desempenho nos extremos quentes e frios e é melhor encontrado nos anos de La Niña.

2.4 ONDA CIRCUMPOLAR ANTÁRTICA

Muito da variabilidade interanual do Oceano Sul tem sido descrita no contexto da Onda Circumpolar Antártica (OCA). Esta se propaga nos campos de gelo, pressão, vento e TSM em torno da Antártica e desempenha um importante papel na dinâmica atmosférica (White & Peterson). O período da OCA é similar ao ciclo do ENOS. White e Peterson (1996) estudaram a Onda Circumpolar Antártica sobre a pressão superficial, o vento, temperatura e sobre a cobertura de gelo. Sendo constatado que a OCA possui um período de quatro anos no sistema acoplado oceano-atmosfera. Possui propagação para leste com velocidade média de aproximadamente 45° de longitude ao ano, levando cerca de 8 anos para circundar o Oceano Sul. A OCA é caracterizada por uma persistente relação de fase entre as anomalias da TSM quente (fria) e anomalias do vento meridional em superfície em direção ao polo.

2.5 MODO ANULAR SUL

Os modos anulares são padrões de escalas atmosféricas da variabilidade climática. O exemplo mais popular de grande escala dos padrões de variabilidade climática é o El Niño/Oscilação Sul, no entanto, o ENOS só existe pela interação do acoplamento oceano-atmosfera no Pacífico tropical, já os modos anulares consideram a dinâmica interna da atmosfera nas latitudes médias (Thompson & Woodworth, 2013)

O Modo Anular Sul é caracterizado pelo número de onda zero e exerce um grande impacto sobre a atmosfera, oceano e sobre o gelo marinho na Antártica em períodos que podem variar de poucos dias a muitos anos. Ela possui uma correspondente no Hemisfério Norte, chamada de Oscilação Ártica. A resposta dinâmica do oceano com a variação do MAS tem grande importância para se entender a evolução climática, principalmente, do Hemisfério Sul (Kushara & Oshima, 2000).

Gong & Wang (1998) identificaram a Oscilação Antártica como um dos principais modos de variabilidade das médias e altas latitudes no Hemisfério Sul. Eles definiram então através de análises estatísticas das componentes principais (EOF) que existe uma oscilação entre os cinturões de pressão superficial nas latitudes médias ($\sim 40^{\circ}\text{S}$) com as altas latitudes ($\sim 65^{\circ}$), eles encontraram que essas oscilações também ocasionam uma alternância da massa atmosférica entre esses dois cinturões de pressão. Gong & Wang (1999) mostraram que a Antártica e sua vizinhança apresentam um centro de anomalias de pressão com o mesmo sinal e nas latitudes entre $40^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$ foram encontrados sinais opostos, sendo esta diferença de sinais em latitudes distintas estável, ou seja, quando a pressão ao nível do mar em torno de 40°S está alta (baixa), na latitude $\sim 65^{\circ}\text{S}$ está baixa (alta). Com isso, os autores (Gong & Wang, 1998:1999) definiram um índice para a Oscilação Antártica na tentativa de compreender a estrutura espacial da pressão média a nível do mar e a sua conexão com as anomalias climáticas no Hemisfério Sul. O índice positivo (negativo) da oscilação é definido como a altura geopotencial em 700 hPa abaixo (acima) do normal na região polar.

Principal EOF (27%) - Mapa de regressão da Altura Geopotencial em 700 hPa.

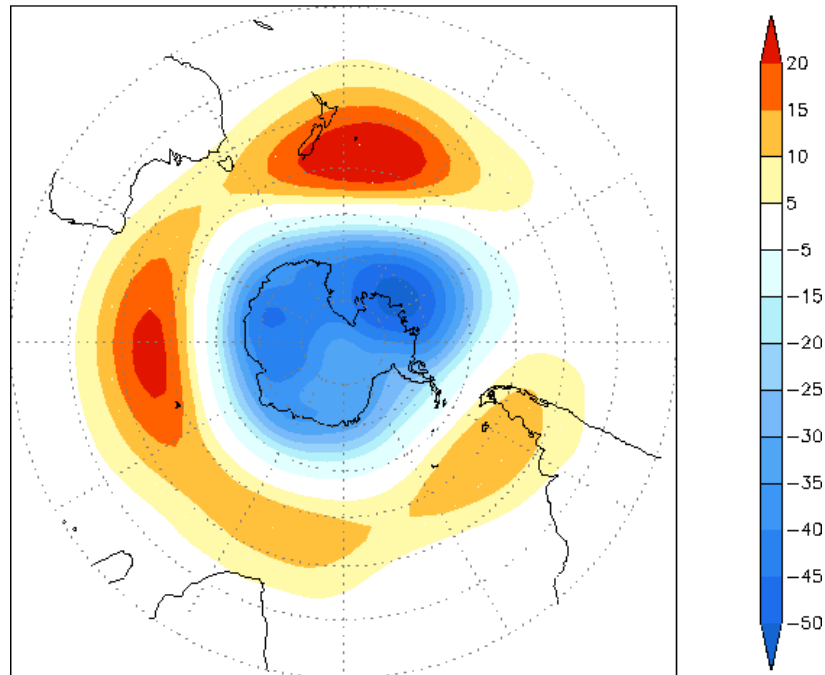


Figura 2. 1 Mapa de Regressão da Altura Geopotencial em 700 hPa, apontando a gangorra leste - oeste e a diferença de pressão entre o continente Antártico e as latitudes médias, caracterizado pelo Modo Anular Sul/Oscilação Antártica. Adaptado de CPC/NOAA (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)

Gong & Wang (1999) definiram o índice da Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation Index – AOI*) como a diferença de pressão média ao nível do mar normalizada entre as latitudes de 40°S e 65°S. Sua definição numérica é dada por:

$$AOI = P^*_{40^{\circ}S} - P^*_{65^{\circ}S}$$

Onde $P^*_{40^{\circ}S}$ e $P^*_{65^{\circ}S}$ representam a pressão média a nível do mar zonal normalizada.

Thompson & Wallace (2000) definiram a Oscilação Antártica, como sendo um Modo Anular Sul, caracterizada por uma estrutura simétrica ou anular associada com perturbações na altura geopotencial em 850 hPa com sinais opostos na faixa de latitude centrada ~45°S. A figura X.X mostra que as estruturas do Hemisfério Sul (a,c) e do Hemisfério Norte (b,d) são predominantemente zonais simétricas, sendo notável que a simetria do HS é mais pronunciada. Ambas são caracterizadas por gangorras norte-sul de massa atmosférica entre as altas latitudes e as latitudes médias. As estruturas verticais da simetria zonal das anomalias da componente zonal do vento mostram uma associação com

o modo anular. Os autores inferiram que os valores positivos dessas anomalias estariam associados a presença de pressão atmosférica inferior à pressão média em nível do mar nas altas latitudes e mais elevadas nas baixas latitudes, e também constataram que os valores positivos (negativos) do índice estão associados com as anomalias negativas (positivas) da altura geopotencial em 850 hPa sobre a Antártica e anomalias positivas (negativas) sobre as latitudes médias.

A relação entre a Oscilação Antártica e sistemas atmosféricos no Hemisfério Sul foi discutida por Reboita et al (2009), onde para o um período de 20 anos (1980 – 1999), foi encontrado que para a fase negativa da Oscilação Antártica, a trajetória de ciclones no Hemisfério Sul se move para o norte quando comparada com a fase positiva. No setor da América do Sul e no Atlântico Sul, existe uma grande atividade frontogenética e anomalias positivas da precipitação são encontradas no sudeste da América do Sul no inverno na fase negativa. Na fase positiva da Oscilação Antártica são encontradas as situações inversas.

Um estudo observacional com 25 anos de dados (1981 – 2005) sobre a interação oceano-atmosfera de larga escala sobre o Hemisfério Sul foi feito por Ciasto & Thompson (2008). Eles colocaram em foco as relações entre a variabilidade da anomalia da TSM extratropical com o Modo Anular Sul e o ENOS. Foi encontrado que as anomalias da TSM associadas ao MAS e ao ENOS, podem variar em função da estação do ano, tanto para termos estruturais como em sua amplitude. Foi encontrado que durante o inverno o alto índice de polaridade do MAS está associada à predominância da TSM fria em 50°S, com exceção de uma região com anomalias frias que se estendem a oeste da península Antártica para as latitudes médias. A fase fria do ENOS (La Niña) com o a fase negativa (positiva) do MAS resulta em anomalias negativas da TSM no sul do Oceano Pacífico. Eles encontraram então que durante o verão, o padrão do MAS na TSM é semelhante no inverno, incluindo, porém, anomalias de TSM que se estendem do Equador em direção ao Oceano Pacífico Tropical. Já para o ENOS no verão, inclui anomalias da TSM que se estendem do Oceano Atlântico para setores do Oceano Índico. Já Kidston et al (2009) encontraram que no verão a variabilidade do MAS é fortemente simétrica zonal enquanto que no inverno exibe um aumento na variabilidade no padrão zonal de onda número 2-3. Os autores afirmam que esse estado médio pode ser influenciado pela temperatura de superfície perto da Austrália onde o continente representa um importante papel na manutenção da variabilidade do MAS.

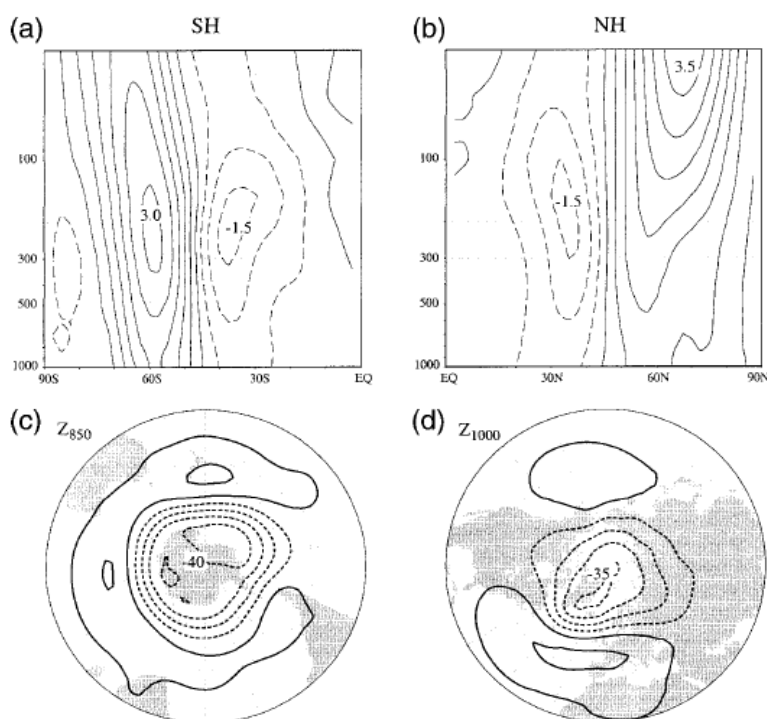


Figura 2. 2 Anomalias do vento geostrófico médio zonal (ms-1) e da altura geopotencial em 850 hPa, nos baixos níveis com regressão no índice padrão do modo anular (desvio padrão do índice da série temporal), baseados em dados mensais de janeiro de 1958 a dezembro de 1997: (a) e (c) representam o Hemisfério Sul e (b) e (d) representam o Hemisfério Norte. Fonte: Thompson e Wallace (2000).

A relação entre atividade intrasazonal e interanual na América do Sul e a variabilidade da Oscilação Antártica no verão Austral foi discutida por Carvalho et al. (2005). Eles encontraram que como os modos anulares possuem forte correlação com a circulação na alta troposfera e na baixa estratosfera, é possível que as fases do ENOS desempenhem um papel na modulação das fases da Oscilação Antártica. Analisando a variabilidade diária do MAS, os autores observaram que durante os episódios de El Niño (La Niña) existe um predomínio de valores negativos (positivos) da Oscilação Antártica.

Marshall (2002) fez um estudo sobre as tendências do Modo Anular Sul a partir de dados observados e dados da Reanálise do NCEP. O autor inferiu uma problemática dos resultados encontrados em trabalhos anteriores, devido as recentes mudanças na obtenção do índice do MAS, os estudos utilizavam principalmente dados da NCAR/NCEP, onde foram encontrados erros significantes, principalmente no campo de pressão nas altas latitudes do Hemisfério Sul. O autor encontrou então que para o período analisado, realmente houve uma mudança preferencialmente para a fase positiva a partir dos anos 60, o que foi atribuído à queda do índice da Oscilação Semi-Anual. Na comparação entre os

dados observados e os dados obtidos através da reanálise (NCEP/NCAR) foi encontrado que os erros são principalmente encontrados na pressão média a nível do mar nas altas latitudes, que geralmente diminuem levando a tendências negativas espúrias na pressão. A reanálise mostrou também um maior aumento na diferença da pressão para as altas e médias latitudes no inverno, enquanto os dados observacionais das estações revelaram uma tendência máxima no verão.

Algumas assinaturas do MAS também são evidentes na variabilidade tanto oceânica como no gelo marinho, principalmente através da tensão em superfície e vias fluxos de calor. A temperatura da superfície do mar responde a uma combinação das correntes superficiais que intensificada pelos fortes os ventos de oeste, fortalecidos fase positiva do MAS, alteram as trocas de calor e energia entre o oceano e a atmosfera (Sem Gupta & Engalnd, 2006; Ciasto & Thompson, 2008).

White et al. (2004) encontraram essa variabilidade do MAS no gelo marinho, na TSM e na pressão em nível médio do mar, através do método de multitaper e decomposição de valores singulares (MTM-SVD) nas anomalias mensais de TSM, PNM e concentração de gelo na área de 30°S – 90°S. Os autores encontraram um espectro correspondente que revelou cinco sinais dominantes na variabilidade climática da concentração de gelo marinho, isto é, um sinal do Modo Anular Sul, com um período de 1 ano e também encontraram quatro sinais da Onda Circumpolar Antártica (OCA) por um período de 2.9, 3.7, 7.1 e 17 anos, respectivamente. Estes foram caracterizados principalmente pela sua propagação de leste. Os autores encontraram que esses cinco sinais explicaram 50% da variação no inverno das anomalias não filtradas nos mares de Ross e Weddell.

Sen Gupta et al. (2007) investigam a interação de volta como eles denominam (*'back interaction'*) das anomalias oceânicas ocasionadas pelo MAS alimentando um feedback na atmosfera através de modelos climáticos acoplados (atmosfera-oceano) e de modelos atmosféricos sem acoplamento. Eles encontraram que tanto para os experimentos acoplados como para os não acoplados mostram uma resposta termal direta, afetando a temperatura na baixa troposfera e os ventos meridionais de superfície. O experimento de não acoplamento aponta que a fase negativa do MAS, as perturbações na TSM produzem uma resposta indireta na atmosfera, projetando diretamente para o MAS. Já as anomalias para a fase positiva do MAS, no entanto, mostram uma resposta pouco robusta, não representando o aquecimento local em superfície. Os experimentos acoplados mostram uma linearidade com respeito ao sinal das anomalias. No entanto a resposta é considerada mais fraca do que no caso desacoplado e a resposta do MAS é mais pobre. Os autores encontraram uma clara persistência do MAS em escalas intrasazonais que se baseiam no acoplamento ar-mar não podendo ser

reproduzindo apenas em experimentos não forçados apenas com a atmosfera. Demonstrando assim que o oceano desempenha um papel na modulação do MAS nessas escalas de tempo.

Aoki (2002) através de um estudo com marégrafos em estações na costa da Antártica, estudou a relação entre as mudanças atmosféricas e o nível do mar Antártico. Ele encontrou uma forte correlação negativa entre o nível do mar e o Modo Anular Sul, consistente com o mecanismo de alta (baixa) pressão nas anomalias dos ventos de oeste, que levam a um maior (fraca) direcionamento da deriva de Ekman para norte, ocasionando uma divergência (convergência) da água superficial ao entorno da Antártica.

Fogt et al. (2012) aponta que os sinais do MAS e do ENOS não estão totalmente independentes. Os autores encontraram que as fases positivas do MAS ocorrem durante os anos da La Niña e as fases negativas são predominantes durante os anos de El Niño.

Um estudo sobre o comportamento da TSM nos trópicos em relação ao MAS foi discutido por Ding et al. (2007). Os autores utilizaram o índice do MAS baseado na altura geopotencial em 200 hPa, justamente pela correspondência com o núcleo dos jatos troposféricos (onde o desvio da circulação é maior). Os autores encontraram que a variabilidade do MAS é estatisticamente significativa com a variabilidade da TSM no Pacífico Tropical, principalmente nos meses de JJA para o Pacífico Central e DJF para o Pacífico Central e Leste. Foi encontrado também um padrão dipolo com centros de ação perto de 40°S e 65°S, onde as assimetrias zonais são claramente notáveis, diferindo de sua configuração entre as altas e médias latitudes. Os autores encontraram também um modo proeminente das médias latitudes, um padrão de onda 3 e encontraram que a maior variabilidade do MAS se dá sobre o Mar de Amundsen (costa leste da Antártica), onde a sua variação mensal também é a maior.

Turner et al. (2012) desenvolvendo a climatologia da Baixa do Mar de Amundsen (BMA), encontrou uma forte relação com a variabilidade do MAS. A BMA é um padrão climatológico de escala sinótica entre a região da Península Antártica e a plataforma de gelo sobre o Mar de Ross. A profundidade e a localização desse modo tem uma significativa influência na circulação atmosférica, temperatura e precipitação ao entorno da parte oeste da Antártica e do Oceano Austral. Os autores encontraram que a BMA é fortemente influenciada pelas fases do MAS, onde a fase positiva (negativa) das anomalias da PMNM ocorre em fases negativas (positivas) do MAS.

A tendência positiva do MAS a partir da década de 50 tem sido discutida por muitos autores (Thompson & Solomon, 2002; Cai et al. 2002; Marshall, 2004; Arblaster & Meehl, 2006), como uma

combinação não linear de fatores naturais e antropogênicos. Esta está principalmente relacionada com a destruição do ozônio estratosférico. Essas tendências encontradas são mais acentuadas no verão (fase mais ativa do MAS), os autores sugerem então, que essa tendência positiva pode ter sido encontrada uma década antes do começo da perda do ozônio estratosférico, sugerindo assim que a emissão de gases do efeito estufa contribuem também para a intensificação da tendência no verão.

Cai et al. (2002) apontam que modelos climáticos preveem uma tendência ascendente do MAS, em resposta ao aumento da concentração atmosférica de CO₂. Eles mostram que a tensão do vento zonal possui um máximo localizado em aproximadamente 60°S e esta mudança provoca um *spin-up* em toda a circulação oceânica nas latitudes médias ao sul, incluindo o fortalecimento dos giros subtropicais, particularmente na corrente leste australiana. Esta intensificação da corrente leste australiana geram uma taxa de aquecimento no mar da Tasmânia, com significativas implicações no nível do mar e no ecossistema marinho, com a extinção de várias espécies marinhas. Os autores indicam que essa tendência positiva e os impactos continuaram no futuro.

A tendência positiva também tem sido relacionada com o aquecimento do Oceano Austral a partir da mesma época (década de 50). Esse aquecimento está relacionado principalmente com a combinação de mecanismos como: mudança da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) em direção aos polos em resposta à intensificação dos giros subtropicais se movendo mais ao sul (Screen et al. 2009; Gille, 2008)

Mudanças na camada de mistura do oceano através do fortalecimento (enfraquecimento) dos ventos de oeste (leste) polares (subtropicais) podem ser ter sido ocasionadas por essa tendência positiva. Salles & Speer (2010) discutem que a profundidade e as propriedades da camada de mistura do oceano são influenciadas principalmente por mecanismos “agitadores”, como o stress do vento. Então é esperado que esta responda às mudanças associadas com a variabilidade climática através do MAS.

Os ventos de oeste são responsáveis em grande parte pelo direcionamento da circulação do Oceano Austral, e tem sido constantemente utilizados em modelos de circulação geral, onde as mudanças na intensidade do vento influenciados pelo MAS alternam os padrões de circulação do Oceano Austral consideravelmente (Oke & England, 2004). Essas mudanças na circulação dos ventos promovem uma alteração na mudança na camada de mistura oceânica, que por sua vez impulsionam uma ventilação da termoclina principalmente movida pelos giros subtropicais do HS, o que afeta as

taxas de nutrientes como o oxigênio dissolvido e o carbono (ciclo biogeoquímico), resultando em impactos na produtividade primária (fitoplâncton) no Oceano Austral. No entanto o impacto do MAS em características biológicas no Oceano Austral não tem sido documentado. Nesse contexto, Lovenduski & Gruber (2005) sugerem que a conexão entre o MAS e a produtividade primária, são mais sensíveis nas latitudes polares devido principalmente ao afloramento do ferro, enquanto nas latitudes médias essa produtividade está relacionada principalmente com as mudanças promovidas no limite de luz (fotossíntese; organismos fitoplanctônicos) promovidos principalmente pelas alterações na camada de mistura.

Essa mudança na posição do cinto de ventos de oeste influencia tanto a força como a posição das frentes frias e dos sistemas de tempestades das latitudes médias, sendo assim, um importante fator na variabilidade de precipitação na América do Sul, Austrália e África (Cai et al. 2005)

Segundo Turner & Marshall (2011) a distribuição geográfica dos oceanos e dos continentes no Hemisfério Sul contribui para uma marcada estruturação física do MAS, devido principalmente a sua estrutura zonal simétrica e possuindo um padrão de onda 3 sobreposto. Essa sobreposição está associada com as anomalias da altura geopotencial de sinais opostos entre as altas latitudes e as latitudes médias, refletindo assim, em mudanças no cinturão de ventos circumpolares de oeste.

2.6 OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL

A Oscilação semianual é caracterizada pela expansão e contração da pressão atmosférica entre as latitudes médias e altas no Hemisfério Sul duas vezes por ano (nos equinócios). A pressão atmosférica ao nível do mar, apresenta uma diminuição nos seus valores em direção aos polos a partir das altas subtropicais em cada oceano até atingir um cavado de baixa pressão ao redor do continente Antártico. Em março e setembro esse cavado de baixa pressão está localizado mais ao sul e mais intenso. Em junho e dezembro esse cavado, se desloca mais ao norte com menor intensidade Taschetto et al. (2007). O mecanismo proposto por Van Loon (1967) dita que a presença da Oscilação Semi-Anual é gerada pela presença do continente Antártico (sul de 65°S) e o fato deste ser rodeado por oceano nas latitudes médias, gerando assim, uma diferença no ciclo anual da temperatura mais visível na troposfera em ambas latitudes (médias e altas). Sobre o oceano próximo a 50°S (65°), o resfriamento (aquecimento) no outono (primavera) é mais rápido que o aquecimento na primavera (outono). Então essas diferenças resultam em um marcado harmônico no gradiente de temperatura meridional entre

50°S e 65°S modulando assim, os ciclos anuais da temperatura e do vento. De acordo com o mecanismo da SAO proposto por Van Loon (1967), essas circunstâncias surgem das diferenças no declive das curvas anuais de temperatura sobre as médias e altas latitudes e podem ser conectadas com a fase dos ciclos anuais das temperaturas em superfície serem mais refletidas na troposfera. Ainda de acordo com van Loon, o armazenamento de calor no oceano retarda a temperatura máxima (mínima) no verão (inverno).

Em grande escala, os padrões de variabilidade climática desempenham um papel fundamental na compreensão dos aspectos regionais, tanto em alterações climáticas projetadas através simulações como por alterações ocorridas no passado (van der Broeke, 1998; Marshall, 2009). Pouca atenção tem sido dada ao papel da Oscilação Semi-Anual na interpretação das mudanças no clima no século XXI. Em grande parte pela grande dificuldade que os modelos climáticos possuem em simular o pico da SAO encontrado na primavera. Estes tem sido atribuído pela má representação dos modelos em representar o ciclo anual da temperatura na troposfera nas latitudes médias (Raphael & Holland, 2006)

Van den Broeke (1998a) analisou a influência da Oscilação Semi-Anual sobre a temperatura de superfície sobre a Antártica através de 27 estações localizadas em todo o continente Antártico e sua vizinhança, para o período de 1957 a 1979. Ele encontrou que as mudanças na circulação atmosférica provocadas pela SAO, modificam o ciclo anual da temperatura tanto dentro do continente como nas regiões costeiras da Antártica. Essas mudanças estão associadas com as fases de expansão da SAO que ocorrem preferencialmente no outono e na primavera. Aumentando assim, o transporte de ar proveniente das latitudes mais baixas em direção a Antártica como já encontrado por Van Loon (1967). Segundo Van den Broeke (1998b) o forte acoplamento nos padrões de temperatura da superfície do mar e na circulação atmosférica, podem implicar na interpretação das séries temporais dos dados de temperatura do ar sobre a Antártica. Também foi observada pelo autor uma tendência temporal de enfraquecimento da SAO a partir de 1970, que fez com que as temperaturas diminuíssem, estabilizando assim a tendência de aquecimento da Antártica. Ele encontrou um possível deslocamento do padrão da SAO da primavera para meados do verão, ligados provavelmente ao aumento da temperatura da superfície do mar no Pacífico Tropical ligado aos eventos de El- Niño. O autor encontrou indícios de que a Oscilação Semi-Anual e a Oscilação Sul possam estar correlacionadas, pois a fase quente (fria) da Oscilação Sul parece estar relacionada com os fortes (fracos) ventos de oeste na Antártica, e essa relação para estar associada com o fraco (forte) desenvolvimento da SAO e isso parece estar relacionado com as temperaturas abaixo (acima) da média ao leste da Antártica.

Na terceira parte do trabalho proposto por Van den Broeke (2000c) o autor faz uma relação entre a Oscilação Semi-Anual e a velocidade do vento superficial e a cobertura de nuvens e como as temperaturas superficiais são afetadas. O autor utilizou dados de estações (fig 2.3) localizadas na costa da Antártica por um período de 1957 – 1995. O autor encontrou que as estações localizadas na parte oeste da Antártica (*Halley* e *Faraday* (Península Antártica) uma onda semi-anual é estabelecida nos ciclos anuais no campo de velocidade do vento e nebulosidade. O autor encontrou que essas estações (parte oeste) segue o enfraquecimento significativo da SAO a partir dos anos de 1970, onde o aumento (diminuição) nos meses de solstício (equinócio). As estações da parte leste da Antártica principalmente as de *Manwon* e *Davis* são controladas pelo distúrbios locais, como os ventos catabáticos provenientes do platô Antártico. Já a estação de *D. D'Urville* é comandada principalmente pelos grandes gradientes climáticos locais, onde estes estão relacionados principalmente com a proximidade da Austrália e foi considerada em parte responsável pelos ruídos encontrados nos sinais da estação de *Macquarie Island*.

Van den Broeke (2000d) publicou a quarta parte de seu grande trabalho com a Oscilação Semi-Anual, nesse trabalho o autor focou principalmente na cobertura de gelo dos mares de Bellingshausen-Amundsen na parte oeste da Antártica (fig.Van). Acredita-se que o forte *feedback* da temperatura local sobre os mares de *Bellingshausen-Amundsen* com a cobertura de gelo marinho é responsável, em partes, pelo aquecimento anômalo da região durante os últimos 50 anos (King & Harangozo, 1998; Van den Broeke (2000d) utilizou valores mensais de cobertura do gelo marinho derivados de satélite para o período de 1973 – 1994 nos mares de *Bellingshausen-Amundsen* (60°W e 130°W). O autor encontrou significantes interações entre a extensão do gelo marinho nos mares de *Bellingshausen-Amundsen* e a média anual da temperatura, velocidade do vento, nebulosidade e frequência de precipitação na estação de *Faraday*. O autor apontou um acoplamento positivo ocorrendo principalmente entre a amplitude da SAO e a extensão de gelo marinho no inverno nos mares de *Bellingshausen-Amundsen*. Anos com fraco desenvolvimento da SAO, o cavado circumpolar da pressão se move para nordeste de abril a julho, suprimindo assim o crescimento da extensão de gelo marinho e essas anomalias são persistentes durante todo o inverno. O autor conclui que o recente enfraquecimento da SAO tem aumentado a velocidade média do vento e a nebulosidade na estação da *Faraday* (Península Antártica), ocasionando assim uma diminuição na cobertura de gelo nos mares de Bellingshausen-Amundsen.

Taschetto et al (2007) fizeram um estudo com uma base de dados maior que corroborou com os autores Van Loon (1967) e Van den Broeke (1998) quanto ao comportamento da Oscilação Semi-Anual no Hemisfério Sul. Elas utilizaram séries mensais de pressão média ao nível do mar cobrindo um

período de 1968 a 2005, provenientes da reanálise NCAR/NCEP. As autoras encontraram que, o enfraquecimento a partir da década de 70 da Oscilação Semi-Anual permanece até os dias de hoje, mas não de forma homogênea em todas as latitudes. Através de análises harmônicas, foi encontrado que o segundo harmônico da pressão média ao nível do mar tem diminuído do Pacífico Sul, mas ao contrário no Atlântico o sinal ainda permanece forte, sugerindo assim que o mecanismo que modula a SAO sobre o Atlântico difere daquele nos oceanos Pacífico e Índico, assim, sugere-se que o Atlântico Sul pode exercer um papel fundamental na manutenção da Oscilação Semi-Anual. Foi encontrado também que o Pacífico e o Índico são fortemente modulados pela variabilidade do ENOS ao contrário do Atlântico Sul, sugerindo assim que a variabilidade interanual do AS seria parte integrante da variabilidade da Oscilação Semi-Anual sobre as bacias oceânicas. O estudo proposto por Meehl (1998) fizeram um estudo com dados observacionais para testar a hipótese de que o mecanismo original de modulação da Oscilação Semi-Anual é o próprio responsável pela redução de sua amplitude. As flutuações de contração e expansão da SAO estão principalmente associadas com flutuações similares dos gradientes de temperatura, altura geopotencial, pressão e vento na troposfera, tanto nas médias como nas altas latitudes. Os autores apontam que a ideia inicial de uma intensificação semestral no gradiente de temperatura em 500 hPa entre as latitudes médias (sendo esta dominada pelos oceanos) e as altas latitudes (dominadas pelo continente polar), estão associadas a um aumento semestral da trajetória de tempestades (*Storm Tracks*) modificando assim o cavado de baixa pressão circumpolar. Os autores encontram que a consequência da redução da amplitude da SAO desde de 1979 está relacionada com a temperaturas superficiais observadas juntamente com as temperaturas em 500 hPa (NCAR/NCEP), aonde o gradiente de temperatura apresentam evidências de que o aquecimento médio em superfície desde 1979 nas duas latitudes (50°S e 65°S) não possui uma distribuição uniforme ao longo do ano. Foi encontrado um maior aquecimento no primeiro semestre e um ligeiro resfriamento no segundo semestre próximo a 65°S. As análises harmônicas mostraram que o segundo harmônico apresenta uma mudança no gradiente de temperatura no período pós 1979 onde o máximo foi encontrado em maio-novembro modulando assim a climatologia do segundo harmônico no período pré 1979, apresentando um máximo em março-setembro.

Yuan & Li (2008) analisaram a influência dos padrões de variabilidade climática (tab 2.1) das altas latitudes como o Modo Anular Sul (MAS), Onda de número 3 quasi-estacionária (Wave-3), padrão do Pacífico Sul America (PSA) e a Oscilação Semi-Anual (SAO) sobre a distribuição de gelo marinho na Antártica (tab2.1). As autoras encontraram que a variabilidade decadal do HS é dominada pela série mensal do MAS, no entanto o ciclo semi-anual é dominado pelo espectro da SAO. Foi

encontrado também que o MAS e a SAO tem um forte impacto na PNM nas latitudes médias das regiões oceânicas e a leste do continente Antártico, particularmente ao longo da costa do Pacífico Sul.

Através de análises de tendência das temperaturas na região Antártica van den Broeke (2000), com dados de reanálise (NCEP/NCAR – 1957 – 1995), encontrou que o enfraquecimento decadal da SAO desde meados da década de 70 tem limitado a troca de calor meridional entre a Antártica e a sua vizinhança, de modo que as tendências de aquecimento tem se mantido estáveis desde então. Foi apontado também que a SAO e o Wave-3 possuem uma relação, principalmente correlacionada as fases de expansão da SAO (outubro-janeiro; março-junho), onde essa relação torna-se incapaz a movimentação do cinturão de baixa pressão para norte na região.

Uma significativa relação entre as temperaturas superficiais do ar, respondendo às tendências das temperaturas na Antártica; essa tendência implicaria que as temperaturas nas estações Antártica ainda “carregam” uma assinatura do enfraquecimento da SAO, sendo assim, interpretada como um *background* do aquecimento Antártico.

Ackerley & Renwick (2010) através de modelagem numérica paleoclimática analisaram a representação da SAO nos modelos PMIP2 e como ela foi mudando durante o holoceno, em especial na variabilidade da circulação no HS. Os autores encontraram um enfraquecimento (fortalecimento) da SAO no cavado circumpolar no outono (primavera). As mudanças podem ser causa do aquecimento (resfriamento) e da secagem (umedecimento) durante a primavera (outono) sobre a Nova Zelândia. É notável que as mudanças na temperatura em 500 hPa estão em acordo com as mudanças da tsm no HS, onde essas respondem as mudanças na insolação. Os autores encontraram que em meados do Holoceno o cavado circumpolar é mais forte e contraído durante a primavera austral e mais fraca e mais expandida no outono do que o presente.

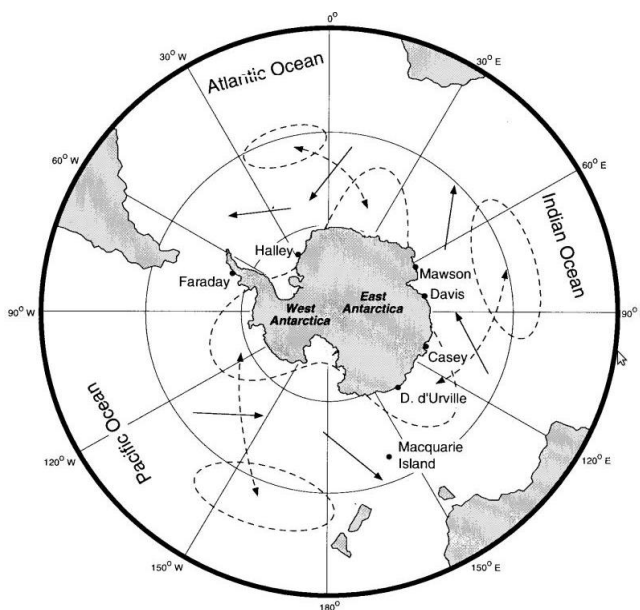


Figura 2. 3 Localização das estações na costa da Antártica e contorno esquemático das mudanças na pressão e na circulação nas fases de expansão e contração da SAO. As setas pontilhadas conectam os locais das maiores mudanças na pressão, setas sólidas estão associadas com as mudanças na circulação. (Adaptada de Van den Broeke, 1998).

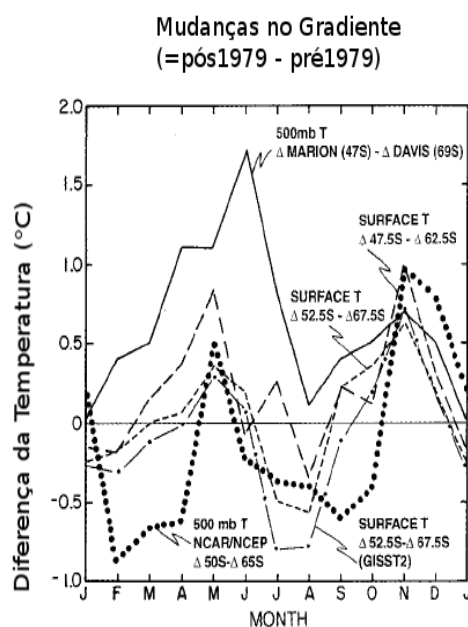


Figura 2. 4 Mudança no gradiente para pós-1979 – pré1979 da temperatura em 500 hPa, Marion - Davis (linha sólida), para a média zonal da temperatura em 500 hPa para a reanálise do NCEP/NCAR (linha pontilhada) e para a média zonal da temperatura em superfície de Jones (1994) para 47,5°S - 62,4°S (linha com traços longos), 52,5°S - 67,5°S (linha com traços curtos), e 52,5°S proveniente GISST2 - 67,5°S de Jones (1994) (linha com ponto e traço) - Adaptada de Meehl et al. (1998).

Tabela 2. 1 Padrões climáticos nas médias e altas latitudes do Hemisfério Sul. Adaptada de Yuan & Li (2008).

	MAS	Wave-3	PSA	SAO
Campos Superficiais	PNM	Gelo Marinho, PNM e ventos	PNM e ventos	Gradientes meridionais de Tar e PNM
Características	3 centros alternados de anomalias da pressão: sul do Pacífico, regiões polares a sudeste do Pacífico e América do Sul.	Ondas de n° 3 quasi-estacionária nas latitudes médias (forte no inverno), move-se em um ciclo anual de leste para oeste.	Forma anular, pressão fora de fase na região polar com as latitudes médias.	Maior gradiente meridional de pressão (sul de 50°S) na primavera e no outono.
Dinâmica/Física	<i>Trem de onda de Rossby (Karoly, 1989)</i>	Distribuição continente-oceano no HS (van Loon & Jemme, 1998)	Interação entre os vórtices e os fluxos médios (Lorenz & Hartman, 2001)	Diferença do aquecimento solar nas médias e altas latitudes (van Loon, 1967)

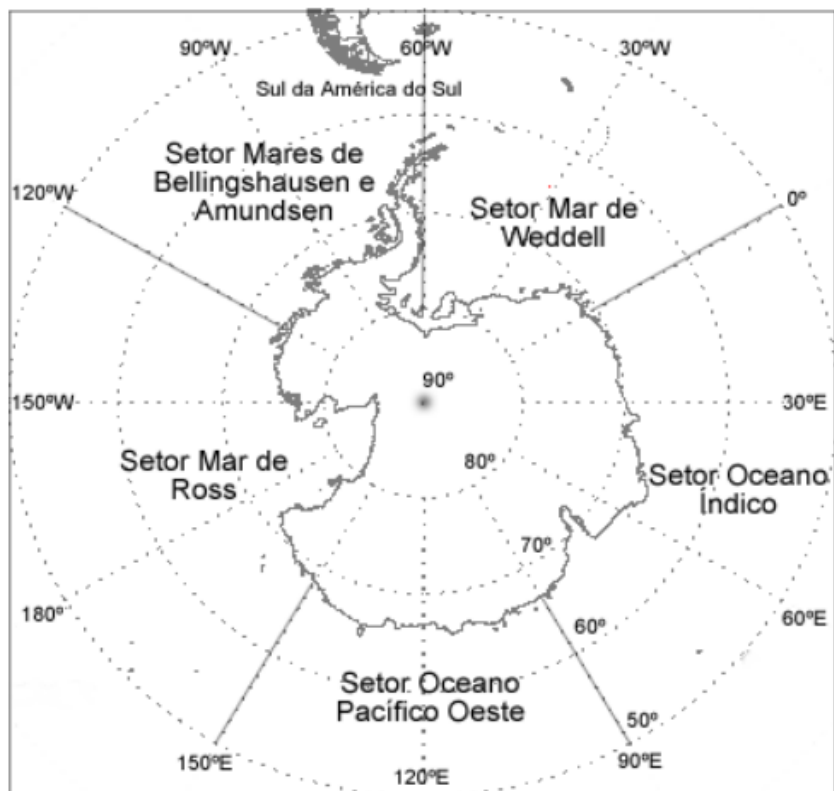


Figura 3. 2 Distribuição dos mares Antárticos. Os setores são: Mar de Weddell, Oceano Índico, Oceano Pacífico Oeste, Mar de Ross e Mares de Bellingshausen e Amundsen. Fonte: Adaptada de Cavalieri e Parkinson (2008).

3.1 DADOS

Os dados utilizados nesse estudo foram extraídos do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR-NCEP). O CFSR é um banco de dados de reanálise em alta resolução, sua segunda versão foi implementada em 2010, referente ao período de 1979 até o presente (Saha et al, 2010). O sistema de assimilação de dados e de modelagem da nova reanálise, foi aprimorado em comparação com as reanálises anteriores do NCEP. Essa melhoria se dá, principalmente, em função do acoplamento de um esquema de superfície de 4 camadas no solo (Noah LSM; Ek et al. 2003) e devido ao acoplamento de um sistema de modelagem oceânica do *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) conhecido como *Modular Ocean Model* versão 4 (MOM4; Griffies et al. 2004). O modelo atmosférico, apresenta uma resolução horizontal de aproximadamente 38 km, coordenada vertical híbrida-sigma com 64 camadas, pressão no topo de 0.266 hPa, enquanto que para o oceano, possui resolução de 0.25° no Equador e 0.5° além dos trópicos, com 40 níveis representando 4737 metros.

As variáveis utilizadas da CFSR foram:

- Vento meridional e zonal – Níveis [1000, 850, 750, 500, 300, 200 hPa]
- Temperatura da Superfície do Mar - TSM
- Fluxo de Calor Latente
- Umidade Relativa – Níveis [1000, 850, 750, 500, 300, 200 hPa]

O índice mensal do Modo Anular Sul, foi obtido através do Climate Prediction Center (CPC), disponível em <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products> para o período compreendido entre 1980 e 2010. O CPC calcula o índice diário do MAS, projetando as anomalias da altura geopotencial em 700 hPa, sobre o modo principal da EOF (*Empirical Orthogonal Function* – EOF-1), derivado das médias mensais das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa entre 20°S e 90°S. O modo principal da EOF (EOF-1) alcança a máxima variância explicada. Esses dados são baseados nas reanálises do NCEP/NCAR (*National Center for Atmospheric Research*) e são empregados com resolução horizontal de latitude x longitude 2,5° x 2,5°, para o período iniciado em 1979, onde o ciclo sazonal é removido do campo do campo médio mensal do geopotencial e em seguida uma matriz de covariância é usada na análise da EOF.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Modo Anular Sul

Neste trabalho foi constituído que as diferentes fases do MAS, seriam baseadas em limiares para distinguir a fase negativa da positiva. Onde a fase positiva seria representada por valores mensais do índice maiores do que zero (>0) e a fase negativa foi representada por valores mensais do índice menores do que zero(<0) e os meses em que o valor do índice mensal encontrado é zero, tratou-se como mês neutro(=0).

3.2.2 Oscilação Semi-Anual

O método para calcular o índice da Oscilação Semi-Anual foi baseado no descrito por Van Loon (1967). O autor encontrou que a pressão média em 50°S e 65°S possuem fases opostas, devido a variação latitudinal da posição do cinturão de pressão circumpolar e do aquecimento desigual das

latitudes médias e altas. O marcado da componente semi-anual é maior nas latitudes altas no solstício ao contrário do que é nas latitudes médias que é encontrado nos meses de equinócio. O cavado circumpolar é caracterizado por uma região de declínio dos distúrbios baroclínicos, onde esse cavado mais forte do que o normal está associado com a queda de pressão a norte dos subtropicos e manifesta-se pelo enfraquecimento da alta subtropical do Pacífico (Meehl, 1998).

Van Loon (1967) descreveu o índice como sendo a diferença da pressão média em nível do mar entre 50°S e 65°S ou da média zonal da temperatura em 500 hPa entre essas duas latitudes.

$$P_{nm}^{50^{\circ}S} - P_{nm}^{65^{\circ}S}$$

$$T_{500hPa}^{50^{\circ}S} - T_{500hPa}^{65^{\circ}S}$$

Onde P_{nm} é a pressão a nível do mar em 50°S e 65°S respectivamente e T_{500hPa} é a temperatura em 500 hPa em 50°S e 65°S respectivamente.

Esse trabalho utilizou o índice em função da temperatura em 500 hPa, primeiramente usado por Van Loon (1967), onde o autor sugere que essa forma de calcular o índice indica o estado real da Oscilação Semi-Anual, estando realmente associado ao fenômeno. Meehl (1998) aponta que a intensificação semi-anual do gradiente de temperatura em 500 hPa na média troposfera entre as latitudes de 50°S (dominada pelos oceanos) e 65°S (área continental polar) está intimamente ligada com o aumento semi-anual da atividade ciclônica e baroclínica, modulando assim a intensidade do cavado circumpolar.

3.2.3 Cálculo de Compósitos

A relação entre as variáveis e os modos climáticos foi calculada a partir de médias ponderadas de acordo com o trabalho proposto por Franco & Santos (2010). A média ponderada parte do princípio que cada valor do conjunto é multiplicado pelo seu “peso”, ou seja, sua importância relativa. Assim, a média ponderada é calculada tomando em consideração, as condições adicionais associadas a cada um dos valores dos dados. Isto é, algum dos valores são multiplicados por um fator multiplicativo extra, quando ocorrem com mais frequência. Ao contrário do que ocorre na média simples, no qual todos valores de um série, contribuem igualmente, em uma média ponderada, elas contribuem de forma desigual. O cálculo de média ponderada é uma importante ferramenta na estatística descritiva, sendo de suma importância quando o objetivo do trabalho é combinar duas médias de dois conjuntos com distintos valores a fim de obter um valor médio global.

As definição aritmética da média ponderada X_p pode ser explicada como um conjunto de números $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ cuja importância relativa (“peso”) é respectivamente $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$.

$$X_p = \frac{(X_1 + X_2 \times P_2 + P_1 \dots + P_n \times X_n)}{P_1 + P_2 + P_n \dots +} = \sum i = \frac{1n(X_1 \times P_1)}{1n \times P_1}$$

Onde x_1 é igual ao valor das variáveis em questão e Σi é o número total de observações.

O numerador é a soma dos produtos entre cada valor da variável em questão, multiplicado pelo índice do MAS e o denominador é calculado pela soma das frequências desse índice. Então a análise foi feita de maneira separada (índice positivo e índice negativo) para que, a diferença entre as associações positivas (índices positivos) e as negativas (índices negativos) determine com clareza a influência exata do índice em uma determinada área e a não influência entre os dois conjuntos.

O compósitos para o índice da Oscilação Semi-Anual foram calculados de maneira diferente ao aplicado no MAS, devido a sua característica principal no qual o índice não possui fases positivas e negativas e sim estado de expansão e contração do cavado circumpolar. Então os compósitos foram calculados a partir de trabalhos propostos por van Loon (1998) e Meehl (2002). Onde o índice foi separado nos meses de contração do cavado circumpolar e aumento do gradiente de temperatura entre 50°S e 65°S representado pelos meses de equinócios, onde os autores atribuíram os meses de: março, abril, maio e junho e os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro. E foram separados também nos meses de expansão do cavado circumpolar e diminuição do gradiente de temperatura entre 50°S e 65°S, representados pelos meses de junho, julho, agosto e setembro e pelos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março. A partir dessa separação foram calculados as médias ponderadas entre os meses de expansão menos os meses de contração.

A Oscilação Semi-Anual não tem o seu estudo tão frequente quanto os outros modos de variabilidade existentes no Hemisfério Sul, isso se deve principalmente pelo fato de que alguns autores (Meehl, 2002; Wainer & Tracchetto, 2005) inferem que a OSA vem enfraquecendo ao longo dos anos. No entanto, se achou necessário incluir a OSA nesse trabalho, justamente por se tratar de uma nova fonte de dados juntamente com uma nova metodologia. Assim é possível verificar qual o comportamento da OSA nos últimos 30 anos.

3.2.4 Teste de Tendência de Mann-Kendall

A série temporal do índice do Modo Anular Sul foram avaliadas pelo teste não paramétrico de Mann-Kendall, baseado no trabalho de Karmeshu (2012).

O teste de Mann-Kendall é considerado um dos testes mais utilizados e significativos para analisar as mudanças em séries climatológicas, permitindo também a detecção e a aproximada localização do ponto de início da determinada tendência. Duas vantagens essenciais, são de extrema importância para a utilização desse teste, a primeira se concentra no fato de que é um teste não paramétrico e sendo assim, não necessita que os dados possuam uma distribuição normal. A segunda vantagem é que o teste possui baixa sensibilidade as quebras abruptas na série temporal, devido principalmente a sua não homogeneidade. A hipótese nula (H_0) então é testada, onde assume-se que não exista tendência (os dados são ordenados aleatoriamente e independentemente) então na sequência é testada a hipótese alternativa H_1 , que assume que a série temporal possui tendência.

O valor estatístico de S (Mann-Kendall) é calculado seguindo:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(T_j - T_i)$$

$$\text{sign}(T_j - T_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } T_j - T_i > 0 \\ 0 & \text{if } T_j - T_i = 0 \\ -1 & \text{if } T_j - T_i < 0 \end{cases}$$

Onde T_j e T_i são os valores anuais da série temporal nos anos de j e i , $j > i$, respectivamente.

Para esse trabalho a hipótese nula foi testada a 95% (0,05) de nível de significância para o índice do Modo Anular Sul e da Oscilação Semi-Anual.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 COMPORTAMENTO CLIMATOLÓGICO DO MODO ANULAR SUL

O índice do Modo Anular Sul, é definido como a componente principal da altura geopotencial em 700 hPa, desde 20°S até o polo Sul. A fase positiva (negativa) do MAS é caracterizada por anomalias de alta pressão nas latitudes médias e uma anomalia de baixa pressão nas latitudes altas médias, levando assim a ocorrência de um fortalecimento (enfraquecimento) do vórtice circumpolar e dos ventos zonal de oeste em torno da Antártica.

A figura 4.1 apresenta a série temporal da média mensal do MAS para 31 anos de dados (1980 – 2010). Foram encontrados 215 meses com valores positivos do índice MAS e 157 meses com valores negativos do MAS. Os valores positivos do índice do Modo Anular Sul foi encontrada preferencialmente no verão e no outono (primeiro semestre) e os valores negativos foram encontrados preferencialmente na primavera e no inverno (segundo semestre).

Os valores positivos foram encontrados preferencialmente no primeiro semestre de cada ano (verão e outono) e os valores negativos foram encontrados prevalecendo no segundo semestre (primavera e inverno). Este padrão pode ser explicado pelos resultados encontrados por Kidston et al. (2009) que mostraram a variabilidade sazonal do MAS, através de regressão da temperatura e da precipitação. Eles encontraram que o MAS varia sazonalmente, com um forte padrão simétrico zonal, no verão onde este vai decaindo e se tornando mais fraco no inverno e na primavera. Os autores King & Turner (2007) inferem que o mecanismo fundamental que dirige a circulação do MAS é o aquecimento não uniforme da Terra e do transporte de energia através da circulação atmosférica, onde a transferência de calor (ar frio) do equador (polos) tem a sua relação para compor o padrão do Modo Anular Sul.

Muitos trabalhos (Marshall, 2004; Arblaster & Meehl, 2006) indicam que o Modo Anular Sul vem apresentando a partir da década de 60 uma tendência crescente em seu índice, essa tendência foi analisada através do teste de Mann-Kendall (fig.4.1). Neste trabalho também foi encontrada uma tendência positiva para o MAS nos últimos anos, a nível de significância de 99,5% ($\alpha=0.05$). A magnitude da tendência também foi estimada, como de aproximadamente 0.0902 (figura não mostrada), sendo esta positiva, corroborando assim com o predomínio da fase positiva do MAS encontrada em outros trabalhos. Essa magnitude de tendência baixa que foi encontrada, pode estar

relacionada ao fato de que os trabalhos atuais sobre o Modo Anular Sul apontam, que a o predomínio da fase positiva do MAS vem ocorrendo prioritariamente no verão, enquanto que nesse trabalho foi calculado o Mann-Kendall para a série temporal completa.

O fortalecimento dos ventos de oeste sobre o continente Antártico modulados pela tendência positiva do MAS, pode favorecer um resfriamento sobre a Antártica, devido principalmente ao isolamento térmico do continente. Em contrapartida esse fortalecimento dos ventos pode resultar no aquecimento na Península Antártica, devido as características morfológicas da região, onde há uma maior movimentação das massas de ar quente marítimas através da circulação atmosférica. Os resultados de Turner et al. 2005 apontam através de séries temporais um forte aquecimento sobre a Península Antártica e Thompson & Solomon (2002) indicam que o isolamento do continente Antártico não é encontrado na Península Antártica, onde o fortalecimento dos ventos de oeste pode aumentar a advecção de ar provenientes do oceano, o que resulta em um significativo aumento da temperatura na área. De acordo com Cai et al. (2005) essa mudança no cinturão de ventos ocasiona um *spin-up* em toda a circulação oceânica nas latitudes médias do oceano Austral, incluindo o fortalecimento para sul dos giros subtropicais em particular na Corrente Leste Australiana. A tendência positiva do índice encontrada a partir da década de 60, contribui fortemente para a intensificação dos ventos de oeste então.

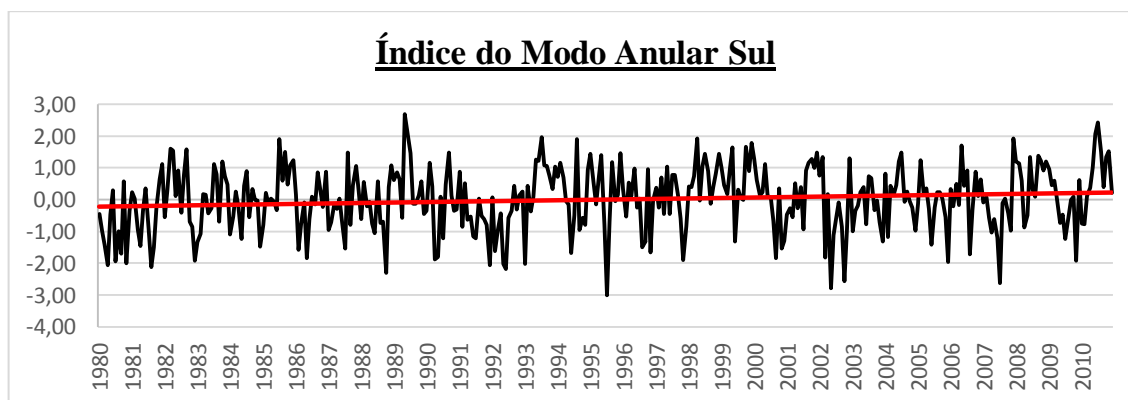


Figura 4. 1 Índice do Modo Anular Sul extraído do CPC/NCEP para 31 anos de dados (1980 – 2010)

4.2 COMPÓSITOS PARA O MODO ANULAR SUL

As figuras 4.2 e 4.3, apresentam os compósitos para a diferença entre as fases positivas e negativas do MAS em diferentes níveis atmosféricos (1000, 850, 700, 500, 300, 200 hPa), para o

campo médio das componentes zonal e meridional do vento. É possível observar na figura 4.2, o padrão mais conhecido do MAS, que é o padrão dipolo entre as latitudes médias ($\sim 40^{\circ}\text{S}$) e altas ($\sim 60^{\circ}\text{S}$). Nos níveis mais próximos da superfície (fig. 4.2 a, b) os ventos zonais mais intensos associados a fase positiva do MAS nas latitudes polares, estão associados com dois núcleos distintos: o primeiro, que vai do oceano Índico e estendendo-se para esquerda até o oceano Pacífico (costa o leste da Antártica) e o segundo núcleo localizado entre o Atlântico e o Pacífico, no estreito de Drake (costa oeste da Antártica). Já nas latitudes médias, é possível notar um padrão de trem de onda, com 3 núcleos, localizados um em cada oceano (Pacífico, Índico e Atlântico) em todos os níveis atmosféricos. Esse padrão de 3 núcleos distintos é encontrado também na climatologia proposto por van Loon (1956). Onde o autor sugere que a conexão entre essa onda 3 nas latitudes médias e a sua influência na América do Sul, Austrália e Índia está relacionada principalmente, na movimentação dos sistemas de pressão modulando assim os cinturões dos ventos de oeste.

Nota-se que na figura 4.2, a fase positiva do índice impõe um fortalecimento dos vento de oeste em torno do continente Antártico (altas latitudes) e em contrapartida um enfraquecimento dos ventos de oeste nas latitudes médias (norte de 40°S). Vale destacar que o modo anular está confinando desde os baixos níveis da troposfera até a estratosfera (não mostrado). Esses resultados são condizentes com os encontrados por Thompson & Wallace (2000), os quais encontraram que os traços característicos da circulação simétrica zonal do HS, revelam-se como o principal modo de variabilidade na circulação média zonal a partir da superfície até a baixa estratosfera e que essa variação do campo zonal do vento em 1000 hPa, apresenta máximos distintos entre $\sim 25^{\circ} - 35^{\circ}\text{S}$ e $\sim 55^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$ e é originada devido a variação do campo médio de geopotencial que reflete na variação média mensal da PMNM, provocando assim, anomalias positivas da componente zonal do vento geostrófico, refletindo então em uma intensificação dos ventos de oeste na região entre os diferentes cinturões de pressão.

É possível notar na figura 4.2 a presença de um “ramo” em todos os níveis atmosféricos estudados que se estende no Pacífico Central Sul, sendo este, mais profundo nos níveis de 1000 a 700 hPa. Esse “ramo”, pode estar relacionado com um padrão conhecido como “Baixa do mar de Amundsen” (BMA), apresentado por Turner et al. (2012) na qual os autores inferem que a profundidade da BMA (centro de baixa pressão sobre o mar de Amundsen) é fortemente influenciada pelas fases do MAS, onde a anomalia da pressão em nível médio do mar positiva (negativa) ocorre com a fase negativa (positiva) do MAS. Embora os autores afirmem que fatores dinâmicos locais

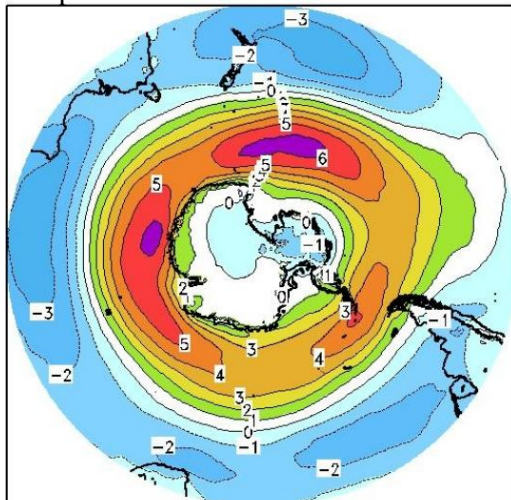
característicos da região como a circulação atmosférica, diferenças na temperatura possam desempenhar um importante papel na manutenção da BMA.

Tabela 4. 1 Nível de significância para as componentes zonal e meridional do vento, nos níveis atmosféricos de 1000, 850, 700, 500, 300 e 200 hPa.

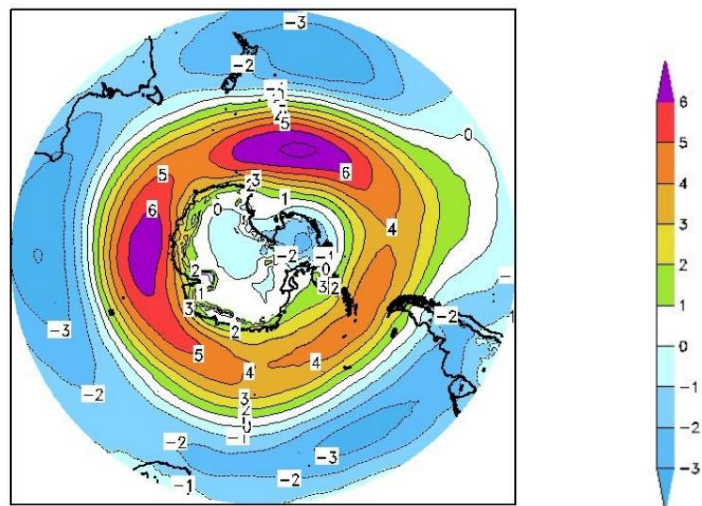
hPa	Comp. Zonal (u)	Comp. Meridional (v)
1000	2,5 %	1%
850	2,5 %	1%
700	1%	10%
500	2,5%	10%
300	10%	5%
200	10%	2,5%

No contexto oceânico essa intensificação dos ventos de oeste, afetam também a circulação da Corrente Circumpolar Antártica (CCA), seu escoamento de leste são intensificados e esses fortes ventos de oeste podem estar relacionados com a diminuição (aumento) da temperatura da superfície do mar entre $\sim 50^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$ ($\sim 40^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{S}$) devido principalmente a essa ressurgência (subsidência) das águas mais frias (quentes) na costa da Antártica. Esse mecanismo de subsidência e ressurgência modulado principalmente pela fase positiva do MAS pode modificar a profundidade da termoclina sazonal nas regiões polares e nas latitudes médias, movidas principalmente pelos giros subtropicais no HS. Podendo então reduzir o gradiente de temperatura ao longo da termoclina, de maneira que afete toda a camada de mistura do oceano sul, modulando assim a produtividade biológica da região, onde nas áreas de ressurgência (subsidência) são encontrados altos (baixos) índices de clorofila e por consequência uma maior (menor) produtividade primária.

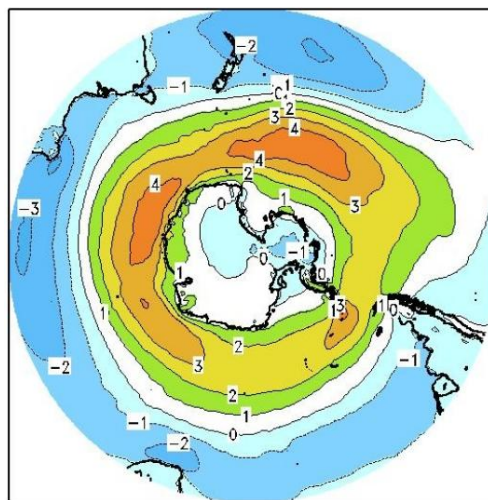
(a) Compósito para o vento zonal em 1000 hPa – MAS(+) – MAS(-)



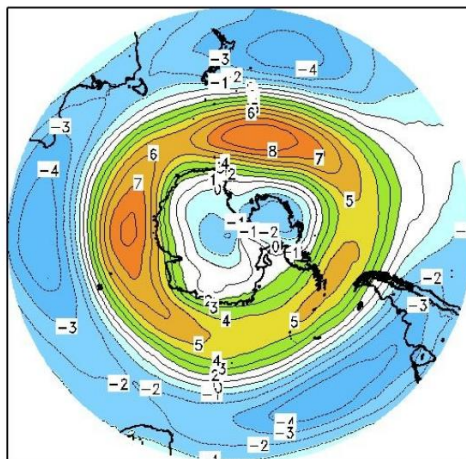
(b) Compósito para o vento zonal em 850 hPa – MAS(+) – MAS(-)



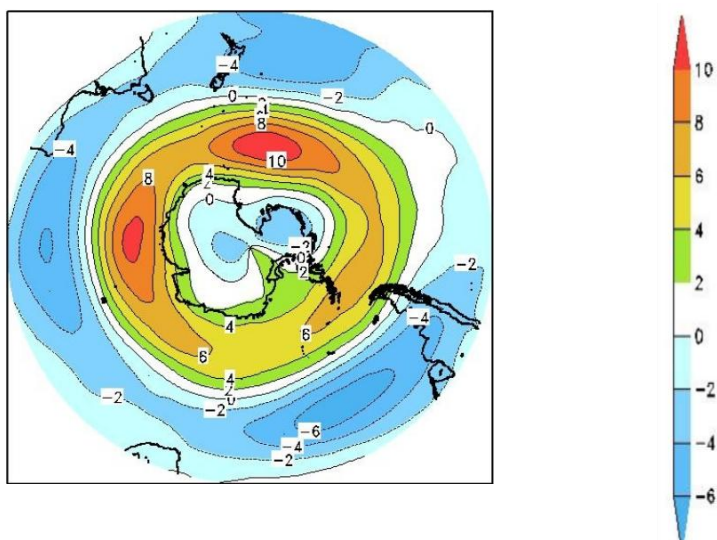
(c) Compósito para o vento zonal em 700 hPa – MAS(+) – MAS(-)



(d) Compósito para o vento zonal em 500 hPa – MAS(+) – MAS(-)



(e) Compósito para a componente zonal do vento em 300 hPa – MAS(+)- MAS(-)



(f) Compósito para a componente zonal do vento em 200 hPa – MAS(+) – MAS(-)

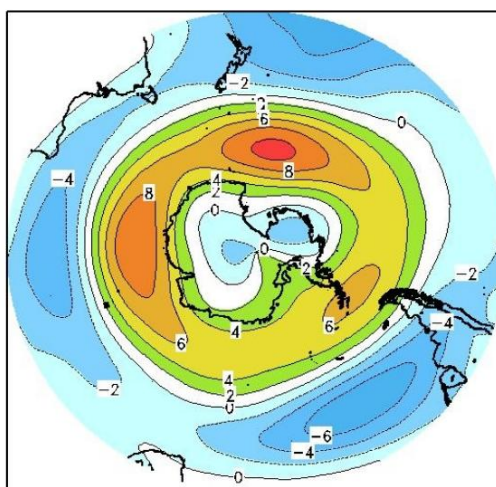


Figura 4. 2 Compósitos para a componente zonal do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.

Alguns autores como Lefebvre et al. (2004) e Lovenduski & Gruber (2005) encontraram que essa intensificação para leste da CCA, resulta em uma deriva de Ekman mais pronunciada para norte, gerando assim, uma subsidência de massas de água em $\sim 45^{\circ}\text{S}$ e ressurgência na costa da Antártica e nas latitudes médias uma deriva de Ekman mais pronunciada para sul.

Além disso observa-se na figura 4.2 que a fase positiva do MAS, resulta em um enfraquecimento dos ventos de oeste ao sul da Austrália, o que pode ocasionar uma diminuição da entrada de frentes frias ao sul do continente Australiano, por outro lado a fase negativa do MAS reflete na expansão dos ventos de oeste em direção ao Equador. Essa mudança nos ventos pode resultar em mais tempestades e sistemas de baixa pressão mais fortes ao sul da Austrália (Cai et al. 2005).

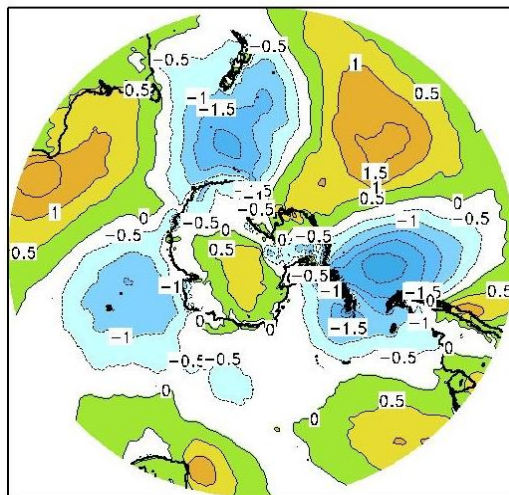
O compósito da componente meridional do vento está apresentando na figura 4.3. Em níveis próximos a superfície em 1000, 850 e 700 hPa é possível notar a presença do padrão de onda 3 como já mencionado anteriormente bem configurado. Esse padrão de onda 3 assemelha-se a assinatura do padrão de onda 3 que aparece nos campos de vento zonal no trabalho proposto por van Loon Rogers (1984). Onde segundo Raphael e Holland (2006) esse padrão é um modo quase-estacionário, tratando-se da parte assimétrica da circulação atmosférica (pressão e vento) de grande escala, estando ele, associado principalmente com o escoamento meridional nos extratropicos do HS. Esse padrão possui sua variabilidade barotrópica por natureza e o seu sinal é encontrado tanto na troposfera das latitudes médias como na interface oceano-atmosfera (Cai et al, 1999).

Nota-se na figura 4.3 uma bem marcada circulação meridional de sul para norte de ar frio e de norte a sul de ar quente. Essa circulação dirige a temperatura do ar podendo modificar a extensão de gelo e devido essa movimentação “mais intensa” pode intensificar a formação de tempestades ao entorno da Península Antártica. O padrão de onda 3 é encontrado em todos os níveis estudados, porém, melhor destacado nos níveis de 1000 e 850 hPa. A relação entre o padrão de onda 3 e o MAS foi explicado por Yuan & Li (2008), que encontraram uma baixa correlação entre os dois modos, aproximadamente 0.28 com 8% de relação. A partir desses resultados, sugere-se que o padrão de onda 3 é sobreposto ao MAS, e por se tratar de um padrão quase-estacionário e o MAS ser o padrão de variabilidade dominante no HS, é possível que o MAS esteja modulando a intensidade desse padrão, modulando este ao sul das ondas do Padrão de onda 3, e assim modificando a extensão de gelo marinho na costa da Antártica. Yuan et al. (2012) encontrou uma intensificação de três ramos do padrão de onda 3, com movimentação para sul, coincidem com três máximas extensões da borda de gelo marinho,

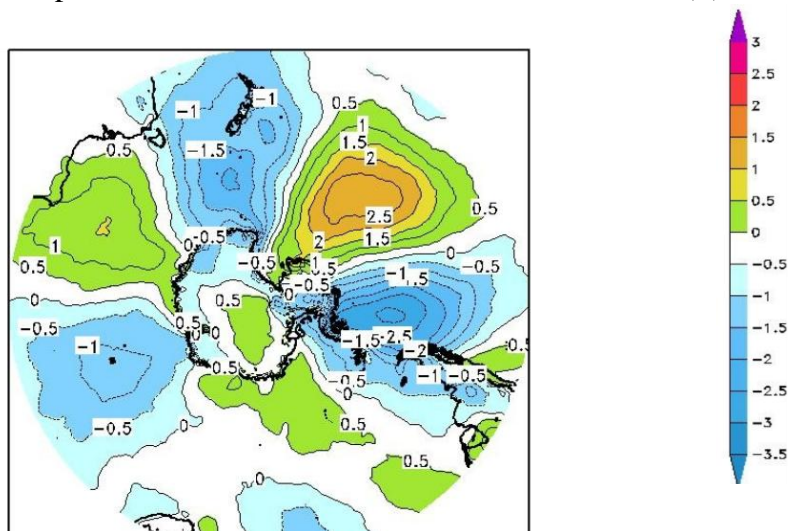
principalmente no inverno. Os autores então sugerem que essa intensificação para sul das ondas pode estar relacionadas como o aumento da extensão de gelo marinho em escala sinótica.

O compósito da componente meridional do vento (fig. 4.3), apresenta os seus valores mais intensos e ativos no Oceano Pacífico principalmente na costa oeste da Antártica e na Península Antártica. A região mais intensa do compósito do vento meridional se assemelha com o “ramo” encontrado no compósito do vento zonal, sendo assim, essa intensificação tanto no vento zonal como no vento meridional parece estar relacionada com a Baixa do Mar de Amundsen. Esse padrão mais ativo no Pacífico pode ser corroborado com os trabalhos de (Ding et al. 2011; Turner et al. 2005) onde os autores encontraram sobre o mar de Amundsen a maior variabilidade do MAS, onde a localização meridional da BMA é fortemente modulada pelas fases do MAS, sendo que a fase positiva (negativa) está relacionada com um deslocamento mais ao norte (sul) da BMA. Isso implica em um movimento mais ao sul das trajetórias de ciclones (*storm tracks*) quando o MAS está positiva e por consequência

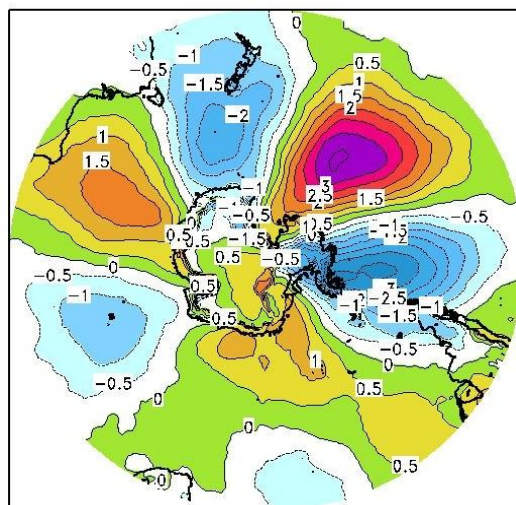
(a) Compósito para a componente meridional do vento em 1000 hPa – MAS(+) – MAS(-)



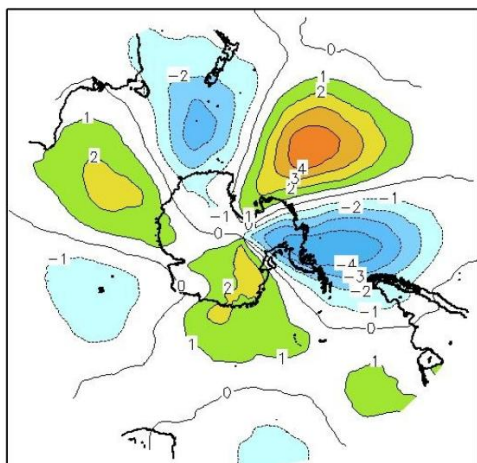
(b) Compósito para a componente meridional do vento em 850 hPa – MAS(+) – MAS(-)



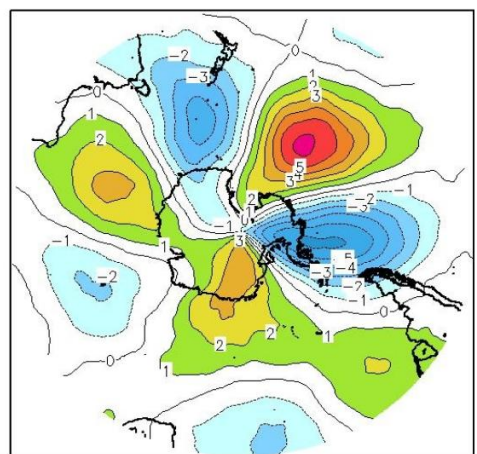
(c) Compósito para a componente meridional do vento em 700 hPa – MAS(+) – MAS(-)



(d) Compósito para a componente meridional do vento em 500 hPa – MAS(+) – MAS(-)



(e) Compósito para a componente meridional do vento em 300 hPa – MAS(+) – MAS(-)



(f) Compósito para a componente meridional do vento em 200 hPa – MAS(+) – MAS(-)

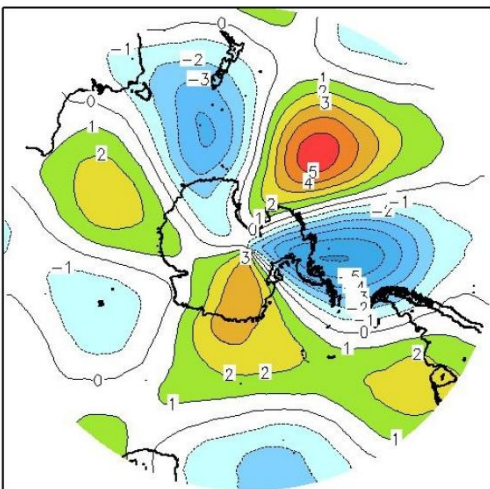


Figura 4. 3 Compósitos para a componente meridional do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.

um deslocamento mais ao norte quando o MAS está negativo. Reboita et al. (2009) encontraram que durante a fase negativa do MAS a densidade de ciclones está mais dispersa e deslocada para norte quando comparada com a fase positiva que apresenta forte concentração de ciclones em torno do continente Antártico.

A intensificação do campo meridional do vento induzidos pelo padrão de pressão característico da fase positiva do MAS, através da advecção de ar quente, promove o aquecimento do Mar de Weddel e sobre a Península Antártica e ar frio sobre o Mar de Amundsen-Bellinghausem e sobre o mar de Ross. Raphael & Holland (2006) apontam que esse resfriamento e aquecimento dos mares da Antártica influenciam na distribuição do gelo marinho, através da advecção da temperatura e dos mecanismos de advecção do gelo marinho. Lefebvre & Goose (2005) indicam também que essa advecção de ar quente proveniente do oceano para os mares de Bellingshausen/Amundsen e para a Península Antártica, incentiva o escoamento de ar mais frio e do fluxo de gelo marinho do Mar de Ross para fora do continente, levando uma maior formação de gelo marinho quando a superfície do oceano fica exposta.

Em relação a temperatura da superfície do mar no Oceano Austral, é conhecido que a TSM apresenta um gradiente meridional de temperatura entre as altas e as médias latitudes em sua climatologia (não apresentado). O compósito para a TSM em relação a diferença entre a fase positiva e negativa do MAS (fig. 4.4) apresenta algumas setorizações. É possível observar um pico impulsionado pela fase positiva do MAS na costa leste da América do Sul entre $\sim 35^{\circ}\text{S}$ e 50°S . Essa região é onde ocorre o encontro das massas de água geladas e menos salinas provenientes de um ramo da Corrente Circumpolar Antártica (CCA), conhecido como Corrente das Malvinas e das águas quentes e mais salinas provenientes dos trópicos, conhecido como Corrente do Brasil. Considerada como uma das regiões mais energéticas dos oceanos, intensa atividade de mesoescala e também pela sua forte modulação na camada limite regional tanto atmosférica como oceânica (Pezzi et al. ,2009). O estreito de Drake é a ligação entre a América do Sul e a Península Antártica. A CCA ao passar pelo estreito sofre uma aceleração na sua velocidade, no qual a turbulenta movimentação força um ramo da corrente para norte (Corrente das Malvinas). Este processo está ligado a variação na geomorfologia local do estreito de Drake e pode estar sendo modificado através de um efeito local do MAS. No entanto, a assinatura intensificada pela fase positiva do MAS na região da confluência Brasil-Malvinas, deve ser estudada com mais atenção. Outras setorizações são as regiões da costa leste e costa oeste da África do Sul. Região conhecida pela retroflexão da Corrente das Agulhas, alguns trabalhos como o de Gonçalves (2012), sugerem que a intensificação dos ventos de oeste, resultado da tendência positiva do MAS, atua como o principal regulador do transporte de água do vazamento das Agulhas (região dos vórtices

oriundos da retroflexão da Corrente das Agulhas) em direção ao Oceano Atlântico Sul, resultando em um aumento da TSM na região.

Outra setorização marcante do MAS na TSM é encontrada em torno do Continente Antártico, essa aparentemente está relacionado com a movimentação da CCA, impulsionada pelo vento, como também com a concentração de gelo marinho Antártico. A intensificação dos ventos de oeste, tem impulsionado áreas de ressurgência nas altas latitudes e subsidência nas médias latitudes. Essa setorização pode ser explicada pelos resultados encontrados por Lovenduski & Gruber (2005) onde os autores afirmam que a fase positiva do MAS, está associada com uma diminuição da TSM na costa da Antártica ($\sim 60^{\circ}\text{S}$), principalmente relacionada com a ressurgência de águas frias, assim como encontrado por Lefebvre et al (2005). A temperatura da superfície do mar apresenta uma relação de fase com o vento zonal (fig.4.2) e uma relação fora de fase com o vento meridional (fig 4.3), indicando assim que o vento de norte corresponde com diferenças positivas na temperatura da superfície do mar e os ventos de sul, apresentam diferenças negativas na temperatura da superfície do mar.

No oceano austral, o fortes ventos de oeste tendem a aumentar a evaporação e o direcionamento dos fluxos de calor para atmosfera, resultando assim em temperaturas da superfície do mar mais baixas. Sem Gupta & England (2006) apontam que as anomalias da tensão do vento impulsionadas pelo MAS, tem geralmente componentes meridionais como também a componente zonal no oceano e a resposta do escoamento zonal está diretamente relacionado com a movimentação dos ventos. Os autores apontam também que a redistribuição da salinidade e da temperatura atuam na alteração do gradiente isopical, principalmente nas camadas superficiais do oceano, através do qual, o equilíbrio térmico do vento leva uma aceleração do fluxo zonal em $40^{\circ}\text{S} - 60^{\circ}\text{S}$ a uma desaceleração entre $20^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$ durante a fase positiva do MAS.

Temperatura da Superfície do Mar – MAS(+) – MAS(-)

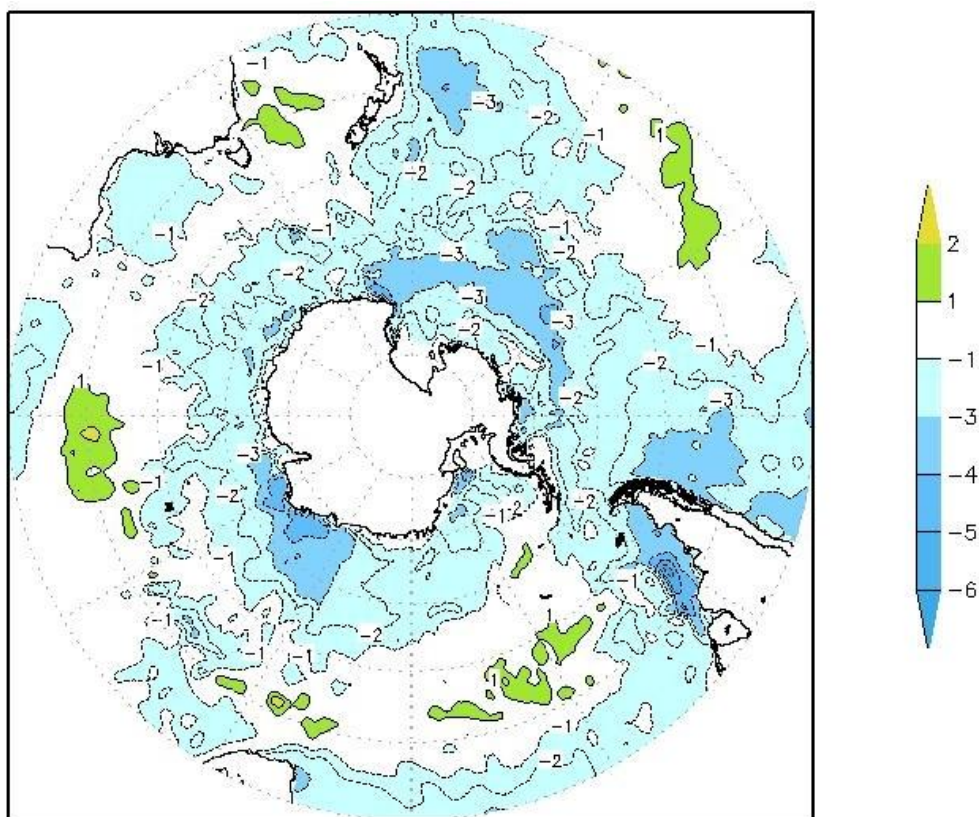
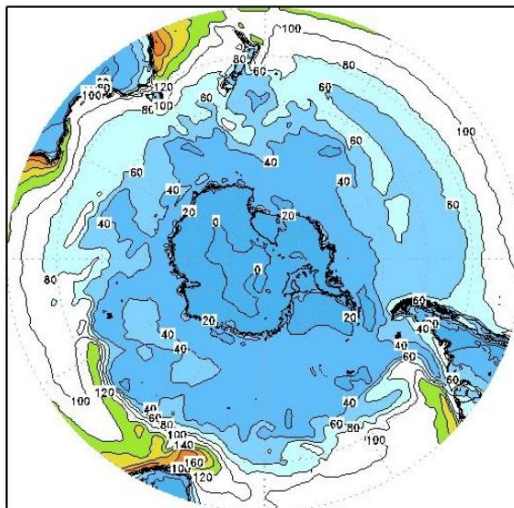


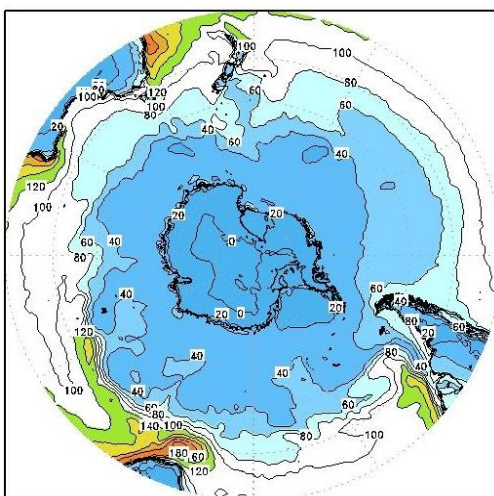
Figura 4. 4 Compósito para a temperatura da superfície do mar, calculados para o período entre 1980 e 2010 a partir de dados da reanálise CFSR do NCEP.

A figura 4.5 apresenta os compósitos para o fluxo de calor latente a partir da diferença dos índices positivos e negativos do MAS. É possível notar que estes compósito, apresentam uma regionalização bem marcada, estando esse diretamente relacionado com a componente meridional do vento em 1000 hPa (fig. 4.3a). O calor latente analisado em fases distintas do Modo Anular Sul (fig. 4.5 a e b) apresenta valores positivos na costa leste da América do Sul e da África, regiões que compreendem a corrente do Brasil e a corrente das Agulhas, respectivamente. Valores positivos também são encontrados no oceano próximo a costa da Nova Zelândia e costa Leste-Oeste da Austrália, resultados encontrados também por Yu et al. (2012). É possível observar claramente os processos de interação oceano-atmosfera na figura dos compósitos para a fase positiva e negativa do MAS (fig. 4.5 a e b) que são resultados do contraste termal da CBM. O lado norte (sul) da Confluência Brasil Malvinas, a corrente do Brasil (Malvinas) apresenta as águas mais quentes (frias) com fluxos de calor

(a) Compósito para o Fluxo de Calor Latente – MAS(+)



(b) Compósito para o Fluxo de Calor Latente – MAS(-)



(c) Compósito para o Fluxo de Calor Latente – MAS(+)-MAS(-)

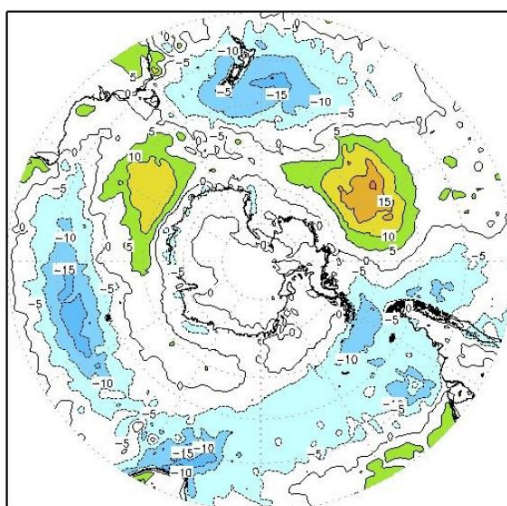


Figura 4. 5 Compósitos para o fluxo de calor latente (w/m^2) calculados para o período entre 1980 e 2010 a partir de dados da reanálise CFSR do NCEP.

positivos (negativos) e ventos mais intensos (fracos) indicando assim os fluxos de oceano para a atmosfera (atmosfera para o oceano). Pezzi et al. (2009) apontam um aumento efetivo dos fluxos de calor sobre as águas mais quentes da Corrente do Brasil, no entanto, não aponta qualquer relação com o Modo Anular Sul.

Quando analisado o compósito para o fluxo de calor latente nota-se uma região mais intensa no Pacífico Sul (na região preferencial do Mar de Amundsen-Bellinghausem e no sul da Austrália. O “ramo” encontrado no padrão do vento zonal no Pacífico Sul, modula o padrão do fluxo de calor latente nessa região. De acordo com Raphael & Holland (2005), a relação entre as diferenças de massas atmosféricas entre as médias e altas latitudes no HS, modula o padrão dos sistemas ciclônicos assim influenciando na quantidade de calor latente dentro da região dos mares de Bellingshausen/Amundsen e para fora do mar de Ross. O fluxo de calor latente é de extrema importância para quantificar as interações oceano-atmosfera, no qual estudos mostram que o feedback da TSM na evaporação superficial contribui para o desenvolvimento de vários modos climáticos (Webster et al, 1999). O fluxo de calor latente é determinado pela velocidade do vento em superfície e pela diferença de umidade entre o ar-mar. Nota-se na figura 4.5 que o compósito para o calor latente possui alguns pontos de maior intensidade, tanto negativa como positiva. São encontrados positivos na região do Pacífico Sul (a leste do Mar de Ross), costa da Austrália e negativo na Nova Zelândia e na região do Índico próximo a região da África se estendendo até a costa da América do Sul. De acordo com Bigg (2003) existem 4 regiões de grande atividade ciclônica, são elas: oeste do Mar de Weddell, regiões ao sul da África e Austrália e o leste do Mar de Ross, essas áreas possuem grande transferência de calor do oceano para a atmosfera.

A fase positiva (negativa) do MAS é associada com anomalias negativas (positivas) dos fluxos de calor latente sobre o oeste do Oceano Índico e no oceano Pacífico Central, com anomalias positivas (negativas) dos fluxos de calor sobre as regiões acima do oceano Austral, no qual pode ser explicada pela anomalia do vento meridional associadas com as fases do MAS (Yu et al., 2012)

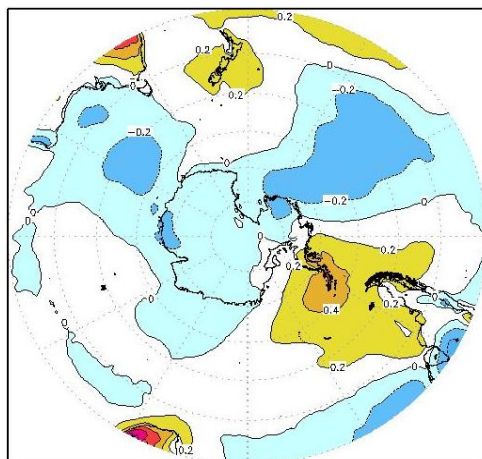
Os compósitos para a umidade específica estão demonstrados na figura 4.6. É possível notar setorizações bem marcadas em todo o oceano austral em todos os níveis atmosféricos estudados. A umidade apresenta o comportamento relacionado com o vento meridional, onde os valores negativos encontrados no Pacífico Sul, estão relacionados principalmente com o deslocamento de ar frio provenientes do continente Antártico, isto porque quando mais frio (quente) o ar deslocado, menor

(maior) é a capacidade de reter a água e assim retém menos (mais) vapor. Ao contrário do que é encontrado na Península Antártica e sul do Oceano Atlântico. Como era esperado nas regiões polares a umidade específica é mais baixa do que nas latitudes médias e nas latitudes tropicais. O predomínio da fase positiva do MAS, impulsionando o aumento da velocidade dos ventos circumpolares tendem a aumentar o calor latente e a evaporação e por consequência diminuir a umidade específica, resultando uma maior nebulosidade na região, aumentando assim a atividade convectiva. Como encontrado por Irving (2010) e Reboita (2009) que sugerem uma modificação no deslocamento dos ciclones extratropicais para a região da costa da Antártica e o enfraquecimento desses ciclones ao norte de 50S.

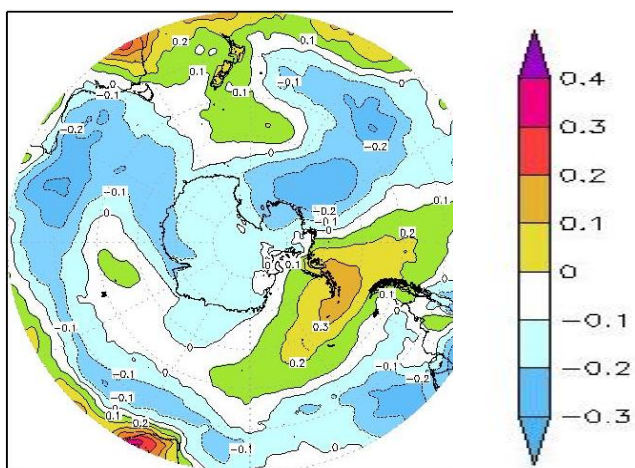
A fase positiva do MAS leva os menores valores de umidade específica dentro do continente Antártico, e os maiores valores de umidade em altas latitudes e contrapartida menores valores em latitudes médias, principalmente nos níveis dw 300 e 200 hPa.

As regiões do Pacífico Leste e do Atlântico Oeste está possivelmente relacionada com o aquecimento sofrido nos últimos anos na Península Antártica, já na costa da Austrália o padrão é diferente (menores valores nos baixos níveis) e maiores valores nos altos níveis isso possivelmente indica que a dinâmica que rege o MAS no continente Australiano é diferente da dinâmica que modula a umidade na região do Pacífico e Atlântico Oeste.

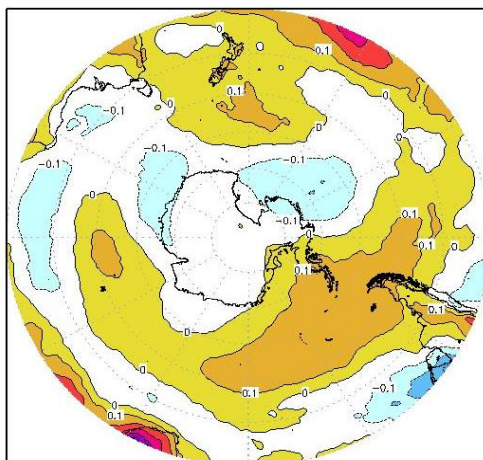
(a) Umidade específica (kg/g) – MAS(+) - MAS(-) 1000 hPa



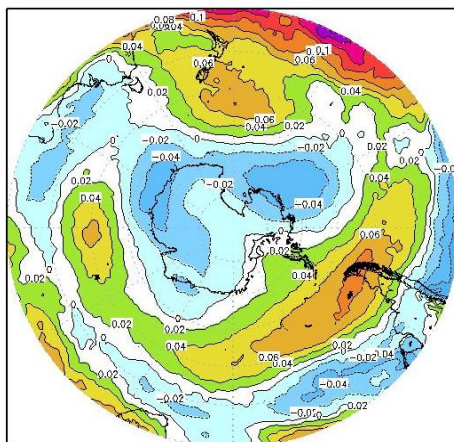
(b) Umidade específica (kg/g) – MAS(+) - MAS(-) 850 hPa



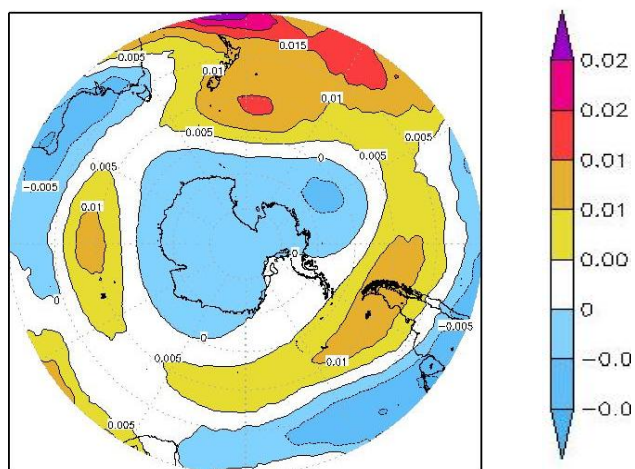
(c) Umidade específica (kg/g) – MAS(+) - MAS(-) 700 hPa



(a) Umidade específica (kg/g)– MAS(+) - MAS(-) 500 hPa



(b) Umidade Específica (kg/g) – MAS(+) –Mas(-) 300 hPa



(c) Umidade Específica (kg/g) – MAS(+) – MAS(-) 200 hPa

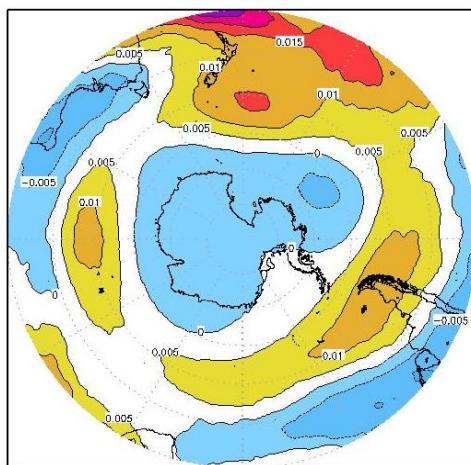


Figura 4. 6 Compósitos para a componente zonal do vento calculados entre o período de 1980 e 2010. Separadas em nível atmosférico: (a) 1000 hPa, (b) 850 hPa, (c) 700 hPa, (d) 500 hPa, (e) 300 hPa e (f) 200 hPa.

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO CLIMATOLÓGICO DA OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL

A Oscilação Semi-Anual foi definida por Van Loon (1967) como sendo caracterizada pela expansão e contração do cinturão de pressão atmosférica, entre as latitudes médias e altas no HS. Isso acontece em resposta a alta absorção de energia entre a Antártica e os oceanos subjacentes, resultando em uma onda semi-anual de atividade baroclínica Van Loon (1967 e Wallace & Simmonds, 2000).

O índice da OSA ao contrário do índice do Modo Anular Sul, não possui valores negativos para indicar a sua “fase negativa” e sim valores que indicam a sua fase de expansão e a sua contração, baseado na literatura.

A figura 4.7 apresenta as temperaturas de 50° e 65°S em 500 hPa. É possível notar uma pequena defasagem entre as duas temperaturas. Isso se deve principalmente aos contrastes entre o oceano e o continente nessas duas latitudes, pois em 50°S o domínio se dá por oceano e 65°S pelo continente polar. Observa-se também que a curva de temperatura em 65°S possui uma taxa de resfriamento um pouco mais lenta do que em 50°S, isso se deve ao fato de algumas partes do continente Antártico não possuírem um inverno típico, ou seja, não atingem uma temperatura mínima. De acordo com Taschetto et al (2007) o deslocamento do cavado circumpolar para norte em 50°S, intensifica o gradiente de pressão longitudinal entre os continentes e os oceanos adjacentes, fazendo com que ocorra advecção de ar quente do cavado para as altas latitudes, reduzindo assim de radiação de onda longa líquida devido as nuvens se estenderem continente adentro.

Foi analisada a tendência do índice da OSA, através do teste de Mann-Kendall em nível de significância de 0,05 Foi encontrada uma tendência positiva de magnitude de 0.0842 indicando assim uma tendência de aquecimento, já que o índice é baseado no gradiente de temperatura em 500 hPa entre as latitudes de 50°S e 65°S. É possível afirmar então que a Oscilação Semi-Anual vem realmente enfraquecendo ao longo dos anos, onde de acordo com Meehl (1998) o principal mecanismo que modula a intensidade da OSA é o gradiente de temperatura e este tem mostrado uma tendência de aquecimento desde de 1979 (época de enfraquecimento da OSA e predomínio da fase positiva do Modo Anular Sul).

No entanto, mesmo a OSA enfraquecendo ela ainda está presente no Hemisfério Sul, onde foi possível encontrar o padrão semi-anual no gradiente de temperatura e de pressão a nível do mar, entre as latitudes médias e as altas, sendo assim seu estudo ainda se faz necessário.

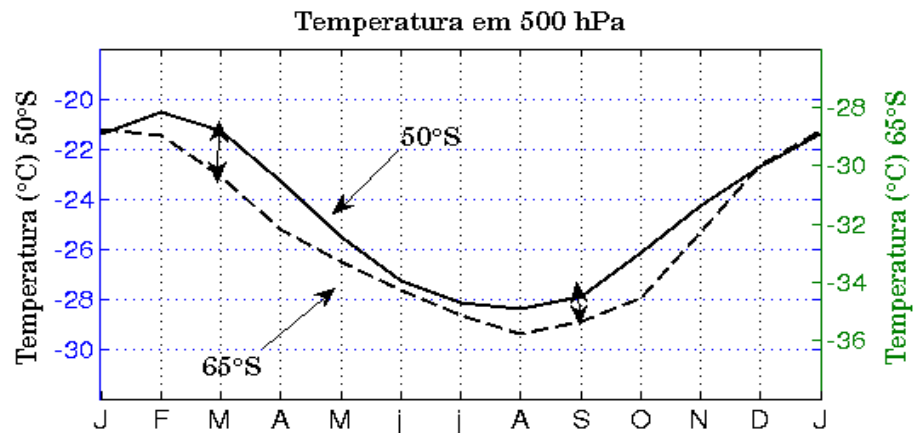


Figura 4. 7 Ciclo anual da média mensal da temperatura (°C) em 500 hPa em 50°S (linha contínua) e em 65°S (linha tracejada). Sobreposta para mostrar o mês do ano em média, onde o gradiente entre 50°S e 65°S se intensifica.

A figura 4.8 apresenta o gradiente de temperatura em 500 hPa entre as latitudes de 50°S e 65°S. É possível observar a intensificação do gradiente ocorrendo em estações de transição como outono e primavera (março e setembro), e nesses meses do ano reflete no cavado circumpolar mais profundo. E a diminuição do gradiente ocorre nas estações de verão e inverno (dezembro e junho). Para verificar a homogeneidade entre as médias do gradiente de temperatura entre 50°S e 65°S foi calculado o desvio padrão para a série temporal (fig. 4.11). Foi possível encontrar que os valores variaram entre 0,8 e 1,2, indicando valores próximos, com pequeno desvio padrão, confirmando a homogeneidade dos dados. A partir desses resultados foram feitos os compósitos para a Oscilação Semi-Anual com a componente zonal e meridional do vento.

Nota-se na figura 4.8, os dois maiores gradientes de temperatura são encontrados em março/abril e setembro/outubro e os menores em junho e dezembro. Van Loon (1972) observou que o cavado do Pacífico Sul na PMNM é mais afastado do sul e mais profundo em março e setembro e mais afastado do norte e mais fraco em junho e dezembro, ocasionando no oceano próximo a 50°S (65°), o resfriamento (aquecimento) no outono (primavera). Essa mudança no cavado circumpolar imposta pela OSA influencia também os campos de vento e de pressão, influenciando diretamente no deslocamento e na intensidade dos ciclones extratropicais.

Gradiente de temperatura entre 50°S – 65°S (1980 -2010)

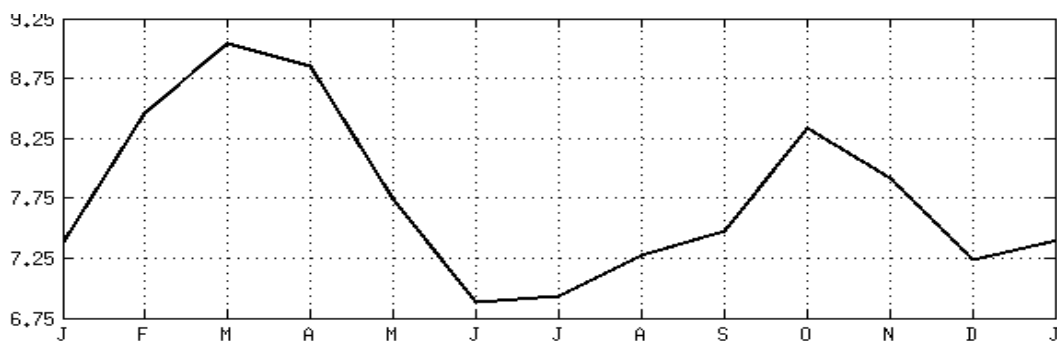


Figura 4. 8 Ciclo anual da diferença de temperatura (°C) em 500 hPa entre as latitudes de 50°S - 65°S.

A figura 4.10, representa a pressão em nível do mar nos meses de março, junho, setembro e dezembro. Onde de acordo com van Loon (1967) que trabalhou com a hipótese de que a média da pressão em 50°S e 65°S varia em fase oposta em resposta a variação latitudinal do cavado circumpolar em março e setembro. Então para interpretar os compósitos para a OSA, mapas da média mensal em nível do mar para os meses de março, junho, setembro e dezembro para o intervalo de 1980 – 2010 são apresentados na figura 4.10

Desvio Padrão do Gradiente de temperatura entre 50°S – 65°S.

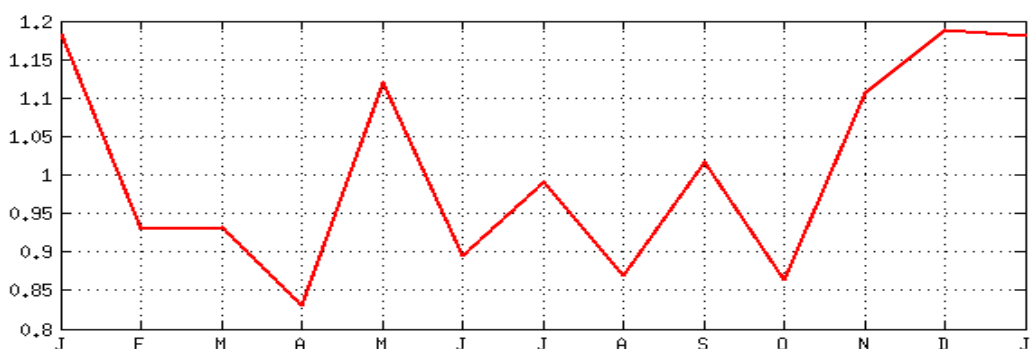


Figura 4. 9 Desvio padrão da diferença anual da temperatura (°C) em 500 hPa entre as latitudes de 50°S – 65°S.

É possível notar na figura 4.10, a presença do padrão semi-anual da na pressão em nível do mar. Nota-se que o cavado circumpolar em média está mais próximo da Antártica em março e em setembro e mais afastado em junho e dezembro, onde também é possível observar que a pressão central também é mais baixa nos meses de equinócio. Essa movimentação do cavado circumpolar (característico na OSA), será refletido provavelmente na velocidade do vento em superfície ao norte da calha circumpolar promovendo o enfraquecimento do vento. É possível notar na figura 4.10 uma maior expansão no cavado circumpolar nos setores dos oceanos Pacífico e Índico. Meehl (1991) apresenta que essa maior expansão nesses setores está possivelmente relacionada com o decaimento da pressão entre as latitudes de 40°S e 60°S, onde as anomalias positivas da pressão se estendem até os trópicos. O autor então sugere que essa modulação pode estar relacionada com os eventos de El Niño e La Niña no Pacífico Tropical e com as Monções da Índia no Oceano Índico.

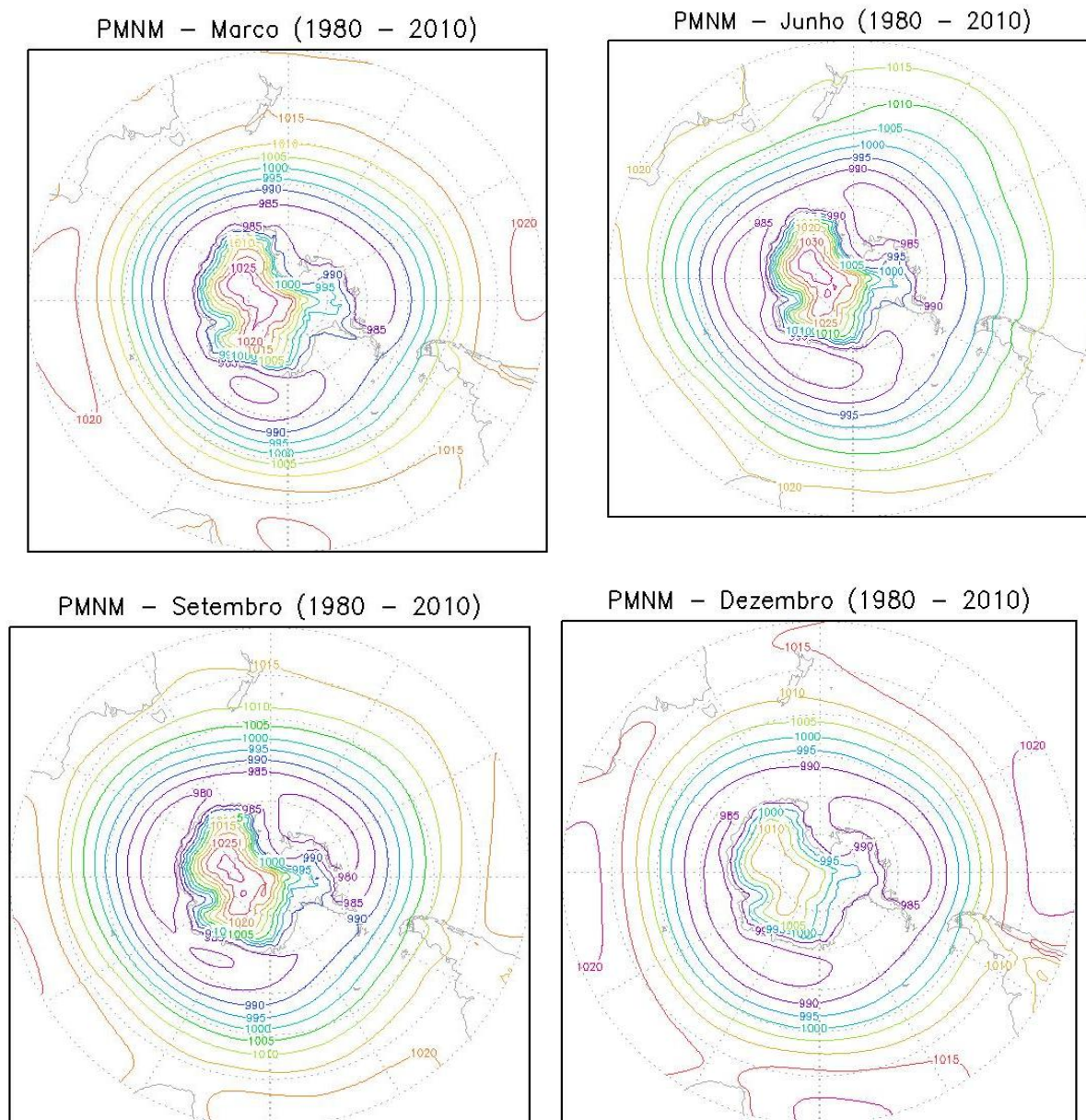


Figura 4. 10 Mapas da média mensal da pressão em nível do mar para os meses de março, junho, setembro e novembro. Indicando os meses mais intensos da Oscilação Semi-Anual. Fonte de dados NCEP/CFSR

4.4 COMPÓSITOS PARA A OSCILAÇÃO SEMI-ANUAL

A partir dos resultados da seção anterior, foram calculados os compósitos para a Oscilação Semi-Anual em relação a componente meridional e zonal do vento em 1000 e 500 hPa e para a TSM. Essas duas variáveis foram escolhidas devido alguns trabalhos (Meelh,1991; Tracchetto & Wainer, 2005) apontarem que a Oscilação Semi-Anual modula fortemente os campos de vento e temperatura da superfície do mar no entorno do continente Antártico.

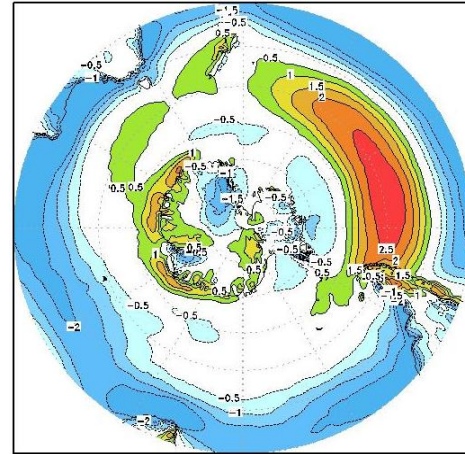
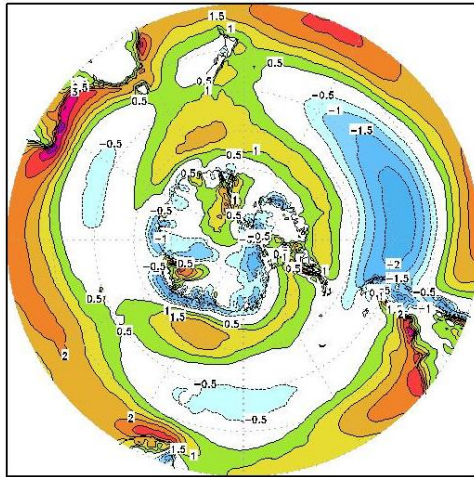
A figura 4.11 apresenta os compósitos para a componente zonal do vento em 1000 e 500 hPa, nas duas variações semestrais encontradas na figura 4.11. Então os compósitos foram calculados entre a diferença dos meses de março, abril, maio e junho (MAMJ) e dezembro, janeiro fevereiro e março (DJFM). O primeiro indicando a primeira expansão e o segundo a primeira contração. Foi possível encontrar setorizações para a figura 4.14 (a) onde foi possível identificar que a fase de expansão de MAMJ (outono) foi responsável por modular a intensidade do vento zonal na costa da Antártica e entre 30° e 40°S

É possível notar que houve setorizações na componente zonal do vento, apresentando intensificação dos ventos impulsionados pela fase de expansão da OSA em torno do continente Antártico (~60°S) e a enfraquecimento entre aproximadamente 40° e 50° S. O contrário acontece para os compósitos entre os meses de SOND e JJAS, isso pode ser explicado pelo trabalho de Simmonds & Walland (1998) que encontraram que as maiores variações da OSA estão relacionadas com um máximo no gradiente de pressão no inverno e contrapartida um mínimo na primavera. É importante destacar que o sinal da OSA se fez presente nas três bacias oceânicas, principalmente no Pacífico Sul.

Comp. Zonal em 1000 hPa

(a) (MAMJ - DJFM)

(b) (SOND - JJAS)



Comp. Zonal em 500 hPa

(c) (MAMJ - DJFM)

(d) (SOND - JJAS)

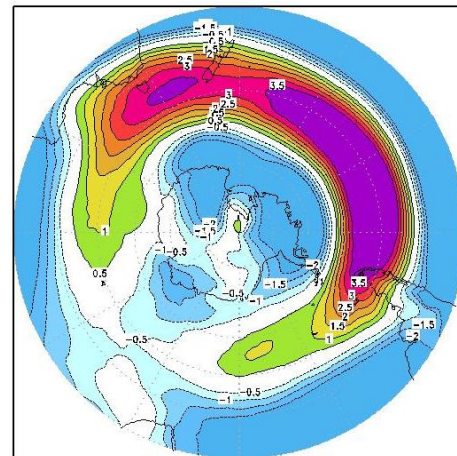
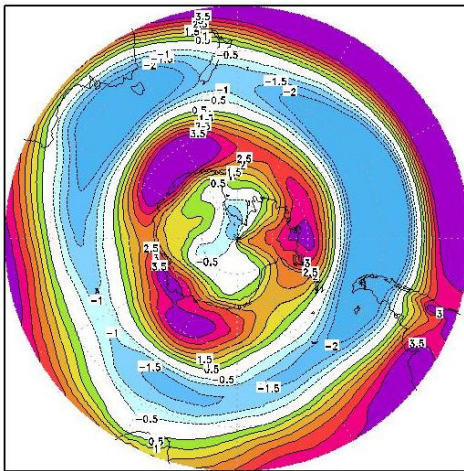
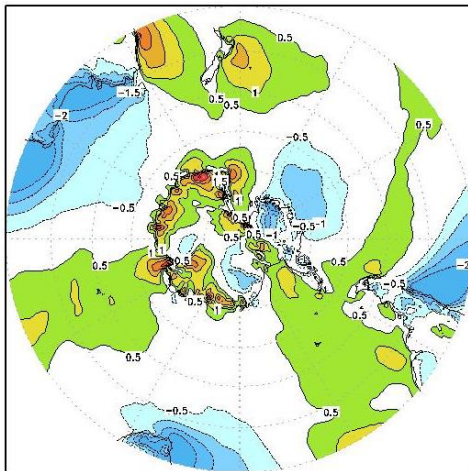


Figura 4. 11 Compósitos para a componente zonal do vento nos meses de expansão e contração da Oscilação Semi-Anual

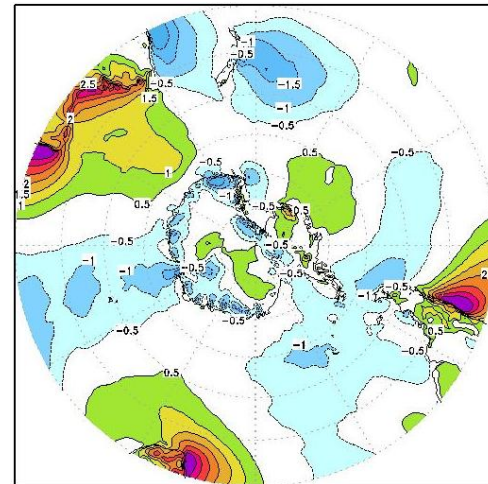
A figura 4.12 apresenta os compósitos para a componente meridional do vento em 1000 e 500 hPa nas duas semi-oscilações. A primeira entre os meses de MAMJ – DJFM é possível notar regiões preferenciais de atuação, um número de onda 3 não configurado totalmente, porém presente (estando este melhor configurado em 500 hPa). É possível encontrar na figura 4.14 (a) o comportamento inverso da figura 4.14 (b) isso parece indicar que a primeira expansão que ocorre preferencialmente no período de outono seja mais intensa do que a segunda que ocorre na primavera, indicando assim o aumento do transporte de ar mais quentes provenientes das latitudes mais baixas em direção a Antártica. Esses resultados estão de acordo com o encontrado por Van der Broeke (1998) onde o autor sugere que as mudanças no ciclo de temperatura superficial da Antártica tanto dentro do continente como nas áreas continentais, estão relacionadas com as mudanças associadas principalmente as fases de expansão da OSA.

Comp. Merid. em 1000 hPa

(a) (MAMJ - DJFM)

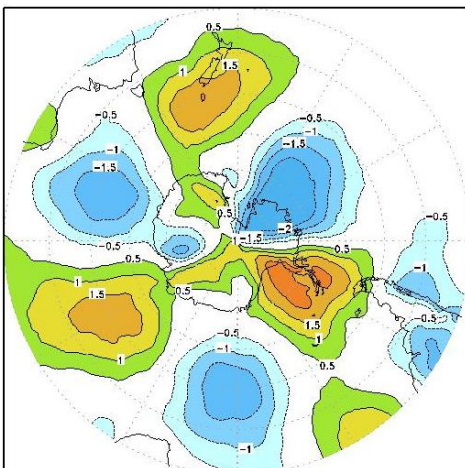


(b) (SOND - JJAS)



Comp. Merid. em 500 hPa

(c) (MAMJ - DJFM)



(d) (SOND - JJAS)

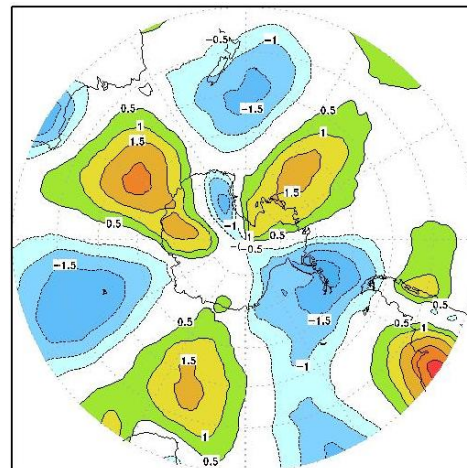


Figura 4. 12 Compósitos para a componente meridional do vento nos meses de expansão e contração da Oscilação Semi-Anual

A figura 4.13 apresenta os compósitos para a Temperatura da Superfície do Mar. Como pode-se notar, o padrão da OSA na TSM ficou bem definido em torno do continente Antártico para os duas fases da OSA, a contração e a expansão. Isso se deve ao fato da intrínseca ligação entre o deslocamento do cavado circumpolar e a concentração de gelo marinho na costa da Antártica (Yuan, et al 2007).

É possível notar um forte pico na região dos mares de Bellingshausen-Amundsen, podendo este estar relacionado com o modo de variabilidade conhecido como Baixa do Mar de Amundsen. Nota-se que essas maiores temperaturas tanto positivas quanto negativas, são encontradas nos dois picos da OSA.

TSM – SAO (MAMJ- DJFM)

TSM – OSA (SOND – JJAS)

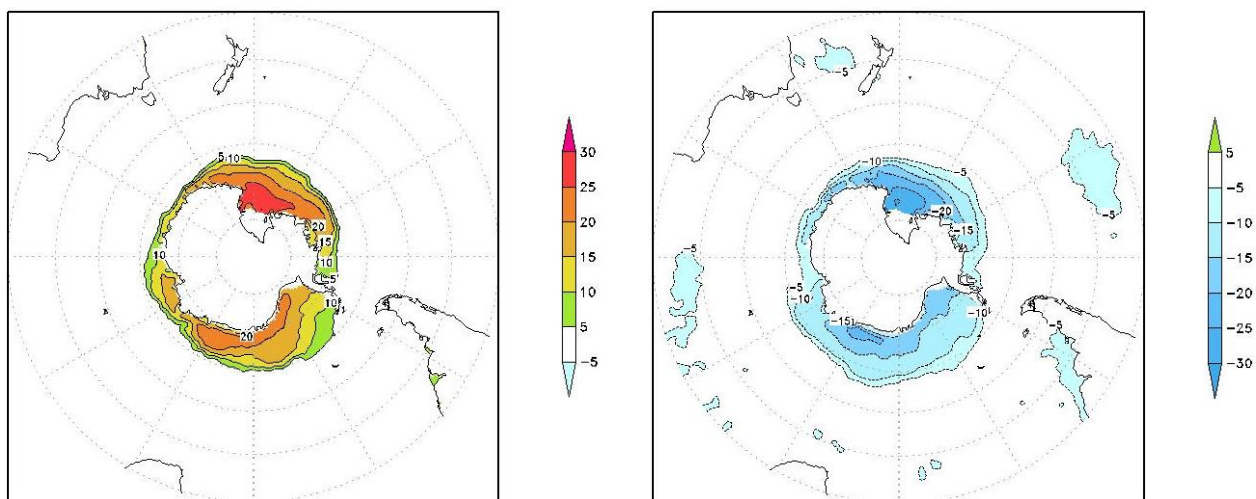


Figura 4.13 Compósitos para a Temperatura da Superfície do Mar nos meses de contração e expansão as SAO.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

As influências dos padrões de variabilidade climática no Hemisfério Sul foram analisadas nesse trabalho. O modo mais representativo conhecido hoje é o Modo Anular Sul e outro modo pouco discutido, porém com certa importância na variabilidade do Oceano Austral, nomeado como Oscilação Semi-Anual, foram analisadas através da análise de compósitos ponderados entre as fases positivas e negativas dos referidos índices. Este trabalho utilizou a técnica de compósitos, uma metodologia nova, que foi muito bem representativa para o Modo Anular Sul, os resultados foram consistentes com os encontrados na literatura, atestando assim a eficiência da metodologia. Através do teste de Mann-Kendall, foi confirmada a tendência positiva do MAS como encontrada por diversos trabalhos. Com essa tendência positiva, pode-se inferir que a intensificação dos ventos circumpolares e o enfraquecimento dos ventos nas latitudes médias, foram encontrados nos níveis atmosféricos de 1000, 850, 700, 500, 300 e 200 hPa. Sugere-se então a formação de uma capa protetora em torno do continente Antártico, permitindo assim o isolamento térmico da Antártica, onde alguns trabalhos sugerem que as temperaturas estão se mantendo constante ou diminuindo, porém a Península Antártica vem sofrendo o aquecimento que está bem documentado em alguns trabalhos. Os resultados para o Modo Anular sul, apontam que essa intensificação dos ventos de oeste aparenta ter grandes implicações nas correntes oceânicas, principalmente na corrente circumpolar Antártica, na corrente Leste Australiana, nas Corrente das Agulhas e também na confluência Brasil-Malvinas, no entanto, um estudo mais aprofundado dessa influência em características oceânicas deve ser feito.

O continente Antártico foi encontrado como sendo de grande importância e fundamental na manutenção do Modo Anular Sul, assim como os oceanos circundantes deste continente. Com ênfase nos mares de Amundsen-Bellingshausen e no mar de Ros na costa leste da Antártica e no mar de Weddell na costa oeste. No campo do vento meridional, notou-se claramente o padrão de onda 3 bem configurado nos níveis mais próximos a superfície, induzidos preferencialmente pela fase positiva do MAS. Essa circulação propicia então, a entrada de ar aquecido, proveniente das regiões oceânicas, promovendo assim, as possíveis modificações na cobertura de gelo marinho e também na formação e deslocamento das tempestades para norte no HS. Essa circulação também propicia o resfriamento encontrado no Mar de Weddell e nos mares de Amundsen-

Bellingshausen, porém foi encontrado que na região dos mares de Amundsen-Bellingshausen é fortemente modulado por um modo regional conhecido como Baixa do Mar de Amundsen, sendo este porém, influenciado tanto pelas distintas fases do Modo Anular Sul, como por características dinâmicas e físicas regionais.

A temperatura da superfície do mar, apresentou ser modulada principalmente pela fase positiva do MAS, onde foi encontrado um sinal forte na região da Confluência Brasil-Malvinas, sugerindo assim uma possível relação entre os efeitos dinâmicos do MAS na interação entre as correntes das Malvinas e da corrente do Brasil. Os resultados encontrados foram consistentes com os encontrados na literatura no entorno do continente Antártico, apresentando assim um sinal permanente impulsionado pela fase positiva do MAS. Essa intensificação dos ventos de oeste promovem a diminuição da TSM no entorno do continente Antártico, onde essa diminuição está principalmente ligada com a modulação da deriva de Ekman, acarretando em ressurgências na região.

Os fluxos de calor latente assim como a umidade específica apresentaram comportamento esperado pela literatura, atestando mais uma vez a eficácia da metodologia de compósitos aplicada. Foram encontradas regionalizações diretamente relacionadas com a componente meridional do vento e com a TSM. O fluxo de calor latente apresentou fortes sinais ligados as regiões de intensa ciclogenia, na costa leste e oeste da África, região conhecida como a retroflexão das agulhas (proporcionando águas mais quentes para o Atlântico Sul). Outro sinal forte foi encontrado na região da confluência Brasil-Malvinas, sendo esta, uma região de intensa atividade tanto oceânica como atmosférica.

A partir desses resultados foi importante concluir que o entendimento da influência do, MAS nas variáveis meteo-oceanográficas estudadas são de grande importância para se compreender a variabilidade climática nas regiões do globo. Sendo assim foi encontrado que o MAS modula fortemente o sudoeste do oceano Pacífico, região fortemente conhecida como fonte de bloqueios atmosféricos e de ciclones extratropicais. Outro forte sinal do MAS foi encontrado na Península Antártica, onde esta sendo estudada a longo dos últimos 50 anos, por parecer mais sensível as mudanças no clima que estão ocorrendo, e esta possui uma grande independência dinâmica do continente Antártico. Foi encontrado que nos oceanos Atlântico e Índico, o MAS parece modular principalmente as regiões das latitudes médias.

O trabalho com a Oscilação Semi-Anual, se fez necessário principalmente pelos poucos trabalhos encontrados para dar base a esse estudo, e os trabalhos encontrados datam 10 anos atrás. O enfraquecimento da OSA repercutido em alguns trabalhos foi reportado como sendo o principal mecanismo de aumento da tendência positiva do Modo Anular Sul. Esse enfraquecimento foi encontrado através do teste aplicado de Mann-Kendall, onde infere assim o aumento das temperaturas reportado a partir de 1979.

A metodologia de compósitos para a OSA apresentou um grande desafio principalmente pelo seu índice não apresentar, as fases positivas e negativas encontradas por outros índices dos modos de variabilidade. Então se fez necessário adaptar a metodologia para que os seus resultados fossem consistentes com os encontrados na literatura. AS variáveis de vento zonal e meridional e temperatura da superfície do mar foram utilizadas para a análise de compósitos, principalmente pela característica principal da OSA de ser um modo de variabilidade de interação oceano-atmosfera. Assim foi possível encontrar setorizações no campo de vento zonal, impulsionados principalmente pela fase de expansão da OSA, sendo esta fase de expansão estando relacionada com o mínimo do gradiente de pressão encontrado na primavera.

No campo de vento meridional foi possível encontrar o padrão de onda 3 encontrado no MAS, porem não totalmente configurado. Regionalizações foram encontradas em todas as bacias oceânicas, inferindo assim que o padrão da Oscilação Semi-Anual se faz presente nos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico. Já os compósitos para a temperatura da superfície do mar, mostraram a intrínseca relação encontrada em outros trabalhos da OSA com a concentração de gelo marinho. No entanto um estudo com aplicações de outras metodologias para se verificar o entendimento da OSA no oceano Austral se faz necessário, assim como análises sazonais como estudos futuros.

CAPÍTULO 6: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aoki, S. (2002): Coherent sea level response to the Antarctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1950, doi:10.1029/2002GL015733

Arblaster, J. M., and G. A. Meehl,(2006): Contributions of external forcings to Southern Annular Mode trends. *J. Climate*, 19, 2896–2905

Ackerley, D. and Renwick, J. A.: The Southern Hemisphere semiannual oscillation and circulation variability during the Mid-Holocene, *Clim. Past*, 6, 415–430, doi:10.5194/cp-6-415-2010, 2010. 1306, 1310, 1331

Bjerknes, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific(1969). *Monthly Weather Review*,v.97, p.163-172..

Cai, W., Whetton, P. H., Karoly, D. J.(2003): The Response of the Antarctic Oscillation to Increasing and Stabilized Atmospheric CO₂. *Journal of Climate*, 16, 1525-1538.

Cai, W., Shi, G., Cowan, T., Bi, D. and Ribbe, J. (2005) The response of the Southern Annular Mode, the East Australian Current and the southern mid-latitude circulation to global warming, *Geophysical Research Letters* 32: L23706

Carter, L., McCave, I.N., and Williams, M., (2008). Circulation and Water Masses of the Southern Ocean: A review. In *Antarctic Climate Evolution, Developments in Earth and Environmental Sciences* 8. Elsevier, Amsterdam, 606pp.

Carvalho, L. M. V., Jones, C., Ambrizzi, T. (2005): Opposite Phases of the Antarctic Oscillations and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity in the Tropics during the Austral Summer. *Journal of Climate*, 18, 702-718.

Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Justi da silva, M. G. A., Dias, M. A. F. S. (2009): *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 463 p.

Cavalieri, D. J., and C. L. Parkinson(2008). "Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006." *Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012)* 113.C7.

Ciasto, L.M., and D.W.J. Thompson, (2008): Observations of large-scale ocean-atmosphere interaction in the Southern Hemisphere. *J. Climate*, 21(6), 1244-1259.

Ding, Qinghua, Eric J. Steig, David S. Battisti, John M. Wallace, (2012): Influence of the Tropics on the Southern Annular Mode. *J. Climate*, 25, 6330–6348.

Fogt, R. L., and D. H. Bromwich (2006), Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high latitude South Pacific governed by coupling with the Southern Annular Mode, *J. Clim.*, 19, 979 – 997.

Fogt, Ryan L., Julie M. Jones, James Renwick, (2012): Seasonal Zonal Asymmetries in the Southern Annular Mode and Their Impact on Regional Temperature Anomalies. *J. Climate*

- Gille, Sarah T., (2008): Decadal-Scale Temperature Trends in the Southern Hemisphere Ocean. *J. Climate*, 21, 4749–4765.
- Gonçalves, R. C. Impactos de mudanças nos ventos de oeste do Hemisfério Sul no vazamento das Agulhas. (2012). Dissertação de Mestrado em Oceanografia Física – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em <http://www.testes.usp.br/teses/disponiveis/21/21132/tde-10122012-155022/>
- Gong, D., Wang, S. (1998): Antarctic Oscillation: concept and applications. *Chinese Science Bulletin*, Vol. 43, No. 9, 734-738.
- Gong, D., and S. Wang (1999), Definition of Antarctic oscillation index, *Geophys. Res. Lett.*, 26(4), 459 – 462.
- Harangozo, S. A. (2000), A search for ENSO teleconnections in the west Antarctic Peninsula climate in austral winter, *Int. J. Climatol.*, 20, 663 – 679
- Karmeshu, Neha (2012). "Trend Detection in Annual Temperature & Precipitation using the Mann Kendall Test–A Case Study to Assess Climate Change on Select States in the Northeastern United States." (2012).
- Kidston, J. Renwick, J.A., McGregor, J: Hemispheric (2009). Scale Seasonality of the Southern Annular Mode and Impacts on the Climate of New Zealand, *J. Climate*, 22, 4759-4770
- King, J. C., (1994): Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *Int. J. Climatol.*, 14, 357-369.
- King, J. C., and S. A. Harangozo (1998), Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: Observations and possible causes, *Ann. Glaciol.*, 27, 571–575. yuan
- King, J.C., and J.C. Comiso (2003). The Spatial Coherence of Interannual Temperature Variations in the Antarctic Peninsula *Geophys. Res. Lett.*, 30(2), 12-1 - 12-4
- Lefebvre, W., and H. Goose (2005). Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice-ocean 112 system: the role of the thermal and mechanical forcing, *Oc. Science*, 1, 145-157.
- Liu, J., J. A. Curry, and D. G. Martinson (2004), Interpretation of recent Antarctic sea ice variability, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L02205,.
- Lovenduski, N. S., and N. Gruber, (2005): Impact of the Southern Annular Mode on Southern Ocean circulation and biology. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L11603
- Marshall, G. J., (2002): Trends in Antarctic geopotential height and temperature: A comparison between NCEP-NCAR reanalysis and radiosonde data. *J. Climate*, 15, 659-674.
- Marshall, G. J., P. A. Stott, J. Turner, W. M. Connolley, J. C. King, and T. A. Lachlan-

Cope (2004), Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the Southern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14205

Marshall, G. J. (2009) On the annual and semi-annual cycles of precipitation across Antarctica. *International Journal of Climatology* **29**:15, 2298-2308

Mayewski, P. A., et al. (2009), State of the Antarctic and Southern Ocean climate system, *Rev. Geophys.*, 47, RG1003

Meehl, G. A. (1988), Tropical-mid latitude interactions in the Indian and Pacific sectors of the Southern Hemisphere, *Mon. Weather Rev.*, **116**, 472–484.

Meehl, G. A. (1991), A reexamination of the mechanism of the Semiannual Oscillation in the Southern Hemisphere, *J. Clim.*, **4**,911–926

Meehl, G. A., J. W. Hurrell, and H. van Loon (1998), A modulation of the mechanism of the semiannual oscillation in the Southern Hemisphere, *Tellus, Ser. A*, **50**, 442–450.

Mo KC, Ghil M. (1986). Statistics and dynamics of persistent anomalies. *Journal of Atmospheric Science* 44: 877–901

Mo KC, Higgins RW. (1998). The Pacific South American modes and tropical convection during the Southern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review* 126: 1581–1598

Mo, K. C.; Peagle, J. N,(2001). The Pacific-South American Modes and their Downstream Effects. *International Journal of Climatology*, v. 21, p. 1211-1229.

Parish, T. R., and D. H. Bromwich, (2007): Re-examination of the near-surface airflow over the Antarctic continent and implications on atmospheric circulations at high southern latitudes. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 1961-1973.

Oke, P.R., and M.H. England, 2004: Oceanic response to changes in the latitude of the Southern Hemisphere subpolar westerly winds, *J. Climate*, 17, 1040-1054

Pereira, J. ; Wainer, I. ; D.campos, E. J. ; Haarsma, R. J. . Variabilidade do Oceano Austral Usando um modelo Acoplado do NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia* (Impresso), v. 19, n.2, p. 113-122, 2004.

Peterson R.G., W.B. White, (1998): Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with tropical ENSO. *J. Geophys. Res.*,103, 24,573-24,583.

Pezzi, Luciano Ponzi, et al (2009): "Multiyear measurements of the oceanic and atmospheric boundary layers at the Brazil-Malvinas confluence region."*Journal of Geophysical Research* 114.D19 D19103.

Raphael, M.N, Holland, M.M (2006) Twentieth century simulation of the southern hemisphere climate in coupled models. Part 1: large scale circulation variability. *Climate Dynamics* **26**:2-3, 217

Radok, U., (1970): Boundary Processes of Drifting Snow. In: Studies on Drifting Snow. Dept. of Meteorology, University of Melbourne, pub. 13.

Reboita, M. S. ; Ambrizzi, Tércio ; ROCHA, Rosmeri Porfírio da(2009) . Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, p. 48-55,

Saha, Suranjana, et al. (2010): "The NCEP climate forecast system reanalysis." *Bulletin of the American Meteorological Society* 91.8 1015-1057.

Salles, J. B., K. Speer, and R. Morrow and S. R. Rintoul,(2010): Zonally asymmetric response of the Southern Ocean mixed-layer depth to the southern annular mode. *Nat. Geosci.*, 3, 273–279.

Santos, I. A. ; N. J. N. Franco (2010) . Uso do Índice Mensal da Oscilação Antártica Para valiação de Algumas Interações com a Circulação Troposférica na América do Sul e Oceanos Próximos. in: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, a Amazônia e o Clima Global.

Sen Gupta, A. S., England, M. H. (2006): Coupled Ocean-Atmosphere-Ice Response to Variations in the Southern Annular Mode. *Journal of Climate*, 19, 4457– 4486

Sen Gupta, Alexander, Matthew H. England, (2007): Coupled Ocean–Atmosphere Feedback in the Southern Annular Mode. *J. Climate*, **20**, 3677–3692.

Stammerjohn, S. E., D. G. Martinson, R. C. Smith, X. Yuan, and D. Rind (2008), Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability, *J. Geophys. Res.*, 113, C03S90

Steig, E.J., D.P. Schneider, S.D. Rutherford, M.E. Mann, J.C. Comiso, and D.T. Shindell, (2009): Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, **457**, 459-462

Szeredi I, Karoly D. (1987a). The vertical structure of monthly fluctuations of the Southern Hemisphere troposphere. *Australian Meteorological Magazine* 35: 19–30.

Szeredi I, Karoly D. (1987b). The horizontal structure of monthly fluctuations of the Southern Hemisphere troposphere. From station data. *Australian Meteorological Magazine* 35: 119–129.

Taschetto, A., Wainer, I. M. Raphael. (2007) Interannual variability associated with Semiannual Oscillation in southern high latitudes. *Journal of Geophysical Research* **112**

Thompson, D. W. J., Wallace, J. M. (2000): Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month variability. *Journal of Climate*, 13, p. 1000-1016.67

Thompson, D. W. J., Wallace, J. M.; Hegerl, G. C. (2000): Annular Modes in the Extratropical Circulation: Part II: Trends. *Journal of Climate*, 13, p. 1018-1036.

- Thompson, D. W. J., and S. Solomon (2002), Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change, *Science*, 296, 895 – 899
- Thompson, D. W. J., and J. D. Woodworth,(2013): Barotropic and baroclinic annular variability in the Southern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.* submitted.
- Toggweiler JR, Russell J. (2008). Ocean circulation in a warming climate. *Nature* 451:286–88
- Turner, J., Colwell, S. R., Marshall, G. J., Lachlan-Cope, T. A., Carleton, A. M., Jones, P. D., Lagun, V., Reid, P. A. and Iagovkina, S. (2005), Antarctic climate change during the last 50 years. *Int. J. Climatol.*, 25: 279–294
- Turner, J., T. Phillips, J. S. Hosking, G. J. Marshall, and A. Orr, (2012a): The Amundsen Sea low. *Int. J. Climate*, 32.
- Turner, J., and G. J. Marshall,(2011): Climate Change in the Polar Regions. *Cambridge University Press*, 434 pp.
- van den Broeke, M. R. (1998a), The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 1: Influence on near surface temperature (1957–79), *Antarct. Sci.*, **10**(2), 175–183.
- van den Broeke, M. R. (1998b), The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 2: Recent changes, *Antarct. Sci.*, **10**(2),184–191
- Van Den Broeke, M (2000d) The semi-annual oscillation and Antarctic climate. Part 4: a note on sea ice cover in the Amundsen and Bellingshausen Seas. *International Journal of Climatology* **20**:4, 455-462
- Van Loon, H. (1956). Blocking action in the Southern Hemisphere, Part I, *Notos* **5**, 171–175.
- van Loon, H. (1967), The half-yearly oscillations in middle and high southern latitudes and the coreless winter, *J. Atmos. Sci.*, **24**,472–486.
- van Loon, H., and J. C. Rogers (1984), Interannual variations in the half-yearly cycle of pressure and zonal wind at sea level on the Southern Hemisphere, *Tellus, Ser. A*, **36**, 76–86.
- Vaughan, D. G., G. J. Marshall, W. M. Connolley, J. C. King, and R. Mulvancy, (2001): Climate change: Devil in the detail. *Science*, 293, 1777-1779.
- White W.B., R. Peterson, (1996): An Antarctic Circumpolar Wave in surface pressure, wind, temperature, and sea ice extent. *Nature*, 380, 699-702.
- White W.B., (2000): Influence of the Antarctic Circumpolar Wave on Australian precipitation from 1958 to 1997, *J. Clim.*, 13, 2125-2141
- Yuan, X., and D. G. Martinson (2001), The Antarctic Dipole and its predictability, *Geophys. Res. Lett.*, 28(18), 3609 –

Yuan Yuan, C. L. Johnny Chan, Wen Zhou, Chongyin Li. (2008) Decadal and interannual variability of the Indian Ocean Dipole. *Advances in Atmospheric Sciences* **25**:5, 856-866