

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas

Hugo Alves Braga

**Propagação de Ondas de Rossby Atmosféricas e a  
Zona de Convergência do Atlântico Sul**

São Paulo

2022





Hugo Alves Braga

# **Propagação de Ondas de Rossby Atmosféricas e a Zona de Convergência do Atlântico Sul**

Tese apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências. Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador(a): Prof. Dr. Tercio Ambrizzi

São Paulo

2022



Tese de autoria de Hugo Alves Braga, sob o título “**Propagação de Ondas de Rossby Atmosféricas e a Zona de Convergência do Atlântico Sul**”, Tese apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências, na área de concentração Ciências Atmosféricas, aprovada em 31 de Agosto de 2022 pela comissão julgadora constituída pelos doutores:

**Prof. PhD. Tercio Ambrizzi**

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo

**Presidente**

**Prof. PhD. Victor Orlando Magaña Rueda**

Instituto de Geografia - Universidad Nacional Autónoma de México

**Prof. Dr. Carlos Frederico Mendonça Raupp**

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - Universidade de São Paulo

**Prof. Dr. Ana Carolina Vasques Freitas**

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - Universidade Federal de Itajubá

**Prof. Dr. Cristiano Prestrelo de Oliveira**

Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas

Universidade Federal do Rio Grande do Norte



*à minha mãe,  
Maria Rosileide Bezerra Alves*



# Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a minha mãe, Maria Rosileide Bezerra Alves, por acreditar em todas as ideias que surgem em minha cabeça, e por ser o maior exemplo de mulher o qual pude ter na minha vida.

Um grande agradecimento ao professor e orientador Tercio Ambrizzi por ter aceitado fazer parte deste projeto e ter contribuído de forma excepcional para o andamento desta pesquisa. Ao parceiro internacional professor PhD. Nicholas M. J. Hall que contribuiu bastante para o andamento desta pesquisa.

Aos meus amigos de toda vida João Felipe Rezende, Yann Costa e Silva, Bruno de Macedo, Felipe de Macedo, Isadora Amorim, Gabriela de Melo, Diogo Sarmento Lessa, Pedro Anversi, Herlon Alves, Leandro Lôbo e Rodrigo Albuquerque, por apoiar e acreditar nesta pesquisa, mesmo sem nunca ter me perguntado algo sobre ela.

Aos meus colegas que se graduaram comigo Matheus Lyra e Lucas Carvalho.

Aos membros do GrEC e alunos de Mestrado e Doutorado do IAG, Elen Pelissaro, Natália Crespo, João Victor Silva, Paola Bueno, Amanda Rehbein, Lívia Dutra, Anderson Bier.

Aos professores Ricardo Camargo, Ricardo Hallak, Carlos Raupp e Pedro Leite da Silva Dias do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP.

Aos membros da Banca PhD Victor Magaña, Dr. Carlos Raupp, Dra. Ana Carolina Vasques Freitas e Dr Cristiano Prestrelo.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, sob o projeto de número “142501/2018-2”.

A todos funcionários do IAG, que sem eles nada disso seria possível.





*“o caos é uma ordem a se decifrar”*

*(José Saramago)*

*“When a butterfly flutters its wings in one part of the world, it can eventually cause a hurricane  
in another.”*

*“If the flap of a butterfly’s wings can be instrumental in generating a tornado, it can equally  
well be instrumental in preventing a tornado.”*

*(Edward N. Lorenz)*

*“Scientific knowledge belongs to humanity.”*

*“There should be no obstacles to accessing knowledge.”*

*(Alexandra Elbakyan)*



# Resumo

Braga, H. A. **Propagação de Ondas de Rossby Atmosféricas e a Zona de Convergência do Atlântico Sul**: 31 de Agosto. 187 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

A relação entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e as propagações de ondas de Rossby foram analisadas durante 34 verões austrais, de acordo com as fases positivas, negativas e neutras do El Niño Oscilação Sul (ENOS). Anomalias das componentes zonais e meridionais do vento, foram calculadas com base na climatologia de 1979-2013 no nível de 200 hPa, e submetidos ao filtro de Lanczos nas bandas temporais de 20-90 dias e 200 dias passa baixa, com a intenção de destacar as variabilidades intrassazonal e interanual, através da análise observacional das composições médias de ZCAS climatológicas e das fases positiva, negativa e neutra do ENOS. As análises desta tese foram divididas em duas partes principais, primeiramente em relação ao domínio da América do Sul, para entender o impacto da ZCAS local, e no domínio do Oceano Pacífico e Atlântico Sul, para compreender os efeitos remotos associados a ZCAS. Da América do Sul com relação as fases do ENOS são destacados; a supressão da ZCIT durante anos de El Niño e a intensificação da mesma durante eventos de La Niña; e sob o Atlântico Equatorial o cavado do nordeste aparenta ser enfraquecido durante anos de La Niña e intensificado durante os anos de El Niño, o que contribui para o estabelecimento dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Do Pacífico à América do Sul foram revelados diferentes guias de ondas de Rossby que interagem com a ZCAS a depender da variabilidade interanual, durante anos de El Niño as ondas são mais longas e partem do Oceano Pacífico Leste, próximo da região da Zona de Convergência do Pacífico Sul. Durante as La Niñas um trem de ondas de Rossby interhemisférico foi identificado partindo do Sudeste da Ásia e dispersando energia para a ZCAS com

até 15 dias, este padrão de ondas de Rossby foi confirmado a partir de simulações numéricas com a utilização do modelo baroclínico DREAM. Posteriormente foi simulado a resposta da atmosfera a perturbações na região da ZCAS sob diferentes estados básicos de ENOS, sendo identificadas propagações de ondas de Rossby a partir da ZCAS aos subtropicais do Hemisfério Norte durante anos de El Niño, destacando a importância dos dutos de oeste na propagação meridional de ondas. Nesta tese foram revelados diferentes guias de ondas de Rossby que interagem com a ZCAS, inclusive guias de ondas interhemisféricos que até então nunca tinham sido relacionados a esta Zona de Convergência Subtropical, este estudo também revela que a ZCAS pode agir como fonte de ondas de Rossby a depender da presença dos dutos de oeste que podem dispersar energia da América do Sul ao Hemisfério Norte, aqui foi demonstrado que esta interação é facilitada durante eventos de El Niño.

# Abstract

The relationship between the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and Rossby Wave propagation was analyzed over 34 summers, with positive, negative and neutral phases of El Niño Southern Oscillation (ENSO). Zonal and meridional wind components anomalies, calculated based on climatology between 1979-2013 at the level of 200 hPa, were submitted to the Lanczos filter for 20-90 days and 200 days low pass bands, with the intention of highlighting intraseasonal and interannual variability, ensuring three mean compositions of SCAZ referring to the positive, negative and neutral phases of ENSO, through observational analysis of the mean composites of climatological SACZ and positive, negative and neutral phases of ENSO. The analyses in this thesis were divided into two main parts, firstly in relation to the South American domain, to understand the impact of local SACZ, and in the Pacific and South Atlantic Ocean domain, to understand the remote effects associated with this cloud band. From South America in relation to the ENSO phases are highlighted; the suppression of the ITCZ during El Niño years and the intensification of the same during La Niña events; and over the Equatorial Atlantic the north-eastern trough appears to be weakened during La Niña years and intensified during El Niño years, which contributes to the establishment of the Upper Tropospheric Cyclonic Vortex (UTCV). From Pacific Ocean to South America, different Rossby wave guides were revealed that interact with SACZ depending on the interannual variability, during El Niño years the waves are longer and depart from the East Pacific Ocean, close to the South Pacific Convergence Zone region. During La Niñas an interhemispheric Rossby wave train was identified departing from Southeast Asia and dispersing energy to the SACZ with up to 16 days, this Rossby wave pattern was confirmed from numerical simulations using the DREAM (Dynamical Research Empirical Atmospheric Model) baroclinic model. Subsequently, the response of the atmosphere to perturbations in the SACZ region under different basic ENSO states was simulated, and Rossby wave

propagation from the SACZ to the subtropics of the Northern Hemisphere was identified during El Niño years, highlighting the importance of the westerly ducts in the meridional wave propagation. In this thesis different Rossby waveguides that interact with the SACZ were revealed, including interhemispheric waveguides that until then have never been related to this Subtropical Convergence Zone, this study also reveals that, the SACZ can act as a source of Rossby waves depending on the presence of the westerly ducts that can disperse energy from South America to the Northern Hemisphere, here it was shown that this interaction is facilitated during El Niño events.

# Lista de Figuras

2.1	Resumo esquemático dos guias de ondas de Hoskins e Ambrizzi (1993) representados pelas setas hachuradas e os padrões preferenciais representados pelas setas pretas. a) estado básico de DJF, b) estado básico de JJA. . . . .	40
2.2	Escoamento climatológico apresentado por Li et al. (2019). escoamento de leste representados pelas regiões em vermelho. a) estado básico de DJFM, b) estado básico de JJAS. . . . .	41
2.3	Solução de aquecimento simétrico sobre o equador para fator de decaimento = 0.1. (A) Contornos de velocidade vertical (contornos sólidos são 0, 0.3, 0.6, o contorno quebrado é - 0.1) sobreposto ao campo de velocidade para a camada inferior. O campo é dominado pelo movimento ascendente na região de aquecimento onde tem aproximadamente a mesma forma que a função de aquecimento. (B) Contornos de pressão de perturbação de pressão (intervalo de contorno 0.3) em todo domínio negativo. Há um canal no equador, no regime oriental, a leste da região de forçante. Encontram-se dois ciclones no noroeste e flancos sudoeste da região da forçante. (C) O fluxo integrado meridionalmente mostrando (i) os contornos da função do fluxo, e (ii) a perturbação pressão. Nota-se o movimento ascendente na região de aquecimento (onde existe um canal) e a subsidência noutros locais. Figura 1 de Gill (1980). . . . .	46
3.1	Primeiro Modo da EOF das anomalias de ROLE ( $Wm^{-2}$ ), durante o período de novembro a março de 1979 a 2013. . . . .	51
4.1	Gráficos de a) total de episódios de ZCAS; b) total episódios de ZCAS durante eventos ENOS. . . . .	61

4.2	Composição média de Todos Episódios de ZCAS; a) Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE, $W/m^2$ ), b) Umidade Específica (g/kg) e vetores do vento (m/s) no nível de 850 hPa, c) Altura Geopotencial (m) e Omega(pa/s) em 500 hPa, d) Divergência ( $10^6 s^{-1}$ ) e vetores do vento (m/s) em 200 hPa. . . . .	63
4.3	Composição média da anomalia do vento zonal e meridional em linhas correntes de Todos episódios de ZCAS nos níveis de a) 200 hPa e anomalia de ROLE, b) 500 hPa, c) 800 hPa. . . . .	64
4.4	Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-Neutras. . . . .	65
4.5	Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-Neutras . . . . .	65
4.6	Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-El Niño. . . . .	66
4.7	Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-El Niño . . . . .	67
4.8	Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-La Niña. . . . .	68
4.9	Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-La Niña. . . . .	68
4.10	Composição média da anomalia de ROLE e das componentes zonal e meridional do vento em linhas correntes no nível de 200 hPa dos episódios de ZCAS que ocorreram durante anos de ; a) Neutro, b) El Niño, c) La Niña. Mesmas composições mas no domínio ( $10^{\circ}N - 30^{\circ}S$ e $40^{\circ}W - 0^{\circ}W$ ); d) Neutros, e) El Niño, f) La Niña. . . . .	70
4.11	Igual a figura 4.10, mas filtrado na banda 20-90 dias. . . . .	71
4.12	Igual a figura 4.10, mas filtrado na banda 200 dias passa-baixa. . . . .	72
5.1	Compostos médios da anomalia de ROLE e da componente meridional e zonal do vento no nível de 200 hPa; a) de todas as ZCAS, b) de ZCAS durante anos neutros, c) de ZCAS durante anos com atuação do El Niño, d) de ZCAS durante anos sob atuação de La Niña. . . . .	77
5.2	Composto médio de função de corrente ( $\psi$ em $10^7 m^2 s^{-1}$ ) de: a) todos os dias de ZCAS em 200 hPa, b) ZCAS Neutras em 200 hPa, c) todos os dias em 800 hPa, d) ZCAS neutras em 800 hPa. Composição média da anomalia da Temperatura da Superfície do Mar em graus de: e) todos os dias de ZCAS, e) ZCAS neutras. . . . .	78
5.3	Igual figura 5.2 mas para El Niño e La Niña. . . . .	79



5.4	Perfil vertical do vento zonal anômalo no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Em cinza escoamentos de oeste anômalo. Esta figura pode ser visualizada maior no Apêndice B.5 . . . . .	81
5.5	Linhas de correntes anômalas em 200 hPa dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Linhas de Correntes na cor vermelha indicam escoamento superior a 10 m/s. . . . .	83
5.6	Igual figura 5.5, mas filtrado na banda 200 dias passa-baixa. . . . .	84
5.7	Compostos de ROLE anômala (sombreado em $Wm^{-2}$ ), $\psi$ ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento zonal e meridional em 200 hPa (vetores em $m.s^{-1}$ ) para os dias de ZCAS: a) Climatológicas, c) Neutras, e) El Niño, g) La Niña. E sobre o domínio da América do Sul: b) Climatológicas, d) Neutras, f) El Niño, h) La Niña. Apenas anomalias com nível de confiança acima de 90% foram plotadas na cor preta, e anomalias não significantes na cor cinza. . . . .	87
5.8	Compostos de ROLE anômala (sombreado em $Wm^{-2}$ ), $\psi$ ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento zonal e meridional em 200 hPa (vetores em $m.s^{-1}$ ) para os dias de ZCAS-Climatológica: a) Não Filtrado, b) Filtrado na banda 20-90 dias, c) Filtrado na banda 200 dias passa-baixa. Apenas anomalias significantes com nível de confiança acima de 90% foram plotadas na cor preta, e anomalias não significantes na cor cinza. . . . .	88
5.9	Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Neutra. . . . .	89
5.10	Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Niño. . . . .	90
5.11	Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Niña. . . . .	92
5.12	Composições das Fontes de Ondas de Rossby "Rossby Wave Source - RWS" ( $10^{-11} s^{-1}$ ) dos dias de ZCAS: a) Climatológicas, b) Neutras, c) El Niño, d) La Niña. . . . .	93
5.13	Composição dos dias de ZCAS-Climatológica do: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e, b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded), EKE (contour) e wave-activity flux (vetor). Intervalo de contorno para o EKE é 5,15,30,45,60 ( $m^2 s^2$ ). Vetores em $m^2 s^2$ . . . . .	95
5.14	Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-Neutras. . . . .	96
5.15	Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-El Niño. . . . .	97
5.16	Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-La Niña. . . . .	98

5.17	Evolução diária da precipitação do episódio de ZCAS do dia 04 ao dia 09 de janeiro da precipitação acumulada do GPCP e $\psi$ ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) em 200 hPa no contorno preto de 0.5, durante os dias; a) 01 janeiro,c) 03 janeiro,e) 04 janeiro,g) 06 janeiro,i) 09 janeiro. E para o domínio da América do Sul $\psi$ ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) em 200 hPa no contorno preto de 0.3, durante os dias; b) 01 janeiro,d) 03 janeiro,f) 04 janeiro,h) 06 janeiro,j) 09 janeiro. . . . .	100
5.18	Composição média do número de onda estacionário durante o período de 1 a 10 de Janeiro de 2009. a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30. . . . .	101
6.1	Perfil Vertical do vento zonal no domínio do Pacifico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) do estado básico de: a) DJF 1992/93 - Neutro, b) DJF 2015/16 - El Niño, c) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste. Esta figura pode ser observada maior no Apêndice F.4 . . . . .	107
6.2	Composição média de ROLE (shaded, $Wm^{-2}$ ). Apenas anomalias com 90% de nível de confiança ou superior foram plotados. a) ZCAS Neutras, b) ZCAS El Niño, c);d) ZCAS La Niña. Sobre as caixas pretas as regiões selecionadas como fonte anômala de calor simuladas pelo modelo baroclínico. . . . .	108
6.3	Composição do Verão Austral do estado básico Neutro: a) Vento Zonal em 200 hPa ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30. . . . .	110
6.4	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacifico Sul (32.5°S - 150°W), sobre o estado básico neutro: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8. . . . .	111
6.5	Composição do Verão Austral do estado básico de El Niño: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30. . . . .	112
6.6	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacifico Sul (25°S - 120°W), sobre o estado básico El Niño: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8. . . . .	112

6.7	Composição do Verão Austral do estado básico de La Niña: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30 . . . . .	113
6.8	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacífico Sul ( $30^\circ S - 170^\circ E$ ), sobre o estado básico La Niña: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8. . . . .	114
6.9	Composições de ZCAS durante anos de La Niña, para a variável de: a) Fontes de Ondas de Rossby, b) anomalia de ROLE com 90% de nível de confiança ou superior. . . . .	115
6.10	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no Sudeste Asiático ( $20^\circ N - 110^\circ E$ ), sobre o estado básico do verão austral de 1999/00: a) região da forçante, b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19. . . . .	116
7.1	Perfil Vertical do Escoamento Zonal Médio no Domínio do Oceano Atlântico ( $10^\circ N - 10^\circ S, 60^\circ W - 0^\circ W$ ) do estado básico de: a) DJF 1979/2016 - Climatológico, b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste. Esta figura pode ser observada maior no Apêndice F.7 . . . . .	121
7.2	Composição do Verão Austral do estado básico Climatológico: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded); e do estado básico neutro : c) e d). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30 . . . . .	123
7.3	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^\circ S - 50^\circ W$ ), sobre o estado básico climatológico: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	123
7.4	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^\circ S - 50^\circ W$ ), sobre o estado básico neutro: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	124
7.5	Composição do Verão Austral do estado básico de El Niño: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30 . . . . .	125

7.6	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS (25°S - 50°W), sobre o estado básico de El Niño: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	126
7.7	Composição do Verão Austral do estado básico de La Niña: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário $K_s$ (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30 . . . . .	126
7.8	Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS (25°S - 50°W), sobre o estado básico de La Niña: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	127
A.1	Correlação entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen, 2019 durante eventos de ENOS. . . . .	143
A.2	Correlação mensal entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen, 2019 . . . . .	144
A.3	Correlação mensal entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen; a) todos os dias, b) Episódios de El Niño, c) Episódios de La Niña, d) Episódios Neutros. . . . .	145
A.4	Series temporais da PC 1 de Braga e Ambrizzi e dos Índices ZCAS norte e ZCAS média de Nielsen, durante o período o verão 2012-2013, . . . . .	146
B.1	Composição média da Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE) dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña. . . . .	147
B.2	Composição média da Umidade Especifica (g/kg) e vetores do vento (m/s) no nível de 850 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña. . . . .	148
B.3	Composição média da Altura Geopotencial (m) e Omega(pa/s) em 500 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña. . . . .	149
B.4	Composição média da Divergência ( $10^6 s^{-1}$ ) e vetores do vento (m/s) em 200 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña . . . . .	150
B.5	Perfil Vertical do vento zonal anômalo no domínio do Pacifico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Em cinza escoamentos de oeste anômalo. . . . .	151

C.1	Composição média da anomalia de ROLE de todos episódios de ZCAS. a) não filtrado, b) filtrado na banda 06-25 dias, c) filtrado na banda 20-90 dias, d) filtrado na banda 200 dias passa-baixa. . . . .	153
C.2	Composição média da anomalia de ROLE dos episódios de ZCAS que ocorreram durante anos de ; a) Neutro, b) El Niño, c) La Niña. Filtradas na banda 06-25 dias; d) Neutro, e) El Niño, f) La Niña. 20-90 dias; g) Neutro, h) El Niño, i) La Niña. 200 dias passa-baixa. j) Neutro, k) El Niño, l) La Niña. . . . .	154
D.1	Evolução diária precipitação diária do episódio de ZCAS do dia 04 de Janeiro das variáveis de precipitação acumulada do GPCP e ( $\psi \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ). a) 1 jan, b) 2 jan, c) 3 jan, d) 4 jan, e) 5 jan, f) 6 jan, g) 7 jan, h) 8 jan, i) 9 jan. . . . .	155
D.2	Mesmo que figura x, mas filtrado na banda 06-25 dias. . . . .	156
D.3	Evolução diária precipitação diária do episódio de ZCAS do dia 04 de Janeiro das variáveis de precipitação acumulada do GPCP e ( $\psi \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ).a) 1 jan, b) 2 jan, c) 3 jan, d) 4 jan, e) 5 jan, f) 6 jan, g) 7 jan, h) 8 jan, i) 9 jan. . . . .	157
D.4	Mesmo que figura x, mas filtrado na banda 06-25 dias. . . . .	158
E.1	Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 1988-89 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19. . . . .	159
E.2	Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 1999-00 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19. . . . .	160
E.3	Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19. . . . .	160
E.4	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Neutro 1992-93 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	161
E.5	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño Moderado 2002-03 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	161
E.6	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña Moderada 2005-06 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	162
E.7	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño 2015-16 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	162
E.8	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1989-99 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	163

E.9	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1999-00 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	163
E.10	ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8. . . . .	164
E.11	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Climatológico 1979-16 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	165
E.12	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Neutro 1992-93 ( $\psi$ $= 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	166
E.13	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño 2015-16 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	167
E.14	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño Mo- derado 2002-03 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	168
E.15	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña Mo- derada 2005-06 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	169
E.16	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1988-89 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	170
E.17	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1999-00 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	171
E.18	ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19. . . . .	172
F.1	Composição média do vento zonal e meridional durante: a) todos os dias de ZCAS, b) ZCAS neutras, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Vetores cinzas indicam escoamento inferior a 20 m/s. . . . .	173
F.2	Composição do escoamento zonal do vento (u, intervalo de contorno $10 ms^{-1}$ ) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06. . . . .	174
F.3	Composição do Número de Onda Estacionária (Ks) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06. . . . .	175

F.4	Perfil Vertical do vento zonal no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) do estado básico de: b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste. . . . .	176
F.5	Composição do escoamento zonal do vento (u, intervalo de contorno 10 ms <sup>-1</sup> ) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06. . . . .	177
F.6	Composição do Número de Onda Estacionária (Ks) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06. . . . .	178
F.7	Perfil Vertical do Escoamento Zonal Médio no Domínio do Oceano Atlântico (10°N - 10°S, 60°W - 0°W) do estado básico de: a) DJF 1979/2016 - Climatológico, b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña. . . . .	179





## Lista de Tabelas

6.1	Estados Básicos dos Verões Austrais - DJF . . . . .	106
7.1	Estados Básicos dos Verões Austrais - DJF . . . . .	120



# Sumário

1. Introdução . . . . .	31
1.1 Hipótese . . . . .	35
1.2 Objetivos . . . . .	35
2. Fundamentação Teórica . . . . .	37
2.1 Teoria Linear das Ondas de Rossby . . . . .	37
2.2 Propagação Meridional de Ondas de Rossby . . . . .	39
2.3 Acoplamento entre Ondas de Rossby Baroclinicas e Barotrópicas . . . . .	42
2.4 Ondas Equatoriais . . . . .	45
3. Dados e Metodologia . . . . .	49
3.1 Dados e Softwares Utilizados . . . . .	49
3.1.1 ECMWF - Reanalyse . . . . .	49
3.1.2 Convecção . . . . .	49
3.1.3 Precipitação . . . . .	49
3.1.4 Softwares Utilizados . . . . .	50
3.2 Metodologia . . . . .	50
3.2.1 Caracterização Objetiva . . . . .	50
3.2.2 Filtro de Lanczos . . . . .	52
3.2.3 Wave Activity Flux e Eddy Kinetic Energy . . . . .	53
3.2.4 Fonte de Ondas de Rossby . . . . .	53
3.2.5 Ondas de Rossby Estacionárias ( $K_S$ ) . . . . .	54
3.2.6 Modelo Baroclínico . . . . .	54

3.2.6.1	Sistema de Equações do Dynamical Research Empirical Atmospheric Model (DREAM) . . . . .	55
3.2.6.2	Dynamical Research Empirical Atmospheric Model (DREAM)	56
3.3	Procedimentos . . . . .	57
3.3.1	Etapa Observacional . . . . .	57
3.3.2	Simulação Numérica . . . . .	58
4.	<i>América do Sul</i> . . . . .	59
4.1	A Zona de Convergência do Atlântico Sul . . . . .	59
4.2	Frequência dos Episódios . . . . .	61
4.3	Estrutura Média dos Episódios de ZCAS . . . . .	62
4.3.1	ZCAS - Climatológica . . . . .	62
4.3.2	ZCAS - Neutra . . . . .	64
4.3.3	ZCAS - El Niño . . . . .	65
4.3.4	ZCAS - La Niña . . . . .	67
4.4	A Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis .	69
4.5	Conclusões . . . . .	73
5.	<i>Pacífico América do Sul</i> . . . . .	75
5.1	A Zona de Convergência do Atlântico Sul . . . . .	75
5.2	Estrutura Média da Circulação Anômala dos Episódios de ZCAS . . . . .	76
5.3	Escoamento Tropical . . . . .	80
5.3.1	Perfil Vertical . . . . .	81
5.3.2	Altos Níveis Troposférico Tropicais . . . . .	82
5.4	Ondas de Rossby e a ZCAS . . . . .	84
5.4.1	Escoamento Significativo - Altos Níveis Troposférico . . . . .	85
5.4.2	Escoamento Significativo - Intrassazonal e Interanual . . . . .	88
5.4.2.1	ZCAS - Climatológica . . . . .	88
5.4.2.2	ZCAS - Neutra . . . . .	89
5.4.2.3	ZCAS - El Niño . . . . .	90
5.4.2.4	ZCAS - La Niña . . . . .	91
5.4.3	Análise das Ondas de Rossby . . . . .	93
5.5	Estudo de Caso . . . . .	99

5.6	Conclusões . . . . .	101
6.	<i>Simulação Numérica - Interação Trópicos - Extratropicos: Parte I - Efeitos Remotos sob a ZCAS</i> . . . . .	105
6.1	Estado Básico . . . . .	106
6.2	Fontes de Ondas de Rossby . . . . .	108
6.3	A Zona de Convergência do Pacífico Sul como fonte de Ondas de Rossby . . . . .	109
6.3.1	Neutro . . . . .	110
6.3.2	El Niño . . . . .	111
6.3.3	La Niña . . . . .	113
6.4	O Sudeste Asiático como fonte de Ondas de Rossby . . . . .	114
6.5	Conclusões . . . . .	117
7.	<i>Simulação Numérica - Interação Trópicos - Extratropicos: Parte II - A ZCAS como fonte de Ondas de Rossby</i> . . . . .	119
7.1	Estado Básico . . . . .	120
7.2	A Zona de Convergência do Atlântico Sul como fonte de Ondas de Rossby . . . . .	121
7.2.1	Climatológico e Neutro . . . . .	122
7.2.2	El Niño . . . . .	125
7.2.3	La Niña . . . . .	126
7.3	Conclusões . . . . .	127
8.	<i>Considerações Finais</i> . . . . .	129
8.1	Sumário e Conclusões Gerais do Trabalho . . . . .	129
8.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	131
	<i>Referências</i> . . . . .	133
	<i>Apêndice</i> . . . . .	141
A.	<i>Correlação da Caracterização ZCAS</i> . . . . .	143
A.1	Correlação com o Índice ZCAS de Nielsen et al. 2019 . . . . .	143

<i>B. Estrutura Média dos Episódios de ZCAS</i> . . . . .	147
B.1 Radiação de Onda Longa Emergente . . . . .	147
B.2 Umidade Específica - 850 hPa . . . . .	148
B.3 Altura Geopotencial e $\hat{\Omega}$ - 500 hPa . . . . .	149
B.4 Divergência e U;V - 200 hPa . . . . .	150
B.5 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ ) - Domínio Oceano Pacífico Sul . . . . .	151
<i>C. Anomalias de ROLE filtrados e não filtrados - América do Sul</i> . . . . .	153
C.1 Composição Climatológica . . . . .	153
C.2 Neutro, El Niño e La Niña . . . . .	154
<i>D. Episódios Interhemisféricos</i> . . . . .	155
D.1 Caso - 04 Janeiro de 2009 - América do Sul . . . . .	155
D.1.1 Filtrado na Banda 06-25 dias . . . . .	156
D.2 Caso - 04 Janeiro de 2009 . . . . .	157
D.2.1 Filtrado na Banda 06-25 dias . . . . .	158
<i>E. Todas Simulações</i> . . . . .	159
E.1 RWS - Sudeste Asiático . . . . .	159
E.2 ZCPS como fonte de ondas de Rossby . . . . .	161
E.3 ZCAS como fonte de ondas de Rossby . . . . .	165
<i>F. Análises Extras</i> . . . . .	173
F.1 Jato . . . . .	173
F.2 Estados Básicos - Pacífico . . . . .	174
F.2.1 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ ) . . . . .	176
F.3 Estados Básicos - Atlântico . . . . .	177
F.3.1 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ ) . . . . .	179

## Introdução

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma banda de nebulosidade subtropical característica do verão austral na América do Sul, facilmente identificada nos compostos climatológicos de precipitação e Radiação de Onda Longa (ROLE), devido a sua persistência e influência no clima local. Esta banda de nebulosidade é responsável por muitos impactos na variabilidade de água no Brasil, seja para consumo humano, irrigação na agricultura, reservatórios de água e produção de energia hidrelétrica, que é responsável por aproximadamente 65% da matriz energética brasileira (Ministério de Minas e Energia, 2020), sendo a região Sudeste a que concentra a maior quantidade, e também é a mais impactada pelas variações da ZCAS.

A ZCAS é uma zona de nebulosidade persistente com características ondulatórias em sua retaguarda na maioria de suas composições médias e frequentemente analisada em estudos de propagações de ondas com foco na América do Sul, sendo uma perturbação atmosférica importante de grande escala devido a interação intrassazonal com o padrão Pacific South American (PSA) e a Oscilação Madden Jullian (OMJ) (Cunningham e Cavalcanti, 2006; Liebmann et al., 1999), além de ser um dos principais sistemas atmosféricos responsável pela precipitação na região Sudeste do Brasil durante os meses de primavera e verão austral, com aproximadamente  $10 \text{ mm.dia}^{-1}$ , a partir de uma banda de nebulosidade diagonal persistente com no mínimo 4 dias consecutivos e orientação noroeste-sudeste, que se estende da Amazônia até o Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (Kodama, 1992, 1993; Carvalho et al., 2002, 2004; Ambrizzi e Ferraz, 2015; Nielsen et al., 2019; Silva et al., 2019; Rosa et al., 2020).

Estruturas semelhantes a ZCAS são encontradas no Pacífico Sul e Índico Sul, embora a Zona de Convergência do Índico Sul (ZCIS) não seja tão marcante quanto a ZCAS e a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS). A ZCAS é observada através do canal de infravermelho dos produtos gerados por satélites, sendo uma banda frontal situada sobre a região Sudeste do Brasil,

e parte do Oceano Atlântico Sul, durante um período de 4 a 20 dias (Figuerola et al., 1995; Carvalho et al., 2002; Ninomiya, 2007). Para estabelecer este sistema atmosférico o seguinte critério deve ser observado: 1) convergência de umidade em 850 hPa com permanência mínima de 4 dias; 2) cavado em 500 hPa a oeste da região de convergência em superfície; 3) faixa uniforme no campo de ômega em 500 hPa, com movimentos ascendentes e na mesma posição da ZCAS; 4) presença da alta da Bolívia em altos níveis, de um cavado sobre a região Nordeste do Brasil, e, em algumas situações, a presença de um vórtice ciclônico de altos níveis; 5) nebulosidade persistente e semi-estacionária em imagens de satélite (Ambrizzi e Ferraz, 2015).

Um dos principais mecanismos que contribuem com a configuração da ZCAS, e também com os grandes volumes de precipitações na região, durante os meses de fim da primavera e do verão austral, é a Monção da América do Sul (South American Monsoon System - SAMS), responsável pelo transporte de umidade do norte do Brasil e das regiões amazônicas às regiões centrais e sudeste do continente sul americano, (Casarin e Kousky, 1986; Kodama, 1992, 1993; Gan, 2009; Grimm, 2011). Tanto a SAMS, quanto a ZCAS, podem atuar em conjunto, modulando o ciclo de precipitação sobre os trópicos e subtropicais na América do Sul. Jorgetti et al. (2014) sugerem, que a ZCAS pode ocorrer independente da SAMS estar ativa ou inativa, tendo como consequência diferenças na intensidade e posicionamento na configuração da zona de nebulosidade.

O El Niño Oscilação Sul (ENOS) possui uma grande influência na dinâmica do posicionamento da ZCAS, de acordo com alguns estudos. Carvalho et al. (2004) observaram que durante a fase quente a ZCAS possui características e nebulosidade oceânica, enquanto que na fase fria é observado uma maior atividade convectiva continental, Ferreira et al. (2004) também corroboraram com estes resultados, e verificaram que eventos de ZCAS em anos de La Niña tem uma correlação maior com a presença da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto que o mesmo não é verificado para os casos de El Niño.

Van Der Wiel et al. (2015) destacaram a ligação entre a ZCPS e a ZCAS a partir da propagação de um trem de ondas de Rossby, disparado pela divergência da ZCPS, onde embebidos pelos dutos de oeste e guiado pelo jato subtropical do Hemisfério Sul, é refratado em direção ao Pacífico Oeste e a América do Sul. Hoskins e Ambrizzi (1993); Ambrizzi (1994); Ambrizzi e Hoskins (1997); Grimm e Silva Dias (1995); Magaña e Ambrizzi (2005) já haviam destacado a relação entre trens de ondas de Rossby e o verão na América do Sul, e por vezes até indicando a ocorrência de interações interhemisféricas. Duas regiões sobre o Pacífico Leste e sobre o Atlântico são



preferenciais para propagações interhemisféricas onde o escoamento da alta troposfera é predominantemente de oeste. Além disso, a depender da variabilidade interanual, estes escoamentos de Oeste podem ser intensificados e as ondas de Rossby podem se propagar para mais longe (Webster e Holton, 1982; Tomas e Webster, 1994; Li et al., 2019).

Carvalho et al. (2011) ao analisar, o Large-scale Index for South America Monsoon (LISAM), foram os primeiros a sugerir uma relação interhemisférica de ondas que afetam a ZCAS, considerando um estado básico climatológico. Vários estudos tem mencionado a influência de ondas de Rossby extratropicais sobre a ZCAS numa escala intrasazonal (Grimm e Silva Dias, 1995; Figueroa et al., 1995; Liebmann et al., 1999; Carvalho et al., 2004; Cunningham e Cavalcanti, 2006), porém a investigação dinâmica de como essas propagações de ondas podem interferir na ZCAS em diferentes escalas temporais não é bem descrita na literatura, onde é apenas destacado a presença do trem de ondas em meio à um estado básico médio climatológico.

Hoskins e Karoly (1981), ao analisarem, a resposta linear das ondas de Rossby a forçantes térmicas e orográficas, introduziram o conceito de latitudes críticas, onde as regiões equatoriais seriam dominadas por escoamentos de leste, enquanto que as latitudes médias seriam características de escoamentos de oeste e a partir disto a zona equatorial é considerada uma barreira para as ondas de Rossby, pois a região seria característica de vento zonal quase nulo, o que é muito restritivo para a propagação meridional de ondas entre os hemisférios, sendo esta uma região que "prenderiam" as ondas que se propagam das latitudes extratropicais, características de um escoamento de oeste mais intenso. O trabalho de Webster e Holton (1982) vai além do proposto a respeito das latitudes críticas e analisa a região equatorial por meio de um escoamento zonal mais realista, onde destaca dois "wind-wave corridors", um no Oceano Pacífico Central/Leste e outro no Oceano Atlântico Equatorial, devido ao escoamento de oeste significativo na região. Diversos testes foram realizados a partir da mesma forçante subtropical com diferentes intensidades do vento zonal equatorial e foram observados os Cross Equatorial Waves (CEWs) nas simulações em que o vento zonal de oeste eram mais significativos.

O estado básico climatológico médio por si só não é suficiente para explicar todas as variações dos dutos de oeste, uma vez que a variabilidade interanual do ENOS é forte o suficiente para gerar anomalias na circulação planetária equatorial e tropical. Hoskins e Ambrizzi (1993); Ambrizzi (1994); Tomas e Webster (1994), sugeriram que, dependendo da variabilidade interanual, as propagações de ondas de Rossby podem ter guias diferentes e possibilidade de propagação interhemisférica, desde que haja um escoamento de oeste significativo que permita este tipo de

teleconexão entre os hemisférios. Ambrizzi (1994) demonstrou que, durante anos de La Niña, essas propagações interhemisféricas são possíveis devido ao escoamento de oeste na região do Pacífico Central, forçado pela anomalia negativa da temperatura da superfície do mar (TSM), enquanto que durante os anos de El Niño, o escoamento de altos níveis é caracterizado por um forte escoamento de leste tropical, o que dinamicamente dificulta as propagações de ondas interhemisféricas, agindo como uma barreira. Li et al. (2019) apontaram a importância da CEWS e da janela equatorial com escoamento de oeste nos padrões de teleconexão global, demonstrando que as interações entre Hemisfério Norte (HN) e Hemisfério Sul (HS) ocorrem com maior frequência durante o verão austral (DJF) pelo Oceano Pacífico Leste Equatorial, enquanto que as interações Hemisfério Sul - Hemisfério Norte ocorrem majoritariamente pelo corredor de oeste do Oceano Atlântico Equatorial.

As características necessárias para propagação de ondas em geral são encontradas ao longo das correntes de jatos subtropicais e nas regiões de maior fluxo de oeste, também descritas na literatura como dutos de oeste, que se estendem das latitudes médias as equatoriais durante o verão e outono austral sob o Oceano Pacífico e Atlântico (Hsu e Lin, 1992; Kiladis e Weickmann, 1997), sendo que essas correntes de jatos podem atuar como guias de ondas de Rossby, assim como descrito por Hoskins e Ambrizzi (1993).

A discussão da ZCAS como fonte de ondas de Rossby foi brevemente introduzida por Grimm e Silva Dias (1995) em meados dos anos 90, a partir das funções de influência através de um modelo barotrópico forçado pela divergência em meio a um estado básico climatológico, onde foi observado um guia de ondas que após ser disparado pela atividade convectiva na região da ZCAS interagiu com o continente europeu. Embora a dinâmica das ondas de Rossby e a própria circulação de grande escala contribua para esse tipo de propagação e teleconexão interhemisférica partindo da ZCAS, pouco se foi explorado. Vários estudos sugeriram a interação intrassazonal entre a Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a ZCAS por meio de ondas de Rossby (p. ex. Grimm e Silva Dias (1995); Figueroa et al. (1995); Liebmann et al. (1999); Carvalho et al. (2004); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015), porém apenas Grimm e Silva Dias (1995) atribuíram a ZCAS como uma possível fonte de ondas de Rossby.

## 1.1 Hipótese

A tese aqui apresentada parte da premissa que as variações dinâmicas causadas pelas variabilidades interanual e intrassazonal são fortes o suficiente para perturbar a circulação atmosférica e os guias de ondas que podem influenciar a ZCAS, contribuindo para que haja variações no posicionamento e intensidade desta zona de convergência subtropical. Têm-se também como hipótese a possibilidade da ZCAS propagar ondas, semelhante ao que ocorre com a ZCPS, atualizando uma sugestão anterior mencionada na literatura.

## 1.2 Objetivos

Consiste na compreensão e caracterização dinâmica das propagações de ondas de Rossby em diferentes escalas temporais e suas relações com a ZCAS e sistemas atuantes na América do Sul durante o período de novembro a março, avaliando seu impacto climático no continente sul americano. Desta forma pretende-se responder as seguintes questões:

I – Qual o padrão característico de propagação de ondas nas escalas intrassazonal e interanual durante eventos ZCAS sob as diferentes fases do ENOS e como ocorrem?

II – Como é a interação dinâmica das escalas intrassazonais e interanuais das propagações de ondas de Rossby durante eventos ZCAS sob as diferentes fases do ENOS?

III – Qual a influência dos oceanos Pacífico Sul e Atlântico Sul nos padrões de propagação das ondas?

IV - Quais sistemas atmosféricos interagem em conjunto com a ZCAS e as propagações de ondas de Rossby?

V - A ZCAS é fonte de Ondas de Rossby?



# Fundamentação Teórica

Este capítulo tem como objetivo principal realizar uma descrição geral das ondas de Rossby barotrópicas não divergentes e sua propagação meridional, com a intenção de facilitar a interpretação dos capítulos a seguir sobre as propagações de ondas de Rossby, e da possibilidade de propagação de ondas interhemisféricas, de acordo com a teoria linear. Apenas as ideias básicas e as conclusões gerais serão apresentadas, as quais auxiliarão na compreensão das teleconexões atmosféricas sugeridas por esta tese.

### 2.1 Teoria Linear das Ondas de Rossby

A teoria das ondas de Rossby inicialmente proposta por Rossby (1939), descreve que uma fonte de vorticidade numa atmosfera barotrópica, com um fluxo básico zonal estável de oeste, produz uma série de cristas e cavados para os quais a energia se propaga com a velocidade de grupo. Podemos chamar esta série de cristas e cavados como ondas de Rossby que são oscilações de larga escala que se propagam no oceano e atmosfera, sendo o seu principal mecanismo de ajuste do fluido geostrófico, a perturbação de grande escala, cuja força restauradora é a variação do parâmetro de Coriolis com a latitude, associada à conservação de vorticidade absoluta. Este movimento ondulatório, de escala sinótica, caracterizado pela alternância de cristas e cavados no plano horizontal, possui uma característica singular, onde sua velocidade de fase tem sempre uma componente para oeste em relação ao fluxo básico, enquanto que sua velocidade de grupo é para leste.

O modelo barotrópico de Rossby (1939), embora seja de grande simplicidade, é de grande importância para a compreensão das propagações de ondas na atmosfera, e as equações que descrevem este modelo são apresentadas a seguir, sendo baseadas numa atmosfera barotrópica.

Da equação da vorticidade absoluta com escoamento básico de oeste, têm-se:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial}{\partial x}\right)\nabla^2\psi + \beta\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (2.1)$$

Onde  $\bar{u}$  é a variação do escoamento de oeste com a latitude, e  $\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$  que é a variação do parâmetro de coriolis com a latitude.

Da relação de dispersão:

$$\psi = \psi_0 e^{i(kx + ly + \omega t)} \quad (2.2)$$

Chega-se a:

$$\omega = \bar{u}k - \frac{\beta * k}{k^2 + l^2} \quad (2.3)$$

Onde:

$$\beta * = \beta - \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \quad (2.4)$$

é o gradiente meridional da vorticidade absoluta,  $k$  e  $l$  são os números de onda zonal e meridional e  $K = (k^2 + l^2)$  o número de onda total, e  $\omega$  a frequência da onda, sendo a velocidade da onda  $(c_{x,y}) \frac{\omega}{k}, \frac{\omega}{l}$ , e a velocidade de grupo  $(cg_{x,y}) \frac{\partial\omega}{\partial k}, \frac{\partial\omega}{\partial l}$ .

Considerando  $\omega = 0$  e  $c = 0$ , temos a seguinte equação para a onda estacionária:

$$K = K_s = \left(\frac{\beta *}{\bar{u}}\right)^{1/2} \quad (2.5)$$

Onde as propagações de ondas só são possíveis se ambos  $\bar{u}$  e  $\beta *$  forem positivos, sendo  $\bar{u}$  positivo uma representação de um escoamento de oeste.

De acordo com Hoskins e Karoly (1981), quando o escoamento simétrico básico zonal varia suavemente na direção meridional em relação a derivada das perturbações, o número de onda zonal ( $k$ ) permanece constante na medida em que uma onda se propaga, enquanto que o número de onda meridional ( $l$ ) varia. Portanto, para uma onda de Rossby estacionária, o número de onda zonal permanece constante e o ângulo  $\alpha = \tan^{-1}(l/k)$  varia apenas em função do número de onda meridional. Logo, para uma onda de Rossby propagando-se zonalmente ( $l=0$ ), chega-se a seguinte velocidade de grupo estacionária  $cg = 2\bar{u}$ , onde a atividade de ondas de Rossby se propaga zonalmente com o dobro da velocidade do escoamento zonal.

O número de onda estacionário ( $K_s$ ) foi calculado considerando a projeção de Mercator, com base em Hoskins e Karoly (1981); Hoskins e Ambrizzi (1993) e assumindo a equação da seguinte forma:

$$K_s = \left(\frac{a\beta^*}{\bar{v}}\right)^{1/2} = \left\{ \left[ 2\Omega - \left(\frac{1}{\cos\phi} \frac{\partial}{\partial\phi}\right)^2 (\cos^2\phi\bar{v}) \right] / \bar{v} \right\}^{1/2} \cos\phi \quad (2.6)$$

Sendo  $\phi$  a latitude,  $\bar{v} = \bar{u}/a\cos\phi$ ,  $a$  é o raio da Terra,  $\Omega$  a velocidade angular e  $\beta$  é o gradiente meridional da velocidade absoluta, que em coordenadas de Mercator assume a seguinte forma:

$$\beta^* = \left[ 2\Omega - \left(\frac{1}{\cos\phi} \frac{\partial}{\partial\phi}\right)^2 (\cos^2\phi\bar{v}) \right] \frac{\cos^2\phi}{a} \quad (2.7)$$

O número de onda estacionário ( $K_s$ ) indica regiões em que as propagações de ondas de Rossby são permitidas e ou inibidas, destacando a importância das correntes de jatos como guias de ondas. Uma vez que as propagações de ondas estacionárias podem ser intensificadas e guiadas pelas correntes de jatos, a investigação e compreensão dinâmica do escoamento zonal é de grande importância.

## 2.2 Propagação Meridional de Ondas de Rossby

As propagações meridionais de ondas de Rossby são possíveis desde que haja um escoamento de oeste significativo, e isso pode ser observado a partir das equações que serão apresentadas nessa seção. De acordo com Whitham (1960), a atividade das ondas se movem com a velocidade de grupo, onde a partir da equação (2.3) podemos chegar nas seguintes velocidades de grupo:

$$cg_x = \frac{\partial\omega}{\partial k} = \frac{\bar{u} - \beta^* (l^2 - k^2)}{(k^2 + l^2)^2} \quad (2.8)$$

$$cg_y = \frac{\partial\omega}{\partial l} = \frac{2\beta^* kl(l^2 - k^2)}{(k^2 + l^2)^2} \quad (2.9)$$

Realizando algumas modificações em (2.5) chegamos a:

$$l^2 = \frac{\beta^*}{\bar{u}} - k^2 \quad (2.10)$$

Baseado em Webster e Holton (1982) e considerando (2.10) como resultado das ondas estacionárias e aplicando em (2.8) e (2.9), temos:

$$cg_x = 2\bar{u}^{-2}k^2/\beta^* \quad (2.11)$$

$$cg_y = 2\bar{u}^{-2}kl/\beta^* \quad (2.12)$$

Em (2.10) e (2.11) é evidente que dada a escala de  $k$ , ambas componentes de velocidade de grupo intensificam dado o crescimento de  $\bar{u}$ , logo o escoamento de oeste sendo significativo e intenso é uma das características para que haja propagação meridional de ondas de Rossby.

Webster e Holton (1982) observaram que as propagações de ondas partindo do equador com diferentes intensidades de  $\bar{u}$  se deslocavam para mais longe a medida que  $\bar{u}$  se intensificava, notando que quando  $\bar{u} = 5 \text{ ms}^{-1}$  a energia se propagava apenas por 1800 km em 10 dias, enquanto que quando  $\bar{u} = 10 \text{ ms}^{-1}$  a energia dessa onda se propagava meridionalmente por 9000 km em 10 dias. Eles também notaram que tanto  $cg_x$  quanto  $cg_y$  eram também intensificados.

Hoskins e Ambrizzi (1993) também encontraram resultados semelhantes, porém a partir do traçado dos guias de ondas de Rossby (ray-tracing), considerando  $K$  como direção partindo de  $cg = 2\bar{u}\cos\alpha$  e sendo  $\alpha$  um ângulo feito por  $K$  na direção zonal  $x$ ,  $\tan\alpha = \frac{1}{K}$ . A partir dos traçados de ondas de Rossby foi identificado vários guias de ondas preferencias, que se referem a um experimento linearmente barotrópico, onde foram identificadas as regiões preferenciais de propagação de ondas a partir dos jatos das regiões do Atlântico Norte e dos continentes europeu, africano e asiático, além do jato do HS e podem ser observados pela figura 2.1, em que as setas pretas se referem as regiões preferencias de propagação de ondas e por vezes demonstrando propagação interhemisférica pela janela equatorial de oeste do Oceano Pacífico.

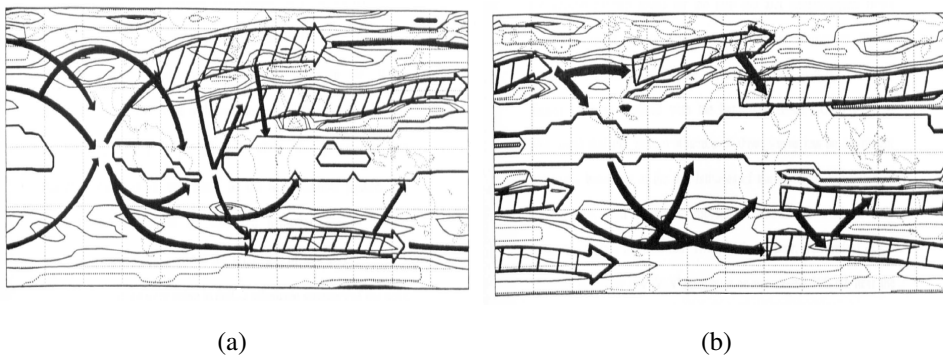


Figura 2.1: Resumo esquemático dos guias de ondas de Hoskins e Ambrizzi (1993) representados pelas setas hachuradas e os padrões preferenciais representados pelas setas pretas. a) estado básico de DJF, b) estado básico de JJA.



Nas figuras 2.1.a.b também se destacam as regiões que não são favoráveis as propagações de ondas, que são aquelas com contornos pretos maiores na região equatorial, que é característica do escoamento de leste.

Li et al. (2019), semelhante ao proposto por Hoskins e Ambrizzi (1993), observaram os padrões ondulatorios que cruzam a região equatorial durante o período de 1980 a 2017, a partir de uma análise observacional. Eles destacam duas regiões preferencias para que ocorra esse tipo de propagação interhemisférica, a principal, e com maior frequência de passagem de trens de ondas, é localizada na região equatorial do Oceano Pacífico e outra é localizada no Oceano Atlantico, ambas com maior frequência durante o verão. Essas duas janelas interhemisféricas já haviam sido discutidas, tanto por simulações barotrópicas (Webster e Holton, 1982), quanto por análises observacionais (Tomas e Webster, 1994), devido a persistência do escoamento de oeste em ambas as regiões e podem ser observadas pela figura 2.2, que demonstra o escoamento médio em 300 hPa durante os meses de Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março na figura 2.2.a, e os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro na figura 2.2.b.

Li et al. (2019) ainda destacam que as maiorias das interações interhemisféricas entre o HN e o HS ocorre majoritariamente pelo Oceano Pacífico, enquanto que as ondas que cruzam o equador partindo do HS ocorrem em sua maioria pelo Oceano Atlântico.

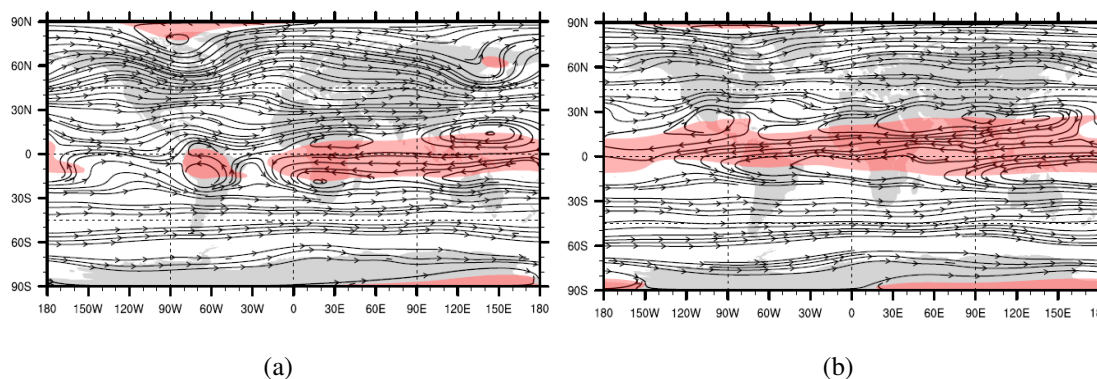


Figura 2.2: Escoamento climatologico apresentado por Li et al. (2019). escoamento de leste representados pelas regiões em vermelho. a) estado básico de DJFM, b) estado básico de JJAS.

### 2.3 Acoplamento entre Ondas de Rossby Baroclínicas e Barotrópicas

Liebmann et al. (1999), com base em Ambrizzi e Hoskins (1997), acreditavam que o posicionamento da ZCAS se dava em parte a partir do caminho preferencial da dispersão de energia das ondas de Rossby com direção equatorial pelo guia de onda do estado básico sendo semelhante ao proposto por Kiladis (1998), onde a banda de nebulosidade da ZCIT no Pacífico Leste seria dependente da presença da atividade de onda.

A faixa tropical tende a ter uma estrutura baroclínica enquanto que nas latitudes médias a estrutura vertical tende a ser mais barotrópica. Termos baroclínicos excitando modos barotrópicos podem ser compreendidos a partir do acoplamento das componentes baroclínicas e barotrópicas pelo modelo de duas camadas e explicadas a partir do cisalhamento vertical.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} - \beta v + \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} + \beta u + \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial p} + u \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial p} + v \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial \phi}{\partial p} + \sigma \omega = -\frac{R}{p} \frac{\dot{Q}}{c_p} \quad (2.16)$$

Onde  $u$  e  $v$  corresponde às perturbações das componentes zonais e meridionais do vento, nas direções  $x$  (para leste) e  $y$  (para norte);  $\phi$  representa a perturbação do campo geopotencial e  $\omega = \frac{Dp}{Dt}$  que é a perturbação da velocidade vertical na coordenada  $p$ .  $\sigma$  refere-se ao parâmetro de estabilidade estática;  $R$  é referente à constante dos gases para o ar seco;  $c_p$  corresponde a capacidade térmica do ar seco a pressão constante e  $\dot{Q}$  é uma representação da forçante diabática.

Do modelo de duas camadas:

$\omega_0$  ----- 0 hPa

$u_1, v_1, \phi_1$  ----- 250 hPa

$\phi_2, \omega_2, \dot{Q}_2, \sigma_2$  ----- 500 hPa

$u_3, v_3, \phi_3$  ----- 750 hPa

$\omega_4$  ----- 1000 hPa

Do escoamento zonal (análogo a outras variáveis):

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + \omega_1 \frac{\Delta(u_1 - u_3)}{\Delta p} - \beta v_1 + \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial u_3}{\partial y} + \omega_3 \frac{\Delta(u_1 - u_3)}{\Delta p} - \beta v_3 + \frac{\partial \phi_3}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

Onde:

$u_m$  = Componente Barotrópica do Escoamento Zonal

$u_t$  = Componente Baroclínica do Escoamento Zonal

$$u_m = \frac{(u_1 + u_3)}{2} \text{ e } u_t = \frac{(u_1 - u_3)}{2}$$

$$u_m + u_t = \frac{(u_1 + u_3)}{2} + \frac{(u_1 - u_3)}{2} = u_1$$

$$u_m - u_t = \frac{(u_1 + u_3)}{2} - \frac{(u_1 - u_3)}{2} = u_3$$

Logo,  $u_1 = u_m + u_t$  e  $u_3 = u_m - u_t$

Como, também  $\omega_2 = \frac{(\omega_1 + \omega_3)}{2}$

Aplicando  $u_1$  em (2.17), têm-se:

$$u_1 = \frac{\partial u_m}{\partial t} + \frac{\partial u_t}{\partial t} + (u_m + u_t) \frac{\partial (u_m + u_t)}{\partial x} + (v_m + v_t) \frac{\partial (v_m + v_t)}{\partial y} + \omega_1 \frac{u_t}{\Delta p} - \beta v_m + \beta v_t + \frac{\partial \phi_m}{\partial x} + \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \quad (2.19)$$

Aplicando  $u_3$  em (2.17), têm-se:

$$u_3 = \frac{\partial u_m}{\partial t} - \frac{\partial u_t}{\partial t} + (u_m - u_t) \frac{\partial (u_m - u_t)}{\partial x} + (v_m - v_t) \frac{\partial (v_m - v_t)}{\partial y} + \omega_3 \frac{u_t}{\Delta p} - \beta v_m - \beta v_t + \frac{\partial \phi_m}{\partial x} - \frac{\partial \phi_t}{\partial x} \quad (2.20)$$

Com  $u_m = \frac{(u_1+u_3)}{2}$ , têm-se:

$$\left[ \begin{aligned} 2 \frac{\partial u_m}{\partial t} + (u_m + u_t) \frac{\partial(u_m + u_t)}{\partial x} + (u_m - u_t) \frac{\partial(u_m - u_t)}{\partial x} + (v_m + v_t) \frac{\partial(v_m + v_t)}{\partial y} \\ + (v_m - v_t) \frac{\partial(v_m - v_t)}{\partial y} + (\omega_1 + \omega_3) \frac{u_t}{\Delta p} - 2\beta v_m + 2 \frac{\partial \phi_m}{\partial x} \end{aligned} \right] \div 2 \quad (2.21)$$

Onde chegamos a seguinte equação barotrópica do escoamento zonal:

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} - \beta v_m + \frac{\partial \phi_m}{\partial x} = -(u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial u_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial v_t}{\partial y} - \frac{\omega_2 \partial u_t}{\Delta p}) \quad (2.22)$$

Análogo para componente meridional, temos o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} - \beta v_m + \frac{\partial \phi_m}{\partial x} = -(u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial u_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial u_t}{\partial y} - \frac{\omega_2 \partial u_t}{\Delta p}) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial v_m}{\partial t} + \beta u_m + \frac{\partial \phi_m}{\partial y} = -(u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial v_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial v_t}{\partial y} - \frac{\omega_2 \partial v_t}{\Delta p}) \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial u_m}{\partial t} + \frac{\partial v_m}{\partial t} = 0 \quad (2.25)$$

As equações 2.23, 2.24 e 2.25 são representações de equações barotrópicas, ondes os termos  $_t$  são os termos baroclínicos referentes ao cisalhamento vertical que podem excitar ondas. As fontes de calor podem excitar ondas barotrópicas pelos termos baroclínicos das componentes barotrópicas. Se formos um pouco mais além e observar a equação da vorticidade barotrópica a partir do conjunto de equações acima ainda fica mais evidente. Kasahara e Silva Dias (1986) destacaram a importância do cisalhamento vertical do campo básico para gerar uma resposta significativa barotrópica nas latitudes médias e altas, a partir de uma forçante tropical.

$$\left[ \frac{\partial u_m}{\partial t} - \beta v_m + \frac{\partial \phi_m}{\partial x} + u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial u_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial u_t}{\partial y} \right] \frac{\partial}{\partial y} \quad (2.26)$$

$$\left[ \frac{\partial v_m}{\partial t} + \beta u_m + \frac{\partial \phi_m}{\partial y} + u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial v_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial v_t}{\partial y} \right] \frac{\partial}{\partial x} \quad (2.27)$$

Subtraindo (2.26) de (2.27) temos a seguinte equação da vorticidade barotrópica com componentes baroclínicas.

$$\frac{\partial \zeta_m}{\partial t} + \beta v_m = -(u_m \frac{\partial \zeta_m}{\partial x} + u_t \frac{\partial \zeta_t}{\partial x} + v_m \frac{\partial \zeta_m}{\partial y} + v_t \frac{\partial \zeta_t}{\partial y}) \quad (2.28)$$

Onde os termos  $u_t \frac{\partial \zeta_t}{\partial x}$  e  $v_t \frac{\partial \zeta_t}{\partial y}$  são representações do cisalhamento vertical, da taxa de variação zonal e meridional da vorticidade baroclínica perturbada pelo escoamento baroclínico médio. Sendo estes termos aqueles que podem causar ondas barotrópicas a partir da não linearidade dos termos baroclínicos.

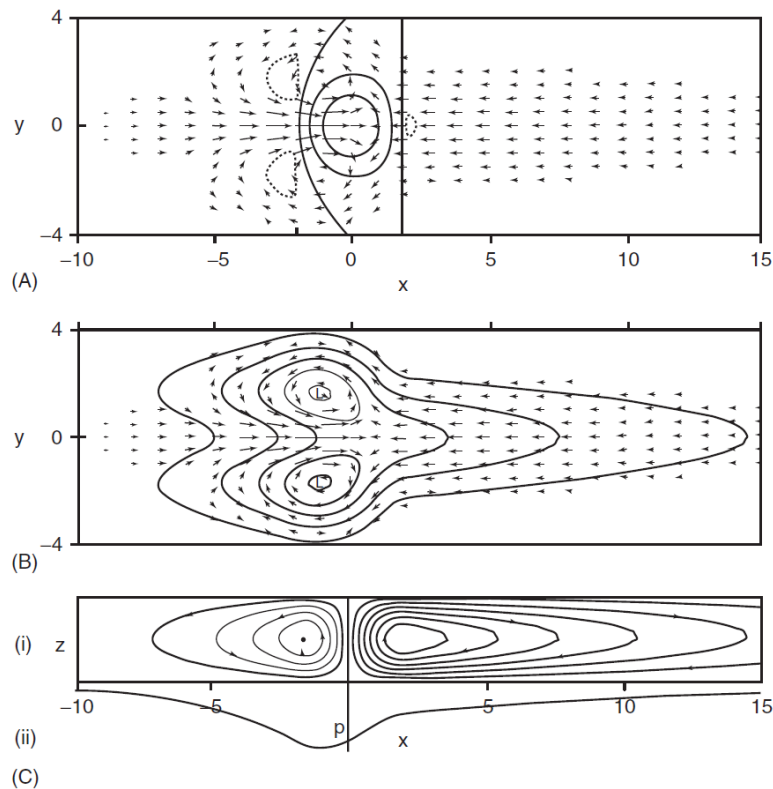
## 2.4 Ondas Equatoriais

Nesta tese são apresentadas análises e discussões das perturbações atmosféricas causadas pela variabilidade interanual do ENOS a partir de uma fonte fixa de calor anômala nas águas superficiais e sub-superficiais do Oceano Pacífico Equatorial. O impacto dessa perturbação tem implicações de larga-escala sendo capaz de perturbar o escoamento médio atmosférico e favorecer a propagação meridional de ondas de Rossby, onde a depender da fase do ENOS, o escoamento médio de altos níveis pode atuar como janela interhemisférica, favorecendo a troca de energia entre os hemisférios via propagação de ondas.

Durante eventos de El Niño, nos baixos níveis sobre o Oceano Pacífico Equatorial é caracterizado um par de ciclones anômalos, enquanto nos altos níveis, há um par de anticiclones anômalos com escoamento de leste equatorial. Este padrão baroclínico de circulação anômala pode ser explicado pela teoria das ondas equatoriais, discutida desde meados dos anos 60 a partir de uma série de estudos teóricos e observacionais que contribuíram de modo significativo no entendimento da física elementar da circulação atmosférica de grande escala equatorial. O trabalho clássico de Matsuno (1966) revela de modo relativamente simples, partir do conjunto de equações de água-rasa, a existência dos modos confinados na região equatorial, que posteriormente foram identificados na atmosfera e oceano, como as Ondas Mistas de Rossby-Gravidade (Yanai e Maruyama, 1966) e de Kelvin (Wallace e Gousky, 1968).

Posteriormente, Gill (1980) realizou um estudo teórico utilizando as equações de água rasa em um modelo hidrodinâmico simples perturbado por uma fonte de calor simétrica na região equatorial, representando o efeito da convecção tropical, destacando a baroclinia da região a partir de um par de anticiclones em resposta a uma fonte em altitude. Quando uma fonte de calor é imposta na região equatorial ao mesmo tempo ondas de Kelvin são propagadas, zonalmente para leste, formando uma espécie de célula de Walker (movimentos ascendentes sobre a fonte de calor e movimentos subsidentes a leste) intensificando assim os ventos de leste na região.

A propagação para oeste do modelo é representada por ondas de Rossby, que apresentam apenas um terço do tamanho do domínio de atuação das ondas de Kelvin. Hoskins (1988), ao usar o mesmo amortecimento adotado por Gill (1980) de 2.5 dias, destaca que as ondas de Kelvin propagam-se com velocidade de fase 3 vezes mais rápidas do que as ondas de Rossby.



*Figura 2.3:* Solução de aquecimento simétrico sobre o equador para fator de decaimento = 0.1. (A) Contornos de velocidade vertical (contornos sólidos são 0, 0.3, 0.6, o contorno quebrado é - 0.1) sobreposto ao campo de velocidade para a camada inferior. O campo é dominado pelo movimento ascendente na região de aquecimento onde tem aproximadamente a mesma forma que a função de aquecimento. (B) Contornos de pressão de perturbação de pressão (intervalo de contorno 0.3) em todo domínio negativo. Há um canal no equador, no regime oriental, a leste da região de forçante. Encontram-se dois ciclones no noroeste e flancos sudoeste da região da forçante. (C) O fluxo integrado meridionalmente mostrando (i) os contornos da função do fluxo, e (ii) a perturbação pressão. Nota-se o movimento ascendente na região de aquecimento (onde existe um canal) e a subsidência noutros locais. Figura 1 de Gill (1980).

Na Figura 2.3 é representado o modelo de Gill (1980). Nos baixos níveis a partir dos vetores do vento nota-se que a onda de Kelvin a leste da fonte propaga-se até 3 vezes mais longe do que as ondas de Rossby que estão a leste da fonte (Fig2.3.a). Na região de atuação das ondas de Rossby marcada pelo par de ciclones, é possível observar escoamento meridional convergente, que não é observado na região de domínio das Ondas de Kelvin, que possuem solução de escoamento meridional nulo. Na figura 2.3.b o escoamento equatorial de oeste entre as ondas de Rossby simétricas fornecem um fluxo de energia para região da fonte, geostroficamente em equilíbrio, causando a crista ao longo do equador. O perfil vertical deste modelo é destacado na Figura 2.3.c, onde o movimento ascendente é encontrado sobre a fonte de calor, enquanto os movimentos subsidentes são observados ao leste e oeste da fonte, sendo ao oeste com maior prolongamento.

Das interpretações da Figura 2.3 podemos compreender neste modelo também a resposta da dinâmica equatorial do ENOS causada pela fonte fixa de calor das anomalias de TSM nas regiões do NINO 3.4. Nos altos níveis troposféricos é esperado padrão oposto ao observado pela Figura 2.3.b, onde ao invés de um par de ciclones teríamos uma par de anticiclones na alta troposfera, pela característica baroclínica da atmosfera equatorial. Ao ter dois anticiclones na alta troposfera a região acima da fonte seria característica de escoamentos de leste e a região a oeste da fonte característica de escoamentos de oeste, analogamente ao que pode ser observado pelo perfil vertical da Figura 2.3.c. Com isto, imaginando uma fonte centrada no Oceano Pacífico Equatorial e a superposição das ondas de Kelvin e Rossby Equatoriais, os altos níveis do Pacífico Equatorial seriam representados por escoamentos de leste, que dificultam as propagações meridionais de ondas de Rossby, enquanto a região do Atlântico Equatorial (mais a oeste da fonte do Pacífico Equatorial) seria representada pelo escoamento de oeste, que permitiria a propagação meridional de ondas de Rossby.

A partir desta analogia podemos chegar a seguinte suposição, partindo do modelo de Gill (1980) e da interação destas ondas com a fonte fixa de calor do El Niño: a região do Pacífico Equatorial durante anos de El Niño não possui mecanismos dinâmicos para agir como janela interhemisférica, permitindo interações entre os hemisférios via ondas de Rossby propagadas pelos trópicos ou subtropicos de ambos hemisférios, enquanto que a região do Atlântico Equatorial pode ter escoamentos de oeste significativos que permitem este tipo de interação. Este mecanismo está de acordo com Tomas e Webster (1994); Ambrizzi (1994), que destacaram que interações interhemisféricas eram mais fáceis de ocorrer sobre o Atlântico Equatorial do que sobre o Oceano Pacífico Equatorial em anos de El Niño.

Com base na Figura 2.3 também é possível inferir o que aconteceria durante um caso de La Niña, e qual seria a resposta da superposição das ondas de Kelvin e Rossby Equatoriais devido ao resfriamento anômalo na região do Oceano Pacífico Equatorial. Analogamente, o padrão oposto é esperado, onde os baixos níveis (Fig 2.3.b) seria a representação das respostas dos altos níveis atmosféricos para o caso de La Niña. Durante a La Niña, com base no modelo de Gill (1980), teríamos um par de ciclones em altos níveis, representativos da subsidência com escoamentos de oeste equatoriais e escoamentos de leste, a oeste do resfriamento, como uma resposta do modo de Kelvin. Desta maneira ondas de Rossby meridionais propagariam de forma mais fácil sobre região equatorial do Oceano Pacífico e seriam dificultadas ou impedidas sobre o Oceano Atlântico Equatorial, estando de acordo com Tomas e Webster (1994) e Ambrizzi (1994).



# Dados e Metodologia

### 3.1 *Dados e Softwares Utilizados*

#### 3.1.1 *ECMWF - Reanalyse*

Foram utilizados os conjuntos de dados diários de reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), Era-Interim durante o período de 1979 a 2014, no espaçamento de grade de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  (Dee et al., 2011), das componentes meridional e zonal do vento (m/s), umidade específica (g/kg), altura geopotencial (m), omega (pa/s), divergência ( $10^{-6} s^{-1}$ ), nos níveis atmosféricos de 850, 500, 250 e 200 hPa, e TSM ( $^\circ\text{C}$ ).

#### 3.1.2 *Convecção*

Os dados interpolados diários de Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE) ( $W/m^2$ ) dos satélites do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), durante o período de 1979 a 2013, com resolução de  $2,5^\circ$  de latitude por  $2,5^\circ$  de longitude (Liebmann e Smith, 1996), foram utilizados como proxy para convecção e nebulosidade.

#### 3.1.3 *Precipitação*

Os dados diários de precipitação estimada foram coletados apenas para o mês de janeiro de 2009, referente ao estudo de caso de ZCAS da seção 5.5, e são oriundos do Global Precipitation Climatology Project (GPCP) com resolução de  $2,5^\circ$  de latitude por  $2,5^\circ$  de longitude (Huffman et al., 2001).

### 3.1.4 Softwares Utilizados

Os seguintes softwares e linguagens de programação foram utilizados:

- Grid Analysis Display System (GrADS);
- Climate Data Operator (CDO);
- O Modelo GCM DREAM. Modelo baroclínico da Universidade de Reading no Reino Unido, referente a versão 6.7 e descrita em Hall et al. (2019);
- A linguagem Python, com o auxílio da plataforma livre Anaconda, nas aplicações de análises de dados e os cálculos do Rossby Wave Source (RWS) e das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) ;
- A linguagem R, na aplicação do número de onda estacionário ( $K_s$ ) com base no algoritmo desenvolvido por Rehbein et al. (2020);
- A linguagem clássica do FORTRAN para aplicação do Filtro de Lanczos e calculo do Wave Activity Flux (WAF), além de algumas compilações do modelo CGM DREAM.

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Caracterização Objetiva

Semelhante a metodologia aplicada por Van Der Wiel et al. (2015) para caracterizar objetivamente a ZCPS e a ZCAS, a partir das anomalias de ROLE sob uma caixa nas regiões de atividade convectiva da ZCPS e da ZCAS, aqui também foram utilizadas as Funções Ortogonais Empíricas (Empirical Orthogonal Function - EOF), como método de estatística multivariada espacial a partir da análise das componentes principais, descrita por Lorenz (1956), que tem como principal objetivo criar um número menor de novas variáveis que representem a maior fração da variabilidade contida nos dados originais. Conceitualmente, a utilização da técnica de EOF, determina um padrão espaço-temporal de máxima covariância entre a série temporal, em todos os pontos de grade no conjunto de dados. A técnica é representada por autovetores e autovalores, que representam os modos, e a variância explicada em cada modo, sendo que na prática apenas os primeiros modos são robustos e com restrição de ortogonalidade e fisicamente significativos (Wilks, 2006).

Nesta tese a EOF foi aplicada com base nos trabalhos de Ambrizzi e Ferraz (2015), que caracterizaram objetivamente a ZCAS a partir da primeira componente principal da função ortogonal empírica, baseada na climatologia dos dados de precipitação e definindo como ZCAS os dias da série que correspondiam ao somatório da precipitação acumulada que com mais de 3 dias de persistência deveria ser superior a 20% da climatologia do verão austral.

Com base na definição acima, foi realizada a seguinte caracterização objetiva a partir dos dados de anomalia de ROLE, onde os eventos de ZCAS foram caracterizados de acordo com o seguinte critério:

$$PC1 \geq 1.0\sigma \text{ e, persistente por no mínimo 4 dias} \quad (3.1)$$

Para caracterização objetiva da ZCAS, primeiro foi aplicado a função ortogonal empírica nos dados de anomalia de ROLE durante o período de 1979 a 2013 dos meses de novembro a março, na região de atuação da ZCAS continental e oceânica, semelhante a descrita por Carvalho et al. (2004), (25°S - 10°S e 70°W - 30°W), com o intuito de destacar e separar o principal padrão de nebulosidade durante este período e nesta região. Foi encontrado pelo primeiro modo da função uma variância de 19,52% que pode ser observada pela figura 3.1.

A partir desta caracterização foram analisados 497 dias de ZCAS, onde 173 dias ocorreram durante anos de El Niño, 138 dias sob atuação de La Niña e 186 dias em anos neutros. Os eventos de ENOS foram determinados de acordo com o índice ONI (Oceanic Niño Index) da região do Niño 3.4, onde eventos de El Niño são caracterizados por anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) superior a 0,5°C, e os eventos de La Niña com anomalias de TSM inferior a - 0,5°C e persistente por um período de cinco meses ou mais.

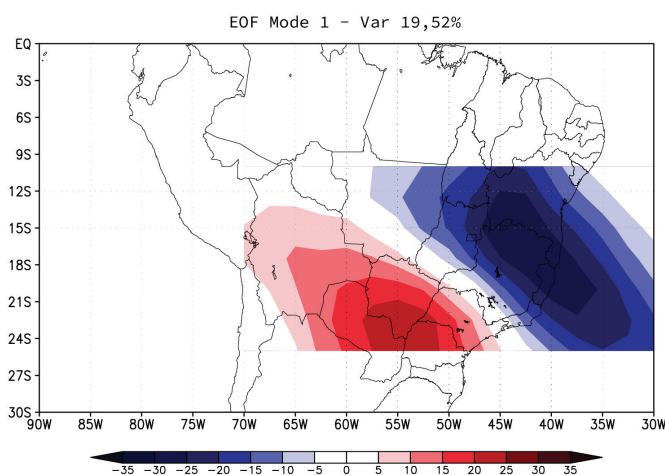


Figura 3.1: Primeiro Modo da EOF das anomalias de ROLE ( $Wm^{-2}$ ), durante o período de novembro a março de 1979 a 2013.

### 3.2.2 Filtro de Lanczos

O Filtro de Lanczos é amplamente utilizado em séries de dados climatológicos por ser um filtro passa banda, que tem como objetivo ressaltar o comportamento de um sinal em determinada frequência ou periodicidade da variável em estudo. O espectro  $G(f)$  do sinal original  $g(t)$  é multiplicado pela resposta em frequência do filtro  $\mu(f)$ , determinado pela transformada de Fourier dos pesos dados pela expressão (3.2).

$$\mu(n) = \frac{\sin(2\pi f c_2 n)}{\pi n} - \frac{\sin(2\pi f c_1 n)}{\pi n} \quad (3.2)$$

Onde  $f c_2$  e  $f c_1$  são as frequências de corte em unidades de tempo que definem a banda passante e  $n$  é o índice dos pesos. Segundo Duchon (1979), a quantidade mínima de pesos é determinada pela expressão (3.3).

$$n \geq \frac{1.3}{f c_2 - f c_1} \quad (3.3)$$

$n$  é referente ao “lag” ou deslocamento máximo da autocovariância, podendo ser um valor fixo para as bandas temporais e sendo um fator de corte do estudo. Para utilização nas bandas 20-90 e 200 dias passa baixa, torna-se necessário um valor de “ $n$ ” de 260, ou seja, 521 pesos o qual elimina 260 dias no início e no fim da série original (13.149 dias, 35 anos), gerando uma nova série filtrada de 12.629 dias que encobre todos os meses de Novembro a Março destes 35 anos.

Com o intuito de eliminar os sinais da mais alta frequência, foram utilizadas as bandas 20-90 dias e 200 dias passa alta, para que se possa analisar os transientes de alta frequências e as variabilidades intrassazonal e interanual isoladamente, possibilitando uma melhor análise das perturbações atmosféricas nessas escalas temporais, separadamente.

Este tipo de metodologia a partir da filtragem de dados é bastante utilizada para ressaltar algum sinal, ou variabilidade atmosférica na análise de certas perturbações atmosféricas. Neste estudo, este método foi utilizado para decompor as composições de ZCAS analisadas, com a intenção de ressaltar os principais padrões de teleconexões atmosféricas nas bandas temporais 20-90 dias e 200 dias passa baixa.

### 3.2.3 Wave Activity Flux e Eddy Kinetic Energy

Para compreensão da atividade de fluxo de onda foi calculado o Wave Activity Flux (WAF) baseado em Takaya e Nakamura (2001), metodologia amplamente utilizada nos estudos de propagações de ondas, como nos trabalhos de Nascimento e Ambrizzi (2002); Wirth et al. (2018); Risbey et al. (2018) e Lin (2019). Esta variável foi calculada a partir das séries das componentes zonais e meridionais do vento, e da altura geopotencial no nível atmosférico de 250 hPa. Em conjunto com o WAF também foi calculado o Eddy Kinetic Energy (EKE) computado a partir das componentes zonais e meridionais do vento zonalmente assimétricas no nível de 250 hPa, com o intuito da compreensão do transporte de energia na banda equatorial. O EKE foi sugerido por Lighthill (1978) como medida de atividade de onda a partir dos padrões de energia cinética.

$$EKE = \frac{u^{*2} + v^{*2}}{2} \quad (3.4)$$

### 3.2.4 Fonte de Ondas de Rossby

Baseado em Sardeshmukh e Hoskins (1988) as fontes de ondas de Rossby também foram calculadas, a partir do Rossby Wave Source (RWS). O cálculo desta variável também parte das componentes zonais e meridionais do vento, onde computados pela biblioteca do python windspharm 1.7.0, resultam na divergência, vorticidade absoluta, componentes de velocidade irrotacional divergente e gradientes de vorticidade absoluta, tendo como resultado as principais regiões de fontes de onda de Rossby ( $10^{-11} \text{s}^{-1}$ ).

$$RWS = -\zeta_a \mathbf{D} - \mathbf{v}_\chi \cdot \Delta \zeta_a \quad (3.5)$$

Da equação 3.5,  $-\zeta_a \mathbf{D}$  é uma representação do estiramento dos vórtices (vortex stretching), que significa os efeitos da divergência no padrão de mudança da vorticidade na alta troposfera como, por exemplo, as regiões de convergência subtropical associadas ao ramo descendente da célula de Hadley, que são regiões importantes de fontes das ondas de Rossby na alta troposfera. Enquanto que  $\mathbf{v}_\chi \cdot \Delta \zeta_a$  representa a advecção do gradiente da vorticidade absoluta pelo escoamento divergente. Onde as regiões de forte gradiente de vorticidade (por exemplo, os jatos subtropicais) são as preferenciais que podem atuar como fontes ou sumidouros de ondas de Rossby, como descrito por Nie et al. (2019).

### 3.2.5 Ondas de Rossby Estacionárias ( $K_s$ )

Hoskins e Karoly (1981) estudaram a propagação da onda estacionária de Rossby no contexto de Wentzel - Kramers - Brillouin (WKB) sob uma atmosfera barotrópica a partir da teoria linear das ondas de Rossby, com o intuito de caracterizar os traçados de ondas de Rossby em meio a um campo básico de vento zonal simétrico, enquanto que Hoskins e Ambrizzi (1993) estenderam a análise barotrópica linear das ondas de Rossby para uma perspectiva mais realista, a partir de um campo básico de vento com variação zonal e meridional, levando em conta as perturbações atmosféricas, destacando que os jatos podem atuar como guias de ondas de Rossby. Estes resultados podem ser explicados a partir da teoria linear das ondas barotrópicas descritas na seção 2.1.

Nesta tese, o cálculo do  $K_s$  foi realizado com base em (Rehbein et al., 2020), algoritmo desenvolvido pelo Grupo de Estudos Climáticos (GrEC) do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, tendo como base as equações 2.6 e 2.7. Os campos de  $K_s$  serão utilizados para uma interpretação qualitativa dos guias de ondas de Rossby, associadas as composições de ZCAS e aos estados básicos do verão austral.

### 3.2.6 Modelo Baroclínico

O modelo numérico utilizado neste estudo foi o inicialmente introduzido por Hall (2000), que é uma versão atualizada e com melhor resolução horizontal do mesmo modelo utilizado por Hoskins e Ambrizzi (1993); Ambrizzi e Hoskins (1997) e descrito originalmente por Hoskins e Simmons (1975). O Dynamical Research Empirical Atmospheric Model (DREAM) é um modelo baroclínico com resolução horizontal de T42, integrado pelas equações primitivas da vorticidade, divergência, temperatura e (log) pressure em 15 níveis de sigma com um time-step semi-implícito de 22,5 min, onde um dia é representado por 64 tempos.

Os estados básicos utilizados neste estudo foram extraídos da série de dados de reanálise do ECMWF, ERA-Interim de 6 em 6 hrs de uma série de 38 anos (1979-2016), onde foram separados nos meses de verão austral dentre as diferentes fases do ENOS, El Niño, La Niña e Neutro. Os eventos de ENOS foram determinados a partir do índice ONI (Oceanic Niño Index) da região do Pacífico Central Niño 3.4, onde eventos de El Niño são caracterizados por anomalias de TSM superior a 0,5°C, e os eventos de La Niña com anomalias de TSM inferior a - 0,5°C e persistente por um período de cinco meses ou mais.

### 3.2.6.1 Sistema de Equações do Dynamical Research Empirical Atmospheric Model (DREAM)

O modelo original, sugerido por Hoskins e Simmons (1975), é baseado nas equações primitivas não dimensionais, no qual considera um gás perfeito, invíscido, adiabático, hidrostático em um planeta esférico em rotação que pode ser escrita da seguinte maneira, nas coordenadas esféricas na horizontal e sigma na vertical:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} f u_v - \frac{\partial}{\partial \mu} f u_u \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} f u_u + \frac{\partial}{\partial \mu} f u_v - \nabla^2 \left( \frac{U^2 + V^2}{2(1 - \mu^2)} + \phi + \bar{T} \ln p_* \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = -\frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} (U T') - \frac{\partial}{\partial \mu} (V T') + D T' - \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} + \kappa \frac{T \omega}{p} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \ln p_*}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \ln p_* - D - \frac{\partial \dot{\sigma}}{\sigma} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma} = -\mathbf{T} \quad (3.10)$$

onde  $f_u$  e  $f_v$  são definidos como:

$$f_u = v \zeta - \sigma \frac{\partial u}{\partial \sigma} - T' \frac{\partial \ln p_*}{\partial \lambda} \quad (3.11)$$

$$f_v = -u \zeta - \sigma \frac{\partial v}{\partial \sigma} - T' (1 - \mu^2) \frac{\partial \ln p_*}{\partial \lambda} \quad (3.12)$$

Das equações acima de Hoskins e Simmons (1975),  $\lambda$  é representativo da longitude e  $\mu$  do seno da latitude.  $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$  representa a vorticidade,  $\frac{\partial D}{\partial t}$  a divergência,  $\frac{\partial T'}{\partial t}$  a termodinâmica,  $\frac{\partial \ln p_*}{\partial t}$  a continuidade e  $\frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma}$  a hidrostática. Os termos estão adimensionalizados usando como escala de comprimento o raio da terra,  $a$ ; e de tempo  $\Omega^{-1}$ , sendo  $\Omega$  a velocidade angular de rotação da terra; a escala de temperatura é representada por  $\frac{a^2 \Omega}{R}$  onde  $R$  é a constante dos gases;  $\zeta$  indica a vorticidade absoluta;  $D$  a divergência;  $T = \bar{T}(\sigma) + T'$  a temperatura;  $p_*$  a pressão em superfície;  $\phi$  o geopotencial;  $\sigma$  as coordenadas verticais; e  $u$  e  $v$  são as velocidades zonal e meridional do vento multiplicados pelo  $\cos \theta$ . A partir disso, o operador da advecção horizontal é dado da seguinte maneira:

$$V \cdot \nabla = \frac{u}{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial \lambda} + v \frac{\partial}{\partial \mu} \quad (3.13)$$

A velocidade potencial  $\chi$  e as funções de correntes  $\psi$  podem ser introduzidas a partir das equações da vorticidade e divergência:

$$u = -(1 - \mu^2) \frac{\partial \psi}{\partial \mu} + \frac{\partial \chi}{\partial \lambda} \quad (3.14)$$

$$v = \frac{\partial \psi}{\partial \lambda} + (1 - \mu^2) \frac{\partial \sigma}{\partial \mu} \quad (3.15)$$

$$\zeta = 2\mu + \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{\partial u}{\partial \mu} = 2\mu + \nabla^2 \psi \quad (3.16)$$

$$D = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{\partial v}{\partial \mu} = \nabla^2 \chi \quad (3.17)$$

O uso das equações do movimento na sua forma de divergência e de vorticidade é um artifício conveniente para aplicações das técnicas espectrais e semi-implícitas para resolução de problemas numéricos. Neste modelo, Hoskins e Simmons (1975) solucionam a parte horizontal por meio dos harmônicos esféricos e a parte vertical por meio das diferenças finitas que conseguem conservar massa, energia e o momento angular dos processos atmosféricos simulados.

### 3.2.6.2 *Dynamical Research Empirical Atmospheric Model (DREAM)*

Hoskins e Simmons (1975) foram os primeiros a desenvolver o que seria a primeira versão do Modelo de Circulação Geral do DREAM, a partir de um modelo dinâmico seco pautado nas equações fundamentais da dinâmica da atmosfera. A versão original partiu de um modelo barotrópico, e perturbações atmosféricas excitadas a partir da divergência foram bem representadas nos fenômenos atmosféricos de escala sinótica e global (Hoskins e Karoly, 1981; Ambrizzi e Hoskins, 1997).

Versões atualizadas também foram utilizadas na literatura em meados dos anos 90 e representaram bem os padrões atmosféricos tropicais, a partir de simulações com o conjunto de equações baroclínicas (Jin e Hoskins, 1995; Ambrizzi e Hoskins, 1997). O DREAM representa uma versão mais recente do modelo de Hoskins e Simmons (1975), tendo uma melhor resolução horizontal, modificações nos processos de difusão e amortecimento, além de incluir a umidade específica,



orografia e forçantes empíricas, onde estas forçantes podem ser determinadas e separadas segundo diferentes escalas de tempo, quando introduzidas com uma série temporal longa (Hall, 2000; Hall et al., 2019).

Depois das modificações realizadas no modelo inicial, o DREAM continuou a ser utilizado como modelo dinâmico para investigar diversos fenômenos atmosféricos, sendo eles, de baixa frequência como o ENOS e variabilidades interdecadais (Hall, 2000; Wu e Lin, 2012; Wu e Zhang, 2015), tropicais e interações trópicos-extratrópicos (Yu e Lin, 2013; Leroux e Hall, 2009; Leroux et al., 2011; Hall et al., 2019).

A partir da simplicidade do uso do modelo, e sua aplicação em diversos estudos, seja da baixa frequência ou a partir da resposta tropical, o DREAM foi escolhido para investigar a resposta das fontes anômalas de calor que podem vir a disparar a ZCAS, onde semelhante ao que foi realizado por Ambrizzi (1994) pretendemos compreender as rotas preferenciais dos guias de ondas de Rossby que interagem com a ZCAS sob diferentes estados básicos durante o verão austral.

### 3.3 Procedimentos

A pesquisa é dividida em duas vertentes de análise para alcance dos objetivos e da verificação hipótese sugerida nesta tese.

#### 3.3.1 Etapa Observacional

Esta etapa se inicia a partir da caracterização objetiva apresentada na seção 3.2.2, após a determinação dos dias que ocorreram ZCAS com base na EOF dos dados de anomalia de ROLE na região (25°S - 10°S e 70°W - 30°W). Os dias de ZCAS identificados foram separados entre eventos de El Niño, La Niña, Neutros e Climatológicos, da série completa dos dias de ZCAS caracterizados pelo primeiro modo da EOF, comparados entre anômalos e não anômalos, filtrados e não filtrados em diversas variáveis e principalmente nos níveis atmosféricos de 200 hPa, 500 hPa e 850 hPa, com o intuito da compreensão da estrutura dinâmica dos dias que ocorreram ZCAS e suas diferenças de acordo com a variabilidade interanual, em particular as oscilações do ENOS na região NINO 3.4.

Têm-se como foco inicial a América do Sul em busca dos padrões atmosféricos de cada composto de ZCAS com relação a variabilidade interanual do ENOS, e muito do que se foi observado nesta etapa está de acordo com proposto por Ferreira et al. (2004) e, recentemente por

Silva et al. (2019).

Para as análises referentes ao padrão global, em especial no domínio que abrange todo o Oceano Pacífico e Atlântico, os resultados obtidos aqui demonstram a presença de guias de ondas, que embora identificados anteriormente por Ambrizzi (1994); Ambrizzi e Hoskins (1997) não haviam sido associados a ZCAS ou a qualquer outro sistema atmosférico atuante na América do Sul durante o verão austral. Aqui também retomamos uma hipótese abordada por Grimm e Silva Dias (1995) sobre a ZCAS como fonte de Onda de Rossby para o padrão de teleconexão com o continente europeu, discutindo as possibilidades dinâmicas para ocorrência desta propagação interhemisférica baseado na teoria linear de propagação de onda de Rossby e nas composições médias das ZCAS identificadas.

A propagação de energia associada as ondas de Rossby foram calculadas para todos os compostos a partir da superimposição dos compostos de WAF, EKE e  $K_s$ . Indicando assim os guias de ondas preferenciais associados ao transporte de energia para a ZCAS.

### 3.3.2 Simulação Numérica

Todas as simulações foram realizadas a partir do modelo baroclínico DREAM, descrito na seção 3.2.3. O modelo DREAM possui dois processos principais: o primeiro com a introdução do estado básico sem a presença de forçantes atmosféricas, e a partir do time-step estipulado pelo usuário, o próprio modelo encontra seu estado estacionário; no segundo processo são introduzidas as forçantes térmicas, onde o modelo é perturbado e as respostas podem ser analisadas. As regiões das forçantes térmicas foram selecionadas a partir das composições das anomalias de ROLE e confirmadas pelo RWS, calculadas dos compostos de ZCAS nas diferentes variabilidades interanuais e, a partir deste processo foram realizadas simulações com estados básicos diferentes.

Nesta etapa da pesquisa, o que se buscou com relação as simulações numéricas são os guias de ondas de Rossby, relacionados as forçantes indicadas pelos compostos observados por meio dos dados de reanálise, tendo como foco a alta troposfera, especificamente o nível de 200 hPa das respostas das anomalias de função de corrente ( $\psi$ ), com intuito da compreensão do padrão ondulatório observado.

Todas as simulações também foram comparadas com os números de ondas estacionários referentes a cada estado básico observacional simulado, auxiliando na compreensão dinâmica dos guias de ondas simulados.

# América do Sul

### *4.1 A Zona de Convergência do Atlântico Sul*

A ZCAS é um dos principais sistemas convectivos que atua durante a primavera e verão na América do Sul, e suas variações, seja de posicionamento, duração ou intensidade, causam vários efeitos adversos para o continente e todas as regiões do Brasil. A ZCAS é uma zona de nebulosidade com no mínimo 4 dias de persistência, com orientação Noroeste-Sudeste que se estende do continente ao oceano Atlântico Sul (Kodama, 1992, 1993; Carvalho et al., 2002, 2004). Variações nas escalas de tempo interanuais de baixa frequência, devido as perturbações atmosféricas de grande escala causadas pelo ENOS, foram analisadas e discutidas por Ferreira et al. (2004) com foco na América do Sul, e a partir de uma perspectiva mais ampla por Carvalho et al. (2002, 2004), que além de analisar as variações da ZCAS nas escalas interanuais, também investigou relações entre a escala de tempo intrassazonal e os eventos extremos causados durante a atividade desta zona de nebulosidade.

Das análises de Carvalho et al. (2002, 2004); Ferreira et al. (2004) em relação as variabilidades interanuais, tem-se alguns padrões atmosféricos associados a estrutura dinâmica dos episódios de ZCAS. Durante eventos de El Niño, a nebulosidade é mais concentrada na região oceânica do que no continente sul americano, além de apresentar um enfraquecimento de atividade convectiva na região da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), desta forma durante os eventos de ZCAS em anos de El Niño é esperado a partir de um padrão médio, volumes menores de precipitação e nebulosidade na região Norte do Brasil e nas regiões de atuação da ZCIT durante o verão austral, se comparada com eventos de ZCAS neutros, climatológicos e sob atuação da La Niña.

Para os anos em que ocorrem La Niña, o padrão atmosférico de nebulosidade da ZCAS é um pouco diferente dos anos de El Niño. Ainda de acordo com os trabalhos de Carvalho et al. (2002, 2004); Ferreira et al. (2004), durante os anos de La Niña temos o que é chamado de ZCAS continental, onde a nebulosidade da ZCAS se estende da região Norte do Brasil ao Atlântico Sul e possui uma interação maior com a ZCIT. De acordo com a série analisada por Carvalho et al. (2004), 50% dos episódios de ZCAS identificados durante anos de La Niña foram caracterizados como continentais, enquanto que 75% dos episódios de ZCAS durante anos de El Niño, possuíam características oceânicas.

Com já mencionado na introdução desta tese, para que um episódio de ZCAS seja estabelecido o seguinte conjunto de perturbações atmosféricas deve ser observado: 1) convergência de umidade em 850 hPa com permanência mínima de 4 dias; 2) cavado em 500 hPa a oeste da região de convergência em superfície; 3) faixa uniforme no campo de ômega em 500 hPa, com movimentos ascendentes e na mesma posição da ZCAS; 4) presença da alta da Bolívia em altos níveis, de um cavado sobre a região Nordeste do Brasil, e, em algumas situações, a presença de um vórtice ciclônico de altos níveis; 5) nebulosidade persistente e semi-estacionária em imagens de satélite (Ambrizzi e Ferraz, 2015). A dinâmica deste conjunto de perturbações atmosféricas e de como interagem entre si é de grande importância para compreensão da ZCAS. Figueroa (1997) já havia discutido em sua tese, o acoplamento entre ZCAS, Alta Bolívia e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN), destacando uma cadeia de dependência entre a convecção tropical amazônica e os fatores transitórios de grande escala. Outro mecanismo atmosférico que contribui com a configuração da ZCAS é a Monção da América do Sul (SAMS), que é responsável pelo transporte de umidade do Norte do Brasil e da Amazônia para as regiões Centrais e Sudeste do continente sul americano (Casarin e Kousky, 1986; Kodama, 1992, 1993; Gan, 2009; Grimm, 2011).

Neste capítulo será discutido a estrutura média dos episódios de ZCAS caracterizados objetivamente pela metodologia proposta na seção 3.2.1 para o domínio da América do Sul e posteriormente, sendo comparados entre si nas diferentes fases dos ENOS, e filtrados nas bandas temporais 20-90 dias e 200 dias passa-baixa, essas bandas temporais são características respectivamente das variabilidades intrassazonal e interanual. A filtragem foi feita a partir do filtro de Lanczos, conforme metodologia descrita na seção 3.2.2.

## 4.2 Frequência dos Episódios

Dentre os episódios caracterizados objetivamente de acordo com a metodologia proposta na seção 3.2.1, durante os meses de Novembro a Março dos anos de 1979 a 2013/14 (até Março de 2014), 497 dias de ZCAS foram identificados, onde 173 dias ocorreram durante anos de El Niño, 138 dias sob atuação de La Niña e 186 dias durante anos neutros. De acordo com a Figura 4.1.a, a maioria dos dias de ZCAS ocorreram durante os meses de Janeiro, Dezembro e Março. O mês de Fevereiro foi o que apresentou menor frequência desta perturbação atmosférica. Tanto Kodama (1993) como Nielsen et al. (2019) observaram em seus trabalhos uma menor frequência dos episódios de ZCAS no mês de fevereiro atribuindo este fato ao enfraquecimento do jato subtropical e do escoamento polar na região.

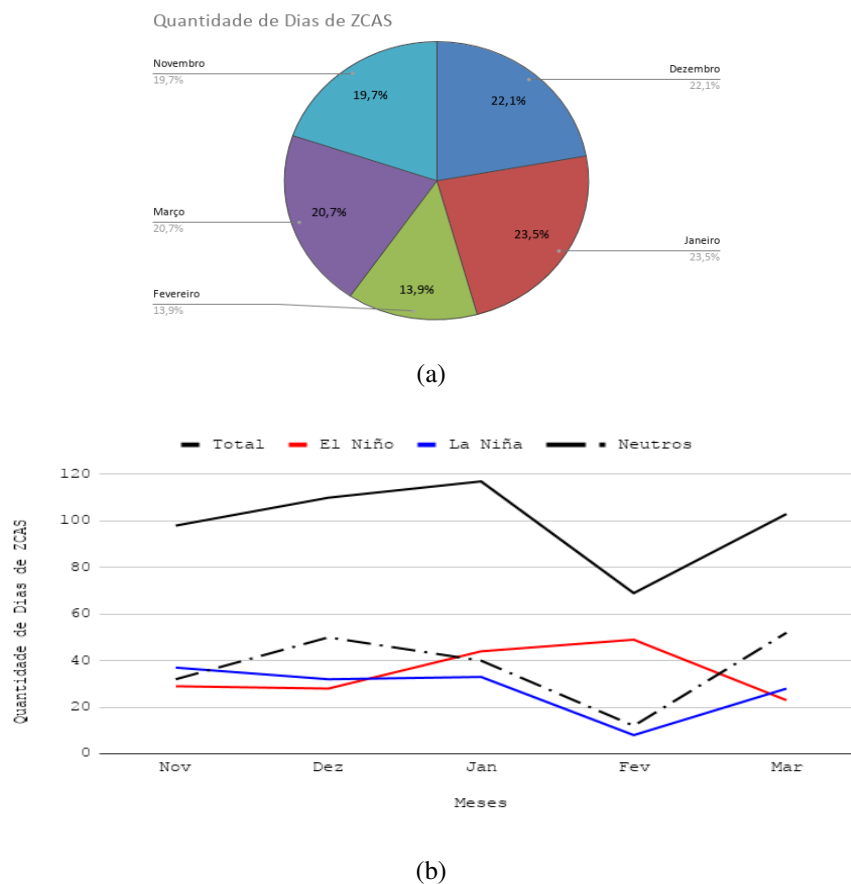


Figura 4.1: Gráficos de a) total de episódios de ZCAS; b) total episódios de ZCAS durante eventos ENOS.

Análises de correlação entre os episódios aqui caracterizados e o índice dos episódios de ZCAS caracterizados por Nielsen et al. (2019), podem ser encontrados no Apêndice A.

Ao analisar a Figura 4.1 que representa a frequência dos dias de ZCAS durante eventos de ENOS, onde da série estudada, 11 anos ocorreram sob a atuação de El Niño, 12 anos sob La Niña, e 12 anos em que não ocorreram eventos ENOS, aqui denominados como anos neutros. Destes, 34% dos episódios ocorreram em anos de El Niño, 27% durante anos de La Niña e 37% durante anos neutros. Na Figura 4.1.b, com exceção dos eventos de ZCAS durante anos de El Niño, os dias em que ocorreram ZCAS durante os anos de La Niña e Neutros seguem o mesmo padrão de frequência mensal do que o padrão médio. No mês de fevereiro houveram 49 dias de ZCAS-El Niño, enquanto que para o mesmo período têm-se 12 dias de ZCAS-Neutras e 8 dias de ZCAS-La Niña. Este padrão ocorre a partir da intensificação do período úmido ou dos jatos subtropicais e escoamento polar a partir da circulação anômala durante anos de El Niño (Nielsen et al., 2019).

### 4.3 Estrutura Média dos Episódios de ZCAS

#### 4.3.1 ZCAS - Climatológica

Das composições de ZCAS separados entre eventos de Climatológicos, Neutros, El Niño e La Niña, tem-se na Figura 4.2 as composições médias de ZCAS Climatológicas nas variáveis de, ROLE não anômala, umidade específica no nível de 850 hPa, altura geopotencial, ômega em 500 hPa, a divergência e vento zonal e meridional em 200 hPa. As composições da Figura 4.2, representam a média de todos os episódios de ZCAS identificados objetivamente, com um total de 497 dias, são semelhantes as composições de ZCAS clássicas identificadas nos estudos de Ferreira et al. (2004); Nielsen et al. (2019); Silva et al. (2019); Rosa et al. (2020).

Na figura 4.2 em relação a configuração necessária da estrutura dos episódios de ZCAS, todos os critérios são representados, a partir de uma banda de nebulosidade com orientação Noroeste-Sudeste persistente por mais de 4 dias (Figura 4.2.a), transporte de umidade bem estabelecido no nível de 850 hPa das regiões do Brasil central ao Oceano Atlântico passando pelo Sudeste (Figura 4.2.b), campo de velocidade vertical ômega negativo, que representa movimento ascendente em fase com o escoamento convergente em 850 hPa (Figuras 4.2.b.c), e com orientação Noroeste-Sudeste semelhante ao ROLE da figura 4.2.a. Ainda sobre a figura 4.2.c há um cavado pronunciado no campo de Altura Geopotencial em 500 hPa, além do padrão gangorra dos movimento verticais nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com movimentos subsidentes na região Sul e ascendentes na região Sudeste, além de movimentos verticais na região da ZCIT. Nos altos

níveis troposféricos a divergência esta em fase com os compostos de Ômega, ROLE e Umidade Específica (Figuras 4.2.a.b.c.d), com o cavado do nordeste bem pronunciado e a presença da Alta da Bolívia (Figura 4.2.d).

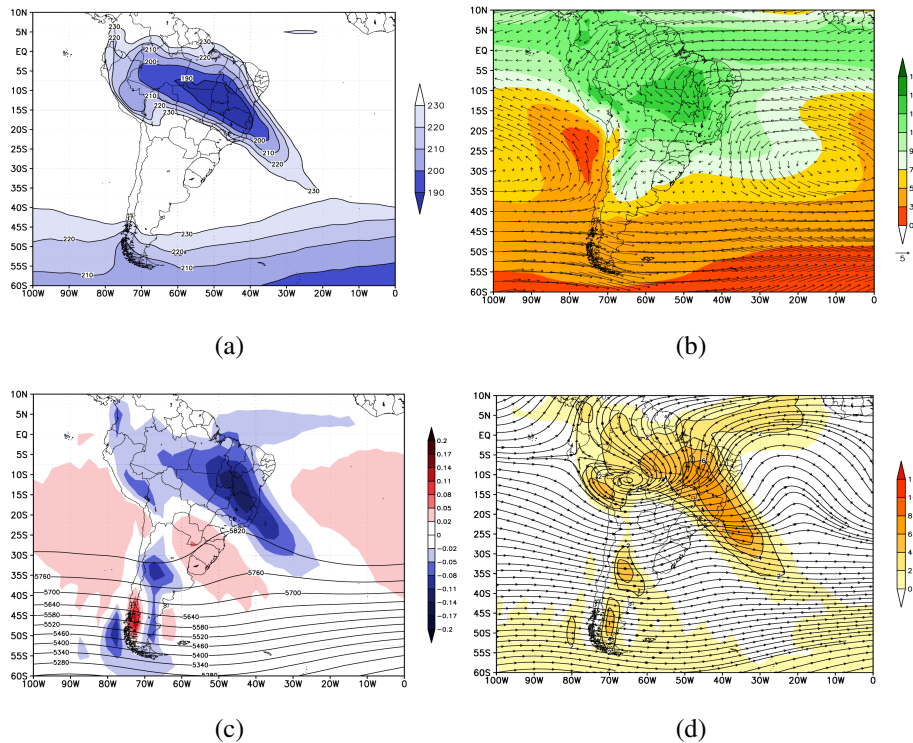


Figura 4.2: Composição média de Todos Episódios de ZCAS; a) Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE,  $W/m^2$ ), b) Umidade Específica ( $g/kg$ ) e vetores do vento ( $m/s$ ) no nível de 850 hPa, c) Altura Geopotencial (m) e Omega( $pa/s$ ) em 500 hPa, d) Divergência ( $10^6 s^{-1}$ ) e vetores do vento ( $m/s$ ) em 200 hPa.

Das composições anômalas de ROLE, vento zonal e meridional nos níveis de 200 hPa, 500 hPa e 800 hPa, têm-se na Figura 4.3 a ZCAS climatológica. Da anomalia de ROLE fica claro nesta composição tanto o padrão gangorra da nebulosidade como o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) a leste do padrão de nebulosidade, de acordo com a Figura 4.3.a, próximo de onde está o Cavado do Nordeste (Figura 4.2.d).

Da estrutura média vertical anômala têm-se na Figura 4.3, um anticiclone em altos níveis na vanguarda da ZCAS (Figura 4.3.a) e um ciclone barotrópico na região Sul do Brasil (Figura 4.3.a.b.c) com uma estrutura ondulatória na sua retaguarda, no sul da América do Sul e na região do Pacífico Sul, próximo do continente Sul Americano. Este padrão de ondas de Rossby pode ser encontrado em diversos estudos, entre eles nos trabalhos de Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015). A estrutura vertical anômala analisada na Figura 4.3 é semelhante aos resultados de Nielsen et al. (2019); Rosa et al. (2020).

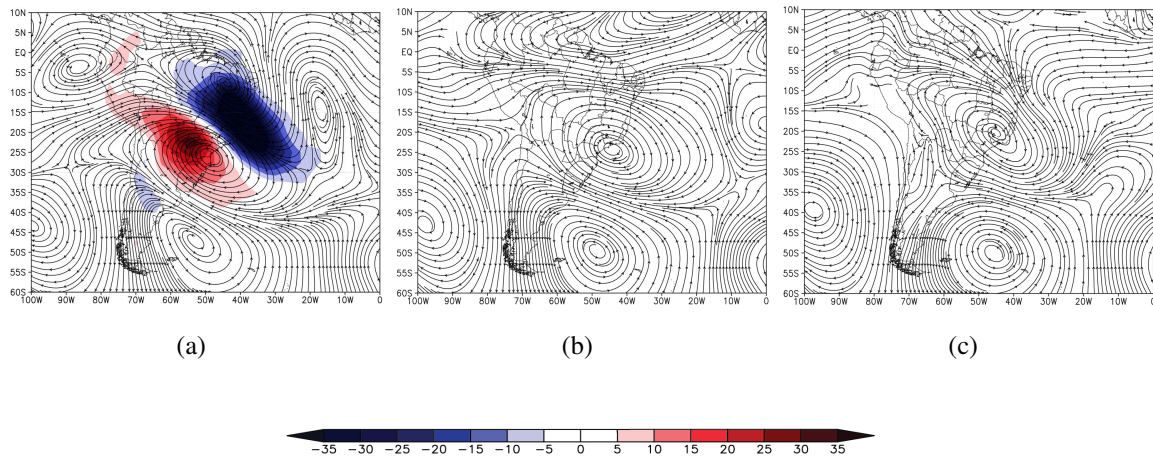


Figura 4.3: Composição média da anomalia do vento zonal e meridional em linhas correntes de Todos episódios de ZCAS nos níveis de a) 200 hPa e anomalia de ROLE, b) 500 hPa, c) 800 hPa.

#### 4.3.2 ZCAS - Neutra

As composições da ZCAS durante o período neutro, que são referentes aos anos em que o Oceano Pacífico não esteve com anomalias da temperatura da superfície do mar nem acima nem abaixo de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , não apresentam grandes diferenças com relação ao padrão climatológico não anômalo. Na figura 4.4 é observado a nebulosidade com orientação Noroeste-Sudeste na composição de ROLE (Figura 4.4.a), com uma ZCIT mais intensa se comparado ao padrão climatológico (Figura 4.2.a) e o padrão de velocidade vertical também em fase com o fluxo de umidade (Figura 4.4.b.c) com uma extensão zonal maior dos movimentos verticais na região da ZCIT, além do padrão gangorra mais intenso nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (Figura 4.4.c). Nos altos níveis troposféricos a divergência está em fase com Ômega, ROLE e o fluxo de umidade (Figuras 4.4.a.b.c.d), além da presença da Alta da Bolívia e do Cavado do Nordeste.

Da composição anômala dos episódios de ZCAS durante anos Neutros (Figura 4.5), têm-se padrão semelhante ao climatológico (Figura 4.3), com o ciclone barotrópico da ZCAS na região Sul do Brasil, e anticiclone na sua vanguarda apenas nos altos níveis (Figura 4.5.a). Também há o VCAN há leste da nebulosidade, em resposta a continuidade da anomalia anticiclônica dentro do continente. Na retaguarda do ciclone barotrópico há também um padrão ondulatório, também barotrópico, mas localizado mais a oeste do que no caso da ZCAS climatológica, com o ciclone barotrópico desta onda de Rossby mais a oeste no Pacífico Sul do que próximo a América do Sul.



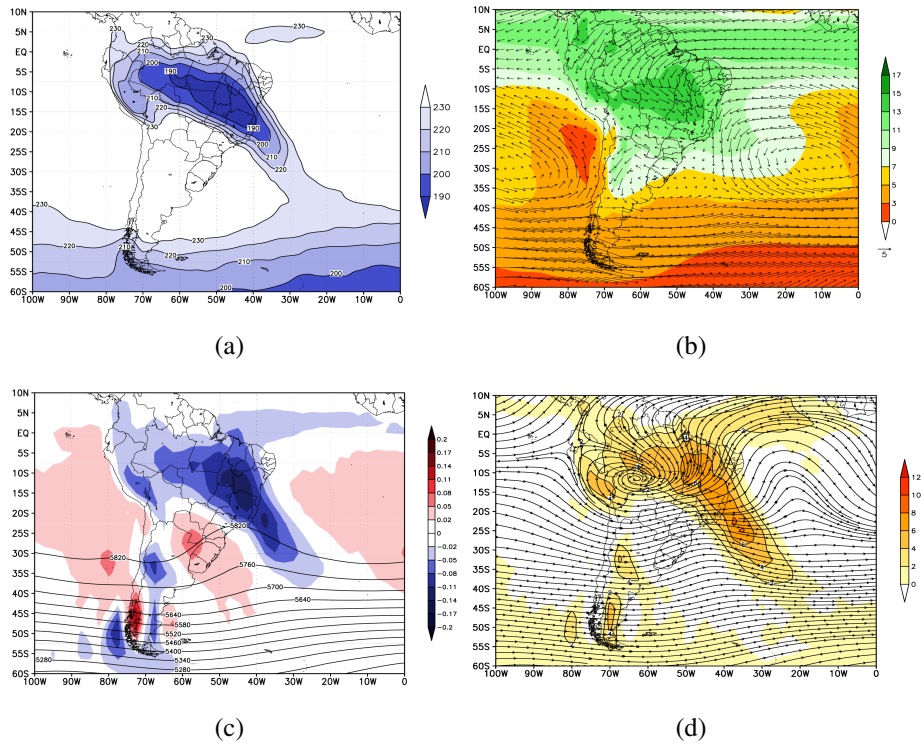


Figura 4.4: Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-Neutras.

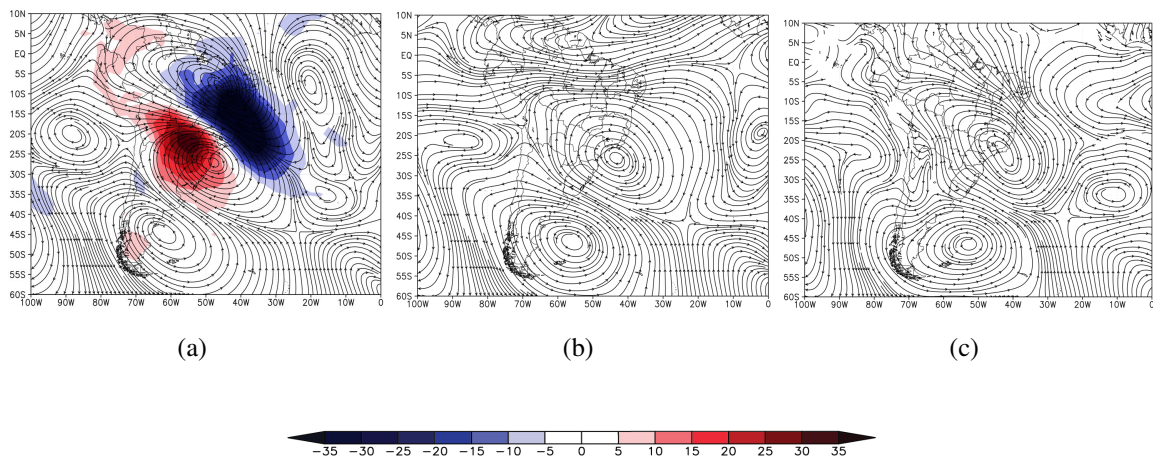


Figura 4.5: Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-Neutras

### 4.3.3 ZCAS - El Niño

Dos episódios de ZCAS durante anos de El Niño é possível notar alguma diferença com relação as composições de ZCAS anteriores das figuras 4.2 e 4.4. Como já destacado por Ferreira et al. (2004), quando a ZCAS se forma em uma configuração da atmosfera perturbada por um El Niño existe uma menor interação com a ZCIT e precipitação mais intensa próximo da costa litorânea e menos nebulosidade na região Amazônica, mesmo que de uma forma mais suavizada

se comparada com os compostos anteriores. A ausência do sinal da ZCIT na composição de ROLE (Figura 4.6.a) é notável quando comparada com as composições anteriores (Figuras 4.2.a e 4.4.a), além do menor extensão zonal dos movimentos verticais na composição de Ômega na região equatorial (Figura 4.4.c). O padrão gangorra também é intensificado como no caso da composição Neutra (Figuras 4.6.c. e 4.4.c), além da Alta Subtropical do Atlântico Sul estar mais intensa nesta composição que nas composições anteriores. Nos altos níveis troposféricos é possível notar o Cavado do Nordeste mais intenso que nos casos anteriores e a Alta da Bolívia enfraquecida (Figura 4.6.d), além da divergência ser mais intensa na região da costa litorânea.

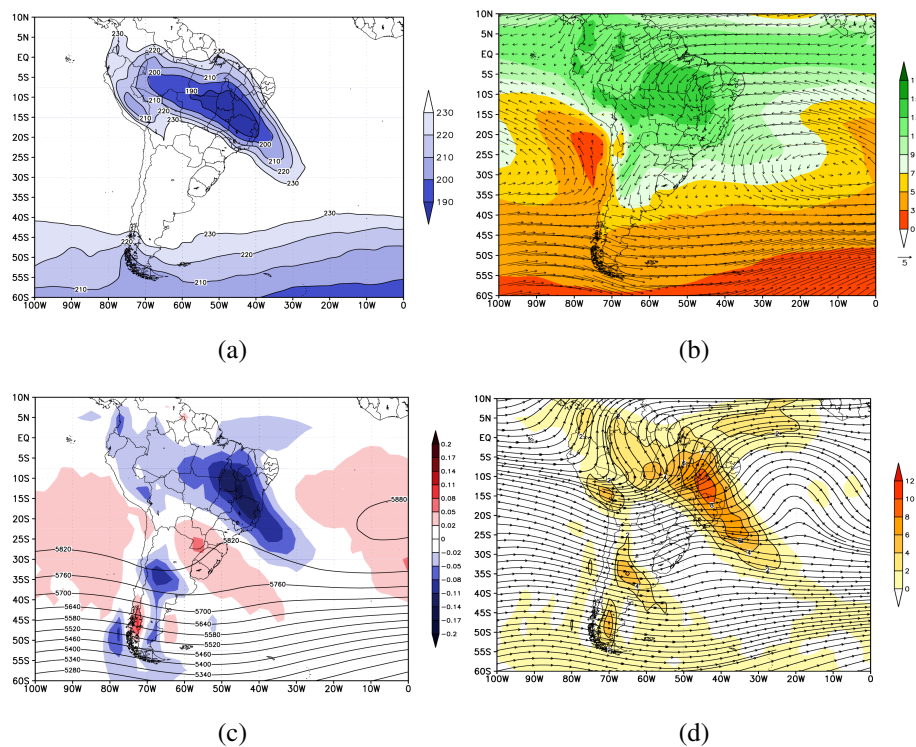


Figura 4.6: Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-El Niño.

Na figura 4.7.a é evidente o enfraquecimento da ZCIT durante eventos de ZCAS-El Niño, a partir da anomalia positiva de ROLE na região equatorial. A intensificação do VCAN também é bastante clara quando comparado com os padrões de ZCAS anteriores (Figura 4.3.a e 4.5.a). Deste modo corroborando com os resultados de Ferreira et al. (2004). A estrutura média vertical mantém o ciclone anômalo barotrópico na região Sul do Brasil (Figura 4.7.a.b.c), mas neste caso mais ao norte, entre as regiões Sul e Sudeste, enquanto que na retaguarda deste ciclone o mesmo padrão barotrópico ondulatório é observado, com maior intensidade e com o núcleo do ciclone barotrópico localizado no Pacífico Sul (Figura 4.7.a.b.c) mais próximo do continente sul americano que nos casos anteriores, entre 40°S e 95°W.

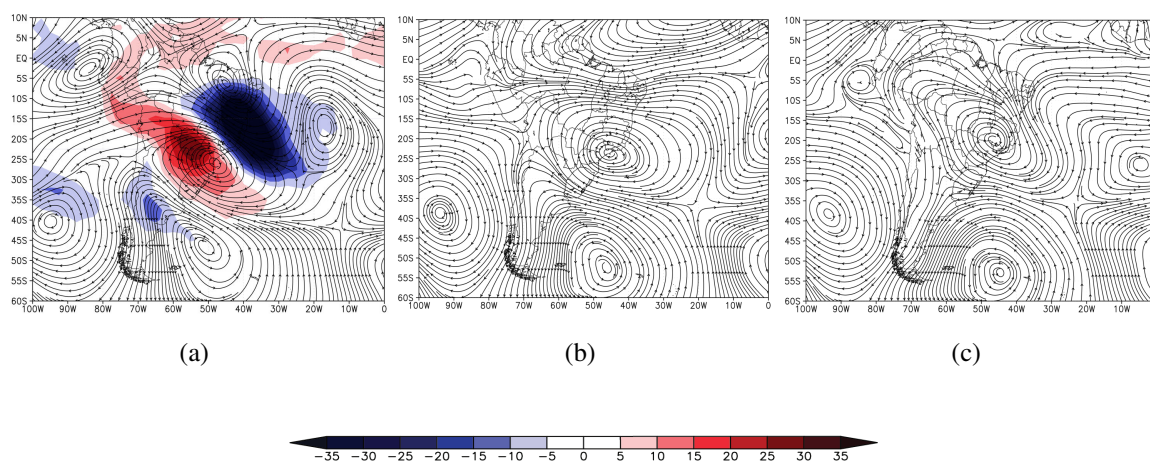


Figura 4.7: Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-El Niño

#### 4.3.4 ZCAS - La Niña

Durante a fase fria do ENOS, poucas diferenças são notadas quando comparadas com as composições não anômalas anteriores, mas ainda assim corroboram com o estabelecido na literatura. De acordo com Carvalho et al. (2004) e Ferreira et al. (2004), durante os anos de La Niña, a ZCAS tem características mais continentais, ou uma intensificação maior da nebulosidade na região Amazônica. Nas composições da Figura 4.5 isso é bem pronunciado, a partir do prolongamento do núcleo mais intenso de ROLE na região Amazônica (Figura 4.8.a), semelhante ao caso de ZCAS Neutra, mas mais intenso. O mesmo prolongamento zonal para oeste, na região Amazônica também pode ser observado em fase a partir da orientação Noroeste-Sudeste das composições de Ômega em 500 hPa (Figura 4.8.c) e da Divergência em altos níveis (Figura 4.8.d). Diferente do que foi observado durante as composições de El Niño, durante os eventos de ZCAS La Niña há uma maior intensificação da atividade convectiva na região da ZCIT com maior extensão zonal para oeste na região equatorial (Figura 4.8.c), em contrapartida durante eventos de La Niña o Cavado do Nordeste aparenta estar menos intenso (Figura 4.8.d), mas com a presença da Alta da Bolívia.

Os episódios de ZCAS durante os anos de La Niña são aqueles em que a nebulosidade é mais prolongada no continente e isso é evidente a partir da composição anômala na Figura 4.9.a. Nesta figura as anomalias de ROLE se estendem a partir da região Amazônica e tem maior interação com a ZCIT, se comparado com as composições anteriores. O ciclone barotrópico também é observado na estrutura média com um padrão ondulatório barotrópico na sua retaguarda (Figura 4.9.a), com o núcleo do ciclone barotrópico próximo do continente sul americano (Figura



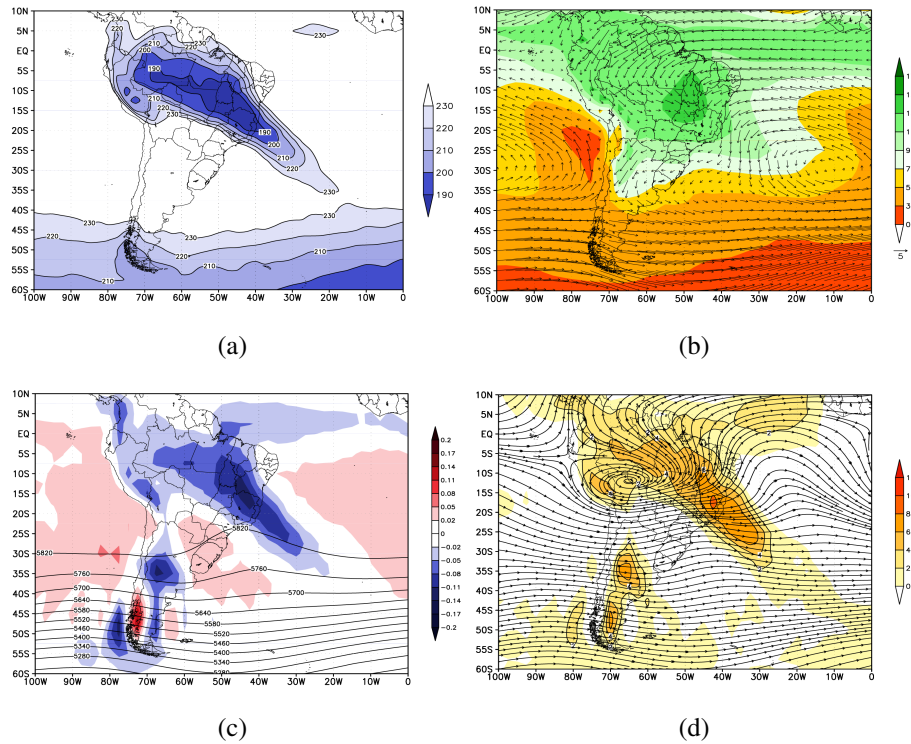


Figura 4.8: Igual a Figura 4.2, mas para ZCAS-La Niña.

4.9.a.b.c). Em 20°S e 90°W há uma anticiclone baroclínico no Pacífico Sul (Figura 4.9.a) que não é observado nas composições anteriores, este anticiclone e o padrão ondulatorio associado será discutido no capítulo 5. Além da maior interação com a ZCIT, os compostos de ZCAS durante anos de La Niña aparentam enfraquecer a ação do VCAN ou do Cavado do Nordeste, observa-se que na figura 4.9.a, na região do VCAN, têm-se um anticiclone anômalo de altos níveis, indicando um enfraquecimento circulação ciclônica nesta região.

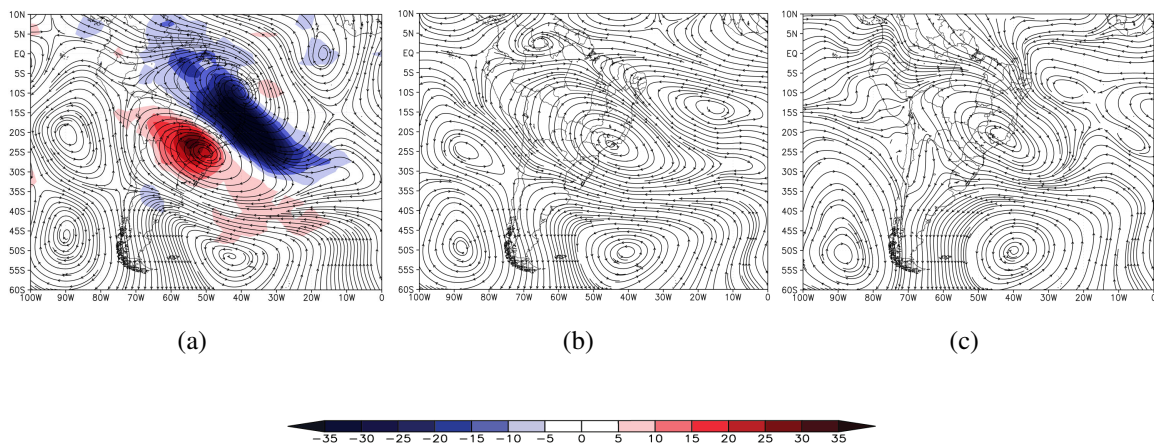


Figura 4.9: Igual a Figura 4.3, mas para ZCAS-La Niña.

Com relação a literatura da ZCAS é a primeira vez que a interação ZCAS-VCAN é mencionado e a partir desta constatação, na próxima seção iremos analisar os compostos de ZCAS filtrados na alta troposfera, com o intuito de compreender em qual frequência temporal o VCAN ou cavado do Nordeste é enfraquecido durante eventos de ZCAS.

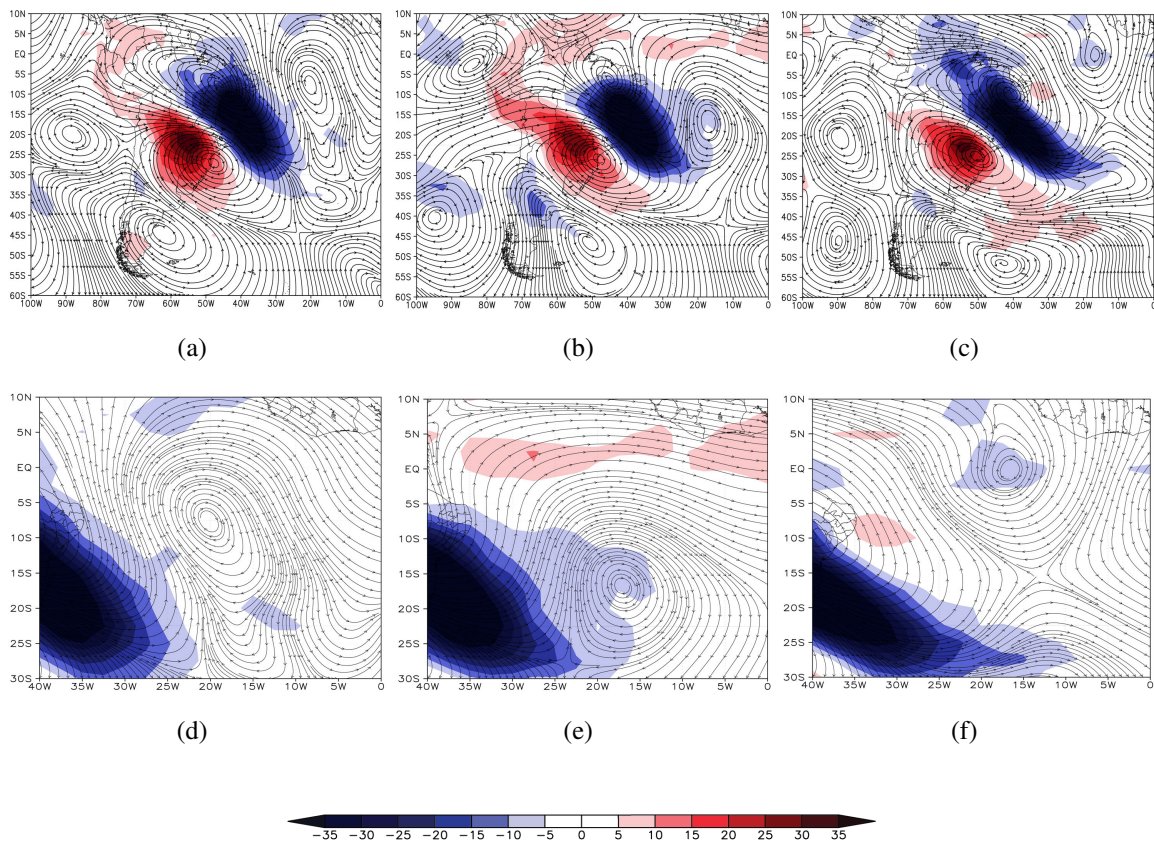
#### 4.4 *A Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis*

Assim como a ZCAS, o VCAN tem sido discutido a vários anos devido a sua influência no regime de precipitação na região nordeste do Brasil (Kousky e Gan, 1981; Gan e Kousky, 1986; Rao e Bonatti, 1987; Mishra et al., 2001; Fedorova et al., 2018; Lyra e Arraut, 2020). O VCAN ocorre durante os meses de primavera e verão sobre o Atlântico Sul, sendo semelhante ao VCAN que ocorre no Hemisfério Norte e nas regiões do Pacífico e Atlântico Norte (Palmer, 1951; Kousky e Gan, 1981). Este sistema atmosférico característico de um ciclone em altos níveis troposféricos pode ter efeitos combinados da região Sudeste ao Nordeste do Brasil, intensificando sistemas convectivos a partir do padrão ZCAS-VCAN (Valverde Ramírez, 1996; Valverde Ramírez et al., 1999). Figueroa (1997) discutiu em sua tese o acoplamento entre a ZCAS, a Alta da Bolívia e o VCAN, destacando uma cadeia de dependência entre eles, onde: (a) o VCAN depende da ZCAS; (b) a Alta da Bolívia depende da convecção tropical e da convecção da ZCAS; (c) a ZCAS depende da convecção Amazônica e dos transientes das médias latitudes; (d) a convecção Tropical ou Amazônica depende dos transientes de grande escala.

Segundo Kousky e Gan (1981), o VCAN no Atlântico Sul próximo a região Nordeste do Brasil é formado a partir do deslocamento equatorial das frentes frias, causando uma intensificação da crista em altos níveis, sendo assim indiretamente responsável pela sua gênese e fortalecimento. Valverde Ramírez et al. (1999) identificou uma relação entre o VCAN e a ZCAS, notando que a divergência em altos níveis da ZCAS, causada pela liberação de calor latente intensifica a circulação anticiclônica na camada superior da troposfera, onde, devido a conservação de vorticidade, o centro do ciclone tende a se desenvolver próximo a costa do Nordeste do Brasil.

Muitos trabalhos discutem os efeitos remotos na ZCAS, porém pouco é discutido da relação ZCAS-VCAN, onde apenas Valverde Ramírez et al. (2004) haviam mencionado o mesmo, mas de forma pouco detalhada. A maioria dos trabalhos focam na gênese do VCAN a partir da ZCAS, porém os aspectos dinâmicos de interação entre a ZCAS e o VCAN sob diferentes es-

calas temporais e variabilidades interanuais nunca foram discutidos. Os resultados da seção anterior (4.3) destacam um enfraquecimento do VCAN durante os compostos de ZCAS que ocorreram sob a atuação da La Niña, assim, neste capítulo pretendemos compreender o que causa este enfraquecimento a partir de uma breve análise climatológica dos compostos médios do escoamento em 200 hPa nas escalas temporais intrassazonal e interanual dos compostos de ZCAS apresentados anteriormente, mas aqui filtrados de acordo com a metodologia proposta na seção 3.2.2.



*Figura 4.10:* Composição média da anomalia de ROLE e das componentes zonal e meridional do vento em linhas correntes no nível de 200 hPa dos episódios de ZCAS que ocorreram durante anos de ; a) Neutro, b) El Niño, c) La Niña. Mesmas composições mas no domínio (10°N - 30°S e 40°W - 0°W); d) Neutros, e) El Niño, f) La Niña.

Na figura 4.10 os resultados dos compostos de ZCAS durante anos de Neutros, El Niño e La Niña em 200 hPa são analisados em conjunto para melhor compreensão das diferenças entre estas composições. Nesta figura haverá também um foco de análise na região do VCAN no domínio entre (10°N - 30°S e 40°W - 0°W) no Oceano Atlântico Sul. Como mencionado anteriormente, o que mais chama atenção é a circulação anticiclônica na região do VCAN durante os anos de La Niña (Figura 4.10.c.f), sendo exatamente a circulação oposta a observada nas composições de El



Niño (Figura 4.10.a.d) e dos anos Neutros (Figura 4.10.b.c). Também é notável o deslocamento do núcleo deste ciclone anômalo, onde durante anos de El Niño fica próximo dos 15°S, os anos Neutros 5°S, e para os eventos de La Niña o núcleo do anticiclone encontra-se próximo a região equatorial em torno de 0°. Ao analisar a circulação zonal próximo da latitude de 5°S é notável que para os compostos de El Niño e Neutros, temos um escoamento anômalo de Oeste (Figura 4.10.d.e), enquanto que para os eventos de ZCAS durante anos de La Niña têm-se um escoamento anômalo de Leste (Figura 4.10.f).

Ainda sobre a Figura 4.10, e as composições de ZCAS-La Niña, ao comparar a Figura 4.10.c.f com a Figura 4.8.d, observamos que o sinal do anticiclone anômalo é uma representação da desintensificação do VCAN ou do enfraquecimento da gênese ciclônica nos altos níveis na região equatorial do Oceano Atlântico Sul, provavelmente devido a ação da variabilidade interanual da La Niña, ou do acoplamento entre eventos de ZCAS-La Niña, sendo esta uma representação do enfraquecimento do cavado do nordeste durante eventos de ZCAS-La Niña. Este resultado corrobora com o encontrado por Repinaldo et al. (2020), onde observou menor atividade de VCANs que atinge o Estado de Alagoas durante os anos de La Niña.

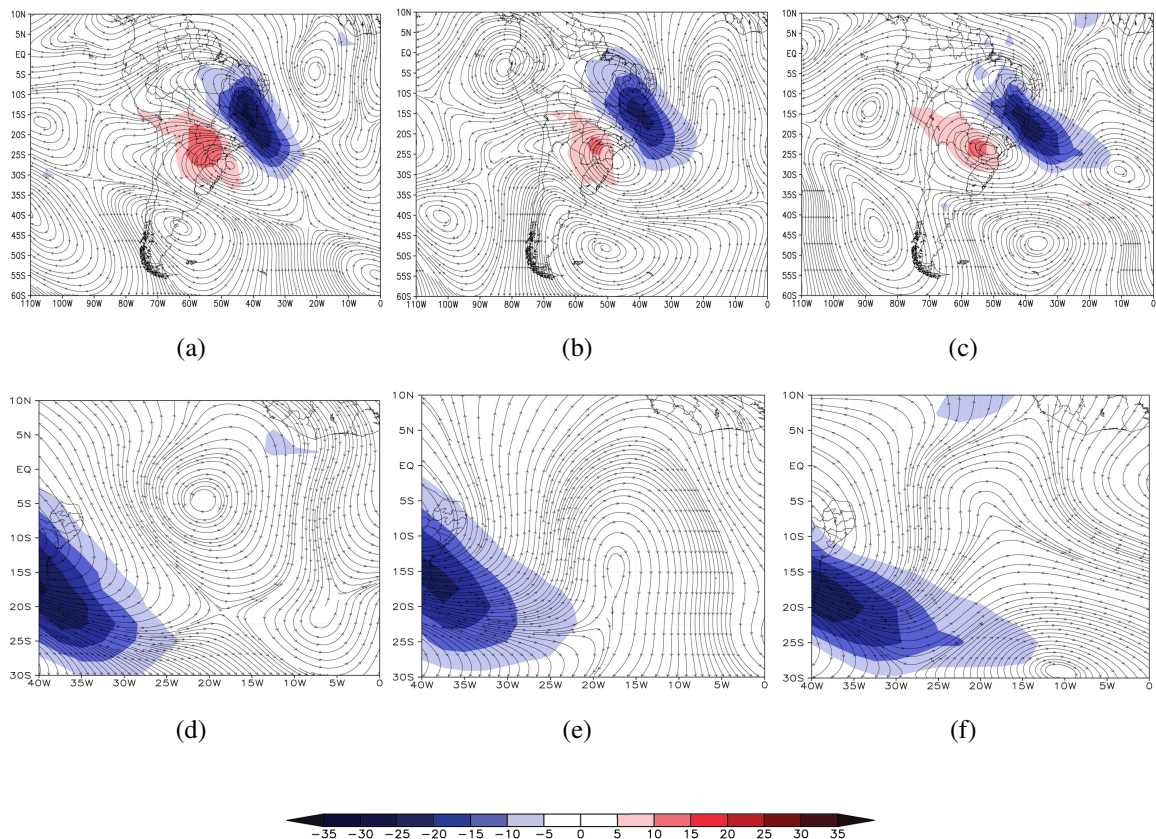


Figura 4.11: Igual a figura 4.10, mas filtrado na banda 20-90 dias.

Na figura 4.11 são analisadas as composições de ZCAS filtradas na banda intrassazonal (20-90 dias). Para as composições de ZCAS-Neutras (Figura 4.11.a.d) têm-se o sinal característico do VCAN, a partir de um ciclone anômalo, e nesta banda temporal tanto para as composições de ZCAS-El Niño (Figura 4.11.b.e) quanto para de ZCAS-La Niña (Figura 4.11.c.f) há o cavado do nordeste, mesmo que ainda mais intenso nos casos de El Niño. Diferente do observado na Figura 4.10.c.f, quando a série é filtrada na banda intrassazonal a configuração clássica de ZCAS se mantém mesmo quando há La Niña, sugerindo que alguma outra variabilidade de mais baixa frequência é responsável pelo enfraquecimento do cavado do nordeste a partir da circulação anticiclônica anômala na região.

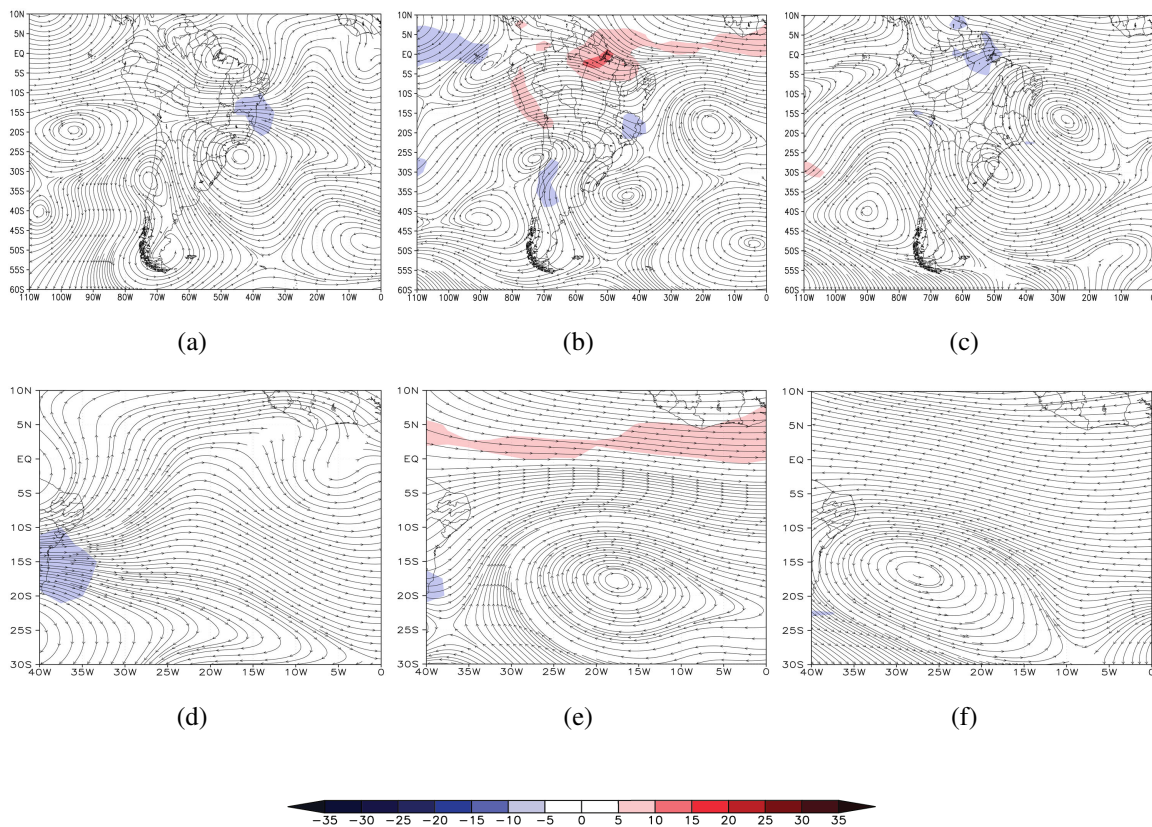


Figura 4.12: Igual a figura 4.10, mas filtrado na banda 200 dias passa-baixa.

A banda temporal 200 dias passa-baixa é a que representa os sinais de mais baixa frequência da série de novembro a março analisada nesta tese, esta banda temporal é considerada característica da variabilidade interanual, onde esperamos encontrar os efeitos do ENOS ou de alguma variabilidade de mais baixa frequência durante as composições. Na figura 4.12 nas composições de ZCAS-Neutras (Figura 4.12.a.c) ainda há o sinal do cavado do nordeste, enquanto que na composição de El Niño (Figura 4.12.b.e) é possível observar um ciclone anômalo



e uma circulação de Oeste intensa próxima da região do cavado do nordeste e do VCAN. Nesta figura também chama atenção as anomalias negativas de ROLE em toda faixa da ZCIT, indicando um desfavorecimento da convecção durante eventos de ZCAS-El Niño. Para a composição de ZCAS-La Niña (Figura 4.12.c.f) têm-se o oposto do observado durante as composições de ZCAS-El Niño, a partir de um anticiclone anômalo e de escoamentos de leste na região equatorial, a análise sugere que o enfraquecimento do cavado do nordeste e o sinal do anticiclone anômalo na Figura 4.10.c.f são uma ação da variabilidade interanual da La Niña nos altos níveis troposféricos do Oceano Atlântico Sul.

#### 4.5 Conclusões

As composições de ZCAS aqui identificadas e caracterizadas objetivamente possuem uma estrutura semelhante as configurações enfatizadas na literatura em vários trabalhos como, por exemplo, Ferreira et al. (2004); Nielsen et al. (2019); Silva et al. (2019) e Rosa et al. (2020). Os padrões de ZCAS nas fases do ENOS apresentam algumas diferenças entre elas.

Para os episódios de ZCAS-El Niño:

- Maior frequência no mês de fevereiro;
- Menor extensão da nebulosidade continental;
- O enfraquecimento da ZCIT;
- Intensificação do VCAN ou Cavado do Nordeste;

Nas composição de ZCAS-Neutras a configuração é semelhante a clássica climatológica discutida na literatura, corroborando com todos os critérios mencionados no capítulo 1 com base em Ambrizzi e Ferraz (2015).

Para as composições de ZCAS-La Niña, algumas diferenças em relação ao padrão médio podem ser destacadas:

- Maior extensão da nebulosidade continental;
- Intensificação da ZCIT;
- Enfraquecimento do Cavado do Nordeste;

Na região do VCAN as composições de ZCAS-El Niño e ZCAS-La Niña são opostas. Na seção 4.4, a partir da análise destas composições filtradas nas bandas intrassazonal e interanual, é evidente a ação da variabilidade interanual na intensificação do VCAN a partir de um ciclone anômalo na região durante os anos de El Niño e o enfraquecimento a partir de um anticiclone anômalo durante os anos de La Niña. Outra diferença marcante na circulação é o escoamento de oeste anômalo na região equatorial do Oceano Atlântico Sul durante as composições de ZCAS-El Niño, enquanto que durante os dias de ZCAS-La Niña a circulação é oposta, característica do escoamento de leste anômalo. Desta forma a variabilidade interanual do El Niño atua por meio de uma intensificação do VCAN ou cavado do Nordeste, enquanto que a baixa frequência da La Niña, enfraquece o cavado. Estes resultados são inéditos e pouco explorados na literatura, mostrando o enfraquecimento do cavado do nordeste durante eventos de ZCAS para os anos de La Niña e a intensificação para os anos de El Niño. Nas análises aqui realizadas não observamos as variações de TSM do Oceano Atlântico Equatorial ou Sul, que também podem influenciar no escoamento da alta troposfera. Combinações entre episódios de ZCAS considerando as oscilações do ENOS e do Oceano Atlântico Equatorial podem esclarecer ainda mais os processos dinâmicos entre a ZCAS e o VCAN.

Em relação a ZCIT, o mesmo pode ser discutido quando é comparado os compostos de ZCAS-El Niño e ZCAS-La Niña na variabilidade interanual, onde as composições de El Niño destacam seu enfraquecimento a partir de anomalias positivas de ROLE por quase todo domínio de atuação da ZCIT com um núcleo ainda mais intenso nos Estados do Amapá e Pará. O mesmo é observado nas composições não filtradas, onde podemos associar este padrão a uma ação da variabilidade interanual do El Niño. Durante os anos de ZCAS-La Niña, a ZCIT se intensifica, embora não seja tão evidente, quanto o enfraquecimento observado durante os anos de El Niño. Os resultados em relação a ZCIT corroboram com os de Ferreira et al. (2004), ainda que o autor não tenha analisado as composições de ZCAS filtradas.

Todas as composições de ZCAS apresentam padrões de Ondas de Rossby na sua retaguarda, embora não aparente ter grandes diferenças ao se analisar apenas no domínio do continente sul americano. No próximo capítulo é realizada uma análise dos padrões de ZCAS a partir de uma perspectiva de circulação global na região do Pacífico América do Sul de ambos hemisférios, com o objetivo de compreender estes padrões de ondas associados a ZCAS e seus possíveis efeitos remotos.

# Pacífico América do Sul

## 5.1 A Zona de Convergência do Atlântico Sul

A ZCAS é uma Zona de Convergência Subtropical (ZCST), perturbação atmosférica persistente característica da grande escala responsável por gerar grandes volumes de precipitação nas regiões subtropicais. De acordo com Kodama (1992), as ZCST são zonas frontais subtropicais caracterizadas por uma intensa convergência de umidade, com atividade frontogenética no campo equivalente barotrópico e instabilidade convectiva generalizada, que se formam ao longo do jato subtropical no lado leste de um cavado quase-estacionário, com inclinação para Nordeste no HN e para Sudeste no HS, sendo que quando ativa a convecção tropical pode atingir até 400 mm/mês. Para que se caracterize uma ZCST duas condições devem ser satisfeitas: 1) escoamento de baixos níveis com direção aos polos a oeste da periferia das altas subtropicais associadas com as entradas das baixas quentes nas zonas de altas pressões subtropicais; 2) o jato subtropical intensificando a frontogênese subtropical em conjunto com o escoamento com direção aos polos (Kodama, 1993). Ao longo do planeta terra três zonas de nebulosidade podem ser caracterizadas como ZCST, ambas possuem características de monção a partir da migração sazonal da precipitação, sendo elas a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e a Zona Frontal de Baiu (ZFB), localizada no Nordeste Asiático.

Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015) analisaram a interação dinâmica entre a ZCPS e a ZCAS via trens de ondas de Rossby embebidos no jato subtropical do HS durante o verão austral, associando as propagações de ondas de Rossby as perturbações causadas pela divergência da ZCPS ou das variabilidades da OMJ. Carvalho et al. (2011) destacam que os trens de ondas de Rossby extratropicais são as principais forçantes da

variabilidade intrassazonal da ZCAS, o que corrobora com os resultados de Casarin e Kousky (1986); Grimm e Silva Dias (1995); Nogués-Paegle e Mo (1997); Liebmann et al. (1999); Van Der Wiel et al. (2015).

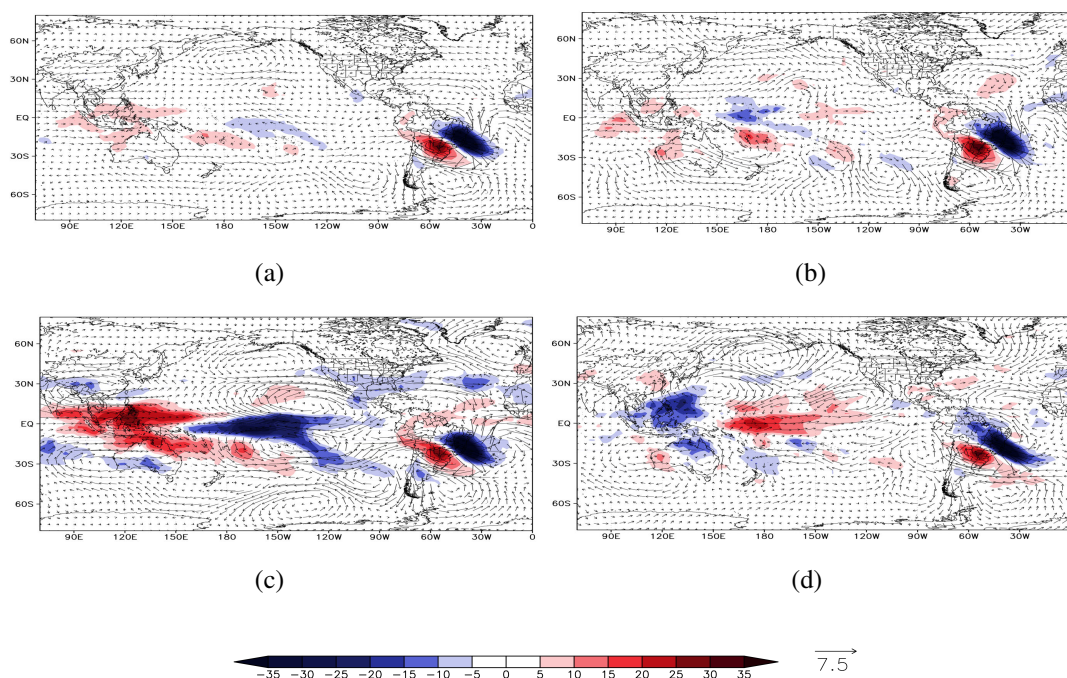
Neste capítulo serão discutidos os padrões de ondas de Rossby associados as composições analisadas no capítulo 4, referente aos compostos ZCAS no domínio da América do Sul. A maioria dos trabalhos que estudaram a interação entre e as propagações de ondas de Rossby e a ZCAS analisam apenas as composições climatológicas, aqui pretendemos analisar; as composições de ZCAS nas diferentes fases dos ENOS, e filtradas nas variabilidades intrassazonal e interanual, em todo o domínio da região do Pacífico e América do Sul, para ambos hemisférios, com intuito de compreender os impactos globais desta zona de nebulosidade.

## 5.2 Estrutura Média da Circulação Anômala dos Episódios de ZCAS

Das composições de ZCAS no domínio dos Oceanos Pacífico e Atlântico têm-se na Figura 5.1 as anomalias de ROLE e das componentes zonais e meridionais do vento na alta troposfera, com o intuito de compreender a circulação anômala global média enquanto esta perturbação atmosférica persistente está ativa. Das composições das ZCAS-Climatológica e ZCAS-Neutra nas Figuras 5.1.a.b é notável um trem de ondas se propagando pelo Oceano Pacífico Sul e interagindo com a ZCAS, possivelmente disparado por alguma perturbação próxima da Austrália. Este trem de ondas é semelhante ao descrito por Mo e Higgins (1998), ao descrever os padrões de teleconexões do Pacífico Sul a partir do padrão ondulatorio Pacífico América do Sul (PSA). Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006) em seus trabalhos também associaram o PSA ao trem de ondas na retaguarda da ZCAS. Ainda sobre a Figura 5.1.a.b, nas anomalias de ROLE poucas diferenças são notáveis, além do posicionamento mais a oeste das anomalias negativa, de ROLE na região do Pacífico Equatorial nas composições de ZCAS-Neutra 5.1.b.

Durante a fase positiva do ENOS, as composições de ZCAS-El Niño (Fig 5.1.c) apresentam um trem de ondas diferente do PSA e mais longo, com número de onda 2 ou 3 partindo das anomalias negativas de ROLE na região do Pacífico Equatorial e Leste. Este tipo de propagação mais longa durante anos de El Niño também foi observado e analisado por Magaña e Ambrizzi (2005), que corrobora com os resultados da Figura 5.1.c. Com relação as anomalias de ROLE têm-se na região leste do Pacífico anomalias positivas ao norte da Austrália e anomalias negativas no Pacífico Equatorial, onde nesta mesma região há uma banda de nebulosidade com orientação

Noroeste-Sudeste, aparentemente um sinal da ZCPS a leste da sua posição climatológica. Vincent et al. (2009); Brown et al. (2020) ao analisarem a ZCPS sob diferentes variabilidades interanuais, destacam que, durante os anos de El Niño, a ZCPS é posicionada a leste da sua região climatológica e durante anos de La Niña é localizada a sudoeste e mais próxima da Austrália.



*Figura 5.1:* Compostos médios da anomalia de ROLE e da componente meridional e zonal do vento no nível de 200 hPa; a) de todas as ZCAS, b) de ZCAS durante anos neutros, c) de ZCAS durante anos com atuação do El Niño, d) de ZCAS durante anos sob atuação de La Niña.

Na Figura 5.1.d, referente a composição de ZCAS-La Niña, diferente do observado pelas Figuras 5.1.a.b., o PSA não é o padrão dominante e o Oceano Pacífico Sul também não mostra de forma clara ser o caminho preferencial das ondas que interagem com a ZCAS. Nesta composição, um trem de ondas de Rossby interhemisférico, disparado no sudeste asiático, é representado como o padrão ondulatório dominante durante anos de La Niña. Nota-se na região equatorial do Oceano Pacífico ventos anômalos de oeste, o que facilitaria este tipo de propagação interhemisférica, assim como também a ausência de nebulosidade no Equador, a partir das anomalias positivas de ROLE na região. Ao comparar esta mesma circulação equatorial no Oceano Pacífico com as composições de ZCAS-El Niño (Figura 5.1.c) a diferença entre elas é notável, sendo representado nesta figura anomalias de ventos de leste, o que é bastante restritivo para propagações interhemisféricas.

Com o intuito de uma melhor compreensão dos trens de ondas observados durante as composições de ZCAS, na Figura 5.2 é representada a estrutura média vertical a partir das anomalias de funções de corrente ( $\psi$ ) e de TSM. Para  $\psi$  os compostos foram calculados nos níveis de 200 hPa e 800 hPa com o objetivo de analisar as características barotrópicas ou baroclínicas destes trens de ondas. Tanto nas Figuras 5.2.a.c referente as ZCAS-Climatologica, quanto nas Figuras 5.2.b.d das ZCAS-Neutras, o trem de ondas semelhante ao PSA é observado, com uma barotropia equivalente propagando-se sobre o Oceano Pacífico Sul e interagindo com a ZCAS. As anomalias de TSM acompanham este padrão ondulatório a partir da sucessão zonal de anomalias positivas e negativas na região do Oceanos Pacífico e Atlântico Sul (Figura 5.2.e.f.).

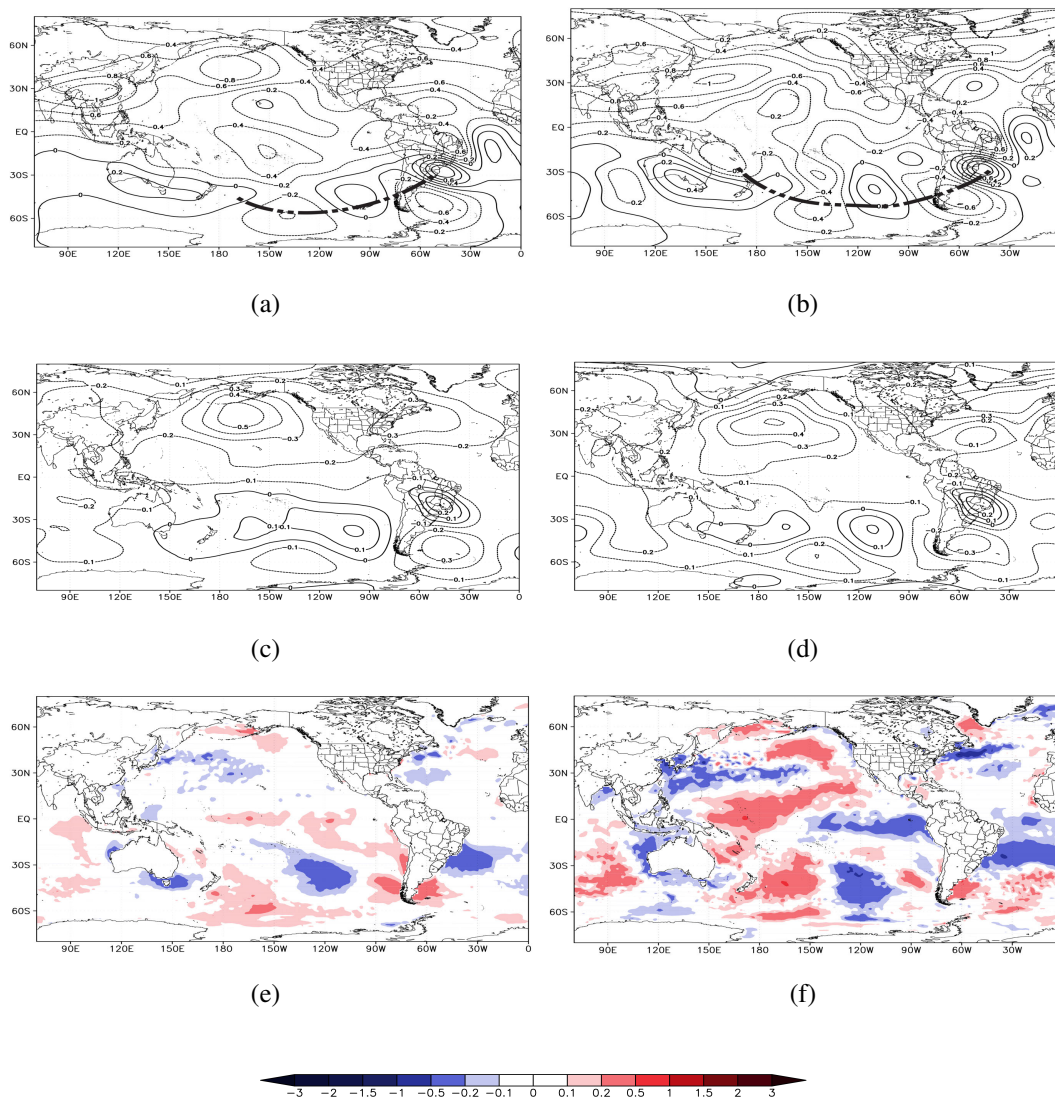


Figura 5.2: Composto médio de função de corrente ( $\psi$  em  $10^7 m^2 s^{-1}$ ) de: a) todos os dias de ZCAS em 200 hPa, b) ZCAS Neutras em 200 hPa, c) todos os dias em 800 hPa, d) ZCAS neutras em 800 hPa. Composição média da anomalia da Temperatura da Superfície do Mar em graus de: e) todos os dias de ZCAS, e) ZCAS neutras.



Para as propagações de ondas que ocorrem durante os anos Neutros e a partir de uma média climatológica, o PSA aparenta ser o padrão de teleconexão dominante da retaguarda da ZCAS, estando de acordo com o sugerido por Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006). Van Der Wiel et al. (2015); Nielsen et al. (2019) observaram o mesmo padrão ondulatorio sobre o Oceano Pacífico Sul, mas não chegaram a associar tal propagação de ondas de Rossby ao PSA. Na Figura 5.3, em geral os trens de ondas equivalentemente barotrópicos podem ter sido disparados por perturbações baroclínicas persistentes a partir das anomalias de TSM causadas pelas perturbações do ENOS durante ambas as fases. A descrição dinâmica de perturbações baroclínicas disparando trens de ondas barotrópicos pode ser analisada na seção 2.3.

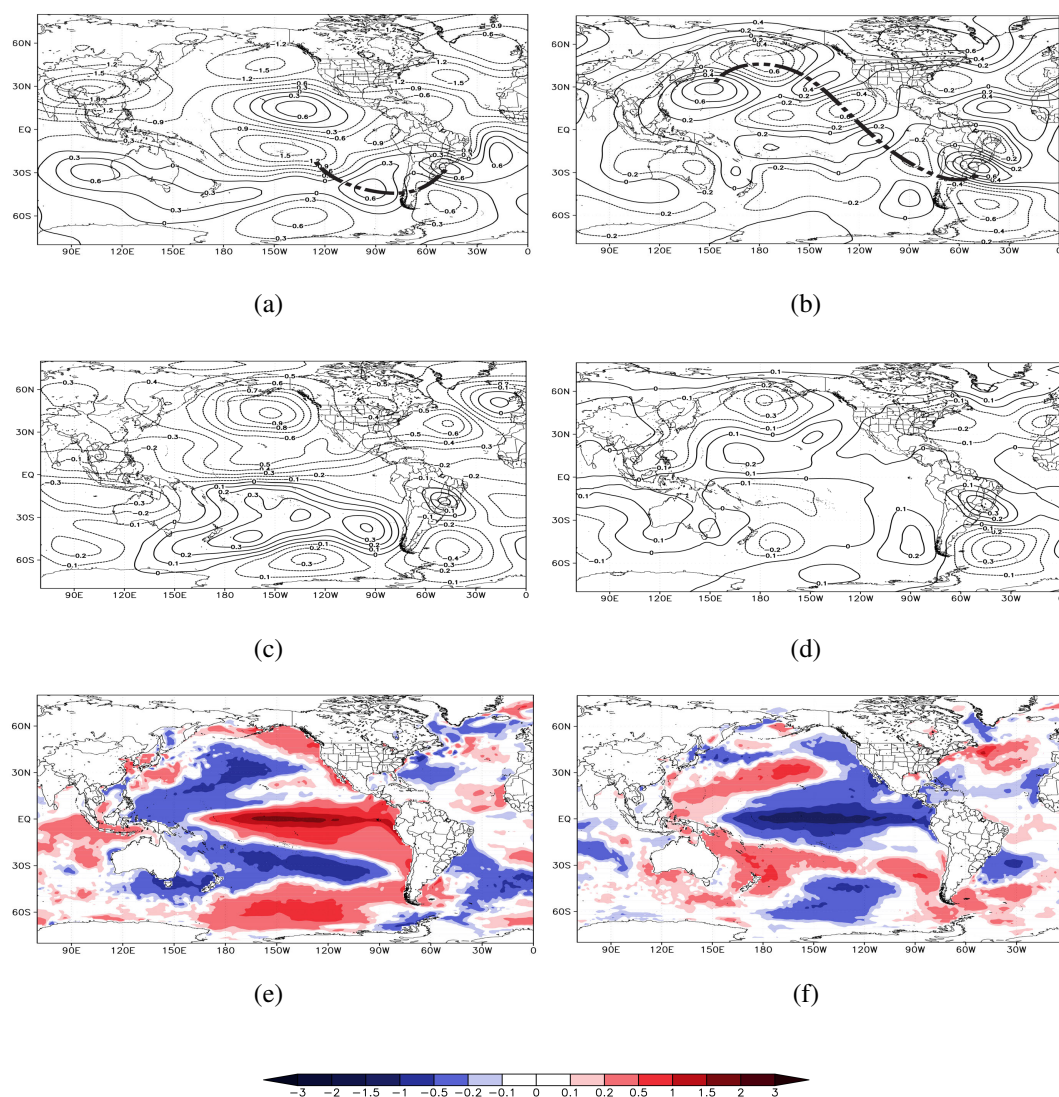


Figura 5.3: Igual figura 5.2 mas para El Niño e La Niña.

Das anomalias de  $\psi$  durante os dias de ZCAS-El Niño da Figura 5.3.a.c.e, um trem de ondas longo parte da região baroclínica equatorial, característica de anomalias de TSM positivas e com anomalias de ROLE negativas na mesma região (Figura 5.1.c). Nesta composição é notável a presença marcante do El Niño, e diferente das outras composições as anomalias de TSM tem uma sucessão meridional no Oceano Pacífico Sul.

Da ZCAS-La Niña (Figura 5.3.b.d.f) é observado um trem de onda de Rossby interhemisférico, principalmente nos altos níveis, com uma barotropia equivalente apenas no leste do Oceano Pacífico Norte e no Sul da América do Sul, na retaguarda da ZCAS. Este resultado está de acordo com o observado por Tomas e Webster (1994), que ao analisar o corte vertical dos trens de ondas de Rossby interhemisféricos que se propagavam sobre o Oceano Pacífico Equatorial, destaca uma certa barotropia equivalente até o momento em que este trem de ondas cruzava o equador, onde a partir dali a onda seguia sendo mais rasa e com características baroclínicas por quase todo domínio tropical até atingir as latitudes médias, induzindo circulações ciclônicas e anticiclônicas equivalentemente barotrópicas nos subtropicais e nas latitudes médias.

Na Figura 5.3.d há um sinal parecido com o do PSA no Oceano Pacífico Sul, embora não seja o dominante. Para as propagações de ondas durante os eventos de ZCAS-La Niña, além do padrão de onda interhemisférico não se deve descartar o padrão clássico de teleconexão do PSA, que é também marcado por uma sucessão zonal de anomalias de TSM na região do Oceano Pacífico Sul (Figura 5.3.f.)

### 5.3 *Escoamento Tropical*

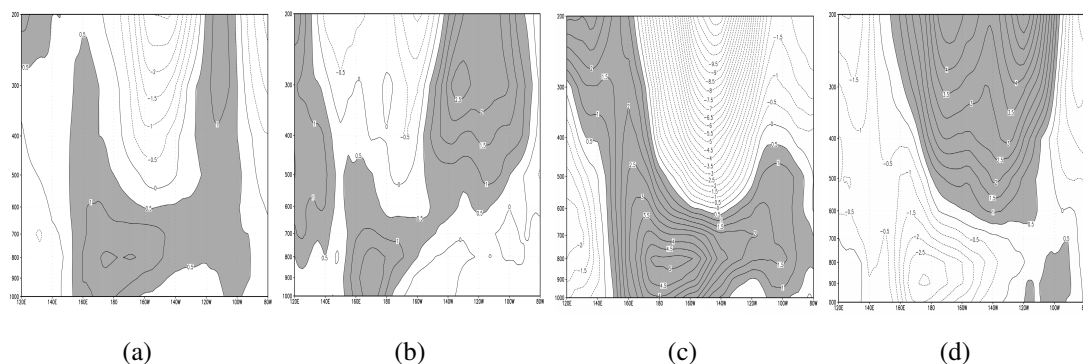
O escoamento tropical e principalmente, equatorial da alta troposfera, tem importância fundamental na dinâmica das propagações de ondas interhemisféricas, das quais podemos chamar de janelas equatoriais ou janelas interhemisféricas, sendo as regiões com escoamento de oeste significativo que permitem a propagação de ondas entre os hemisférios (Webster e Holton, 1982; Tomas e Webster, 1994). As ondas de Rossby que se propagam sobre a região equatorial também podem ser nomeadas como "Cross Equatorial Waves"(CEW), ou Ondas que Cruzam o Equador, que ocorrem sob as mesmas condições de escoamento de oeste intensos, e que podem ser dificultadas ou até impedidas, caso haja um escoamento de leste significativo (Hoskins e Karoly, 1981; Webster e Holton, 1982; Hoskins e Ambrizzi, 1993; Li et al., 2019).



### 5.3.1 Perfil Vertical

Para melhor compreender o que ocorre ao longo da troposfera equatorial durante os eventos de ZCAS nas diferentes fases do ENOS as mesmas composições da seção 5.2 foram analisadas a partir do perfil vertical do vento zonal anômalo no domínio do Oceano Pacífico Equatorial (Fig 5.4), com o intuito de investigar a estrutura vertical da baroclinia equatorial durante estas composições, assim como o escoamento da alta troposfera para cada composição de ZCAS analisada.

Dos altos níveis troposféricos da Figura 5.4.a.b.c.d, apenas as composições de ZCAS-El Niño (Fig 5.4.c) não apresentam escoamentos anômalos de oeste nas regiões centrais e leste do Oceano Pacífico Equatorial, com escoamento positivo apenas na porção oeste e com forte escoamento de Leste equatorial. Apesar do que está sendo analisado são as composições médias de ZCAS durante anos de El Niño, por si só o estado básico do ENOS na sua fase positiva já é semelhante ao observado durante esta composição (Fig 5.4.c), ventos de leste ou enfraquecimento dos escoamentos de oeste na alta troposfera e escoamentos de oeste na superfície, as vezes denominadas como "westerly burst", que enfraquece os alísios.



*Figura 5.4:* Perfil vertical do vento zonal anômalo no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Em cinza escoamentos de oeste anômalo. Esta figura pode ser visualizada maior no Apêndice B.5

As composições de ZCAS-Climatológicas e ZCAS-Neutras das Figuras 5.4.a.b, são de certa forma semelhantes, a partir de um fraco escoamento de oeste no Pacífico Equatorial Leste na alta troposfera e fracos escoamentos de oeste próximo da superfície, mas no Pacífico Equatorial Central e Oeste. A baroclinia é evidente em ambas composições, com escoamento de leste na alta troposfera equatorial e de oeste na superfície. Durante as ZCAS-La Niñas na Figura 5.4.d têm-se um padrão diferente do observado nas composições anteriores das Figuras 5.4.a.b.c, a

partir do escoamento de oeste intenso, sendo até 2 vezes mais intenso que nos casos de ZCAS-Neutras (Fig 5.4.b). Nos baixos níveis o escoamento de leste é ligeiramente intensificado estando de acordo com a intensificação dos alísios nesta região durante os anos de La Niña. Para os dias de ZCAS-La Niña é mais fácil de ocorrer o tipo de teleconexão interhemisférica via ondas de Rossby do que durante as fases positiva ou neutra do ENOS, que impedem ou dificultam que este tipo de propagação de ondas ocorram pelo Pacífico Central e Leste, principalmente durante a fase positiva, onde os escoamentos de Leste são intensificados nos altos níveis.

### 5.3.2 Altos Níveis Troposférico Tropicais

Do escoamento anômalo do vento zonal e meridional em 200 hPa, na alta troposfera, têm-se na Figura 5.5 as composições de ZCAS nas diferentes fases do ENOS em todo o domínio tropical de ambos hemisférios. Das ZCAS-Climatológicas e ZCAS-Neutras pouco é notável em relação ao escoamento equatorial, embora na Figura 5.5.b o sinal do PSA seja destacado. Para as Figuras 5.5.a.b não se observa escoamentos acima de 10 m/s (linhas de correntes vermelhas), onde se destaca apenas o ciclone e anticiclone anômalos da ZCAS nos altos níveis troposféricos.

Para a composição de ZCAS-El Niño na Figura 5.5.c há um par de anticiclone e escoamento de leste na região do Oceano Pacífico Equatorial. Este par de anticiclones simétricos é uma resposta a fonte de calor simétrica do El Niño a partir das anomalias de TSM na região equatorial do Oceano Pacífico onde estes dois anticiclones geram um escoamento de leste em altos níveis e de oeste nos baixos níveis, que são os "westerly wind burst". Além deste escoamento de Leste equatorial na Figura 5.5.c também é possível observar uma certa intensificação do jato subtropical do HS, que é destacado por quase todo domínio do Pacífico Central Equatorial à América do Sul, indicando um guia de ondas da anomalia do El Niño durante eventos de ZCAS. Ainda sobre a Figura 5.5.c na região do Atlântico Equatorial é observado o escoamento intenso de oeste, apenas nesta composição e, se comparado com as figuras anteriores, esta análise indica que durante eventos de ZCAS-El Niño, embora as ondas sejam impedidas ou dificultadas de se propagarem sobre o Oceano Pacífico Equatorial, as propagações de ondas de Rossby interhemisféricas via Oceano Atlântico equatorial podem ser facilitadas. Este tipo de propagação já havia sido sugerida por Grimm e Silva Dias (1995), onde a ZCAS pode ser uma fonte de ondas de Rossby. Li et al. (2015, 2019) demonstram que propagações de ondas cross-equatoriais ocorrem com maior frequência entre o HS e o HN sobre o Oceano Atlântico do que sobre o Oceano Pacífico.

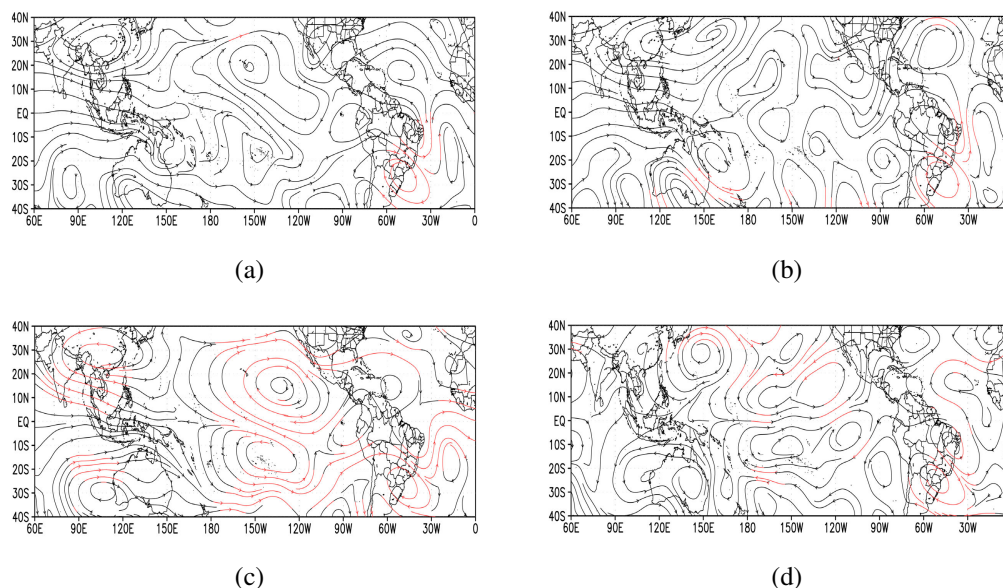


Figura 5.5: Linhas de correntes anômalas em 200 hPa dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Linhas de Correntes na cor vermelha indicam escoamento superior a 10 m/s.

A ZCAS-La Niña é a única composição que apresenta o escoamento de oeste acima de 10 m/s na região equatorial do Pacífico, sendo este um sinal característico que permite a interação entre hemisférios (Fig 5.5.d). Este padrão de circulação já era esperado a partir do perfil vertical da Figura 5.4.d e do sinal característico da onda de Rossby interhemisférica das composições ZCAS-La Niña anteriores, embora a anomalia causada pela onda dificulte a análise do escoamento de oeste equatorial. A partir deste resultado, decidiu-se analisar a mesma composição, mas filtrada na banda 200 dias passa-baixa, com o intuito de compreender a circulação equatorial a partir da variabilidade interanual, onde conforme é mostrado na Figura 5.6, as perturbações de mais alta frequência e até intrassazonais são filtradas, facilitando, assim, a interpretação da circulação anômala de mais baixa frequência da região.

Nas análises do escoamento anômalo filtrados na banda 200 dias passa-baixa da Figura 5.6.a.b, em relação as composições de ZCAS-Climatológicas e ZCAS-Neutras, pouco ou nada muito relevante, além da circulação anômala de oeste na região equatorial das composições neutras (Fig 5.6.b), é observado, onde este sinal é uma representação característica do próprio estado básico quando não há atuação de El Niño ou La Niña.

Nas Figuras 5.6.c.d as análises feitas anteriormente com relação a Figura 5.5 são confirmadas, onde durante eventos de ZCAS-El Niño (Fig 5.6.c) há o par de anticlones anômalos nos altos níveis com circulação anômala de leste acima de 10 m/s na região equatorial e com escoamentos de oeste também intensos, mas na região do Atlântico Equatorial. Durante os dias de ZCAS-La

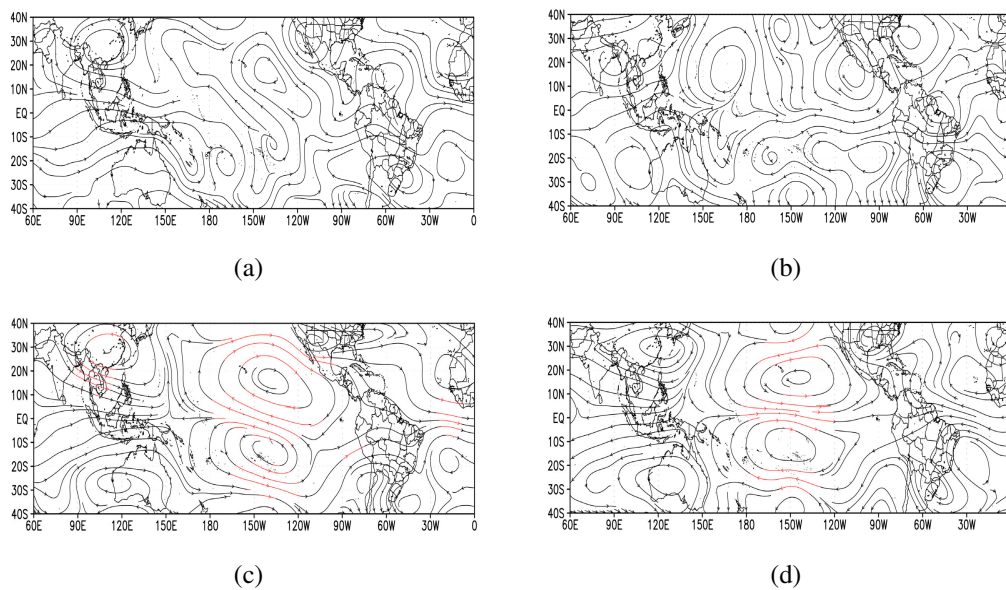


Figura 5.6: Igual figura 5.5, mas filtrado na banda 200 dias passa-baixa.

Niña (Fig 5.6.d) há o extremo oposto, um par de ciclones anômalos com escoamento de oeste na região equatorial, que indicam que propagações de ondas podem ocorrer mais facilmente durante esta variabilidade interanual, facilitando assim propagações de ondas interhemisféricas durante os eventos de ZCAS-La Niña. Para o Oceano Atlântico Equatorial também ocorre o oposto do observado na circulação anômala dos eventos de ZCAS-El Niño (Fig 5.6.c), onde durante as ZCAS-La Niña (Fig 5.6.d) há um escoamento anômalo de leste na região equatorial, dificultando assim propagações de ondas interhemisféricas que possam partir da ZCAS, ou de qualquer outra perturbação atmosférica de grande escala que ocorra no continente da América do Sul ou sobre o Oceano Atlântico Sul. A discussão da ZCAS como fonte de ondas de Rossby será discutido no capítulo 7 desta tese.

#### 5.4 Ondas de Rossby e a ZCAS

Muitos estudos mostraram a influência das ondas de Rossby extratropicais do HS na ZCAS, particularmente na escala de tempo intrassazonal (Grimm e Silva Dias, 1995; Figueroa et al., 1995; Liebmann et al., 1999; Carvalho et al., 2004; Cunningham e Cavalcanti, 2006). No entanto Van Der Wiel et al. (2015) foi um pouco além e investigou a teleconexão atmosférica entre a ZCPS e a ZCAS a partir dos trens de ondas de Rossby disparados pela divergência da ZCPS, que quando refratados pelo duto de oeste, os trens de ondas guiados pelo jato subtropical do HS são refratados a nordeste em direção ao escoamento de oeste equatorial. Assim, a dinâmica das

ondas de Rossby é responsável pela propagação em direção ao equador, com formato de arco, da região do Pacífico à América do Sul.

Na literatura, em geral as análises feitas dos padrões de ondas e a ZCAS não levam em consideração as diferenças dos estados básicos em meio a perturbações das variabilidades interanuais, sendo analisado apenas o padrão climatológico. No entanto o próprio estado básico gerado durante eventos ENOS possuem guias preferencias de propagações de ondas de Rossby diferentes da climatologia, como discutido por Ambrizzi (1994); Tomas e Webster (1994); Magaña e Ambrizzi (2005). Nesta seção serão realizadas as análise dos padrões de ZCAS nas diferentes fases do ENOS, dos guias de ondas de Rossby a partir do número de ondas de Rossby estacionárias ( $K_s$ ), das Fontes de Ondas de Rossby (Rossby Wave Source - RWS), da atividade energética do fluxo de onda e do vento zonal médio das composições de ZCAS serão realizadas, semelhantes as realizadas por Sardeshmukh e Hoskins (1988); Hoskins e Ambrizzi (1993); Takaya e Nakamura (2001).

#### 5.4.1 Escoamento Significativo - Altos Níveis Troposférico

Os mesmos compostos de ZCAS mencionados na Figura 5.1, da seção 5.2 serão analisados aqui, porém apenas as anomalias significantes com nível de confiança acima de 90% foram plotadas, com a intenção de focar nos padrões de teleconexões mais significativos relativos as composições de ZCAS, tanto para as séries filtradas, quanto não filtradas.

Na Figura 5.7 são demonstradas as anomalias de ROLE,  $\psi$ , vento zonal e meridional em 200 hPa com confiança estatística acima de 90% para as composições de ZCAS Climatológica, Neutra, El Niño e La Niña. Os trens de ondas de Rossby são semelhantes aos mencionados nas análises anteriores das Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, onde na Figura 5.7 são destacados os padrões preferencias, ou mais significativos. Das ZCAS-Neutras e ZCAS-Climatológicas (Fig 5.7.a.b.c.d), padrão semelhante ao PSA é destacado como rota preferencial de dispersão de energia, partindo do Oceano Pacífico Sul Oeste propagando-se em direção ao equador na América do Sul e interagindo com a ZCAS. Este é o padrão de onda clássico de interação com a ZCAS, identificado em estudos anteriores como Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015); Nielsen et al. (2019). A respeito das anomalias significantes de ROLE, a onda que parte da ZCAS-Neutra (Fig 5.7.c) é disparada mais a Oeste do que no caso da ZCAS-Climatológica (Fig 5.7.a). Há um sinal, ainda que fraco na região tropical a leste da Austrália e Nova Zelândia e diagonal com orientação Noroeste-Sudeste que se estende do equador aos

subtrópicos ( $25^{\circ}\text{S}$ - $30^{\circ}\text{S}$  -  $180^{\circ}\text{W}$ - $150^{\circ}\text{W}$ ), podendo este ser um sinal da ZCPS em sua posição climatológica. O padrão ondulatório das ZCAS-Climatológica e ZCAS-Neutra são semelhantes ao proposto por Van Der Wiel et al. (2015), onde a ZCAS é disparada pela divergência da ZCPS.

Durante eventos El Niños (Fig 5.7.e.f) as ondas são mais longas, em relação as outras fases do ENOS, e são disparadas da região do Pacífico Sul Leste, a partir de uma banda de nebulosidade diagonal com orientação noroeste-sudeste que pode ser relacionada ao posicionamento da ZCPS, que em anos de El Niño é localizada bem mais a leste de sua região climatológica (Vincent et al., 2009). Perturbações na região do ENOS no Oceano Pacífico Central também podem disparar ondas, Magaña e Ambrizzi (2005) realizaram simulações numéricas das propagações de ondas disparadas pelos ENOS durante o verão austral e um padrão de onda semelhante ao observado na Figura 5.7.e foi encontrado. As propagações de ondas durante os dias de ZCAS-El Niño são mais intensos que os das composições anteriores (Fig 5.7.a.c), talvez pela fonte fixa estar mais próxima do continente sul americano. Na América do Sul durante a ZCAS-El Niño (Fig 5.7.f) destaca-se o escoamento de oeste intenso sobre o Atlântico Equatorial e também o sinal do VCAN, mais claro e intensificado em relação as composições anteriores (Fig 5.7.b.d). Durante os dias de ZCAS-El Niño há uma janela equatorial na região do Atlântico Equatorial, onde a perturbação atmosférica da ZCAS poderia propagar energia por meio de ondas de Rossby ao HN.

No estado básico da La Niña, ondas de Rossby partindo do HN propagam-se em direção a América do Sul. As composições de ZCAS-La Niña (Fig 5.7.g.h), demonstram que as interações entre hemisférios são possíveis, onde uma onda interhemisférica é guiada pelo jato asiático, possivelmente disparada pela anomalia de calor localizada no Oceano Pacífico Norte/Sudeste do continente asiático ( $5^{\circ}\text{N}$ - $25^{\circ}\text{N}$  e  $120^{\circ}\text{E}$  -  $150^{\circ}\text{E}$ ). Esta fonte de calor possivelmente esta relacionada a variabilidade interanual associada a La Niña, podendo ser uma ação do seu estado básico. Deve-se notar que nesta mesma região nas Figuras 5.7.a.c.e as anomalias de ROLE são positivas. Ao comparar as Figuras 5.7.b.d.f.h, para o domínio da América do Sul, além da ausência do sinal do VCAN a diferença nas anomalias de  $\psi$  são evidentes no Leste do Oceano Pacífico Sul. Há um ciclone de latitudes médias ( $40^{\circ}\text{S}$  -  $50^{\circ}\text{S}$  e  $110^{\circ}\text{W}$  -  $90^{\circ}\text{W}$ ) nos dias de ZCAS-Climatológica e ZCAS-El Niño (Fig 5.7.b.f) e um anticiclone na região tropical ( $15^{\circ}\text{S}$  -  $30^{\circ}\text{S}$  e  $110^{\circ}\text{W}$  -  $90^{\circ}\text{W}$ ) nos dias de ZCAS-La Niña (Fig 5.7.h). Estas características são consistentes com a propagação meridional de ondas de Rossby, permitida a partir da reversão do escoamento de leste para oeste nos altos níveis na região do Pacífico Leste durante o estado básico de La Niña.



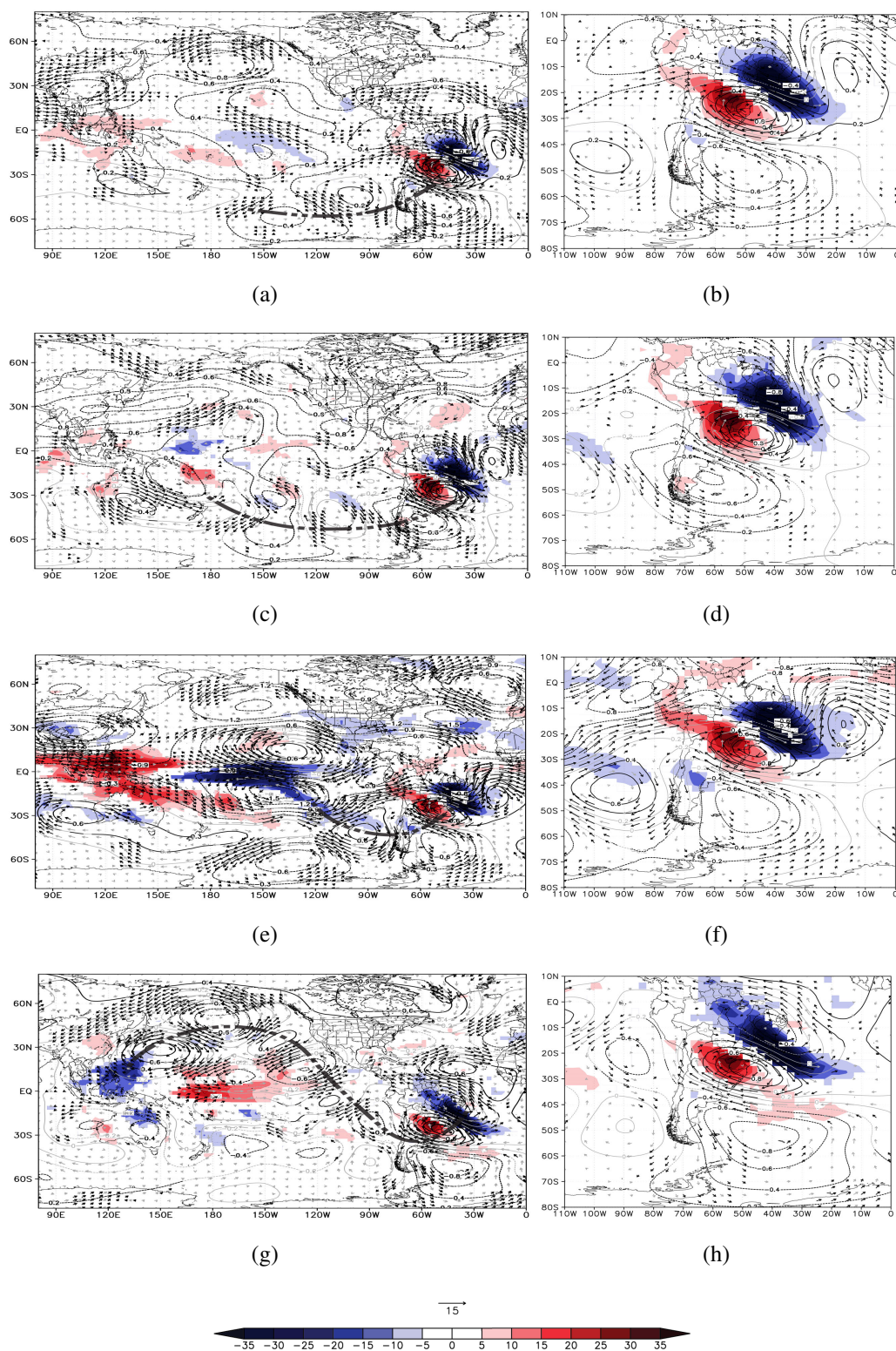


Figura 5.7: Compostos de ROLE anômala (sombreado em  $Wm^{-2}$ ),  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento zonal e meridional em 200 hPa (vetores em  $m.s^{-1}$ ) para os dias de ZCAS: a) Climatológicas, c) Neutras, e) El Niño, g) La Niña. E sobre o domínio da América do Sul: b) Climatológicas, d) Neutras, f) El Niño, h) La Niña. Apenas anomalias com nível de confiança acima de 90% foram plotadas na cor preta, e anomalias não significantes na cor cinza.

### 5.4.2 Escoamento Significativo - Intrassazonal e Interanual

As análises feitas nesta seção tem como base a mesma série de dados utilizada nos resultados até aqui apresentados. As composições a seguir foram submetidas a metodologia descrita na seção 3.2.2, a partir da filtragem da série de dados pelo filtro de Lanczos nas bandas temporais de 20-90 dias e 200 dias passa-baixa, características das variabilidades intrassazonal e interanual. As composições das Figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 são representativas das anomalias de ROLE,  $\psi$ , vento zonal e meridional em 200 hPa, filtradas nas bandas 20-90 dias e 200 dias passa-baixa, com confiança estatística acima de 90% para os dias de ZCAS Climatológica, Neutra, El Niño e La Niña.

#### 5.4.2.1 ZCAS - Climatológica

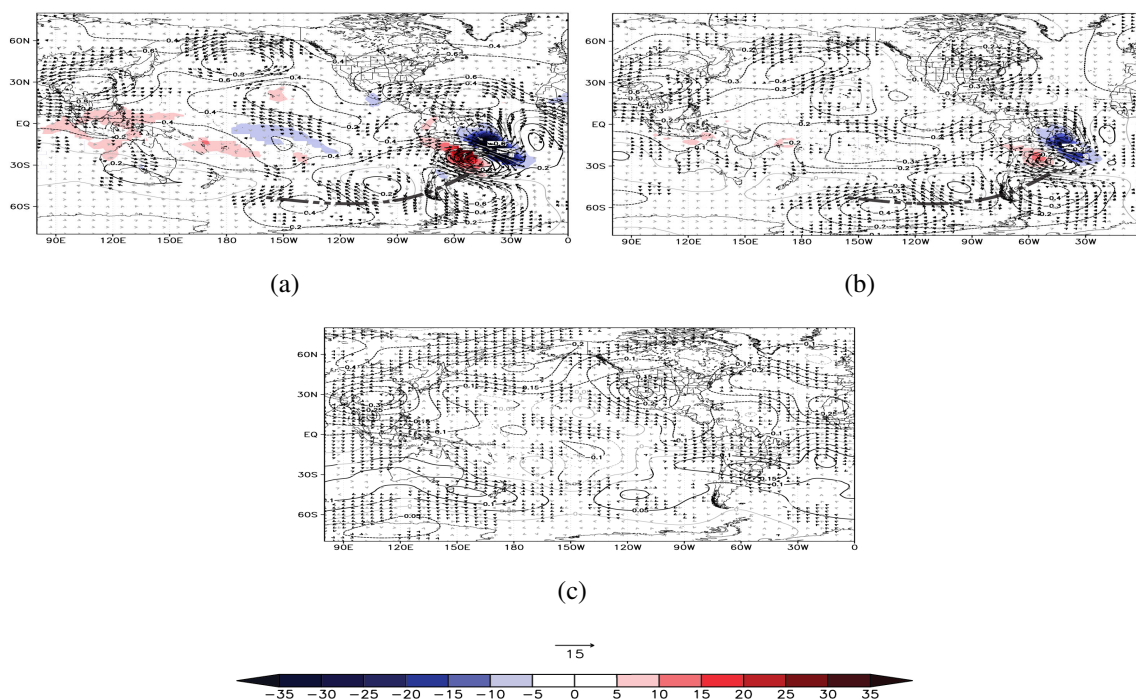


Figura 5.8: Compostos de ROLE anômala (sombreado em  $Wm^{-2}$ ),  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) e vento zonal e meridional em 200 hPa (vetores em  $m.s^{-1}$ ) para os dias de ZCAS-Climatológica: a) Não Filtrado, b) Filtrado na banda 20-90 dias, c) Filtrado na banda 200 dias passa-baixa. Apenas anomalias significantes com nível de confiança acima de 90% foram plotadas na cor preta, e anomalias não significantes na cor cinza.

O padrão de teleconexão do PSA é o dominante para as composições de ZCAS-Climatológicas conforme se observa na Figura 5.8.a, discutido na seção 5.4.1, sendo que quando filtrado na banda 20-90 dias (Fig 5.8.b), o mesmo sinal de propagação de onda ainda é observado. O trabalho de Carvalho et al. (2011) corroboram estes resultados, onde foi observado em suas



composições médias de ZCAS sinais característicos do PSA na retaguarda da banda de nebulosidade, utilizando a banda temporal de 10-90 dias na filtragem da série, semelhante a utilizada aqui para representar a variabilidade intrassazonal. Cunningham e Cavalcanti (2006) também encontraram resultados semelhantes, mas a partir da banda temporal de 30-90 dias. Na composição da variabilidade interanual da Figura 5.8.c não há nada representativo, visto que nesta série de composição de ZCAS-Climatológica há 497 dias, dentre eles anos em que houveram El Niños e La Niñas, levando o sinal da variabilidade interanual ou a ser suavizado ou anulado entre ele mesmo, visto que o sinal das baixas frequências podem ser mascarados neste caso.

#### 5.4.2.2 ZCAS - Neutra

Semelhante a análise da Figura 5.8, as ZCAS-Neutras (Fig 5.9) também representam o padrão PSA como dominante, tanto nas composições não filtradas (Fig 5.9.a), quanto na série filtrada na variabilidade intrassazonal (Fig 5.9.b). O padrão ondulatorio do Pacífico Sul à América do Sul aparenta se propagar embebido no jato subtropical do HS, que interage com a ZCAS e o continente sul americano. Das possíveis fontes para estes trens de ondas, poucas anomalias de ROLE aparentam disparar este trem de ondas, além do sinal semelhante ao da ZCPS ao nordeste da Austrália em 30°S - 150°W (Fig 5.9.a).

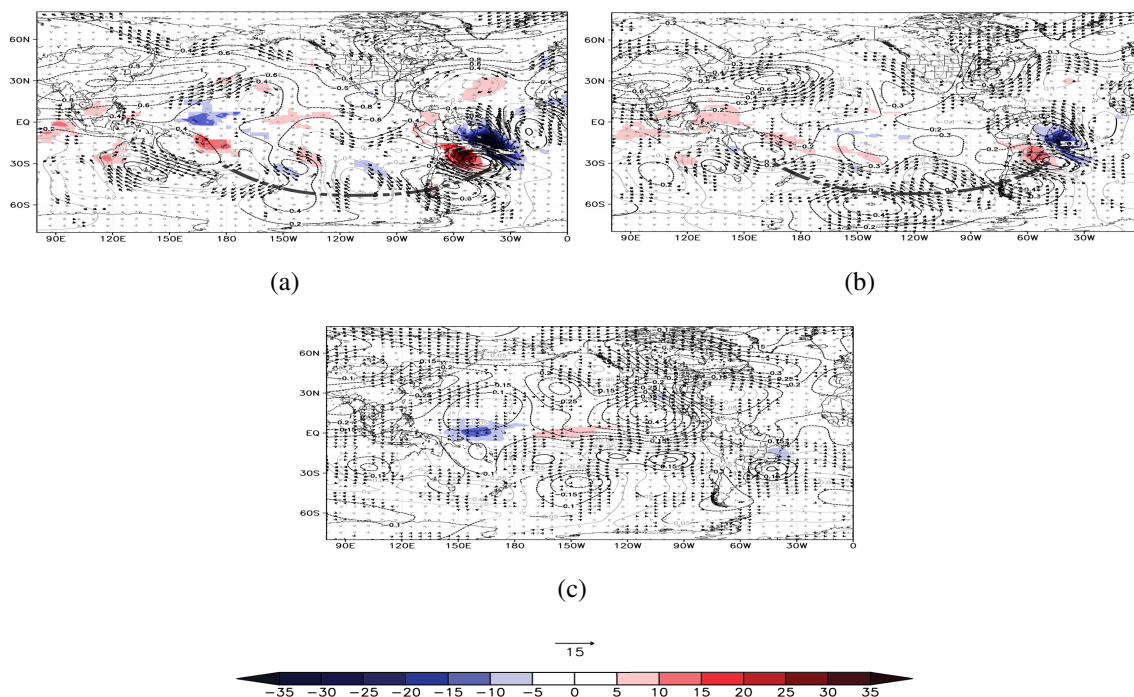


Figura 5.9: Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Neutra.

Na mais baixa frequência, representada pela variabilidade interanual, as composições de ZCAS-Neutras sinalizam que o próprio estado básico de verão austral sem perturbações do El Niño ou da La Niña favorecem o trem de ondas do PSA, e provavelmente, por esta razão que é possível observar este sinal de propagação de onda em todas as composições de ZCAS aqui analisadas na região do Pacífico Sul. A partir das análises de Mo e Higgins (1998), podemos concluir que o PSA é o padrão de teleconexão dominante na região do Pacífico Sul, inclusive durante o verão austral.

#### 5.4.2.3 ZCAS - El Niño

Durante El Niños a propagação de ondas é mais longa, e mais próxima do continente sul americano, provavelmente disparadas a partir da fonte fixa de calor das perturbações causadas pelo aquecimento anômalo no Oceano Pacífico Central e Leste. Na Figura 5.10.a é evidente a propagação de onda longa, com número de onda 2-3, e com intensidade que pode ainda ser observada quando filtrado na banda 20-90 dias (Fig 5.10.b). O estado básico do El Niño contribui bastante para este tipo de teleconexão atmosférica entre o Pacífico Central e a América do Sul, sendo observado tanto na composição não filtrada (Fig 5.10.a), quanto na composição filtrada para representar a variabilidade interanual (Fig 5.10.c).

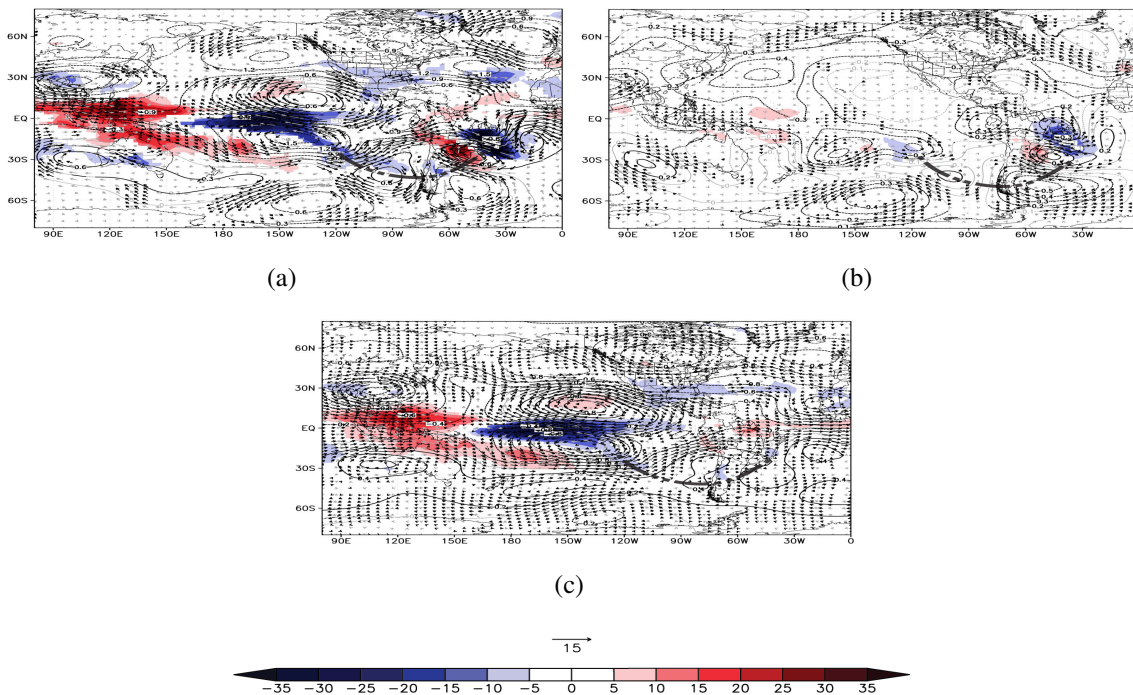


Figura 5.10: Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Niño.

Das anomalias de ROLE, as regiões de anomalias intensas, tanto negativas quanto positivas das composições não filtradas (Fig 5.10.a) são basicamente repetidas mas com menor extensão nas composições representativas da variabilidade interanual (Fig 5.10.c), destacando assim as regiões das perturbações atmosféricas do El Niño. Na Fig 5.10.b, representativa da variabilidade intrassazonal, na região do Pacífico Leste tropical há um pequeno sinal que pode ser da ZCPS sob condições de El Niño, também observadas nas Fig 5.10.a.c.

Em relação a circulação anômala equatorial nas composições de ZCAS-El Niño filtrados na variabilidade interanual (Fig 5.10.c), o par de anticiclone de altos níveis é bem representado, indicando que os escoamentos anômalos de leste na região equatorial são uma ação desta variabilidade interanual, e são também representados na Figura 5.10.a. Estes escoamentos de leste equatorial dificultam qualquer possibilidade de propagação meridional de ondas de Rossby nesta região.

Na região do Atlântico Equatorial é observado o oposto, tanto na composição não filtrada (Fig 5.10.a) quanto na filtrada da mais baixa frequência (Fig 5.10.c), onde a região possui intensos escoamentos de oeste. Logo, durante anos de El Niño, existe a possibilidade de que ondas interhemisféricas sejam disparadas na América do Sul e propagadas para o Atlântico Equatorial podendo dispersar energia para o HN.

#### 5.4.2.4 ZCAS - La Niña

Dos dias de ZCAS-La Niña na Figura 5.11.a.b.c é destacado que a propagação de onda de Rossby do PSA também pode ser observada nas composições das bandas 20-90 dias (Fig 5.11.b) e 200 dias passa-baixa (Fig 5.11.c). Embora este padrão de onda não aparente ser o dominante quando analisada a composição não filtrada (Fig 5.11.a), na Figura 5.11.c, as anomalias de ROLE filtradas na variabilidade interanual destacam que a anomalia de calor na região do Sudeste Asiático são características da variabilidade interanual da La Niña. Também há uma fonte anômala de calor diagonal no Pacífico Sul (5.11.c), podendo ser um sinal da ZCPS ligeiramente a sudoeste da sua posição climatológica, semelhante a banda de nebulosidade diagonal observada na Figura 5.11.a, no Oceano Pacífico Sul ao nordeste da Nova Zelândia, na mesma região próximo de 30°S - 170°W. De acordo com Vincent et al. (2009) a ZCPS é localizada mais próxima da Austrália durante os anos de La Niña.

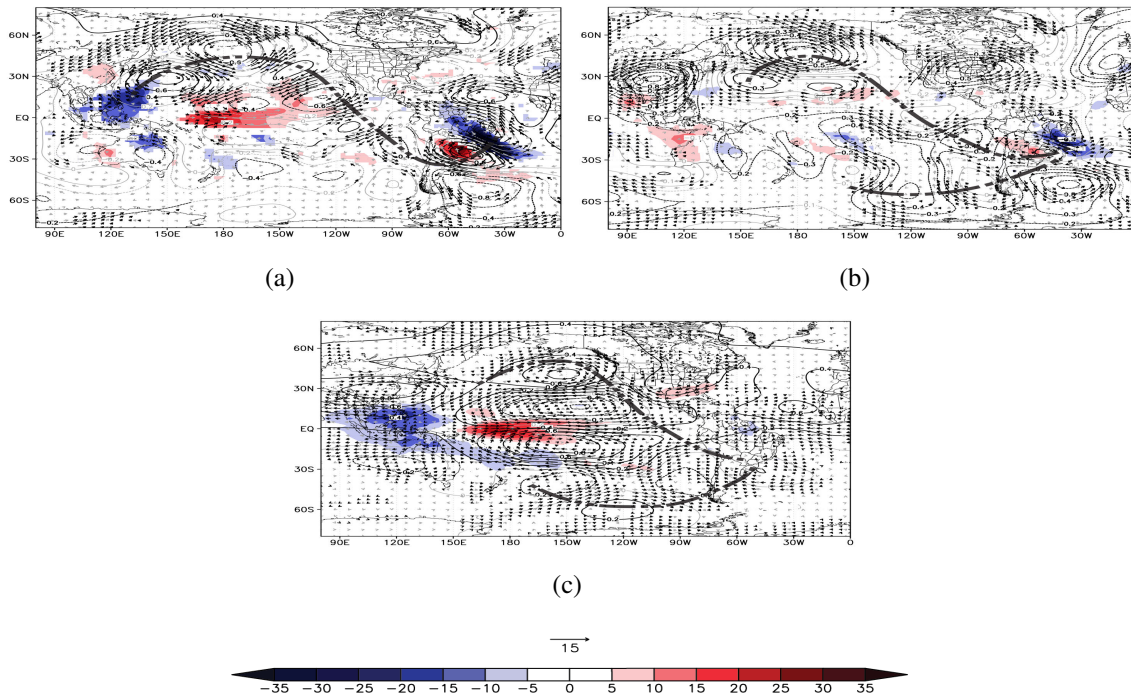


Figura 5.11: Igual a figura 5.8 mas para os dias de ZCAS-Niña.

As composições da variabilidade intrassazonal (Fig 5.11.b), não indicam anomalias intensas de ROLE, além das negativas na região da ZCAS, que é o padrão intrassazonal dominante durante a La Niña. O trem de ondas que se propaga no Pacífico Sul, aparenta ter sido disparado pela ZCPS, podendo ser observado tanto na variabilidade intrassazonal (Fig 5.11.b) quanto na variabilidade interanual (Fig 5.11.c), sendo neste caso uma provável ação do estado básico de La Niña. Grimm e Silva Dias (1995); Van Der Wiel et al. (2015) obtiveram resultados semelhantes, onde ondas de Rossby eram excitadas pela ZCPS e embebidas no jato subtropical do HS interagem com a ZCAS.

No domínio do Oceano Pacífico Equatorial os ventos de oeste anômalos estão associados com o par de ciclones nos altos níveis (Fig 5.11.c), permitindo que haja propagações do tipo interhemisférica na região a partir do estado básico da La Niña. As composições filtradas da Figura 5.11 revelam que a fonte de calor associada com a propagação de onda interhemisférica do Pacífico Norte e Sul é característica da variabilidade interanual da La Niña, também consideradas como parte do estado básico. Ambrizzi (1994); Tomas e Webster (1994) já haviam sugeridos a possibilidade da interação interhemisférica entre o HN e a América do Sul durante os estados básicos de La Niña, a partir de simulações numéricas, embora aqui é apresentado pela primeira vez este tipo de interação com a ZCAS através de dados observacionais.

### 5.4.3 Análise das Ondas de Rossby

Nesta seção, as ondas de Rossby serão analisadas com base no cálculo das fontes de ondas de Rossby proposta por Sardeshmukh e Hoskins (1988), descritas na seção 3.2.4, representados pela Figura 5.12. Além disto também serão analisados os guias preferencias de ondas de Rossby com base nas ondas estacionárias ( $K_s$ ) e no vento zonal médio, sendo esta análise semelhante as realizadas por Hoskins e Ambrizzi (1993); Ambrizzi (1994); Ambrizzi e Hoskins (1997), mas aqui focadas nas composições de ZCAS. O método aplicado ao  $K_s$  foi calculado com base no algoritmo de Rehbein et al. (2020), com o objetivo de auxiliar na interpretação dos guias de ondas das composições de ZCAS. Também foram calculados a atividade energética a partir da atividade do fluxo de onda e da energia cinética dos eddies, descritas na seção 3.2.3, auxiliando na interpretação dos guias de ondas de Rossby relativos as composições de ZCAS.

Das composições de ZCAS-Climatológicas na Figura 5.12.a não há fontes de ondas de Rossby aparentes além da própria ZCAS na América do Sul, e isto é coerente com os compostos das anomalias de ROLE das Figuras 5.7.a e 5.8.a, onde anomalias de calor não são significativas nestes compostos. As anomalias e fontes de ondas de Rossby podem ter sido suavizadas a partir da média climatológica da série completa de ZCAS.

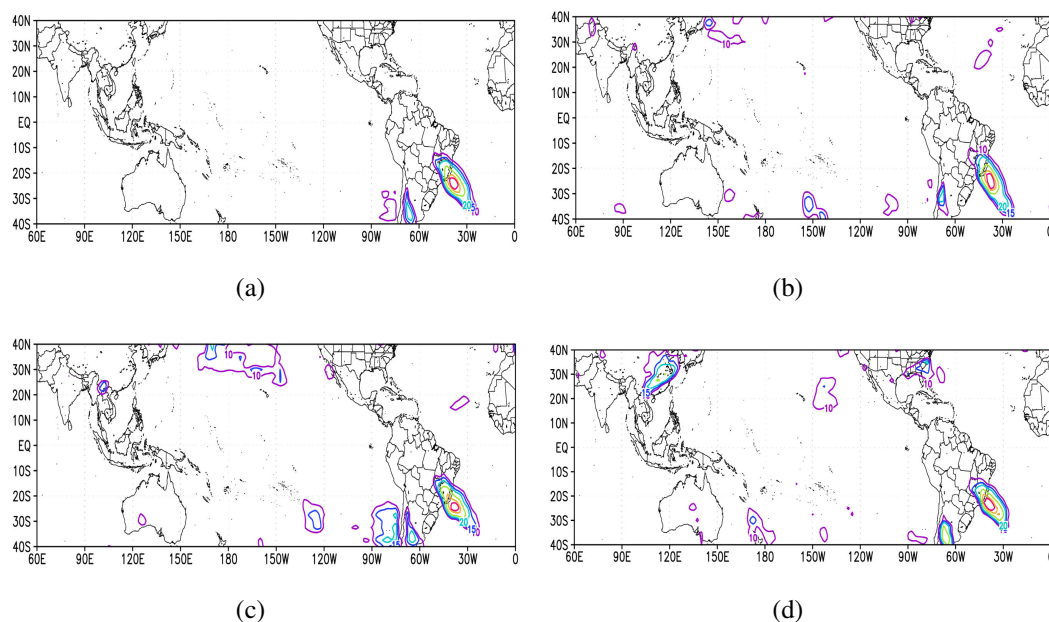


Figura 5.12: Composições das Fontes de Ondas de Rossby "Rossby Wave Source - RWS" ( $10^{-11} s^{-1}$ ) dos dias de ZCAS: a) Climatológicas, b) Neutras, c) El Niño, d) La Niña.



Da ZCAS-Neutras, além da ZCAS na América do Sul, há um sinal mais fraco no Oceano Pacífico Sul na região de  $150^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$ , nas análises das anomalias de ROLE (Fig 5.7.c. e Fig 5.9.a.b) associamos essa região a ZCPS em sua posição climatológica, onde o ramo sul da zona de nebulosidade sugere disparar trens de ondas extra-tropicais. Na Figura 5.3.b onde as anomalias de ROLE não são filtradas, esta região indica um prolongamento mais para sul. Aqui vamos considerar esta região como uma ZCPS na sua região climatológica, ou sem efeitos das perturbações de El Niño e La Niña que alteram o posicionamento zonal desta zona de nebulosidade. Vincent et al. (2009), após realizar um estudo sobre a variabilidade interanual da ZCPS, destaca que durante anos neutros a ZCPS pode se estender de  $160^{\circ}\text{E} - 140^{\circ}\text{W}$  e dos  $5^{\circ}\text{S} - 35^{\circ}\text{S}$ .

Durante anos de El Niño (Fig. 5.12.c), além da ZCAS, as fontes de ondas de Rossby que provavelmente disparam as perturbações ondulatórias estão localizadas no HS, visto que a propagação interhemisférica durante este estado básico é dificultada. No Pacífico Sul duas regiões chamam a atenção e ambas estão próximas das anomalias negativas de ROLE diagonais representadas nas Figuras 5.7.f e 5.10.a.c, considerando que a anomalia na região de  $140^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$  e  $20^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{S}$  seja também uma representação da ZCPS bem mais a leste da sua posição climatológica, esta região pode ser caracterizada como uma fonte de calor anômala, que dispara as ondas de Rossby que interagem com a ZCAS. Vincent et al. (2009) menciona que as ZCPS-El Niño são localizadas mais a leste da região climatológica e podem se estender até  $130^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$ , e são localizadas mais ao norte se comparadas com as ZCPS-Neutras e ZCPS-La Niña.

Dos eventos de La Niña durante dias de ZCAS representado na Figura 5.12.d, fontes de ondas de Rossby mais intensas podem ser observadas sobre a região da ZCAS e no Sudeste Asiático ( $20^{\circ}\text{N} - 40^{\circ}\text{N}$  e  $100^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{E}$ ). Esta região é consistente com a anomalia de ROLE negativa característica da variabilidade interanual da La Niña (Fig 5.11.a.c). Um sinal mais fraco de fonte de ondas de Rossby também é observado na região do Pacífico Sul, Sudeste da Austrália e sobre a Nova Zelândia, perto da ZCPS característica da variabilidade interanual da La Niña ( $170^{\circ}\text{E} - 170^{\circ}\text{W}$  e dos  $20^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{S}$ ). Estas regiões podem ser associadas com as fontes de calor características das anomalias negativas de ROLE das Figuras 5.11.a.b e da Figura 5.1.d. A fonte de ondas de Rossby localizada no Sudeste Asiático é situada ao norte da anomalia de calor (Fig 5.11.a.c), como sugerido por Sardeshmukh e Hoskins (1988) para as regiões tropicais, enquanto que a fonte de ondas de Rossby mais fraca localizada nas médias latitudes é sobreposta a anomalia de calor que aqui atribuímos a ZCPS-La Niña (Fig 5.11.a.c).

Nas figuras a seguir (Fig 5.13,5.14,5.15,5.16) serão analisados os compostos médios de vento zonal ( $\bar{U}$ ) e de ondas estacionárias ( $K_s$ ) durante os dias de ZCAS, para indicar as regiões preferências de propagação de ondas de Rossby, enfatizando a importância dos jatos como guias de ondas. A atividade de fluxo de onda (Wave Activity Flux - WAF) e a Energia Cinética dos Eddies (Eddy Kinetic Energy - EKE) também foram calculadas e sobrepostas ao  $K_s$ . De acordo com Lighthill (1978), padrões de energia cinética podem ser utilizados para mensurar a atividade da onda ao longo dos guias de ondas.

O guia preferencial de ondas de Rossby, a partir do  $K_s$  sobreposto ao WAF e o EKE, destacam, para todos os dias de ZCAS, nas composições de ZCAS-Climatológicas (Fig 5.13.a.b) o mesmo padrão de propagação de ondas mencionado nas análises anteriores a partir do PSA se propagando no Pacífico Sul embebido nos jatos subtropicais do HS (Fig 5.13.a), com um número de onda 3 até o sul do continente sul americano (Fig 5.13.b).

A análise energética com base nas variáveis de WAF e EKE destacam o mesmo padrão de onda observado na Figura 5.7.a, deste modo corroborando os resultados apresentados anteriormente e destacando esse padrão ondulatório do Pacífico Sul como o dominante quando analisada as ZCAS-Climatológicas, sem separar entre as diferentes fases do ENOS. Como mencionado nos resultados e análises deste capítulo, este padrão ondulatório é semelhante aos encontrados nos estudos de Liebmann et al. (1999); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015).

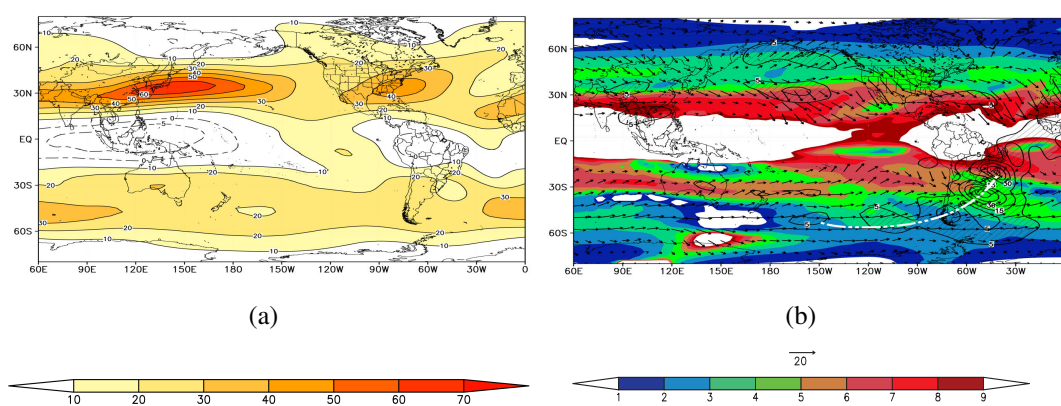


Figura 5.13: Composição dos dias de ZCAS-Climatológica do: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e, b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded), EKE (contour) e wave-activity flux (vetor). Intervalo de contorno para o EKE é 5,15,30,45,60 ( $m^2 s^2$ ). Vetores em  $m^2 s^2$ .

Durante as composições de ZCAS-Neutras nas Figuras 5.14.a.b, o mesmo padrão da Figura 5.7.c é observado, porém diferente da Figura 5.14.b um trem de ondas mais curto, com número de onda 4, se propaga do Oceano Pacífico Oeste em direção a América do Sul, embebido no jato subtropical do HS (Fig 5.14.a), que age como guia de ondas para esta teleconexão atmosférica. A onda que se propaga nas composições das ZCAS-Neutras é mais intensa e extensa que as observadas nas composições das ZCAS-Climatológicas. O sinal da propagação de onda de Rossby pode ser uma resposta da ZCPS-Neutra, embora nesta composição não é possível atribuir diretamente a fonte da onda, ainda que na Figura 5.12.b indique que a ZCPS-Neutra tenha disparado esta onda.

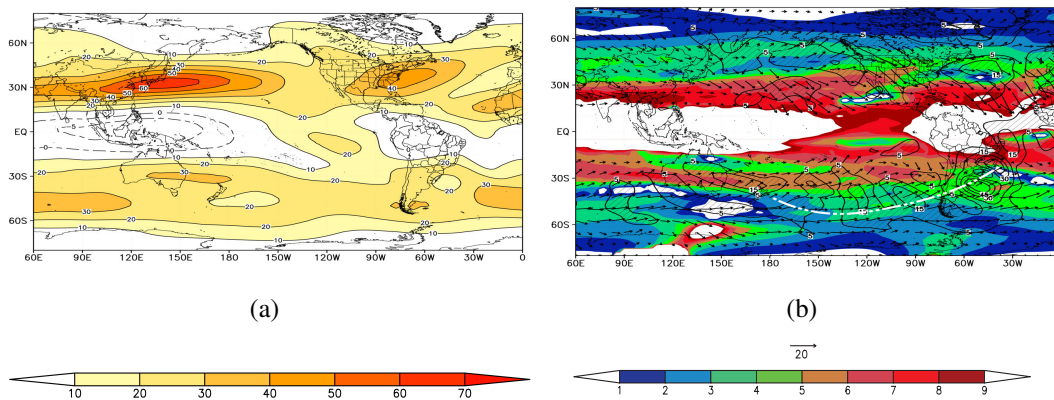


Figura 5.14: Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-Neutras.

Na Figura 5.15, durante o estado básico de El Niño é notável que o jato subtropical do HN é mais intenso e o escoamento equatorial de oeste é o mais fraco na região do Pacífico Central, ao comparar a Figura 5.15.a com as Figuras 5.13.a e 5.14.a. A propagação meridional de ondas de Rossby é dificultada neste região, marcada pelo Número de Onda Estacionário  $K_s$  nulo (zero) na região do Pacífico Equatorial (Fig 5.15.b).

Durante os eventos de ZCAS-El Niño a onda é mais longa, com números de ondas 2-3 do Pacífico Leste à América do Sul, o que corrobora os resultados das composições de ZCAS-El Niño analisadas anteriormente nas Figuras 5.7.e e 5.10.a.b.c. Considerando o WAF e EKE (Fig 5.15.b) este padrão ondulatório é o mais intenso, talvez pela proximidade do continente sul americano com a fonte fixa do El Niño ou da ZCPS-El Niño, que é localizada a leste da sua posição climatológica. O padrão de onda da Figura 5.15.b é semelhante ao analisado por Magaña e Ambrizzi (2005), que simulou a resposta das ondas de Rossby em diferentes verões austrais de El Niños na região do NINO 3.4.



No Atlântico Equatorial (Fig 5.15.b) é possível a propagação de ondas curtas com número de onda 7-9, visto que durante os eventos de ZCAS-El Niño os escoamentos de oeste são intensificados nesta região (Fig 5.10.a.c), sendo possível que durante este estado básico a ZCAS possa disparar ondas de Rossby interhemisféricas do tipo HS-HN através do Oceano Atlântico. Li et al. (2019) comenta que a teleconexão interhemisférica entre os HS e HN, ocorre com maior frequência pela janela de oeste sobre o Oceano Atlântico Equatorial. Note que nas Figuras 5.13.b, 5.14.b e 5.16.b esta região é característica do número de onda zero, marcado pela cor branca, sendo uma região de escoamentos de leste, ou de fracos escoamentos de oeste, o que dificulta a propagação meridional de energia.

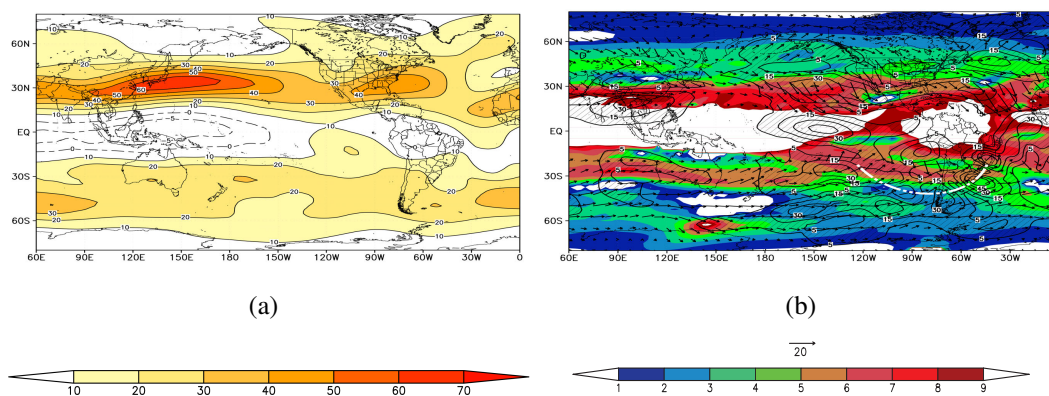


Figura 5.15: Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-El Niño.

Durante o estado básico de La Niña o vento zonal (Fig 5.16.a) é o mais intenso e extenso na região do Oceano Pacífico Central e Leste, estando de acordo com o observado nas análises anteriores das seções 5.3.1 e 5.3.2. Logo é possível que perturbações do HN possam interagir com o HS, a partir desta janela interhemisférica na região equatorial do Oceano Pacífico Leste.

Na Figura 5.16.b é destacada a sobreposição do WAF e EKE no  $K_s$  para as composições de ZCAS-La Niña, a combinação destas variáveis corrobora os resultados anteriores, a partir de uma janela equatorial no Pacífico Leste, com orientação noroeste-sudeste, conectando o HN ao HS através do guia de onda do jato asiático, que se estende do Pacífico Norte à América do Sul com número de onda 7-8 (Fig 5.16.b). Estes resultados estão em fase com a onda interhemisférica das composições de ZCAS-La Niña filtradas e não filtradas, identificadas nas Figuras 5.7.g e 5.11.a.b.c.

A superimposição do EKE e do  $\bar{U}$  no Pacífico Leste sugere a dispersão de energia da onda de um hemisfério ao outro. Li et al. (2019) observou dutos de oeste no Pacífico Leste Equatorial com orientação noroeste sudeste que permitia a propagação de ondas de Rossby de um hemisfério ao outro, semelhante ao duto de oeste observado na Figura 5.16.a na região do Pacífico Leste Equatorial.

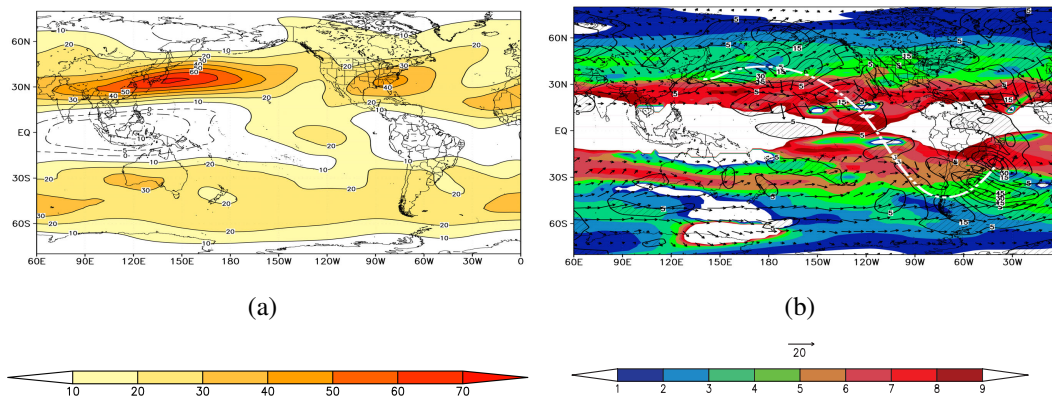


Figura 5.16: Igual a Figura 5.13, mas para as composições de ZCAS-La Niña.

As interações de ondas interhemisféricas entre o HS e HN ocorrem majoritariamente sobre o Oceano Atlântico Equatorial (Li et al., 2019). Ao comparar as Figuras 5.13,5.14,5.15,5.16 no domínio do Oceano Atlântico Equatorial, é evidente a possibilidade de propagação meridional de ondas de Rossby durante os eventos de ZCAS-El Niño (Fig 5.15). Note, apenas nesta figura não há uma grande região em branco sobre o Atlântico Equatorial, o  $K_s$  em branco indicando número de onda nulo. Com base nisto, durante anos de El Niño no verão austral, é possível que eventos de ZCAS propaguem ondas para as regiões subtropicais ou extratropicais do HN. Enquanto que sobre o Oceano Pacífico Sul, as propagações de ondas interhemisféricas entre o HN e o HS são facilitadas a partir do estado básico de La Niña e, conforme sugerido anteriormente, quando disparadas no Sudeste Asiático e embebidas no jato asiático podem interagir com a América do Sul e dispersar energia na a região da ZCAS. A partir deste resultado na próxima seção será apresentado um estudo de caso, um evento de ZCAS em que houve extremo de precipitação durante um ano de La Niña, com o intuito de analisar o padrão atmosférico da região do Pacífico-América do Sul nos altos níveis troposféricos, com análise diária da perturbação causada pela combinação dos episódios de ZCAS e de La Niña.

## 5.5 Estudo de Caso

Com o objetivo de destacar um caso específico em relação as composições médias apresentadas até o momento, nesta seção é analisado um episódio de ZCAS durante um ano de La Niña onde se registrou altos volumes de precipitação diária. O episódio escolhido ocorreu entre os dias 04 e 08 de Janeiro de 2009, onde muitos municípios do Sul e Sudeste do Brasil registraram volume de precipitação maior que  $100 \text{ mm.dia}^{-1}$ . Nos dias 03 e 04 de janeiro nas regiões nordeste dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e no dia 05 nos municípios de Linhares (ES) e Itaperuna (RJ) ocorreram volumes de precipitação de 106 mm e 95,4 mm, respectivamente. Este episódio foi registrado pelo boletim de monitoramento e análise climática "Climanálise" do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), no mês de janeiro de 2009, Volume 24, Número 01. Este episódio foi identificado na dissertação de mestrado de Sena (2016) como um evento de ZCAS de precipitação extrema, com volume de precipitação maior que  $60 \text{ mm.dia}^{-1}$ .

A Figura 5.17 mostra o desenvolvimento diário do episódio de ZCAS. No dia 01 de janeiro (Fig 5.17 a.b) a convecção localizada na América do Sul ainda não é um sinal da ZCAS, que apenas começa a se desenvolver a partir do dia 04 de Janeiro (Fig 5.17.e.f). Do dia 03 a 04 de janeiro (Fig 5.17.c.d) é evidente a organização da banda de nebulosidade identificada pelo CPTEC-INPE. Uma onda de Rossby interhemisférica parte do HN cruza o equador (Fig 5.17.a) e interage com a banda de nebulosidade no dia 03 de janeiro (Fig 5.17.c), enquanto a ZCAS se desenvolve, produzindo eventos extremos de precipitação ao longo das regiões Sul e Sudeste do Brasil. Isto sugere uma possível interação entre a onda de Rossby e a ZCAS, sendo a responsável pelo intensidade da precipitação. Enquanto a onda de Rossby se propaga para leste, a ZCAS se enfraquece e desaparece no dia 09 de janeiro (Fig 5.17.i)

Quando o foco da análise é na América do Sul, o aumento da intensidade da precipitação em conjunto com a entrada da onda interhemisférica no continente é mais evidente. De 01 a 09 de janeiro (Fig 5.17.b.i) o sinal da anomalia positiva de  $\psi$  na região tropical ( $10^{\circ}\text{S}$  e  $100^{\circ}\text{W}$  -  $90^{\circ}\text{W}$ ) reverte, indo de positivo para negativo na mesma região. Ao mesmo tempo, a anomalia negativa de  $\psi$ , relacionada aos anticiclones no HS, intensifica em conjunto com a precipitação no Sul e Sudeste do Brasil, próximo do Oceano Atlântico Sul ( $30^{\circ}\text{S}$  -  $40^{\circ}\text{S}$  e  $60^{\circ}\text{W}$  -  $30^{\circ}\text{W}$ ). Depois deste processo, o anticiclone se move para leste no dia 09 de janeiro (Fig 5.17.j), enquanto a ZCAS se dissipa a anomalia negativa de  $\psi$  na região tropical ( $10^{\circ}\text{S}$  e  $100^{\circ}\text{W}$  -  $90^{\circ}\text{W}$ ) é estabelecida.

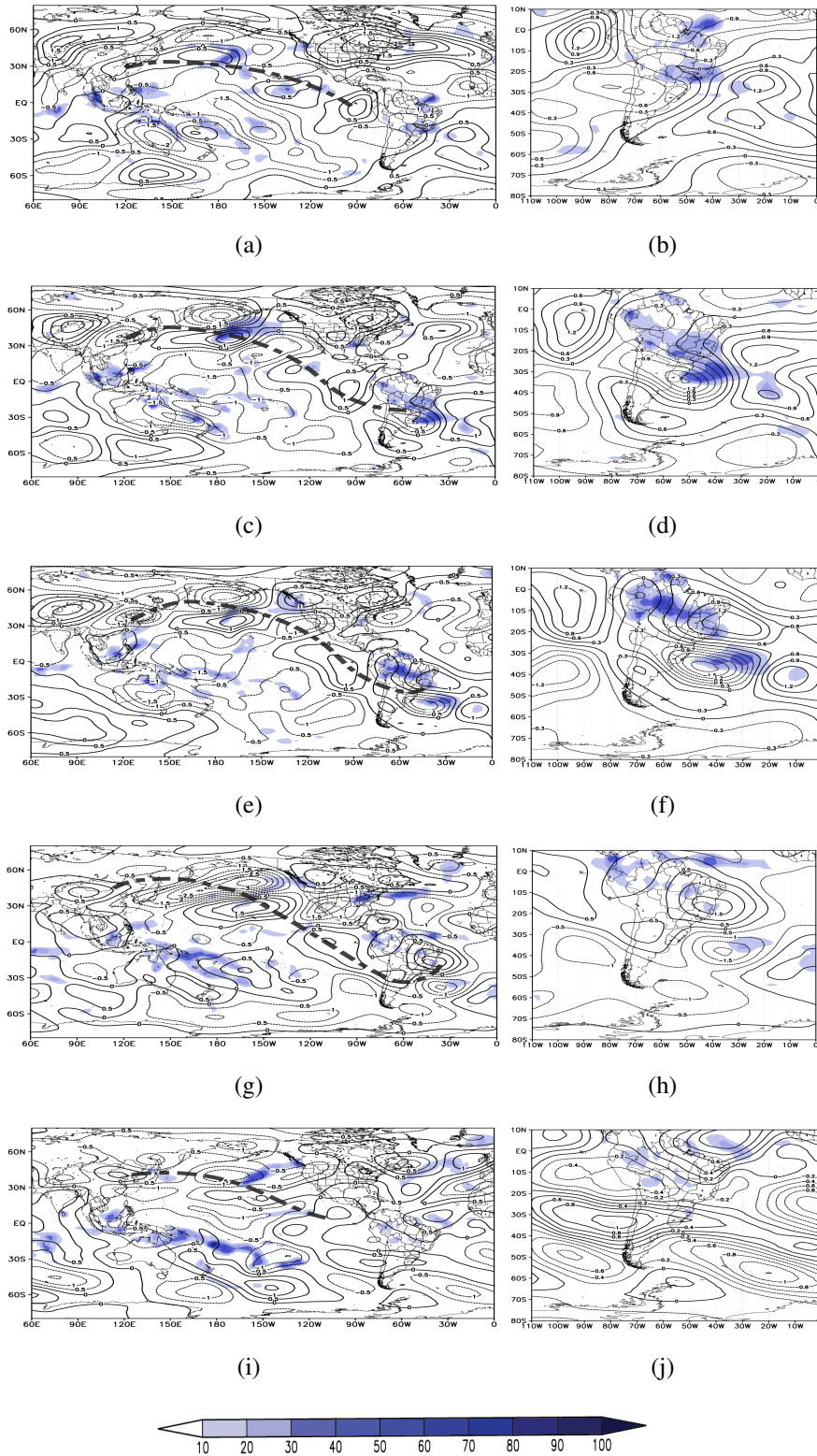


Figura 5.17: Evolução diária da precipitação do episódio de ZCAS do dia 04 ao dia 09 de janeiro da precipitação acumulada do GPCP e  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) em 200 hPa no contorno preto de 0.5, durante os dias; a) 01 janeiro, c) 03 janeiro, e) 04 janeiro, g) 06 janeiro, i) 09 janeiro. E para o domínio da América do Sul  $\psi$  ( $10^7 m^2 s^{-1}$ ) em 200 hPa no contorno preto de 0.3, durante os dias; b) 01 janeiro, d) 03 janeiro, f) 04 janeiro, h) 06 janeiro, j) 09 janeiro.

Ainda sobre o episódio de ZCAS dos dias 04 a 08 de janeiro, na Figura 5.18 é analisado o vento zonal médio e o guia de onda preferencial com base no número de onda estacionário  $K_s$ . Das composições médias do vento zonal e do  $K_s$  durante o período de 1 a 10 de janeiro de 2009 é evidente o intenso escoamento de oeste na região equatorial (Fig 5.18.a) com contorno de  $\bar{U}$  de  $30 \text{ m.s}^{-1}$ , além do intenso jato asiático na região sudeste do continente asiático e no Oceano Pacífico Norte Tropical, que se divide em dois escoamentos, um para o Canadá e Estados Unidos da América e outro em direção a América do Sul. Do número de onda estacionário  $K_s$  é destacado na Figura 5.18.b a partir da linha tracejada branca o guia de onda com número de onda 7-8 que aparenta conectar o Sudeste Asiático à América do Sul.

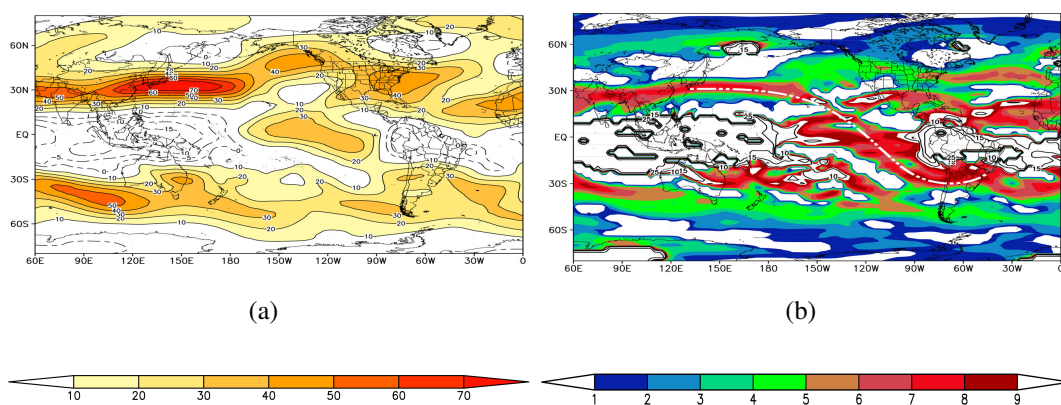


Figura 5.18: Composição média do número de onda estacionário durante o período de 1 a 10 de Janeiro de 2009. a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30.

Os resultados da Figura 5.18 concordam com a onda de Rossby interhemisférica observada na Figura 5.17 e discutida ao longo deste capítulo durante a análise ZCAS-La Niña. A presente análise confirma a possibilidade da teleconexão atmosférica entre o Sudeste Asiático e América do Sul sugerida pelas composições médias. Análises extras deste episódio estão no Apêndice D.

## 5.6 Conclusões

Neste capítulo foram analisadas as composições de ZCAS a partir de uma perspectiva de escala global dos dados observacionais filtrados e não filtrados, separados nas diferentes fases do ENOS. O domínio das regiões dos Oceanos Pacífico e Atlântico Sul são clássicos nos estudos das perturbações de grande escala que ocorrem no continente da América do Sul, tanto pela ação do ENOS, como interações com a OMJ, ZCPS e o padrão de teleconexão do PSA (Ambrizzi,



1994; Mo e Higgins, 1998; Grimm, 2003; Magaña e Ambrizzi, 2005; Cunningham e Cavalcanti, 2006; Carvalho et al., 2011; Coelho et al., 2016). Nesta região foram identificados diferentes guias de ondas de Rossby associados a ZCAS, onde, dependendo do estado básico, a propagação de ondas pode ter guias preferencias de ondas de Rossby diferentes, assim como discutido por Ambrizzi (1994); Ambrizzi e Hoskins (1997).

Em síntese, dos padrões de ZCAS analisados, podemos destacar que durante as ZCAS Climatológicas e Neutras as propagações de ondas de Rossby tem características semelhantes, a partir da onda com número de onda 3-4 na região do Oceano Pacífico Sul semelhante ao PSA. Nas composições de ZCAS-Neutras há indícios que a onda que se propaga pelo Oceano Pacífico Sul foi disparada pela divergência da ZCPS, que, embebida no jato subtropical do HS, dispersa energia para região da ZCAS.

Da perspectiva global das ZCAS-El Niño, é destacado a fonte da perturbação do ENOS, na região do Oceano Pacífico Central a partir das anomalias positivas de TSM. Esta fonte anômala de calor contribui tanto para disparar ondas na escala global, como para perturbar e modificar a circulação de grande escala por ação da sua persistência como fonte fixa pulsante, tendo como resposta o acoplamento de ondas de Kelvin e equatoriais de Rossby (Kiladis et al., 2009). Durante o El Niño, o estado básico tem uma circulação diferente da climatológica ou neutra, onde a ZCPS é localizada a leste de sua posição climatológica (Vincent et al., 2009; Brown et al., 2020), e as ondas que interagem com a ZCAS neste caso são mais longas, com número de onda 2-3 e partem do Pacífico Central, com um trem de ondas semelhante ao observado por Magaña e Ambrizzi (2005). Ainda que o RWS indique que a fonte que dispara a onda de Rossby que interage com a ZCAS parte da ZCPS, deve ser mencionado que a variabilidade interanual do El Niño, além de contribuir com o guias de ondas por meio do estado básico, pode também disparar alguma onda que venha a interagir com a ZCAS, visto que o posicionamento do jato subtropical do HS contribui bastante para esta interação.

Os resultados apresentados neste capítulo revelam a existência da propagação de ondas de Rossby interhemisféricas durante anos de La Niña. Inicialmente guiada pelo jato asiático, a onda de Rossby cruza o equador e interage com a ZCAS através da janela equatorial no Pacífico Leste. O estado básico da La Niña por si só contribui de diversas formas para a propagação da onda interhemisférica. A janela equatorial com escoamentos de oeste são intensificadas pela ação da variabilidade interanual da La Niña, permitindo que haja propagações interhemisféricas na região do Pacífico Equatorial Leste, sendo que este padrão é evidente a partir da ação de dois

ciclones anômalos da região equatorial e tropical nos altos níveis e podem ser observadas tanto nas composições filtradas da mais baixa frequência, quanto nas não filtradas. Isto permite que o jato asiático ou o jato subtropical do HN possa se expandir para o HS, onde, dependendo das condições de circulação atmosférica, ondas de Rossby podem ser guiadas até a América do Sul e, conseqüentemente, à região de atuação da ZCAS.

As perturbações globais causadas pela anomalia de TSM da La Niña também contribuem para a propagação de ondas interhemisféricas que interagem com a América do Sul. O empilhamento de águas mais quentes na região do Oceano Pacífico Oeste a partir da intensificação dos alísios, fortalecem o processo convectivo na região tropical e equatorial do Pacífico Norte, ao norte da Austrália. Esta região é característica de fontes tropicais anômalas de calor, que podem disparar ondas atmosféricas de interação trópico-extratropical e até interhemisféricas, como demonstrado pelos resultados aqui analisados.

Ao comparar as regiões das fontes anômalas de calor entre si, com base nas anomalias negativas de ROLE, a região Sudeste Asiático é destacada como uma região de intensa atividade convectiva, presente apenas nas composições de ZCAS-La Niña. Durante as composições de ZCAS Climatológicas, Neutras e El Niño, o Sudeste Asiático é característico de anomalias de ROLE positiva, indicando movimentos de subsidência ou de ausência convectiva. Com base nas análises deste capítulo aqui é sugerido que o Sudeste Asiático atua como fonte de onda de Rossby interhemisférica durante os anos de La Niña, durante o verão austral. Sendo este o primeiro estudo a sugerir a possibilidade de interação interhemisférica entre o Sudeste Asiático e a ZCAS.





## Capítulo 6

---

# Simulação Numérica - Interação Trópicos - Extratrópicos: Parte I - Efeitos Remotos sob a ZCAS

Neste capítulo serão analisadas as respostas das perturbações remotas idealizadas de grande escala que disparam as ondas de Rossby atmosféricas que interagem com a ZCAS na América do Sul. As simulações numéricas foram realizadas a partir do modelo baroclínico DREAM (Hall, 2000), que é uma versão mais atualizada e com melhor resolução horizontal do mesmo modelo utilizado por Hoskins e Ambrizzi (1993); Ambrizzi e Hoskins (1997) e descrito por Hoskins e Simmons (1975), conforme brevemente apresentado na seção 3.2.6.

Com base nos resultados do capítulo 5 foram selecionadas as regiões que podem atuar como fontes anômalas de calor responsáveis pelos efeitos remotos relacionados a ZCAS. Essas regiões foram selecionadas com base no RWS e nas anomalias negativas de ROLE com confiança estatística. Buscou-se encontrar propagações de ondas de Rossby semelhantes aquelas identificadas nas composições de ZCAS no domínio do Pacífico e América do Sul para ambos hemisférios, conforme discutido no capítulo 5.

Nas simulações realizadas, primeiro foram selecionados os estados básicos de DJF para cada fase do ENOS e em seguida as regiões determinadas como "fontes de ondas de Rossby" foram perturbadas por uma anomalia de calor idealizada em suas respectivas regiões. Nas análises das respostas das perturbações realizadas pela simulação numérica, o período de verão austral foi escolhido para facilitar a comparação entre os resultados aqui simulados com trabalhos encontrados na literatura (Webster e Holton, 1982; Hoskins e Ambrizzi, 1993; Tomas e Webster, 1994; Ambrizzi e Hoskins, 1997; Li et al., 2019).

Nas seções a seguir será utilizado o estado básico DJF, além do seu perfil vertical, vento zonal médio ( $\bar{u}$ ) e número de onda estacionário  $K_s$  para cada escoamento médio no nível de 200 hPa. Também serão discutidas as regiões selecionadas como fonte anômalas de calor e as respostas dessas fontes, mantidas por até 20 dias. O estado básico climatológico não foi analisado neste capítulo pois não apresentou fontes anômalas de calor claras para os testes com o modelo baroclínico. Todas simulações numéricas, inclusive de estados básicos, não apresentados neste capítulo podem ser encontrados no Apêndice E.

## 6.1 Estado Básico

As simulações deste capítulo tem como estado básico a média do escoamento dos verões austrais (DJF) destacados pela Tabela 6.1, onde para representar o escoamento médio durante anos neutros foi escolhido o verão austral de 1992/93, um ano em que o as anomalias de TSM do Oceano Pacífico Central foram de  $+0,1^\circ\text{C}$ . Para os anos de El Niño, o DJF de 2015/16 foi selecionado por ser um ano da fase positiva do ENOS, com anomalias intensas de  $+2,5^\circ\text{C}$  na região do Niño 3.4, enquanto que para a representação da fase fria do ENOS a La Niña de 1999/00 foi selecionada pelas anomalias de TSM de  $-1,7^\circ\text{C}$ , característico de um evento intenso. Esses estados básicos foram selecionados para auxiliar na análise da resposta das fontes remotas de calor que disparam a ZCAS, auxiliando na compreensão do impacto da variabilidade interanual do ENOS nos guias preferenciais de ondas de Rossby. Esta análise é semelhante a realizada por Ambrizzi (1994), que observou os diferentes guias de ondas de Rossby em diferentes estados básicos para o verão austral.

Tabela 6.1 - Estados Básicos dos Verões Austrais - DJF

Ano	ONI 3.4 Anomalia	ENOS - Intensidade
1992/1993	$+0,1^\circ\text{C}$	Neutro
2015/2016	$+2,5^\circ\text{C}$	El Niño Forte
1999/2000	$-1,7^\circ\text{C}$	La Niña Forte

Antes de analisar a resposta das fontes anômalas de calor, é importante compreender o perfil vertical do vento zonal no Pacífico Equatorial, considerando que a propagação de ondas de Rossby interhemisféricas foram observadas nas composições observacionais. Na Figura 6.1, é representado o perfil vertical dos estados básicos selecionadas para simular a resposta das forçantes, em todos os verões austrais escolhidos, onde se vê de forma clara uma estrutura baroclínica no domínio do Oceano Pacífico Central, onde os escoamentos mais intensos de oeste na região são representados durante os estados básicos neutro (Fig 6.1.a) e de La Niña (Fig 6.1.c), com intensidade de 16 m/s e 28 m/s, respectivamente. Considerando este padrão, ondas que partem do HN ou do HS podem cruzar a região equatorial no Pacífico mais facilmente para estes estados básicos, diferente do observado durante o estado básico de El Niño (Fig 6.1.b), que tem o escoamento zonal de oeste mais fraco na região. Este resultado sugere que o estado básico de La Niña pode servir de janela interhemisférica, conforme discutido nos capítulos anteriores e representado pela seção 2.2, referente a propagação meridional de ondas de Rossby, onde em função da intensidade de  $\bar{u}$ , ondas de Rossby podem se propagar mais livremente na direção meridional. Webster e Holton (1982) destacam em seus resultados que, quanto maior a intensidade de  $\bar{u}$ , as ondas se propagavam para mais longe, e tanto a velocidade de grupo zonal quanto meridional, também eram intensificadas pelo fortalecimento do escoamento zonal.

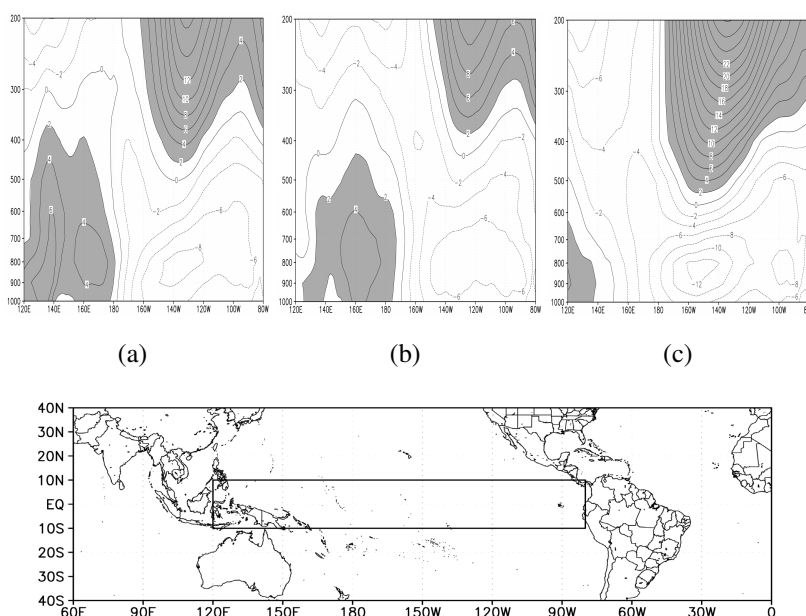


Figura 6.1: Perfil Vertical do vento zonal no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) do estado básico de: a) DJF 1992/93 - Neutro, b) DJF 2015/16 - El Niño, c) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste. Esta figura pode ser observada maior no Apêndice F.4

## 6.2 Fontes de Ondas de Rossby

Como fontes de ondas de Rossby, foram selecionadas as regiões em que as composições de RWS (Figuras 5.12) eram semelhantes com as regiões de anomalias negativas significantes de ROLE (Fig 5.7). Como discutido na seção 5.4.3, as principais regiões que poderiam disparar as ondas de Rossby e que interagiriam com a ZCAS foram disparadas pela ZCPS, nas suas diferentes fases do ENOS, e pelo Sudeste asiático para os verões de La Niña.

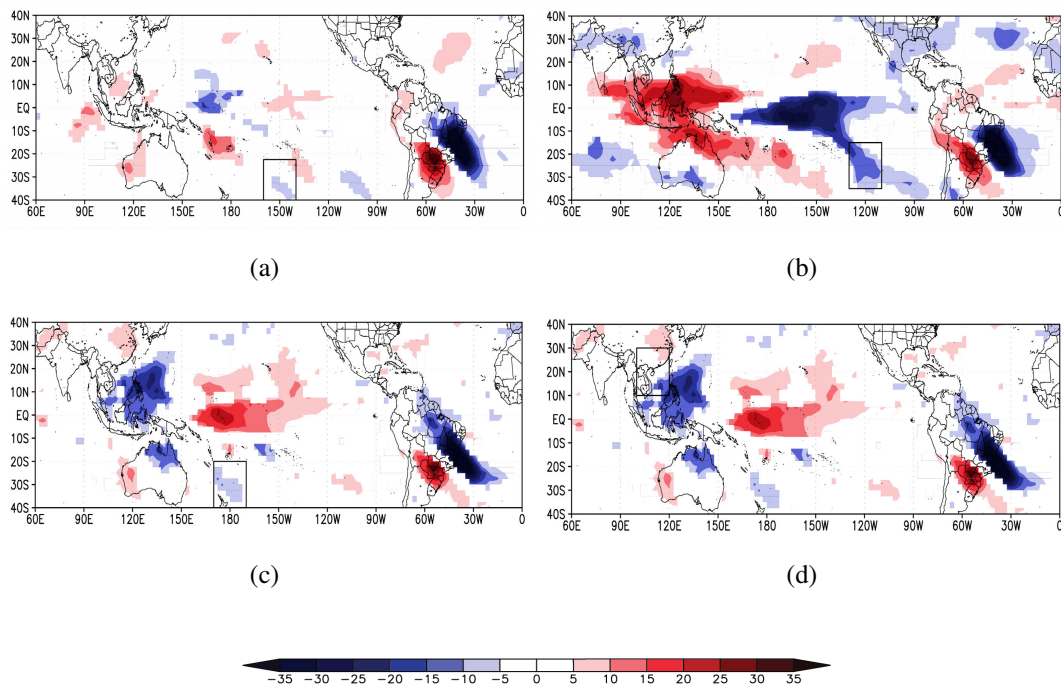


Figura 6.2: Composição média de ROLE (shaded,  $Wm^{-2}$ ). Apenas anomalias com 90% de nível de confiança ou superior foram plotados. a) ZCAS Neutras, b) ZCAS El Niño, c);d) ZCAS La Niña. Sobre as caixas pretas as regiões selecionadas como fonte anômala de calor simuladas pelo modelo baroclínico.

A 6.2 representa as composições médias de ROLE anômala para os dias de ZCAS com significância estatística acima de 90% e as caixas pretas indicam as regiões convectivas selecionadas como fontes anômalas de calor para a simulação com o modelo baroclínico DREAM. As regiões identificadas sendo como da ZCPS nas diferentes fases do ENOS são sobrepostas pelo RWS (Fig 5.12) nas mesmas regiões de anomalias negativas de ROLE com orientação Noroeste-Sudeste no Oceano Pacífico Sul e são identificadas pelas caixas pretas nas Figuras 6.2.a.b.c. Para o estado básico neutro, foi selecionada a região de  $32.5^{\circ}S - 140^{\circ}W$  como fonte anômala de calor da ZCPS-Neutra (Fig 6.2.a). Durante o estado básico de El Niño, a região de  $25^{\circ}S - 120^{\circ}W$  foi selecionada como fonte anômala de calor para a ZCPS-El Niño (Fig 6.2.b), enquanto que para o

estado básico de La Niña há duas fontes anômalas de calor, uma no Pacífico Sul 30°S - 170°E, referente a ZCPS durante anos de La Niña (Fig 6.2.c), e outra no Sudeste Asiático no Pacífico Norte 20°N - 110°E. Nesta última região, o RWS (Fig 5.12.d) é situado ao norte da fonte anômala de calor, ou da convecção representada pelo ROLE negativo (Fig 6.2.d), estando de acordo com o sugerido por Sardeshmukh e Hoskins (1988) para as regiões tropicais.

Todas regiões nas caixas pretas da Figura 6.2 foram selecionadas para simular uma perturbação idealizada a partir de uma fonte térmica fixa de  $2K.dia^{-1}$ , calor latente equivalente a  $8 mm.dia^{-1}$  de precipitação, semelhante a precipitação diária média sobre a ZCPS, que varia entre 4 - 12  $mm.dia^{-1}$  (Brown et al., 2020). O tempo das simulações realizadas foi de 20 dias.

### 6.3 A Zona de Convergência do Pacífico Sul como fonte de Ondas de Rossby

Das regiões selecionadas como fontes de ondas de Rossby na Figura 6.2, três ocorreram no Oceano Pacífico Sul (Fig 6.2.a.b.c) com orientação Noroeste-Sudeste e com variação no posicionamento zonal. Estas três fontes foram consideradas como sinais característicos da ZCPS e as variações zonais do posicionamento desta zona de nebulosidade ocorreram a partir da variabilidade interanual. A ZCPS tem variações no seu posicionamento zonal a partir das fases do ENOS. Para os anos de El Niño, a Zona de Convergência Subtropical é localizada bem mais a oeste do padrão climatológico, próximo dos 140°W - 120°W, enquanto que para os anos de La Niña a convecção organizada ocorre mais próximo do leste da Austrália entre 160°E - 180°W, e durante os anos neutros, a ZCPS varia dentre 180°W até 140°W no seu ramo mais ao sul (Vincent et al., 2009; Brown et al., 2020). Apesar da variação zonal das ZCPS, é esperado o que foi sugerido pelo trabalho de Van Der Wiel et al. (2015), a respeito da teleconexão entre a ZCPS e a ZCAS, devido ao trem de ondas de Rossby disparado pela divergência da ZCPS, onde refratado pelo duto de oeste, o trem de ondas embebido no jato subtropical é refratado com direção equatorial ao duto de oeste do Atlântico, interagindo assim com o Sudeste da América do Sul, e disparando um ciclone com orientação Noroeste-Sudeste que força a divergência nos altos níveis troposféricos.

Nesta seção são esperados padrões de ondas semelhantes aqueles já analisados dos compostos observacionais analisados na 5.7. Pretendemos reproduzir propagações de ondas semelhantes as observadas e assim compreender os guias preferencias de ondas que afetam a ZCAS remotamente a partir das variações da baixa frequência, especificamente da escala interanual.

No Apêndice E.2 todas as simulações da ZCPS como fonte de ondas podem ser analisadas, inclusive com estados básicos diferentes ao apresentado nesta seção.

### 6.3.1 Neutro

Para o estado básico neutro foi selecionado o verão austral (DJF) de 1992/1993, com anomalias de TSM de  $+0,1^{\circ}\text{C}$  na região do Oceano Pacífico Central (Nino 3.4). A Figura 6.3 mostra a composição do vento zonal ( $\bar{u}$ ) nos altos níveis troposféricos e do número de onda estacionário ( $K_s$ ). Na Figura 6.3 além do Jato do HN mais intenso que o Jato do HS é possível observar na região do Pacífico Leste Tropical ventos zonais acima de 20 m/s, que pode facilitar a interação entre os hemisférios. Para este estado básico é possível que haja interações do tipo interhemisféricas, desde que alguma onda parta do HN e se propague com inclinação Noroeste-Sudeste através do escoamento zonal (Fig 6.3.a), que facilita a interação HN-HS (Li et al., 2019). As composições dos estados básicos indicam a possibilidade de interação interhemisférica do HN ao HS guiada pelo Jato do HN com números de ondas 8-9, a partir de uma janela estreita na composição do  $K_s$  (Fig 6.3.b).

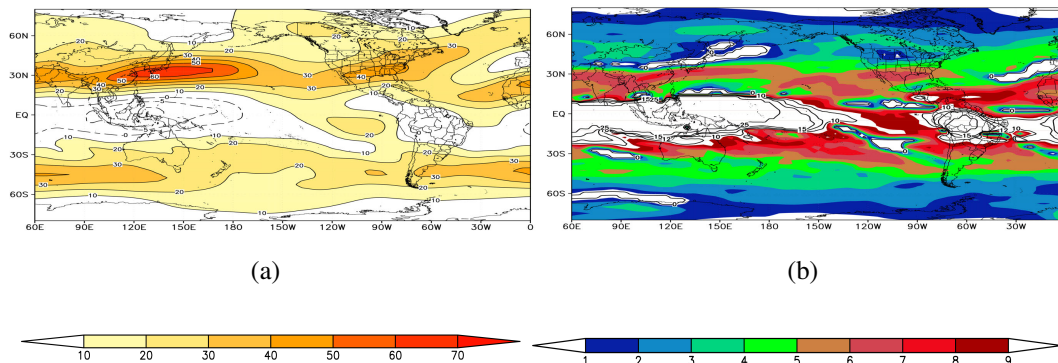


Figura 6.3: Composição do Verão Austral do estado básico Neutro: a) Vento Zonal em 200 hPa ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30.

No Oceano Pacífico Sul ondas podem ser guiadas a partir do Jato do HS com números de ondas 3-4 nas latitudes extratropicais e por ondas mais curtas nas latitudes tropicais com números de onda 6-9 (Fig 6.3.b). O jato do HS é menos intenso que o jato do HN, mas há o escoamento de 30 m/s que conecta a Oceania a América do Sul. A resposta da forçante na região  $32.5^{\circ}\text{S} - 140^{\circ}\text{W}$ , a partir de uma fonte térmica fixa de  $2\text{K}\cdot\text{dia}^{-1}$ , equivalente a  $8\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ , é representada na Figura 6.4.a das anomalias de  $\psi$ .

O trem de ondas que se desenvolve na Figura 6.4.b.c.d com até 8 dias é semelhante a propagação de ondas de Rossby identificados pelas Figuras 5.7.a.c para os casos de ZCAS-Climatológicas e ZCAS-Neutras. A propagação ondulatoria é guiada pelo Jato do HS com números de ondas 3-4 (Fig 6.3.a.b), partindo do Oceano Pacífico Sul e chegando na América do Sul com até 4 dias, se desenvolvendo para um padrão ondulatorio quase-geostrófico ajustado no dia 8 com uma propagação zonal de onda mais clara (Fig 6.3.d). Este padrão de teleconexão entre a ZCPS e a ZCAS é semelhante ao sugerido por Van Der Wiel et al. (2015).

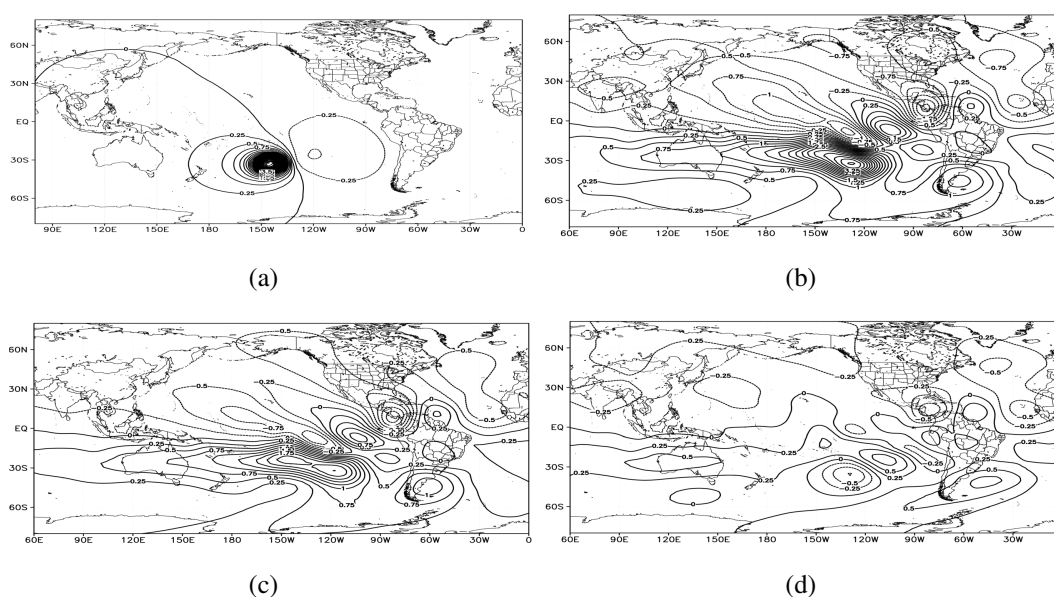


Figura 6.4: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacífico Sul ( $32,5^\circ S - 150^\circ W$ ), sobre o estado básico neutro: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8.

### 6.3.2 El Niño

Durante o estado básico de El Niño com as anomalias de TSM do Pacífico Central mais intensas e positivas, o padrão do escoamento zonal apresenta o Jato Asiático mais intenso e duto de oeste mais fraco sob o Pacífico Equatorial (Fig 6.5.a). Isto sugere que são baixas as possibilidades de interação interhemisférica durante este estado básico, conforme o número de onda estacionária ( $K_s$ ) observado na Figura 6.5.b, que indica a possibilidade de propagação de ondas interhemisféricas a partir dos números de onda acima de 10 nesta região, o que é muito restritivo. Na região do Pacífico Central, a composição do  $K_s$ , sugere que ondas que partem da região da ZCPS durante anos de El Niño, podem interagir com a América do Sul guiadas pelo Jato Subtropical com números de ondas 2-4 ou ondas mais curtas com números de ondas 7-9.

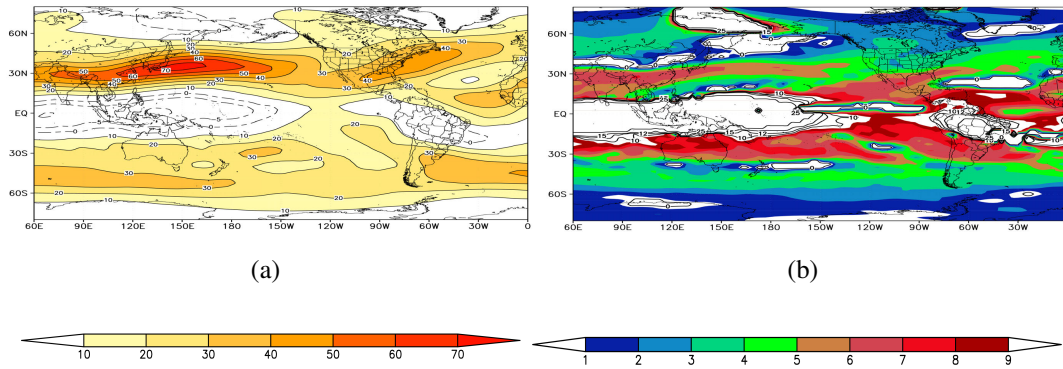


Figura 6.5: Composição do Verão Austral do estado básico de El Niño: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30.

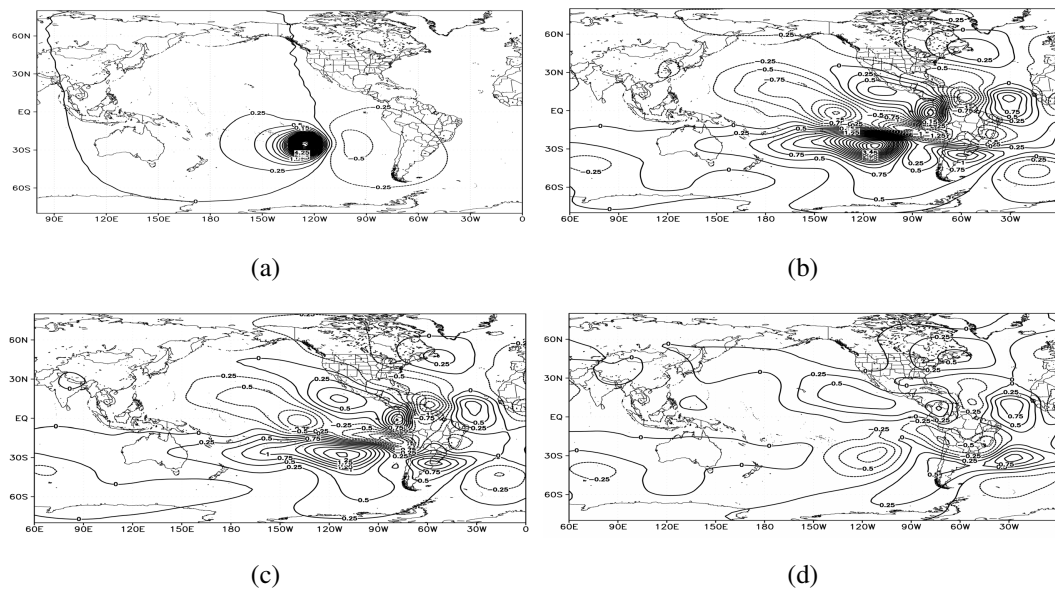


Figura 6.6: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacífico Sul ( $25^\circ S - 120^\circ W$ ), sobre o estado básico El Niño: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8.

Nas simulações numéricas com a forçante centrada em  $25^\circ S - 120^\circ W$  (Fig 6.6.a), referente ao posicionamento da ZCPS-El Niño, as ondas partem com uma intensidade maior do que no caso da ZCPS-Neutra (Fig 6.4b.c.d) e chegam na América do Sul a partir de uma onda mais longa de número 2-3 guiada pelo Jato do HS (Fig 6.5.a.b) no decorrer de 8 dias (Fig 6.6.b.c.d). Esta propagação de onda é semelhante a onda de Rossby identificada na figura 5.7.e, relativa as composições de ZCAS-El Niño. Este resultado sugere, que a ZCPS deslocada zonalmente devido a variabilidade interanual do El Niño pode disparar ondas atmosféricas que interagem com a América do Sul, semelhante ao discutido no capítulo 5, com relação aos compostos observacionais. Os padrões ondulatórios identificados na Figura 6.6, são semelhantes aqueles observados por Magaña e Ambrizzi (2005), que simularam diferentes respostas de Ondas de Rossby at-



mosféricas no nível de 250 hPa a forçantes de diferentes El Niño's no Pacífico Central durante o verão austral.

### 6.3.3 La Niña

O estado básico de La Niña do verão austral de 1999/00 é o que representa o escoamento zonal médio ( $\bar{u}$ ) mais intenso na região do Pacífico central (Fig 6.7.a), além de uma espécie de bifurcação do Jato do HN, sugerindo assim a possibilidade de interações interhemisféricas durante este estado básico. No Oceano Pacífico Sul o Jato do HS também é bem representado e menos intenso do que o Jato do HN (Fig 6.7.a), e semelhante aos estados básicos anteriores (Fig 6.3.a e 6.5.a), e esperado a partir da circulação climatológica de verão e inverno. O Jato do HS pode guiar ondas sob o Oceano Pacífico Sul com números de ondas estacionários 2-4 nas latitudes extratropicais e de 6-8 nas regiões tropicais e subtropicais (Fig 6.7.b).

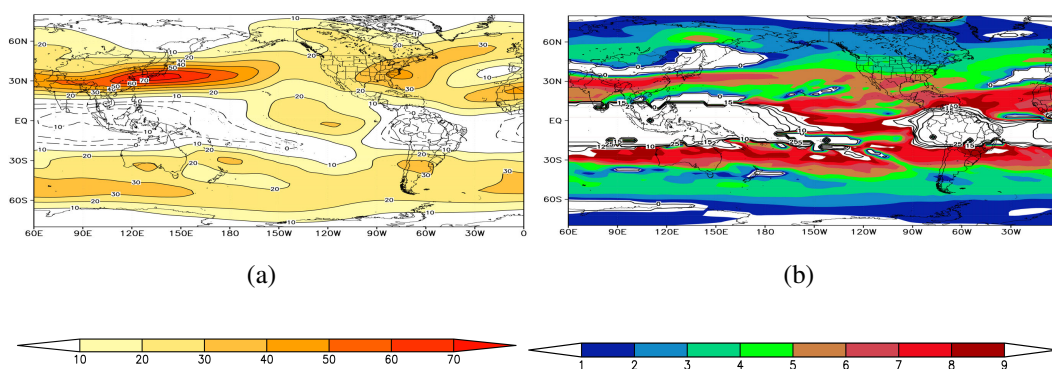


Figura 6.7: Composição do Verão Austral do estado básico de La Niña: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30

Da resposta da forçante idealizada na região ZCPS-La Niña, o desenvolvimento de um trem de ondas de Rossby na região do Pacífico Sul é observada no decorrer de 4 e 8 dias (Fig 6.8.c.d) a partir do desenvolvimento da perturbação da fonte de calor na região do Oceano Pacífico Sul centrada em 30°S - 170°E. Com esta forçante, a Figura 6.8 revela um padrão de propagação semelhante ao observado pela Figura 5.11.b, quando analisados os compostos de ZCAS-La Niña filtrada na banda 20-90 dias, da variabilidade intrassazonal. A atividade da onda de Rossby é guiada ao longo do Jato do HS e atinge a América do Sul em 8 dias, sendo refratada em direção ao duto de oeste do Atlântico Equatorial, semelhante ao sugerido por Van Der Wiel et al. (2015).

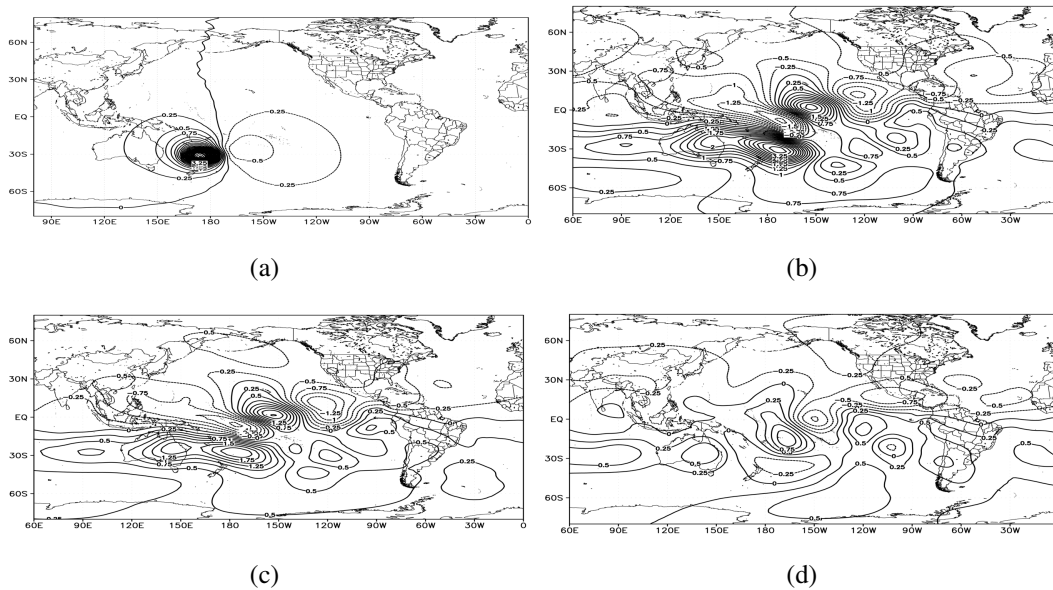


Figura 6.8: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no (a) Pacífico Sul ( $30^\circ S - 170^\circ E$ ), sobre o estado básico La Niña: b) dia 2 c) dia 4, d) dia 8.

Nota-se também, um padrão de onda que é refratado a nordeste em direção ao duto do Pacífico Leste Equatorial, mostrando que a mesma fonte de calor, também pode perturbar a costa do Pacífico Norte Americano. Este tipo de interação também é sugerido pelos estudos de Van Der Wiel et al. (2015) e está de acordo com as hipóteses de Matthews (2012), onde a propagação da onda disparada pela divergência da ZCPS continuaria a se propagar em direção ao duto de oeste do Pacífico Equatorial. Embora estes trabalhos não tenham mencionado a possível propagação de ondas interhemisféricas partindo da ZCPS, aqui é destacado que é possível, desde que haja um escoamento de oeste intenso o suficiente para que atue como uma janela equatorial que facilite este tipo de interação entre hemisférios. Isto pode ocorrer mais facilmente durante anos de La Niña.

#### 6.4 O Sudeste Asiático como fonte de Ondas de Rossby

Além da ZCPS, a região do Sudeste Asiático também foi identificada como possível fonte de ondas de Rossby que causa efeitos remotos na região da ZCAS durante os anos de La Niña. Os resultados de RWS e da anomalia significativa de ROLE foram repetidos na Figura 6.9, onde a região de fonte de ondas de Rossby (Fig 6.9.a) podem ser observadas sobre a ZCAS, e também sobre o Sudeste Asiático entre ( $20^\circ N - 40^\circ N$  e  $100^\circ E - 120^\circ E$ ), referente a caixa preta da Figura 6.9.b. Essa região é consistente com a aparente fonte anômala de calor causada pela perturbação

característica da variabilidade interanual dos anos de La Niña (Fig 5.11.a.c), sendo esta uma ação do próprio estado básico. A mesma região de RWS da Figura 6.9.a pode ser associado a fonte anômala de calor na Figura 6.9.b, a partir das anomalias negativas de ROLE. A fonte de ondas de Rossby do Sudeste Asiático esta situada ao norte da fonte anômala de calor da mesma região (Fig 6.9.a.b), assim como sugerido por Sardeshmukh e Hoskins (1988) para as fontes tropicais de calor.

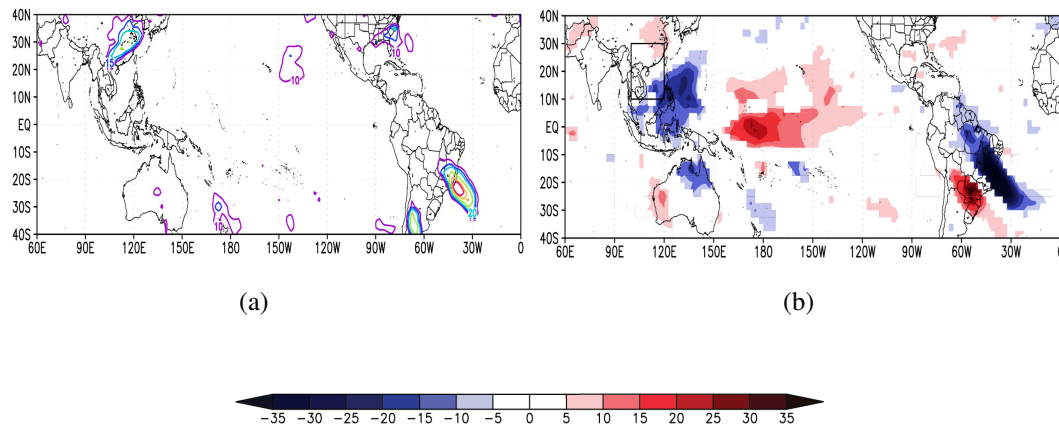


Figura 6.9: Composições de ZCAS durante anos de La Niña, para a variável de: a) Fontes de Ondas de Rossby, b) anomalia de ROLE com 90% de nível de confiança ou superior.

A fonte de calor do Sudeste Asiática foi centrada na região de (20°N - 110°E), com a mesma intensidade de fonte da ZCPS, de  $2K.dia^{-1}$  (equivalente a  $8mm.dia^{-1}$ ) sobre o estado básico de La Niña de DJF de 1999/00 (Fig 6.7.a.b). Deste estado básico é notável a intensidade do Jato Asiático, assim como a bifurcação que ocorre na região do Oceano Pacífico Central Norte, onde um ramo do escoamento segue sobre a América do Norte e Atlântico Norte e outro escoamento sobre o Oceano Pacífico Central, sugerindo uma conexão entre o Sudeste Asiático e o Sudeste da América do Sul. Na Figura 6.7.b, ainda é destacado pelo  $K_s$  a possibilidade de ondas de Rossby interhemisféricas serem guiadas através do número de onda 7-9, do Pacífico Norte Central ao Sul da América do Sul. O próprio estado básico da La Niña facilita este tipo de interação interhemisférica pelo duto de oeste do Oceano Pacífico Central e Leste (Fig 6.7.a), que durante este verão austral é mais intenso do que o escoamento zonal dos estados básicos de El Niño e Neutros analisados (Fig 6.3.a e 6.5.a).

A Figura 6.10 demonstra a resposta das perturbações atmosféricas causadas por uma fonte fixa de calor, semelhante as regiões convectivas características de anomalias negativas de ROLE filtradas e não filtradas das Figuras 5.11.a.c e 6.7.b. O desenvolvimento desta perturbação é

evidenciado a partir de uma onda que parte do Pacífico Norte, com intensidade superior que a onda que parte do Pacífico Sul, na simulação da ZCPS (Fig 6.8), com o mesmo estado básico. Guiada pelo Jato Asiático, a propagação segue uma rota de tipo arco, que se divide no Pacífico Leste do HN, enquanto um trem de ondas cruza a costa do Pacífico Norte Americano, outro segue em direção ao equador e HS, avançando pela América do Sul em direção ao Oceano Atlântico no decorrer de 19 dias (Fig 6.10.b.c.d). Esses trens de ondas estão de acordo com as composições de  $K_s$  (Fig 6.7.b), e semelhante a onda destacada pela análise observacional das composições não filtradas, como demonstrada pela Figura 5.7.g e 5.11.a.

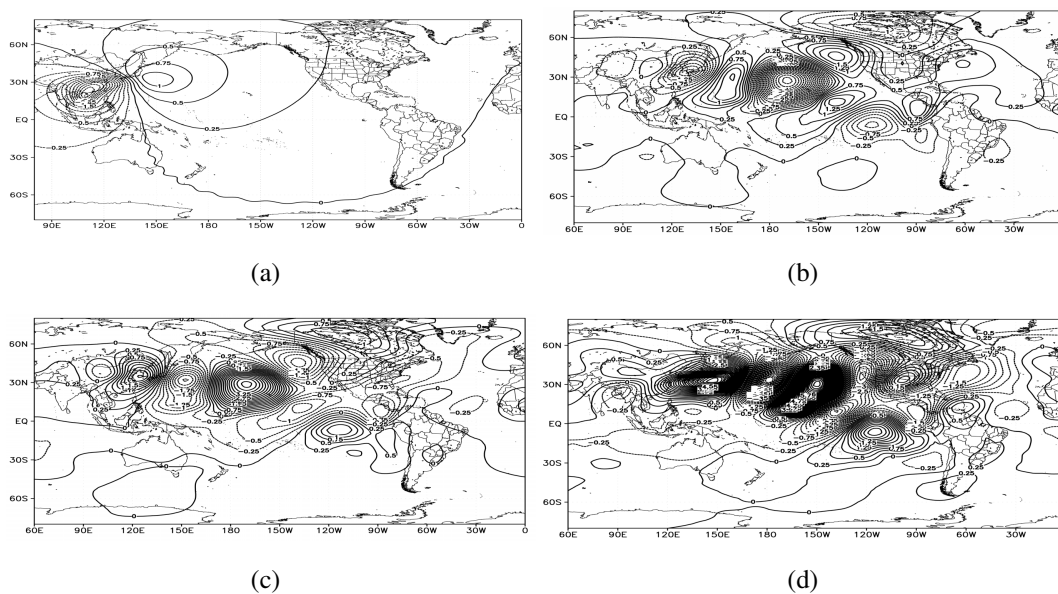


Figura 6.10: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no Sudeste Asiático ( $20^\circ N - 110^\circ E$ ), sobre o estado básico do verão austral de 1999/00: a) região da forçante, b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19.

A onda simulada a partir da resposta das anomalias de  $\psi$  na Figura 6.10 é semelhante aquela observada por Ambrizzi (1994), quando foi analisado por meio de um modelo barotrópico linear os guias de ondas de Rossby perturbados no campo de divergência durante um estado básico de La Niña. Aqui mostramos um padrão mais realista, a partir de um modelo baroclínico, onde podemos usar fontes anômalas de calor e não apenas a divergência como RWS, reproduzindo assim um padrão semelhante ao obtido nas análises observacionais descritas nos capítulos anteriores.

Simulações com outros estados básicos de La Niña intensas também foram realizadas, e podem ser analisadas nos Apêndices E.1

## 6.5 Conclusões

Das simulações realizadas neste capítulo, vemos resultados semelhantes aos padrões das análises observacionais, confirmando as regiões da ZCPS e do Sudeste Asiático como fonte de ondas de Rossby para a ZCAS. Apesar das diferenças do posicionamento zonal das regiões selecionadas como fontes de ondas de Rossby da ZCPS, devida a ação da variabilidade interanual, elas ainda assim se encontram na periferia do jato do HS. Lee et al. (2009) destaca que para que uma fonte de calor anômala dispare uma onda de Rossby, ela deve estar próxima de uma corrente de jato, o que também está de acordo com as análises de Hoskins e Ambrizzi (1993).

Vários estudos já haviam demonstrado os efeitos da ZCPS na ZCAS, a partir de propagação de ondas de Rossby (Casarin e Kousky, 1986; Grimm e Silva Dias, 1995; Liebmann et al., 1999; Cunningham e Cavalcanti, 2006; Matthews, 2012; Van Der Wiel et al., 2015), porém, esta é a primeira vez que foi analisado a teleconexão atmosférica sob diferentes estados básicos e também a partir de análises observacionais, não se limitando apenas ao domínio da América do Sul e em análises de compostos médios gerais. Foi demonstrado que há diferenças nos padrões ondulatórios que interagem com a ZCAS em estados básicos Neutros, La Niña e El Niño.

Sobre o Sudeste Asiático, os resultados apresentados revelam a existência de uma propagação de onda de Rossby atmosférica durante os eventos de La Niña, que é inicialmente guiada pelo jato asiático, cruzando o equador e interagindo com a ZCAS através de uma janela equatorial na região do Pacífico Leste. Estudos anteriores haviam sugerido a possibilidade deste tipo de interação, porém este é o primeiro estudo com foco na ZCAS, além de revelar essa ligação entre o Sudeste Asiático e o Sudeste da América do Sul.

O perfil vertical do vento zonal destaca ventos de oeste intensos sobre quase todo o Pacífico Equatorial durante anos de La Niña. Isso demonstra a importância da variabilidade interanual de La Niña na circulação de grande escala, através da intensificação dos dutos de oeste equatoriais. No verão austral, devido a ação da variabilidade interanual da La Niña, o Sudeste Asiático pode agir como uma fonte anômala de calor na vizinhança do Jato Asiático, região favorável para disparar e dispersar energia de ondas atmosféricas. Desta forma, as ondas de Rossby podem cruzar o equador pelo duto de oeste equatorial, e embebido no fluxo de oeste, interagir com a ZCAS. Durante o estado básico de La Niña dois guias de ondas que interagem com a ZCAS foram identificados, um trem de ondas partindo do Sudeste Asiático cruzando o Pacífico Leste, e outro guiado pelo Jato do HS, disparado pela ZCPS.

Dos estados básicos Neutros e de El Niño, ocorreu o esperado, onde ondas foram disparadas a partir dos posicionamentos da ZCPS. O estado básico de El Niño destaca a impossibilidade de propagação de ondas interhemisféricas sobre o Oceano Pacífico, porém o oposto é observado na região do Oceano Atlântico Equatorial. Durante o verão austral Neutro, não é que seja improvável que ondas de Rossby se propaguem sob o Oceano Pacífico Leste de um hemisfério ao outro, apenas não foi identificado nenhuma fonte de calor aparente no HN que dispare este tipo de onda. Aqui observamos as regiões de fontes de ondas de Rossby que causam algum tipo de efeito na ZCAS, desde que esteja em alguma região favorável para que esta energia seja transportada para o outro hemisfério.

As simulações com o modelo baroclínico confirmam as hipóteses abordadas nesta tese, ou seja a suposição de que diferentes trens de ondas de Rossby podem interagir com a ZCAS devido a variabilidade interanual dos eventos de ENOS. O estado básico durante um evento de ENOS é forte o suficiente para perturbar o escoamento atmosférico global de altos níveis e impor diferentes guias de ondas de Rossby estacionárias a depender de sua fase positiva ou negativa das anomalias de TSM no Oceano Pacífico Central. Além disso, a variabilidade interanual também altera o posicionamento da fonte, particularmente relacionada a ZCPS. A interação interhemisférica, obtida a partir das simulações com a fonte no Sudeste Asiático, mostrou de forma inédita a conexão remota entre o HN e o HS, em especial a relação com a ZCAS considerando o estado básico de La Niña. Para o El Niño, ondas mais longas interagiram com a América do Sul partindo dos trópicos do Oceano Pacífico Leste. Embora as interações interhemisféricas pelo Oceano Pacífico Leste sejam dificultadas durante este estado básico é possível que ondas se propaguem no Atlântico Equatorial, a partir de uma janela equatorial com dutos de oeste intensos, este ponto será discutido no próximo capítulo, onde investigaremos a possibilidade da ZCAS como fonte de ondas de Rossby, principalmente com o estado básico de El Niño.

## Simulação Numérica - Interação Trópicos - Extratrópicos: Parte II - A ZCAS como fonte de Ondas de Rossby

A discussão da ZCAS como fonte de ondas de Rossby foi brevemente introduzida por Grimm e Silva Dias (1995) em meados dos anos 90, a partir das funções de influencia através de um modelo barotrópico forçado pela divergência com um estado básico climatológico. Eles observaram que, após a dissipação da ZCAS, ondas de Rossby poderiam interagir com o continente europeu. Embora a dinâmica das ondas de Rossby e a própria circulação de grande escala contribua para esse tipo de propagação de onda, a teleconexão interhemisférica, partindo da ZCAS, pouco foi explorada em detalhes.

Muitos estudos na literatura científica descrevem a interação intrassazonal entre a ZCPS e a ZCAS por meio de ondas de Rossby, por exemplo, Grimm e Silva Dias (1995); Figueroa et al. (1995); Liebmann et al. (1999); Carvalho et al. (2004); Cunningham e Cavalcanti (2006); Van Der Wiel et al. (2015), porém apenas Grimm e Silva Dias (1995) atribui a ZCAS como uma possível fonte de ondas de Rossby que poderia impactar o padrão de teleconexão da Eurásia. Van Der Wiel et al. (2015) vai um pouco além e discute que a divergência da ZCAS não seria forte o suficiente para disparar ondas de Rossby, entretanto, essa análise foi baseada apenas em um composto médio climatológico, não observando as alterações da circulação em grande escala causada em eventos de ENOS, que tendem a intensificar (enfraquecer) o escoamento de oeste da alta troposfera sobre o Oceano Atlântico Equatorial.

Li et al. (2015, 2019) ao realizar uma análise detalhada das ondas que cruzam o equador, destaca que as propagações de ondas interhemisféricas entre o HS e o HN ocorrem majoritariamente durante o verão austral e pelo Oceano Atlântico através do duto de oeste tropical, porém nenhum

sistema atmosférico ou zona de convergência que ocorre na América do Sul foi associado como fonte de onda.

Com base nos trabalhos de Ambrizzi (1994); Tomas e Webster (1994); Grimm e Silva Dias (1995); Ambrizzi e Hoskins (1997), a região da ZCAS é proposta como de fonte de ondas de Rossby, perturbada em meio a diferentes estados básicos e fases do ENOS durante o verão austral a partir de simulações com o modelo baroclínico DREAM, semelhante ao realizado no capítulo 6, mas com foco nas ondas atmosféricas que propagam-se através do Oceano Atlântico Equatorial.

## 7.1 Estado Básico

Os verões austrais selecionados como estado básico podem ser observados na Tabela 7.1 na qual os eventos ENOS foram separados nas fases neutra, positiva e negativa. Os anos de verões austrais (DJF) escolhidos são exatamente os mesmos representados pela Tabela 6.1, mas neste capítulo o estado básico climatológico também foi analisado (Tabela 7.1) com o objetivo de destacar a suavização que o escoamento médio climatológico pode representar para este tipo de análise.

As simulações realizadas são semelhantes as de Ambrizzi (1994), em que foram analisadas as respostas das perturbações atmosféricas a partir da divergência em um modelo barotrópico linear sob diferentes estados básicos.

Tabela 7.1 - Estados Básicos dos Verões Austrais - DJF

Ano	ONI 3.4 Anomalia	ENOS - Intensidade
1979/2016	—	Climatológico
1992/1993	+0,1°C	Neutro
1999/2000	-1,7°C	La Niña Forte
2015/2016	+2,5°C	El Niño Forte

Antes de analisar a resposta da forçante térmica e o desenvolvimento das anomalias de função de corrente ( $\psi$ ) é importante compreender o perfil vertical do vento zonal no domínio do Oceano Atlântico Equatorial (10°N - 10°S e 60°W - 0°W), uma vez que variações no escoamento de altos níveis troposféricos podem permitir ou não a propagação meridional de ondas de Rossby.

Na figura 7.1 é notável a diferença entre os escoamentos de altos níveis no Oceano Atlântico Equatorial. Para o estado básico de El Niño (Fig 7.1 .c) o escoamento zonal é 4 vezes mais



intenso do que quando há uma La Niña (Fig 7.1 .d), o que facilita a propagação de ondas nesta região. Para os estados básicos climatológico (Fig 7.1 .a) e Neutro (Fig 7.1 .b) o escoamento zonal é mais intenso do que o verão austral de La Niña (Fig 7.1 .d) e mais fraco do que de El Niño (Fig 7.1 .c), sendo mais fácil as ondas de Rossby se propaguem sobre o Oceano Atlântico Equatorial durante os estados básicos Neutro e Climatológico, do que durante os anos de La Niña.

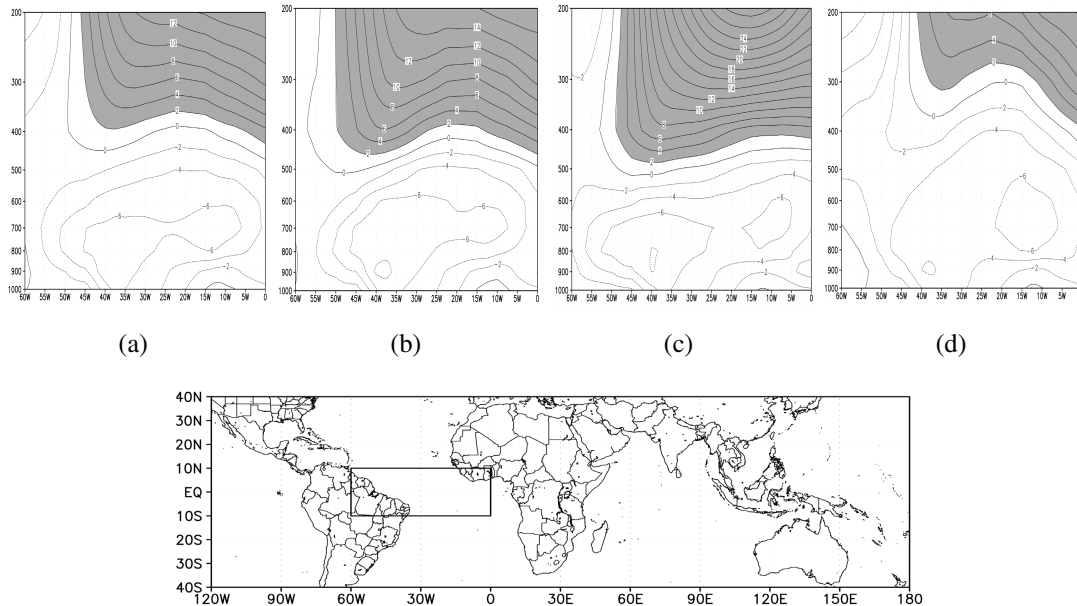


Figura 7.1: Perfil Vertical do Escoamento Zonal Médio no Domínio do Oceano Atlântico (10°N - 10°S, 60°W - 0°W) do estado básico de: a) DJF 1979/2016 - Climatológico, b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste. Esta figura pode ser observada maior no Apêndice F.7

Simulações extras com outros estados básicos não apresentados neste capítulo podem ser analisadas no Apêndice E.3

## 7.2 A Zona de Convergência do Atlântico Sul como fonte de Ondas de Rossby

Nesta seção serão analisadas as respostas das anomalias de função de corrente ( $\psi$ ) a partir de uma fonte anômala de calor fixa na região característica da ZCAS no sudeste da América do Sul. Os estados básicos adotados são aqueles representados na Tabela 7.1, e serão discutidos os desenvolvimentos das anomalias para os dias 2, 4, 16 e 19.

As análises do modelo baroclínico foram realizadas a partir da resposta da perturbação no campo de função de corrente ( $\psi$ ), perturbada por uma fonte anômala de calor fixa com um pico vertical médio de  $2K.dia^{-1}$ , que é equivalente a uma precipitação de  $8 mm.day^{-1}$ . A fonte

anômala de calor foi fixada próxima da região de atuação da ZCAS (15°S - 35°S e 60°W - 40°W) durante 20 dias (1280 time steps). Esta região é semelhante ao que foi denominado como fração da ZCAS costeira no trabalho de Carvalho et al. (2004).

Nos trabalhos de Tomas e Webster (1994); Ambrizzi (1994) é destacada a possibilidade do Oceano Atlântico Equatorial ser uma região favorável para interações interhemisféricas, principalmente durante os anos de El Niño, a partir do duto de oeste nos altos níveis equatoriais. Li et al. (2019) comenta que as interações de ondas interhemisféricas entre HS e HN ocorrem majoritariamente pelo duto de oeste do Oceano Atlântico Equatorial, mas não atribui nenhuma fonte de calor ao disparo dessas ondas. Aqui vamos investigar o que foi proposto inicialmente por Grimm e Silva Dias (1995), e analisar se semelhante a ZCPS, a ZCAS também pode ser uma fonte de ondas de Rossby, considerando diferentes estados básicos para simulações semelhantes aquelas realizadas no Capítulo 6, mas neste capítulo com o foco no Oceano Atlântico.

### 7.2.1 Climatológico e Neutro

Do perfil vertical do estado básico climatológico tem-se que o escoamento médio zonal em altos níveis é de  $12 \text{ m.s}^{-1}$  (Fig 7.1.a) e contorno de  $15 \text{ m.s}^{-1}$  próximo da região equatorial do oceano Atlântico, de acordo com a componente zonal do vento ( $\bar{U}$ ) (Fig 7.2 .a). Em relação ao Ks, na região subtropical do HN, é possível que ondas de Rossby sejam guiadas com números de ondas 5-8 (Fig 7.2.b), porém na região equatorial, que conecta o HS ao HN, apenas ondas mais curtas acima do número de onda 10 seriam capazes de cruzar esta região, sendo confirmados a partir das poucas perturbações que cruzam o Atlântico Equatorial, de acordo com as simulações do modelo baroclínico demonstradas na figura 7.3.

No estado básico climatológico (Fig 7.3), as anomalias de função de corrente ( $\psi$ ) demonstram uma resposta a partir da propagação de onda de Rossby meridionais da América do Sul em direção ao Atlântico Norte no decorrer de 16 dias, e outra propagação ondulatória ainda mais evidente no Oceano Atlântico Sul ao sul do continente africano (Fig 7.3.a.b.c.d), sendo representativos dos números de ondas estacionários 4-6, e mais intenso do que a onda que atravessa o Atlântico Equatorial em direção ao Atlântico Norte. O desenvolvimento das perturbações causadas no continente sul americano no decorrer de 4, 16 e 19 dias (Fig 7.3.b.c.d) também impacta o leste do continente europeu, a partir do desenvolvimento lento de um cavado no Norte da África em 19 dias (Fig 7.3.d).

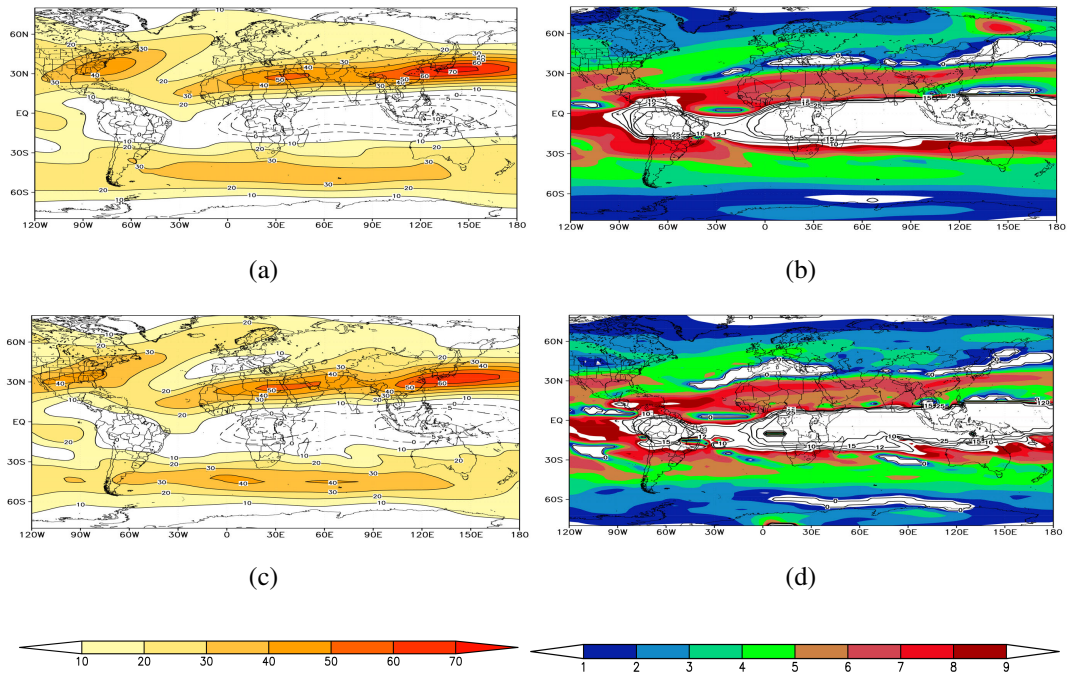


Figura 7.2: Composição do Verão Austral do estado básico Climatológico: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded); e do estado básico neutro : c) e d). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30

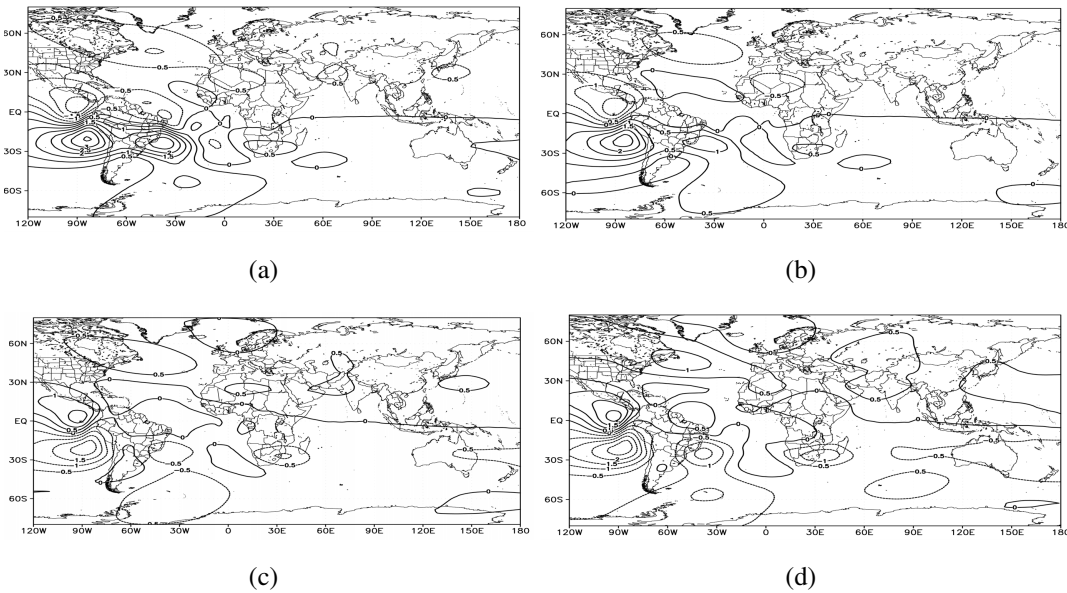


Figura 7.3: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^{\circ}S - 50^{\circ}W$ ), sobre o estado básico climatológico: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19.

Para o estado básico neutro, o escoamento zonal de oeste no Atlântico Equatorial (7.1 .b) é  $2 \text{ m.s}^{-1}$  mais intenso do que o observado durante o estado básico climatológico, e propagações de ondas podem ocorrer mais facilmente do Oceano Atlântico Norte ao Pacífico Norte, a partir do contorno de  $15 \text{ m.s}^{-1}$  próximo da região equatorial no Oceano Atlântico (Fig 7.2.c) e com possibilidade de propagação de ondas estacionárias de número 8-10 (Fig 7.2 .d). Na região do Atlântico Equatorial, o contorno do Ks é mais estreito do que o observado durante o estado básico climatológico, ao comparar as figuras 7.2.b e 7.2.d, demonstrando assim que ondas mais longas poderiam cruzar a região equatorial com maior facilidade durante o estado básico neutro do que o estado básico climatológico, podendo ser observado a partir do desenvolvimento das perturbações de ( $\psi$ ) na figura 7.4.

Na Figura 7.4 observa-se que a onda parte do Sudeste da América do Sul, onde cruza o Oceano Atlântico Norte (7.4.b) embebidas pelo escoamento de Oeste subtropical do HN (7.2.c) com numero de onda 8-10 (7.2.d), interagindo com a Africa e o Oriente Médio (7.4.c), e posteriormente Europa e Ásia no decorrer de 19 dias (7.4.d), demonstrando um padrão de onda interhemisférico mais claro que no caso anterior. Também há Ondas de Rossby que se propagam pelo Oceano Atlântico Sul, com desenvolvimento semelhante ao observado durante o estado básico climatológico, interagindo com o sul do continente africano próximo a área de atuação da Zona de Convergência do Indico Sul (ZCIS).

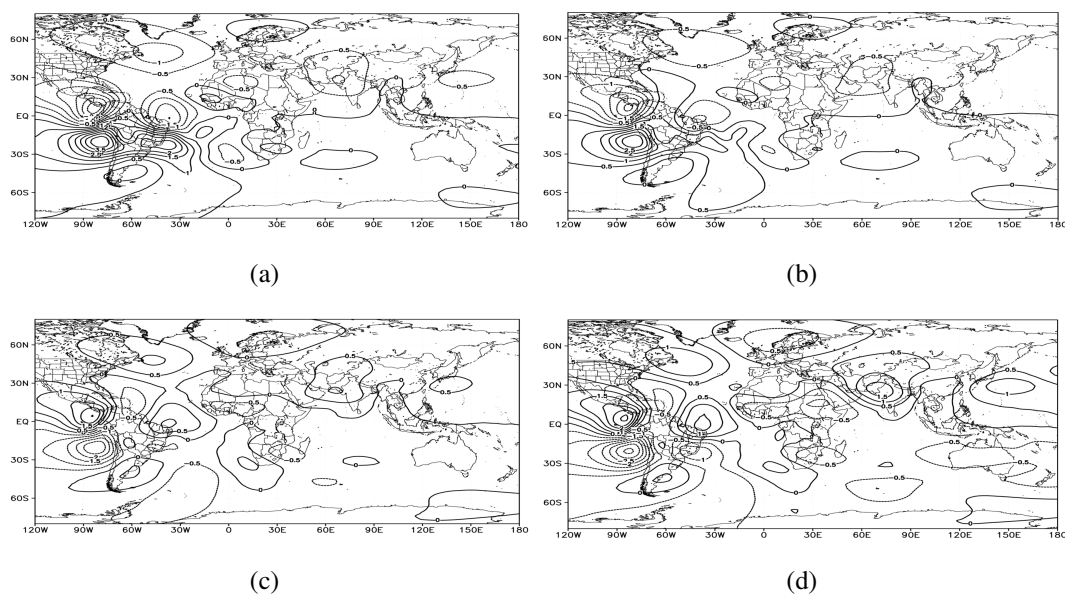


Figura 7.4: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2 \text{ K.dia}^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^\circ \text{S} - 50^\circ \text{W}$ ), sobre o estado básico neutro: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19.

### 7.2.2 El Niño

O estado básico durante o ano de El Niño é o que apresenta escoamento zonal de oeste mais intenso na alta troposfera no Oceano Atlântico Equatorial (Fig 7.1.c), assim como na composição da componente zonal do vento (Fig 7.5.a) no qual os contornos ( $\bar{U}$ ) que cruzam o equador possuem intensidade superior a  $15 \text{ ms}^{-1}$ . Sendo este o estado básico com escoamento de Oeste mais intenso na região equatorial do Oceano Atlântico em relação aos outros estados básicos simulados, ele permite maiores possibilidades de que ondas atmosféricas cruzem a região equatorial, a partir dos números de ondas 6-10 (Fig 7.5.b). Nesta região, os contornos dos  $K_s$  são mais estreitos se comparados com os resultados da figuras 7.2.b.d, permitindo a propagação de ondas longas por esta região.

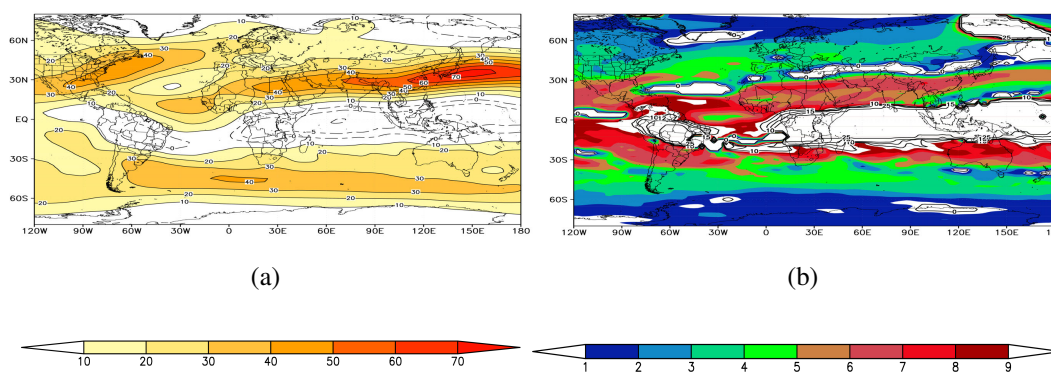


Figura 7.5: Composição do Verão Austral do estado básico de El Niño: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Numero de onda zonal 10, 15, 25-30

Nas figuras 7.6 a simulação é realizada com o estado básico de El Niño, que apresenta o escoamento zonal de oeste mais intenso e o contorno mais estreito de  $K_s$  na região do Atlântico Equatorial. A onda de Rossby parte da América do Sul, cruza o Oceano Atlântico e inserida no jato subtropical do HN interage com as latitudes subtropicais nos continentes africano e asiático. Essa propagação de onda é evidente em todo desenvolvimento das anomalias de ( $\psi$ ) (Fig 7.6.a.b.c.d) interagindo inclusive com o Oceano Pacifico Norte nos últimos passos de tempo.

A onda de Rossby que se propaga no Oceano Atlântico Sul nesta simulação é mais intensa, se comparado aos resultados anteriores com os estados básicos neutro e climatológico. Esta onda se propaga além do que é observado nas simulações anteriores, atingindo o sul da Austrália. O jato dos HS nesta simulação é mais intenso e extenso do que nas simulações anteriores (Fig 7.5.a) e com números de ondas mais longos de 2-6 (Fig 7.5.b).

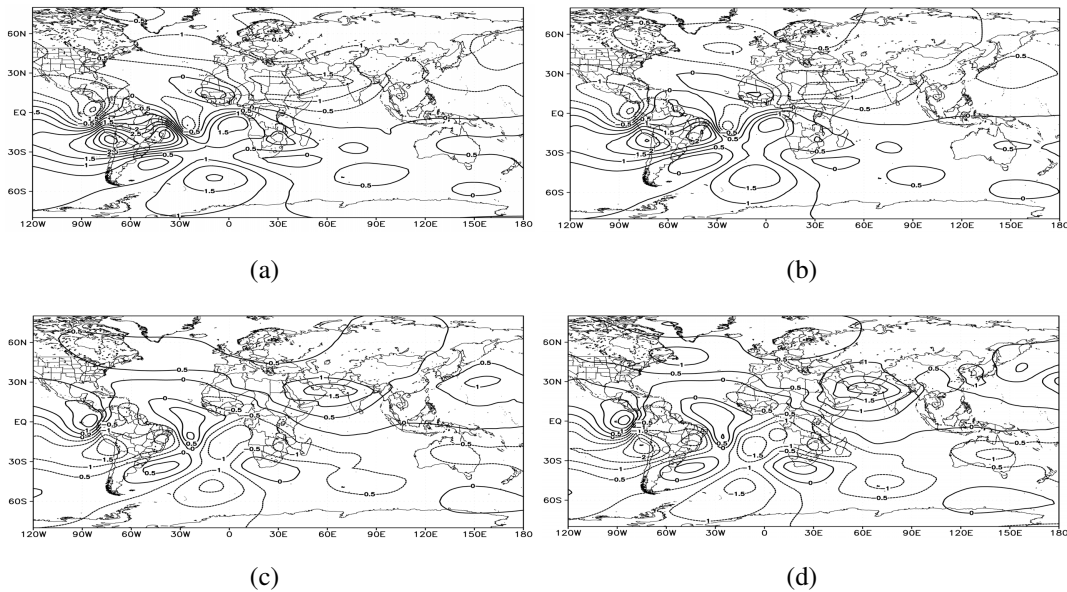


Figura 7.6: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K.dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^{\circ}S - 50^{\circ}W$ ), sobre o estado básico de El Niño: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19.

### 7.2.3 La Niña

A La Niña é a variabilidade interanual que representa o escoamento de oeste mais fraco sobre o Oceano Atlântico Equatorial entre todas as simulações realizadas (Fig 7.1.d), onde as propagações de ondas nesta região são dificultadas. Diferente dos estados básicos anteriores o contorno de  $15 ms^{-1}$  da componente zonal do vento é localizado no HN ao norte da região equatorial (Fig 7.7.a) e o contorno do  $K_s$  é o mais largo, o que dificulta a propagação de ondas mais longas nesta região, sendo permitido que apenas ondas curtas acima do número de onda 10 cruzem a região equatorial (Fig 7.7.b).

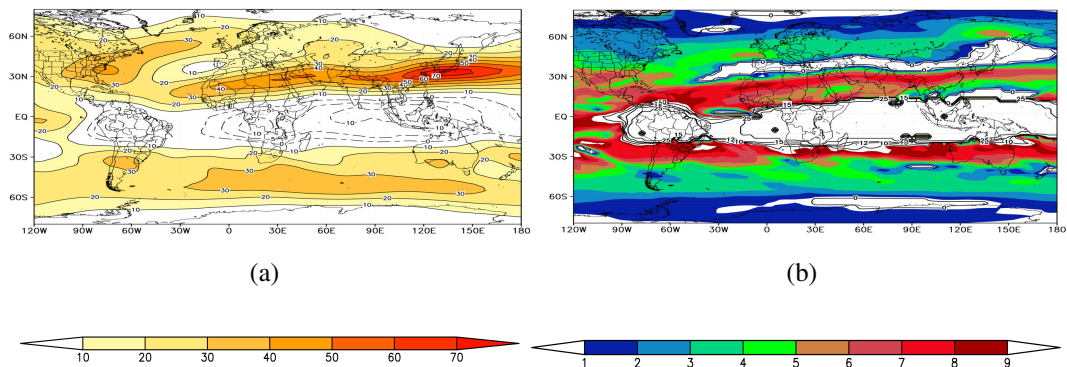


Figura 7.7: Composição do Verão Austral do estado básico de La Niña: a) Vento Zonal ( $\bar{U}$ ) e b) Número de Onda Estacionário  $K_s$  (shaded). Contornos do Número de onda zonal 10, 15, 25-30



Sob o estado básico de La Niña intensa, nas figuras 7.8.a.b.c.d, pouco ou nenhuma perturbação se desenvolve nas latitudes subtropicais do HN, onde é marcado pelo contorno de Ks a partir dos números de ondas 10, 15, 25-30 (Fig 7.7.b) e apenas ondas muito curtas seriam capazes de cruzar a região equatorial.

Para o Atlântico Sul com 19 dias (Fig 7.8.d) uma onda de Rossby interage com o sul do continente africano guiada pelo jato do HS (Fig 7.7.a), indicando uma possível interação entre a ZCAS e a região de atuação da ZCIS. As simulações indicam que durante anos de La Niña o enfraquecimento do escoamento equatorial de altos níveis dificulta as propagações inter-hemisféricas sobre o Oceano Atlântico Equatorial, o que está de acordo o observado por Ambrizzi (1994) e bem representado pelas composições de Ks da figura 7.7.b.

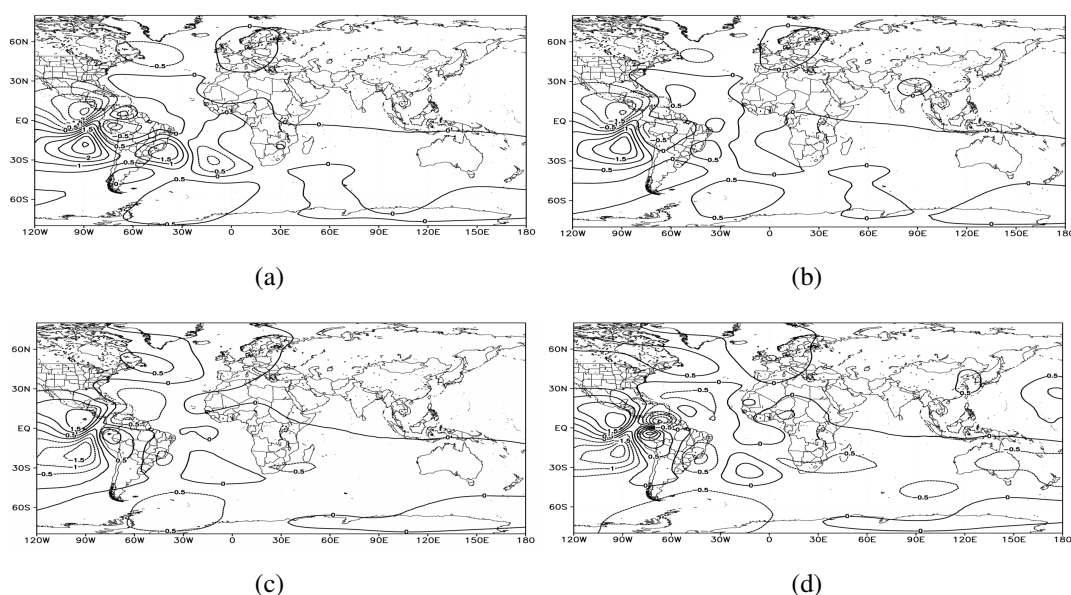


Figura 7.8: Resposta da função de corrente ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) perturbada por uma fonte de calor anômala de  $2K \cdot dia^{-1}$ , localizada no região da ZCAS ( $25^{\circ}S - 50^{\circ}W$ ), sobre o estado básico de La Niña: a) dia 2 b) dia 4, d) dia 16, e) dia 19.

### 7.3 Conclusões

Os resultados das simulações feitas a partir do modelo baroclínico DREAM indicam que as ondas que se propagam do HS ao HN pelo Oceano Atlântico Equatorial ocorrem mais facilmente durante os estados básicos Neutros e de El Niño do que durante os de La Niña, devido ao enfraquecimento do escoamento de oeste na alta troposfera imposto por esta variabilidade inter-anual. As simulações foram realizadas a partir de uma fonte fixa de calor localizada na região

de atuação da ZCAS, retomando a discussão introduzida por Grimm e Silva Dias (1995), onde a divergência na região da ZCAS seria capaz de propagar ondas para região subtropical da Eurásia.

A partir de um modelo baroclínico simples com diferentes estados básicos foi demonstrado que esta zona de convergência pode provocar perturbações que se propagam para os subtrópicos do HN, desde que haja um escoamento zonal de oeste intenso que facilite este tipo de propagação meridional de ondas atmosféricas, permitindo que ocorra teleconexões interhemisféricas entre o HS e o HN através do Oceano Atlântico Equatorial.

Neste capítulo foi identificado que durante anos neutros e de El Niño as perturbações causadas pela ZCAS no Sudeste do Brasil podem dispersar energia e impactar regiões do Atlântico Norte e subtrópicos da África e da Ásia. No entanto, durante os eventos de La Niña, as perturbações causadas pela ZCAS interagem com o Sul da África inseridas no jato subtropical do HS, não gerando perturbações no HN. Para o estado básico de La Niña, o escoamento de oeste equatorial é o mais fraco em relação aos outros aqui analisados, indicando que durante esta variabilidade interanual, as propagações de ondas interhemisféricas são dificultadas na região do Oceano Atlântico Equatorial.

Durante os estados básicos climatológico e neutro as propagações de ondas no Oceano Atlântico Equatorial também foram observadas, embora no estado básico climatológico estas propagações não sejam tão evidentes e representativas quanto para o estado básico neutro.

Pelas análises realizadas podemos sugerir que a ZCAS pode ser uma fonte de ondas de Rossby para os subtrópicos no HN, desde que se tenha algum escoamento de oeste significativo para que as perturbações causadas por esta zona de convergência persistente sejam propagadas e isto depende da variabilidade interanual imposta na região do Oceano Atlântico. Aqui foi demonstrado que durante anos de El Niño isto pode ocorrer mais facilmente devido os intensos ventos de oeste na região. As simulações do modelo baroclínico também sugeram que assim como a ZCPS, a ZCAS também pode ser uma fonte de ondas de Rossby de interação com outras zonas de convergências. A dispersão de energia da ZCAS, quando embebida no jato subtropical do HS, pode vir a transportar energia para a região subtropical do continente africano e auxiliar na formação da ZCIS. Sob diferentes estados básicos é possível observar uma onda mais longa que conecta os subtrópicos da América do Sul aos subtrópicos austrais do continente africano.



# Considerações Finais

### 8.1 *Sumário e Conclusões Gerais do Trabalho*

Nesta tese foram analisadas composições de ZCAS em diferentes estados básicos com base na variabilidade interanual do ENOS, considerando que as perturbações persistentes do Oceano Pacífico Equatorial são capazes de modificar a circulação equatorial e tropical média, de modo que os trens de Ondas de Rossby que interagem com a ZCAS propagassem por rotas diferentes a depender da fase e intensidade da forçante. Guias de ondas distintos foram identificados ao longo da tese, ao mesmo tempo que diferentes impactos das fases do ENOS também foram observadas nos padrões de ZCAS.

Na América do Sul, quando é analisado apenas a ZCAS, não considerando os padrões de ondas do Oceano Pacífico Sul, é evidente a relação com a ZCIT dependendo da fase do ENOS, estando de acordo com o encontrado na literatura científica. Sobre o Oceano Atlântico Equatorial é destacado o enfraquecimento do cavado do nordeste, nos dias de ZCAS em que a La Niña estava ativa. Nas observações filtradas um forte escoamento de leste foi identificado como ação da variabilidade interanual da La Niña, que enfraquecia o cavado do nordeste e consequentemente o VCAN. Em contra-partida durante anos de El Niño, o escoamento de altos níveis equatorial sobre o Oceano Atlântico Equatorial é de oeste, o que pode intensificar o cavado do nordeste e o VCAN. Pelo nosso conhecimento esta é a primeira vez que se comenta a relação entre a ZCAS e o VCAN em relação a fase do ENOS.

Os oceanos Pacífico e Atlântico tem papel importante na dinâmica das ondas de Rossby atmosféricas, seja por possíveis fontes e sumidouros de calor, ou pelas janelas interhemisféricas, que dependendo da fase do ENOS ou da circulação imposta aos altos níveis troposféricos, as propagações meridionais de ondas de Rossby podem ser favorecidas ou impedidas. Durante

eventos de El Niño foi identificado que os escoamentos de oeste na região do Atlântico são intensificados, enquanto que os escoamentos de oeste são enfraquecidos sobre o Oceano Pacífico Leste Equatorial, região de fonte de aquecimento anômalo do ENOS. O enfraquecimento dos ventos de oeste que atuam como dutos propagação dificultam a possibilidade de interações interhemisféricas. Durante anos de La Niña, o oposto é observado, escoamento de oeste intensos são observados no Oceano Pacífico Leste e escoamentos de leste ocorrem sobre o Oceano Atlântico Equatorial.

Das propagações de ondas, foi identificado pela primeira vez uma interação de ondas de Rossby interhemisféricas e a ZCAS durante anos de La Niña, onde a propagação meridional de ondas de Rossby é favorecida pelo duto de oeste intensificado pela variabilidade interanual da La Niña. Também foram destacados trens de ondas mais curtos do que o clássico PSA interagindo com a ZCAS durante anos de El Niño. Além da ação da ZCPS, que é uma das principais fontes de ondas de Rossby para a ZCAS, variações no posicionamento da ZCPS também modificam os trens de ondas que interagem com a ZCAS.

A variabilidade interanual do ENOS é forte o suficiente para perturbar a atmosfera e alterar tanto os guias de ondas de Rossby que podem interagir com a ZCAS, quanto localmente na América do Sul em sua área de atividade convectiva. As regiões de duto de oeste no Atlântico Equatorial tanto podem agir como janela interhemisférica nos anos de El Niño, quanto intensificam o cavado do Nordeste e o VCAN. As comparações entre os compostos de ZCAS-Climatológicos e de ZCAS sob as diferentes fases do ENOS, revelam padrões diferentes dos clássicos climatológicos que sempre destacam o PSA como o padrão de onda associado a ZCAS, no entanto, quando separamos em anos de La Niña ou El Niño encontramos padrões de ondas diferentes, inclusive interhemisférico para o caso de La Niña.

Nesta tese também foi proposta a ZCAS como fonte de ondas de Rossby, assim como a ZCPS, e foi identificado que, dependendo da fase do ENOS, a ZCAS pode dispersar energia nos subtropicais do HN através do Jato Asiático no decorrer de 15 dias. Este tipo de interação tinha sido pouco discutido na literatura, onde em geral, sempre foi considerado um estado básico climatológico. Neste estudo, utilizando diferentes estados básicos destacamos a importância dos dutos de oeste equatoriais além de revelar qual variabilidade interanual do ENOS poderia favorecer ou não estas janelas interhemisféricas. Além das interações entre a ZCPS-ZCAS e da ZCAS como fonte de ondas de Rossby durante anos de El Niño, também observamos uma possível relação entre a ZCAS e a ZCIS, pois quando a energia não é totalmente dispersada para

o HN a energia pode ser guiada ao sul do continente africano.

Deste modo, os resultados apresentados neste trabalho puderam avançar o nosso conhecimento sobre a importância da variabilidade interanual do ENOS na circulação atmosférica de grande escala em relação aos vários trabalhos apresentados na literatura. Um melhor entendimento, dos trens de ondas de Rossby associados a ZCAS e os diferentes guias de ondas associados em função das fases do ENOS poderá servir para melhor previsão de tempo e clima e, eventualmente auxiliar na evolução dos modelos numéricos associados aos mesmos.

## 8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Desta pesquisa alguns estudos mais detalhados ficaram em aberto a partir dos resultados. Por exemplo, no presente trabalho só analisamos oscilações do ENOS, análises de episódios de ZCAS combinados de El Niño e Niño do Atlântico seriam interessantes. Assim como análises de episódios de La Niña combinados com a Niña do Atlântico, durante eventos de ZCAS. Simulações futuras com dados de projeções climáticas também podem ser interessantes com relação as janelas interhemisféricas e a dispersão de energia entre os hemisférios.

A ZCAS como fonte de ondas de Rossby durante anos de El Niño embora apenas simulado pelo modelo baroclínico, contem uma dinâmica e teoria sólida associada ao argumento, análises observacionais de compostos do que acontece após a dissipação da ZCAS durante anos de El Niño podem esclarecer melhor essa interação interhemisférica. Análises de estudos de caso seriam promissores para entender o impacto da ZCAS nos subtrópicos durante o Inverno Boreal.

Interações entre a ZCAS e a ZCIS foram sugeridas em alguns de nossos resultados, por exemplo, foram observadas durante as simulações realizadas. Poucos estudos tem abordado este tipo de teleconexão e nossos resultados sugerem que durante anos de La Niña esta interação parece ser mais evidente. Estudos de caso da ZCAS relacionada a ZCIS seriam de interesse da comunidade científica que investiga as Zonas de Convergências Subtropicais do HS.



## Referências Bibliográficas

- Ambrizzi T., Rossby Wave Propagation on El Nino and La Nina non-zonal Basic Flows, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1994, vol. 9, p. 54
- Ambrizzi T., Ferraz S., An objective criterion for determining the South Atlantic Convergence Zone, *Frontiers in Environmental Science*, 2015, vol. 3, p. 1
- Ambrizzi T., Hoskins B. J., Stationary rossby-wave propagation in a baroclinic atmosphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, vol. 123, p. 919
- Brown J. R., Lengaigne M., Lintner B. R., Widlansky M. J., van der Wiel K., Duteil C., Linsley B. K., Matthews A. J., Renwick J., South Pacific Convergence Zone dynamics, variability and impacts in a changing climate, *Nature Reviews Earth Environment*, 2020, vol. 1, p. 530
- Carvalho L. M. V., Jones C., Liebmann B., Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone, *Journal of Climate*, 2002, vol. 15, p. 2377
- Carvalho L. M. V., Jones C., Liebmann B., The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual Activity and Extreme Rainfall, *Journal of Climate*, 2004, vol. 17, p. 88
- Carvalho L. M. V., Jones C., Silva A. E., Liebmann B., Silva Dias P. L., The South American Monsoon System and the 1970s climate transition, *International Journal of Climatology*, 2011, vol. 31, p. 1248
- Casarin D. P., Kousky V. E., Anomalias de precipitação no sul do Brasil e variações na circulação atmosférica., *Rev. Brasileira de Meteorologia*, 1986, pp 83 – 90

- Coelho C. A. S., de Oliveira C. P., Ambrizzi T., Reboita M. S., Carpenedo C. B., Campos J. L. P. S., Tomaziello A. C. N., Pampuch L. A., Custódio M. d. S., Dutra L. M. M., Da Rocha R. P., Rehbein A., The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections, *Climate Dynamics*, 2016, vol. 46, p. 3737
- Cunningham C., Cavalcanti I., Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone, *International Journal of Climatology*, 2006, vol. 26, p. 1165
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, vol. 137, p. 553
- Duchon C. E., Lanczos Filtering in One and Two Dimensions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1979, vol. 18, p. 1016
- Fedorova N., Levit V., Campos A. M. V., Brazilian Northeast Jet Stream: association with synoptic-scale systems, *Meteorological Applications*, 2018, vol. 25, p. 261
- Ferreira N. J., Sanches M., Silva Dias M. A. F., Composição da Zona de Convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña, *Atmosfera*, 2004, vol. 19, p. 89
- Figuroa S. N., Estudo dos sistemas e circulação de verão sobre a América do Sul e sua simulação com modelos numéricos., Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, 1997, Tese de Doutorado
- Figuroa S. N., Satyamurty P., Dias P. L. D. S., Simulations of the Summer Circulation over the South American Region with an Eta Coordinate Model, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, vol. 52, p. 1573
- Gan M. A., *Monção na América do Sul*. 1 edn. Oficina de Texto, 2009, 297
- Gan M. A., Kousky V. E., Vórtices ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico Sul, *Rev. Brasileira de Meteorologia*, 1986, vol. 1, p. 19

- Gill A. E., Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, vol. 106, p. 447
- Grimm A. M., The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences, *Journal of Climate*, 2003, vol. 16, p. 263
- Grimm A. M., Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events, and possible effects of climate change, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, vol. 25
- Grimm A. M., Silva Dias P. L., Analysis of Tropical–Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995, vol. 52, p. 3538
- Hall N., Leroux S., Ambrizzi T., Transient contributions to the forcing of the atmospheric annual cycle, *Clim Dyn*, 2019, vol. 52, p. 6719–6733
- Hall N. M. J., A Simple GCM Based on Dry Dynamics and Constant Forcing, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, vol. 57, p. 1557
- Hoskins B. J., Dynamics of low-frequency phenomena in the atmosphere : notes from an NCAR Summer Colloquium. National Center for Atmospheric Research, 1988
- Hoskins B. J., Ambrizzi T., Rossby Wave Propagation on a Realistic Longitudinally Varying Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, vol. 50, p. 1661
- Hoskins B. J., Karoly D. J., The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1981, vol. 38, p. 1179
- Hoskins B. J., Simmons A. J., A multi-layer spectral model and the semi-implicit method, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975, vol. 101, p. 637
- Hsu H.-H., Lin S.-H., Global Teleconnections in the 250-mb Streamfunction Field during the Northern Hemisphere Winter, *Monthly Weather Review*, 1992, vol. 120, p. 1169
- Huffman G. J., Adler R. F., Morrissey M. M., Bolvin D. T., Curtis S., Joyce R., McGavock B., Susskind J., Global Precipitation at One-Degree Daily Resolution from Multisatellite Observations, *Journal of Hydrometeorology*, 2001, vol. 2, p. 36

- Jin F., Hoskins B. J., The Direct Response to Tropical Heating in a Baroclinic Atmosphere, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, vol. 52, p. 307
- Jorgetti T., da Silva Dias P. L., de Freitas E. D., The relationship between South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning, *Climate Dynamics*, 2014, vol. 42, p. 3077
- Kasahara A., Silva Dias P. L., Response of Planetary Waves to Stationary Tropical Heating in a Global Atmosphere with Meridional and Vertical Shear, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, vol. 43, p. 1893
- Kiladis G. N., Observations of Rossby Waves Linked to Convection over the Eastern Tropical Pacific, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, vol. 55, p. 321
- Kiladis G. N., Weickmann K. M., Horizontal Structure and Seasonality of Large-Scale Circulations Associated with Submonthly Tropical Convection, *Monthly Weather Review*, 1997, vol. 125, p. 1997
- Kiladis G. N., Wheeler M. C., Haertel P. T., Straub K. H., Roundy P. E., Convectively coupled equatorial waves, *Reviews of Geophysics*, 2009, vol. 47
- Kodama Y.-M., Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1992, vol. 70, p. 813
- Kodama Y.-M., Large-Scale Common Features of Sub-Tropical Convergence Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II : Conditions of the Circulations for Generating the STCZs, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1993, vol. 71, p. 581
- Kousky V. E., Gan M. A., Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic, *Tellus*, 1981, vol. 33, p. 538
- Lee S.-K., Wang C., Mapes B. E., A Simple Atmospheric Model of the Local and Teleconnection Responses to Tropical Heating Anomalies, *Journal of Climate*, 2009, vol. 22, p. 272
- Leroux S., Hall N. M. J., On the Relationship between African Easterly Waves and the African Easterly Jet, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, vol. 66, p. 2303
- Leroux S., Hall N. M. J., Kiladis G. N., Intermittent African Easterly Wave Activity in a Dry Atmospheric Model: Influence of the Extratropics, *Journal of Climate*, 2011, vol. 24, p. 5378



- Li Y., Feng J., Li J., Hu A., Equatorial Windows and Barriers for Stationary Rossby Wave Propagation, *Journal of Climate*, 2019, vol. 32, p. 6117
- Li Y., Li J., Jin F. F., Zhao S., Interhemispheric Propagation of Stationary Rossby Waves in a Horizontally Nonuniform Background Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, vol. 72, p. 3233
- Liebmann B., Kiladis G. N., Marengo J., Ambrizzi T., Glick J. D., Submonthly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone, *Journal of Climate*, 1999, vol. 12, p. 1877
- Liebmann B., Smith C. A., Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, vol. 77, p. 1275
- Lighthill J., *Waves in fluids*, 1978
- Lin Z., The South Atlantic–South Indian Ocean Pattern: a Zonally Oriented Teleconnection along the Southern Hemisphere Westerly Jet in Austral Summer, *Atmosphere*, 2019, vol. 10
- Lorenz E. N., *Empirical Orthogonal Functions and statistical weather prediction*, 1956
- Lyra M. J. A., Arraut J. M., Análise Termodinâmica de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil, *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 2020, vol. 43, p. 302
- Magaña V., Ambrizzi T., Dynamics of subtropical vertical motions over the Americas during El Niño boreal winters, *Atmósfera*, 2005, vol. 18, p. 211
- Matsuno T., Quasi-Geostrophic motions in the equatorial area, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1966, vol. 44, p. 25
- Matthews A. J., A multiscale framework for the origin and variability of the South Pacific Convergence Zone, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, vol. 138, p. 1165
- Ministério de Minas e Energia, 2020 Technical report Balanço Energético Nacional
- Mishra S. K., Rao V. B., Gan M. A., Structure and Evolution of the Large-Scale Flow and an Embedded UpperTropospheric Cyclonic Vortex Over Northeast Brazil, *Monthly Weather Review*, 2001, vol. 129, p. 1673

- Mo K. C., Higgins R. W., The Pacific–South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter, *Monthly Weather Review*, 1998, vol. 126, p. 1581
- Nascimento E. d. L., Ambrizzi T., The Influence of Atmospheric Blocking on the Rossby Wave Propagation in Southern Hemisphere Winter Flows, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2002, vol. 80, p. 139
- Nie Y., Zhang Y., Yang X.-Q., Ren H.-L., Winter and Summer Rossby Wave Sources in the CMIP5 Models, *Earth and Space Science*, 2019, vol. 6, p. 1831
- Nielsen D., Belém A., Marton E., Cataldi M., Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone, *Clim Dyn*, 2019, vol. 52, p. 5527–5553
- Ninomiya K., Similarity and Difference between the South Atlantic Convergence Zone and the Baiu Frontal Zone Simulated by an AGCM, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2007, vol. 85, p. 277
- Nogués-Paegle J., Mo K. C., Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer, *Monthly Weather Review*, 1997, vol. 125, p. 279
- Palmer C. E., On high[U+2010]level cyclones originating in the tropics, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1951, vol. 32, p. 683
- Rao V. B., Bonatti J. P., On the origin of upper tropospheric cyclonic vortices in the South Atlantic Ocean and adjoining Brazil during the summer, *Meteor. Atmos. Phys*, 1987, vol. 37, p. 11
- Rehbein A., Ambrizzi T., Ibarra-Espinosa S., Dutra L. M. M., , 2020 raytracing: An R package for identification and tracking the atmospheric Rossby waves
- Repinaldo H. F. B., Fedorova N., Levit V., Repinaldo C. R. R., Upper Tropospheric Cyclonic Vortex and Brazilian Northeast Jet Stream over Alagoas State: Circulation Patterns and Rainfall, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2020, vol. 35, p. 745
- Risbey J. S., O’Kane T. J., Monselesan D. P., Franzke C. L. E., Horenko I., On the Dynamics of Austral Heat Waves, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, p. 38
- Rosa E. B., Pezzi L., Quadro M., Brunsell N., Automated Detection Algorithm for SACZ, Oceanic SACZ, and Their Climatological Features, 2020, vol. 8, p. 1

- Rossby C. G., Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of action, *JOURNAL OF MARINE RESEARCH*, 1939, vol. 2, p. 38
- Sardeshmukh P. D., Hoskins B. J., The Generation of Global Rotational Flow by Steady Idealized Tropical Divergence., *Journal of Atmospheric Sciences*, 1988, vol. 45, p. 1228
- Sena A. C. T., Padrões de Larga Escala Associados a Eventos Extremos de Precipitação em São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo - USP, 2016, Tese de Doutorado
- Silva J., Reboita M., G.C.J. E., Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Campos Atmosféricos Recentes, *Revista Brasileira de Climatologia*, 2019, vol. 25, p. 355–377
- Takaya K., Nakamura H., A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, vol. 58, p. 608
- Tomas R. A., Webster P. J., Horizontal and Vertical Structure of Cross-Equatorial Wave Propagation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1994, vol. 51, p. 1417
- Valverde Ramírez M. C., Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no nordeste do Brasil., Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, 1996, Tese de Doutorado
- Valverde Ramírez M. C., Kayano M. T., Ferreira N. J., Statistical analysis of upper-tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989, *Atmosfera*, 1999, vol. 12, p. 75
- Valverde Ramírez M. C., Kayano M. T., Ferreira N. J., Padrão de verão: ZCAS-VCAN atuando sobre a região sudeste do Brasil, *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2004, pp 1–20
- Van Der Wiel K., Matthews A. J., Stevens D. P., Joshi M. M., A dynamical framework for the origin of the diagonal South Pacific and South Atlantic Convergence Zones, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, vol. 141, p. 1997
- Vincent E., Lengaigne M. M., C.E. et al. Interannual variability of the South Pacific Convergence Zone and implications for tropical cyclone genesis., *Clim Dyn*, 2009, vol. 36, p. 1881–1896

- Wallace J. M., Kousky V. E., Observational Evidence of Kelvin Waves in the Tropical Stratosphere, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1968, vol. 25, p. 900
- Webster P. J., Holton J. R., Cross-Equatorial Response to Middle-Latitude Forcing in a Zonally Varying Basic State, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1982, vol. 39, p. 722
- Whitham G. B., A note on group velocity, *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, vol. 9, p. 347–352
- Wilks D. S., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press: New York, 2006, 627
- Wirth V., Riemer M., Chang E. K. M., Martius O., Rossby Wave Packets on the Midlatitude Waveguide—A Review, *Monthly Weather Review*, 2018, vol. 146, p. 1965
- Wu Z., Lin H., Interdecadal variability of the ENSO–North Atlantic Oscillation connection in boreal summer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, vol. 138, p. 1668
- Wu Z., Zhang P., Interdecadal variability of the mega-ENSO–NAO synchronization in winter, *Climate Dynamics*, 2015, vol. 45, p. 1117
- Yanai M., Maruyama T., Stratospheric Wave Disturbances Propagating over the Equatorial Pacific, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1966, vol. 44, p. 291
- Yu B., Lin H., Tropical/extratropical forcing on wintertime variability of the extratropical temperature and circulation, *Climate Dynamics*, 2013, vol. 40, p. 1183

# Apêndice



## Apêndice A

---

### Correlação da Caracterização ZCAS

#### A.1 Correlação com o Índice ZCAS de Nielsen et al. 2019

Aqui estão presentes as análises de correlação entre caracterização feita por Braga e Ambrizzi com os índices referentes aos episódios de ZCAS com base na climanálise feitos por Nielsen DM et al. (2019) Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. *Clim Dyn* 52, 5527–5553. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4460-4>. Nielsen separou as ZCAS entre posicionamento AB,C e DE, onde as ZCAS AB seriam as ZCAS mais ao norte, C referentes as ZCAS numa posição media entre o Sudeste e Minas e DE os episódios de ZCAS mais ao sul.

	North (AB)	Mean (C)	South (DE)
All	0.7	0.57	0.2
El Nino	0.68	0.56	0.26
La Nina	0.68	0.52	0.08
Neutral	0.73	0.62	0.27

*Figura A.1:* Correlação entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen, 2019 durante eventos de ENOS.

	<b>North (AB)</b>	<b>Mean (C)</b>	<b>South (DE)</b>
<b>Nov</b>	0.71	0.56	0.27
<b>Dec</b>	0.73	0.57	0.24
<b>Jan</b>	0.73	0.68	0.29
<b>Feb</b>	0.65	0.55	0.16
<b>Mar</b>	0.68	0.56	0.22

*Figura A.2:* Correlação mensal entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen, 2019



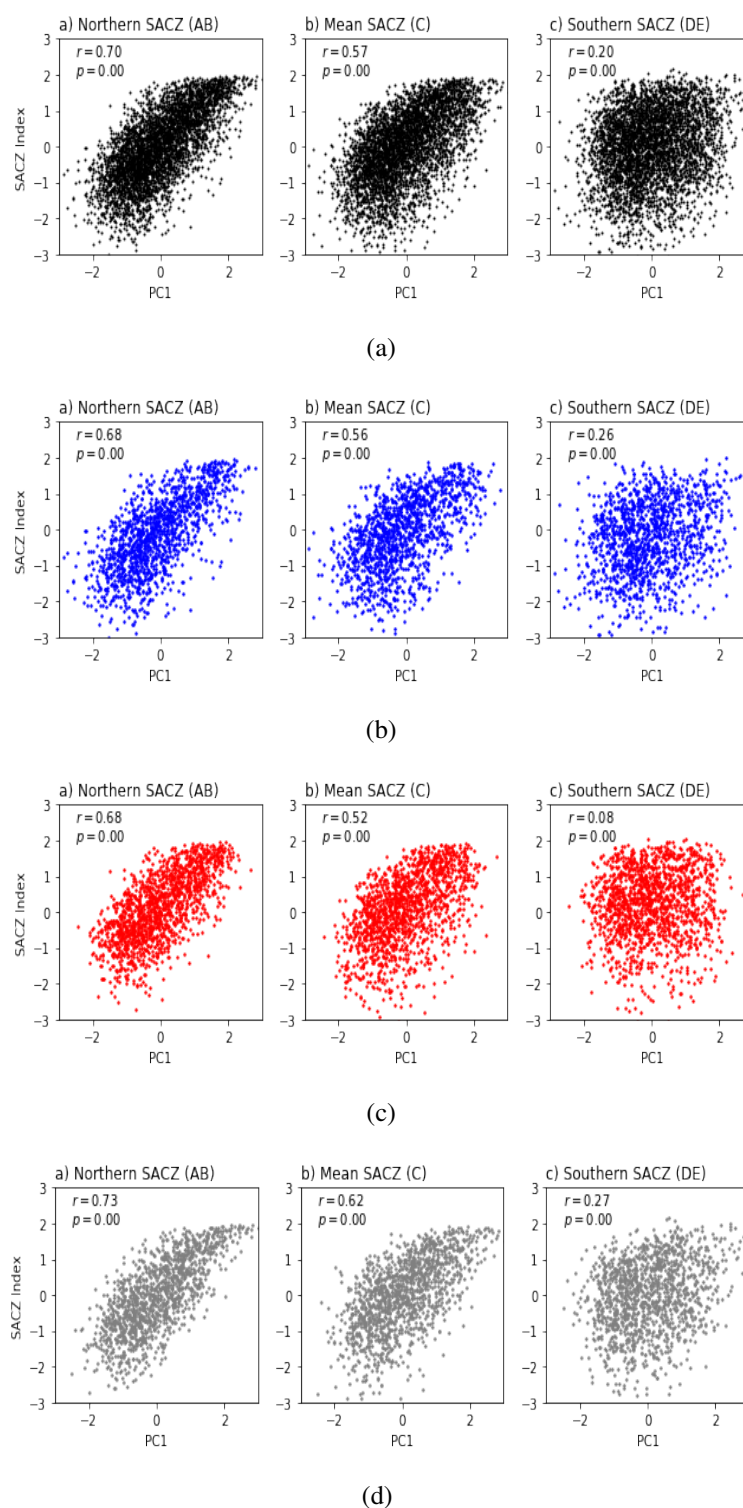


Figura A.3: Correlação mensal entre os episódios de ZCAS caracterizados por Braga e Ambrizzi com os de Nielsen; a) todos os dias, b) Episódios de El Niño, c) Episódios de La Niña, d) Episódios Neutros.

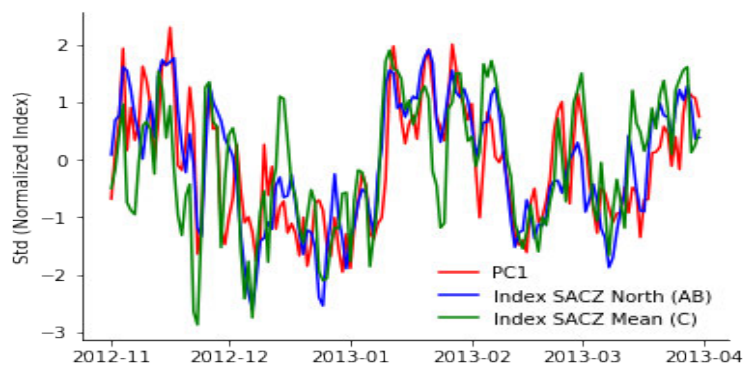


Figura A.4: Series temporais da PC 1 de Braga e Ambrizzi e dos Índices ZCAS norte e ZCAS média de Nielsen, durante o período o verão 2012-2013,

## Apêndice B

# Estrutura Média dos Episódios de ZCAS

### B.1 Radiação de Onda Longa Emergente

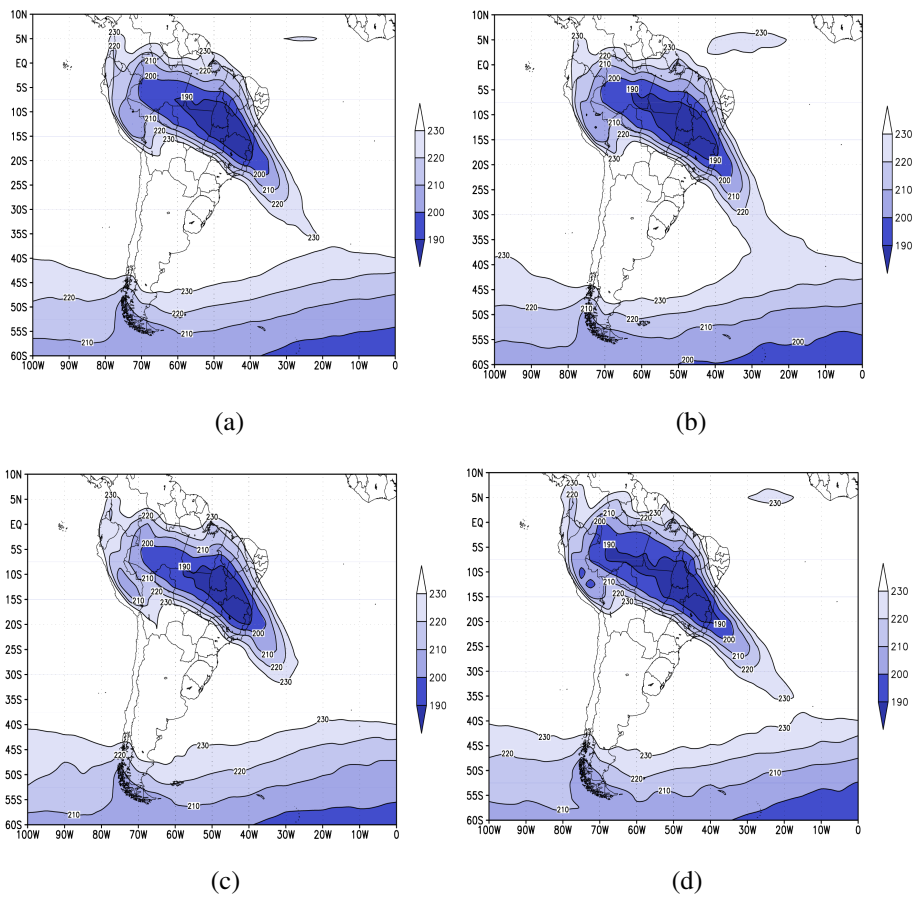


Figura B.1: Composição média da Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE) dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña.

## B.2 Umidade Específica - 850 hPa

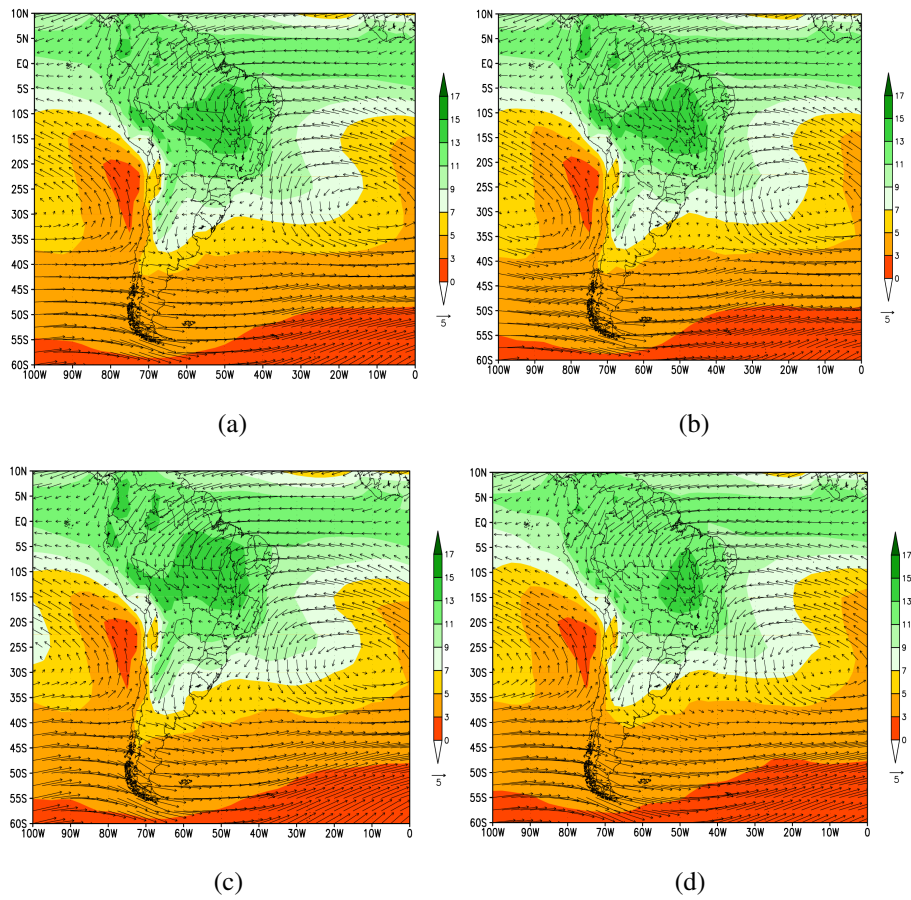


Figura B.2: Composição média da Umidade Específica (g/kg) e vetores do vento (m/s) no nível de 850 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña.

### B.3 Altura Geopotencial e Ômega - 500 hPa

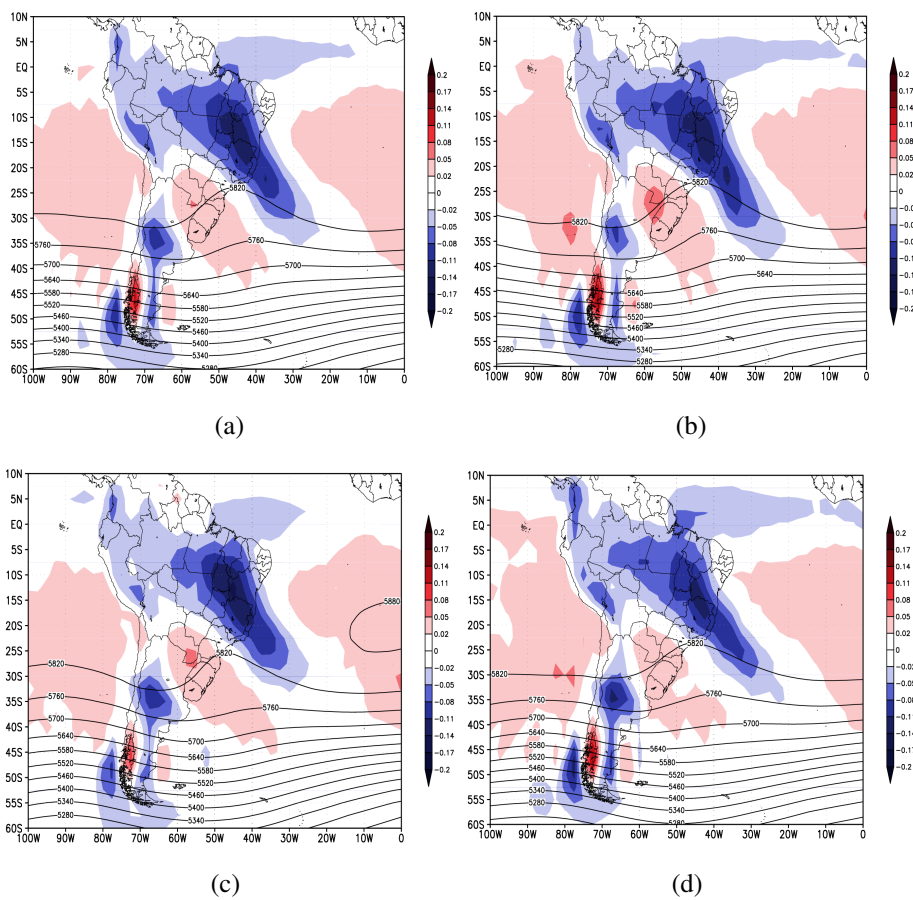


Figura B.3: Composição média da Altura Geopotencial (m) e Omega(pa/s) em 500 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña.

### B.4 Divergência e U;V - 200 hPa

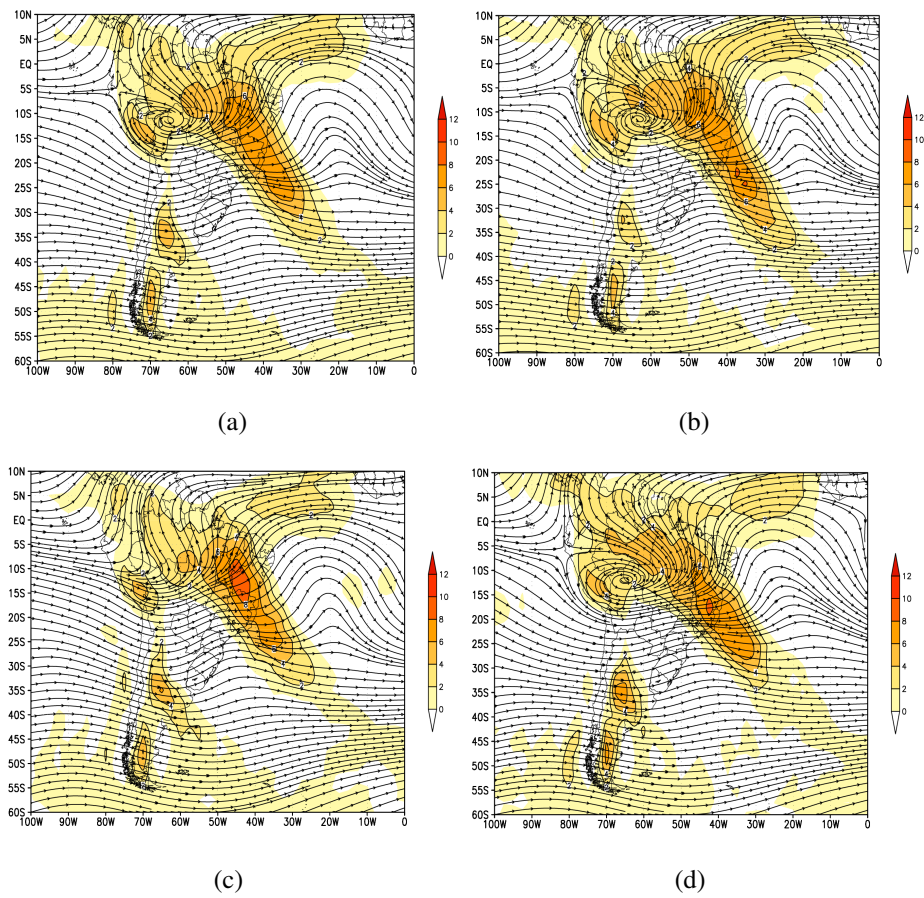


Figura B.4: Composição média da Divergência ( $10^6 s^{-1}$ ) e vetores do vento ( $m/s$ ) em 200 hPa, dos episódios de ZCAS; a) Climatológicos, b) Neutros, c) El Niño, d) La Niña

### B.5 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ ) - Domínio Oceano Pacífico Sul

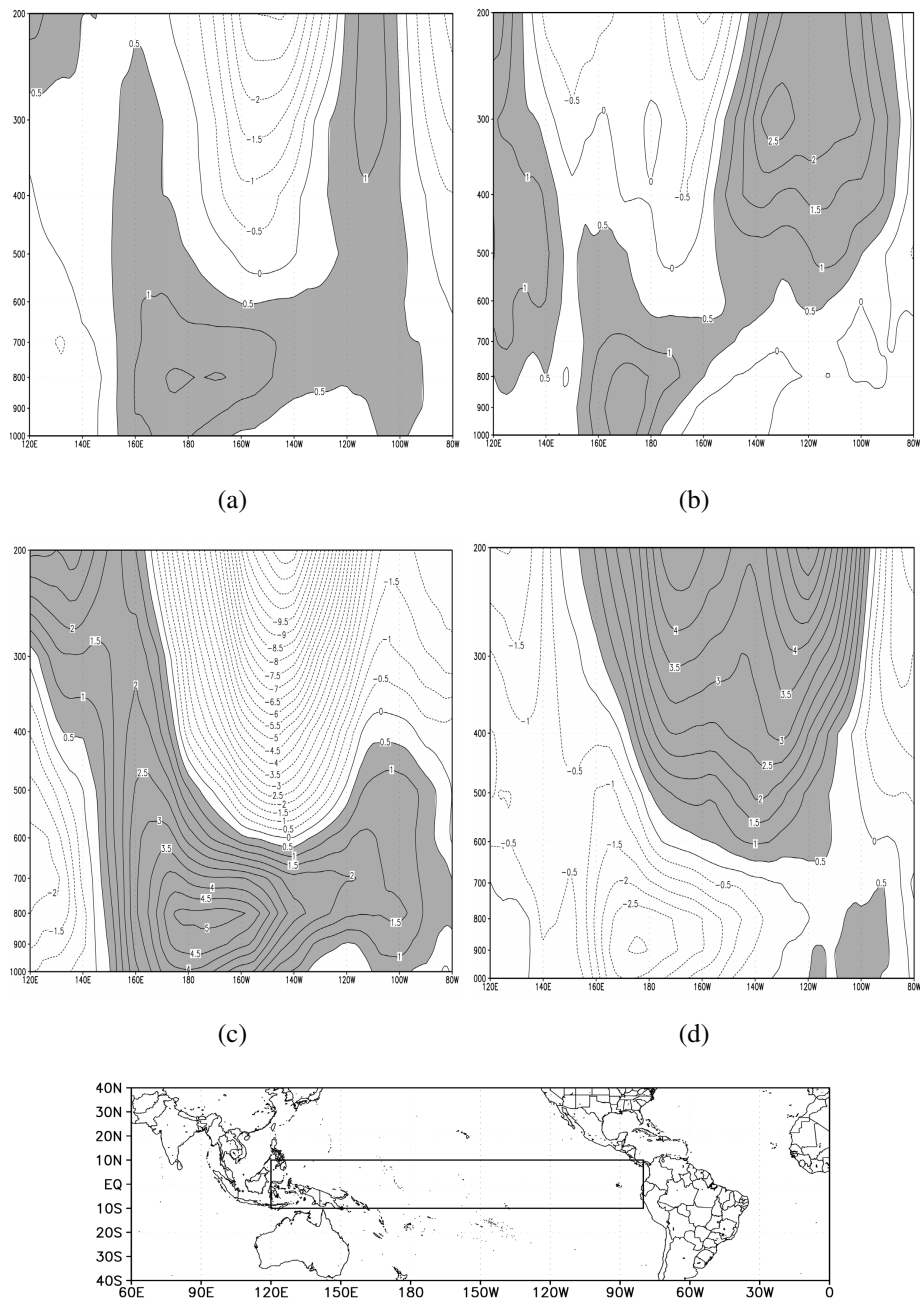


Figura B.5: Perfil Vertical do vento zonal anômalo no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) dos compostos de: a) Todas as ZCAS, b) ZCAS Neutra, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Em cinza escoamentos de oeste anômalo.





## Apêndice C

---

# Anomalias de ROLE filtrados e não filtrados - América do Sul

### C.1 Composição Climatológica

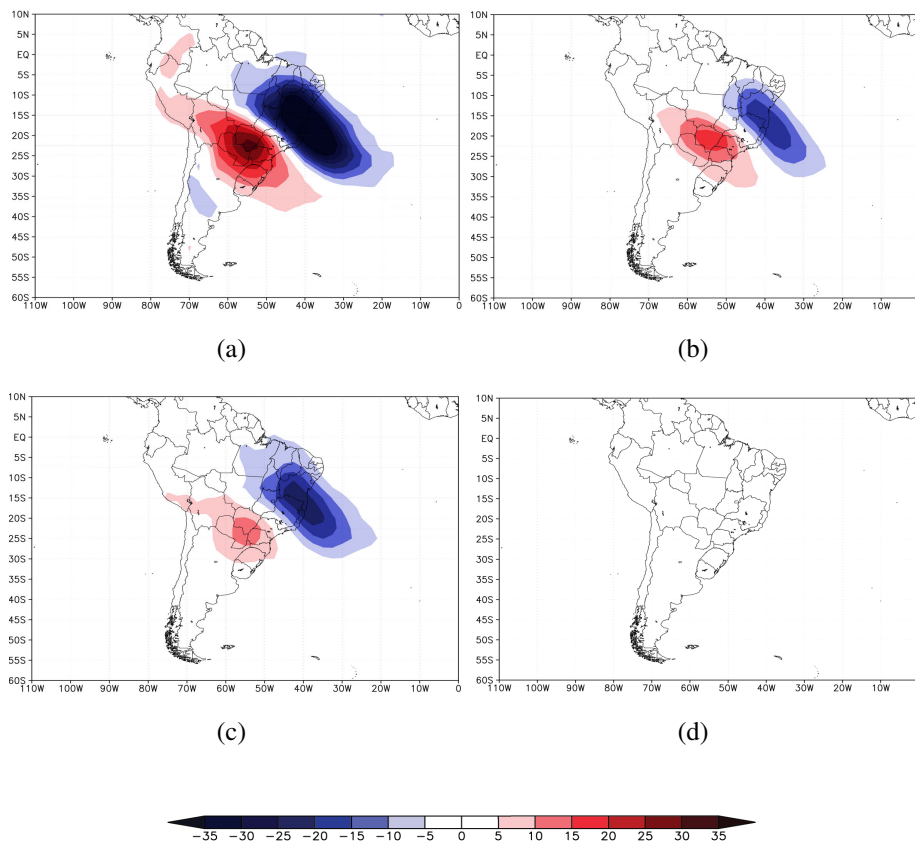


Figura C.1: Composição média da anomalia de ROLE de todos episódios de ZCAS. a) não filtrado, b) filtrado na banda 06-25 dias, c) filtrado na banda 20-90 dias, d) filtrado na banda 200 dias passa-baixa.

## C.2 Neutro, El Niño e La Niña

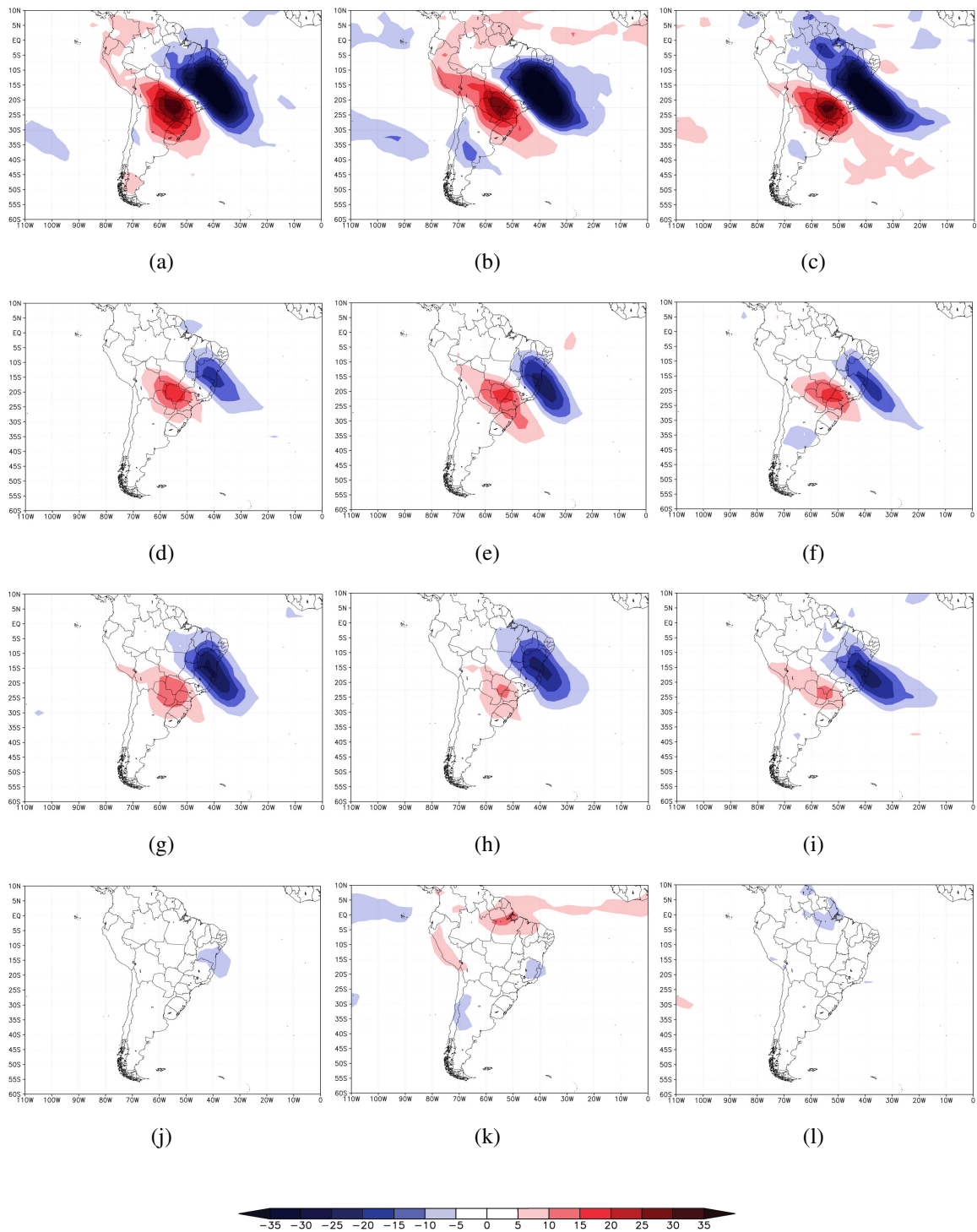


Figura C.2: Composição média da anomalia de ROLE dos episódios de ZCAS que ocorreram durante anos de ; a) Neutro, b) El Niño, c) La Niña. Filtradas na banda 06-25 dias; d) Neutro, e) El Niño, f) La Niña. 20-90 dias; g) Neutro, h) El Niño, i) La Niña. 200 dias passa-baixa. j) Neutro, k) El Niño, l) La Niña.

# Apêndice D

## Episódios Interhemisféricos

### D.1 Caso - 04 Janeiro de 2009 - América do Sul

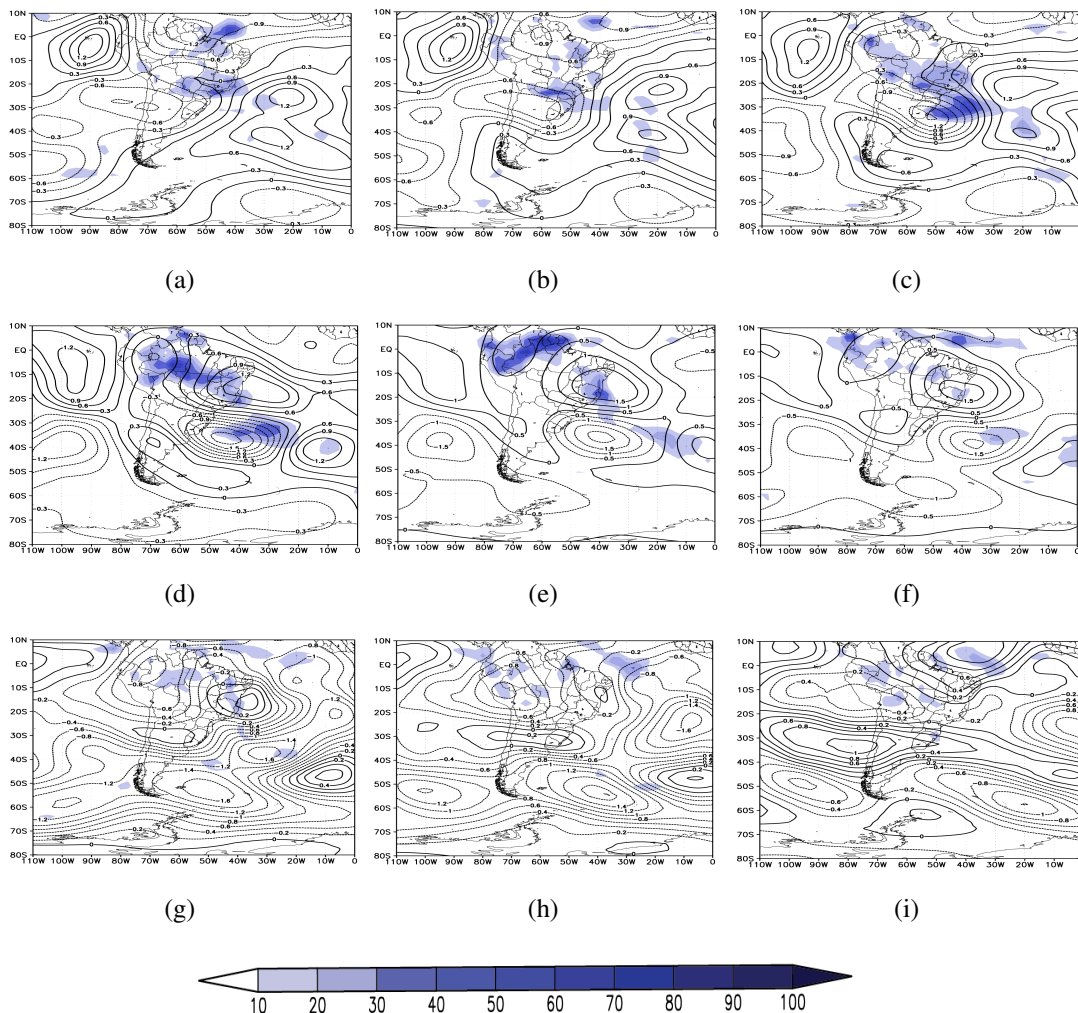


Figura D.1: Evolução diária precipitação diária do episódio de ZCAS do dia 04 de Janeiro das variáveis de precipitação acumulada do GPCP e ( $\psi \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ). a) 1 jan, b) 2 jan, c) 3 jan, d) 4 jan, e) 5 jan, f) 6 jan, g) 7 jan, h) 8 jan, i) 9 jan.

## D.1.1 Filtrado na Banda 06-25 dias

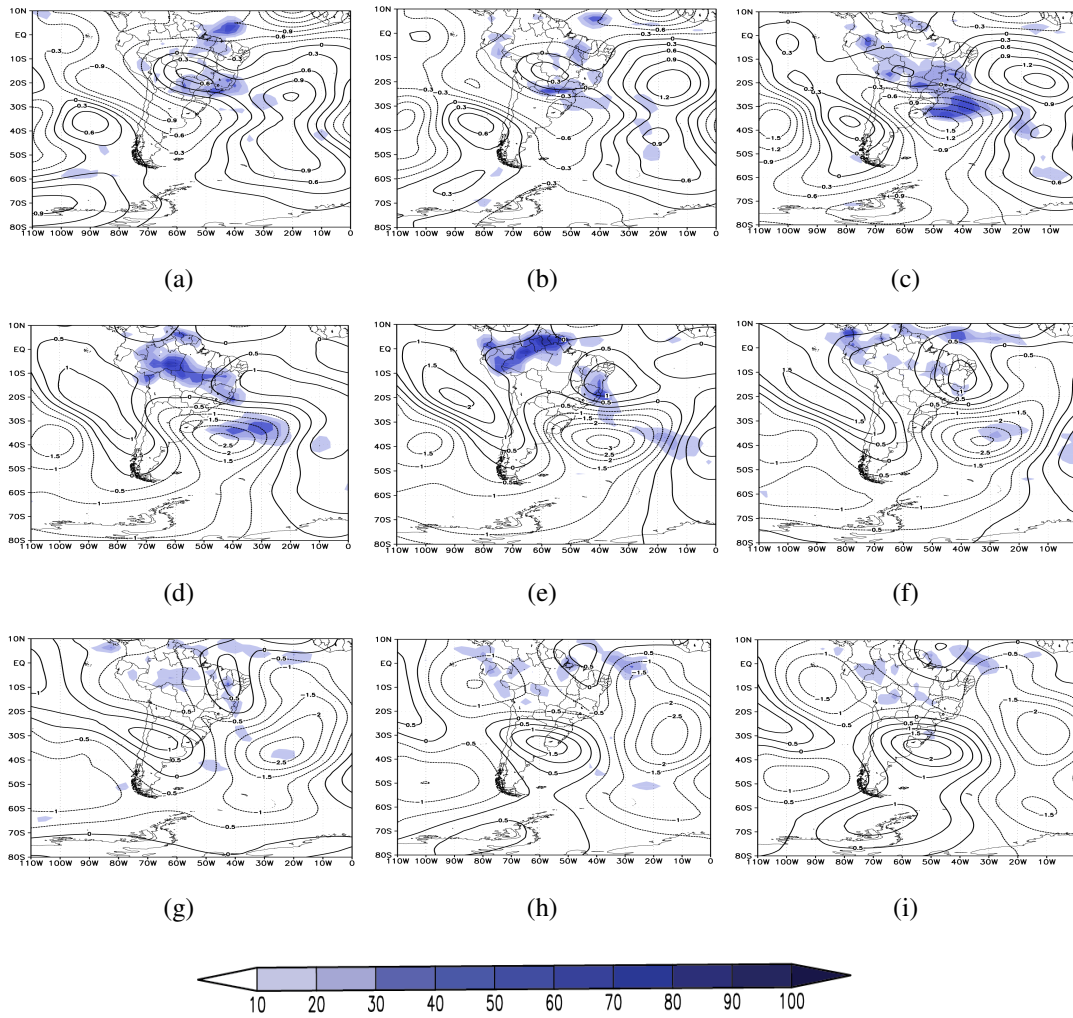


Figura D.2: Mesmo que figura x, mas filtrado na banda 06-25 dias.

## D.2 Caso - 04 Janeiro de 2009

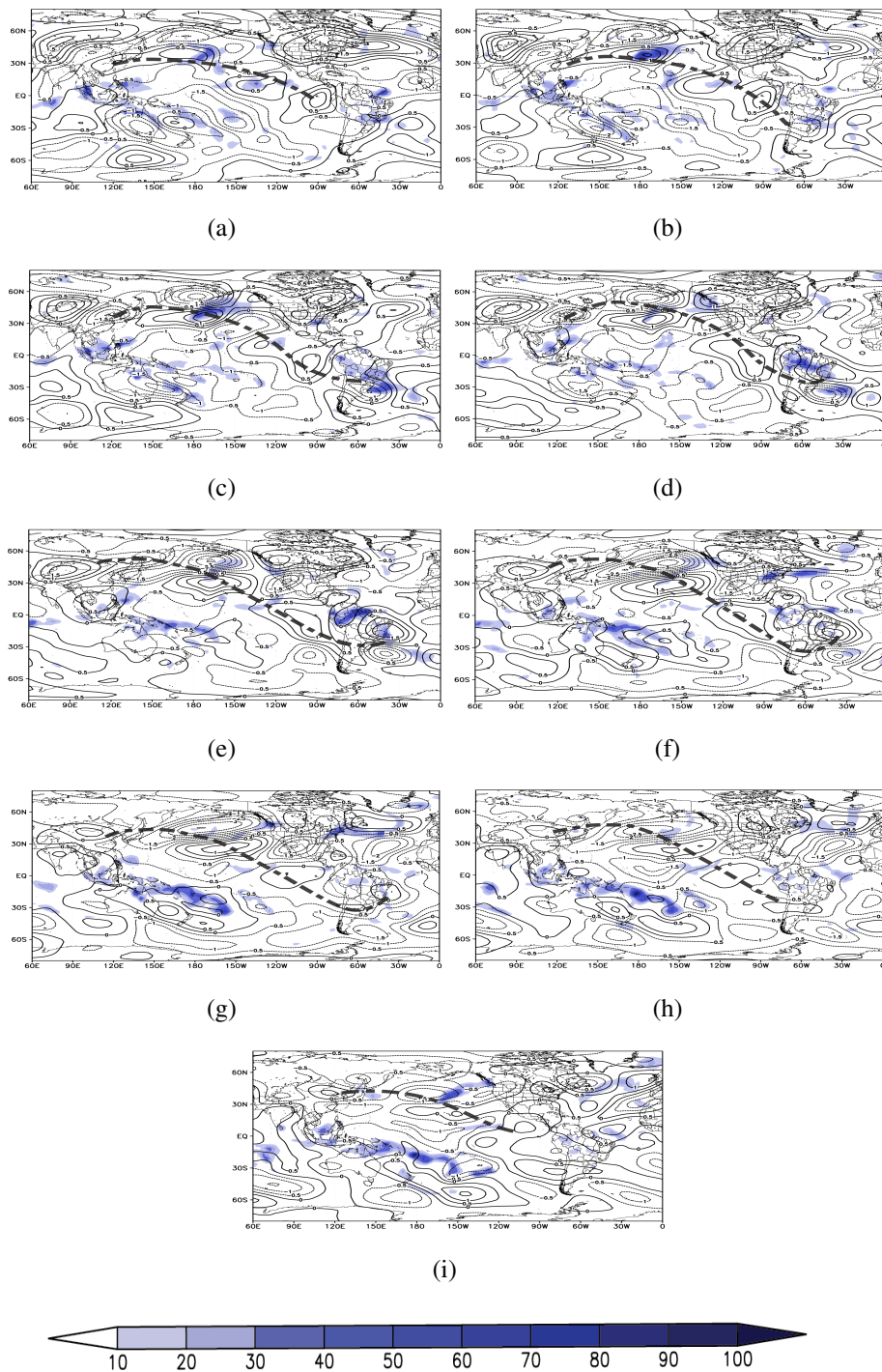


Figura D.3: Evolução diária precipitação diária do episódio de ZCAS do dia 04 de Janeiro das variáveis de precipitação acumulada do GPCP e ( $\psi \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ). a) 1 jan, b) 2 jan, c) 3 jan, d) 4 jan, e) 5 jan, f) 6 jan, g) 7 jan, h) 8 jan, i) 9 jan.



## D.2.1 Filtrado na Banda 06-25 dias

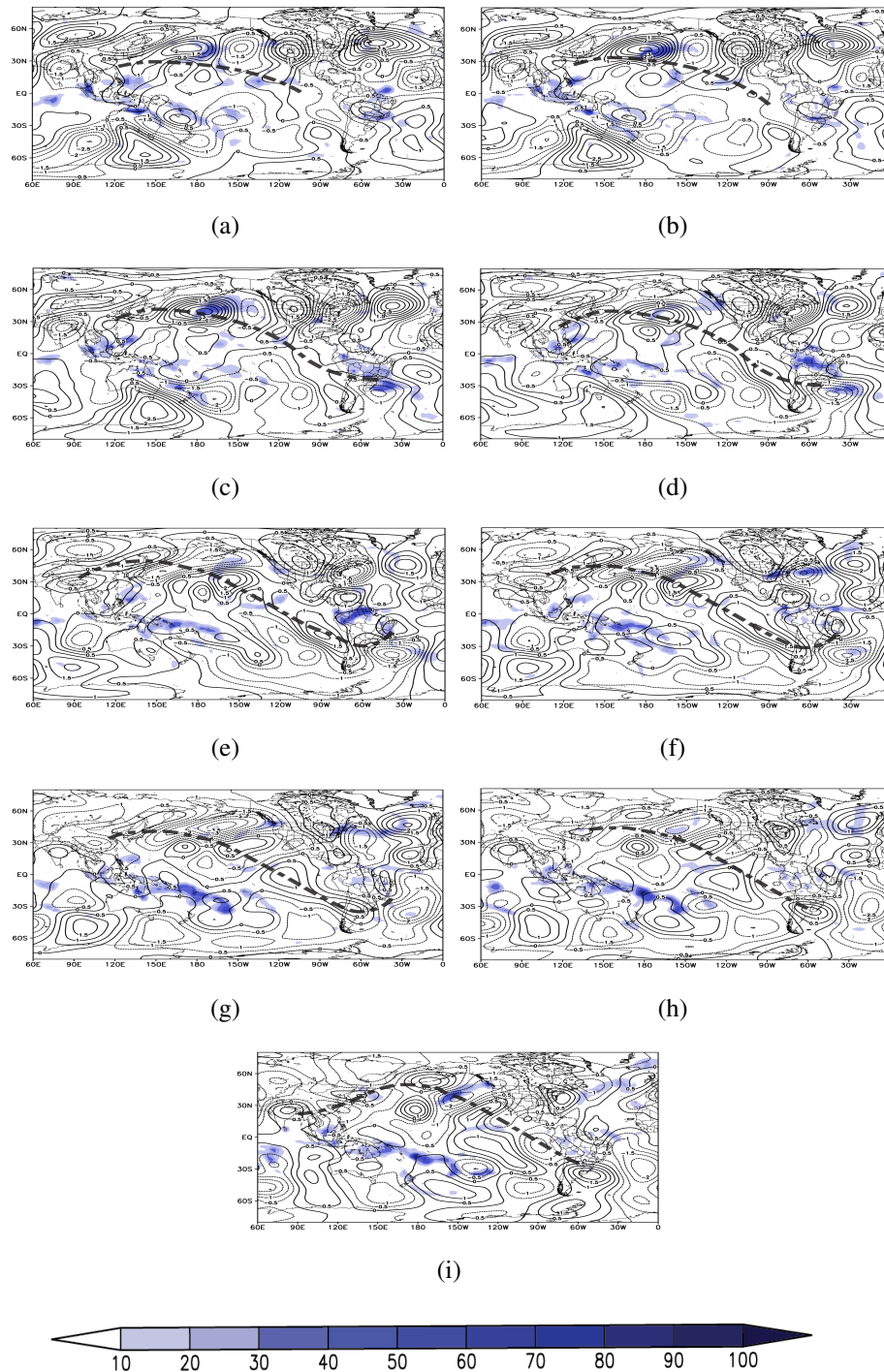


Figura D.4: Mesmo que figura x, mas filtrado na banda 06-25 dias.

# Apêndice E

---

## Todas Simulações

### E.1 RWS - Sudeste Asiático

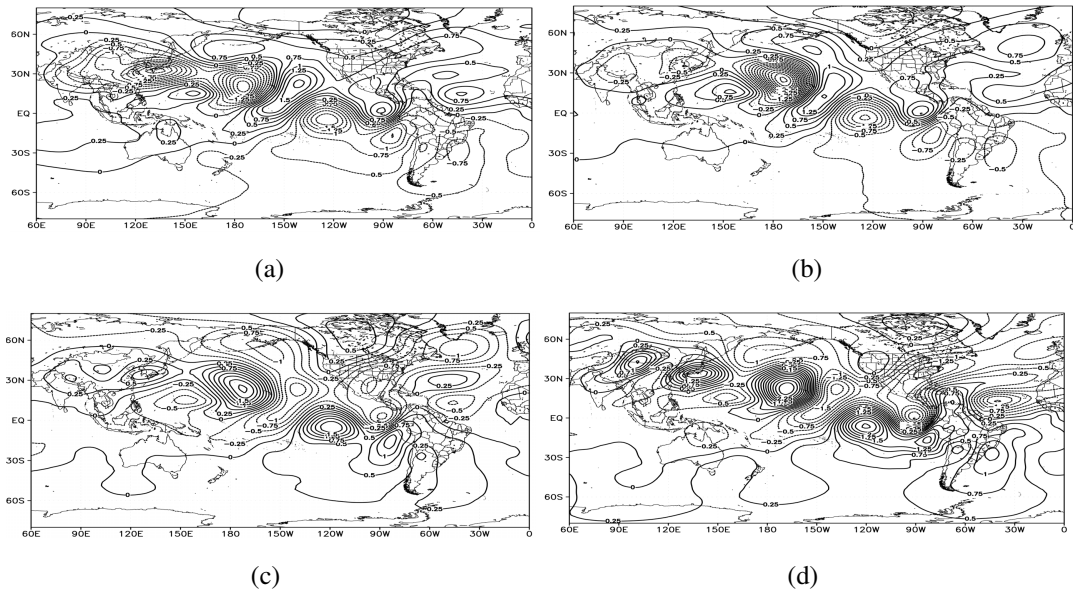


Figura E.1: Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 1988-89 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19.

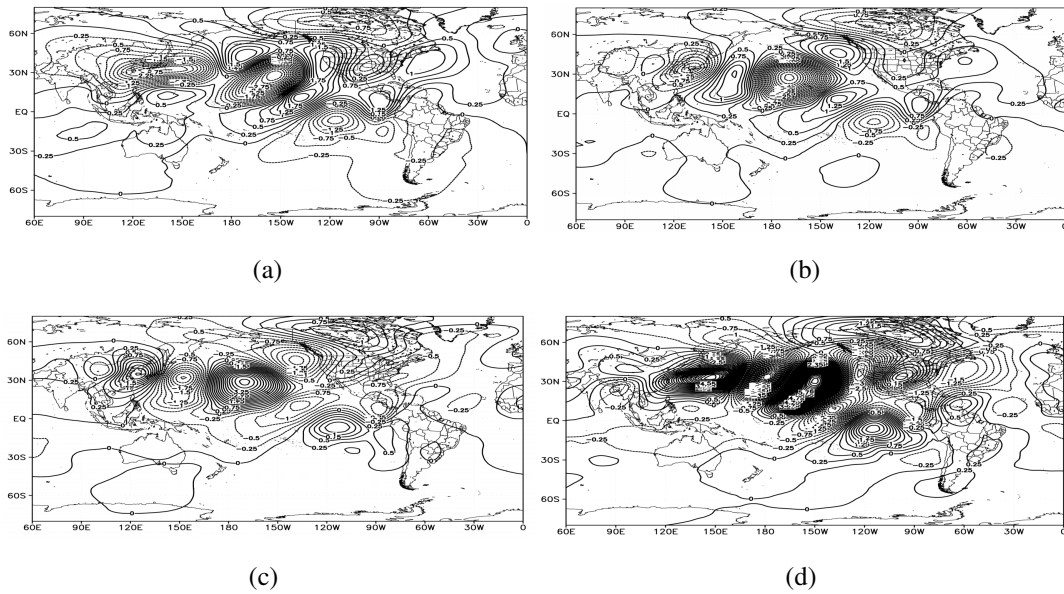


Figura E.2: Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 1999-00 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19.

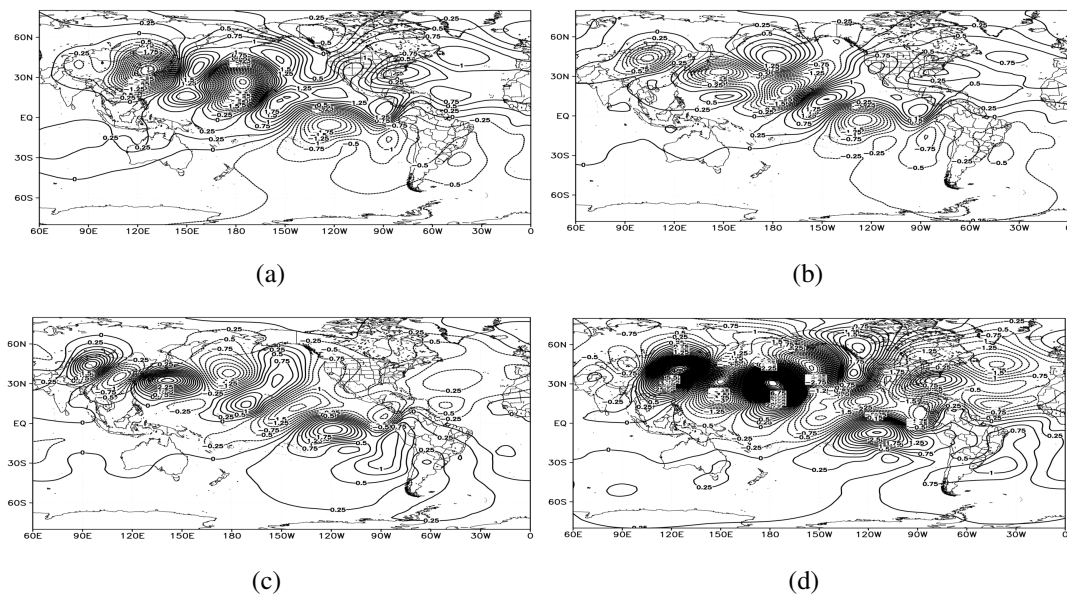


Figura E.3: Rossby Wave Source durante o Estado Básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 5, c) dia 15, d) dia 19.



## E.2 ZCPS como fonte de ondas de Rossby

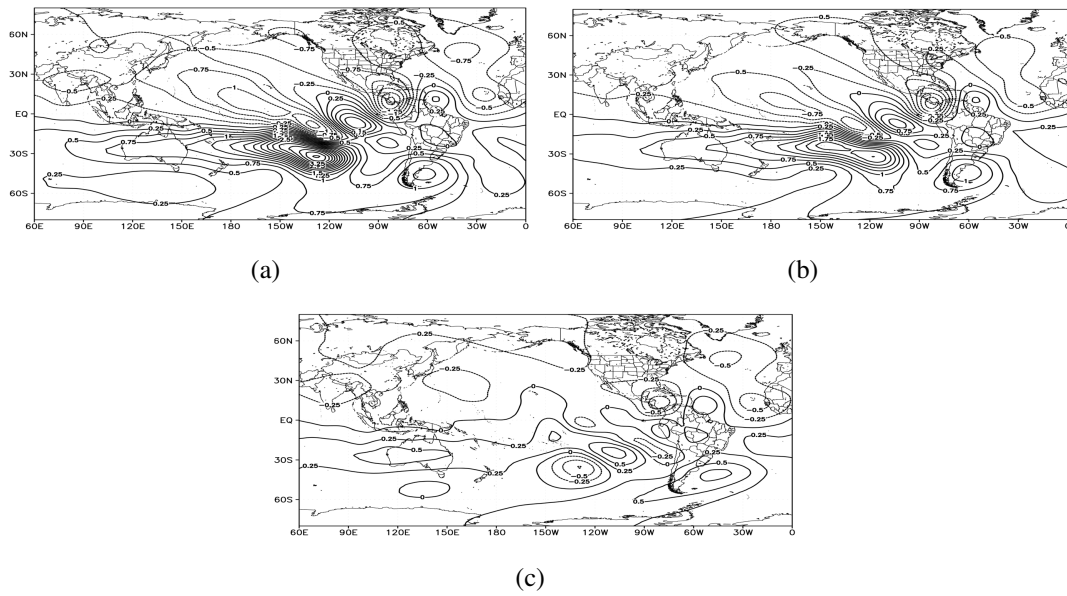


Figura E.4: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Neutro 1992-93 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

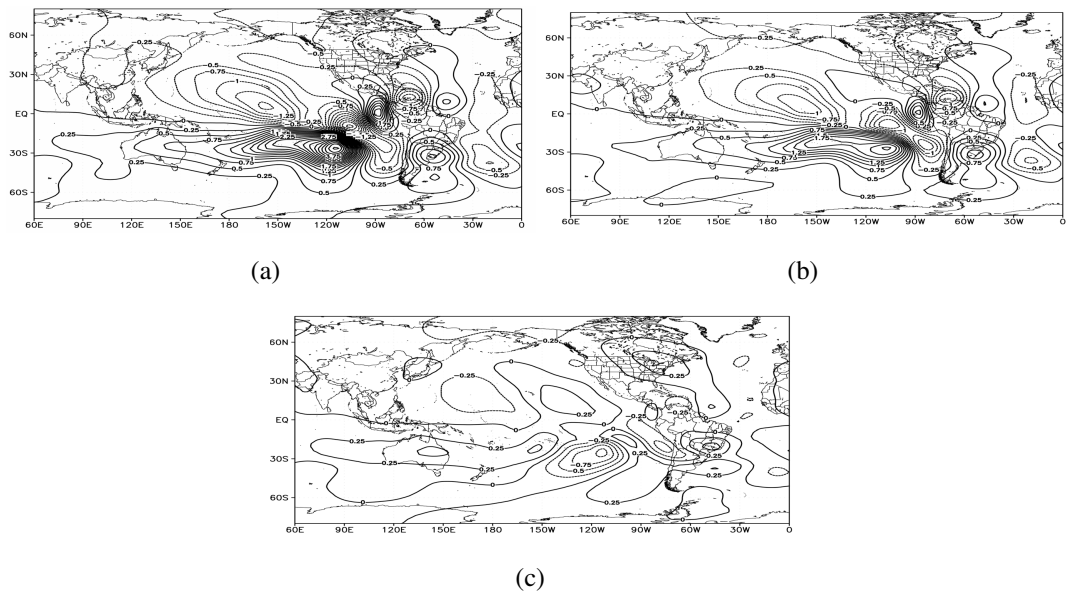


Figura E.5: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño Moderado 2002-03 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

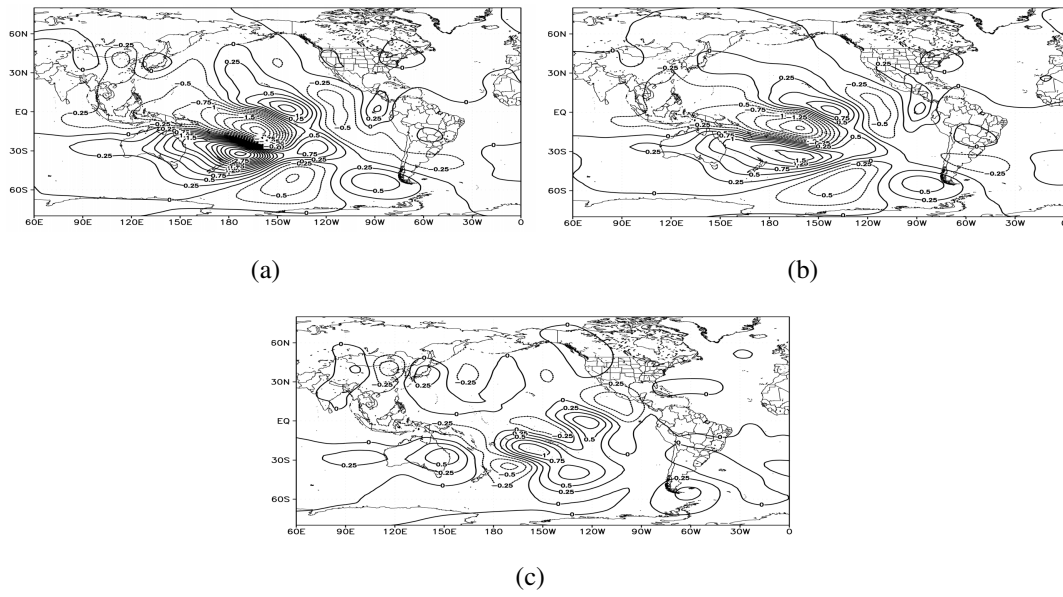


Figura E.6: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña Moderada 2005-06 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

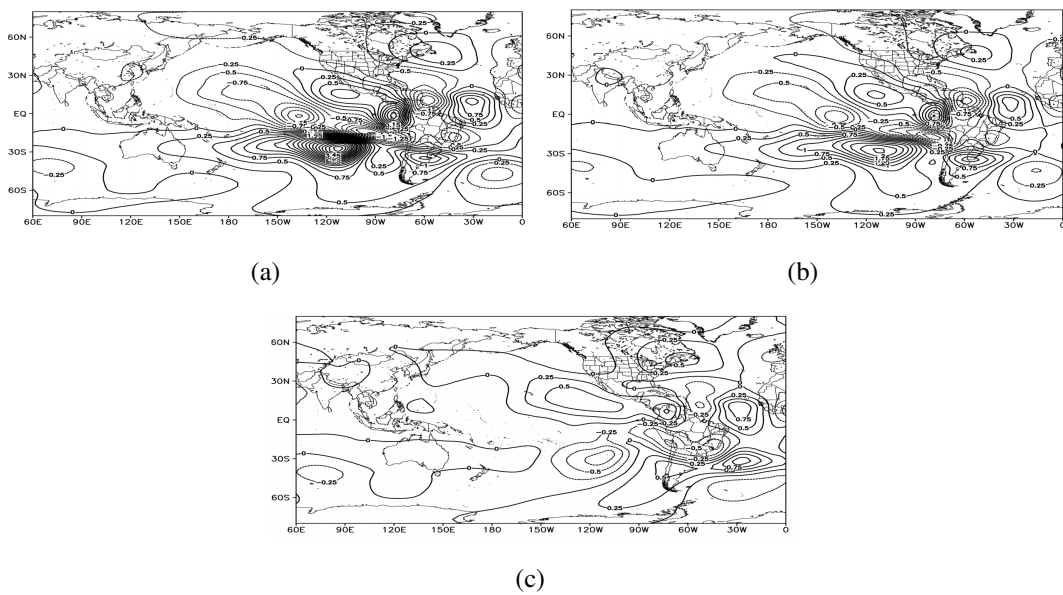


Figura E.7: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño 2015-16 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

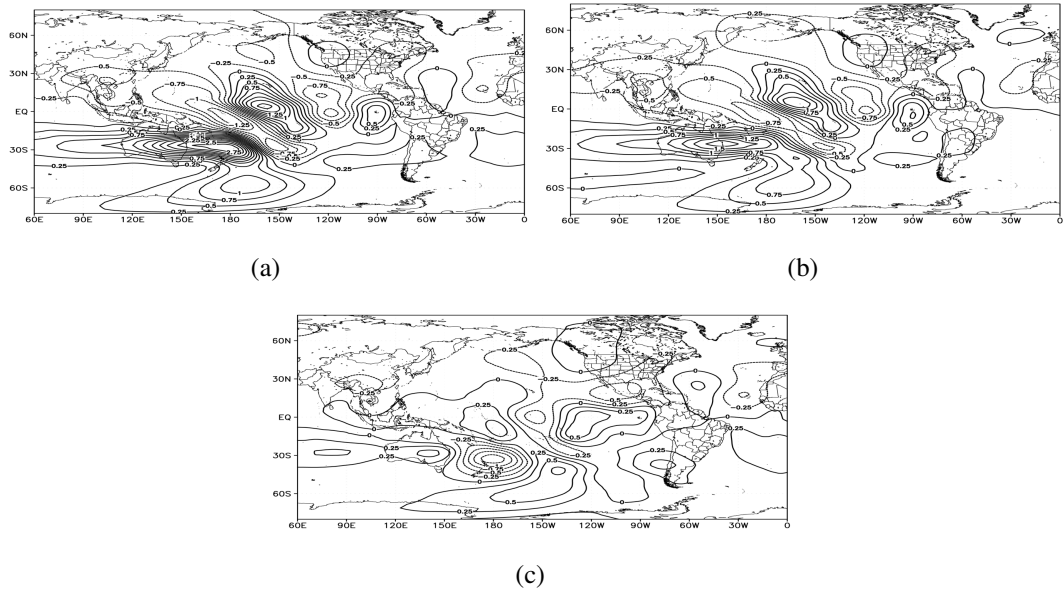


Figura E.8: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1989-99 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
 a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

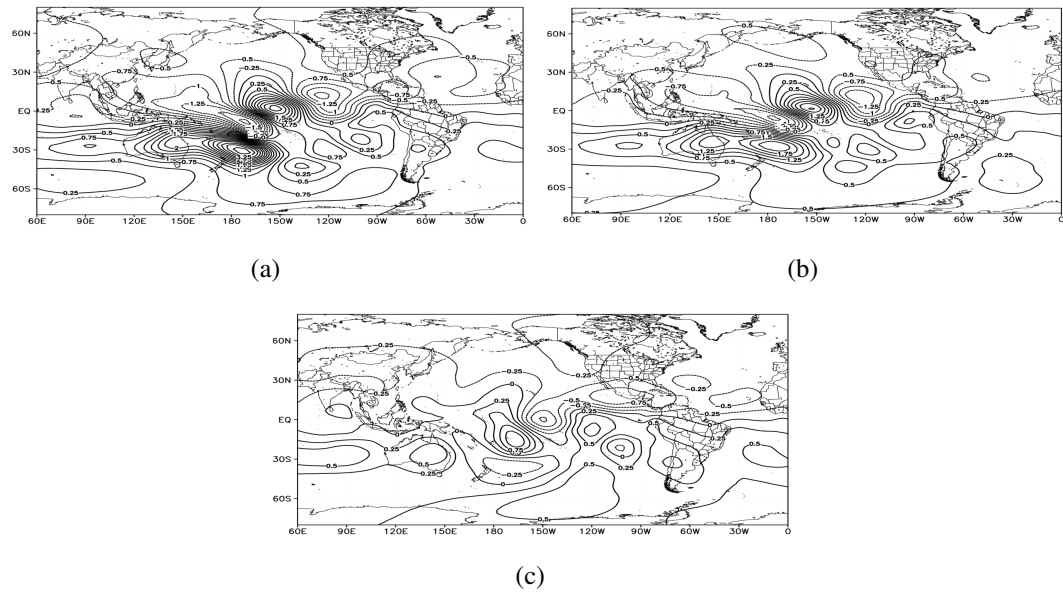


Figura E.9: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1999-00 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
 a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

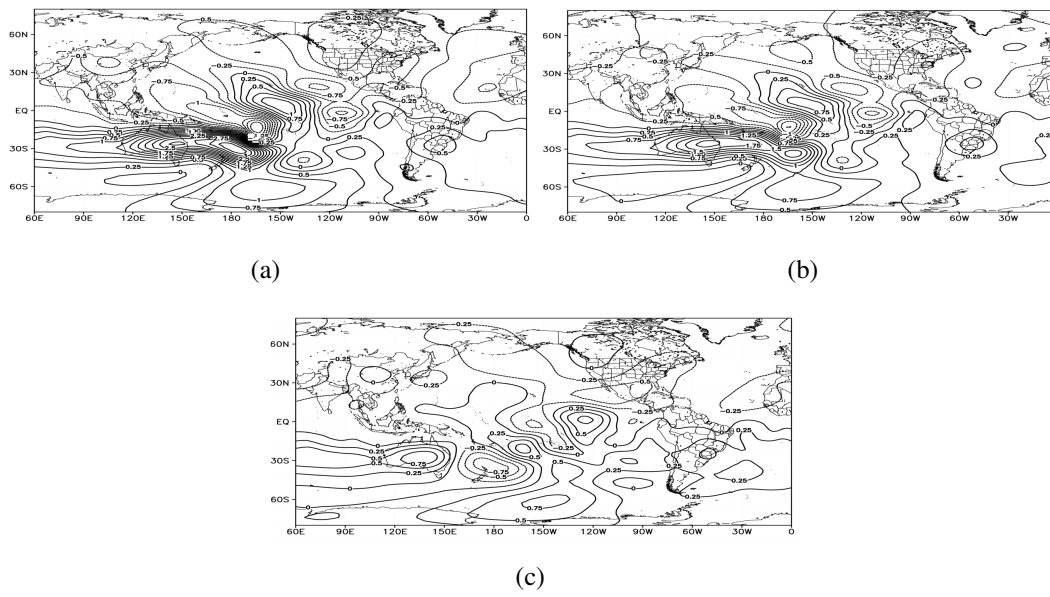


Figura E.10: ZCPS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,25 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8.

### E.3 ZCAS como fonte de ondas de Rossby

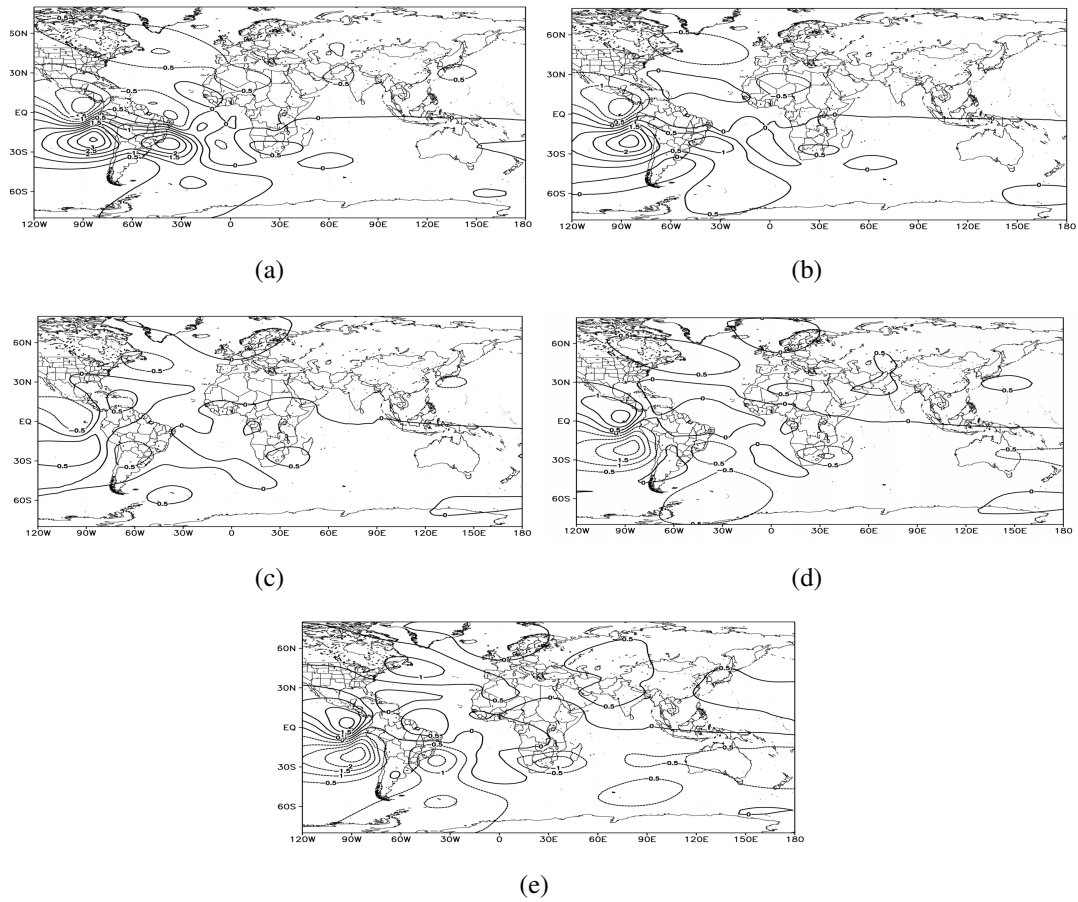


Figura E.11: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Climatológico 1979-16 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.

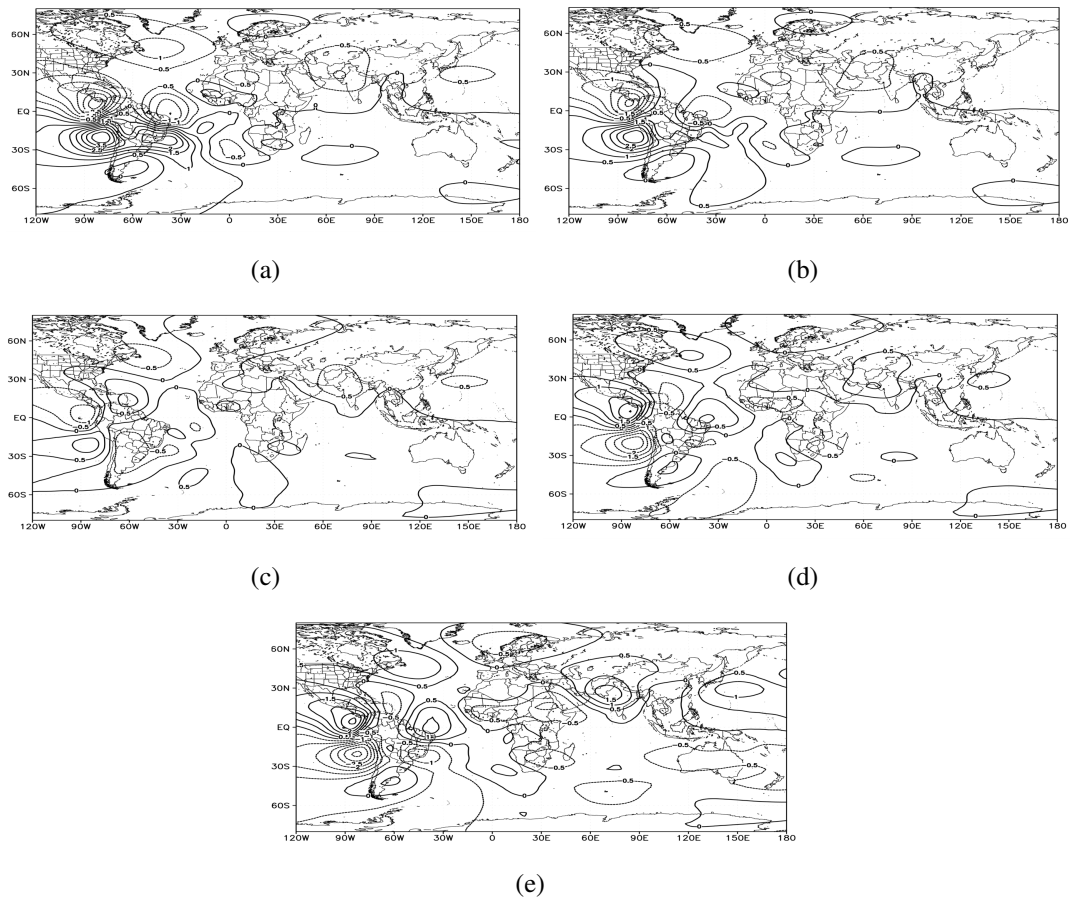


Figura E.12: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico Neutro 1992-93 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.

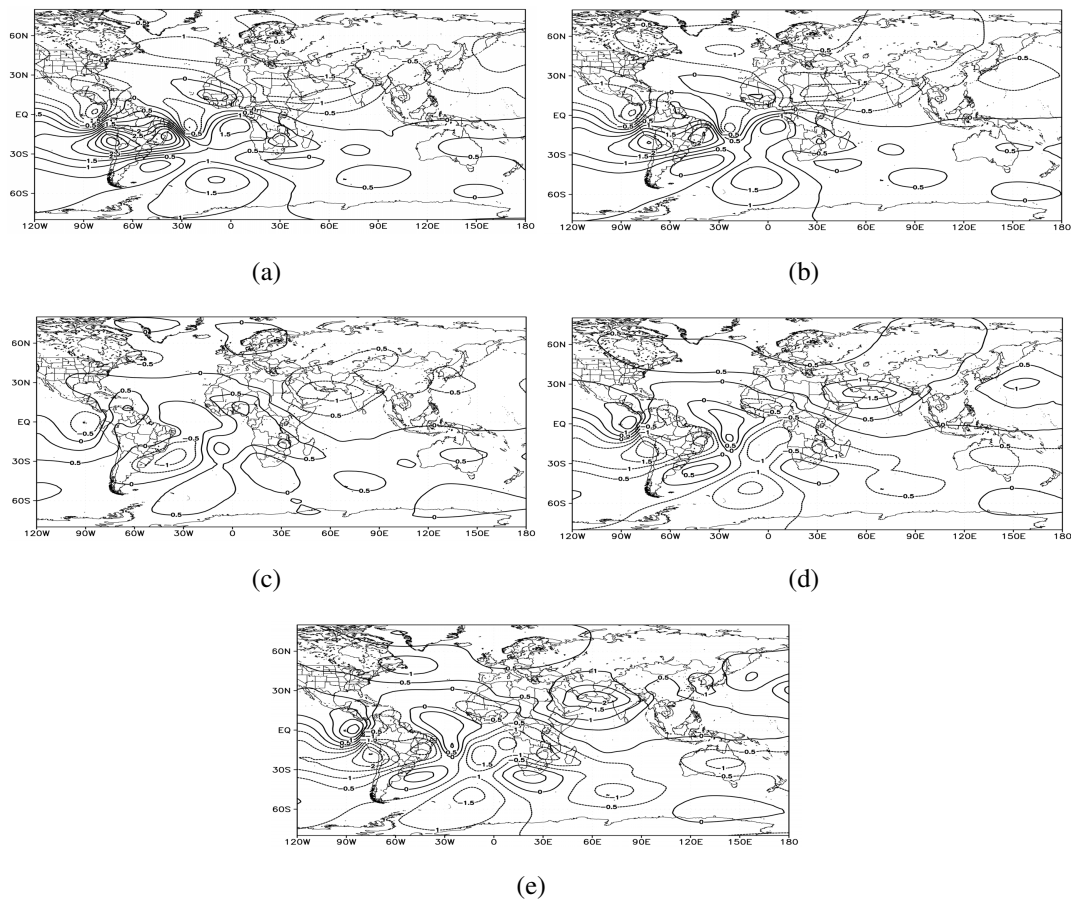


Figura E.13: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de El Niño 2015-16 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.





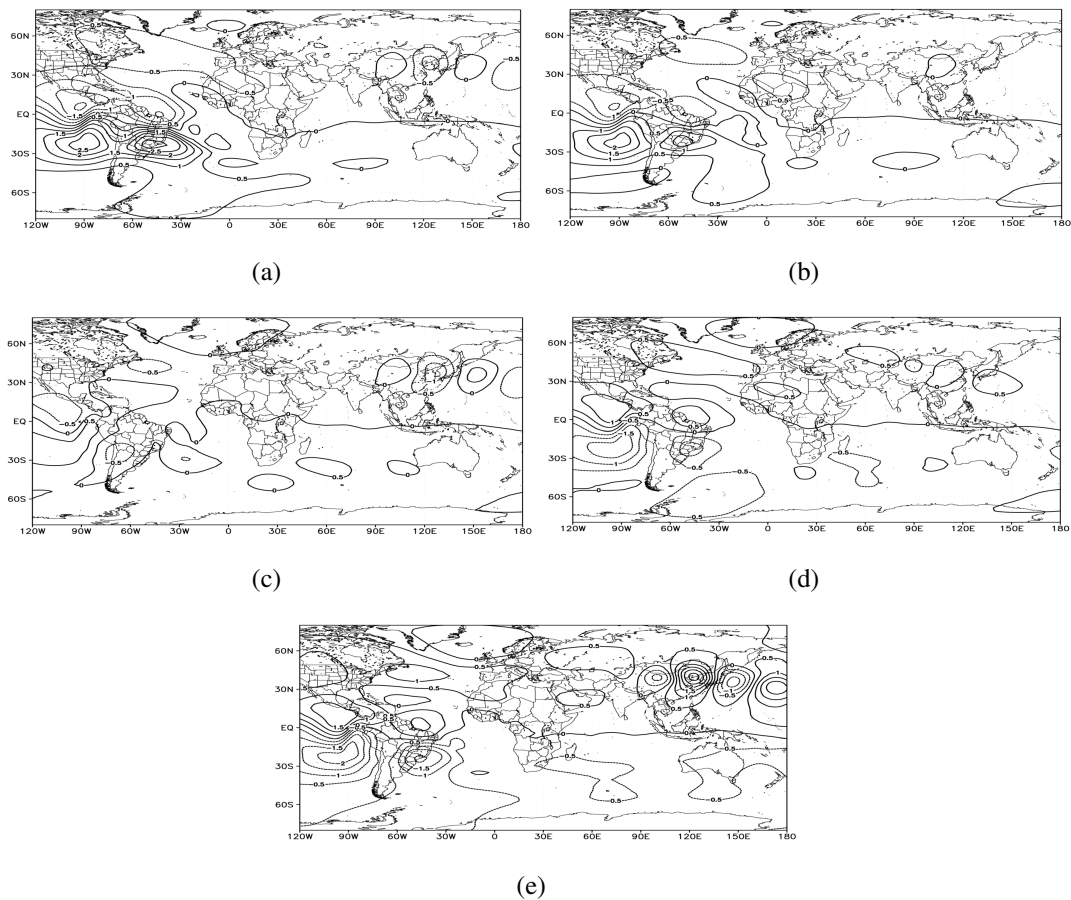


Figura E.15: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña Moderada 2005-06 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ ) a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.

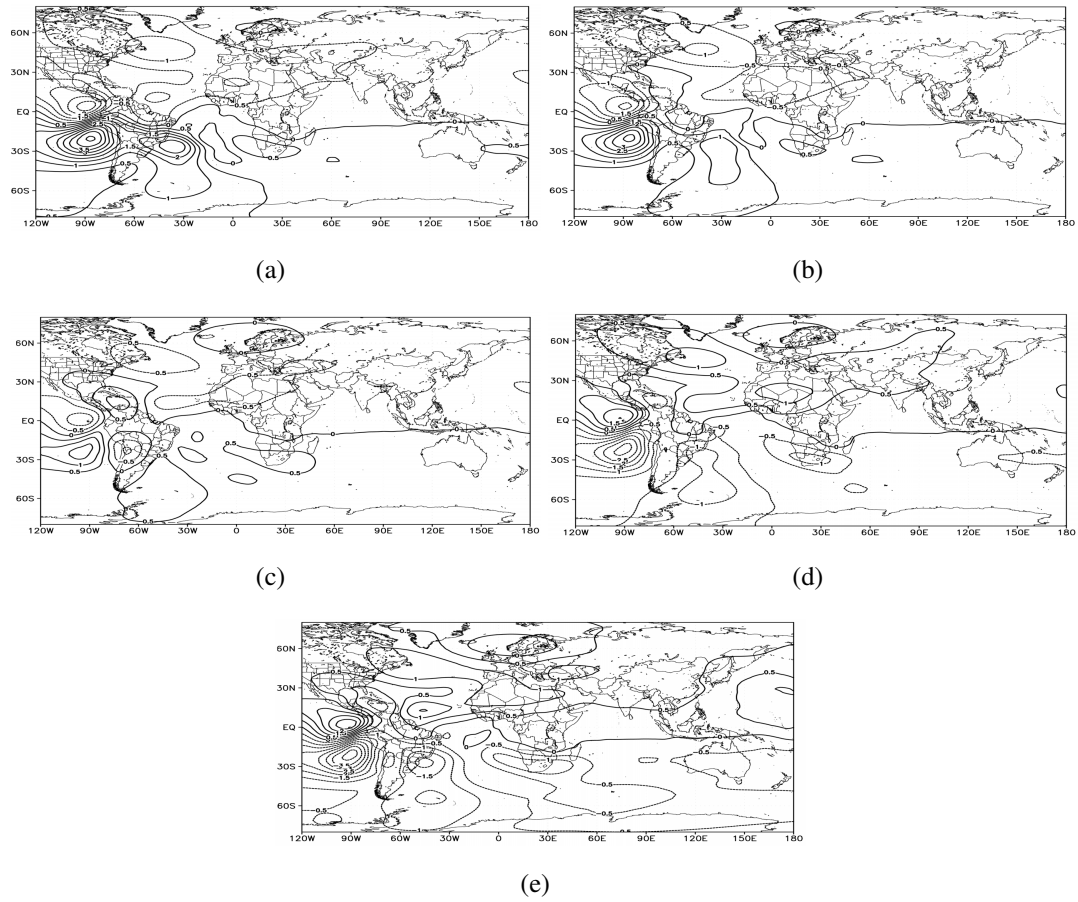
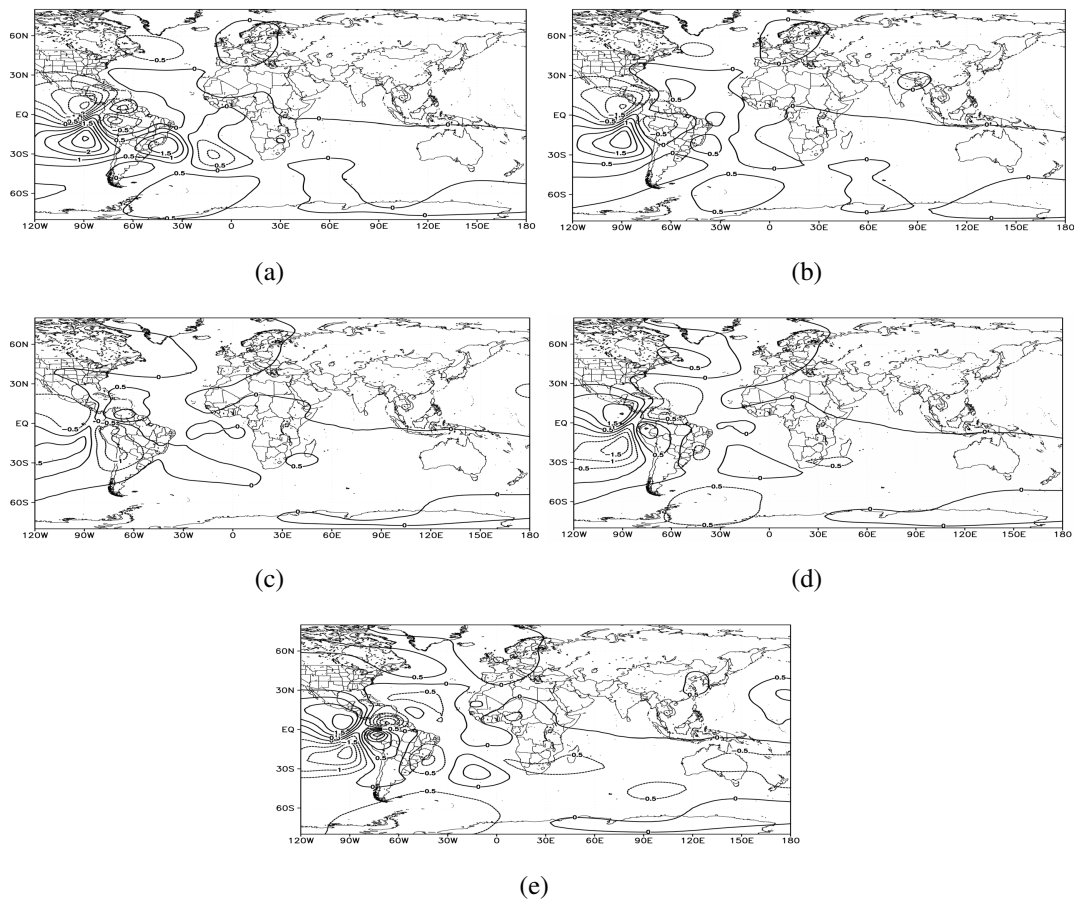


Figura E.16: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 1988-89 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.



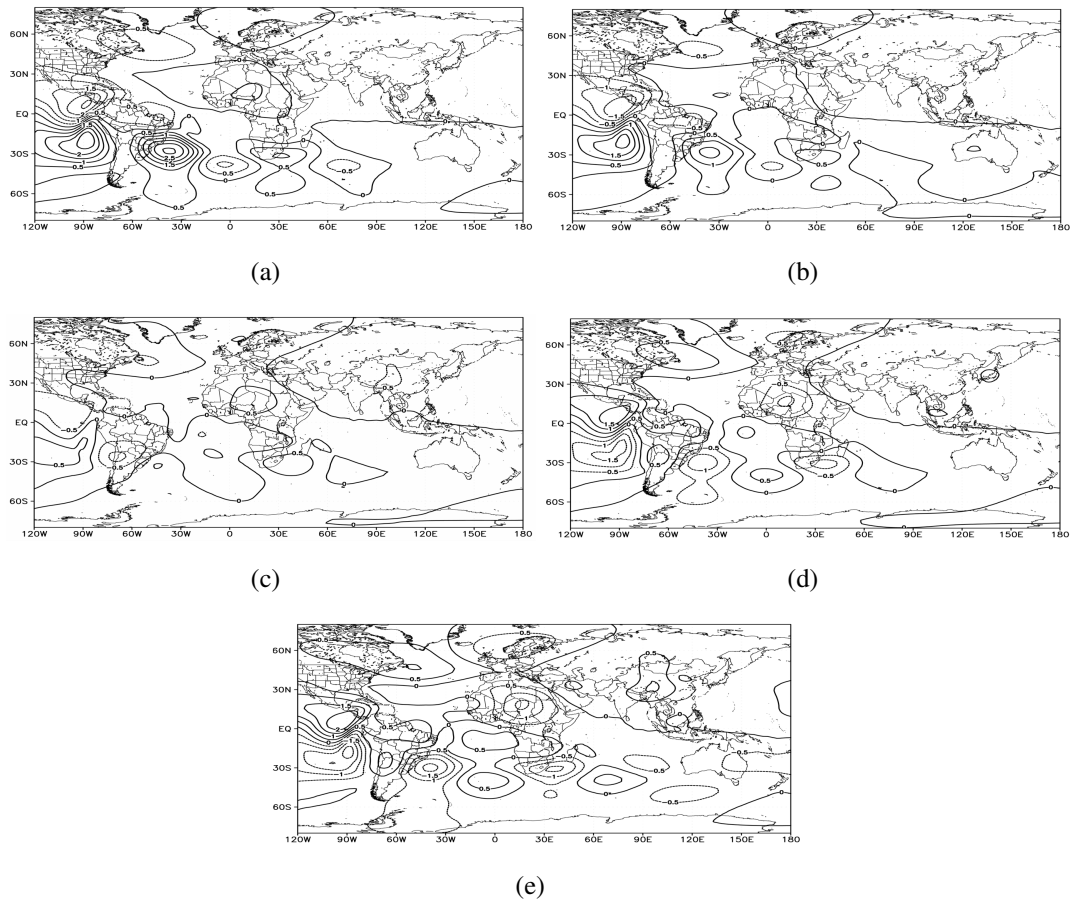


Figura E.18: ZCAS como fonte de ondas de Rossby sobre o estado básico de La Niña 2007-08 ( $\psi = 0,5 \times 10^6 m^2 s^{-1}$ )  
a) dia 2 b) dia 4, c) dia 8, d) dia 16, e) dia 19.

## Análises Extras

### F.1 Jato

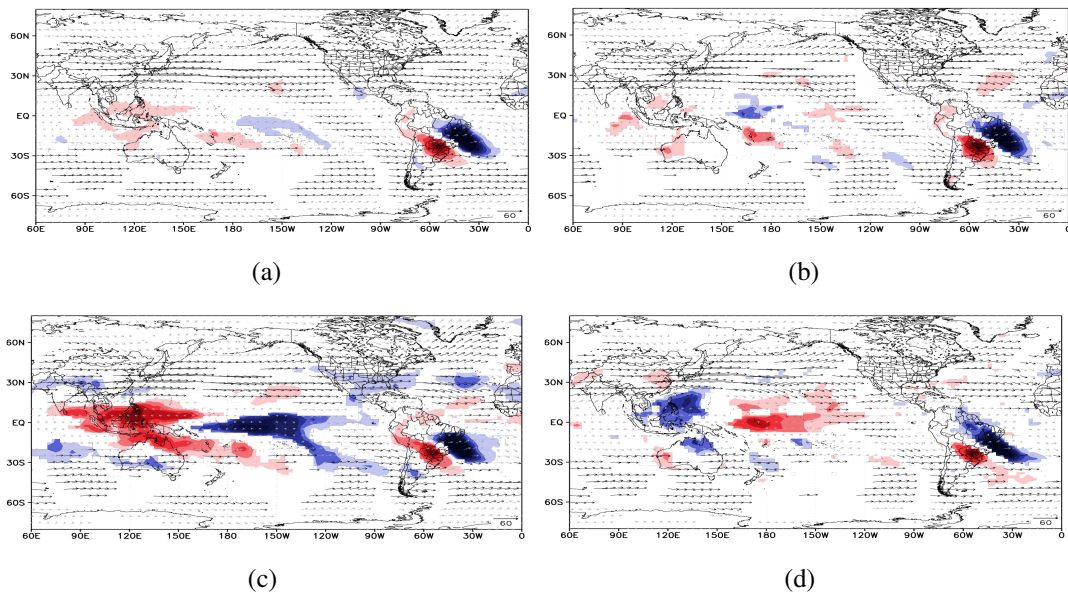


Figura F.1: Composição média do vento zonal e meridional durante: a) todos os dias de ZCAS, b) ZCAS neutras, c) ZCAS El Niño, d) ZCAS La Niña. Vetores cinzas indicam escoamento inferior a 20 m/s.

## F.2 Estados Básicos - Pacífico

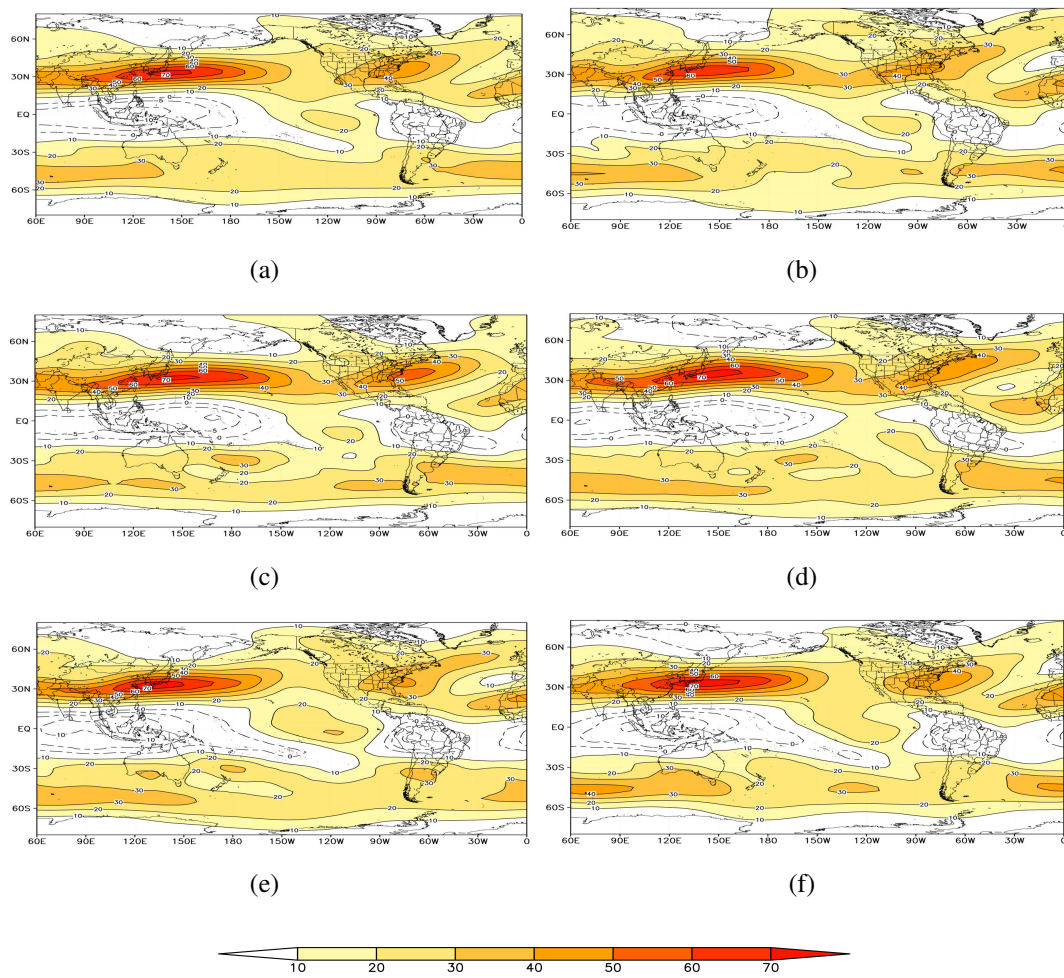


Figura F.2: Composição do escoamento zonal do vento ( $u$ , intervalo de contorno  $10 \text{ m s}^{-1}$ ) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06.

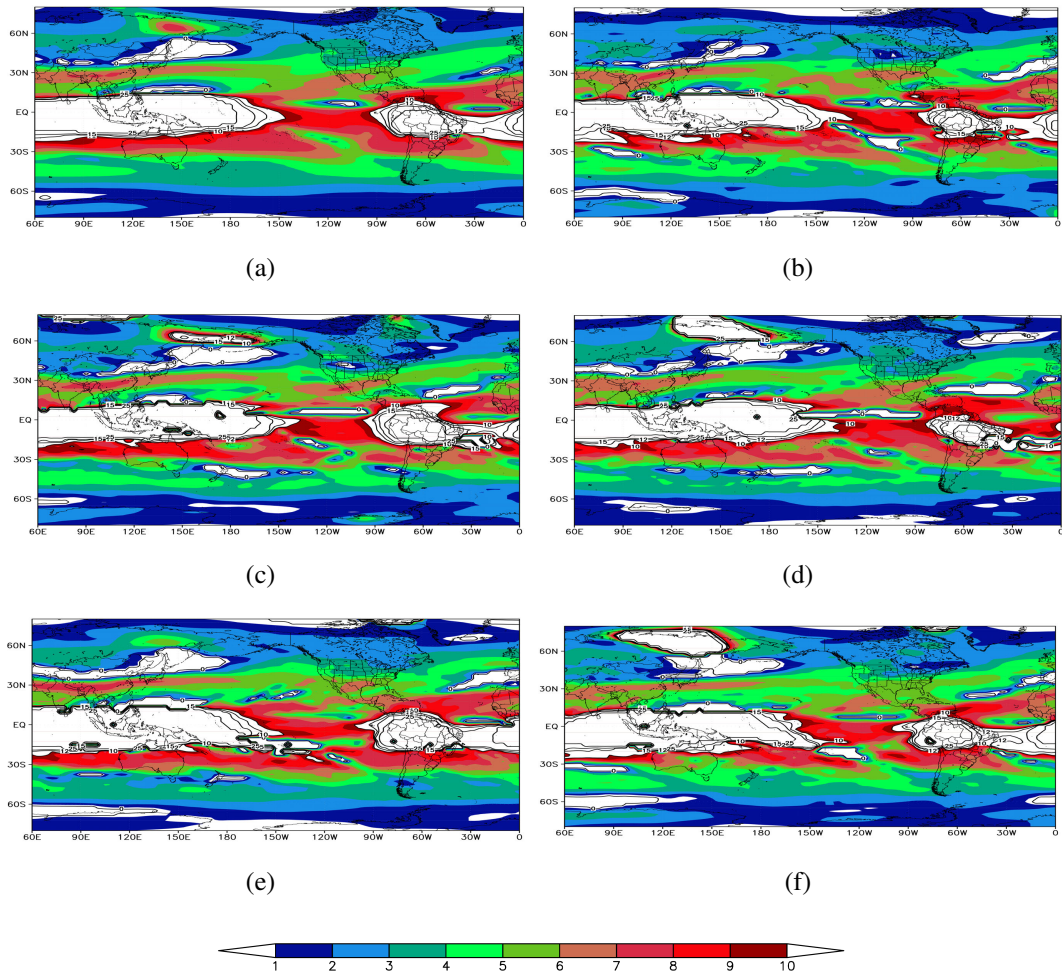


Figura F.3: Composição do Número de Onda Estacionária (Ks) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06.

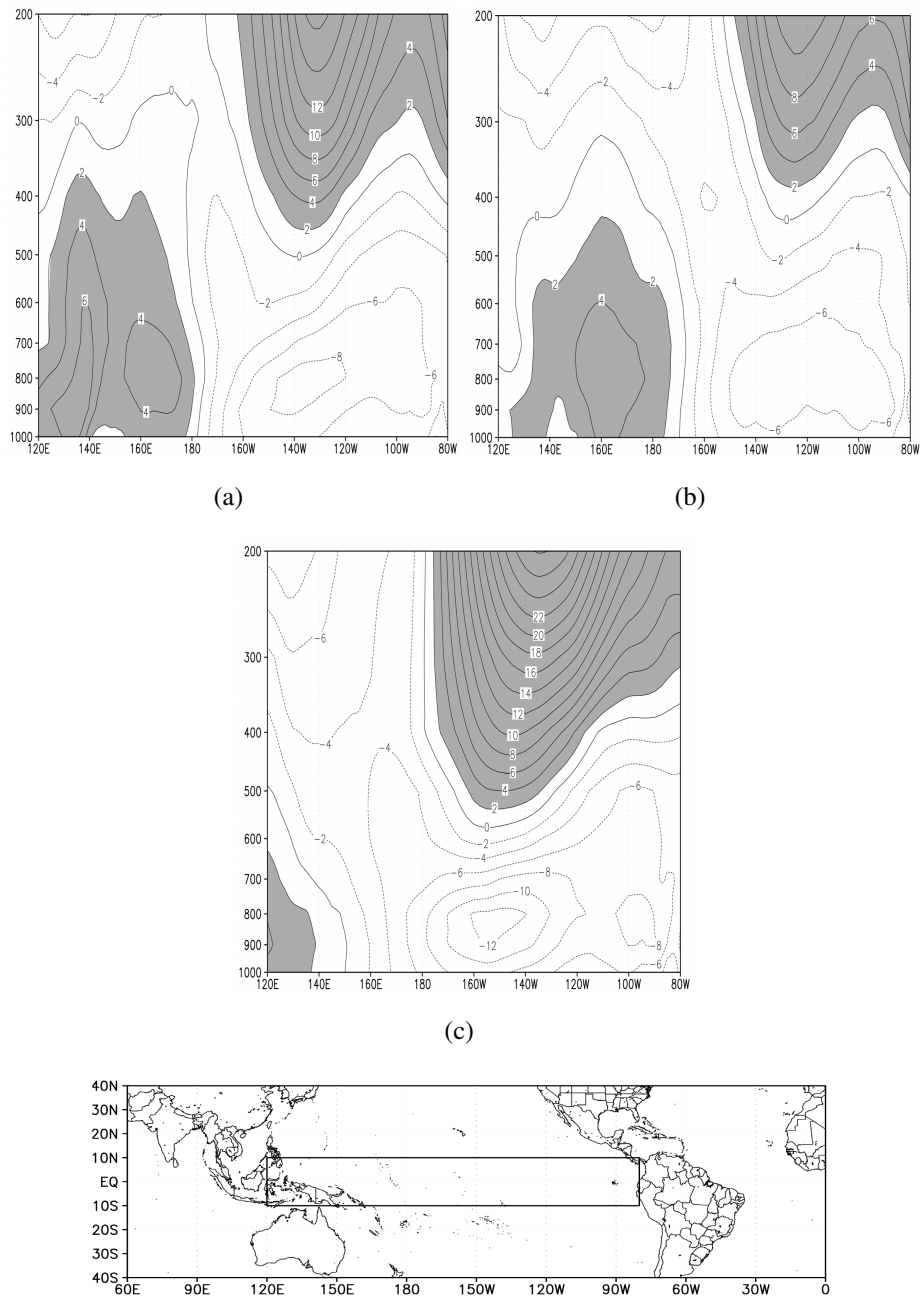
F.2.1 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ )

Figura F.4: Perfil Vertical do vento zonal no domínio do Pacífico Equatorial (10°N - 10°S, 120°W - 80°W) do estado básico de: b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña. Em cinza escoamento de oeste.



## F.3 Estados Básicos - Altântico

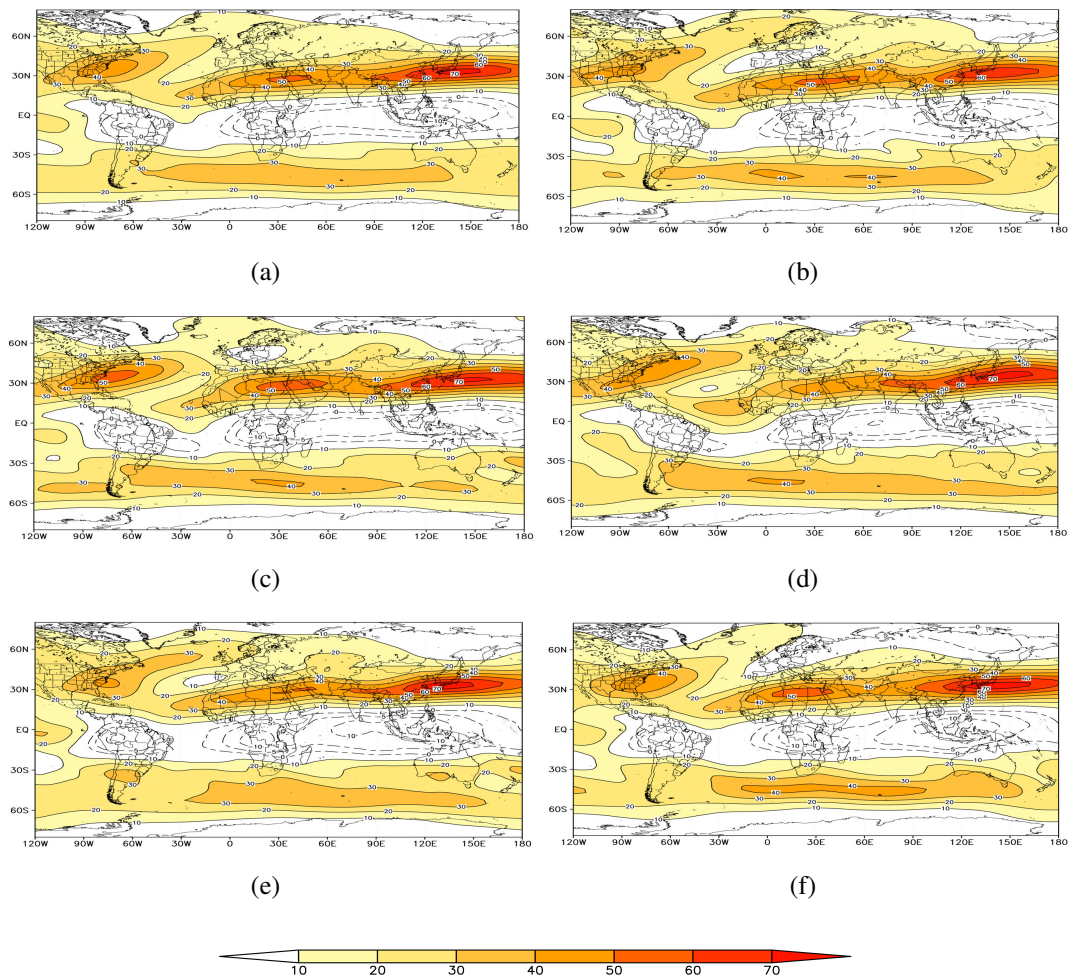


Figura F.5: Composição do escoamento zonal do vento ( $u$ , intervalo de contorno  $10 \text{ ms}^{-1}$ ) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06.

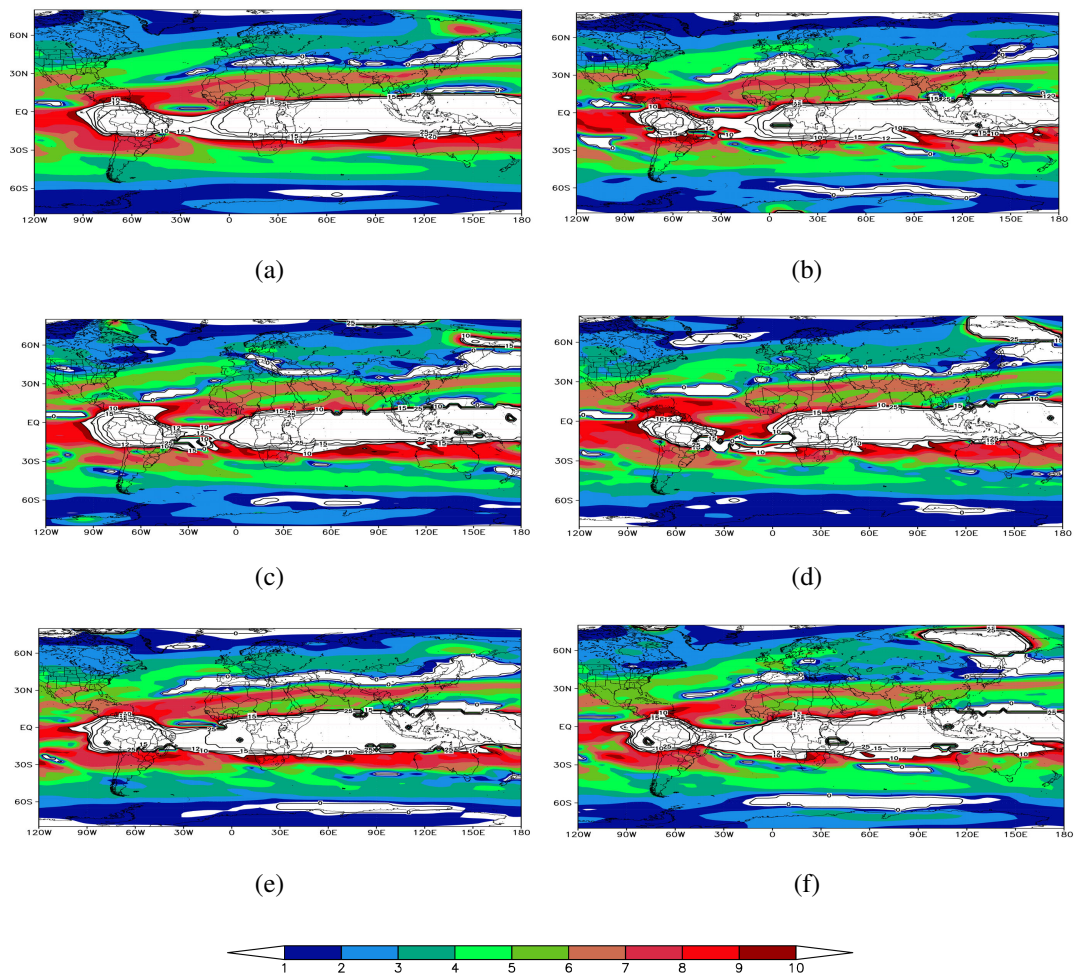


Figura F.6: Composição do Número de Onda Estacionária ( $K_s$ ) durante o verão austral dos anos de: a) 1979-2016, b) 1992/93, c) 2002/03, d) 2015/2016, e) 1999/00, f) 2005/06.

F.3.1 Perfil Vertical ( $\bar{U}$ )

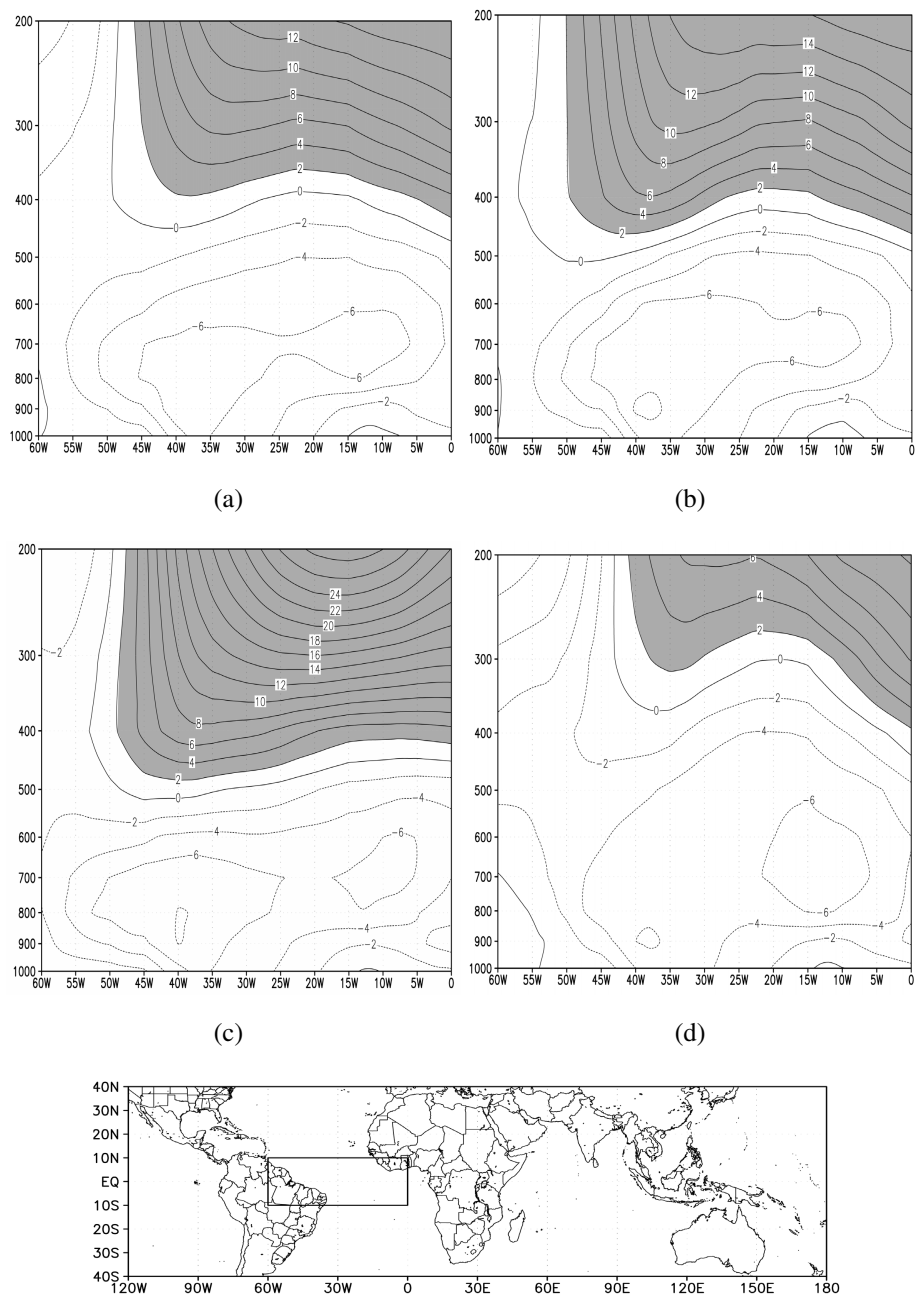


Figura F.7: Perfil Vertical do Escoamento Zonal Médio no Domínio do Oceano Atlântico (10°N - 10°S, 60°W - 0°W) do estado básico de: a) DJF 1979/2016 - Climatológico, b) DJF 1992/93 - Neutro, c) DJF 2015/16 - El Niño, d) DJF 1999/00 - La Niña.



# Anexos



## RESEARCH ARTICLE

# Relationship between interhemispheric Rossby wave propagation and South Atlantic convergence zone during La Niña years

Hugo A. Braga<sup>1</sup>  | Tercio Ambrizzi<sup>1</sup>  | Nicholas M. J. Hall<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Atmospheric Sciences,  
University of São Paulo, São Paulo, Brazil

<sup>2</sup>LEGOS, University of Toulouse, UPS,  
IRD, CNRS, CNES, Toulouse, France

**Correspondence**

Hugo A. Braga, Department of  
Atmospheric Sciences, University of São  
Paulo, São Paulo 05508-090, Brazil.  
Email: [hugo.braga@iag.usp.br](mailto:hugo.braga@iag.usp.br)

**Funding information**

Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico, Grant/Award  
Numbers: 142501/2018-2, 465501/2014-1,  
304298/2014-0, 301397/2019-8; FAPESP,  
Grant/Award Numbers: 2017/09659-6,  
2014/50848-9

**Abstract**

Through a set of observational analyses and baroclinic model experiments, we show that during La Niña conditions a wave train in North Pacific propagates eastwards along the Asian jet, crosses the equator and interacts with the SACZ through an equatorial window in the East Pacific. Composites of active SACZ for November–March of 1979–2013 are used, drawn from the full dataset and also from just the La Niña years. The data are filtered in two-time bands: 20–90 days (intraseasonal) and >200 days (interannual). Interhemispheric waveguides are identified in the anomalous SACZ composites during La Niña years. A similar wave pattern is simulated by a baroclinic atmospheric model with a fixed La Niña basic state where a thermal forcing anomaly is added on Southeast Asia. This La Niña basic state favours anomalous westerly equatorial flow at high levels, enabling a connection between Asia and South America around 15 days.

**KEYWORDS**

interhemispheric Rossby waves, La Niña, South Atlantic convergence zone, westerly duct

## 1 | INTRODUCTION

Interhemispheric wave propagation has been a topic of interest since Webster and Holton (1982), where it was suggested that planetary Rossby waves could cross the Equator, provided there is a heat source strong enough to trigger them and strong enough equatorial westerly flow to allow them to propagate. Arkin and Webster (1985), Hoskins and Ambrizzi (1993), Ambrizzi (1994) and Tomas and Webster (1994) suggested that, depending on interannual variability, Rossby waves may propagate along different waveguides and there is a possibility of interhemispheric propagation when there is equatorial westerly flow. Ambrizzi (1994) demonstrated that, during La Niña, this interhemispheric propagation is possible due to westerlies in the Central Pacific region, forced by the negative sea surface temperature (SST) anomaly, while during the El Niño, the upper-

level flow is characterized by a strong tropical easterly flow, which dynamically hinders the propagation of interhemispheric waves. Li *et al.* (2019) confirmed the importance of this equatorial window with westerly flow for global teleconnection patterns, demonstrating that interactions between the Northern Hemisphere (NH) and Southern Hemisphere (SH) occur more frequently during the austral summer December–January–February (DJF) in the Eastern Pacific Ocean. Similar SH–NH interactions also occur through the westerly Atlantic Ocean corridor.

The necessary flow environment for wave propagation is generally found along the subtropical jet streams and in regions with strong westerly flow, described in the literature as westerly ducts. They stretch from mid-latitudes to the equator over the Pacific and Atlantic Oceans during summer and autumn seasons for both hemispheres (Webster and Holton, 1982; Hsu and Lin, 1992; Kiladis and

# A Variabilidade Intrassazonal e Interanual do Acoplamento entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

Hugo A. Braga<sup>1</sup> , Tercio Ambrizzi<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>*Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.*

Recebido em: 29 de Junho de 2022 - Aceito em: 15 de Agosto de 2022

## Resumo

A relação entre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) foi analisada durante 34 verões austrais, de acordo com as fases positivas, negativas e neutras do El Niño Oscilação Sul (ENOS). Anomalias das componentes zonais e meridionais do vento, foram calculadas com base na climatologia de 1979-2013 no nível de 200 hPa, e submetidos ao filtro de Lanczos nas bandas temporais de 20-90 dias e 200 dias passa baixa, com a intenção de destacar as variabilidades intrassazonal e interanual, através da análise observacional de três composições médias de ZCAS referentes às fases positiva, negativa e neutra do ENOS. As composições filtradas nas bandas intrassazonal e interanual revelam a intensificação do VCAN tanto para os casos de ZCAS-El Niño e de ZCAS-Neutras, enquanto que a variabilidade interanual durante eventos de ZCAS sob anos de La Niña inibem a ação do VCAN próximo do continente a partir de uma circulação anticiclônica na região.

**Palavras-chave:** ZCAS, VCAN, La Niña.

## The Intraseasonal and Interannual Variability of The Coupling Between the South Atlantic Convergence Zone and the Upper Tropospheric Cyclonic Vortex

### Abstract

The relationship between the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and the Upper Tropospheric Cyclonic Vortex (UTCV) was analyzed over 34 summers, with positive, negative and neutral phases of El Niño Southern Oscillation. Zonal and meridional wind components anomalies, calculated based on climatology between 1979-2013 at the level of 200 hPa, were submitted to the Lanczos filter for 20-90 days and 200 days low pass bands, with the intention of highlighting intraseasonal and interannual variability, ensuring three mean compositions of SCAZ referring to the positive, negative and neutral phases of ENSO. The compositions for the intraseasonal and interannual band reveal the intensification of the UTCV for both SACZ-El Niño and SACZ-Neutral, while the interannual variability during SACZ events under La Niña activity inhibit the formation of the UTCV near the continent due to anticyclonic circulation in the area.

**Keywords:** SACZ, UTCV, La Niña.

## 1. Introdução

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma banda de nebulosidade subtropical característica do verão austral na América do Sul, facilmente identificada nos compostos climatológicos de precipitação e Radiação de Onda Longa (ROLE), devido a sua persistência e influência no clima local. Esta banda de nebulosidade é res-

ponsável por muitos impactos na variabilidade de água no Brasil, seja para consumo humano, irrigação na agricultura, reservatórios de água e produção de energia hidrelétrica que é responsável por aproximadamente 65% da matriz energética brasileira (Balanço de Energia Brasileiro - 2020), sendo a região Sudeste a que concentra a maior quantidade, e também a mais impactada pelas variações da ZCAS.



# South Atlantic Convergence Zone as Rossby Wave Source

Braga Hugo .A<sup>1\*</sup>, Ambrizzi Tercio<sup>1</sup> and Hall Nicholas M. J.<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Department of Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.

<sup>2</sup>LEGOS, University of Toulouse, Toulouse, France.

\*Corresponding author(s). E-mail(s): [hugo.braga@iag.usp.br](mailto:hugo.braga@iag.usp.br);

## Abstract

The South Atlantic Convergence Zone (SACZ), which extends from the Amazon to the southwestern South Atlantic, is one of the major precipitation systems in South America and has an important socioeconomic impact in Brazil. This study suggests the possibility of SACZ to act as a Rossby wave source by numerical simulations using a simple baroclinic model under different basic states. Sixteen days after the perturbation, it is possible to observe wave propagation inside the subtropical latitudes of the Northern Hemisphere during the basic states of El Niño and neutral years, which have the most intense westerly flow in the upper troposphere of the equatorial Atlantic Ocean. In La Niña basic states, very little or nothing propagates over the equatorial Atlantic Ocean due to the weak westerly flow, restricting wave propagations over the Southern Hemisphere. According to the analyses of this study, SACZ may act as interhemispheric Rossby wave source, providing there is westerly flow that allows wave propagation over the equatorial Atlantic Ocean.

**Keywords:** South Atlantic Convergence Zone, Rossby Waves, Interhemispheric Rossby Waves