

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas

Inter-Relação entre a Temperatura da Superfície do Mar e Eventos de Bloqueios Atmosféricos

José Leandro Pereira Silveira Campos

Dissertação de Mestrado

Orientador: Prof.Dr. Tércio Ambrizzi

São Paulo

2014

José Leandro Pereira Silveira Campos

Inter-Relação entre a Temperatura da Superfície do Mar e Eventos de Bloqueios Atmosféricos

Versão Corrigida.

O original encontra-se na unidade

Dissertação apresentada ao Instituto
de Astronomia Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Programa: Meteorologia

Orientador : Prof.Dr. Tércio Ambrizzi

São Paulo

2014

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado condições para concluir esse trabalho.

A minha mãe pela dedicação, carinho e compreensão nesses dois anos de pesquisa.

Ao meu orientador Tércio Ambrizzi pela orientação e pela paciência.

Aos profs. Rosmeri Porfírio da Rocha, Ricardo Hallak, Ricardo de Camargo e Rita Ynoue, por terem me ajudado com seus conselhos, seu apoio e sugestões.

A técnica do laboratório GrEC Livia Dutra pela ajuda com os conjuntos de dados e pelo apoio.

Aos meus amigos de sala Eduardo Marcos e André Teruya pelo apoio e pela ajuda.

A CAPES e ao CNPQ pelo suporte financeiro à pesquisa

RESUMO

Silveira-Campos, J.L.P. **Inter-Relação entre a Temperatura da Superfície do Mar e Eventos de Bloqueios Atmosféricos**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Eventos de bloqueios são conhecidos por serem anomalias persistentes de alta pressão que podem durar de dias a semanas, causando secas e ondas de calor ou frio extremas. Atualmente o entendimento dos processos de estabelecimento, manutenção e decaimento dessas anomalias para o Hemisfério Sul (HS) ainda é pequeno.

Com essa motivação nesse trabalho é apresentada uma climatologia de bloqueios para o HS em todas as latitudes para 26 anos (1979-2005) de dados ERA – Interim, obtida através do método PV/ θ , que identifica bloqueios através do campo de anomalia de temperatura potencial (θ) sobre a tropopausa dinâmica. Uma comparação entre o método PV/ θ , baseado na temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica, e método baseado na altura geopotencial em 500 hPa, conhecido como TM, é também mostrada.

Foram identificadas duas regiões preferenciais (picos de frequência) para a ocorrência de bloqueios, uma no setor do Pacífico Oeste em aproximadamente 180°W e outra no Pacífico Leste em aproximadamente 120°W. O método TM somente consegue identificar uma região preferencial de bloqueios sobre o Pacífico Oeste/Central. A tendência de bloqueios foi estudada e foi achada uma tendência negativa de 3 bloqueios por década para todo HS.

Através da climatologia de bloqueios foram escolhidos oito setores sobre o Oceano Pacífico, e foram feitas composições dos campos anomalia de temperatura de superfície, temperatura da superfície do mar, linhas de corrente e vento zonal em 500 hPa, para estudar as relações entre os eventos de bloqueios e temperatura da superfície do mar que ocorrem nos setores estudados. Foi observado que diferentes configurações de temperatura podem interferir na posição de partição do jato, configurando assim um bloqueio.

Também foram estudados bloqueios em dois cenários do IPCC (*“Intergovernmental Panel for Climate Change”*), um de forte aquecimento global (rcp85) e outro de aquecimento intermediário (rcp45) através das saídas do modelo MRI-CGCM 3 (*“Meteorological Research Institute – Coupled General Circulation Model 3”*), para três períodos, um de 2015-2030, 2031-2060 e 2061-2090. Foi achado maior número de bloqueios para o cenário de maior aquecimento até o final do século, e não foram encontradas tendências significativas no número de bloqueios para nenhum dos períodos estudados em nenhum dos cenários.

Palavras Chave: Bloqueios Atmosféricos, TSM, Modelos Acoplados IPCC, Climatologia, Circulação, ERA-Interim, Tropopausa Dinâmica, Vorticidade Potencial.

ABSTRACT

Atmospheric blockings are known for being persistent high pressures anomalies which can long last for several days and weeks, inducing to droughts and extremely heat or cold waves. Actually the understanding of the onset, maintenance and decaying process of these anomalies in the Southern Hemisphere is still poor understood.

With this motivation in this work is presented climatology of blocking events for the Southern Hemisphere in all latitudes for 26 years (1979-2005) of ERA –Interim reanalysis, obtained through the PV/ θ method, which identifies atmospheric blockings through the field of potential temperature on the dynamical tropopause. A comparison between the method PV/ θ , based in the potential temperature on dynamic tropopause and the one based in the geopotential height on 500 hPa, known as TM, traditionally used, is showed.

Two main regions (frequency peaks) of blocking occurrence were identified, one in Western Pacific sector about 180°W and the other one in East Pacific sector about 120°W. The TM method just identifies one main region located between the sectors West and Central Pacific. The blocking trend is studied too and it was found a negative trend of 3 blockings per decade for the whole Southern Hemisphere.

Through the blocking climatology was chosen eight sectors over the Pacific Ocean and was done composites of the fields of anomaly of skin temperature, stream lines and zonal winds in 500 hPa, to evaluate the relationships between the sea surface temperature and blockings on the given sectors. Was found that distinct patterns of temperatures can modulate the position of the jet split, giving rise a blocking in a given sector.

Were also studied blockings for two IPCC (*“Intergovernmental Panel for Climate Change”*) scenarios, one of strength global warming (rcp85) and other of intermediary global warming (rcp45) through the outputs of the model MRI-CGCM (Meteorological Research Institute – Coupled General Circulation Model 3), for three periods, 2015 – 2030, 2031 – 2060 and 2061 – 2090. The largest number of blocking frequency until the end of century was found in the strength global warming scenario and was not found significant trends of blocking in neither of the scenarios studied

Key Words: Atmospheric Blockings, SST, CGCMs IPCC, Climatology, Circulation, ERA – Interm, Dynamic Tropopause, Potential Vorticity

Sumário

Lista de figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas.....	ix
1. Introdução	1
1.1 - Teorias de Bloqueio	3
1.1.1- Teoria das Ondas Estacionárias	3
1.1.2 - Forçante Tropical.....	5
1.2 - Motivação e Objetivo	6
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	6
2. Conjunto de Dados e Metodologia	8
2.1 - Dados ERA-Interim	8
2.2 - Modelo MRI - CGCM 3 e Cenários Futuros	8
2.2.1 - Cenários Futuros	9
2.3 -Considerações Sobre a Metodologia.....	11
2.3.1 - Interpolação de Variáveis nas Superfícies de Vorticidade Potencial	11
2.3.2 - Anomalias Calculadas a Partir da Extração do Ciclo Anual.....	12
3. Identificação de Bloqueios	14
3.1 - Definição do Índice PV/ θ	14
3.1.1 - Ideias PV/ θ	14
3.1.2 - Quebras de Ondas de Rossby e Bloqueios Atmosféricos	17
3.1.3 - Índice PV/ θ (Pelly e Hoskins, 2003).....	18
3.1.4 - Determinação da Latitude Central ϕ_c e Índice 1D	20
3.2 - Método dos Regimes (Barnes et al. 2012)	24

3.3 – Índice Clássico de Detecção de Bloqueios (Tibaldi e Molteni 1990)	25
3.4 – Índice 2D e Comparação entre o Índice PV/ θ e o Índice Classico	28
3.4.1 – Índice 2D	28
3.4.2 – Comparação entre os Índices PV/ θ e Baseado na Altura Geopotencial	28
4. Climatologia de Bloqueios para o Hemisfério Sul	31
4.1 – Comparação entre os índices PV/ θ e o Baseado na Altura Geopotencial (TM) e a Média Anual da Frequência de Bloqueios.	33
4.2 – Variabilidade Interanual e Persistência dos Eventos de Bloqueio	38
4.2.1 – Variabilidade Interanual dos Eventos de Bloqueio	38
4.2.2 – Persistência dos eventos de Bloqueios	39
4.3 – Variabilidade Sazonal dos Eventos de Bloqueio	42
4.3.1 – Análise da Climatologia de Bloqueios sobre a Latitude das Linhas de Tempestade ...	42
4.3.2 – Análise da Climatologia em Todas as Latitudes	43
4.4 – Discussão	45
4.5 – Conclusão e Sumário	47
5. Tendência no Número de Bloqueios no Hemisfério Sul	48
5.1 – Tendência do Número de Bloqueios em Todas as Latitudes	49
5.2 – Discussão e Sumário	51
6. Relação entre Bloqueios e a Temperatura da Superfície do Mar e Propagação de Ondas de Rossby	53
6.1 – Análise de Composições	54
6.1.1 – Parâmetro para a Análise de Composições	54
6.1.2 – Análise das Composições do Campo de Temperatura de Superfície	55
6.1.3 – Análise de Composições de Campos de Vento Meridional	59
6.2 – Discussão	64
6.3 – Conclusão e Sumário	67

7. Validação do Modelo MRI-CGCM3	68
7.1 – Médias Climatológicas.....	69
7.1.1 – Posição dos Jatos e Circulação Atmosférica em Médias Latitudes.....	69
7.1.3 – Linhas de Tempestade e Latitude Central.....	71
7.2 – Bloqueios no Experimento Histórico	73
7.2.1 – Eventos de bloqueios sobre 50°S	73
7.2.2 – Eventos de Bloqueio em todas as latitudes.....	77
7.2.3 – Tendência no Número de Bloqueios e Variabilidade Interanual	78
7.3 – Discussão	79
7.4 – Conclusão e Sumário	81
8. Bloqueios em Cenários Futuros	82
8.1 – <i>Frequência de Bloqueios para Cenários Futuros</i>	82
8.2 – <i>Conclusão e Discussão</i>	85
9. Considerações Finais	88
9.1 – <i>Conclusão Geral</i>	88
9.2 – <i>Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	90
Apêndice	91
A1 – Linhas de Tempestade ou Energia Cinética dos Turbilhões Transientes.....	91
A2 – Temperatura da Superfície do Mar no Modelo MRI CGCM 3	93
A3 – Número de Onda Estacionário	94
A4 – Climatologia 2D de bloqueios para os cenários RCP45 e RCP85	96
Referências	98

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Emissões permitidas simuladas pelo modelo HADGEM2-ES (linhas finas), comparado com as observações de emissão de CO₂ para o período histórico do experimento e aqueles projetados pelos cenários RCP com a avaliação integrada de modelos (linhas grossas). [Adaptado de Friedlingstein e Jones 2010].

Fig. 2.2 - Fluxograma representando o algoritmo de interpolação utilizado nesse trabalho.

Fig. 3.1 - Padrões de circulação e temperatura associados com as anomalias (a) negativas e (b) positivas de vorticidade potencial no Hemisfério Sul. Contornos representam isentrópicas. (Adaptado de Hoskins, 1997).

Fig. 3.2 - Diagrama esquemático para o HS mostrando estruturas da (a) quebra de onda ciclônica e (b) quebra de onda anticiclônica. Os contornos representam um valor particular de temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica e as flechas indicam o sentido da advecção dominante de valores anômalos de temperatura potencial (adaptado de Berrisford et al. 2007).

Fig. 3.3 - Representação esquemática de parâmetros relevantes para o cálculo do índice PV/theta em uma dada longitude λ_0 (adaptado de Pelly e Hoskins 2003).

Fig. 3.4 - Média anual da magnitude do vento (m/s) em 300 hPa, extraído de 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005 ECMWF Re-Analises).

Fig. 3.5 - Média anual da energia cinética de turbilhonamento transiente (m^2s^{-2}) em 250 hPa, extraído de 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005 ECMWF Re-Análises), dado espectralmente suavizado e truncado em T21.

Fig. 3.6 – Latitude central dos eventos de bloqueios, calculada a partir do máximo meridional da TEKE (fig3.5) em 250 hPa extraída de 26 anos de dados ERA Interim (1979 – 2005 ECMWF Re-análises), (a) a curva vermelha representa a latitude central para os meses de DJF, a verde para MAM, a azul para JJA, a azul claro para SON e (b) a curva preta representa a média anual da latitude central.

Fig. 3.7 - Fluxograma ilustrando os passos usados para definir um evento de bloqueio. Adaptado de Barnes et al. (2012).

Fig. 3.8 – Diagramas de Hovmoller representando o índice de bloqueios 1D para o inverno de 1995. (a) representa o índice instantâneo de bloqueio (LBI), (b) representa o grupo de longitudes bloqueadas instantâneas (GLBI) e (c) representa os bloqueios identificados.

Fig. 3.9 - Bloqueio ocorrido entre 21 e 26 de agosto de 1995, (a) para o índice PV/theta e (b) para o índice clássico, os sombreados representam o número de dias de persistência do bloqueio e os

contorno representam a média entre 21 e 26 de agosto de 1995 dos campos de (a) temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica, contornos de 5° e (b) altura geopotencial em 500 hPa, contornos de 50m. A linha azul tracejada representa a latitude de 50°S .

Fig. 4.1 – Média anual da frequência das Longitudes Instantaneamente Bloqueadas (LBIs) contra a longitude, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), a curva azul escuro representa o índice PV/θ calculado sobre a latitude das "storm tracks", a curva azul representa o mesmo só que calculado sobre a latitude constante de 50°S e a curva azul claro representa o índice baseado na altura geopotencial em 500 hPa calculado sobre a longitude de 50°S .

Fig. 4.2 - Média anual dos eventos ou regimes de bloqueios, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), a linha sólida representa os bloqueios calculados pelo método PV/θ sobre as latitudes das linhas de tempestade e a linha pontilhada representa os bloqueios calculados pelo índice TM sobre a latitude constante de 50°S , e a linha cinza representa os bloqueios calculados através do método PV/θ sobre a latitude constante de 50°S .

Fig. 4.3 – Média anual dos eventos de bloqueios (em porcentagem de dias bloqueados) para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), para (a) o índice PV/θ e para (b) o índice TM.

Fig. 4.4 - Diagrama de Hovmoller da média anual da frequência de eventos de bloqueios (%) por ponto de longitude, para o período de 1979 a 2005 (10% de frequência representam aproximadamente 36 dias de bloqueio em um ano).

Fig. 4.5 - Setor de bloqueios, o quadrado azul delimita o setor do Oceano Índico que vai de 30°E a 120°E , o vermelho o do Pacífico Oeste que vai de 120°E a 150°W , o verde Pacífico Leste que se estende de 150°E a 80°W e a laranja o do Atlântico que se estende de 80°W a 30°E .

Fig. 4.6 – Persistência de bloqueios por número de eventos, as colunas pretas representam o número total de eventos, a cor azul representa o setor do Oceano Índico, a vinho o setor do Pacífico Oeste, a verde o setor Pacífico Leste, e a roxa o setor do Atlântico Sul, para o período de 1979 a 2005. Os valores de número de detecções estão representados em escala logarítmica decimal.

Fig. 4.7– O mesmo que para a fig.4.6, só que para o HS todo e para os meses de DJF (azul), MAM (vinho), JJA (verde) e SON (roxo).

Fig. 4.8- Média anual da frequência de eventos ou regime de bloqueios por ponto de longitude, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), para os meses de DJF (curva azul), MAM (curva vinho), JJA (curva verde), SON (curva roxa).

Fig. 4.9- Frequência de eventos de quebra de ondas de Rossby com persistência acima de 3 dias ou eventos de bloqueios 2D, extraído de 26 anos de dados ERA Interim (1979 - 2005), para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Fig 5.1 – Tendência linear de bloqueios, os valores sombreados representam o coeficiente linear extraída da série de bloqueios, os contornos cheios representam a tendência positiva de bloqueios em número de bloqueios em 26 anos e os contornos pontilhados representam a tendência negativa de bloqueios, sem significância estatística.

Fig. 5.2 – O mesmo que para a fig.5.1, só que para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Fig. 5.3 – Número anual de eventos de bloqueios sobre todo o Hemisfério Sul, a curva azul representa a soma anual do número de eventos de bloqueios e a reta vermelha representa o ajuste linear ou a linha de tendência, a equação de tendência está apresentada na parte superior a direita do gráfico.

Fig. 6.1 - Número de dias com bloqueios para os meses de JJA no período de 26 anos de análise (1979 – 2005), os quadrados representam as regiões utilizadas como parâmetro para as composições e sua localização está apresentada na tabela 1.

Fig. 6.2 – Composições do campo de anomalia de temperatura de película para os meses de JJA em 26 anos (1979 – 2005) extraídas dos dados ERA-Interim, para (a) ausência de bloqueio em todos os setores, (b) presença de bloqueios somente no setor 1, (c) setor 2, (d) setor 3, (e) setor 4, (f) setor 5, (g) setor 6, (h) setor 7, os quadrados pretos mostram a área correspondente a seus respectivos setores, centrados nas coordenadas apresentadas no cabeçalho das figuras.

Fig. 6.3 – Composições do campo de anomalia de vento meridional para os meses de JJA entre 1979 – 2005, extraída dos dados ERA Interim para os bloqueios ocorridos somente no setor 1 para (a) 3 dias antes do estabelecimento, (b) durante o bloqueio, (c) 3 dias após o decaimento dos bloqueios, e para os bloqueios ocorridos somente no setor 2 para (c) 3 dias antes do estabelecimento, (d) durante o bloqueio e (e) 3 dias após seu decaimento.

Fig. 6.4 - O mesmo que para a fig.6.3, mas para os setores 3 e 4.

Fig. 6.5 – O mesmo que para a fig.6.3, mas para os setores 5 e 6.

Fig. 6.6 - O mesmo que para a fig.6.3 mas para o setor 7.

Fig. 6.7 – Composições do campo de velocidade do vento zonal (sombreado) e linhas de corrente para os meses de JJA para o período de 1979 – 2005 de análise de dados ERA-Interim, (a) para a ausência de bloqueios em todos os setores, b) presença de bloqueios somente no setor 1, (c) setor 2, (d) setor 3, (e) setor 4, (f) setor 5, (g) setor 6, (h) setor 7, os quadrados pretos mostram a área correspondente a seus respectivos setores, centrados nas coordenadas apresentadas no cabeçalho das figuras.

Fig. 7.1 – Média sazonal climatológica para 26 anos (1979-2005) do campo de altura geopotencial em 500 hPa para os dados (a,d,h,k) ERA Interim e para (b,f,i,l) o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e (c,g,j,m) o viés do experimento histórico para os meses de DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.

Fig. 7.2 - Média climatológica de 26 anos (1979 - 2005) da intensidade do vento (em m^2/s^2) em 250hPa extraído dos dados (a) ERA - Interim e (b) do período histórico do modelo MRI - CGCM3

Fig. 7.3 - Média anual da energia cinética de turbilhonamento transiente (m^2s^2) em 250 hPa, calculado de 26 anos de dados (a) ERA Interim (1979-2005) e (b) do período histórico do modelo MRI - CGCM3. Ambos os dados foram espectralmente suavizados e truncados em T21.

Fig. 7.4 - Latitude central dos eventos de bloqueios, calculada a partir do máximo meridional da TEKE (fig.6.4) em 250 hPa obtido de 26 anos do experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3 (1979 - 2005),(a) Era Interim, (b) MRI-CGCM3 e (c) Média anual. A curva vermelha representa a latitude central para os meses de DJF, a verde para MAM, a azul para JJA, a azul claro para SON. Em (c) a curva preta representa a média anual da latitude central do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e a verde da reanálise ERA Interim.

Fig. 7.5 - (a) Média para 26 anos (1979 - 2005) de frequência de eventos ou regime de bloqueios por ponto de longitude, a curva azul representa a média anual para os dados ERA Interim e a curva vinho para o experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3 e (b) médias sazonais extraída dos dados do experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3; a curva azul representa a media para os meses DJF, a vinho para MAM, a verde para JJA e a roxa para SON.

Fig. 7.6 - Persistência de bloqueios por número de eventos, as colunas pretas representam o número total de eventos, as verdes representam o setor do Oceano Índico, a azul claro representa o setor do Pacífico Oeste, a laranja representa o setor Pacífico Leste, e a roxa representa o setor do Atlântico Sul, para o período de 1979 - 2005 de dados ERA Interim, representado pelas colunas cheias, e o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 é representado pelas colunas pontilhadas. Os valores de número de detecções estão representados em escala logarítmica decimal.

Fig. 7.7 - Frequência média sazonal dos eventos de quebra de onda Rossby com persistência acima de 3 dias ou regimes de bloqueios atmosféricos, para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, considerando 26 anos de dados ERA Interim (1979 - 2005) de a-d respectivamente e para 26 anos de dados do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 de e-h respectivamente, e viés entre o experimento histórico e os dados ERA Interim, são mostrados de i-m, respectivamente.

Fig. 7.8 - Número anual de eventos de bloqueios sobre todo o Hemisfério Sul. A curva azul representa a soma anual do número de eventos de bloqueios encontrados nos dados ERA Interim e sua reta de tendência e a curva vinho mostram o número de bloqueios extraídos dos dados MRI-CGCM3 e sua curva de tendência. As equações de regressão dos ajustes estão representadas na parte inferior da figura com a cor de seus respectivos pares.

Fig. 8.1 - Frequência média anual de escoamento bloqueado por ponto de longitude sobre a latitude central de 50°S, para os cenários, (a) rcp45 e (b) rcp85, para os períodos de 2015-2030 (linha azul), 2031-2060 (linha vinho), 2061-2090 (linha verde), e para o experimento histórico (linha cinza), extraída das rodadas do modelo MRI-CGCM3.

Fig. 8.2 - Persistência de bloqueios por número de eventos por ponto de longitude para os cenários RCP45 e RCP85, as colunas azuis representam o período histórico de 1979-2005, as vinhos o período de 2015-2030, as verdes o período de 2031-2060 e as roxas o período de 2061-2090. Os valores de número de detecções estão representados em escala logarítmica decimal.

Fig. 8.3 - Número anual (curva grossa) e tendência linear (curva fina) de bloqueios para os períodos de (a) 2015-2030, (b) 2031-2060 e (c) 2061-2090, e (d) 2015-2090, as curvas azuis representam o cenário rcp45 e as curvas tom vinho representam o cenário rcp85.

Fig. A1 – Média Sazonal da Energia Cinética de Turbilhonamento Transiente, para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON, extraído de 26 anos de reanálise ERA Interim (1979-2005).

Fig. A2- Média Sazonal da Energia Cinética de Turbilhonamento Transiente para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON, extraído de 26 anos do período histórico da rodada do modelo MRI-CGCM 3 (1979-2005).

Fig. A3 - Média climatológica de 26 anos (1979 - 2005) do campo de TSM (em °C) para os dados (a) ERA-Interim, (b) para o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e (c) viés entre o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e reanálise ERA-Interim.

Fig. A4 – Número de onda estacionário calculado a partir das composições de vento zonal na presença e ausência de bloqueios nos setores descritos em vários setores. Regiões sombreadas representa regiões onde o vento é de oeste e $\beta > 0$, regiões não sombreadas são regiões onde o vento zonal é de leste ou $\beta < 0$.

Fig. A5 – Frequência de bloqueios em todas as latitudes do HS, para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, representado no lado esquerdo da figura, para o período histórico (1979 – 2005) do modelo MRI-CGCM 3 e para três períodos do cenário RCP45, representados na parte superior.

Fig. A5 – Frequência de bloqueios em todas as latitudes do HS para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, representado no lado esquerdo da figura, para o período histórico (1979 – 2005) do modelo MRI-CGCM 3 e para três períodos do cenário RCP85, representados na parte superior.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores específicos para os parâmetros usados no método dos regimes (fig.3.7).

Tabela 4.1 – Duração média dos episódios de bloqueios para eventos com duração menor que três dias e para eventos com duração maior ou igual a três dias.

Tabela 6.1 – Localização e número de dias onde pelo menos 30% de um dado setor foram preenchidos pelo índice de bloqueio e em nenhum outro setor foi encontrado bloqueio.

Tabela 7.1 - Duração média dos eventos de bloqueio para os dados ERA Interim e MRI-CGCM3.

Tabela 8.1 - Persistência média dos eventos de bloqueios para os cenários RCP45 e RCP85 e período histórico.

Tabela 8.2 - Tendência (#bloqueios/década), Média e desvio padrão (#bloqueios) da média anual dos eventos de bloqueios ocorridos nos períodos estudados.

LISTA DE ABREVIATURAS

HS – Hemisfério Sul

HN – Hemisfério Norte

θ – Temperatura Potencial

PV – Vorticidade Potencial (“Potential Vorticity” em inglês)

PV/θ – Índice Vorticidade Potencial – Temperatura Potencial

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

ERA – “European Reanalysis”

ECMWF – “European Centre of Medium Weather Forecast”

MRI – “Meteorological Research Institute Japan”

CGCM – “Coupled Global Circulation Model”

ϕ – Latitude

λ – Longitude

CAP.1 – INTRODUÇÃO

Bloqueios atmosféricos são sistemas meteorológicos de escala sinótica, que impedem a passagem do jato de oeste impedindo o de seguir seu caminho climatológico. Por meio de observações nos campos de altura geopotencial ou linhas de correntes na média troposfera são encontrados dois tipos de bloqueios: o bloqueio tipo ômega onde duas baixas frias desprendidas se localizam na direção equatorial de uma alta de bloqueio, onde esses três sistemas são semelhantes em intensidade e tamanho e sua forma se assemelha a letra grega ômega (ômega invertido no HS); e o bloqueio onde uma baixa desprendida se posiciona na posição equatorial da alta de bloqueio, caracterizado por uma estrutura tipo dipolo que faz com que surja uma corrente de ar anômala de leste, caracterizando assim um escoamento bloqueado.

Um padrão de bloqueio de grande escala uma vez estabelecido pode durar de dias a semanas, decaindo subitamente, desbloqueando o escoamento de oeste. Os bloqueios além de impedirem o escoamento de oeste em latitudes médias, também impedem a passagem de sistemas transientes como ciclones e frentes, causando impactos na precipitação, na umidade e na temperatura do ar e em regiões adjacentes à sua localização.

Do ponto de vista da meteorologia sinótica, eventos de bloqueio são vistos como regimes de tempo (*"weather regimes"* – Berggren, 1949) e métodos objetivos de identificação foram desenvolvidos para detectá-los, como através de campos de vento, linhas de corrente, altura geopotencial (Lejenas, 1983) e temperatura potencial (Pelly e Hoskins, 2003), e também através de técnicas estatísticas tais como distribuições bivariadas, análise de componentes principais e outras (Berggren, 1949). Uma revisão geral destes

sistemas e pelo menos dois dos principais métodos de identificação é apresentada no capítulo 3.

Os bloqueios atmosféricos geralmente ocorrem nas regiões de bifurcação ou saída do jato de oeste em latitudes médias em ambos os hemisférios. No Hemisfério Sul, há duas regiões mais propensas à ocorrência de bloqueios, a região do Pacífico Oeste, em aproximadamente 180°W a leste da costa da Nova Zelândia e a outra região no Pacífico Leste em aproximadamente 100°W a oeste da costa do Chile. Outras regiões de máximos secundários também são encontradas sobre o Atlântico Sul e sobre o Oceano Índico, um estudo detalhado da climatologia de bloqueios para o HS é apresentado no capítulo 4.

Muitos estudos têm tentado explicar o estabelecimento, a manutenção e o decaimento de um evento de bloqueio, mas atualmente ainda não há uma teoria unificada que explique todos os estágios de um evento de bloqueio; algumas teorias como as das ondas estacionárias (Egger, 1978; Austin, 1980; Tung and Lindzen, 1979), forçante tropical (Hoskins e Karoly. 1981) e equilíbrio múltiplo (Charney e DeVore. 1979; Charney et al. 1981) são de natureza global, enquanto outras consideram os bloqueios como um fenômeno mais localizado, como a teoria dos modons (Mc Williams. 1980; Verkley, 1987) e ainda, para explicar a maturação do bloqueio alguns autores sugerem a interação de transientes com o escoamento de grande escala (Hoskins et al. 1983). Nesse estudo a ênfase maior será nas teorias de natureza global e que serão brevemente apresentadas a seguir.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na primeira seção serão apresentadas as principais teorias de bloqueio, que darão suporte ao trabalho, na segunda seção será mostrada a motivação e objetivos do trabalho e por fim, na seção três será mostrada a estrutura da dissertação.

1.1 – Teorias de Bloqueio

As primeiras teorias tentando explicar os mecanismos responsáveis pela ocorrência de bloqueios surgiram na década de 1950. Um dos primeiros trabalhos foi o de Rex (1951), onde descrevia o comportamento atmosférico durante uma situação de bloqueio como a intrusão de uma célula de alta pressão no escoamento de oeste, no qual ele fez uma analogia com um salto hidráulico, onde na região em que a área por onde passa o escoamento aumenta é criada uma circulação ciclônica e outra anticiclônica, gerando um escoamento anômalo contrário ao escoamento original.

Durante os anos de 1950 a 1970, enquanto outras áreas da meteorologia e climatologia avançavam, o estudo de bloqueios e de outras anomalias persistentes não obteve muito progresso. Devido a problemas econômicos causados por tais sistemas, considerando o desenvolvimento de computadores e a maior disponibilidade de séries históricas, na segunda metade da década de 1970, houve um aumento de interesse por anomalias persistentes e bloqueios.

No início da década de 1980 algumas teorias de bloqueio surgiram como a teoria das ondas estacionárias e a teoria da forçante tropical, sendo que ambas veem bloqueios como interferência de ondas planetárias e serão brevemente apresentadas a seguir.

1.1.1- Teoria das Ondas Estacionárias

Os primeiros experimentos utilizando modelos numéricos concluíram que uma alta de bloqueio somente se estabeleceria se houvesse uma forçante térmica ou orográfica (Egger 1978; Kalnay-Rivas e Merkin 1981; Rex 1951). A maior parte desses trabalhos é devotada ao estudo de bloqueios que ocorrem no HN nas regiões do Pacífico e da costa leste da América do Norte, onde a forçante orográfica é dominante (Groose e Hoskins, 1979). Bloqueios ocorridos próximos à costa Europeia no mar do Norte são devidos à forçante térmica como mostrado no estudo observacional de Austin (1980) e Namias (1964).

Austin (1980) sugere que os contrastes térmicos na TSM induzem ondas longas estacionárias que interferem na partição do jato, produzindo anomalias de vorticidade próximas à tropopausa, este mecanismo então estabelece uma alta de bloqueio.

Tung e Lindzen (1979) sugerem que bloqueios atmosféricos são causados pela amplificação ressonante de ondas planetárias de grande escala forçadas pela topografia e aquecimento da superfície. Eles mostraram que para a ocorrência de uma situação de bloqueio, as ondas planetárias tem que entrar em ressonância e sua velocidade de fase têm que ser reduzida a zero, assim a onda torna se estacionária em relação à superfície da terra e conseqüentemente, também as forçantes topográficas e térmicas.

Groose e Hoskins (1979) usando um modelo barotrópico linearizado para um escoamento zonal de 300mb mostraram que quando o jato zonal passa sobre uma montanha, ele tende a produzir dois trens de onda, um a norte e outro ao sul, tornando se fora de fase escoamento abaixo, dando origem a um fraco bloqueio. Com isso eles tentam mostrar que o principal mecanismo responsável pelo estabelecimento de um bloqueio no HN é a forçante topográfica e não a térmica.

Para o Hemisfério Sul, Berbery e Nuñez (1989) simularam episódios de bloqueios sobre a região do sudoeste do Atlântico Sul usando um modelo hemisférico de água rasa e forçante topográfica. Eles concluíram que os bloqueios ocorridos nessa área podem resultar da ressonância de ondas de Rossby gerada pelos Andes e pela forçante gerada corrente acima do jato. Esse mecanismo poderia explicar o estabelecimento e manutenção dos bloqueios ocorridos sobre o Atlântico Sul. Basicamente segundo essa teoria, quando o escoamento de oeste (o jato), passa sobre uma anomalia térmica ou sobre uma montanha, a forçante térmica/orográfica, induz vorticidade anticiclônica/ciclônica e, considerando somente efeitos inerciais, essas induções se tornam mais intensas com a diminuição da latitude. Assim, dependendo da latitude onde a forçante está localizada pode se induzir trens de onda no escoamento abaixo (“*downstream*”) no qual eles se tornam fora de fase, formando uma estrutura tal que gere

um cavado na direção equatorial e uma crista na direção polar ao escoamento e, se esses trens de onda se tornar estacionários, um evento de bloqueio se estabelece.

1.1.2 – Forçante Tropical

Essa teoria é uma extensão da teoria anterior, só que ao invés da origem dos trens de onda ser em médias latitudes, agora eles têm origem na região subtropical e são induzidos por meio de anomalias de TSM tropicais e subtropicais.

Hoskins e Karoly (1981), usando um modelo baroclínico de cinco camadas, estudaram a respostas de forçantes térmicas e orográficas numa escala global. Eles mostraram que o modo mais fácil de produzir uma resposta dessas forçantes em médias latitudes era posicioná-las em latitudes subtropicais. Para o caso da forçante térmica, em altos níveis foram gerados dois trens de onda, um de ondas longas e outro de ondas curtas. O trem de ondas longas se propagava na direção polar e para leste, enquanto o trem de ondas curtas ficava preso na direção equatorial do jato polar. Essa divisão em dois trens de onda resultaria em uma região de bloqueio escoamento abaixo, onde o trem de ondas longas na direção polar e o trem de ondas curtas na direção equatorial se tornam fora de fase.

Algumas evidências observacionais da importância da forçante tropical para o Hemisfério Sul são os estudos que relacionam a frequência de bloqueios com o padrão de variabilidade El Niño/Oscilação Sul (ENSO - El Niño Southern Oscillation, em inglês), como os estudos de (Oliveira et al. 2013; Mendes et al. 2005; Marques e Rao, 2000). Onde encontraram que em anos de La Niña a frequência de bloqueio sobre o Oceano Pacífico central é menor e em anos de El Niño a frequência é maior, o que indica que o padrão ENSO pode modular a frequência de bloqueios no HS através da propagação de ondas geradas por tais padrões de variabilidade.

1.2 – Motivação e Objetivo

A maior parte dos trabalhos teóricos e observacionais que tentam analisar os processos dinâmicos por trás de eventos de bloqueios foi feita para o HN, onde a forçante topográfica explica grande parte dos fenômenos. Devido à topografia ser pouco presente no HS e a forçante térmica ser mais difícil de ser trabalhada que a topográfica, o entendimento dos processos de estabelecimento, manutenção e decaimento de bloqueios no HS ainda precisa ser melhorado.

Com isso através da análise da variabilidade da Temperatura de Superfície do Mar (TSM) e da frequência de bloqueios atmosféricos pretende-se determinar as tendências climáticas do passado, presente e futuro, onde dados observacionais (ERA Interim) e dados gerados por meio de modelos relacionados ao IPCC AR5 (*Coupled Model Intercomparison Project - CMIP 5*), mais especificamente o modelo MRI – CGCM3, serão utilizados. Pretende-se mostrar:

- 1) Climatologia de bloqueios para o Hemisfério Sul, utilizando o índice de PV/ θ (Pelly e Hoskins 2003).
- 2) Comparação entre os índices de bloqueio tradicionalmente utilizado e o índice PV/ θ .
- 3) Variabilidade interanual e intrasazonal das TSMs considerando os dados observacionais e do modelo MRI – CGCM3 para dois cenários de emissão de CO₂ distintos, até o ano de 2100.
- 4) Relacionar períodos de bloqueios com anomalias de TSM
- 5) Verificar variabilidades em cenários futuros de clima utilizando as simulações geradas pelo modelo MRI – CGCM3.

1.3 - Estrutura da Dissertação

No cap.2 é apresentada uma breve descrição dos conjuntos de dados utilizados, uma descrição dos dois cenários a serem avaliados e considerações sobre a metodologia

empregada, como por exemplo, a interpolação de dados sobre a superfície de vorticidade potencial, definições de médias através de remoção do ciclo anual e outros.

No cap.3 é apresentada uma comparação da metodologia de detecção de bloqueios tradicionalmente utilizada com a metodologia do índice PV/ θ .

No cap.4 é apresentada a climatologia de bloqueios para o HS em todas as latitudes, avaliando a sazonalidade dos eventos de bloqueios e sua variabilidade interanual, assim como também sua duração.

No cap.5 é apresentada a tendência dos eventos de bloqueios para todo o HS.

No cap.6 são estudadas as relações entre os bloqueios e a TSM para seis setores no Oceano Pacífico.

Nos caps. 7 e 8 são avaliados os dados do experimento histórico do modelo utilizado e a frequência de bloqueios para os cenários futuros.

No cap.9 é apresentada a conclusão e algumas considerações finais.

CAP. 2 – CONJUNTOS DE DADOS E METODOLOGIA

2.1 – Dados ERA-Interim

Nesse trabalho foi utilizada a reanálise ERA Interim (European Reanalysis – Dee et. al. 2011), disponível no endereço http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/, onde foram utilizadas as seguintes variáveis: altura geopotencial, vento zonal e meridional, temperatura, temperatura de película (temperatura de superfície sobre o continente e temperatura da superfície do mar sobre os oceanos) e temperatura sobre a superfície de -2PVU ou tropopausa dinâmica, no período de 1979 a 2005. Os dados estão dispostos em grades regulares com resolução espacial de 1,5° e são disponíveis em 37 níveis verticais, variando de 1000 hPa a 1 hPa e possuem resolução temporal de 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC), sendo que foram calculadas médias diárias a partir desses quatro horários.

2.2 – Modelo MRI – CGCM 3 e Cenários Futuros

O projeto CMIP (*“Coupled Model Intercomparison Project”*) é um protocolo padrão estabelecido para o estudo de AOGCMs (*“Atmospheric-Ocean Global Circulation Models”*), onde é oferecido suporte para estudos de mudanças climáticas. Esse projeto mantém o seguinte portal <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html>, onde são disponibilizadas várias saídas de modelo para diferentes cenários de mudança climática suportados pelo quinto relatório (AR5 – *“Assessment Report 5”*) do IPCC (*“Intergovernmental Panel of Climate Change”*).

Para a realização das análises de cenários futuros, foi escolhido o modelo MRI-CGCM 3 (Meteorological Research Institute- Coupled Global Circulation Model version 3, Yukimoto et al. 2009.) e dois cenários de mudanças climáticas, o rcp45 e rcp85, que serão apresentados a seguir.

Para esse modelo somente são disponibilizados 8 níveis verticais(1000hPa, 850hPa, 700hPa, 500hPa, 250hPa, 100hPa, 50hPa, 10hPa) com resolução espacial de T159. A fim de fazer comparações com os dados do ERA Interim, a saída do modelo foi interpolada para uma resolução espacial de 1.5° em grade regular.

2.2.1 – Cenários Futuros

Cenários são descrições de possíveis futuros, não são previsões, mas roteiros (“*storyboards*”), uma série de visões alternativas de futuros os quais são possivelmente plausíveis, mas não necessariamente prováveis (Storch, 2008). O objetivo dos cenários é confrontar partes interessadas e formadores de políticas sobre os possíveis meios de lidar com um futuro desconhecido. Os cenários permitem a implementação de políticas para evitar um futuro não desejado.

Assim, para fornecer tais informações plausíveis de como o futuro pode evoluir em termos de mudança econômica, tecnológica, energia, uso da terra e emissões de gases do efeito estufa são usados cenários sócio econômicos e cálculos climatológicos para servir como base para a entrada dos modelos de circulação geral da atmosfera, onde essas entradas consistem em “caminhos” da forçante radiativa (“*Pathways*”).

Para o quinto relatório de avaliação do IPCC, foram designados 4 cenários de emissão distintos ou quatro “caminhos para a forçante radiativa”, denominados “Caminhos de Concentração Representativos” (RCPs – “*Representative Concentration Pathways*”), onde a forçante radiativa chega a 8,5, 6,0, 4,5 e 2,6 W/m² até o final do século 21.

Cada cenário cobre o período de 1850 – 2100, os dados anteriores a 2005, fazem parte do experimento ou período histórico do modelo, os dados após 2005, fazem parte dos cenários.

A fig.2.1 mostra emissões para o período histórico e para os diferentes cenários disponíveis. Foram escolhidos dois cenários, o RCP85, onde os níveis de emissão de CO₂ atingem seu pico em 2100, chegando a 30 GtC/ano e o cenário RCP45 onde atinge o pico de emissão em aproximadamente 2050, chegando a pouco mais de 12GtC/ano, retornando aos níveis de emissão do final da década de 1950 com aproximadamente 5GtC/ano.

Para mais

informações

(http://www.clivar.org/sites/default/files/imported/publications/exchanges/Exchanges_5_6.pdf).

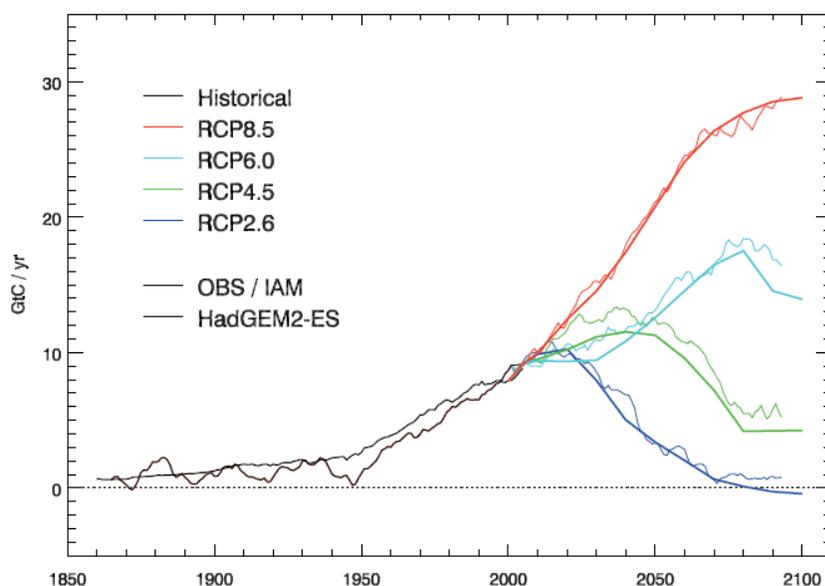


Fig. 2.1 – Emissões permitidas simuladas pelo modelo HADGEM2-ES (linhas finas), comparado com as observações de emissão de CO₂ para o período histórico do experimento e aqueles projetados pelos cenários RCP com a avaliação integrada de modelos (linhas grossas). [Adaptado de Friedlingstein e Jones 2010].

2.3 – Considerações Sobre a Metodologia

2.3.1 – Interpolação de Variáveis nas Superfícies de Vorticidade Potencial

Neste trabalho os eventos de bloqueio foram identificados no nível da tropopausa dinâmica que segundo Hoskins et.al. (1991) pode ser considerado o nível de ± 2 PVU para o HN/HS. Assim, para os dados ERA Interim, a variável temperatura potencial (θ) e temperatura (T) são disponíveis para esse nível, mas os dados do modelo MRI-CGCM 3 não estão disponíveis nesse nível, assim foi criado um algoritmo de interpolação baseado em partes no usado pelo ECMWF, com descrição disponível em <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY25r1/Observations/Observations-01-1.html>.

Na fig.2.2, é apresentado um fluxograma descrevendo as etapas do algoritmo utilizado. Basicamente, o algoritmo recebe dados de temperatura, vento zonal e meridional em diferentes níveis de pressão, calcula a temperatura potencial e vorticidade potencial em cada nível de pressão, busca dois níveis mais próximos de um valor pré-estabelecido de vorticidade potencial e através de uma regressão linear interpola a temperatura potencial nesse nível de vorticidade potencial. Se não houver esse dado nível de vorticidade potencial ou estiver a uma altura abaixo do nível de 400 hPa ou acima de 96 hPa, é usado o valor de temperatura potencial de 96 hPa.

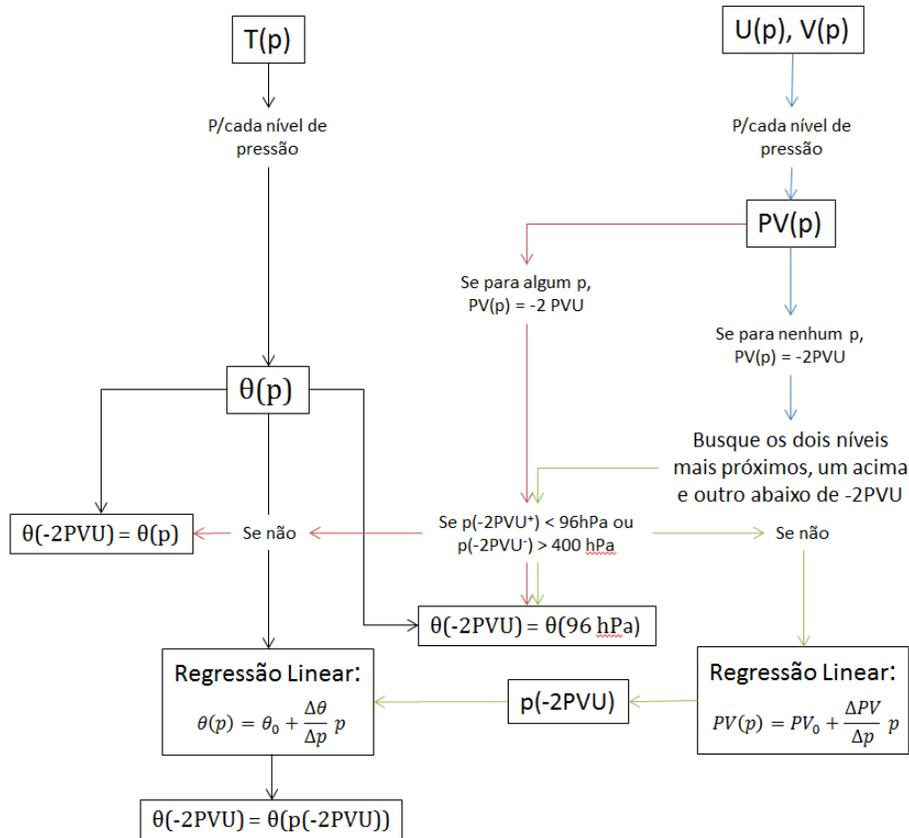


Fig. 2.2 - Fluxograma representando o algoritmo de interpolação utilizado nesse trabalho.

2.3.2 – Anomalias Calculadas a Partir da Extração do Ciclo Anual

Para o cálculo da anomalia de algumas variáveis utilizadas como vento meridional, temperatura e altura geopotencial na escala de tempo diária, foi utilizado a remoção do ciclo anual.

Cada variável atmosférica pode ser representada como média mais anomalia $x = \bar{x} + x'$, onde \bar{x} representa a média e x' representa a anomalia ou perturbação, o problema reside em determinar como calcular a média, uma vez que, a maior parte das variáveis da atmosfera é diretamente modulada pelo Sol e o eixo de rotação da Terra é inclinado em relação à eclíptica. A média aritmética pode não ser apta para representar o “clima médio” para todos os dias ou meses do ano, assim através do uso de transformada da

Fourier dos dados ou análise harmônica pode se obter o “clima médio” para todos os dias do ano, o que caracteriza o ciclo anual.

Para a remoção do ciclo anual, seguindo o procedimento apresentado em Wilks (2011), para cada ponto de grade é calculada a média de uma dada variável para 365 dias do ano, sendo que essa série temporal pode ser representada como:

$$Y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ C_k \cos \left[\frac{2\pi kt}{n} - \phi_k \right] \right\} \quad (eq. 2.1)$$

Onde $C_k = (A_k^2 + B_k^2)^{1/2}$ e A_k e B_k são dados por

$$A_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \cos \frac{2\pi kt}{n} \quad ; \quad B_k = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n y_t \sin \frac{2\pi kt}{n} \quad (eq. 2.2a, b)$$

$$\phi_k = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \right) & \text{para } A_k > 0 \\ \tan^{-1} \left(\frac{B_k}{A_k} \right) \pm \frac{\pi}{2} & \text{para } A_k < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{para } A_k = 0 \end{cases} \quad (eq. 2.3)$$

Onde y_t representa a média das observações para os 365 dias do ano, n representa os 365 dias do ano e k representa o harmônico a ser calculado.

A anomalia é obtida através da remoção do ciclo anual que foi definido nesse trabalho como Y_t calculado até o segundo harmônico ($k=2$).

CAP. 3 – IDENTIFICAÇÃO DE BLOQUEIOS

Eventos de bloqueios tradicionalmente são identificados por meio de análises de campos de altura geopotencial ou função de corrente em 500 hPa. Atualmente há uma tendência em representar bloqueios como quebras de ondas de Rossby (Pelly e Hoskins, 2003; Berrisford et al. 2007; Barnes et al. 2012) usando o campo de temperatura potencial sobre uma dada superfície de vorticidade potencial.

Devido ao maior embasamento dinâmico do campo de temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica ou superfície de -2 PVU (HS) e também pelo fato da temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica ser menos suavizada que os campos em 500 hPa utilizaremos nesse trabalho o índice desenvolvido por Pelly e Hoskins (2003), referido aqui como índice PV/ θ .

Esse capítulo está estruturado da seguinte forma, na seção 3.1 definiremos o índice PV/ θ , na seção 3.2 discutiremos algumas características do índice, na seção 3.3 será apresentado o método dos regimes para a identificação de bloqueios (Barnes et al. 2012), na seção 3.4 o índice PV/ θ será comparado com o índice desenvolvido por Tibaldi e Molteni (1990), referido aqui como TM e por fim na seção 4 será apresentado outros métodos objetivos de identificação de bloqueios.

3.1 – Definição do Índice PV/ θ

3.1.1 – Ideias PV/ θ

A vorticidade potencial de Ertel-Rossby é definida por:

$$PV = \frac{1}{\rho} \vec{\eta} \cdot \nabla \theta \quad (eq. 3.1)$$

onde ρ é a densidade do ar em kg m^{-3} , $\boldsymbol{\eta}$ é o vetor vorticidade absoluta em s^{-1} e θ é a temperatura potencial em K. Logo a unidade da Vorticidade Potencial (PV) são $\text{K m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$, a PV é representada em unidades de vorticidade potencial, representado aqui por PVU, então $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Da equação 3.1, fica claro que a PV combina elementos da estrutura térmica (na forma de $\nabla\theta$) com a informação dinâmica da atmosfera (na forma de $\boldsymbol{\eta}$). Portanto como discutido por Hoskins (1997), a PV tem duas propriedades que a tornam um diagnóstico importante para a identificação de sistemas sinóticos:

- (a) A conservação de PV – onde na ausência de processos diabáticos e fricção, PV é conservada seguindo o movimento do fluido, dando uma visão lagrangeana das parcelas de ar;
- (b) O princípio da Invertibilidade – onde dadas condições de fronteiras e condições de balanço que relacionam os campos de temperatura e vorticidade (vento térmico) adequadas, a distribuição tridimensional de PV pode ser invertida para recuperar os campos de velocidade, temperatura e pressão (útil para a modelagem numérica).

O princípio da conservação de PV permite descobrir trajetórias de parcelas de ar para períodos maiores que uma semana sobre uma superfície isentrópica longe dos efeitos de atrito da superfície. O princípio da invertibilidade implica que a distribuição de PV em combinação com as condições de fronteira e balanço têm todas as informações relevantes a respeito das estruturas térmica e dinâmica da atmosfera. Portanto PV combina a dinâmica e termodinâmica em uma única equação.

Assim podemos imaginar bolhas de PV como blocos básicos da dinâmica e termodinâmica da atmosfera. A fig.3.1 mostra os padrões de circulação e temperatura associados com anomalias de PV negativas e positivas. Nas duas situações, a região de influência se estende além da região onde se encontra a anomalia. A anomalia negativa pode induzir circulação ciclônica com ar quente acima do ar frio. A estabilidade estática aumenta na região da anomalia, mas reduz acima e abaixo da anomalia, analogamente a anomalia

positiva de PV induz circulação anticiclônica com ar quente abaixo do ar frio, reduzindo a estabilidade estática na região da anomalia e aumentando nas regiões acima e abaixo da anomalia.

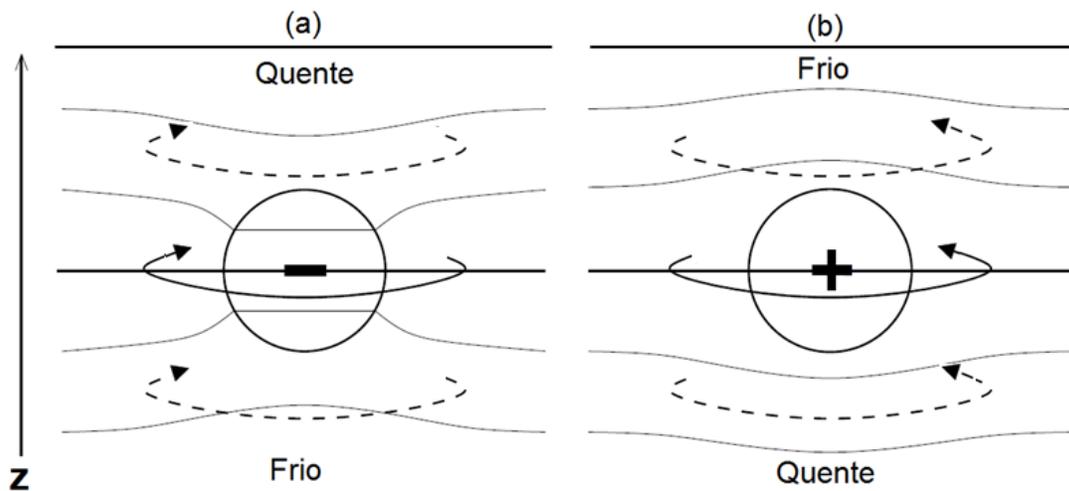


Fig. 3.1 - Padrões de circulação e temperatura associados com as anomalias (a) negativas e (b) positivas de vorticidade potencial no Hemisfério Sul. Contornos representam isentrópicos. (Adaptado de Hoskins, 1997).

Podemos observar na fig.3.1 como as anomalias de temperatura estão associadas com o padrão de circulação na ausência das anomalias de PV. Vamos imaginar uma linha horizontal, acima da anomalia negativa de PV na fig.3.1a. A região abaixo desta linha contém uma anomalia quente associada com a circulação ciclônica, e similarmente a fig.3.1b nos diz que o ar frio está associado à circulação anticiclônica. Podemos também imaginar uma linha horizontal representando a tropopausa abaixo de cada anomalia. Assim ar quente na tropopausa está associado com circulação anticiclônica na troposfera e ar frio na tropopausa circulação ciclônica.

Em uma situação de bloqueio (situação anticiclônica), ocorre um fenômeno chamado “quebra” de onda de Rossby, que está associado à intrusões de ar de baixas latitudes para altas latitudes. Assim bloqueios podem ser vistos como anomalias positivas de temperatura potencial em médias latitudes sobre a tropopausa dinâmica.

3.1.2 – Quebras de Ondas de Rossby e Bloqueios Atmosféricos

Quebra de ondas de Rossby é um processo onde os contornos de vorticidade potencial sobre uma superfície isentrópica ou de temperatura potencial sobre uma superfície de vorticidade potencial tornam-se irreversivelmente deformados permitindo a mistura das diferentes massas de ar. Isto implica na reversão do gradiente meridional de temperatura (Berrisford et al. 2007).

Em uma situação de bloqueio, temos parcelas de ar de baixas latitudes sendo advectadas para altas latitudes e vice versa, o que faz com que o gradiente meridional de temperatura potencial sobre uma dada superfície de vorticidade potencial seja revertido, assim eventos de bloqueios podem ser vistos como quebras de ondas de Rossby.

Como apontado por Berrisford et al. (2007) não se pode assumir que todos os eventos de quebra de onda sejam considerados como bloqueios. No trabalho de Hitchman e Huesman (2007) foi encontrado que eventos de pequena escala também podem levar a quebra de ondas de Rossby tanto na troposfera como na estratosfera e também foram encontrados eventos transientes de quebra de onda. Portanto consideraremos como bloqueio, eventos de quebra de onda que tenham a mesma escala temporal e longitudinal de um evento de bloqueio como os identificados nos campos de altura geopotencial em 500hPa.

Há dois tipos principais de quebra de ondas de Rossby relevantes para o estudo de bloqueios (Tyrlis e Hoskins, 2008), o tipo ciclônico e o tipo anticiclônico, ambos representados na fig.3.2. No tipo ciclônico (fig.3.2a) o ar frio de altas latitudes move-se em direção ao equador e para leste, o que faz com que o ar quente de latitudes mais baixas se mova para oeste e para direção polar e no tipo anticiclônico (fig.3.2.b) o ar mais quente de baixas latitudes se move na direção polar e para leste, fazendo com que o ar de altas latitudes se mova para oeste e em direção ao equador.

Ambas as morfologias de quebra de onda estão relacionadas com a posição do jato de oeste de médias latitudes (Tyrlis e Hoskins, 2008). No HS, quando a quebra de onda é ciclônica o jato se localiza ao sul da quebra de onda, e quando a quebra de onda é

anticiclônica, o jato situa-se geralmente a norte da quebra de onda, o que explica os mecanismos apresentados no parágrafo anterior. Também há duas outras morfologias de quebra de onda que ocorrem ao longo do eixo do jato, similares aos dois últimos padrões, uma ciclônica e outra anticiclônica, mas como apontado por Tyrlis e Hoskins (2008), o tempo de decaimento desse tipo de quebra de onda é menor do que a escala de tempo sinótica e geram anomalias de temperatura muito fracas, portanto, tais eventos não podem ser considerados como bloqueios.

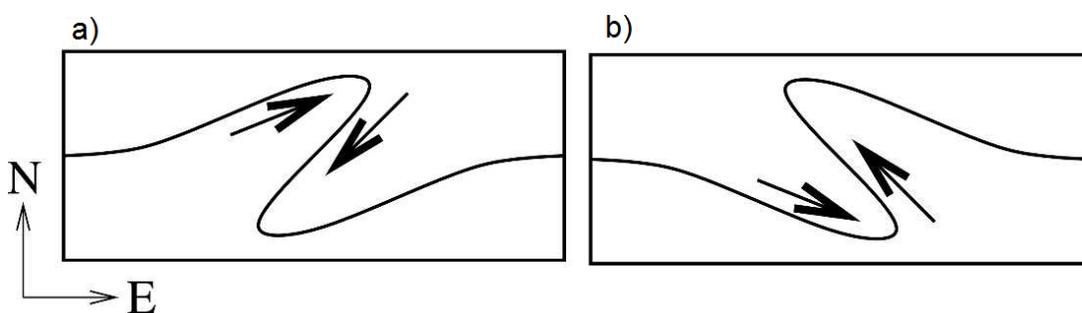


Fig. 3.2 - Diagrama esquemático para o HS mostrando estruturas da (a) quebra de onda ciclônica e (b) quebra de onda anticiclônica. Os contornos representam um valor particular de temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica e as flechas indicam o sentido da advecção dominante de valores anômalos de temperatura potencial (adaptado de Berrisford et al. 2007).

3.1.3 – Índice PV/ θ (Pelly e Hoskins, 2003)

O índice PV/ θ detecta eventos instantâneos de bloqueio por meio da quebra de onda de Rossby, identificando regiões de reversão do gradiente meridional de temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica. Através do cálculo da subtração de duas médias meridionais de temperatura, uma localizada acima de uma dada latitude central e outra abaixo da latitude central.

Na fig.3.3 estão representados alguns parâmetros necessários para o cálculo do índice PV/ θ . A linha preta representa uma dada isoterma sobre a superfície de -2PVU em uma situação de bloqueio atmosférico, como descrito no parágrafo anterior. Basicamente o

índice consiste na subtração da temperatura potencial média de duas regiões, uma na direção polar e outra na direção equatorial de uma dada latitude central ϕ_c .

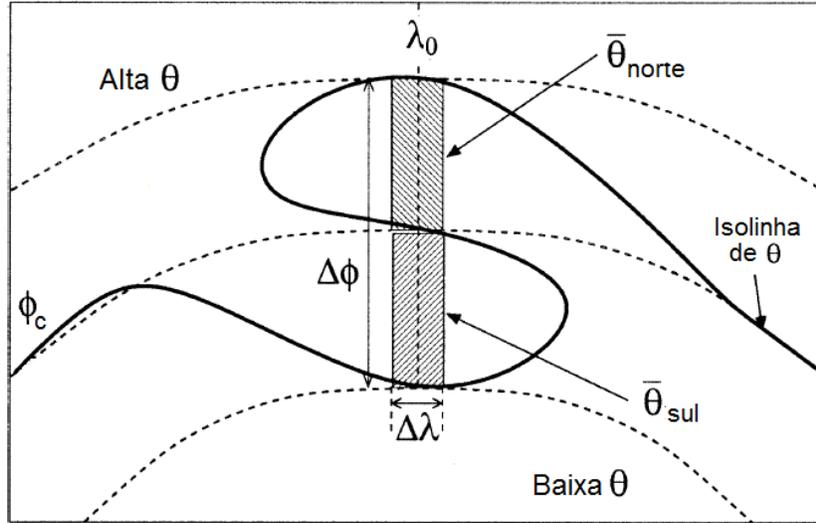


Fig. 3.3 - Representação esquemática de parâmetros relevantes para o cálculo do índice PV/theta em uma dada longitude λ_0 (adaptado de Pelly e Hoskins 2003).

Assim o índice PV/ θ é dado por:

$$B(\lambda) = [\bar{\theta}]_{sul} - [\bar{\theta}]_{norte} = \frac{1}{\delta\phi} \int_{\phi_c - \delta\phi}^{\phi_c} [\theta] d\phi - \frac{1}{\delta\phi} \int_{\phi_c}^{\phi_c + \delta\phi} [\theta] d\phi \quad , \quad (eq. 3.2)$$

onde ϕ_c representa a latitude central, que será definida a seguir, δ_ϕ representa a extensão meridional dos bloqueios tendo aproximadamente 15° , e $[\theta]$ representa a média longitudinal de temperatura potencial entre um intervalo de longitudes $\lambda_0 - \Delta\lambda$ e $\lambda_0 + \Delta\lambda$. Para filtrar efeitos de pequena escala, onde λ_0 é a longitude a ser calculado o índice e $\Delta\lambda = 6.0^\circ$, então $[\theta]$ é definido como:

$$[\theta](\lambda_0) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_0 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_0 + \Delta\lambda/2} \theta(\lambda) d\lambda \quad , \quad (eq. 3.3)$$

Para uma dada longitude λ ser considerada como bloqueada, $B > 0$, ou seja, o ar frio está a norte do ar mais quente (HS). Logo isto indica reversão do gradiente de temperatura potencial e quebra de onda de Rossby.

3.1.4 – Determinação da Latitude Central ϕ_c e Índice 1D

A latitude central ϕ_c , talvez, seja o parâmetro mais importante na determinação do índice de bloqueios, pois é a latitude onde se espera que os bloqueios ocorram. Não há uma latitude definida ou única para que os bloqueios ocorram em uma dada longitude. Muitos autores para o HS assumem latitudes centrais entre 55°S e 45°S como Tibaldi et al. (1994), Oliveira et al. (2013) e Mendes et al. (2008).

O bloqueio muda o padrão de circulação em médias latitudes inpedindo ou dividindo o jato de oeste em dois ramos, sendo assim é razoável escolher como valores de latitude central, as latitudes ou a latitude do eixo do jato. Como extensão meridional dos bloqueios, a extensão meridional do jato, o que também justifica as escolhas dos autores citados anteriormente. Para ilustrar as latitudes mais prováveis de ocorrência de bloqueios, na fig.3.4 está representada a média anual da magnitude do vento em 300 hPa entre os anos de 1979-2005.

Para o HS podemos observar que sobre o Oceano Atlântico e Índico, o jato polar é bem proeminente, e está localizado entre as latitudes de 50°S a 55°S, sobre o Oceano Pacífico também se observa a divisão do jato e a assinatura do jato subtropical em aproximadamente 30°S a norte da Nova Zelândia, aproximadamente em 180°W. Sobre o Atlântico e sobre o Índico, é possível definir a latitude central de bloqueios, mas sobre o Pacífico devido à dupla estrutura do jato a mesma definição não se aplica.

Devido aos bloqueios estarem associados ao impedimento da passagem de sistemas meteorológicos transientes, como frentes e ciclones, é calculada a energia cinética dos turbilhões (Eddy Kinetic Energy – EKE, eq. 5a), que nada mais é do que a energia cinética calculada a partir da variância do vento, ou seja:

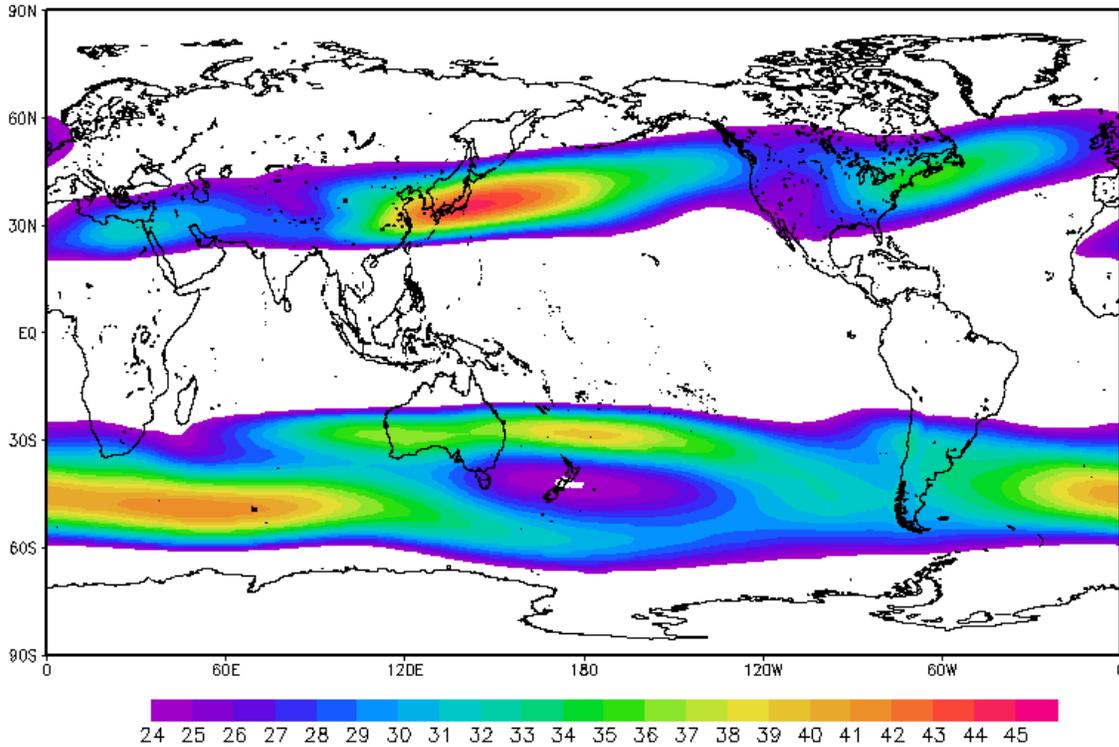


Fig. 3.4 - Média anual da magnitude do vento (m/s) em 300hPa, extraída de 26 anos de dados ERA Interim(1979-2005).

$$EKE = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2) \quad , \quad (eq.3.3a)$$

$$\begin{cases} u' = u - \bar{u} \\ v' = v - \bar{v} \end{cases} \quad , \quad (eq.3.3b)$$

onde u e v representam as componentes zonal e meridional do vento, u' e v' suas respectivas perturbações e \bar{u} e \bar{v} suas respectivas médias temporais.

A fim de representar somente a contribuição devido aos transientes, antes do cálculo da EKE aplicou-se um filtro de Lanczos passa banda nos dados, onde somente são retidos os valores de frequências correspondentes a banda entre dois e seis dias, que é a escala dos turbilhões transientes, assim a EKE torna-se Energia Cinética dos Turbilhões Transiente (Transiente Eddy Kinetic Energy – TEKE).

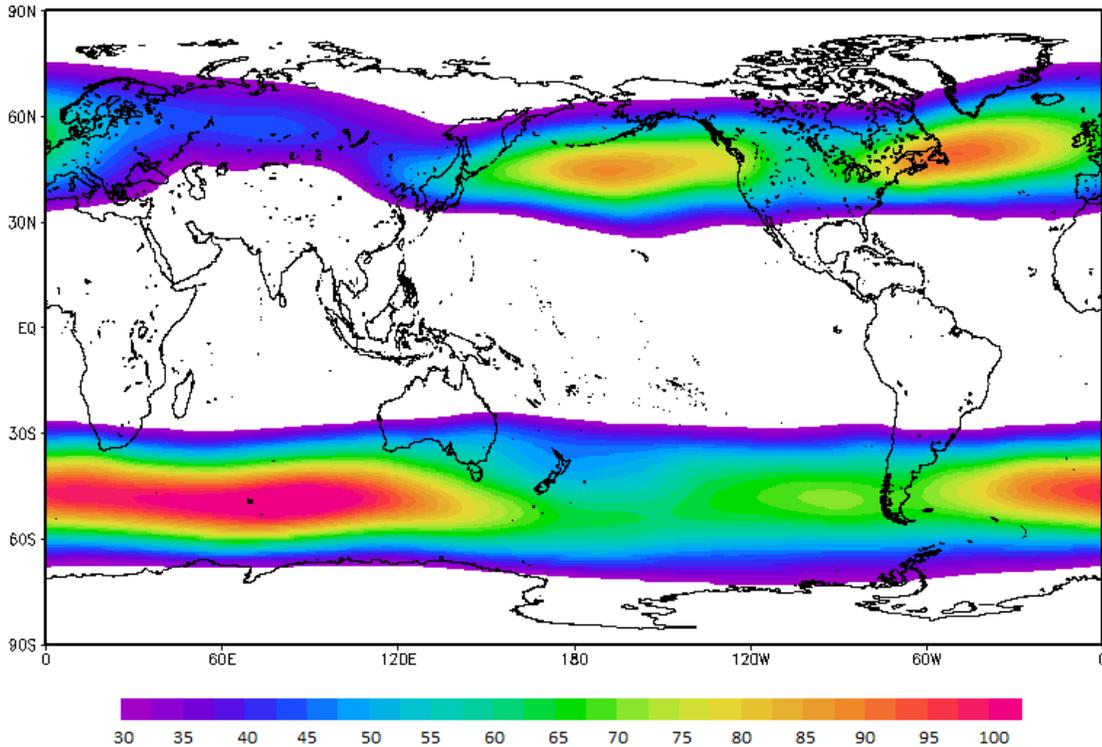


Fig. 3.5 - Média anual da energia cinética de turbilhonamento transiente (m^2s^{-2}) em 250hPa, extraído de 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005 ECMWF Re-Análises), dado espectralmente suavizado e truncado em T21.

Na fig.3.5 é mostrada a TEKE em 300hPa, onde observa-se que a dupla estrutura de jatos sobre o Oceano Pacífico não aparece mais, logo nessa banda entre dois e seis dias, a contribuição do jato subtropical é muito pequena em relação à contribuição do jato polar. Assim usamos como valores de latitude central, aqueles de máximo meridional da TEKE, ou as latitudes onde o jato polar é mais intenso. A fim de remover ruídos de pequena escala do campo, o campo de TEKE foi espectralmente suavizado em T21 (filtro de Fourier). A fig.3.5 representa a TEKE truncada em T21.

A partir da fig.3.5, é obtida a fig.3.6 onde estão representadas as latitudes onde se encontram o máximo meridional da TEKE, essas latitudes serão utilizadas como valores de latitude central (ϕ_c) para o cálculo do índice PV/θ em uma dimensão. Seguindo a metodologia proposta por Pelly e Hoskins (2003), será utilizada a média anual da latitude

central (fig.3.6b) e o índice B (eq.3.2) será calculado entre um $\Delta=4^\circ$ a norte e a sul da latitude central em uma longitude particular, se para algum valor entre $\phi_c \pm \Delta$, $B > 0$, dizemos que a dada longitude está bloqueada.

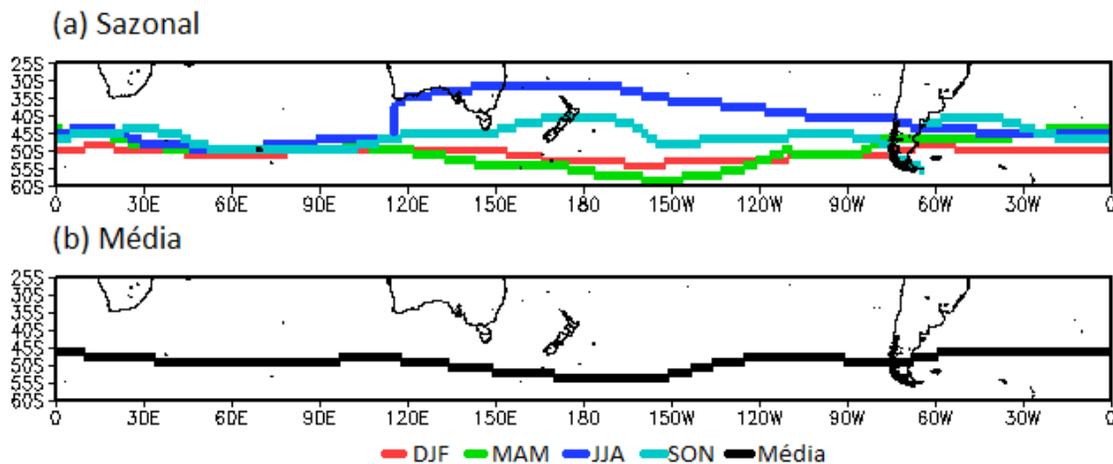


Fig. 3.6 – Latitude central dos eventos de bloqueios, calculada a partir do máximo meridional da TEKE (fig3.5) em 250 hPa extraída de 26 anos de dados ERA Interim (1979 – 2005), (a) a curva vermelha representa a latitude central para os meses de DJF, a verde para MAM, a azul para JJA, a azul claro para SON e (b) a curva preta representa a média anual da latitude central.

Analisando a fig.3.6a, observa-se sobre a região do Oceano Pacífico (120°E a 90°W) uma grande variação da latitude central, sendo que durante os meses de JJA (inverno austral), situa-se mais a norte, chegando a 30°S. Isto indicaria maior contribuição do jato subtropical para a manutenção dos sistemas transientes, já para os demais meses encontramos maior contribuição do jato polar, com valores de latitude central em aproximadamente 50°S, exceto para SON que a latitude central atinge 40°S. Para as demais regiões do globo não é encontrado grande variabilidade sazonal, com a latitude central situando-se próximo de 50°S.

3.2 – Método dos Regimes (Barnes et al. 2012)

Longitudes instantaneamente bloqueadas não implicam na existência de bloqueios, mas somente um indicativo de que pode existir um bloqueio nessa região. O índice PV/θ descrito na seção 3.1.3, não leva em conta a escala temporal e nem a escala longitudinal de um evento de bloqueio.

A fig.3.7 mostra um fluxograma apresentando os passos utilizados para definir um evento de bloqueio. No passo 1 é calculado o índice apresentado na seção 3.1.3, onde se $B > 0$ pode-se definir a longitude como instantaneamente bloqueada, que chamamos aqui de Longitude Bloqueada Instantânea (LBI). No passo 2 são preenchidas lacunas de até $L=7.5^\circ$ entre duas longitude bloqueadas. No passo 3 são agrupadas longitudes bloqueadas com extensão longitudinal mínima de $W = 15^\circ$. Assim chamamos este grupo de Grupo de Longitudes Bloqueadas Instantâneas (GLBI). No passo 4 repete-se o passo 2 só que para as GLBIs já calculadas no passo anterior, assim temos uma lista inicial de GLBIs (A) (passo 5).

Do passo 6 em diante é utilizado um critério temporal, onde no passo 6 são encontradas GLBIs um dia antes e um dia após que no máximo se sobreponham por $P=10^\circ$, caso seja encontrado algum evento que respeite esse critério, este é colocado na lista de Bloqueios (B) (passo 7), após esse evento ter sido tirado da lista A, o passo 6 é repetido novamente. Após todos os eventos terem sido identificados, é usado um critério de persistência (passo 8), onde os eventos de bloqueios tem que persistir por pelo menos T dias, que assumiu-se aqui $T=3$ dias. Todos o bloqueios com 3 dias ou mais de persistência são removidos da lista e os passos de 6 a 8 são repetidos novamente, assim temos uma nova lista de bloqueios (B).

Para um evento na lista B ser considerado como um evento de bloqueio, um critério de deslocamento é aplicado. No passo 10, para cada dia calculou-se o ponto médio de B e calculou-se o seu deslocamento, se o ponto médio do evento se deslocar mais do que 10° por dia, o evento em questão não é considerado como bloqueio, e é removido da lista B. Após esse passo, o critério de persistência (passo 8) é aplicado novamente, assim temos a

lista final de bloqueios. A tabela 3.1 apresenta a lista dos parâmetros usados para a detecção dos eventos de bloqueios.

Tabela 3.1 - Valores específicos para os parâmetros usados no método dos regimes (fig.3.7).

Parâmetro	Valor
L	7.5°
W	15.0°
P	10.0°
T	3 dias
X	10.0°

A maioria dos trabalhos que identificaram bloqueios, somente levam em conta os passos 2, 3 e 8, não considerando o deslocamento dos eventos de bloqueios (passos 6 e 10). Para exemplificar melhor a metodologia, na fig.3.8 são mostrados três diagramas de Hovmöller, indicando o que acontece em cada etapa da identificação dos bloqueios. O primeiro representa o índice instantâneo de bloqueios (passo 1), o segundo representa a lista inicial de GLBIs (passos de 2 a 4) e o terceiro representa a lista final de bloqueios (passos de 5 a 10).

3.3 – Índice Clássico de Detecção de Bloqueios (Tibaldi e Molteni 1990)

Baseado no trabalho de Lejenäs e Økland (1983), esse índice consiste na detecção da inversão do gradiente de altura geopotencial em 500 hPa em médias latitudes. Esse índice foi modificado por Tibaldi e Molteni (1990), pois algumas baixas polares desprendidas eram detectadas como bloqueios. Assim Tibaldi e Molteni (TM) adicionaram mais uma condição ao índice desenvolvido por Lejenäs e Økland, exigindo um escoamento mínimo de oeste na direção equatorial à reversão do gradiente e também adaptou o índice para detectar bloqueios no HS. O índice é dado por:

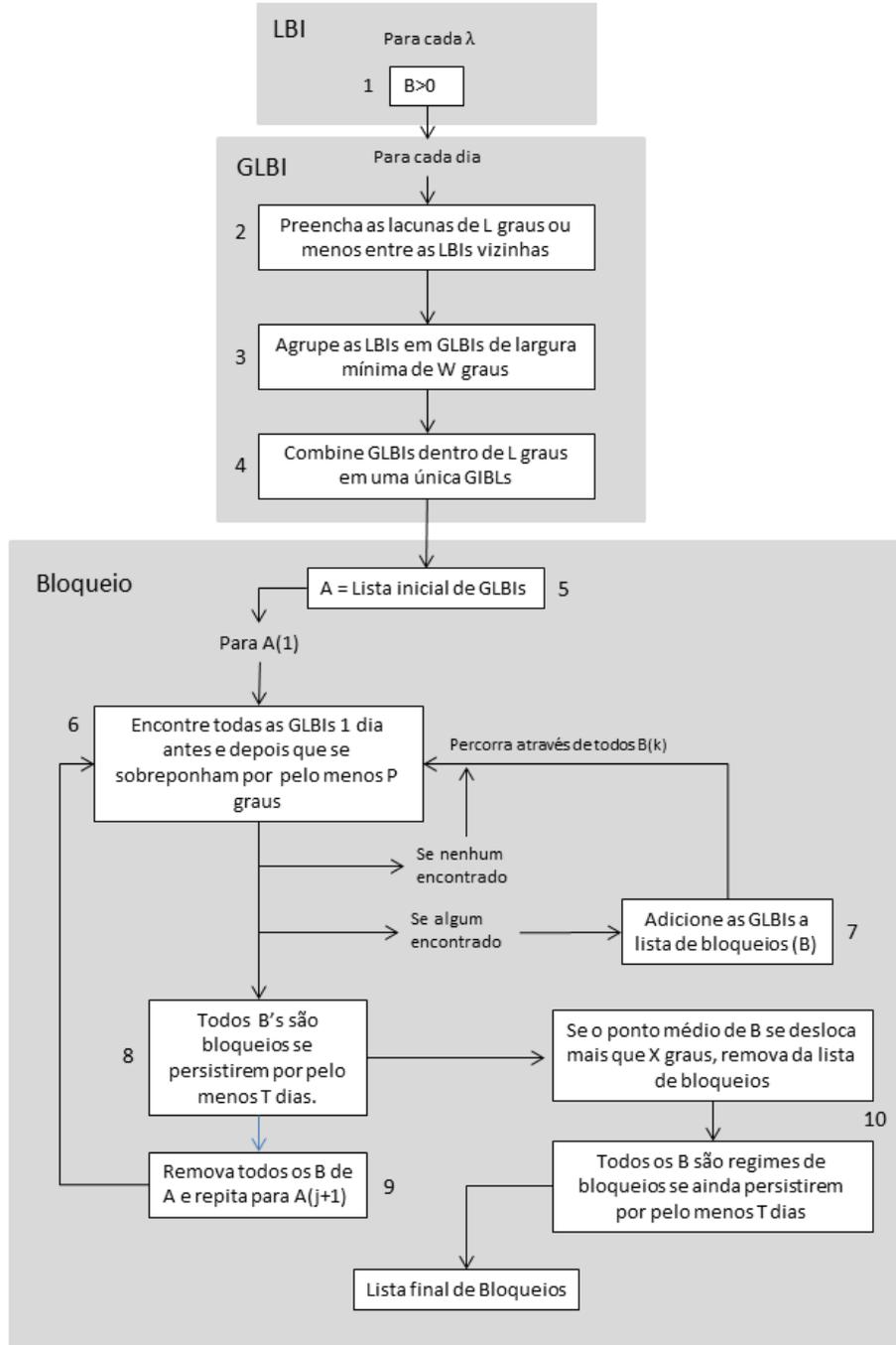


Fig. 3.7 - Fluxograma ilustrando os passos usados para definir um evento de bloqueio. Adaptado de Barnes et al. (2012).

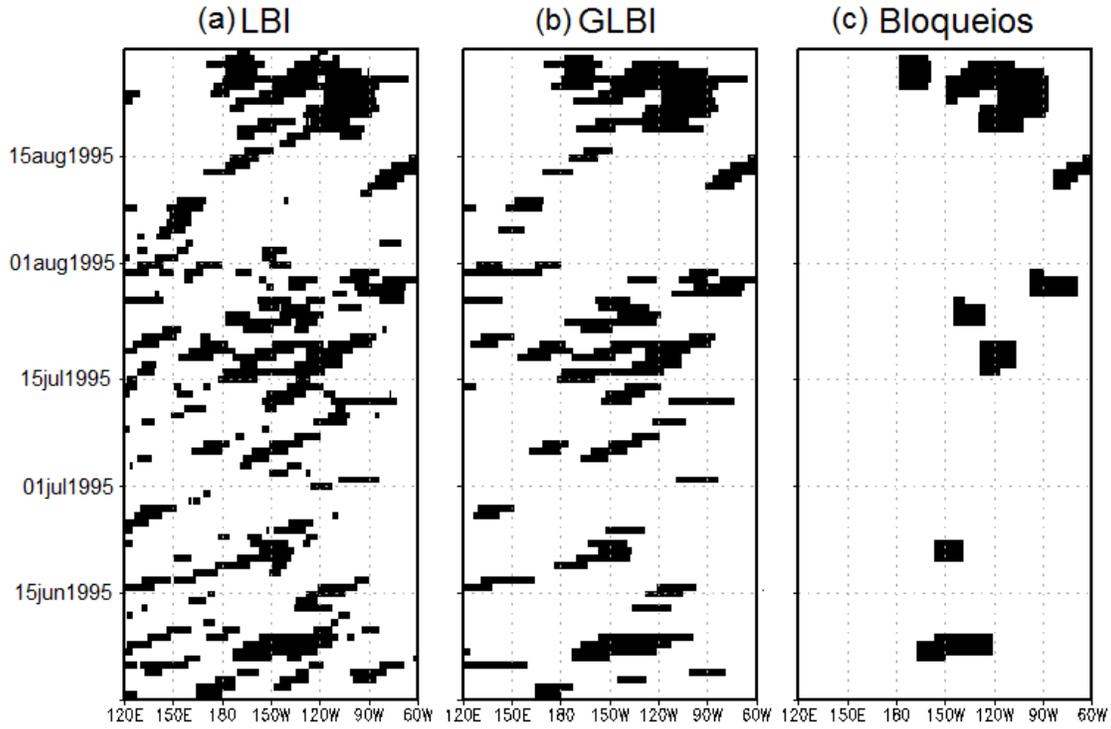


Fig. 3.8 – Diagramas de Hovmoller representando o índice de bloqueios 1D para o inverno de 1995. (a) representa o índice instantâneo de bloqueio (LBI), (b) representa o grupo de longitudes bloqueadas instantaneamente (GLBI) e (c) representa os bloqueios identificados.

$$\begin{cases} GHGN(\lambda) = \frac{\Delta Z(\phi_N, \phi_c)}{(\phi_N - \phi_c)} = \frac{Z(\phi_N) - Z(\phi_c)}{(\phi_N - \phi_c)} > 0 \frac{m}{^\circ lat}, & (eq. 3.4a) \\ GHGS(\lambda) = \frac{\Delta Z(\phi_c, \phi_S)}{(\phi_c - \phi_S)} = \frac{Z(\phi_c) - Z(\phi_S)}{(\phi_c - \phi_S)} < -10 \frac{m}{^\circ lat}, & (eq. 3.4b) \end{cases}$$

onde GHGN e GHGS, são os gradientes de altura geopotencial, a norte e a sul de uma dada latitude central ϕ_c . As latitudes ϕ_N e ϕ_S , latitude norte e sul ou equatorial e polar, são determinadas por meio das seguintes expressões:

$$\begin{cases} \phi_N = \phi_c + \delta_\phi \\ \phi_S = \phi_c - \delta_\phi \end{cases} \quad (eq. 3.5)$$

Diferentemente do índice PV/θ , esse índice usa valores constantes de latitude central, que para a maioria dos trabalhos no HS, ϕ_c situa-se entre 45°S e 55°S.

3.4 – Índice 2D e Comparação entre o Índice PV/θ e o Índice Classico

3.4.1 – Índice 2D

Na seção 3.1.4 é apresentada a determinação da latitude central ou latitudes propensas à ocorrência de bloqueios, os índices de bloqueios são muito sensíveis ao uso da latitude central e nem todos os bloqueios ocorrem sobre essas referidas latitudes.

Para resolver esse problema autores como Oliveira et al. (2013) propõem o cálculo do índice de bloqueio sobre três latitudes centrais, localizadas em 55°S, 50°S e 45°S, referidas como média alta, média e média baixa latitude. Outros autores como Crosci-Maspoli et al. (2009) e Berrisford et al (2007), propõem o calculo do índice em todas as latitudes, dando assim a dimensão geográfica, não só longitudinal como no índice 1D, mas também a dimensão meridional dos eventos de bloqueios.

3.4.2 – Comparação entre os Índices PV/θ e Baseado na Altura Geopotencial

A fig.3.9 representa o bloqueio ocorrido entre os dias 21 e 26 de agosto de 1995, entre as longitudes 120°W e 60°W, para o índice PV/θ (fig.3.9a) e para o índice baseado na altura geopotencial (fig.3.9b), ambos são mostrados junto com as médias entre os dias 21 e 26 de agosto dos campos de temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica e altura geopotencial em 500 hPa, respectivamente.

A assinatura de bloqueio aparece em ambas as figuras, na fig.3.9a ,entre 120°W e 80°W, nota-se no campo de temperatura potencial, uma região mais quente nessa região e na fig.3.9b tem-se em uma latitude mais alta que a anomalia encontrada no campo anterior, uma anomalia de pressão positiva.

Tanto o índice PV/θ como o índice baseado na altura geopotencial procuram por regiões de reversão do gradiente de temperatura potencial e altura geopotencial,

respectivamente. Sendo assim, uma vez que o bloqueio é uma estrutura quase barotrópica, nem sempre as anomalias de altura geopotencial em 500hPa estão exatamente na mesma posição que as anomalias de temperatura potencial.

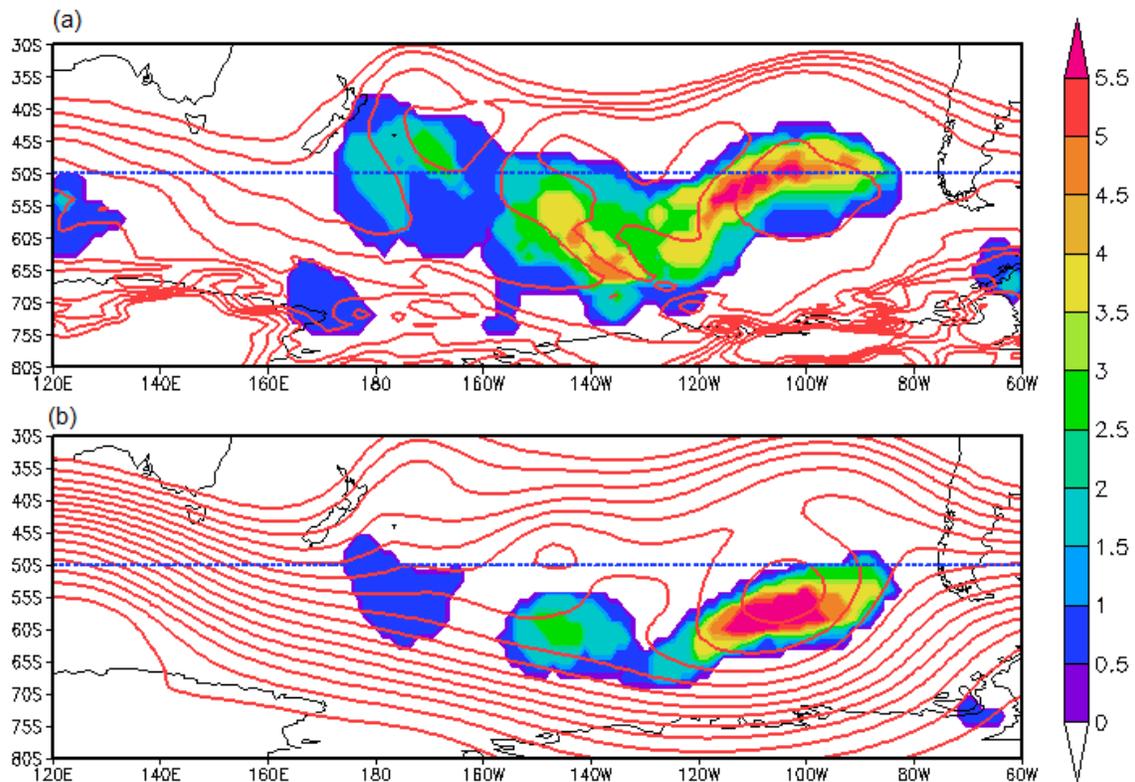


Fig. 3.9 - Bloqueio ocorrido entre 21 e 26 de agosto de 1995, (a) para o índice PV/theta e (b) para o índice clássico, os sombreados representam o número de dias de persistência do bloqueio e os contorno representam a média entre 21 e 26 de agosto de 1995 dos campos de (a) temperatura potencial sobre a tropopausa dinâmica, contornos de 5° e (b) altura geopotencial em 500 hPa, contornos de 50m. A linha azul tracejada representa a latitude de 50°S.

Outro fator que contribui para essa diferença na posição dos bloqueios é a definição do bloqueio de um índice e do outro. Para o índice PV/ θ , um bloqueio basicamente é uma região de intrusão de ar de latitudes mais baixas em latitudes mais altas, assim a região de bloqueio por esse índice é a região onde ocorre reversão do vento zonal. Para o índice baseado na altura geopotencial, a definição de bloqueio é a região de alta pressão ou alta

de bloqueio, sendo assim é razoável esperar que os bloqueios localizados pelo índice PV/θ , situam-se mais equatorialmente que os bloqueios localizados pelo método baseado na altura geopotencial, uma vez que durante um evento de bloqueio ou qualquer outro evento de alta pressão atmosférica a reversão do vento de oeste ocorre ao norte da alta pressão no HS.

CAP. 4 – CLIMATOLOGIA DE BLOQUEIOS PARA O HEMISFÉRIO SUL

No capítulo anterior foi visto que atualmente há uma grande tendência de representar bloqueios não somente sobre uma dada latitude mas sobre todo um hemisfério. Em análises recentes como as mostradas pelo trabalho de Berrisford et al. (2007) que utilizaram os dados ERA40 e o método PV/ θ para identificar bloqueios em todas as latitudes sobre o HS, observaram duas regiões de máximo de frequência de bloqueio, uma a leste da Nova Zelândia em aproximadamente 180°W e outra a oeste da costa da América do Sul em aproximadamente 100°E. No trabalho de Sinclair (1996), que utilizou campos de pressão ao nível do mar e altura geopotencial em 500 hPa para identificar regiões de alta pressão e bloqueios, encontrou três máximos, dois deles localizados a leste e oeste da Nova Zelândia e outro localizado a leste da costa da América do Sul.

Em contra partida trabalhos como o de Oliveira et al. (2013), que usando o índice clássico de detecção de bloqueios, baseado na altura geopotencial em 500 hPa, e calculando o mesmo sobre três latitudes distintas, encontrou somente uma região de máximo de bloqueios, localizada entre 150°E e 240°E, sendo que esse máximo se desloca para leste/oeste, conforme a latitude varia para altas/baixas latitudes.

Trenberth e Mo (1985), usando anomalias de altura geopotencial em 100hPa e em 500hPa acima de determinados limiares para identificar anomalias persistentes de mais de 5 dias de duração em 9 invernos, acharam duas regiões de máximo de bloqueios, uma localizada a leste da Nova Zelândia e outra localizada a sudoeste da América do Sul no Oceano Atlântico.

Wiedenman et al. (2002), usando dados de reanálise NCEP/NCAR em um período de 30 anos e um método de detecção baseado na altura geopotencial em 500hPa sobre a 50°S de latitude, acharam três regiões de máximo, a leste e oeste da Nova Zelândia, as mesmas achadas por Trembreth e Mo (1985) e a terceira, sobre o Pacífico Leste próximo à costa do Chile.

Como exposto nos últimos parágrafos, a maior parte das climatologias feitas para o HS, usam diferentes critérios de identificação de bloqueios e tempos de persistência, assim como também essas climatologias foram construídas com diferentes conjuntos de dados em diferentes períodos, o que torna comparações entre essas climatologias, uma tarefa não muito fácil. Porém os trabalhos de Berrisford et al. (2007) e Sinclair (1996) e Wiedenman et al. (2002), concordam na localização dos eventos de bloqueio, apresentando máximos nas regiões a leste e oeste da Nova Zelândia, e a Oeste da costa do Chile no Pacífico Leste.

Assim com a definição de bloqueios dada no Cap.3, e usando o método de identificação apresentado no fluxograma da fig.3.7, foi construída a climatologia de 26 anos de bloqueios para HS, entre o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2005, usando os dados ERA Interim.

Esse capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 4.1 é apresentada a frequência anual de bloqueios e uma comparação entre a metodologia tradicionalmente usada, baseada na altura geopotencial em 500 hPa e com a metodologia apresentada no cap.3 baseada em θ sobre a tropopausa dinâmica ou -2PVU, na seção 4.2 é apresentada a variabilidade interanual dos eventos de bloqueio e um estudo da persistência média dos eventos, na seção 4.3 é apresentada a variabilidade sazonal dos eventos de bloqueio, na seção 4.4 é feita uma breve discussão dos resultados apresentados e por fim na seção 4.5 é apresentada a conclusão e um sumário do capítulo.

4.1 – Comparação entre os índices PV/ θ e o Baseado na Altura Geopotencial (TM) e a Média Anual da Frequência de Bloqueios.

A fig.4.1 mostra a frequência anual média de longitudes bloqueadas instantâneas (LBIs), calculadas a partir do índice PV/ θ , usando a latitude das “storm tracks” (fig.3.3) e usando uma latitude constante de 50°S, também é mostrada a curva representando a frequência de LBIs calculadas com o índice baseado na altura geopotencial em 500 hPa, referido aqui como TM. Nessa figura estão inclusos muitos eventos de pequena escala e de persistência curta, assim como eventos de grande escala e de persistência longa como bloqueios.

A curva azul escura na fig.4.1 mostra que há duas regiões mais suscetíveis para a ocorrência de bloqueios no HS; uma delas entre 180° e 150°W, no Pacífico Oeste, a outra entre 90°W e 60°W, no Pacífico leste, o que concorda com os resultados encontrados por Berrisford et al. (2006) e Sinclair et al. (1996), que encontraram também essas duas regiões de máximo de frequência de bloqueios no Hemisfério Sul.

Comparando as curvas da fig.4.1, para o caso do índice PV/ θ (curvas azul e azul escuro), nota-se que não há diferenças muito significativas entre a média anual de LBIs calculadas sobre a latitude das “storm tracks” (PV) e a calculada sobre a latitude constante de 50°S (PV50), o que já era esperado, uma vez que a média anual da latitude das “storm tracks”, varia entre 45°S e 55°S, e o método de detecção obtém as LBIs numa faixa de 5° a norte e a sul da latitude central.

Observando as curvas correspondentes ao índice PV/ θ (curvas azul e azul escura) e a correspondente índice TM (curva azul clara) na fig.4.1, podem-se observar grandes discrepâncias em relação à frequência dos eventos. Há uma subestimativa dos valores de frequência calculados com índice TM em relação aos calculados com o índice PV/ θ , onde este efeito já era esperado, uma vez que há mais características de pequena escala em campos mais dinâmicos como a temperatura potencial em -2PVU que no campo de altura geopotencial em 500 hPa e também pelo fato dos campos de altura geopotencial serem mais suavizados, como discutido no capítulo anterior. Outra diferença é observada no pico de frequência que ocorre na região do Pacífico Leste, em aproximadamente 90°W,

observa-se que para o índice TM esse pico tem quase metade do valor do pico principal, no Pacífico Oeste. Para o índice PV/ θ , ambos os picos apresentam a mesma intensidade, o que pode ser um indicativo de que essa região seja mais fortemente influenciada por eventos de pequena escala e curta duração que a outra. Outra diferença é o fato do índice TM apresentar um pico bem pronunciado na região do Atlântico Sul, entre 60°W e 30°W, o que não é visto no índice PV/ θ , embora os valores de frequência ainda sejam maiores no índice PV/ θ que no TM.

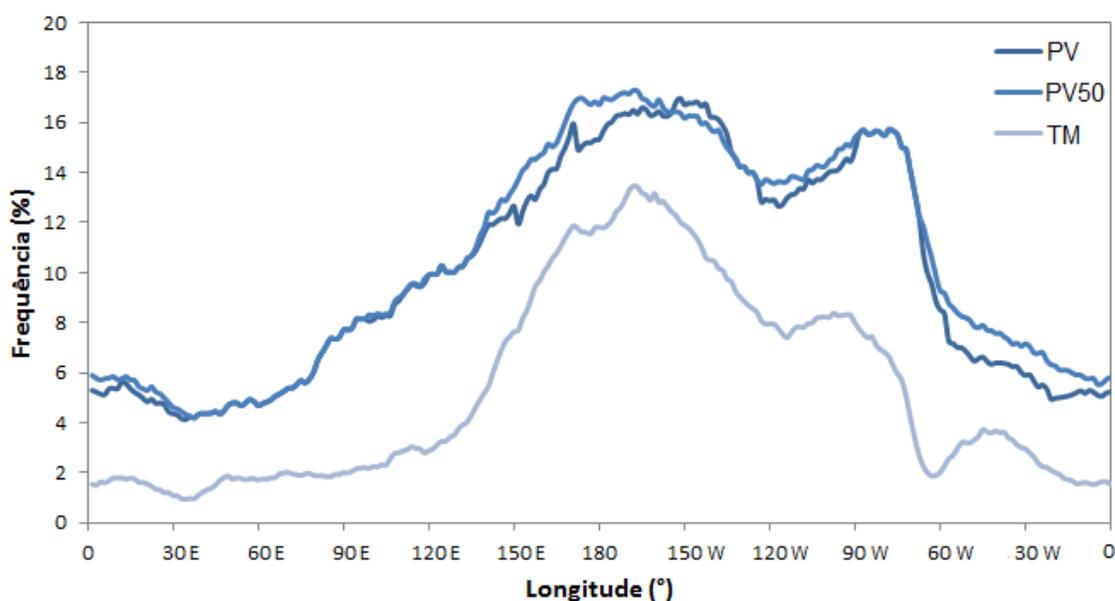


Fig. 4.1 – Média anual da frequência das Longitudes Instantaneamente Bloqueadas (LBIs) contra a longitude, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), a curva azul escuro representa o índice PV/ θ calculado sobre a latitude das "storm tracks", a curva azul representa o mesmo só que calculado sobre a latitude constante de 50°S e a curva azul claro representa o índice baseado na altura geopotencial em 500 hPa calculado sobre a longitude de 50°S.

A fig.4.2, representada as médias anuais das frequências dos eventos de bloqueios calculados a partir do método PV/ θ usando a latitude das "linhas de tempestade" (linha sólida), PV/ θ 50 usando a latitude constante de 50°S (linha cinza) e TM (linha pontilhada usando a latitude constante de 50°S), se observa que diferentemente da fig.4.1, onde

estão representadas as médias anuais de escoamento bloqueado (passo 2 no fluxograma da fig.3.7), para os bloqueios não há superestimativa ou subestimativa tão discrepante por parte de um índice e outro. As regiões de maiores diferenças são as regiões do Pacífico Oeste em aproximadamente 180°, onde ambos os índices mostram um pico. Nesta representação o índice TM superestima a frequência de bloqueios em relação ao PV/θ apresentando valores pouco acima de 6% enquanto o índice PV/θ apresenta valores pouco acima de 5% de frequência e com o pico deslocado para leste, a outra região é a do Pacífico Leste em aproximadamente 90°W, onde somente o índice PV/θ apresenta um pico com aproximadamente 5% de frequência de dias bloqueados, e o índice TM, não mostra um pico bem pronunciado nessas longitudes, ele gera uma região “plana” que vai de 150°W indo até 90°W, decrescendo rapidamente a leste disso.

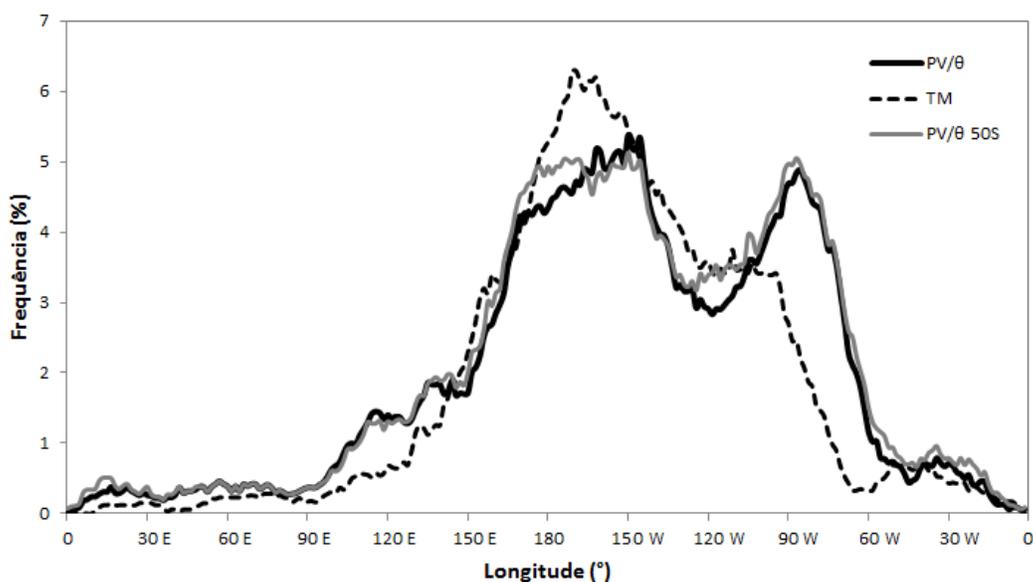


Fig. 4.2 - Média anual dos eventos ou regimes de bloqueios, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), a linha sólida representa os bloqueios calculados pelo método PV/θ sobre as latitudes das linhas de tempestade e a linha pontilhada representa os bloqueios calculados pelo índice TM sobre a latitude constante de 50°S, e a linha cinza representa os bloqueios calculados através do método PV/θ sobre a latitude constante de 50°S.

Sobre o uso da latitude central das linhas de tempestade e da latitude constante de 50°S, comparando as curvas PV/θ e PV/θ 50°S, não se nota grandes diferenças em relação a posição dos picos e valores de frequência de bloqueios.

Comparando os resultados apresentados na fig.4.2 com os resultados do trabalho de Sinclair (1993), que usou um critério baseado na altura geopotencial, é observada grande concordância em relação ao índice PV/θ , onde é apresentado dois picos de atividade de bloqueios. Já para o índice TM, embora use também como critério a altura geopotencial em 500 hPa, não é encontrado os dois picos de frequência.

A fim de investigar melhor essas diferenças, a fig.4.3 mostra a média anual de bloqueios calculada entre as latitudes de 75°S a 30°S, para os índices PV/θ e TM. Considerando somente as regiões de médias latitudes, entre 60°S e 40°S, nota-se que ambos os índices apresentam duas regiões de máximo de atividade de bloqueios, uma no setor do Oceano Pacífico Oeste e outra no setor do Oceano Pacífico Leste, o que não era capturado na média anual em uma dimensão mostrada na fig.4.2 para o índice TM, que é tradicionalmente usado na literatura. Isso pode ser devido ao uso da latitude central constante de $\phi_c = -50^\circ \pm 5^\circ$, que não consegue identificar eventos de bloqueio que ocorram em latitudes mais altas ou mais baixas que essa. Por outro lado o índice PV/θ , por identificar as regiões de reversão do vento e mistura das parcelas de ar, que ocorre quase sempre entre a alta de bloqueio e a região de baixa pressão que se forma no lado equatorial da alta de bloqueio, identifica essa região quando calculado sobre a latitude das linhas de tempestade ou sobre a latitude central constante, como mostrado na fig.4.2, o que torna o índice PV/θ em uma dimensão mais representativo que o índice TM em uma dimensão.

Ainda fazendo as comparações, na fig.4.3 nota-se que o índice TM, captura menos eventos de bloqueios em algumas regiões como na costa sul da Austrália e Nova Zelândia (entre 90°E e 180°E), na costa leste do Chile e Oceano Atlântico (entre 90°W e 30°W). Alguns autores, p.ex., Pelly e Hoskins (2003) sugerem que o índice TM não é eficiente para representar bloqueios do tipo ômega, onde a alta de bloqueio se forma entre dois ciclones

na no lado equatorial, talvez isso explique o fato da não detecção de alguns eventos de bloqueio por parte do índice TM. Por esses motivos, aqui será utilizado o índice PV/ θ para o resto das análises.

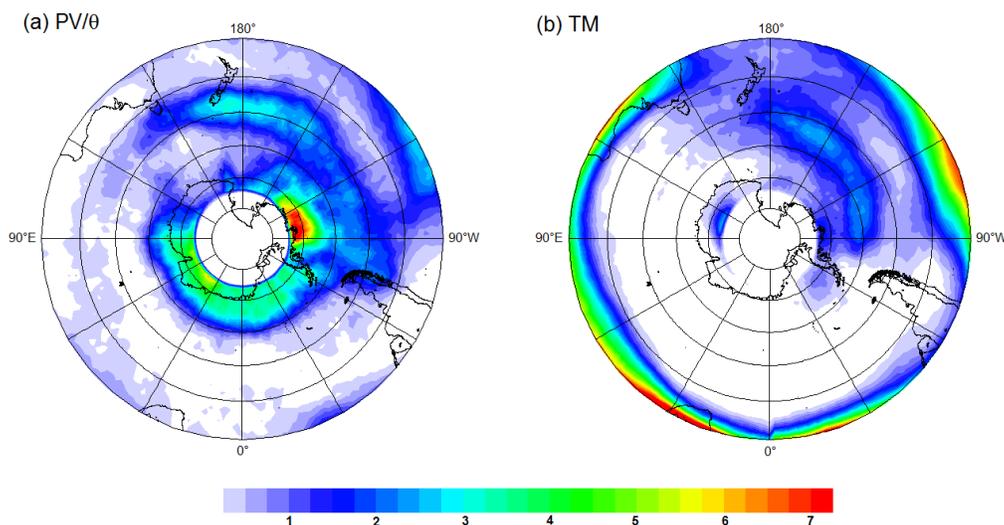


Fig. 4.3 – Média anual dos eventos de bloqueios (em porcentagem de dias bloqueados) para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), para (a) o índice PV/ θ e para (b) o índice TM.

Sobre o índice PV/ θ , há um debate se todas as regiões que ele mostra como bloqueio realmente são bloqueios. Como mostrado por Berrisford (2007), regiões de baixas latitudes ($< 35^{\circ}\text{S}$) que aparecem “bloqueadas”, são assinaturas das altas subtropicais e para as regiões de altas latitudes ($> 85^{\circ}\text{S}$), os valores de temperatura potencial não são considerados muito confiáveis devido ao fato da superfície de -2 PVU “perder altitude” muito rapidamente e o algoritmo interpolar esses valores indefinidos com os valores da temperatura potencial em 96 hPa. Há também o fator do vórtice polar ter uma assinatura muito forte nesse nível de pressão, o que leva o índice a interpretar a mudança de sentido do vórtice na primavera e no verão como bloqueio .

4.2 – Variabilidade Interanual e Persistência dos Eventos de Bloqueio

4.2.1 – Variabilidade Interanual dos Eventos de Bloqueio

A fig.4.4 é mostra o diagrama de Hovmoller da frequência de bloqueios anual de eventos de bloqueios ocorridos sobre a linha de tempestade (“storm tracks”). Se observa que os bloqueios quase em sua totalidade ocorrem nos setores do Pacífico Leste e Oeste e também há grande variabilidade interanual dos eventos de bloqueios, o que faz com que nem sempre os picos de máximo de frequência sigam os padrões da fig.4.2 ou fig.4.3, onde há dois picos, um no Pacífico Leste e outro no Oeste. Também é visto que a frequência de bloqueios não apresenta nenhum ciclo de variabilidade interanual definido.

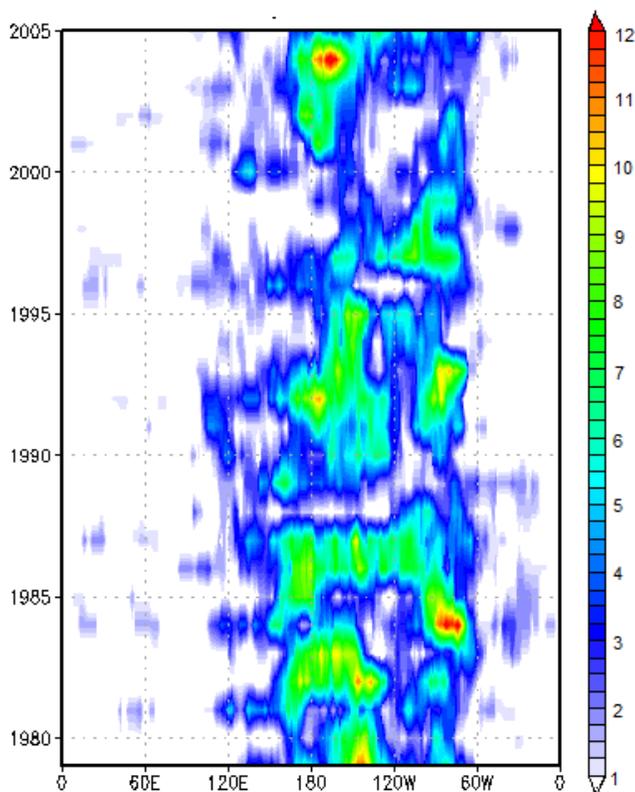


Fig. 4.4 - Diagrama de Hovmoller da média anual da frequência de eventos de bloqueios (%) por ponto de longitude, para o período de 1979 a 2005 (10% de frequência representam aproximadamente 36 dias de bloqueio em um ano).

Alguns autores argumentam que a variabilidade interanual de bloqueios pode ser explicada devido a muitos fatores, como o padrão de variabilidade ENSO (El Niño

Southern Oscillation), que segundo os trabalhos de Oliveira et. al (2013), Marques e Rao (2002), Wiedenman et al. (2002) e Mendes et al. (2005), encontraram que a frequência de bloqueio aumenta em anos de El Niño e diminui em anos de La Niña, e também devido ao padrão da oscilação antártica (SAM – Southern Hemisphere Annular Mode) onde Berrisford et. al (2007) mostraram que os eventos de quebra de onda de Rossby e bloqueios são anticorrelacionados com esse padrão, ou seja durante a fase negativa/positiva da SAM, se espera aumento/diminuição na frequência de bloqueios no HS.

4.2.2 – Persistência dos eventos de Bloqueios

A fim de estudar os eventos de bloqueios em termos de persistência, a fig.4.5 mostra os setores de bloqueios considerados, o primeiro setor representado pelo quadrado azul é o do Oceano Índico, que se estende de 30°E a 120°E, o segundo representado pela cor vermelha é o do Pacífico Leste, que se estende de 120°E a 150°W, o terceiro representado pela cor verde é o setor do Pacífico Leste que se estende de 150°W a 80°W, e por fim a cor laranja representa o setor do Atlântico Sul que vai de 80°W a 30°E.

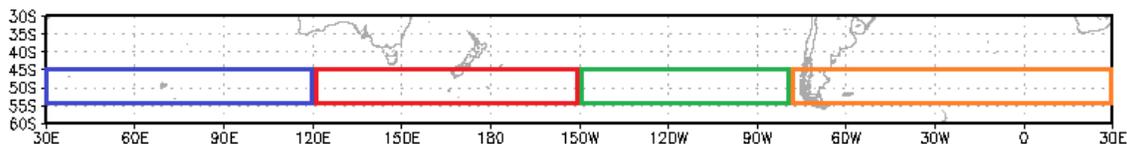


Fig. 4.5 - Setores de bloqueios, o quadrado azul delimita o setor do Oceano Índico que vai de 30°E a 120°E, o vermelho o do Pacífico Oeste que vai de 120°E a 150°W, o verde Pacífico Leste que se estende de 150°E a 80°W e a laranja o do Atlântico que se estende de 80°W a 30°E.

A fig.4.6 mostra a persistência dos eventos de bloqueio pelo número de detecções de longitudes instantaneamente bloqueadas (LIBs), sem levar em conta a sazonalidade. Essa figura inclui eventos de pequena escala e pouco persistentes e também eventos ou regimes de bloqueios, para os setores apresentados na fig.4.5.

A primeira coisa mostrada na fig.4.6 é o decaimento exponencial da persistência dos eventos. Analisando as colunas pretas, observa-se que mais da metade dos eventos de LBIs ocorrem entre 1 e 3 dias, decaindo exponencialmente até 23 dias (foi encontrado um evento de persistência de 23 dias, não mostrado na fig.4.6). Considerando os setores, os eventos mais persistentes ocorrem nos setores Pacífico Leste e Oeste, com persistência de até 15 dias (23 dias no Pacífico Leste), para os setores do Oceano Índico e Atlântico Sul são encontrados valores de persistência de até nove dias.

Tabela 4.1 – Duração média dos episódios de bloqueios para eventos com duração menor que três dias e para eventos com duração maior ou igual a três dias.

Setor	Duração média dos eventos de escoamento bloqueado (< 3dias)	Duração média dos bloqueios (>= 3 dias)
Total	1,41	3,76
Índico	1,30	3,39
Pacífico Oeste	1,44	3,84
Pacífico Leste	1,50	3,87
Atlântico	1,34	3,52

Na tabela 4.1, é mostrada a persistência média dos eventos de bloqueio por setor, nota-se que não há grandes diferenças na persistência média dos eventos de bloqueio nos diferentes setores analisados, sendo os bloqueios ocorridos no Oceano Pacífico Leste os mais persistentes e os do Oceano Índico os menos persistentes. Esses resultados concordam com os resultados de Berrisford et. al. (2007).

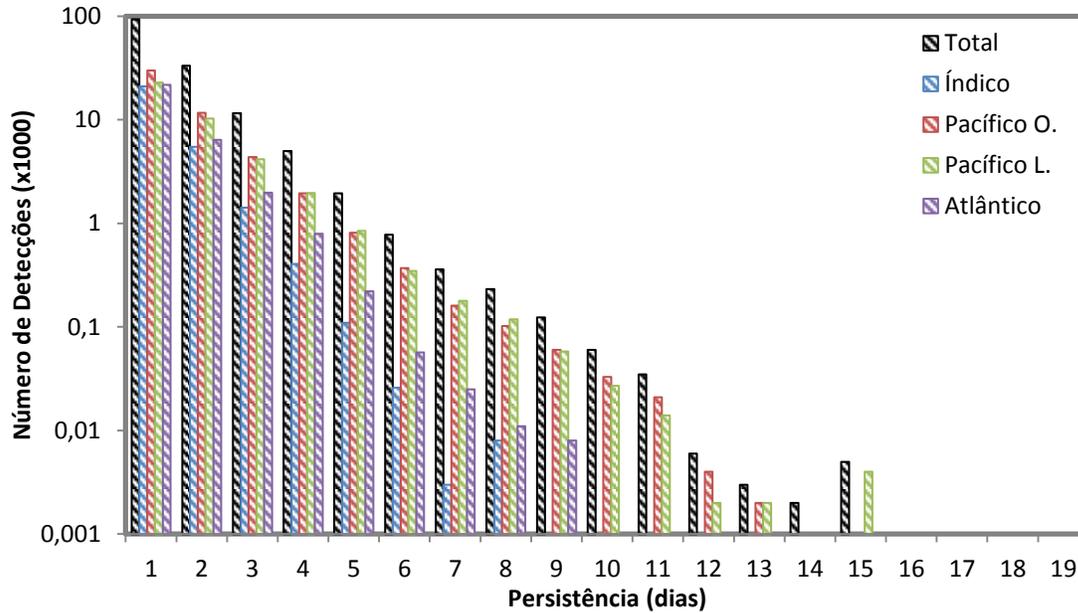


Fig. 4.6 – Persistência de bloqueios por número de eventos, as colunas pretas representam o número total de eventos, a cor azul representa o setor do Oceano Índico, a vinho o setor do Pacífico Oeste, a verde o setor Pacífico Leste, e a roxa o setor do Atlântico Sul, para o período de 1979 a 2005. Os valores de número de detecções estão representados em escala logaritmica decimal.

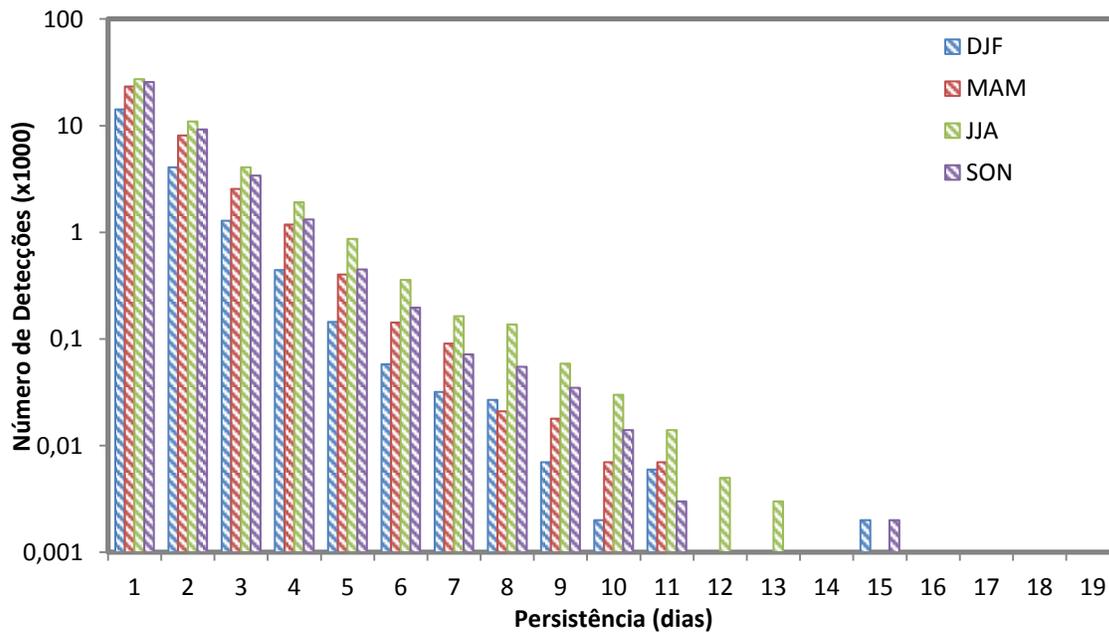


Fig. 4.7– O mesmo que para a fig.4.6, só que para o HS todo e para os meses de DJF (azul), MAM (vinho), JJA (verde) e SON (roxo).

Ainda na fig.4.6 observa-se que o maior número de longitudes bloqueadas ocorre sobre o Oceano Pacífico Oeste, com 7891 detecções em 26 anos de dados, seguida pelo setor do Oceano Pacífico Leste com 7736 detecções, e pelos setores Atlântico e Índico com 3097 e 1984 detecções respectivamente, fornecendo um total de 20267 detecções de longitudes bloqueadas em 26 anos, o que mostra que mais de 50% dos bloqueios que se estabelecem no HS, ocorrem sobre o Oceano Pacífico, o que concorda com os resultados apresentados por Wiedenman et al. (2002), Berrisford et al. (2007), Oliveira et al. (2013), Mendes et al. (2005).

Na fig.4.7 está representada a variabilidade sazonal da persistência dos eventos de bloqueio pelo número de detecções de LIBs, nessa figura estão inclusos eventos de pequena escala e de grande escala. Observa-se que a maior parte dos eventos de bloqueios ocorre nos meses de JJA e SON, o que concorda com as climatologias feitas para o HS.

4.3 – Variabilidade Sazonal dos Eventos de Bloqueio

4.3.1 – Análise da Climatologia de Bloqueios sobre a Latitude das Linhas de Tempestade

A fig.4.8 representa a média anual da frequência de eventos de bloqueios detectados sobre as latitudes da linha de tempestade, entre os anos de 1979 e 2005 para os meses de DJF, MAM, JJA e SON. Pode-se observar que para todos os meses, os bloqueios situam-se quase que em sua totalidade sobre o Oceano Pacífico entre 150°E e 80°W, e também é bem evidente as duas regiões geográficas de máximo de frequência de bloqueios, uma entre 180°W e 150°W, sobre o Oceano Pacífico Oeste e outra entre 120°W e 90°W sobre o Oceano Pacífico Leste, para todos os meses.

Em termos de variabilidade sazonal, a fig.4.3 mostra que a maior frequência de bloqueios ocorre nos meses de inverno (JJA) e primavera austral (SON), decrescendo no verão (DJF) onde ocorre a menor frequência de bloqueios, voltando a aumentar nos meses de outono

austral (MAM). Para o setor do Oceano Atlântico Sul, diferente do mostrado anteriormente, podemos observar que a maior frequência de bloqueios é nos meses da primavera (SON), fugindo do padrão de outras regiões como o Pacífico e o Índico que apresentam o máximo de atividade nos meses de inverno. Os resultados apresentados para o Oceano Atlântico Sul entre 50°W e 0°, concordam com aqueles encontrados por Marques e Rao (2000), que utilizando o índice TM (baseado na altura geopotencial), encontraram maior atividade de bloqueios no mês de setembro para o setor do Atlântico Sul.

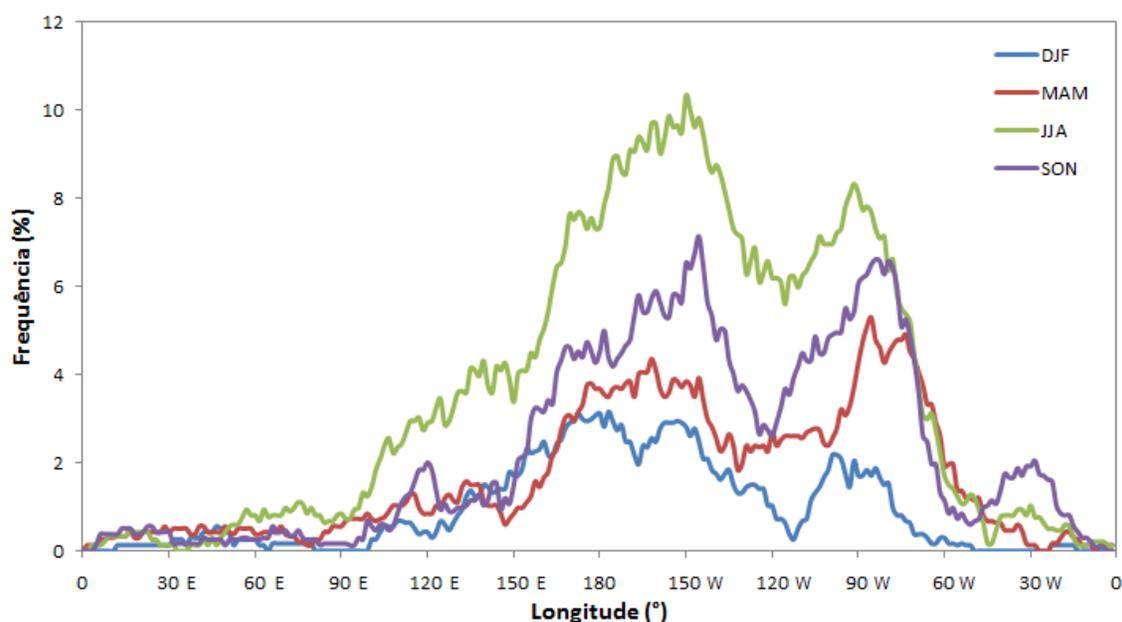


Fig. 4.8- Média anual da frequência de eventos ou regime de bloqueios por ponto de longitude, para 26 anos de dados ERA Interim (1979-2005), para os meses de DJF (curva azul), MAM (curva vinho), JJA (curva verde), SON (curva roxa).

4.3.2 – Análise da Climatologia em Todas as Latitudes

A fig.4.9 representa a media anual da frequência de quebras de ondas de Rossby, ou eventos de bloqueio com duração acima de 3 dias, para os meses de DJF, MAM, JJA e SON entre os anos de 1979 e 2005. Esta figura mostra que a região de máximo de frequência de bloqueios é a região do Pacífico Oeste, próximo à Nova Zelândia, chegando a valores

pouco acima de 10% de frequência. Em termos de variabilidade latitudinal, não são encontradas diferenças significativas na posição dos bloqueios, situando-se entre 40°S e 60°S, exceto para o setor do Oceano Pacífico Leste onde para os meses MAM, os bloqueios ocorrem em latitudes mais altas quando comparado aos meses de JJA e SON.

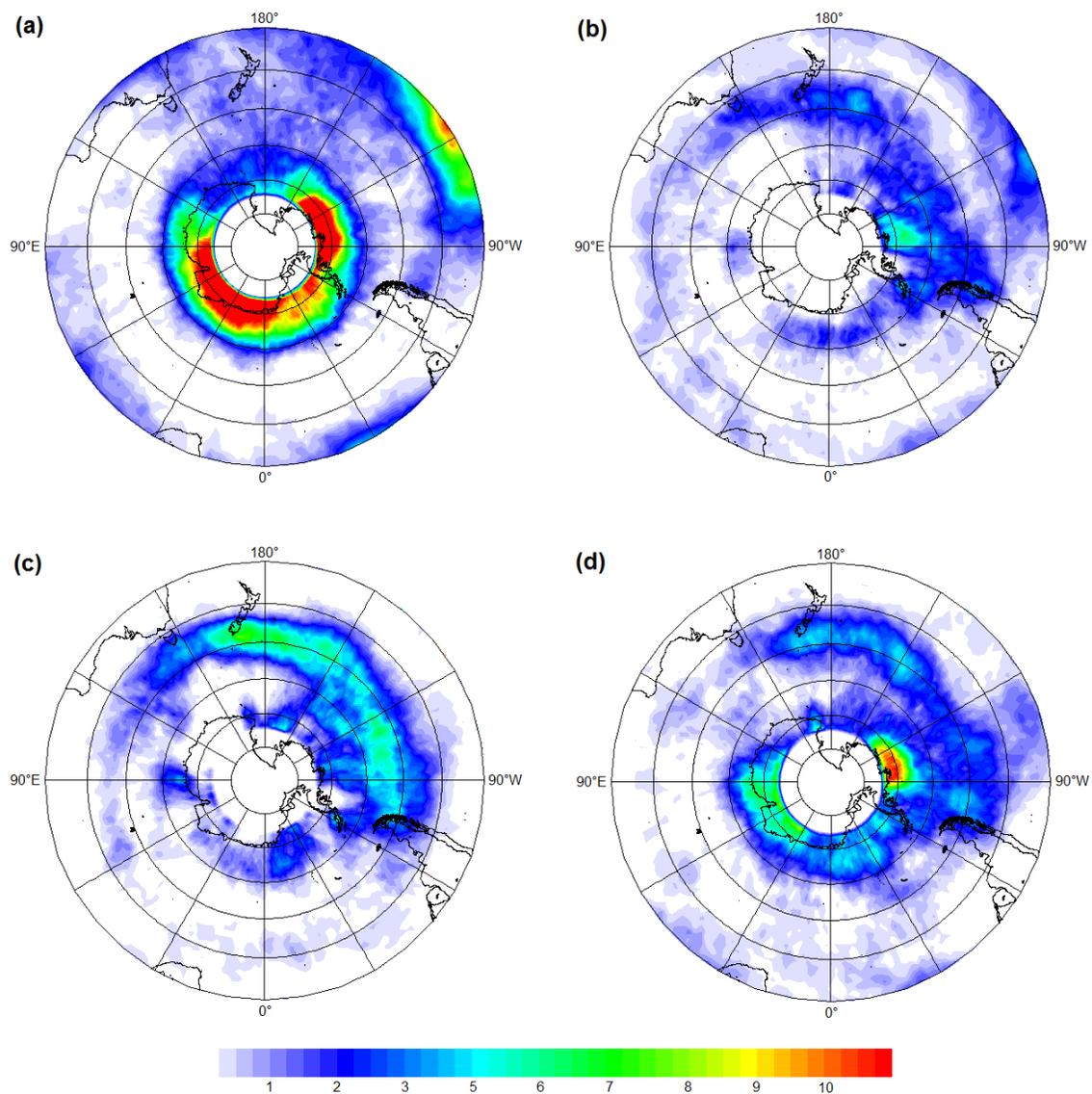


Fig. 4.9- Frequência de eventos de quebra de ondas de Rossby com persistência acima de 3 dias ou eventos de bloqueios 2D, extraído de 26 anos de dados ERA Interim (1979 - 2005), para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

Também se pode observar na fig. 4.9 que para os meses de JJA, os eventos de bloqueios são bem distribuídos nos setores do Oceano Pacífico Leste e Oeste, para os meses de SON e MAM, os eventos de bloqueios são mais localizados no setor do Oceano Pacífico Oeste, entre 180° e 150°W. Os meses de DJF não apresentam valores significativos de frequência de bloqueios, mas em quase sua totalidade ocorrem sobre o Oceano Pacífico Oeste.

Nos setores dos Oceanos Atlântico e Índico, observa-se que no geral os eventos de bloqueio ocorrem um pouco mais a norte (acima dos 50°S) que nas outras regiões, atingindo valores de até 2% de frequência de bloqueio, que não é muito bem representado na climatologia 1D (fig.4.8).

4.4 – Discussão

Segundo van Loon (1964), a região mais favorável para ocorrência de bloqueios é onde os jatos subtropical e polar estão justapostos, e segundo Sinclair (1996), as regiões de desaceleração dos jatos também são favoráveis à ocorrência de eventos de bloqueios. Na fig.3.4, está representada a média anual da magnitude do vento em 300 hPa, nas longitudes entre 120°E e 120°W, no Pacífico Leste, é bem clara a assinatura dos dois jatos justapostos, sendo o jato subtropical mais intenso que o jato polar. Comparando esse resultado com o mostrado na fig.4.8, observam-se claramente, principalmente para as estações de outono, inverno e primavera (fig.4.8b-d), que as áreas de máximo de frequência de bloqueio estão deslocadas um pouco a sul em relação à região de mínimo de magnitude do vento na fig.3.4.

Para a outra região de máximo de bloqueio, aproximadamente em 90°W, no Pacífico Leste, na fig.3.4 observamos que nessa região o jato subtropical desacelera, portanto é uma região de “saída do jato”. Na fig.4.9 para as estações de outono e inverno (fig.4.9b-c), pode se observar que nesse setor as regiões de máximo de bloqueio se encontram um pouco mais a sul, que as regiões de máximo de bloqueio no setor Pacífico Oeste, o que é

coerente com a fig.3.4 onde a desaceleração do jato ocorre mais a sul que a região de mínima magnitude do vento no Pacífico Leste.

Para as regiões dos Oceanos Atlântico e Índico, o jato polar é muito intenso, o que não contribui para o estabelecimento dos eventos de bloqueios. Isso pode ser mais bem observado analisando a fig.3.5 onde está representada a média anual da energia cinética dos turbilhões transientes (EKE), que foi utilizada aqui para representar as linhas de tempestade. Nota-se que tanto na fig.3.5 quanto na fig.3.4 que o jato polar é mais intenso e mais a norte nessas regiões, o que explica o fato dos bloqueios ocorrerem em latitudes mais baixas ou mais próximas ao equador sobre essas longitudes.

No geral para o HS nos meses do inverno austral, os bloqueios ocorrem em latitudes mais baixas, chegando a latitudes mais altas nos meses de DJF, voltando a ocorrer em latitudes mais baixas nos meses seguintes. Essa variação segue a posição do eixo do jato polar ou das linhas de tempestade, que pode ser observada na fig.3.6, onde para maior parte do globo, as linhas de tempestade seguem a mesma variabilidade que os bloqueios. O fato dos bloqueios seguirem a variabilidade latitudinal das linhas de tempestade reforça a teoria do estabelecimento e manutenção dos bloqueios por meio de atividades de sistemas transientes (*“Transient Eddies”*), que mantém os bloqueios por meio de transferência de vorticidade anticiclônica (Marques e Rao, 2002; Trenberth e Mo, 1985; Wallace e Blackmon, 1983).

Para os setores do Oceano Pacífico Leste (costa da Nova Zelândia) e Oceano Atlântico, são observados que diferentemente dos eventos de bloqueios que ocorrem no HN e nos demais setores do HS, os bloqueios ocorrem imediatamente corrente abaixo (*“downstream”*) ou na mesma longitude das porções de terra. Alguns autores como Coughlan (1983) e Austin (1980) sugerem que o mecanismo que dispara os bloqueios nessas regiões possivelmente seja contrastes de temperatura entre a terra e o oceano circundante ou anomalias de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), uma vez que a topografia no HS é bastante reduzida quando comparada à do HN.

4.5 – Conclusão e Sumário

Foi mostrado que para o HS há duas principais regiões propícias para a ocorrência de bloqueios, a região do Oceano Pacífico Oeste (aproximadamente em 180°) e a região do Oceano Pacífico Leste/ costa leste da América do Sul (aproximadamente em 90°W), uma terceira região de máximo também é encontrada no Oceano Atlântico/ costa oeste da América do Sul.

Também é visto que o índice PV/ θ representa melhor os eventos de bloqueios ocorridos no setor do Oceano Pacífico Leste que o índice TM (mais usado na literatura), isso se deve possivelmente ao fato do campo de altura geopotencial em 500 hPa ser mais suavizado que o campo de θ em -2PVU, e também devido o uso da latitude central constante de 50°S por parte do índice TM, que não representa bem a latitude de ocorrência dos bloqueios no setor do Oceano Pacífico Oeste.

Os bloqueios que ocorrem sobre os Oceanos Pacífico Leste e Oeste têm maior tempo de persistência que os que ocorrem nos demais setores e os eventos de bloqueios não apresentam um ciclo de variabilidade interanual definido, mas para a maioria dos anos a climatologia em uma dimensão representa bem a posição dos bloqueios.

Para a variabilidade interanual avaliada sobre a latitude central das linhas de tempestade, se observou que para a maioria dos setores o máximo de atividade de bloqueios, ocorre nos meses de JJA para maior parte dos setores, exceto para o setor do Oceano Atlântico Sul, onde o máximo de atividade de bloqueios ocorre nos meses de SON.

A posição climatológica dos eventos de bloqueios apresentada, concorda com as climatologias de bloqueios em duas dimensões feitas por Berrisford (2007) e Sinclair (1990).

CAP.5 - TENDÊNCIA NO NÚMERO DE BLOQUEIOS NO HEMISFÉRIO SUL

Tendências no número bloqueios sobre determinadas regiões podem implicar em mudanças significativas na circulação atmosférica, devido ao seu tempo de vida e extensão espacial. Portanto, mudanças no número de bloqueios ou em sua posição geográfica de recorrência, pode levar a fortes impactos em algumas variáveis atmosféricas como precipitação e temperatura (Crosci-Maspoli, 2002).

Devido à falta de séries temporais longas e confiáveis, estudos de tendência de bloqueios são raros na literatura e em sua grande maioria feitos para o HN. Entre estes estão os estudos de Crosci-Maspoli (2007), Wiedenmann et al. (2002) e Barnes et al. (2014). Estes três estudos apontam para diminuição no número de bloqueios no HN, porém tais resultados não são estatisticamente significativos.

Para o HS, o estudo feito por Wiedenmann et al. (2002) que utilizou um índice de bloqueios baseado na altura geopotencial e estudou 30 anos de bloqueios sobre o HN e HS. Em seu estudo de tendência de bloqueio achou uma tendência negativa do número de bloqueios sobre quase todo o HS, exceto para a região do Oceano Pacífico, onde foram achadas tendências negativas porém sem significância estatística.

Todos esses trabalhos, exceto o de Crosci-Maspoli et al. (2007), avaliaram a tendência de bloqueios sobre uma única latitude em médias latitudes. Nesse capítulo será estudada a tendência de bloqueios em todas as latitudes a partir da climatologia mostrada no capítulo anterior.

Para o cálculo da tendência foi utilizado o número de bloqueio (eventos acima de 3 dias), onde somente foram contados os dias de estabelecimento (“onset”) de cada evento, não

levando em conta a persistência dos eventos, ou seja, eventos que durem 3 ou 15 dias, ambos são contados como 1 evento de bloqueio.

5.1 – Tendência do Número de Bloqueios em Todas as Latitudes

A fig.5.1 representa a tendência anual do número de bloqueios em 26 anos (1979-2005) de dados ERA Interim. Duas regiões se destacam com tendência negativa e com coeficiente linear de -0.16 (1,6 bloqueios por década), representando uma diminuição de 4 bloqueios nessas regiões em 26 anos de análise, são as regiões ao sul da Nova Zelândia no Oceano Pacífico Oeste e outra localizada em aproximadamente 150°W e 50°S. Para outras áreas como o Oceano Pacífico Oeste, sul da Austrália e Oceano Pacífico Leste entre 120°W e 90°W é observada tendência negativa com coeficiente linear -0.04. Isto representa diminuição de 1 bloqueio em 26 anos. Para as regiões de latitude mais altas sobre o Pacífico Oeste são observadas tendência positiva com coeficiente linear de aproximadamente 0.08, que representa um aumento de 2 eventos de bloqueio em 26 anos. Para outros setores como o Oceano Índico e Pacífico, não são encontrados valores de tendências maiores ou menores que 1 evento de bloqueio em 26 anos.

A fig.5.2 representa a tendência sazonal do número de bloqueios entre 1979-2005 de dados ERA Interim. Observa-se que para os meses de DJF e MAM, não são encontrados valores de tendência significativa, chegando a ± 1 bloqueio em 26 anos. Para os meses de JJA, é encontrado um padrão parecido com o da figura 5.1, onde as regiões do Pacífico Oeste, a leste da Nova Zelândia e a região do Pacífico Central se destacam, apresentando tendência linear negativa de até -2 bloqueios. Para os meses de SON é encontrado no setor do Pacífico Oeste a leste da Nova Zelândia, uma situação contrária à aquela observada nos meses de JJA, uma tendência linear positiva de +1 bloqueio em 26 anos.

Para verificar se há tendência no número de bloqueios ocorrido em todo o hemisfério, a partir da climatologia de bloqueio 1D (calculada sobre a latitude de 50°S) foi construída a fig.5.3. Esta figura mostra uma tendência linear de diminuição do número de bloqueios de

aproximadamente -3 bloqueios por década, que é estatisticamente significativa em 95%. Ainda nessa figura, se observa a variabilidade interanual do número de bloqueios, como na fig.4.4, onde não foi encontrado nenhum padrão regular de variabilidade ao longo dos 26 anos de dados.

A partir dos resultados mostrados na fig.5.3 calculou-se uma média de 20 bloqueios por ano para todo o HS, com desvio padrão de aproximadamente 7,0 bloqueios para os 26 anos de análise.

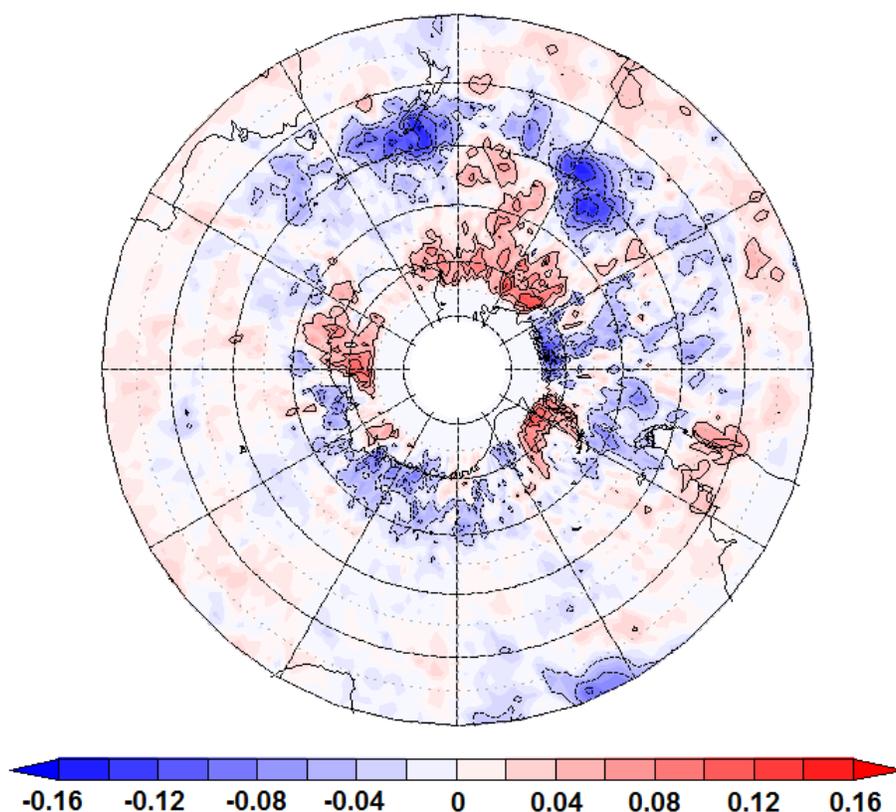


Fig 5.2 – Tendência linear de bloqueios, os valores sombreados representam o coeficiente linear extraída da série de bloqueios, os contornos cheios representam a tendência positiva de bloqueios em número de bloqueios em 26 anos e os contornos pontilhados representam a tendência negativa de bloqueios.

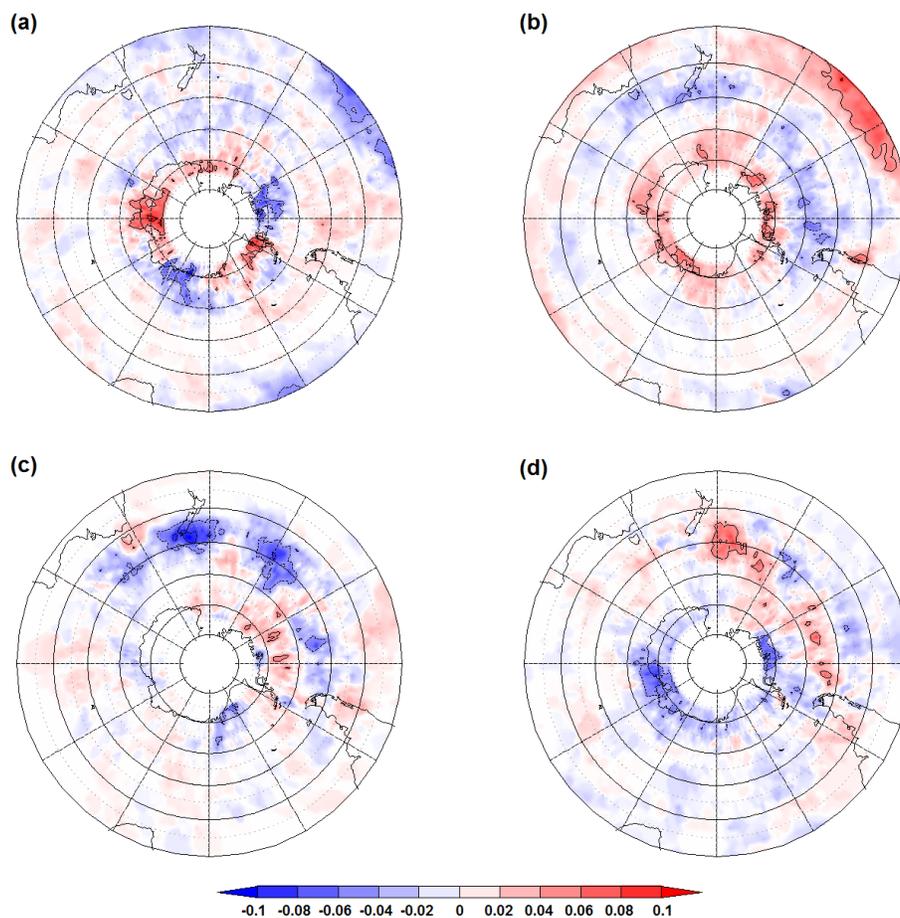


Fig. 5.2 – O mesmo que para a fig.5.1, só que para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON.

5.2 – Discussão e Sumário

No geral, são observadas tendências de decréscimo no número de bloqueios para quase todo o HS, principalmente para a região do Oceano Pacífico em médias latitudes. Para as outras regiões não foram encontrados resultados maiores ou menores que $\pm\frac{1}{2}$ bloqueio por década e para todo o Hemisfério Sul os resultados não apresentaram significância estatística no nível de confiança de 95%.

Os resultados apresentados são coerentes com os mostrados por Wiedenmann et al. (2002) que achou tendências de diminuição de bloqueios para quase todo o HS e os

resultados apresentados na fig.5.3 são coerentes com os mostrados por Marques e Rao (2002) onde foram encontrados os mesmos picos de máximo de frequência de bloqueios.

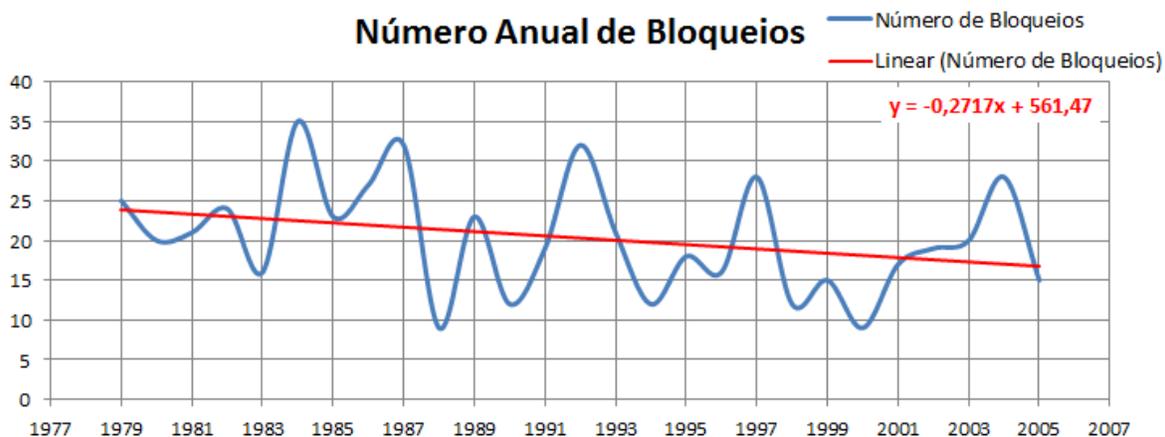


Fig. 5.3 – Número anual de eventos de bloqueios sobre todo o Hemisfério Sul, a curva azul representa o total anual do número de eventos de bloqueios e a reta vermelha representa o ajuste linear ou a linha de tendência, a equação de tendência está apresentada na parte superior a direita do gráfico.

CAP. 6 – RELAÇÃO ENTRE BLOQUEIOS E A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR E PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ROSSBY

Como discutido na introdução, a maioria dos trabalhos voltados ao estudo dos aspectos dinâmicos dos eventos de bloqueios e sua modelagem, concluíram que uma alta de bloqueio somente pode se estabelecer sob a presença de uma forçante térmica ou orográfica. A grande maioria desses trabalhos foi feita para estudar bloqueios que ocorrem no Hemisfério Norte, onde a forçante orográfica é dominante sobre a forçante térmica.

Para o HS, devido a menor quantidade de continente em relação aos oceanos, Coughlan (1982) mostrou que a forçante dominante para os bloqueios no HS é a térmica devido a contrastes terra-oceano e a TSM anômalas. Para alguns autores como Taljaard (1972), os contrastes terra-oceano são fundamentais para partição do jato de oeste em médias latitudes, que é uma das condições para o estabelecimento de uma alta de bloqueio.

Atualmente, alguns trabalhos como o de Ummenhofer et al. (2013), estudando bloqueios que ocorrem no inverno sobre as regiões do mar da Tasmânia e sul da Nova Zelândia através de experimentos numéricos mostraram que algumas configurações de anomalias de temperatura da superfície do continente australiano e TSM favoreciam a maior frequência de bloqueios sobre essas áreas. Outros trabalhos observacionais como os de Oliveira et al. (2013), Marques e Rao (2002), Berrisford et al. (2007), entre outros já citados, mencionam a relação entre bloqueios e o padrão de ENOS.

Nesse capítulo é estudado do ponto de vista observacional a relação entre bloqueios ocorridos em 7 setores localizados sobre o Oceano Pacífico Sul e anomalias de temperatura da superfície do mar, através de técnicas de composições dos dados de temperatura de película e de vento meridional na presença de bloqueios.

6.1 – Análise de Composições

6.1.1 – Parâmetro para a Análise de Composições

No capítulo 4 foi apresentada a climatologia de bloqueios para o HS com eventos de duração maior ou igual a três dias, devido ao fato dos oceanos se aquecerem ou se resfriarem mais lentamente que a atmosfera., Para uma análise de composições com o campo de anomalia de TSM é conveniente usar eventos de bloqueios que tenham uma duração um pouco maior que três dias, para que se possa verificar alguma mudança nos campos de anomalia de TSM . Assim a fig.6.1 apresenta o número de dias bloqueados na presença de bloqueios com duração igual ou superior a cinco dias para a estação de inverno austral (JJA) no período de 1979 – 2005.

Devido à extensão espacial de um bloqueio ser pelo menos 15° de latitude por longitude, como definido no capítulo 3, foram escolhidas 7 regiões ou setores de $15^\circ \times 15^\circ$ de extensão centradas sobre os pontos de máxima frequência de bloqueios mostrados na tabela 6.1 e fig. 6.1, formando quadrados com $\phi \pm 7,5^\circ$ por $\lambda \pm 7,5^\circ$ de latitude por longitude de extensão.

O índice utilizado identifica as regiões de mistura das parcelas de ar provenientes de latitudes mais baixas com as que são provenientes de latitudes mais altas. Assim, dificilmente todo o quadrado que representa o setor estará totalmente preenchido com o índice de bloqueio, e necessariamente nem todos os bloqueios detectados estão centrados ou totalmente compreendidos dentro desses setores. Para resolver esse problema e detectar somente eventos que ocorram dentro ou ocupem maior parte desses setores foram selecionados dias onde pelo menos 30% do setor estivesse preenchido com o índice de bloqueio.

Tabela 6.1 – Localização e número de dias onde pelo menos 30% de um dado setor foram preenchidos pelo índice de bloqueio e em nenhum outro setor foi encontrado bloqueio.

Setor	Latitude(ϕ)	Longitude(λ)	# dias
#1 – SE Austrália	50°S	150°E	24 dias
#2 – Sul Nova Zelândia	50°S	170°E	28 dias
#3 – SE Nova Zelândia	50°S	185°E	35 dias
#4 – Pacífico Central (I)	65°S	135°W	32 dias
#5 – Pacífico Central (II)	45°S	150°W	26 dias
#6 – Pacífico Leste (I)	55°S	115°W'	29 dias
#7 – Pacífico Leste (II)	55°S	95°W	52 dias

6.1.2 –Análise das Composições do Campo de Temperatura de Superfície

Na fig.6.2 estão representadas as composições do campo de anomalia de temperatura de película, que será chamada daqui para frente de TSM sobre os oceanos e temperatura de superfície sobre as porções de terra, para a estação de inverno austral para os 26 anos de análise considerando ausência total de bloqueios e também a presença de bloqueios que ocorreram somente dentro dos setores apresentados na tabela 6.1 e fig.6.1.

Na ausência de bloqueios em todos os setores, não se observa anomalias de TSM intensas, exceto para as regiões de altas latitudes sobre a Antártica, onde os dados de TSM são pouco confiáveis. Assim, analisaremos somente a temperatura para regiões de baixas e médias latitudes.

Na presença de bloqueios apenas no setor 1, sudeste da Austrália (fig.6.2b), pode-se observar que o Oceano ao redor da Austrália apresenta anomalias positiva de TSM, principalmente no oceano adjacente a região da Indonésia, chegando a valores de +1,5°C, enquanto o continente australiano apresenta anomalia negativa de temperatura, atingindo valores de -2,0°C. Também nota-se que o Oceano Pacífico Central em aproximadamente 30°S apresenta anomalia positiva de TSM, com valores próximos a 1.5°C.

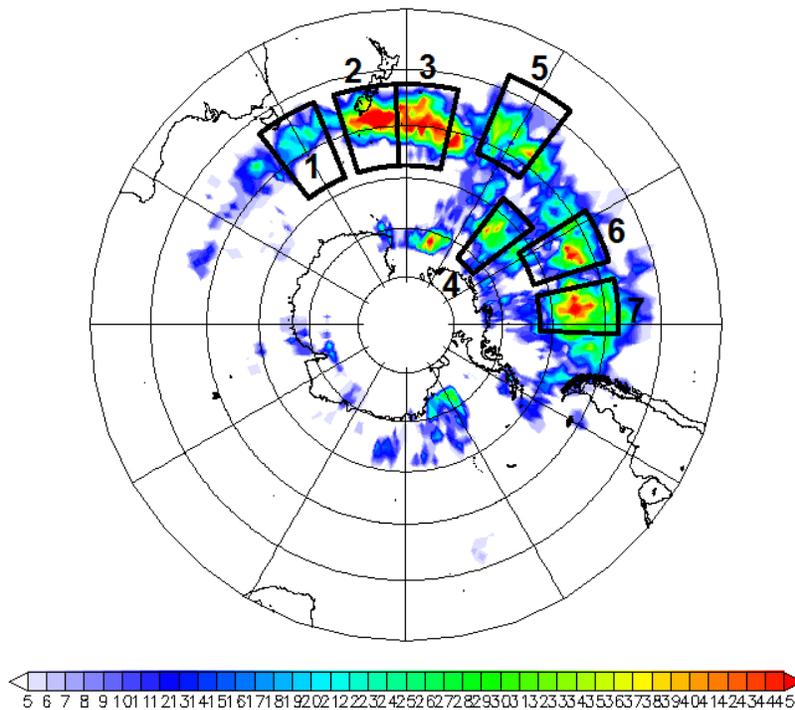


Fig. 6.1 - Número de dias com bloqueios para os meses de JJA no período de 26 anos de análise (1979 – 2005), os quadrados representam as regiões utilizadas como parâmetro para as composições e sua localização está apresentada na tabela 1.

Para os bloqueios que ocorrem somente no setor 2 (fig.6.2c), diferentemente da configuração descrita para o setor 1, observa-se anomalias frias de TSM circundando a Austrália, com valores chegando a -1°C a norte da Austrália e no oceano adjacente a Indonésia observa-se anomalias positivas de TSM, embora não muito intensas com valores de cerca de $0,5^{\circ}\text{C}$. Para o continente Australiano, na parte ocidental observam-se anomalias somente positivas de aproximadamente $+1^{\circ}\text{C}$ e na parte oriental do observa-se anomalias negativas de aproximadamente -2°C , e também observa-se anomalias frias de TSM para quase toda a região do Oceano Pacífico Central e Oceano Índico, acima da linha do equador.

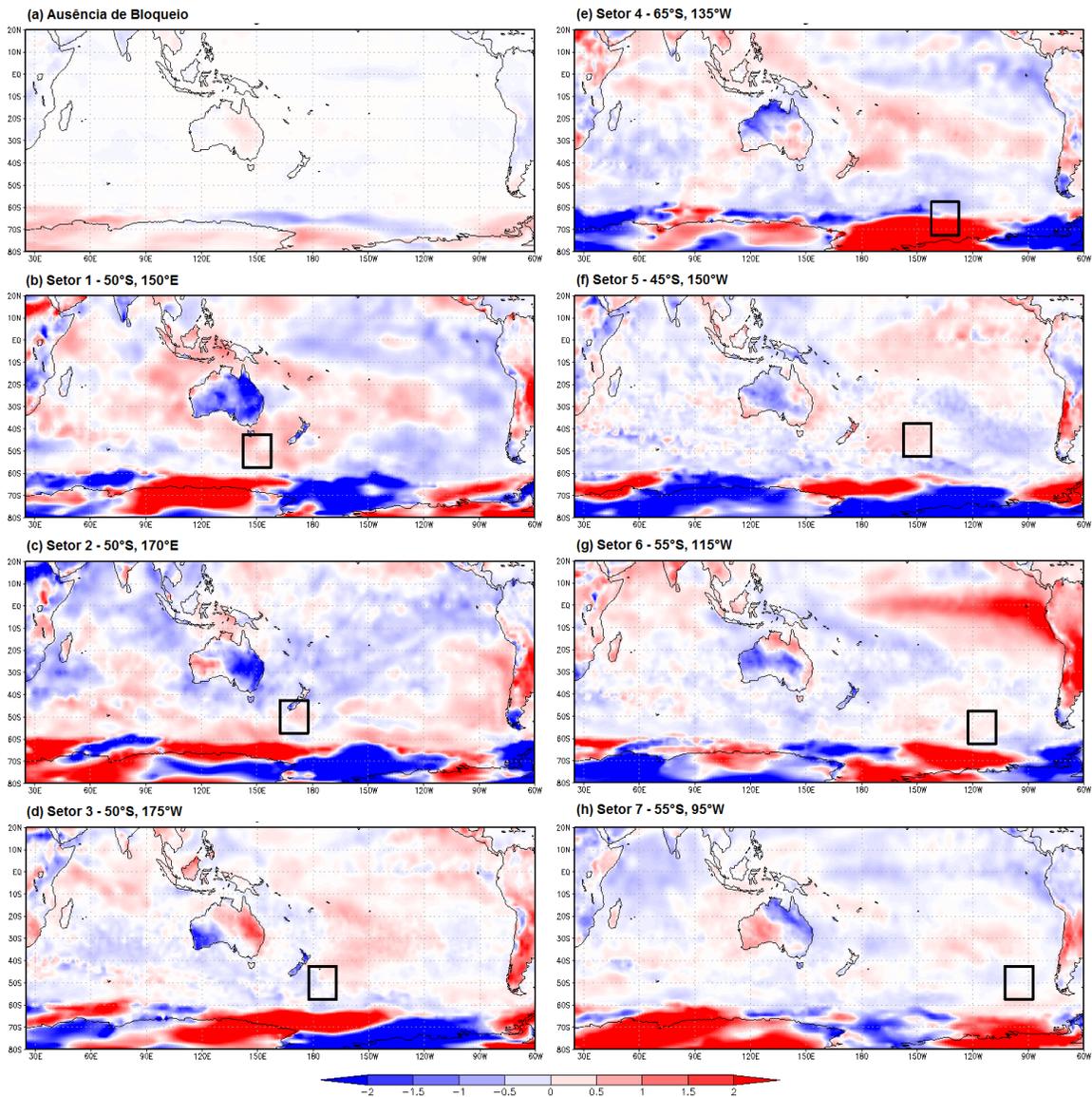


Fig. 6.2 – Composições do campo de anomalia de temperatura de película para os meses de JJA em 26 anos (1979 – 2005) extraídas dos dados ERA-Interim, para (a) ausência de bloqueio em todos os setores, (b) presença de bloqueios somente no setor 1, (c) setor 2, (d) setor 3, (e) setor 4, (f) setor 5, (g) setor 6, (h) setor 7, os quadrados pretos mostram a área correspondente a seus respectivos setores, centrados nas coordenadas apresentadas no cabeçalho das figuras.

Para o setor 3, sudoeste da Nova Zelândia (fig.6.2d), sobre o oceano não são observadas grandes anomalias intensas de TSM tanto no Pacífico quanto no Índico, com valores em geral entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $+0,5^{\circ}\text{C}$. Sobre a Austrália é observada uma situação oposta à aquela para os bloqueios do setor 2, onde na porção nordeste do continente são encontradas

anomalias positivas de temperatura chegando a $+1,5^{\circ}\text{C}$ e na porção sudoeste do continente são encontradas anomalias negativas de temperatura de superfície, com valores chegando aos -2°C .

Para o setor 4 (fig.6.2e), Pacífico central I, são observadas anomalias de TSM positivas em toda costa sul da Ásia, em uma região que se estende do mar da Arábia, passando pelo mar da Indonésia, indo até o Pacífico Central e Leste entre as latitudes de 30°S e 20°S , tendo anomalias entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ e $+1,0^{\circ}\text{C}$. Sobre a região da Austrália, na porção norte do continente é observado anomalias frias, chegando a $-1,5^{\circ}\text{C}$, e na porção sudeste do continente são observadas fracas anomalias positivas de temperatura com valores de aproximadamente $+0,5^{\circ}\text{C}$. No Pacífico e Índico, ao sul de 30°S , são observadas anomalias frias de temperaturas de aproximadamente $-0,5^{\circ}\text{C}$, com exceção de uma “faixa” de anomalias positivas de temperatura em torno de 90°E se estendendo até o continente asiático que apresenta valores entre $+0,5^{\circ}\text{C}$ e $+1,0^{\circ}\text{C}$.

No setor 5, Pacífico Central II (fig.6.2f), não são encontradas anomalias de TSM significativas. Sobre o Pacífico central, a oeste do setor em questão é observado anomalias positivas de TSM a leste com valores de $+0,5^{\circ}\text{C}$. A norte e a sul desse setor são observadas anomalias negativas de TSM com valores de $-0,5^{\circ}\text{C}$. Sobre o Oceano Índico, não são observados valores significativos de anomalia de TSM. Sobre a Austrália são observadas anomalias negativas de temperatura de superfície menos intensas que para os outros setores, com valores entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ e $-1,0^{\circ}\text{C}$.

Para o sexto setor, Pacífico Leste I (fig.6.2g), o que mais chama a atenção é a região do Pacífico equatorial, central e leste apresentando anomalias positivas bastante intensas. Para o restante do Oceano Pacífico e Oceano Índico não são observados anomalias intensas de TSM, exceto no mar da Arábia e anomalias quentes de temperatura de superfície sobre a Índia com anomalias positivas entre $1,0^{\circ}\text{C}$ e $1,5^{\circ}\text{C}$ de TSM e de temperatura de superfície também. Para a Austrália, são observadas anomalias negativas de temperatura de superfície entre $-1,0^{\circ}$ e $-1,5^{\circ}\text{C}$, e na costa norte e leste do continente são observadas anomalias positivas de temperatura de superfície, de $+1,0^{\circ}\text{C}$.

Por fim, para o setor 7, Pacífico Leste II (fig.6.2h), não são observadas anomalias significativas de TSM sobre o Oceano Pacífico. Sobre o Oceano Índico, ao norte de 30°S são observadas fracas anomalias de TSM, com valores próximos a -1,0°C. Sobre o continente Australiano, é observada uma situação contrária à apresentada para o setor 3, onde na porção nordeste do continente se observa anomalias negativas e na porção sudoeste existe anomalias positivas de TSM, com valores de -1,5°C e +1,5°C respectivamente.

6.1.3 – Análise de Composições de Campos de Vento Meridional

Pela teoria de ondas estacionárias, sabe-se que eventos de bloqueios são consequência da amplificação e/ou interferência de ondas de escalas planetárias ou ondas de Rossby (Egger, 1979). A fim de estudar o deslocamento dessas ondas, nas figs. 6.3 – 6.6 representam as composições ou compostos do campo de anomalia de vento meridional para os casos de bloqueios ocorridos nos setores mostrados na fig.6.1 e tab. 6.1.

Na fig.6.3 estão representados os campos de anomalia de vento meridional durante os eventos de bloqueio para os setores 1 e 2, 3 dias antes do estabelecimento da alta, durante e 3 dias depois do decaimento dos bloqueios. Para o primeiro setor, 3 dias antes do estabelecimento da alta de bloqueio, pode se observar que em aproximadamente 120°E, no escoamento acima (“*upstream*”) do setor, o trem de ondas guiado pelo jato de oeste se divide, dando origem a dois trens de ondas, que marca a divisão do jato de oeste em polar e subtropical. Pode-se observar que o comprimento do trem de ondas referente ao jato subtropical é menor que o do jato polar e durante o bloqueio é observado o deslocamento do padrão e a amplificação dos dois trens de onda, aumentando a sua amplitude e comprimento de onda na região do setor. Três dias após o decaimento do bloqueio, é observada uma amplificação do trem de onda devido ao jato polar no escoamento abaixo (“*downstream*”), em aproximadamente 120°W, e os trens de onda aparentemente entram em fase.

Para o segundo setor, três dias antes do estabelecimento do bloqueio nota-se a separação dos trens de onda aproximadamente na mesma localização do setor anterior, onde os

trens de ondas devido ao jato polar e subtropical situa-se mais a sul e entram em fase no escoamento abaixo do setor em aproximadamente 120°W. Durante o evento de bloqueio, similarmente ao encontrado na análise anterior observa-se amplificação dos trens de onda, porém não há deslocamento do padrão nas áreas adjacente ao setor. Três dias após o decaimento, é observado um deslocamento do padrão e escoamento abaixo do bloqueio e os trens de onda tendem a entrar em fase.

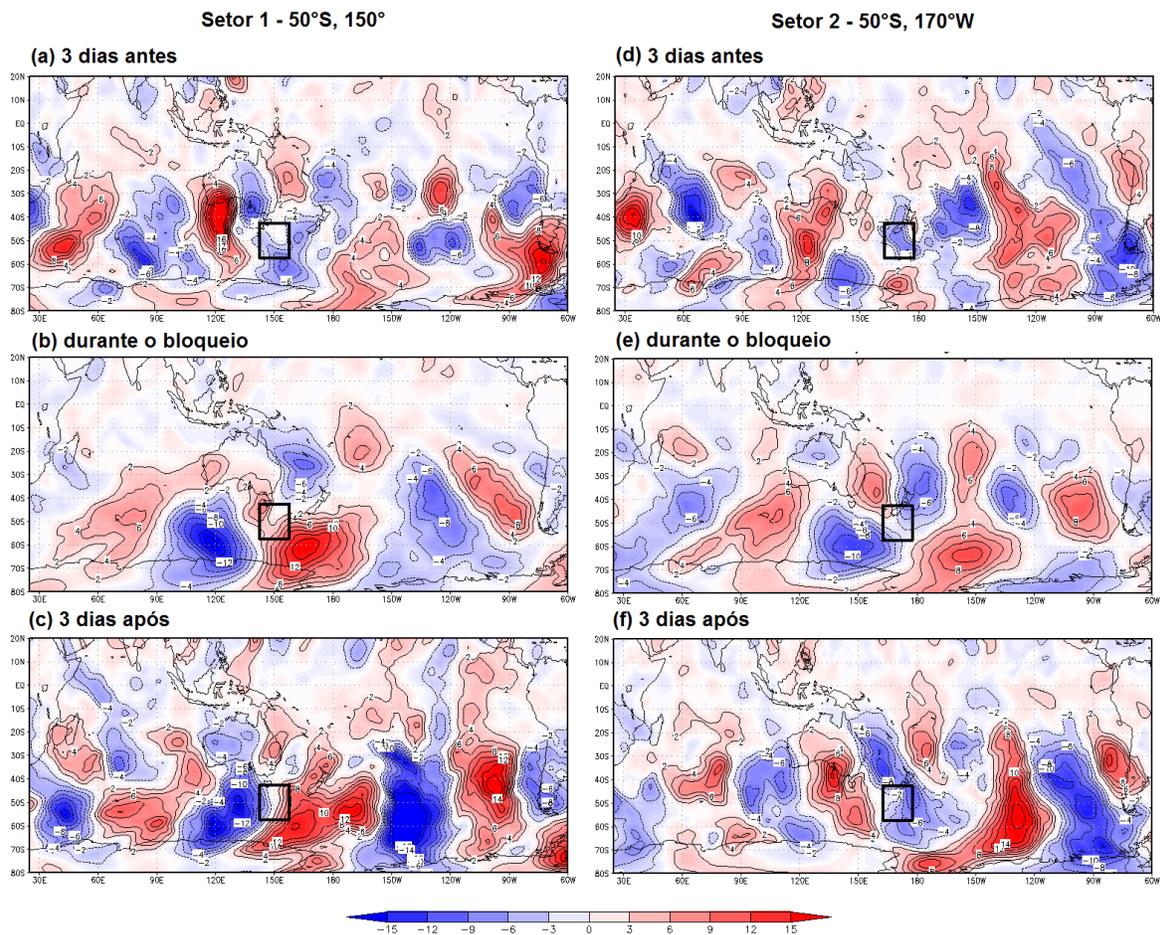


Fig. 6.3 – Composições do campo de anomalia de vento meridional para os meses de JJA entre 1979 – 2005, extraída dos dados ERA Interim para os bloqueios ocorridos somente no setor 1 para (a) 3 dias antes do estabelecimento, (b) durante o bloqueio, (c) 3 dias após o decaimento dos bloqueios, e para os bloqueios ocorridos somente no setor 2 para (c) 3 dias antes do estabelecimento, (d) durante o bloqueio e (e) 3 dias após seu decaimento.

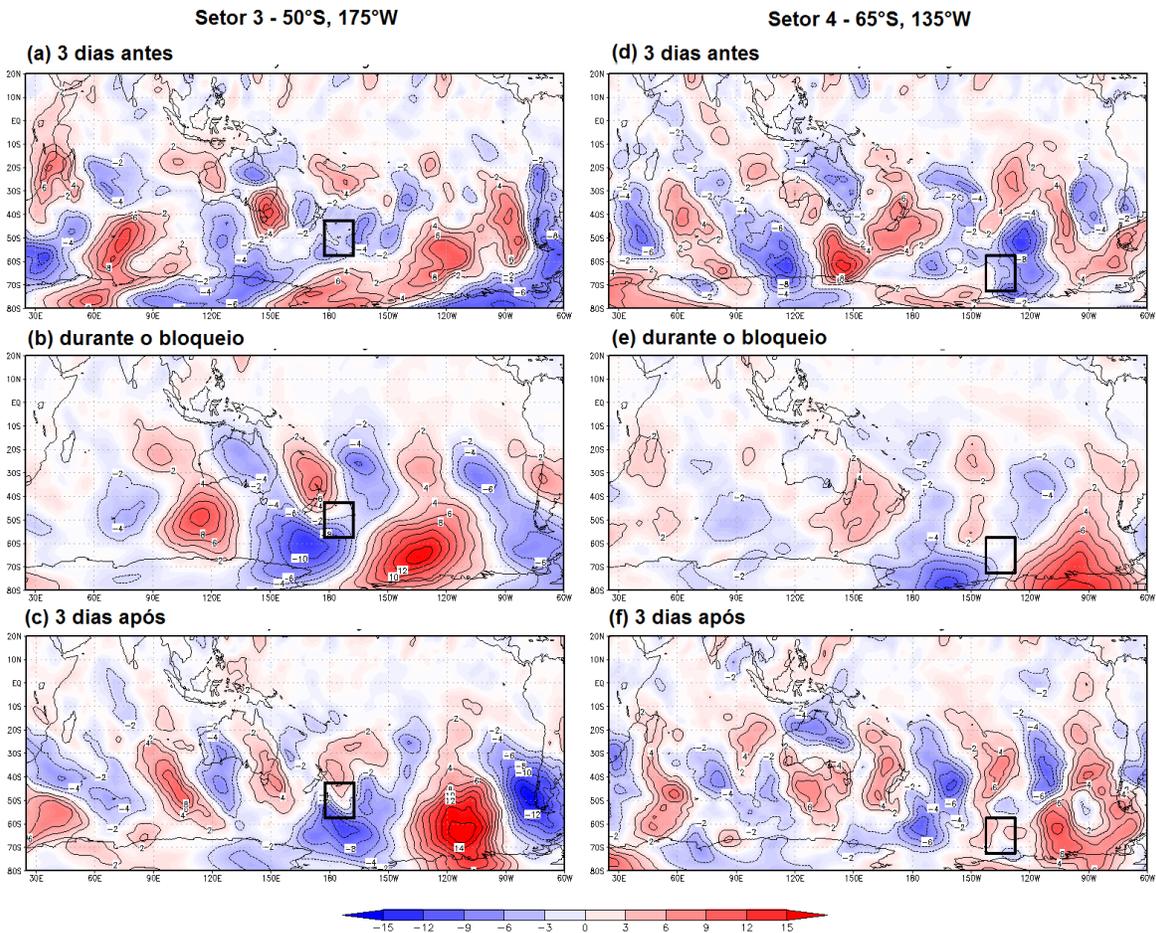


Fig. 6.4 - O mesmo que para a fig.6.3, mas para os setores 3 e 4.

Na fig.6.4 estão apresentadas as composições de anomalia de vento meridional para os setores 3 e 4. Para o setor 3, três dias antes do estabelecimento e durante a ocorrência dos bloqueios é observado um padrão muito semelhante ao apresentado para o setor 2, embora um pouco mais deslocado para leste (aproximadamente uns 15°). Três dias após o decaimento do bloqueio, nota-se que o padrão se deslocou um pouco mais para leste e também se observa a amplificação dos trens de onda escoamento abaixo e sua tendência de entrarem em fase.

Para o setor 4, durante o bloqueio, não é observada ação direta dos trens de onda devido aos jatos de oeste, que podem ser identificados nas figuras referentes a 3 dias antes do estabelecimento e 3 dias após o decaimento. Este resultado sugere que os bloqueios que

ocorrem nesse setor sofrem menos influência da circulação de médias latitudes e mais influência da circulação polar de inverno. Também se observa que antes, durante e após os bloqueios, o padrão de circulação em médias latitudes mantém uma configuração muito parecida, mas na presença do bloqueio, as anomalias enfraquecem e voltam a se intensificar após o decaimento do mesmo, o sugerindo que durante o bloqueio o padrão de circulação esteja mais zonal do que três dias antes/após o estabelecimento/decaimento do mesmo.

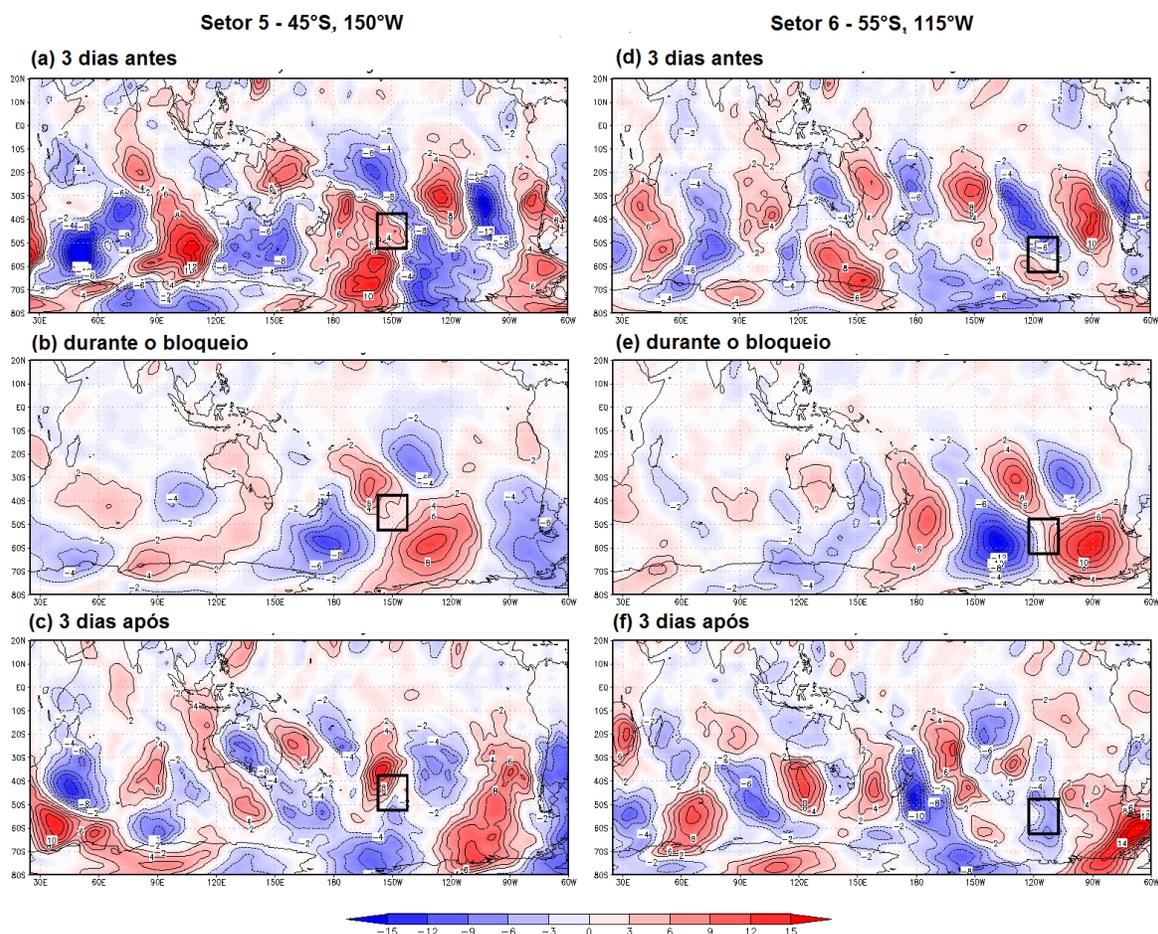


Fig. 6.5 – O mesmo que para a fig.6.3, mas para os setores 5 e 6.

A fig.6.5 mostra as anomalias de vento meridional para 3 dias antes, durante e após o estabelecimento/decaimento do bloqueio para os setores 5 e 6. Para o setor 5, três dias antes do estabelecimento, se observa a presença de dois trens de onda devido aos jatos subtropical e polar, também se nota, escoamento acima do setor em aproximadamente 180°W , a partição do trem de onda devido ao jato polar em duas partes, que aparentemente interfere com o trem de ondas do jato subtropical, se unindo a ele. Durante o bloqueio, nota-se o deslocamento do padrão e também, fica mais clara a partição do escoamento de oeste ou do jato em aproximadamente 180°W , 30°S mais a leste que o observado para os outros setores anteriormente analisados. Similarmente ao observado para os outros setores, é clara a amplificação dos trens de onda e a defasagem de um em relação ao outro, e para três dias após o decaimento, se observa o deslocamento para leste do trem de ondas devido ao jato polar, entrando em fase com o trem de ondas do jato subtropical em aproximadamente 90°W , próximo da América do Sul.

Para o setor 6 (fig.6.5 d-f), três dias antes do estabelecimento do bloqueio, pode-se identificar a presença de um trem de ondas que se divide aproximadamente em 110°E . Durante os bloqueios, é observado deslocamento dos padrões de anomalia para leste, e diferentemente dos outros casos onde a divisão dos trens de onda permanecia na mesma posição, para este setor durante o bloqueio, a partição se dá em aproximadamente 150°W , 60°S , mais a leste que três dias antes, ocorrendo também defasagem e amplificação nos trens de onda. Para três dias após o decaimento é observado deslocamento para leste dos trens de onda e sua divisão, devido aos jatos de oeste, é em aproximadamente 180°W , mais para oeste que durante o bloqueio.

Para o sétimo setor, representado na fig.6.6, pode-se observar para três dias antes do estabelecimento da alta a presença dos dois trens de onda e a divisão deles em aproximadamente 120°E . Durante os eventos de bloqueios, a partição dos trens de onda sobre a Austrália não é muito aparente, mas em 120°W há uma indicação de que o trem de ondas proveniente do jato polar se divide nessa região, configurando um padrão similar aos bloqueios encontrados nos outros setores. Para três dias após o decaimento

do bloqueio, há o deslocamento do padrão anterior e a divisão dos trens de onda não é muito aparente.

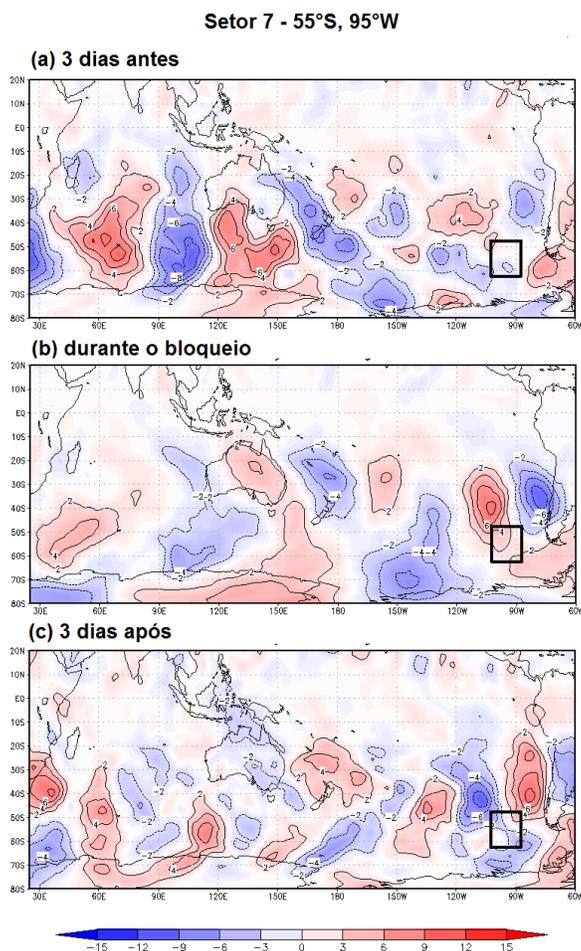


Fig. 6.6 - O mesmo que para a fig.6.3 mas para o setor 7.

6.2 - Discussão

Bloqueios atmosféricos estão intimamente ligados à partição do jato de oeste (Trenberth e Mo 1985). Segundo Taljaard (1972), a existência da partição do jato de oeste sobre a região da Austrália-Nova Zelândia, assim como sua intensidade e posição, é determinada pelo resfriamento do continente australiano relativo à TSM a sul do continente. Tais anomalias de temperatura aumentam a baroclinicidade da região, fazendo com que o

gradiente meridional de temperatura se desloque para uma posição mais equatorial que a climatológica, fazendo com que o jato de oeste se divida.

Essa hipótese feita por Taljaard (1972) e Tremberth Mo (1985), dá suporte aos resultados mostrados na fig.6.2 b-d, onde são analisados bloqueios que ocorrem a sudoeste da Austrália (mar da Tasmânia) e a sul da Nova Zelândia, onde o continente australiano apresenta anomalias de temperatura negativa e anomalias de SST circundante positiva.

Para investigar melhor esses resultados a fig.6.7 mostra as composições do campo de velocidade de vento zonal e linha de corrente na ausência e presença de bloqueios ocorridos somente nos setores delimitados pelos quadrados desenhados em cada figura.

Na fig.6.7 pode se observar que conforme a posição dos bloqueios varia de oeste para leste, a posição da bifurcação do jato varia junto com a bifurcação dos bloqueios, exceto para os setores 6 e 7, que são mais afastados da Austrália. Nesses setores, a bifurcação do jato ocorre sobre o continente Australiano, próximo de 120°E. Analisando esta figura em conjunto com as figs. 6.2g-h, assim como para os setores 1, 2 e 3, é observado um contraste de temperatura de superfície dentro do próprio continente Australiano porém, sobre o oceano, não são vistas anomalias intensas de TSM.

Para os dois últimos casos, setores 6 e 7, são observados que os dois trens de onda devido aos jatos polar e subtropical estão aproximadamente 180° fora de fase corrente abaixo da amplificação de uma crista localizada em 180°W na região da Nova Zelândia, que não chega a formar um bloqueio. Tais efeitos são mais evidentes nas figs 6.5e e 6.6b, onde se pode notar a separação dos trens de onda, que pode ser visto através das anomalias de vento meridional, onde nas longitudes delimitadas pelos respectivos setores, encontramos padrões de anomalias positivas/negativas de vento meridional a norte/sul a oeste do setor e padrões de anomalias contrários a leste do setor, o que denota que os trens de onda estão aproximadamente 180° fora de fase.

Para o setor 4 foi encontrado anomalias negativas de temperaturas na porção norte do continente Australiano, anomalias negativas pouco intensas de temperatura na porção

sul, e a respectiva situação inversa na TSM circundante, tanto para a porção norte como para a porção sul. No setor 5 não são encontradas anomalias significativas de TSM e nem de temperatura de superfície (no continente), sem grandes contrastes entre terra-oceano. Para ambos os casos, a bifurcação do jato se dá mais a leste que nos demais casos.

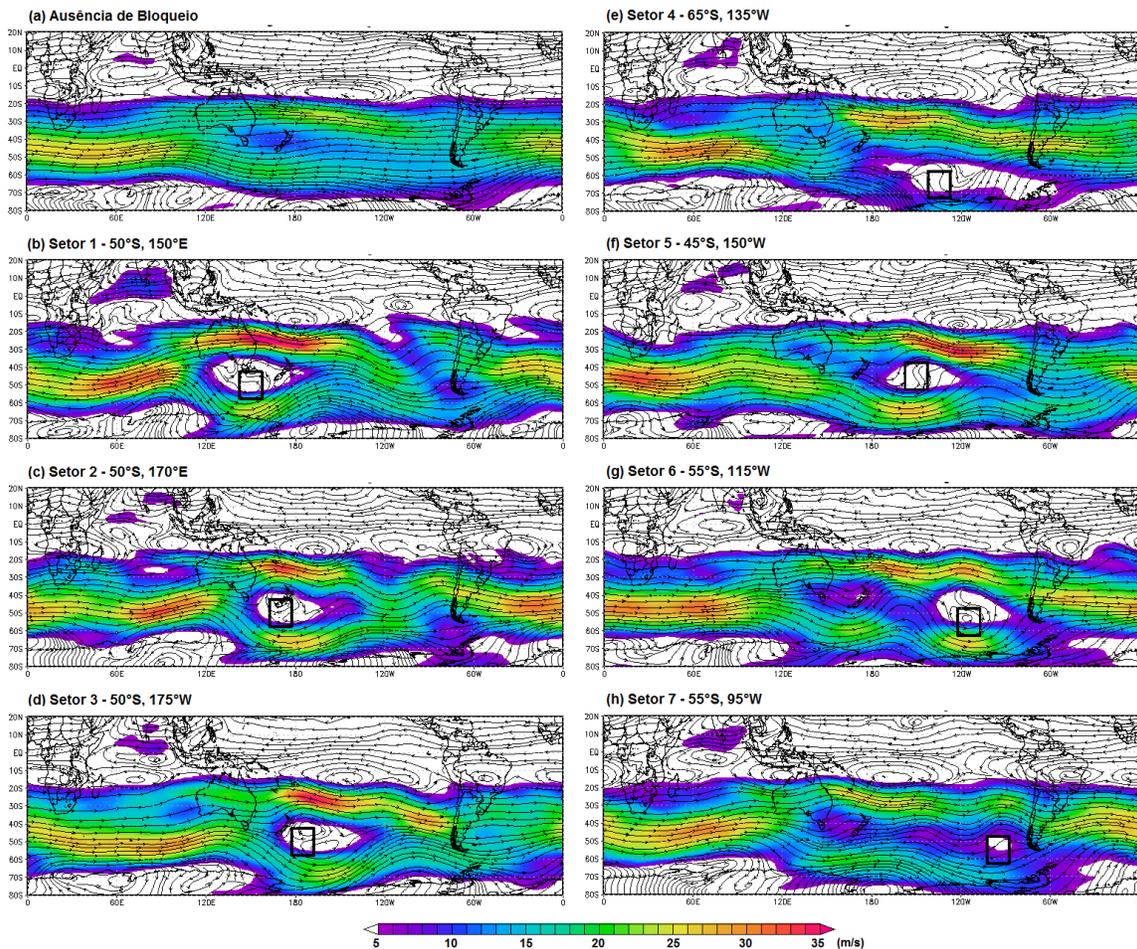


Fig. 6.7 – Composições do campo de velocidade do vento zonal (sombreado) e linhas de corrente para os meses de JJA para o período de 1979 – 2005 de análise de dados ERA-Interim, (a) para a ausência de bloqueios em todos os setores, (b) presença de bloqueios somente no setor 1, (c) setor 2, (d) setor 3, (e) setor 4, (f) setor 5, (g) setor 6, (h) setor 7, os quadrados pretos mostram a área correspondente a seus respectivos setores, centrados nas coordenadas apresentadas no cabeçalho das figuras.

6.3 – Conclusão e Sumário

Foram apresentadas composições de anomalias de TSM na presença de bloqueios em determinados setores (fig.6.2). As regiões mais importantes onde foram notadas anomalias de temperatura são as regiões do Oceano Índico, continente Australiano, Mar da Tasmânia, oceano a Norte da Austrália (região da Indonésia) e Oceano Pacífico Equatorial, sendo que essas mesmas regiões foram encontradas no estudo de Umennhoffer et al. (2013), que estudou somente bloqueios ocorridos nos setores 1 e 2.

Foi verificada também a validade da teoria das ondas estacionárias nos vários setores estudados para a formação de um evento de bloqueio através das análises de composições de vento meridional, vento zonal e linhas de corrente. Esta análise mostrou que para o estabelecimento de altas de bloqueios é necessário à presença de dois trens de onda que entrem fora de fase em aproximadamente 180° na região de formação do bloqueio, o que concorda com o estudo feito por Egger (1982).

Também foi mostrado que para os bloqueios que ocorrem nas regiões dos Oceanos Pacífico Oeste e Central (setores 1 - 5) que conforme os bloqueios vão ocorrendo mais a leste do continente Australiano, mais a leste se dá a partição do jato de oeste. E para os bloqueios que ocorrem na região do Pacífico Leste (setores 6 e 7), foi mostrado que a partição do jato ocorre aproximadamente em 120°E , com o campo de linha de corrente apresentando um padrão de crista no oceano entre a Austrália e Nova Zelândia, porém não formando um bloqueio, devido a fase dos dois trens de onda, que somente entram 180° fora de fase a leste de 120°W formando um padrão de bloqueio.

CAP.7 – VALIDAÇÃO DO MODELO MRI-CGCM3

Um modelo acoplado de circulação geral da atmosfera (CGCM – Coupled Global Circulation Model) deveria ser capaz de reproduzir as características médias do clima e sua variabilidade. Para o estudo de certos fenômenos da atmosfera, algumas variáveis são mais efetivas que outras, e alguns padrões de variabilidade têm maior influência que outros. Para o caso dos eventos de bloqueios sabe se que padrões de variabilidade como El Niño/Oscilação Sul têm forte influência na frequência anual de bloqueios (Oliveira et al 2013, Berrisford et al 2007, Wiendenmann et al. 2002, Marques e Rao 2000) e variáveis como a altura geopotencial ou temperatura potencial na tropopausa dinâmica, podem ser mais efetivas para representar eventos de bloqueios do que outras variáveis meteorológicas.

Yukimoto et al. (2012), que em seu trabalho de validação do modelo MRI-CGCM3 (Meteorological Research Intsitute - Coupled Global Climatological Model version 3) com várias reanálises mostraram que este modelo representa padrões de variabilidade como El Niño e SAM razoavelmente bem. Considerando variáveis como a TSM e temperatura de superfície o modelo apresenta um viés hemisférico, com as temperaturas do HS apresentando um viés frio e as do HN tendo um viés quente (ver apêndice A2).

Aqui, será feita a validação do modelo MRI –CGCM3 (Meteorological Research Intsitute- Coupled Global Climatological Model version 3) com a reanálise ERA-Interim (European Reanalysis ECMWF), comparando o clima simulado em 26 anos (1979-2005) pelo modelo com os dados de reanálise e utilizando alguns campos relevantes ao estudo de bloqueios

como a altura geopotencial em 500 hPa, intensidade do vento e energia cinética transiente.

7.1 – Médias Climatológicas

7.1.1 – Posição dos Jatos e Circulação Atmosférica em Médias Latitudes

A fim de analisar a circulação do modelo em médias latitudes, a fig.7.1 mostra a altura geopotencial em 500 hPa para os dados de reanálise e para o experimento numérico (definido aqui como histórico) e também o viés em relação à reanálise, com isso podemos ver algumas características do escoamento como, por exemplo, sua ondulação.

Comparando as figuras relativas às reanálises e ao experimento histórico para todas as estações pode-se notar que no geral, o modelo tende a suavizar a ondulação (cristas e cavados) apresentada na reanálise. Para DJF (fig.7.1 a-b) nota-se que as cristas localizadas a leste da Nova Zelândia e América do Sul não são bem representadas pelo modelo. Para MAM (fig.7.1 d-f) se observa que a crista localizada entre 180°W e 120°W está deslocada para leste e mais amplificada no experimento histórico que na reanálise. Para JJA (fig.7.1 h-i), há sobre o Oceano Pacífico um padrão de ondulação semelhante aos dados de reanálise, porém de uma forma muito suavizada e para SON (fig.7.1 k-l) é observado que o experimento histórico não representa bem a crista entre a Nova Zelândia e Austrália, apresentando um cavado nessa região e deslocando a crista para leste, ocorrendo o mesmo com a crista localizada na costa oeste da América do Sul no Pacífico Leste.

Em relação ao viés (fig.7.1 c,g,j e m), para o HS em geral se nota que o modelo superestima a altura geopotencial , principalmente em latitudes mais altas. Em médias latitudes algumas regiões de viés negativo também são observadas, principalmente a leste da Nova Zelândia para os meses de DJF, MAM e JJA. Para os meses de JJA há um viés negativo se estendendo desde o sudeste da Nova Zelândia até o sul da América do Sul, ou seja, apresenta cristas e cavados mais profundos.

A fig.7.2 mostra o vento médio quadrático ou intensidade média do vento para os 26 anos (1979-2005) da reanálise ERA Interim e para o experimento histórico do MRI-CGCM3.

Comparando os dois mapas observa-se que, em média o modelo representa bem os jatos para o HS, assim como a região de bifurcação em aproximadamente 120°E. Na região de saída do jato em aproximadamente 120°W, percebe-se que o modelo subestima a desaceleração do jato nessa região.

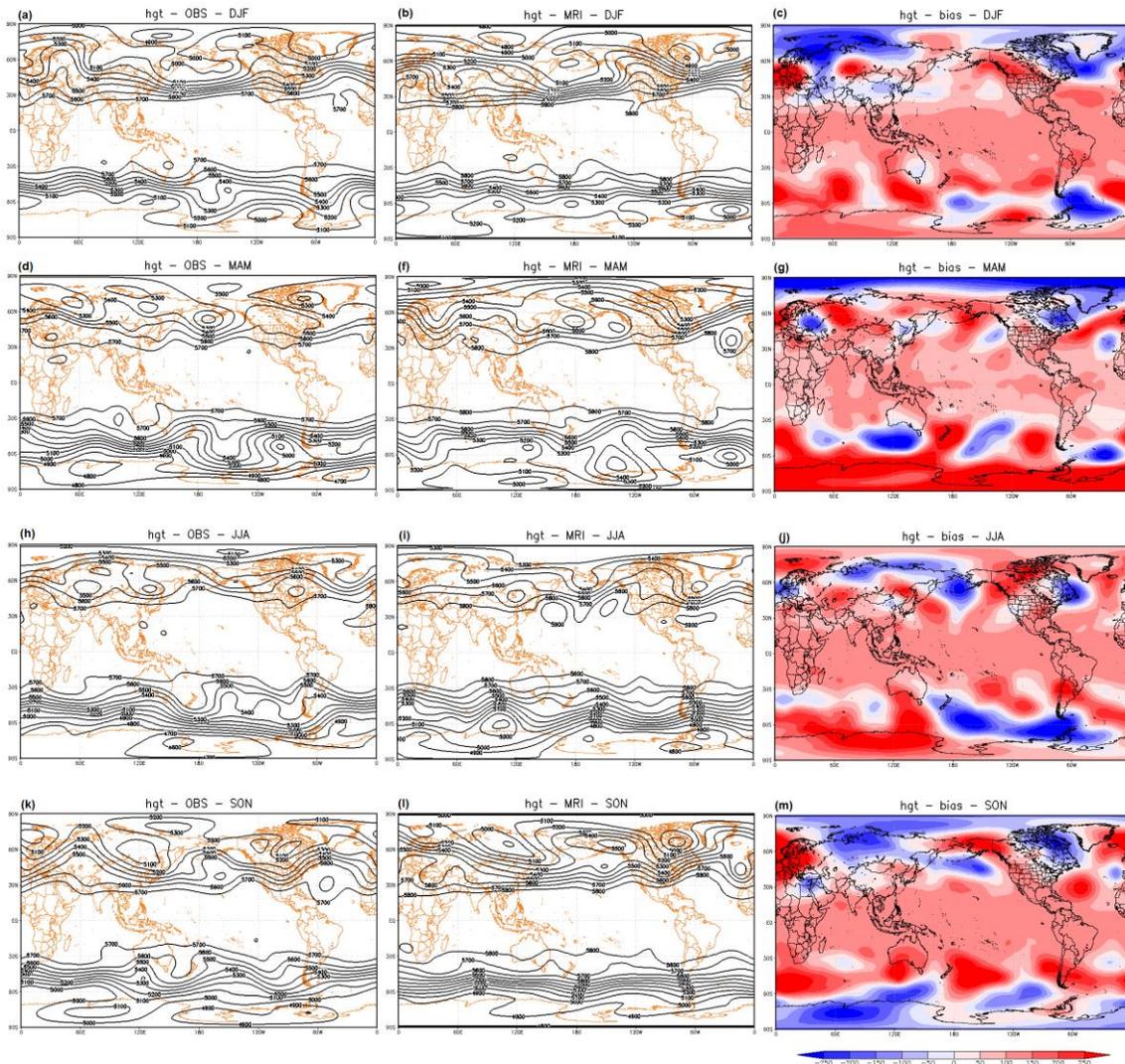


Fig. 7.1 – Média sazonal climatológica para 26 anos (1979-2005) do campo de altura geopotencial em 500 hPa para os dados (a,d,h,k) ERA Interim e para (b,f,i,l) o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e (c,g,j,m) o viés do experimento histórico para os meses de DJF, MAM, JJA, SON, respectivamente.

Não são observadas grandes diferenças na intensidade do jato polar, mas no jato subtropical, que ocorre ao norte da Nova Zelândia, observa-se que seu núcleo no modelo é superestimado e um pouco deslocado para leste em relação à reanálise.

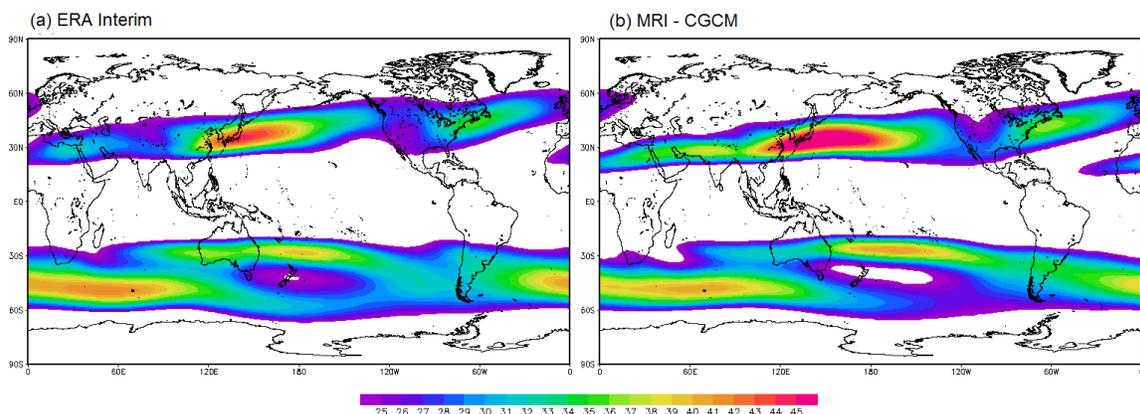


Fig. 7.2 - Média climatológica de 26 anos (1979 - 2005) da intensidade do vento (em m^2/s^2) em 250hPa extraído dos dados (a) ERA - Interim e (b) do período histórico do modelo MRI - CGCM3

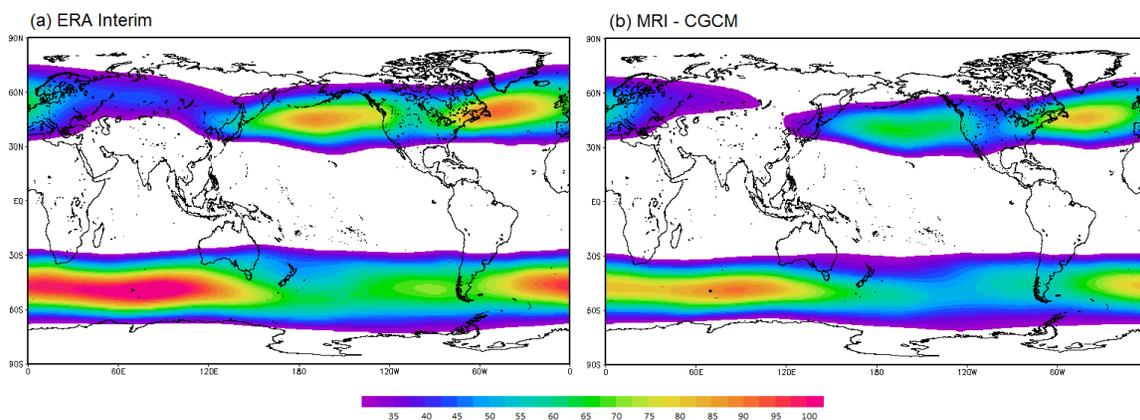


Fig. 7.3 - Média anual da energia cinética dos turbilhões transiente (m^2s^{-2}) em 250 hPa, calculado de 26 anos de dados (a) ERA Interim (1979-2005) e (b) do período histórico do modelo MRI - CGCM3. Ambos os dados foram espectralmente suavizados e truncados em T21.

7.1.3 - Linhas de Tempestade e Latitude Central

Eventos de bloqueios são fortemente influenciados por atividade transiente, como discutido no cap.3. A fim de verificar a atividade transiente, a fig.7.3 apresenta a média anual de 26 anos (1979-2005) da energia cinética dos turbilhões transientes (“EKE -

Transient Eddy Kinetic Energy”). Comparando os dados de reanálise com o experimento histórico, não se percebe grandes diferenças entre os campos em termos de posição dos máximos ou das linhas de tempestade, mas há grande diferença na intensidade da EKE, que é subestimada no experimento histórico, ou seja, há uma menor atividade transiente.

Para avaliar a posição das linhas de tempestade, a fig.7.4 mostra o eixo das linhas de tempestade, médias sazonais e anuais, para os dados ERA Interim e para o experimento histórico do modelo MRI CGCM3.

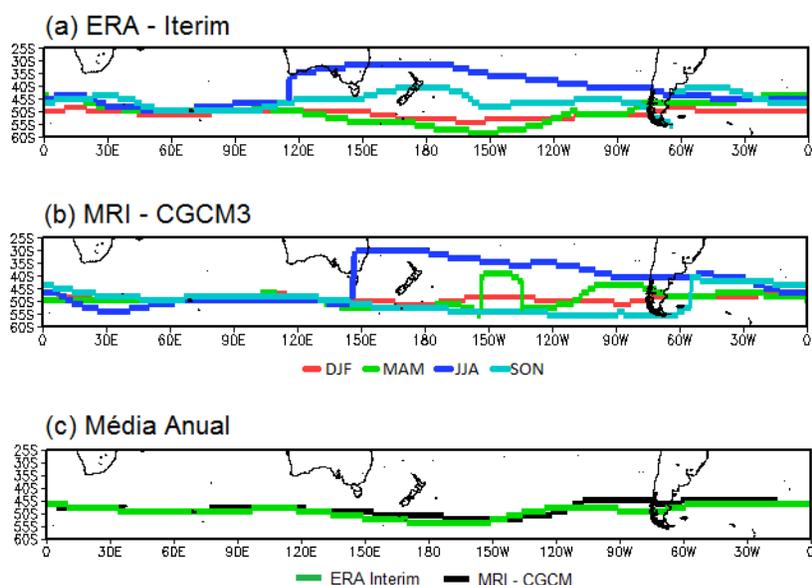


Fig. 7.4 - Latitude central dos eventos de bloqueios, calculada a partir do máximo meridional da TEKE (fig.6.4) em 250 hPa obtido de 26 anos do experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3 (1979 – 2005),(a) Era Interim, (b) MRI-CGCM3 e (c) Média anual. A curva vermelha representa a latitude central para os meses de DJF, a verde para MAM, a azul para JJA, a azul claro para SON. Em (c) a curva preta representa a média anual da latitude central do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e a verde da reanálise ERA Interim.

Comparando as figs 7.4a e 7.4b, nota-se que grandes diferenças são encontradas na região do Oceano Pacífico. Para os meses de MAM, as maiores diferenças ocorrem sobre Oceano Pacífico, onde nota-se dois “saltos” nas linhas de tempestade simuladas pelo

modelo, uma para norte em 150°W, e outra em 90°W, que não estão presentes nos dados ERA Interim. Para os meses de JJA (curva azul escuro) é visto que o “salto” da linha de tempestade no modelo ocorre 30° a leste em relação aos dados ERA Interim sobre a Austrália. Também nota-se que sobre a região do Oceano Pacífico e Atlântico a linha de tempestade do MRI-CGCM3 se encontra mais a norte que na reanálise. Para os meses de SON (curva azul claro) é observado que o modelo simula as linhas de tempestade mais a sul em relação aos dados ERA Interim, principalmente na região do Pacífico e, na região do Oceano Atlântico, é observado um “salto” para norte na linha de tempestade simulada, em aproximadamente 60°W. Para os meses de DJF, não são encontradas grandes diferenças, embora seja observado que sobre o Oceano Pacífico o MRI-CGCM3 posiciona as linhas de tempestade mais a norte, tendo uma boa representação no restante do globo em relação aos dados ERA Interim.

7.2 – Bloqueios no Experimento Histórico

7.2.1 – Eventos de bloqueios sobre 50°S

A curva azul na fig.7.5a representa a média anual de 1979-2005 da frequência de bloqueios calculada sobre a latitude central de 50°S com os dados ERA Interim e a curva vinho representa a frequência de bloqueios extraída dos dados do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3. É observado que o MRI-CGCM3 apresenta somente um pico de atividade de bloqueio, sobre o Oceano Pacífico Leste, entre 150°W e 120°W, com frequência de 5% de dias bloqueados, enquanto a reanálise ERA Interim apresenta dois picos de atividade, com intensidade igual. Também nota-se que para os Oceanos Pacífico Oeste e Índico, a frequência de bloqueios é subestimada pelo MRI-CGCM3 e para o Oceano Atlântico Sul, a frequência de bloqueios é superestimada, chegando a apresentar um pico de atividades entre 0° e 30°E, que não é tão pronunciado nos dados ERA Interim. Para a comparação entre as médias sazonais, foram encontrados padrões espaciais parecidos com os descritos para as médias anuais, as figuras das médias sazonais estão no apêndice A1.

A fig.7.5b mostra a média sazonal da frequência de bloqueios para 26 anos (1979-2005) de dados do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3. Observa-se que o ciclo anual de atividade de bloqueios é bem representado pelo MRI-CGCM3, aumentando a atividade em DJF a JJA onde apresenta o máximo de atividade, voltando a diminuir em SON a DJF, similar à fig.3.7, onde é apresentada as médias sazonais dos bloqueios calculados a partir dos dados ERA Interim.

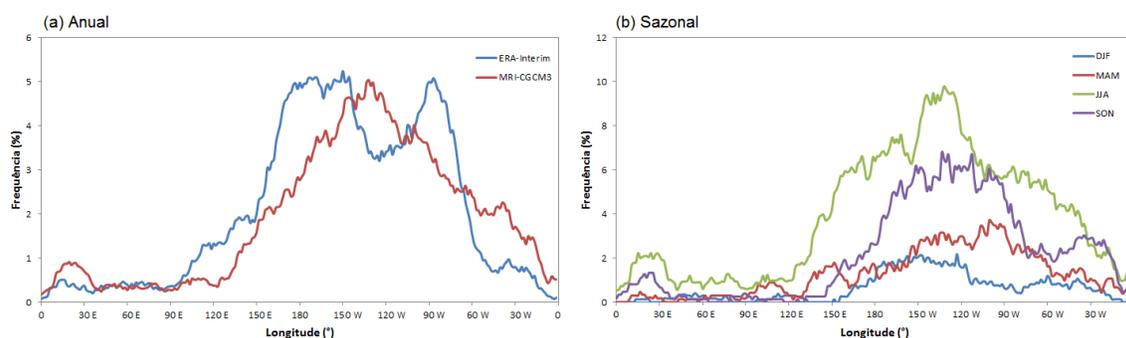


Fig. 7.5 – (a) Média para 26 anos (1979 – 2005) de frequência de eventos ou regime de bloqueios por ponto de longitude, a curva azul representa a média anual para os dados ERA Interim e a curva vinho para o experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3 e (b) médias sazonais extraída dos dados do experimento histórico realizado com o modelo MRI-CGCM3; a curva azul representa a media para os meses DJF, a vinho para MAM, a verde para JJA e a roxa para SON.

Na fig.7.6 está representada a persistência dos eventos por número de detecções de longitudes instantaneamente bloqueadas (similar à fig.4.6) para todo o globo e para os setores mostrados na fig.4.5. Essa figura inclui os eventos de pequena escala e pouco persistentes e os eventos de escala maior e mais persistentes, como os regimes ou eventos de bloqueio.

Na tab.7.1 não são observadas diferenças significativas na duração dos eventos de bloqueio, conforme o gráfico apresentado na fig.7.6. Comparando as colunas pretas relativas ao MRI-CGCM3 e aos dados ERA Interim, se observa que para eventos com

duração menor que três dias, o MRI-CGCM3 subestima o número de eventos de pequena escala e para eventos com duração maior que três dias, o MRI-CGCM3 superestima este número, o que fica evidente na tab.6.1, onde para todos os setores, a duração média dos eventos de bloqueio é levemente superestimada pelo MRI-CGCM3.

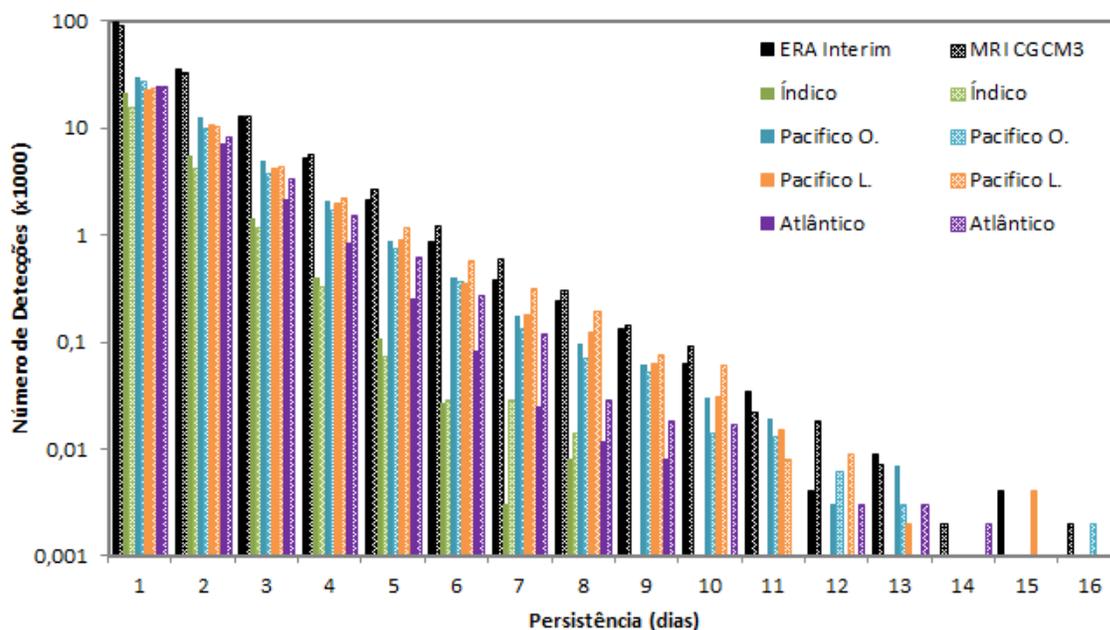


Fig. 7.6 - Persistência de bloqueios por número de eventos, as colunas pretas representam o número total de eventos, as verdes representam o setor do Oceano Índico, a azul claro representa o setor do Pacífico Oeste, a laranja representa o setor Pacífico Leste, e a roxa representa o setor do Atlântico Sul, para o período de 1979 – 2005 de dados ERA Interim, representado pelas colunas cheias, e o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 é representado pelas colunas pontilhadas. Os valores de número de detecções estão representados em escala logarítmica decimal.

Tabela 7.1 - Duração média dos eventos de bloqueio para os dados ERA Interim e MRI-CGCM3.

Setor	ERA Interim	MRI – CGCM3
Total	3,76	3,87
Índico	3,38	3,45
Pacífico Oeste	3,81	3,83
Pacífico Leste	3,88	4,05
Atlântico	3,53	3,75

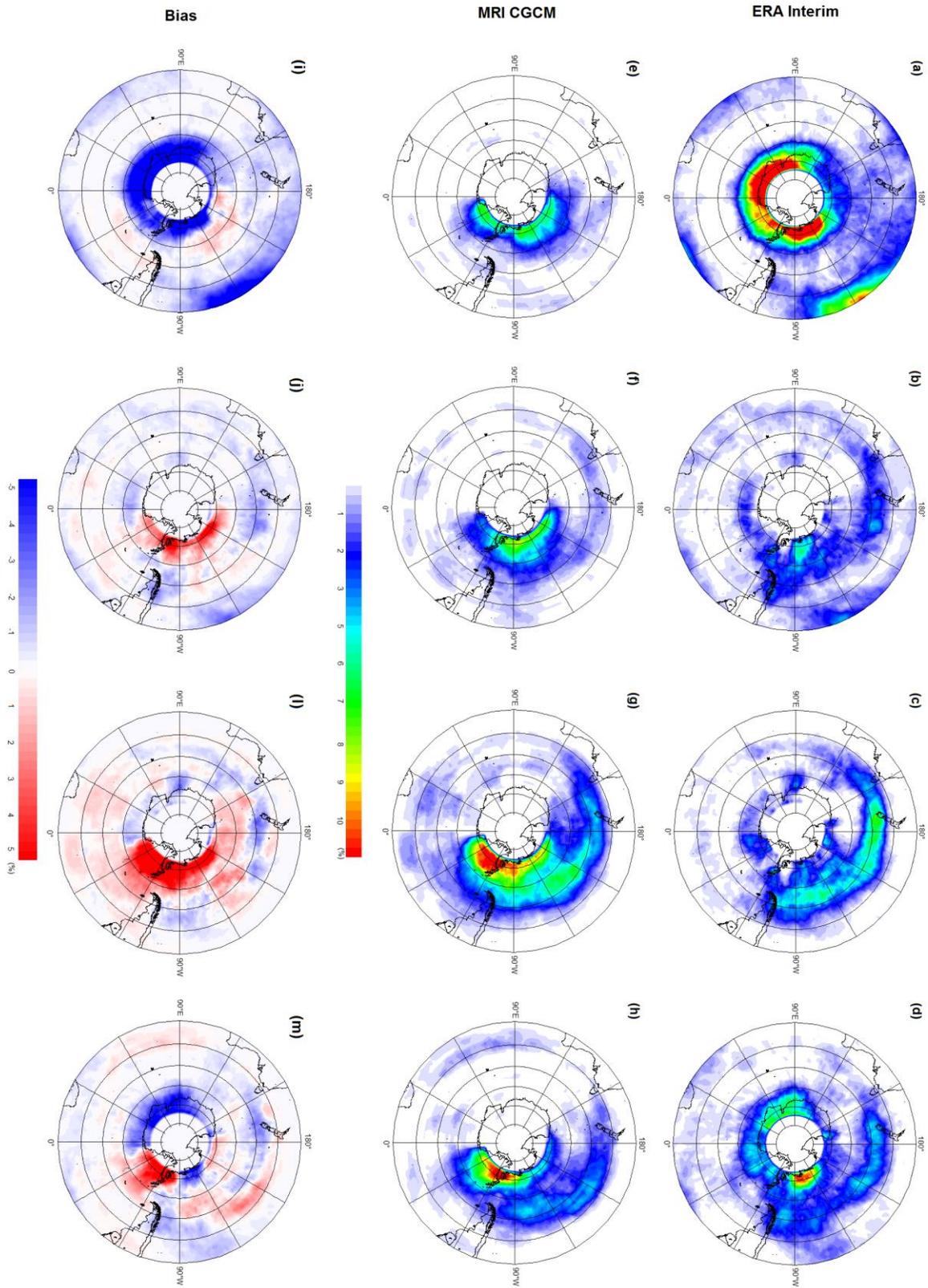


Fig. 7.7 – Frequência média sazonal dos eventos de quebra de onda Rossby com persistência acima de 3 dias ou regimes de bloqueios atmosféricos, para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, considerando 26 anos de dados ERA Interim (1979 – 2005) de a-d respectivamente e para 26 anos de dados do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 de e-h respectivamente, e viés entre o experimento histórico e os dados ERA Interim, são mostrados de i-m, respectivamente.

7.2.2 – Eventos de Bloqueio em todas as latitudes

A fig.7.7 representa a média sazonal da frequência de bloqueios para 26 anos (1979-2005) de dados de reanálise ERA Interim e do experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e o viés entre o MRI-CGCM3 e a reanálise.

Para os meses de DJF (figs.7.7 a,e,i), observa-se que em médias e altas latitudes a frequência de bloqueios é subestimada pelo MRI-CGCM3 em relação a frequência extraída da reanálise, isso é demonstrado na fig.6.7i, onde o viés é negativo para quase todo o HS.

Para os meses de MAM (figs.7.7 b,f,j), em médias latitudes, é observado que o MRI-CGCM3 subestima a frequência de bloqueios e para altas latitudes ele superestima a frequência. Também é observado que para a região do Oceano Pacífico, o MRI-CGCM3 representa a posição dos bloqueios razoavelmente bem, com exceção da região do mar de Amundsen, onde o máximo de frequência de bloqueios está mais pronunciado e geograficamente mais espalhado no MRI-CGCM3 do que na reanálise ERA Interim.

Para os meses de JJA (figs.7.7 c,g,f), os padrões são parecidos com os dos meses MAM, onde o MRI-CGCM3 subestima/superestima a frequência de bloqueios em médias/altas latitudes, para a maior parte do globo, exceto para uma região em médias latitudes entre o Oceano Pacífico Leste e Oeste, entre aproximadamente 120°W e 150°W. Nesta região o viés é positivo de aproximadamente 3%, que reflete no pico de frequência encontrado na curva vinho da fig.6.6. Para as regiões dos Oceanos Atlântico e Índico, o MRI-CGCM3 superestima a frequência de bloqueio. Para os bloqueios ocorridos sobre o Oceano Pacífico Oeste, próximos a Nova Zelândia e Oeste da costa da América do Sul é observado que o MRI-CGCM3 representa os bloqueios mais deslocados a sul em relação aos representados pelos dados ERA Interim, para esses meses, isso pode explicar o fato do

viés entre o MRI-CGCM3 e a reanálise apresentar o viés positivo em latitudes mais equatoriais e viés negativo em latitudes mais polares.

Finalmente para os meses de SON (figs.7.7 d,h,m), para médias latitudes no setor do Pacífico Leste é observado que os bloqueios representados pelo MRI-CGCM3 se encontram mais a norte em relação aos representados pelos dados ERA Interim. Isso pode ser visto mais claramente através do viés, onde é apresentado um padrão contrário ao mostrado para os meses de JJA para essa região, com viés positivo em latitudes mais equatoriais e viés negativo para latitudes polares. Para a região do Pacífico Central é encontrado viés positivo, indicando que os eventos de bloqueios são superestimados pelo MRI-CGCM3 em relação á reanálise. Para a região do Pacífico Leste ou costa da América do Sul é observado o mesmo padrão que para o mês de JJA para esse setor.

No geral é observado que o MRI-CGCM3 representa os bloqueios mais a sul para quase todos os setores em todas as estações, exceto para o setor do Oceano Pacífico Oeste nos meses de SON, onde o MRI-CGCM3 mostra os bloqueios mais a norte em relação aos dados ERA Interim. Também é observado que o MRI-CGCM3 representa mal os bloqueios ocorridos a sul da Austrália, a leste de 150°W, onde a frequência é subestimada.

7.2.3 – Tendência no Número de Bloqueios e Variabilidade Interanual

Na fig.7.8 está representado o número anual de bloqueios para todo o Hemisfério Sul e sua tendência linear, tanto para os dados ERA Interim como para os dados do experimento histórico MRI-CGCM3. Analisando somente as curvas referentes à atividade de bloqueios, observa-se que o MRI-CGCM3 representa bem a variabilidade interanual dos eventos de bloqueio. Com relação às tendências da reanálise e do MRI-CGCM3, nota-se que o MRI-CGCM3 mostra uma tendência negativa de aproximadamente 1 bloqueio por década, enquanto os dados ERA Interim apresentam uma tendência negativa de aproximadamente 3 bloqueios por década.

Para o experimento histórico foi achado uma média de 21 bloqueios por ano e um desvio padrão de 6,5 bloqueios, enquanto para os dados ERA Interim foi encontrada uma média de 20 bloqueios por ano e um desvio padrão de 7,0 bloqueios para os 26 anos de análise.

Com isso não são encontradas grandes diferenças nem na média anual e nem no desvio padrão para os anos em análise.

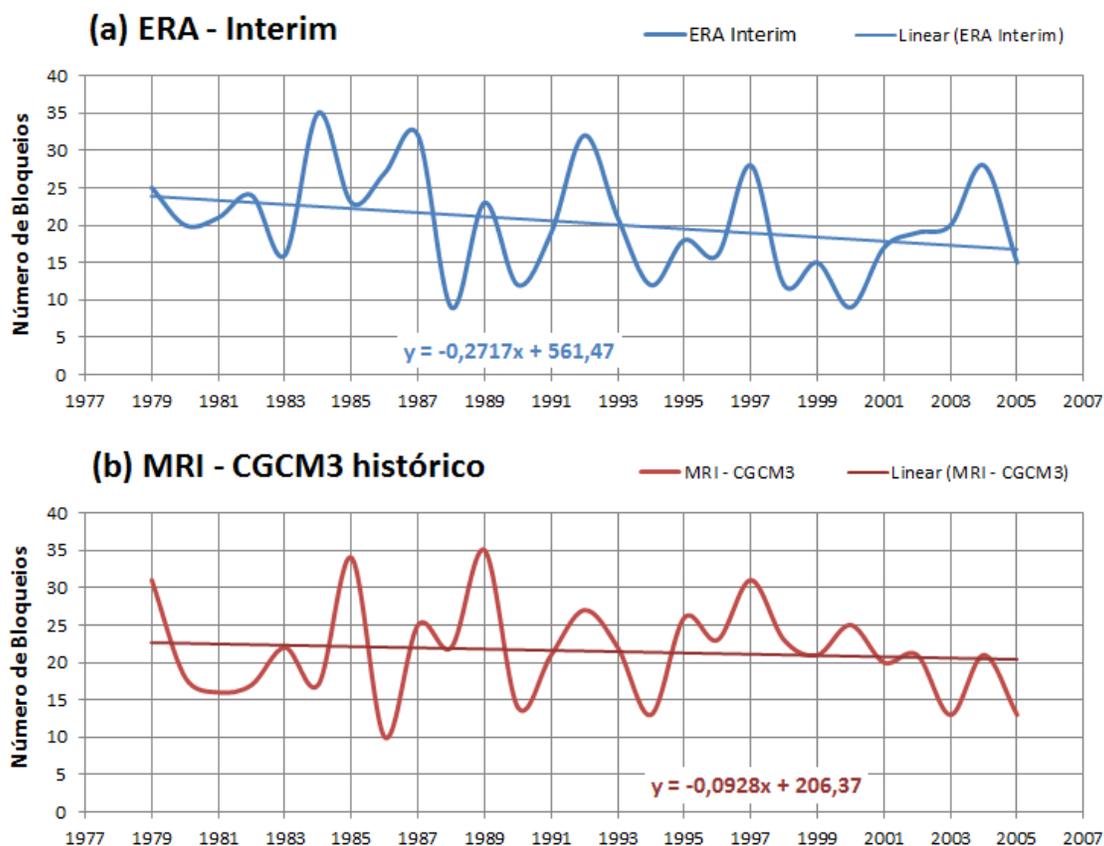


Fig. 7.8 - Número anual de eventos de bloqueios sobre todo o Hemisfério Sul. A curva azul (a) representa a soma anual do número de eventos de bloqueios encontrados nos dados ERA Interim e sua reta de tendência e a curva vinho (b) mostram o número de bloqueios extraídos dos dados MRI-CGCM3 e sua curva de tendência. As equações de regressão dos ajustes estão representadas na parte inferior da figura com a cor de seus respectivos pares.

7.3 – Discussão

Eventos de bloqueio geralmente tendem a ocorrer escoamento abaixo (“downstream”) da bifurcação do jato de oeste, que se divide entre jato polar e jato subtropical, como observado na fig.7.7. Para a maioria das estações, os eventos de bloqueios são representados um pouco mais a sul no modelo e os picos de frequência geralmente

ocorrem um pouco mais deslocados para leste. Analisando a fig.7.4, observa-se que principalmente para a estação de inverno, o “salto” do eixo das linhas de tempestades ocorre mais a leste em relação aos dados de reanálise, o que indica que a bifurcação do jato de oeste ocorre aproximadamente 30° mais a leste no MRI-CGCM3 em relação à reanálise, o que é um indicativo da causa dessa mudança longitudinal nos picos de frequência de bloqueio, principalmente nas estações de JJA e SON, como pode ser visto na fig.7.7.

Como mostrado no capítulo anterior, a posição da bifurcação do jato é um componente essencial para o estabelecimento do bloqueio em um determinado setor, devido ao fato da bifurcação do jato ocorrer 30° mais a leste no experimento histórico em relação aos dados ERA Interim, isso não permite que se estabeleça uma alta de bloqueio nos setores 1, 2, 6 e 7 (onde os setores 1 e 2, representam o primeiro pico e os setores 6 e 7 o segundo pico) como mostrado no cap.6, onde a condição necessária para a ocorrência dos eventos de bloqueio nessas regiões é a bifurcação do jato.

O MRI-CGCM3 representa bem as regiões correspondentes aos setores 3, 4 e 5, devido a uma das condições para o estabelecimento de bloqueio nessas regiões ser a posição do jato ocorrer exatamente na posição que o MRI-CGCM3 representa melhor.

Para o segundo pico observado no Pacífico Leste, não presente nas análises realizadas com experimento histórico. A fig.7.3 mostra que o máximo de EKE nessa região nos dados ERA Interim é bastante subestimado por parte do MRI-CGCM3. Através dos resultados mostrados por Shutts (1983) e Marques e Rao (2002), que mostraram que uma possível causa da manutenção e estabelecimento dos bloqueios pode ser devido à transferência de energia e vorticidade anticiclônica por parte dos sistemas transientes móveis, pode-se inferir que esta é uma possível explicação da obtenção da menor frequência de bloqueios encontrada nessa região nos resultados do experimento histórico. Acrescenta-se ainda que nessa região o jato tem características mais zonais nos dados do experimento histórico que nos dados ERA Interim e também possui uma desaceleração menor, o que

não contribui para a instabilidade do escoamento e o consequente estabelecimento de uma alta de bloqueio nessa região.

Para a região do Oceano Atlântico Sul é encontrado que o MRI-CGCM3 superestima a frequência de bloqueios para quase todas as estações, principalmente para JJA e SON. Na fig.7.4 nota-se que a latitude central ou eixo das linhas de tempestade apresentam um salto para os meses de SON no gráfico referente ao MRI-CGCM3, o que implica em uma região de bifurcação do jato, sendo que este resultado não está presente na curva dos dados ERA Interim, o que pode explicar a tendência do MRI-CGCM3 em superestimar o número de bloqueios sobre o Atlântico Sul. Porém, nessa região, também há o fator da topografia dos Andes que têm um papel importante no estabelecimento dos bloqueios no Atlântico Sul próximo à costa da Argentina, como mostrado por Berbery e Nuñez (1982), porém este efeito não é significativo nas médias de geopotencial mostradas na fig.7.1, uma vez que a frequência de bloqueios nessa região é pequena.

7.4 – Conclusão e Sumário

Foi mostrado que o MRI-CGCM3 não representa bem a posição geográfica dos dois picos de frequência presentes na reanálise, deslocando o pico correspondente ao Pacífico Oeste (sul na Nova Zelândia) para leste e representando o pico correspondente ao Pacífico Leste (costa oeste da América do Sul) mais em direção a altas latitudes e subestimando seu valor de frequência em relação aos dados ERA Interim.

O MRI-CGCM3 consegue representar razoavelmente bem a média anual dos jatos e das linhas de tempestade, porém para as médias sazonais percebe-se que o mesmo não representa tão bem a região de bifurcação do jato, colocando-a 30° mais a leste que sua posição usual.

Também foi mostrado que o MRI-CGCM3 representa bem a variabilidade interanual do número de bloqueios, porém superestima o valor de sua tendência.

CAP.8 – BLOQUEIOS EM CENÁRIOS FUTUROS

8.1 – Frequência de Bloqueios para Cenários Futuros

Os dados referentes aos cenários rcp45 e rcp85 foram divididos em três períodos diferentes, o primeiro para um período de 15 anos e os outros dois para um período de 30 anos, onde o primeiro período se estende de 2015 a 2030, o segundo cobre 2031 a 2060 e o terceiro é de 2061 a 2090.

Como mostrado no cap.7, o MRI-CGCM3 não representa bem os bloqueios que ocorrem em alguns setores ou regiões, devido a deficiências na representação dos jatos polar e subtropical e conseqüentemente das linhas de tempestade, assim nos limitaremos a apresentar e analisar aqui somente a frequência em uma dimensão. A frequência em duas dimensões para os cenários futuros é mostrada no apêndice A4.

A fig.8.1 apresenta a média anual da frequência de dias de bloqueio para os cenários rcp45 e rcp85. Para ambos os experimentos e para os diferentes períodos, a posição longitudinal dos máximos de frequência não varia muito, exceto para a curva azul na fig.8.1b que representa o período de 2015-2030 para o cenário rcp85, onde ocorre um segundo pico de frequência em aproximadamente 60°W (300°E) na região correspondente ao Atlântico Sul.

Para o cenário rcp45, considerando o primeiro e o segundo período, não há nenhum indício de tendência ou diminuição no número de bloqueios, sendo mais pronunciado para o terceiro período, onde há uma indicação fraca de aumento de bloqueios, principalmente na região do Pacífico Oeste, onde está localizado o pico de máximo de frequência.

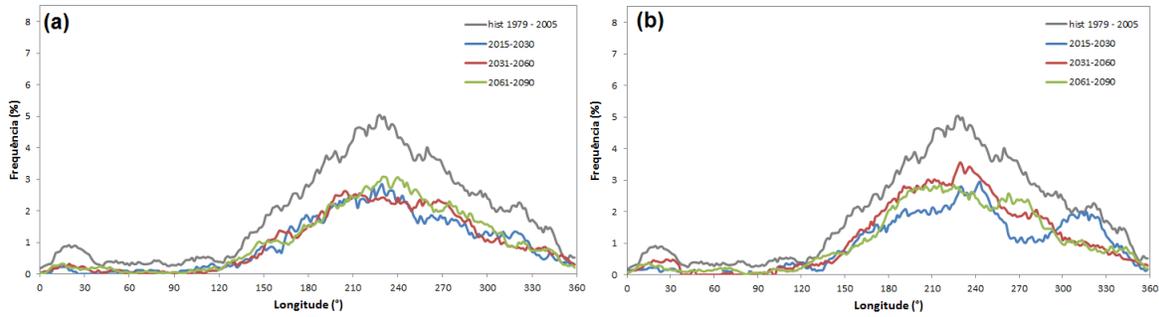


Fig. 8.1 - Frequência média anual de escoamento bloqueado por ponto de longitude sobre a latitude central de 50°S, para os cenários, (a) rcp45 e (b) rcp85, para os períodos de 2015-2030 (linha azul), 2031-2060 (linha vinho), 2061-2090 (linha verde), e para o experimento histórico (linha cinza), extraída das rodadas do modelo MRI-CGCM3.

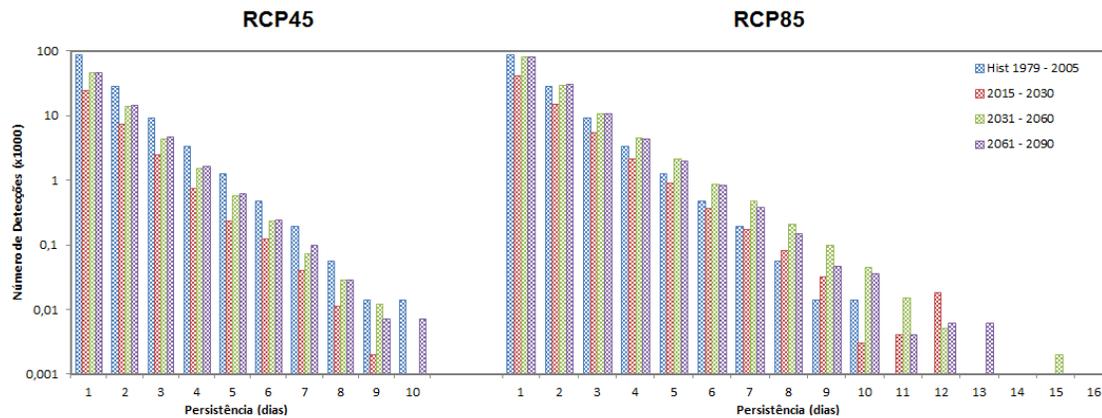


Fig. 8.2 - Persistência de bloqueios por número de eventos por ponto de longitude para os cenários RCP45 e RCP85, as colunas azuis representam o período histórico de 1979-2005, as vinhos o período de 2015-2030, as verdes o período de 2031-2060 e as roxas o período de 2061-2090. Os valores de número de detecções estão representados em escala logarítmica decimal.

Para o cenário rcp85, diferentemente do primeiro setor, é notado um aumento na frequência de bloqueios no setor do Oceano Pacífico Oeste, e uma diminuição no setor do Pacífico Leste e Atlântico. A frequência do primeiro período é menor que a dos outros dois no setor do Pacífico Oeste e vice versa. Para esse mesmo setor, se observa uma mudança para oeste na posição do primeiro pico de frequência nos períodos de 2031-2060 e 2061-2090 em relação ao período de 2015-2030.

Para investigar a persistência dos eventos de bloqueios nos cenários futuros, a fig.8.2 mostra a persistência dos eventos de bloqueios pelo número de detecções por ponto de longitude. Esta figura indica claramente que o número de eventos de pequena escala (extensão longitudinal < 15°) e escoamento bloqueado (persistência < 3 dias) é maior para o cenário RCP85 (cenário de máximo aquecimento global) que para o cenário RCP45.

Tabela 8.1 - Persistência média dos eventos de bloqueios para os cenários RCP45 e RCP85 e período histórico.

	RCP45	RCP85
Histórico 1979 – 2005	3,87 dias	3,87 dias
2015 – 2030	3,49 dias	3,71 dias
2031 – 2060	3,56 dias	3,83 dias
2061 – 2090	3,57 dias	3,74 dias
2015 – 2090	3,54 dias	3,76 dias

Na tabela 8.1 está apresentada a persistência média dos eventos de bloqueios ocorridos em todo o globo para os dois cenários. Isto indica que não ocorrem grandes diferenças na persistência dos eventos entre os cenários e nem na persistência média, quando comparada a persistência média obtida com os dados do experimento histórico, apresentada também na tabela 6.1, que foi de 3,87 dias.

A fim de investigar tendências nos conjuntos de dados, a fig.8.3 apresenta o número anual de bloqueios e a tendência linear dos bloqueios para os períodos descritos anteriormente. A tabela 8.2 mostra alguma das estatísticas.

Analisando a fig.8.3 juntamente com a tabela 8.2 observa-se uma tendência para o primeiro período de 2015 – 2030, onde para o cenário rcp45 mostra uma tendência de aumento de 4 bloqueios por década e o cenário rcp85 uma tendência de 2,5 bloqueios por década. Para os demais períodos e considerando o período completo não são observadas tendências acentuadas nos dados de bloqueio.

Com relação as frequências anuais médias do número de bloqueios para o globo todo e seu desvio padrão, da tabela 8.2 não se observa grandes diferenças entre um cenário e outro, nem na média e nem no desvio padrão. Em relação ao experimento histórico, mostrou se que a média anual de bloqueios caiu e o desvio padrão diminuiu em 50% em relação aos dados de reanálise. O que representa menor variabilidade interanual.

Tabela 8.2 - Tendência (#bloqueios/década), Média e desvio padrão (#bloqueios) da média anual dos eventos de bloqueios ocorridos nos períodos estudados.

	rcp45			rcp85		
	Tendência	Média	Desv.Pad	Tendência	Media	Desv.Pad
2015-2030	4	11,7	3,6	2,5	10,7	3,8
2031-2060	1,2	11,2	4,1	1,8	13,7	5,4
2061-2090	0,5	11,8	4,3	-0,7	12,2	4,5
2015-2090	0,03	11,5	4,7	0,007	12,5	4,8

8.2 – Conclusão e Discussão

O modelo utilizado não representa bem a posição dos bloqueios, desta forma, somente foi apresentada a climatologia 1D dos eventos de bloqueios ocorridos sobre a latitude de 50°S, que como mostrado nos capítulos 3, 4 e 6, para o caso do índice PV/ θ pode ser usada como representativa da posição dos mesmos em todas as latitudes. Foi mostrado que tanto para o cenário RCP45 como para o RCP85 (que representa um cenário de aquecimento global mais intenso – Taylor 2012), a frequência de bloqueios diminui para todo o período estudado, sendo encontrado um pequeno aumento do número de bloqueios para os cenários futuros em relação ao do clima presente.

Os resultados de aumento de frequência de bloqueios num cenário de maior aquecimento global não concorda com os resultados obtidos para o HN por Barnes et al. (2011), que utilizaram 14 CGCM para dois cenários do projeto CMIP3 e encontraram diminuição do número de bloqueios para o cenário de maior aquecimento global em relação a um cenário de aquecimento intermediário. Eles argumentam que a maior/menor frequência

de bloqueio presente nos cenários está ligada diretamente a posição do jato polar no HN, que move se para a direção polar no cenário de aquecimento global.

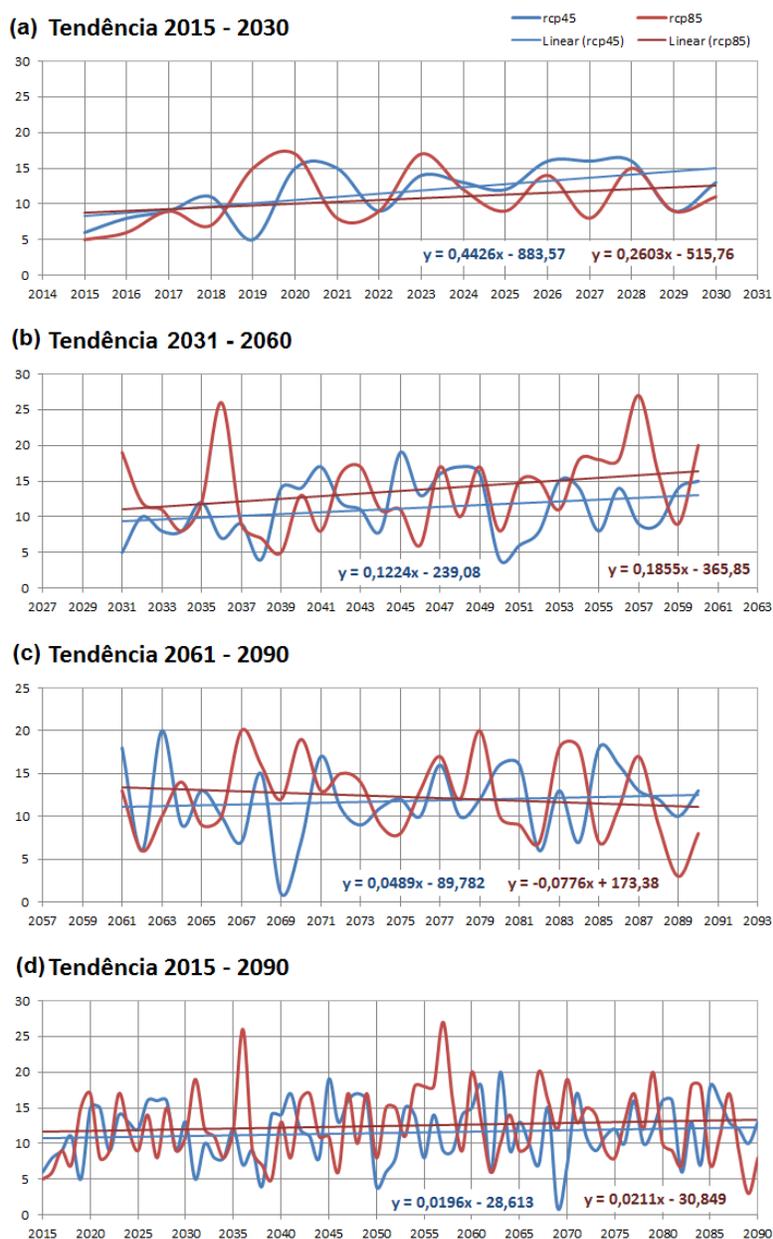


Fig. 8.3 - Número anual (curva grossa) e tendência linear (curva fina) de bloqueios para os períodos de (a) 2015-2030, (b) 2031-2060 e (c) 2061-2090, e (d) 2015-2090, as curvas azuis representam o cenário rcp45 e as curvas tom vinho representam o cenário rcp85.

Para o HS, o trabalho de Wilcox et al. (2012), que estudou a posição do jato de oeste na troposfera e na estratosfera no cenário RCP85, mostrou que para um cenário de aquecimento global, o jato polar move-se para uma direção mais equatorial em relação ao experimento histórico.

Com a sugestão de Barnes et al. (2011) e com os resultados obtidos por Wilcox et al. (2012) em relação ao jato polar, é possível que as mudanças nas linhas de tempestade expliquem a maior frequência de bloqueios encontrada no cenário RCP85 em relação ao RCP45.

CAP.9 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 – Conclusão Geral

Nessa dissertação foi utilizado um índice de bloqueios com maior embasamento dinâmico (PV/ θ – Pelly e Hoskins, 2003) que o índice tradicionalmente utilizado pela literatura no HS (TM – Tibaldi e Molteni, 1996). O uso desse índice não foi somente limitado a uma única latitude, chamada de latitude central, o que permitiu uma comparação mais acurada entre o índice utilizado e o clássico.

Foram encontradas diferenças geográficas na localização dos bloqueios entre um índice e outro, com o índice PV/ θ localizando bloqueios nas regiões onde ocorre mistura das parcelas de ar (entre a baixa pressão e a alta pressão que se forma), e o índice TM localizando bloqueios sobre a região que ocorre a alta pressão ou alta de bloqueio. Assim o índice PV/ θ localiza bloqueios em uma direção mais equatorial que o índice TM.

Foi apresentada uma climatologia de bloqueios obtida com o índice PV/ θ em todas as latitudes do HS, sobre a latitude central das linhas de tempestade e sobre a latitude central de 50°S. Para as climatologias 1D, não foram encontradas diferenças significativas nas regiões de detecção, sendo que duas regiões se destacaram mais, uma sobre o Pacífico Leste e outra sobre o Pacífico Oeste, concordando com trabalhos publicados anteriormente. Para a climatologia 2D, foram encontradas as mesmas regiões de máximo de frequência de bloqueios que para o índice 1D, com uma região adicional de máximo secundário sobre o Pacífico Central em aproximadamente 65°S (região 4 da fig.6.1). Também foi avaliado o índice TM em 1D, sendo que este índice somente consegue representar bem os bloqueios que ocorrem sobre o Pacífico Oeste e Central, não mostrando o segundo pico principal de frequência que ocorre sobre o Pacífico Leste.

No cap.6 foram analisadas composições de anomalias de TSM e temperatura de superfície na presença de bloqueios para 7 setores sobre o Oceano Pacífico Sul, cobrindo do sul da Austrália até próximo da costa do Chile. Foram encontradas algumas configurações de anomalias de TSM e temperatura favorável à ocorrência de bloqueios. As regiões que apresentaram um maior impacto foram as regiões do continente Australiano, Oceano Índico (parte norte, a sul da costa da Índia), oceano a norte da Austrália (Indonésia) e mar da Tasmânia.

Nesse capítulo também foi mostrado que os bloqueios que ocorrem nas regiões do Oceano Pacífico Oeste e Central tem uma grande dependência da posição de bifurcação do jato. Se a bifurcação do jato se der mais a leste de sua posição climatológica, os bloqueios também tendem a ocorrer mais a leste nessas regiões. Para a região do Oceano Pacífico Oeste, a bifurcação do jato tende a ser próxima de 120°E e o escoamento apresenta um cavado sobre o oceano compreendido entre a Austrália e Nova Zelândia (165°E) e gera um padrão de bloqueio escoamento abaixo de 120°W .

No cap. 7 foi mostrado que o modelo utilizado não representa bem a posição geográfica dos bloqueios devido à deficiência na representação do ponto de divisão do jato na estação de inverno, que ocorre 30° mais a leste em relação aos dados de reanálise. A consequência deste resultado é o deslocamento do pico principal localizado sobre o Oceano Pacífico Oeste em 180°W na reanálise e em 120°W no modelo, o segundo pico não é detectado no modelo.

Foram estudados dois cenários de clima futuro, um representando maior aquecimento global e outro representado aquecimento global intermediário. Para o cenário de maior aquecimento foi encontrado um maior número de bloqueios em relação ao cenário de aquecimento intermediário. Para ambos os cenários o número de bloqueios ocorridos diminui relação ao período histórico e em relação á reanálise. Não foram encontradas grandes diferenças na persistência dos bloqueios para nenhum dos cenários estudados.

9.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Os resultados apresentados no cap.6 mostram algumas configurações de anomalias de temperatura que sugerem o estabelecimento de bloqueios em 7 diferentes setores. Considerando estes padrões seria interessante realizar um estudo envolvendo modelagem para avaliar quais regiões tem mais influência no estabelecimento de bloqueios.

O foco maior do estudo foi a região do Oceano Pacífico onde foi encontrada a maior frequência de bloqueios, nas figuras do cap.6 nos campos de anomalia de temperatura foram encontradas anomalias de temperatura significativas sobre a América do Sul e sobre a o continente Africano, o que pode indicar possíveis padrões de teleconexões atmosféricas.

APÊNDICE

A1 – Linhas de Tempestade ou Energia Cinética dos Turbilhões Transientes

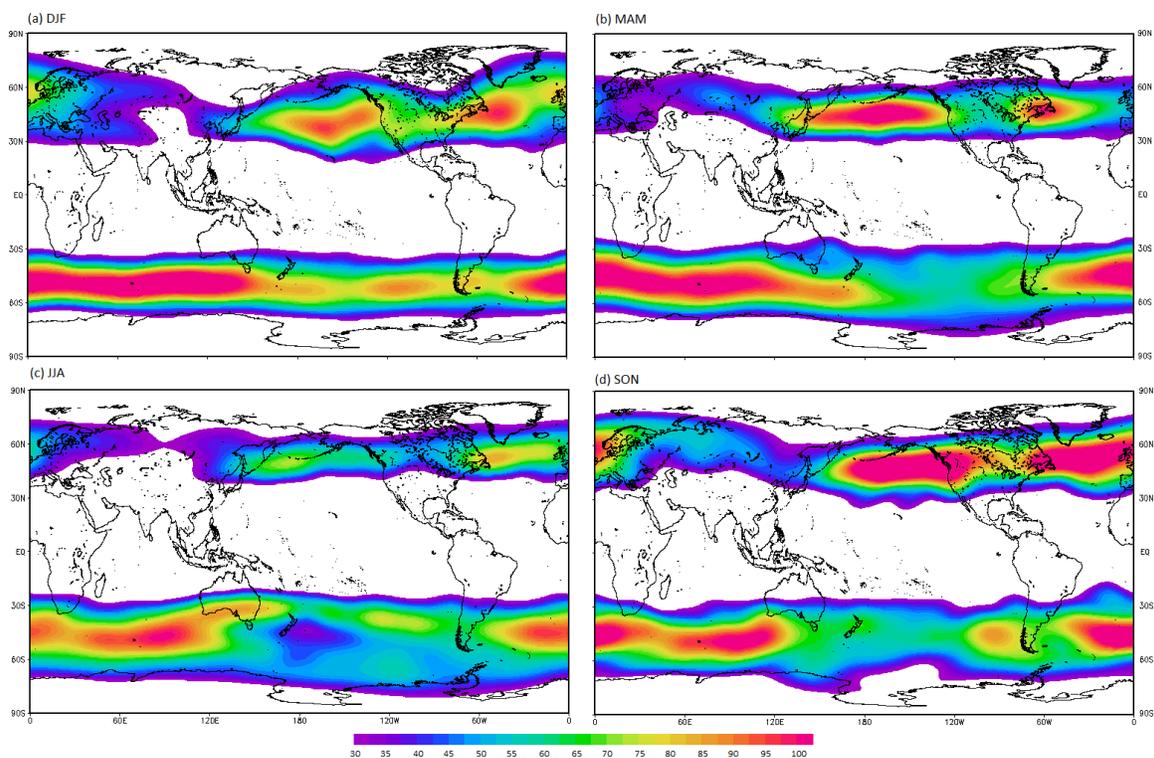


Fig. A1 – Média Sazonal da Energia Cinética de Turbilhonamento Transiente, para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON, extraído de 26 anos de reanálise ERA Interim (1979-2005).

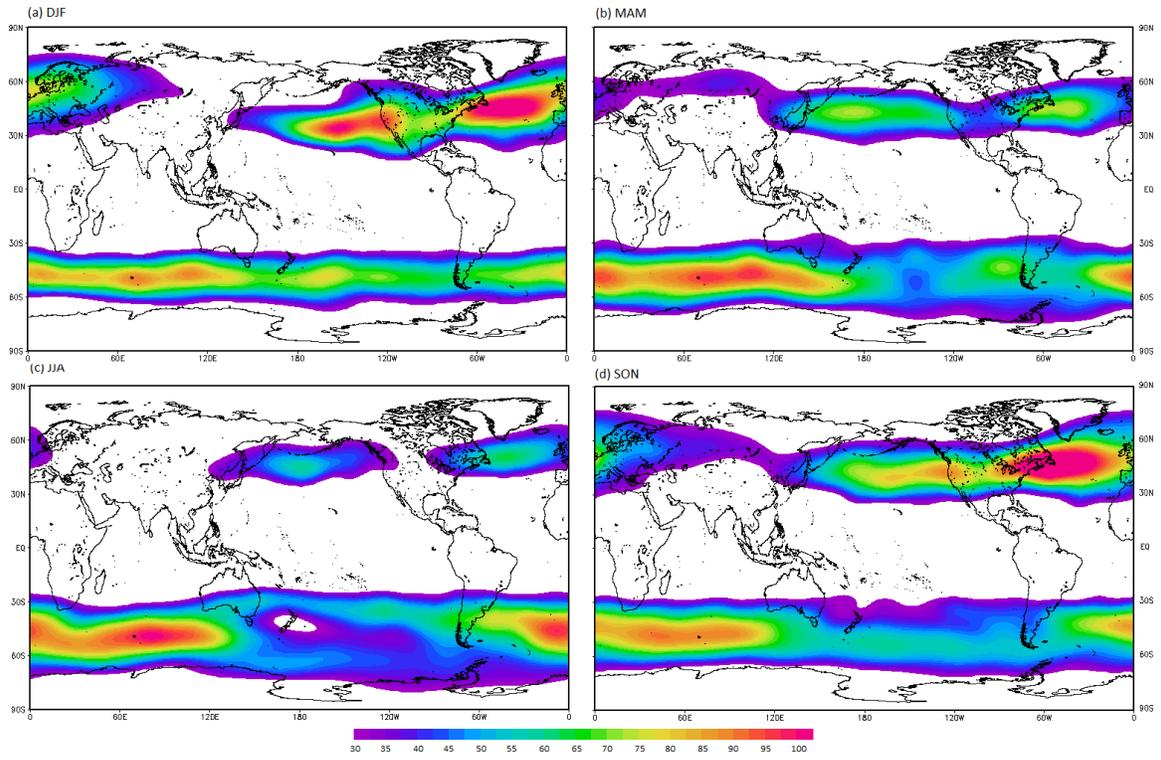


Fig. A2- Média Sazonal da Energia Cinética de Turbilhamento Transiente para os meses de (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON, extraído de 26 anos do período histórico da rodada do modelo MRI-CGCM 3 (1979-2005).

A2 - Temperatura da Superfície do Mar no Modelo MRI CGCM 3

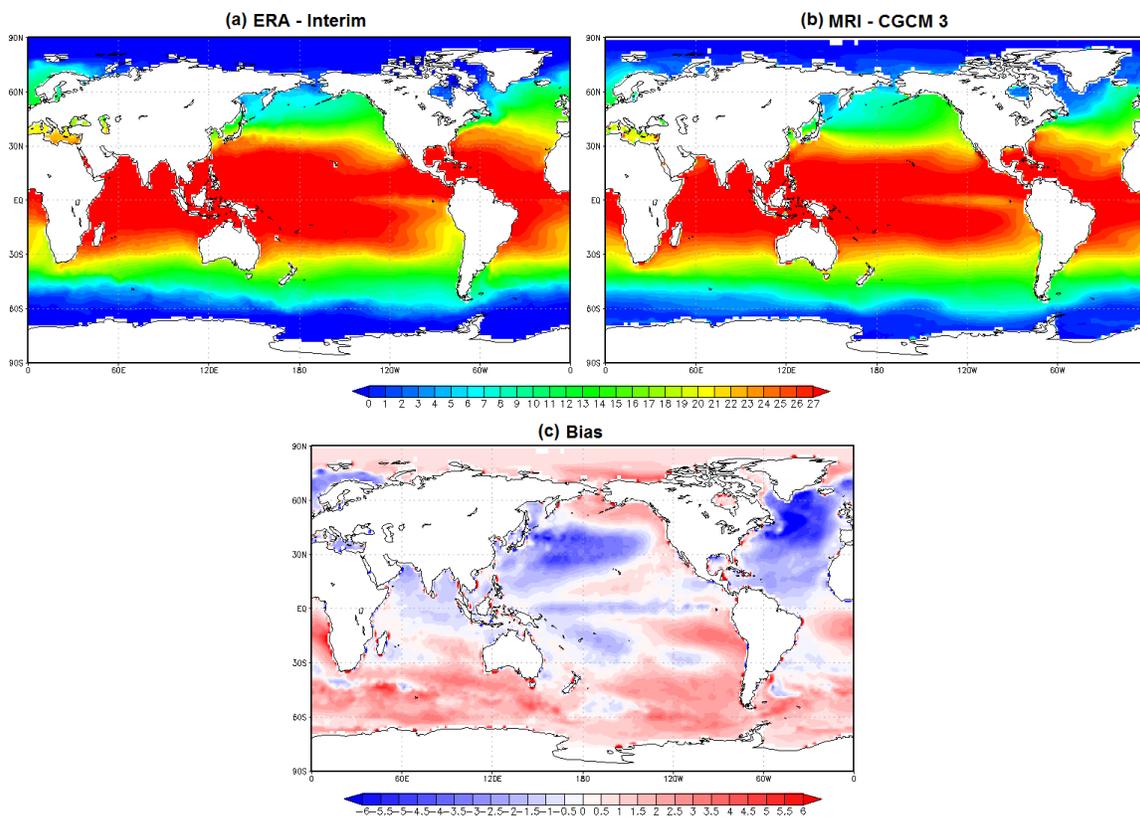


Fig. A3 - Média climatológica de 26 anos (1979 - 2005) do campo de TSM (em °C) para os dados (a) ERA-Interim, (b) para o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e (c) viés entre o experimento histórico do modelo MRI-CGCM3 e reanálise ERA-Interim.

A3 – Número de Onda Estacionário

Para verificar se na presença de bloqueios as ondas estacionárias realmente se amplificam, a figura A4 mostra o número de onda estacionário k_s , dado por:

$$k_s^2 = \frac{\beta}{\bar{u}} \quad (\text{eq. A1})$$

Onde β representa o gradiente meridional da vorticidade absoluta e \bar{u} representa o estado básico do vento zonal

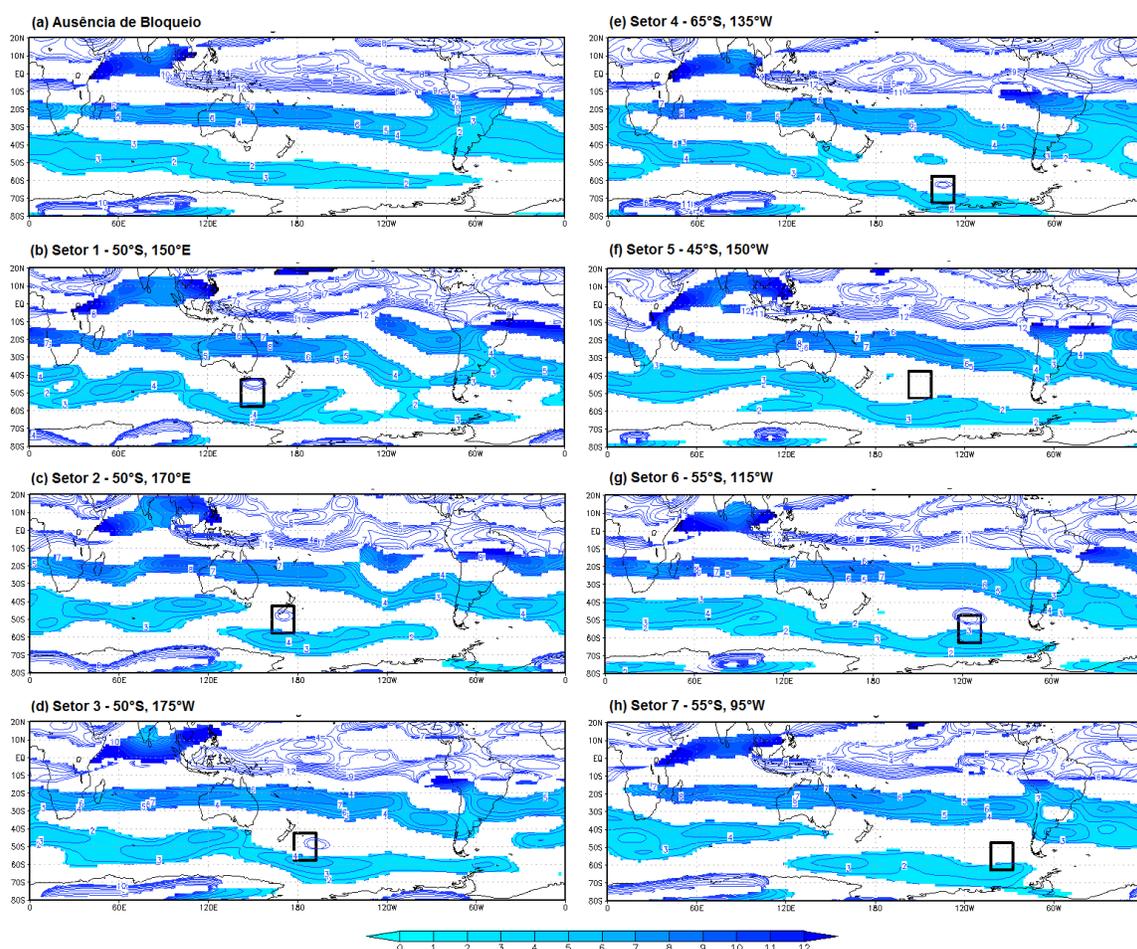


Fig. A4 – Número de onda estacionário calculado a partir das composições de vento zonal na presença e ausência de bloqueios nos setores descritos em vários setores. Regiões sombreadas representa regiões onde o vento é de oeste e $\beta > 0$, regiões não sombreadas são regiões onde o vento zonal é de leste ou $\beta < 0$.

As regiões sombreadas denotam as regiões que servem como dutos ou guias para ondas estacionárias se propagarem, ou seja, a propagação das ondas fica limitada a essas regiões sombreadas.

Nos setores onde ocorrem bloqueios, pode se observar que a norte e a sul desses setores, o número de onda estacionário é sempre maior que nos arredores e escoamento abaixo/acima, representando uma amplificação do padrão de onda estacionário, como também pode ser visto nas composições de vento zonal e linha de corrente apresentado no capítulo 7.

A4 – Climatologia 2D de bloqueios para os cenários RCP45 e RCP85

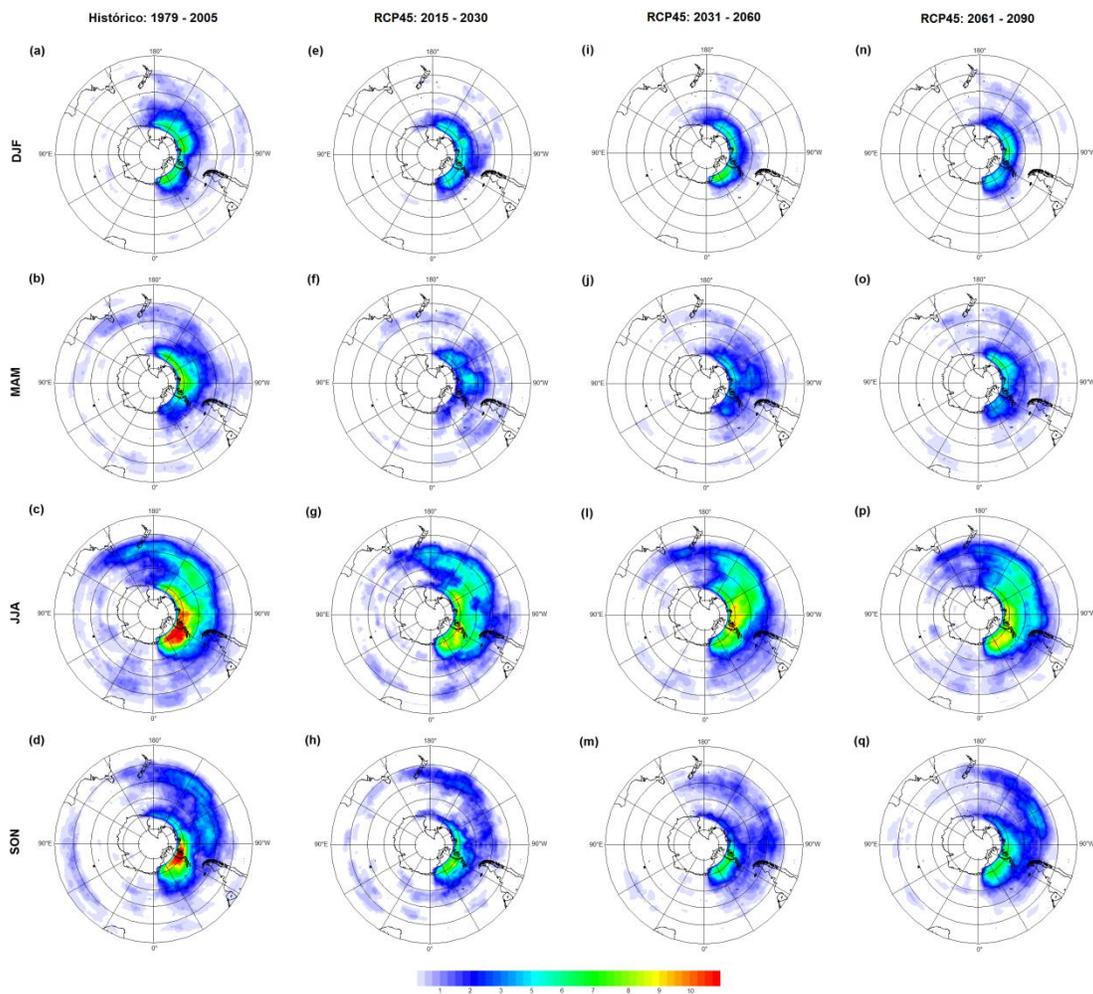


Fig. A5 – Frequência de bloqueios em todas as latitudes do HS, para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, representado no lado esquerdo da figura, para o período histórico (1979 – 2005) do modelo MRI-CGCM 3 e para três períodos do cenário RCP45, representados na parte superior.

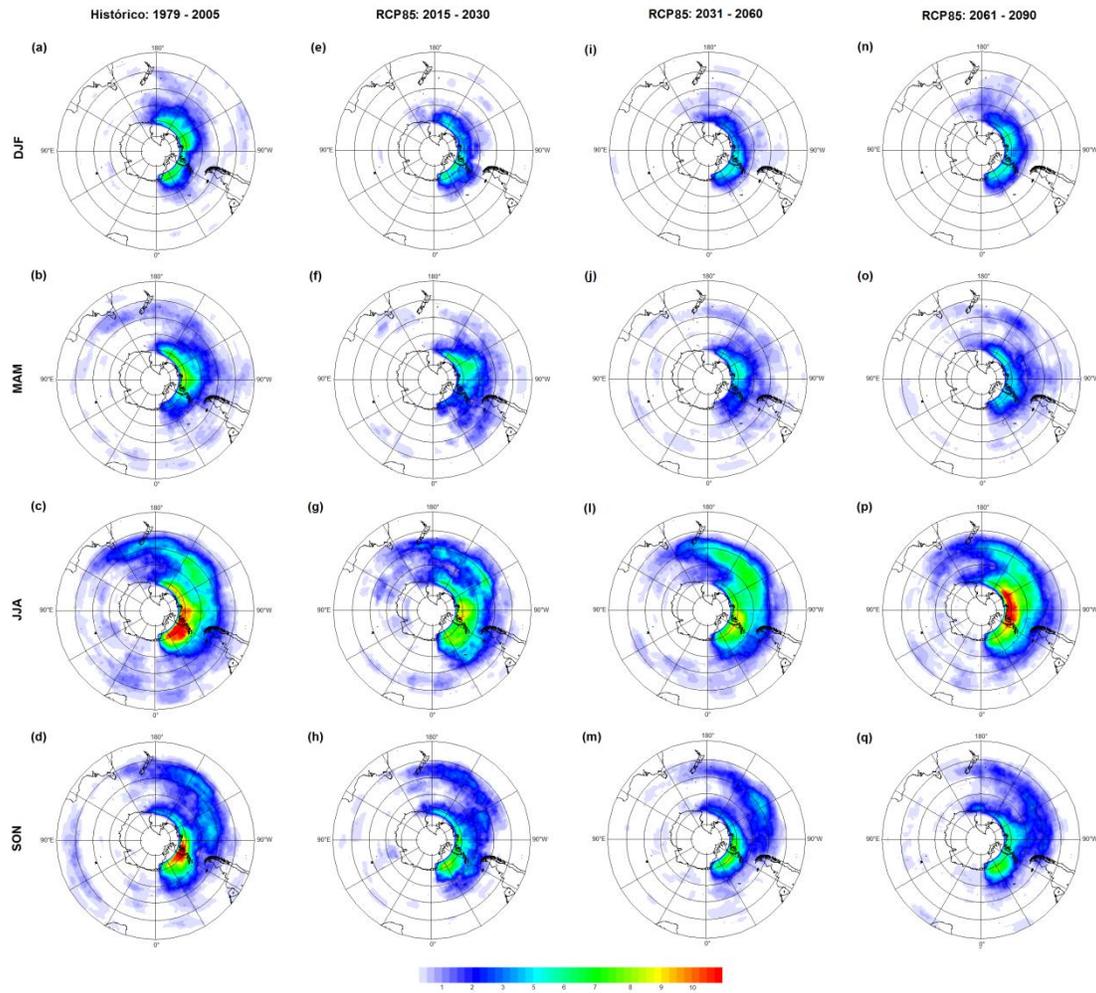


Fig. A5 – Frequência de bloqueios em todas as latitudes do HS para os meses de DJF, MAM, JJA e SON, representado no lado esquerdo da figura, para o período histórico (1979 – 2005) do modelo MRI-CGCM 3 e para três períodos do cenário RCP85, representados na parte superior.

REFERÊNCIAS

Austin, J. F. "The blocking of middle latitude westerly winds by planetary waves." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106.448 (1980): 327-350.

Barnes, Elizabeth A., Julia Slingo, and Tim Woollings. "A methodology for the comparison of blocking climatologies across indices, models and climate scenarios." *Climate dynamics* 38.11-12 (2012): 2467-2481.

Barnes, Elizabeth A., et al. "Exploring recent trends in Northern Hemisphere blocking." *Geophysical Research Letters* (2014).

Berbergy, Ernesto H., and Mario N. Núñez. "An observational and numerical study of blocking episodes near South America." *Journal of Climate* 2.11 (1989): 1352-1361.

Berggren, R., B. Bolin, and C-G. Rossby. "An Aerological Study of Zonal Motion, its Perturbations and Break-down." *Tellus* 1.2 (1949): 14-37.

Berrisford, P., B. J. Hoskins, and E. Tyrlis. "Blocking and Rossby wave breaking on the dynamical tropopause in the Southern Hemisphere." *Journal of the atmospheric sciences* 64.8 (2007).

Charney, Jule G., and John G. DeVore. "Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking." *Journal of the Atmospheric Sciences* 36.7 (1979): 1205-1216.

Charney, J. G., J. Shukla, and K. C. Mo. "Comparison of a barotropic blocking theory with observation." *Journal of the Atmospheric Sciences* 38.4 (1981): 762-779.

Coughlan, M. J. "A comparative climatology of blocking action in the two hemispheres." *Australian Meteorological Magazine* 31 (1983) : 3-13.

Dee, D. P., et al. "The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137.656 (2011): 553-597.

Egger, J. "Dynamics of blocking highs." *Journal of the Atmospheric Sciences* 35.10 (1978): 1788-1801.

Grose, William L., and Brian J. Hoskins. "On the influence of orography on large-scale atmospheric flow." *Journal of the Atmospheric Sciences* 36.2 (1979): 223-234.

Hitchman, Matthew H., and Amihan S. Huesmann. "A Seasonal Climatology of Rossby Wave Breaking in the 320–2000-K Layer." *Journal of the atmospheric sciences* 64.6 (2007).

- Hoskins, Brian J., and David J. Karoly. "The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing." *Journal of the Atmospheric Sciences* 38.6 (1981): 1179-1196.
- Hoskins, Brian J., Ian N. James, and Glenn H. White. "The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems." *Journal of the atmospheric sciences* 40.7 (1983): 1595-1612.
- Hoskins, Brian J. "Towards a PV- θ view of the general circulation." *Tellus A* 43.4 (1991): 27-35.
- Hoskins, Brian. "A potential vorticity view of synoptic development." *Meteorological Applications* 4.4 (1997): 325-334.
- Kalnay-Rivas, Eugenia, and Lee-Or Merkin. "A simple mechanism for blocking." *Journal of the Atmospheric Sciences* 38.10 (1981): 2077-2091.
- Lejenäs, Harald. "Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data." *Tellus A* 35.5 (1983): 350-362.
- McWilliams, James C. "An application of equivalent modons to atmospheric blocking." *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 5.1 (1980): 43-66.
- Mendes, M. D. et al. Bloqueios atmosféricos de 1960 a 2000 sobre o oceano pacífico sul: impactos climáticos e mecanismos físicos associados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 175-190, 2005.
- Mendes, Monica Cristina Damião; CAVALCANTI, Iracema Fonseca Albuquerque. The relationship between the Antarctic oscillation and blocking events over the South Pacific and Atlantic Oceans. *International Journal of Climatology*, 2013.
- Marques, Rosa Fátima Cruz, and V. Brahmananda Rao. "Interannual variations of blockings in the Southern Hemisphere and their energetics." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012) 105.D4 (2000): 4625-4636.
- Namias, Jerome. "Seasonal persistence and recurrence of European blocking during 1958–1960." *Tellus* 16.3 (1964): 394-407.
- Oliveira, F. N. M., Carvalho, L. M. V. and Ambrizzi, T." A new climatology for Southern Hemisphere blockings in the winter and the combined effect of ENSO and SAM phases". *Int. J. Climatol.*, 34 (2014): 1676–1692
- Pelly, Jo L., and Brian J. Hoskins. "A new perspective on blocking." *Journal of the atmospheric sciences* 60.5 (2003).
- Rex, Daniel F. "The effect of Atlantic blocking action upon European climate." *Tellus* 3.2 (1951): 100-112.

Shutts, G.J. "The Propagation of Eddies in Diffluent Jetstreams: Eddy Vorticity Forcing of Blocking Flow Fields." *Q.J.R.Meteorol.Soc.*,109 (1983), 737-761.

Sinclair, Mark R. "A climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere." *Monthly Weather Review* 124.2 (1996): 245-264.

von Storch, Hans, and Richard SJ Tol. *Environmental crises*. Springer, 2008.

Taljaard, J. J. "Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere." *Meteorology of the Southern Hemisphere* 13 (1972): 139-213.

Taylor, Karl E., Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl. "An Overview of CMIP5 and the Experiment Design." *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.4 (2012).

Tibaldi, Stefano, and Franco Molteni. "On the operational predictability of blocking." *Tellus A* 42.3 (1990): 343-365.

Tibaldi, S., et al. "Northern and Southern Hemisphere seasonal variability of blocking frequency and predictability." *Monthly Weather Review* 122.9 (1994): 1971-2003.

Trenberth, Kevin F., and Kingtse C. Mo. "Blocking in the southern hemisphere." *Monthly Weather Review* 113.1 (1985): 3-21.

Tung, Ka Kit, and R. S. Lindzen. "A theory of stationary long waves. Part I: A simple theory of blocking." *Monthly Weather Review* 107.6 (1979): 714-734.

Tyrlis, E., and B. J. Hoskins. "The morphology of Northern Hemisphere blocking." *Journal of the Atmospheric Sciences* 65.5 (2008).

Ummenhofer, Caroline C., et al. "Impact of Surface Forcing on Southern Hemisphere Atmospheric Blocking in the Australia-New Zealand Sector." *Journal of Climate* 26.21 (2013).

Verkley, W. T. M. "Stationary barotropic modons in westerly background flows." *Journal of the atmospheric sciences* 44.17 (1987): 2383-2398.

Van Loon, H. "Mid-season average zonal winds at sea level and at 500 mb south of 25 degrees south, and a brief comparison with the Northern Hemisphere." *J. Appl.Meteor.*,3 (1964): 554-563.

Yukimoto, Seiji, Yukimasa Adachi, and Masahiro Hosaka. "A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3: model description and basic performance (special issue on recent development on climate models and future climate projections)." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 90 (2012): 23-64.

Wiedenmann, Jason M., et al. "The climatology of blocking anticyclones for the Northern and Southern Hemispheres: Block intensity as a diagnostic." *Journal of Climate* 15.23 (2002).

Wilcox, L. J., A. J. Charlton-Perez, and L. J. Gray. "Trends in Austral jet position in ensembles of high-and low-top CMIP5 models." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)* 117.D13 (2012).

Wilks, Daniel S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Vol. 100. Academic press, 2011.