

Universidade Federal do Rio de Janeiro

**PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ROSSBY ATMOSFÉRICAS NA AMÉRICA DO
SUL E AS VARIABILIDADES INTERANUAL E INTRASSAZONAL**

Hugo Alves Braga

2018

PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ROSSBY ATMOSFÉRICAS NA AMÉRICA DO SUL E AS VARIABILIDADES INTERANUAL E INTRASSAZONAL

Hugo Alves Braga

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

Orientadores:

Edilson Marton, Prof. Dr.

Vanessa Silveira Barreto Carvalho, Prof.
Dra.

Rio de Janeiro

Abril de 2018

CIP - Catalogação na Publicação

B813p Braga, Hugo Alves
Propagação de ondas de Rossby atmosféricas na América do Sul e as variabilidades interanual e intrassazonal / Hugo Alves Braga. -- Rio de Janeiro, 2018.
74 f.

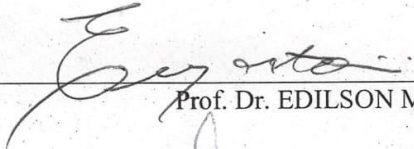
Orientadora: Vanessa Silveira Barreto Carvalho.
Coorientador: Edilson Marton.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Programa de Pós Graduação em Meteorologia, 2018.

1. Meteorologia Dinâmica. 2. Variabilidade Climática. 3. Meteorologia Sinótica. I. Carvalho, Vanessa Silveira Barreto, orient. II. Marton, Edilson, coorient. III. Título.


PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ROSSBY ATMOSFÉRICAS NA AMÉRICA DO
SUL E AS VARIABILIDADES INTERANUAL E INTRASSAZONAL

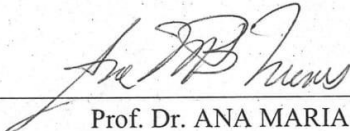
HUGO ALVES BRAGA

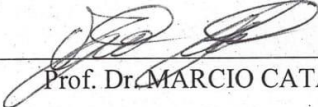
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS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


Prof. Dr. EDILSON MARTON (Orientador)


Prof. Dr. VANESSA BARRETO CARVALHO (Orientadora)


Prof. Dr. WALLACE FIGUEIREDO MENEZES


Prof. Dr. ANA MARIA BUENO NUNES


Prof. Dr. MARCIO CATALDI

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

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 pessoa e mulher a qual pude ter na minha vida.

A minha namorada, Carolina de Lima Silva, por mesmo sem entender nada sobre este estudo, esteve presente e me dando todo apoio necessário para a conclusão do mesmo.

Aos meus amigos de toda vida João Felipe Rezende, Yann Costa e Silva, Bruno de Macedo, Isadora Amorim, João Pedro Abreu, Leandro Lôbo e Rodrigo Albuquerque, por apoiarem e acreditarem nesta pesquisa, mesmo sem nunca terem me perguntado algo sobre ela.

Aos meus colegas de turma, Iago Alvarenga, Douglas Nehme, Sidney e Renata Calado, pelo incentivo a esta pesquisa.

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

Aos meus orientadores Edilson Marton e Vanessa Silveira por acreditarem nesta pesquisa e lapidarem a mesma.

Aos meus amigos-irmãos de casa Pedro Anversi e Caio Muniz, por estarem presente na reta final desta pesquisa.

Aos amigos Leonardo Muniz e Pedro França por todo apoio a academia.

A professora Sâmia Calheiros por todos os esclarecimentos e dúvidas a respeito da parte estatística.

E a todos aqueles que sabem que fizeram parte disto e porventura esqueci de cita-los.

RESUMO

As propagações de ondas de Rossby atmosféricas que interagem com os principais sistemas de escala sinótica da América do Sul foram analisadas, durante o verão austral, considerando a variabilidade intrassazonal e interanual. O estudo foi realizado a partir de técnicas estatísticas por meio de uma observação sinótica e dinâmica dos conjuntos de dados diários de reanálise II do NCEP e ROLE dos satélites NOAA. Inicialmente o período de análise foi de dezembro a fevereiro de 1985 a 2015 com enfoque nas propagações ondas sobre o Pacífico Sul e posteriormente foi analisada a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o período de 2000 a 2015, ambos filtrados na banda de frequência 20-90 dias e 200 dias passa baixa. Através das análises de correlação das Funções Ortogonais Empíricas nos compostos de anomalias filtrados na banda 20-90 dias, foram identificados padrões de propagação de ondas de Rossby atmosféricas do tipo Pacífico América do Sul (PSA), os quais foram separados em duas análises, de 1985 a 1999 e de 2000 a 2015 com a intenção de destacar semelhanças e diferenças entre estes períodos. As análises de 1985 a 1999 demonstraram similaridades ao apresentado na literatura com um padrão de onda mais curto que se propaga da Austrália a América do Sul. De 2000 a 2015, é representado no primeiro auto vetor um padrão mais longo característico de onda zonal 2 no Oceano Pacífico Sul, sendo este um indício de atuação da variabilidade interdecadal da Oscilação Decadal do Pacífico. Também foi observado como os trens de ondas do tipo PSA interagem com a ZCAS nas escalas temporais intrassazonal e interanual durante as fases do El Niño Oscilação Sul (ENOS), destacando que durante a fase fria (La Niña) as perturbações nas duas escalas temporais agem em fase, intensificando o cavado associado a ZCAS em altos níveis, enquanto que na fase quente (El Niño) é observado o oposto. A composição de eventos de ZCAS no nível de 200 hPa das componentes zonais e meridionais do vento destacam a interação entre os eventos de ZCAS sob atuação de La Niña e a ausência do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) neste composto, por meio de um anticiclone da escala de tempo interanual na região característica de formação do VCAN, fato não observado durante os eventos de ZCAS El Niño e ZCAS Neutra. As correlações das EOF nos dados de ROLE no domínio da América do Sul destacam como principal sistema convectivo a ZCAS e sua atuação em conjunto com a Oscilação Madden-Julian, tanto para as correlações não filtradas quanto para as de escala intrassazonal. Sugere-se neste estudo que as escalas temporais intrassazonal e interanual atuam em conjunto seja por meio de intensificação dos sistemas atmosféricos ou por meio de enfraquecimento dos padrões já estabelecidos.

ABSTRACT

The propagation of atmospheric Rossby waves interacting with the main synoptical scale systems in South America were analyzed during the austral summer, considering the intraseasonal and interannual variability. The study was carried out from statistical techniques through a synoptic and dynamic observation of the daily data sets of NCEP Reanalysis II and ROLE of the NOAA satellites. Initially the period of analysis was from December to February from 1985 to 2015 with focus on the wave propagation over the South Pacific. Later, the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) was analyzed from 2000 to 2015, both filtered in the 20-90 days and 200 days pass low band of frequency. Through correlation analyzes of the Empirical Orthogonal Functions (EOF) in the compounds of filtered anomalies in the 20-90 days band, atmospheric Rossby waves propagation patterns of the Pacific South America type (PSA) were identified and separated in two analyzes, from 1985 to 1999 and from 2000 to 2015. The goal was to highlight similarities and differences between these periods. The analyzes from 1985 to 1999 demonstrated similarities to the literature with a shorter wave pattern that propagates from Australia to South America. From 2000 to 2015, a longer characteristic pattern of zonal wave 2 is represented in the first auto-vector in the South Pacific Ocean, indicating the interdecadal variability of the Pacific Decadal Oscillation. It was also observed how the PSA train of waves interacts with SACZ in the intraseasonal and interannual temporal scales during the El Niño Southern Oscillation (ENOS) phases; noting that during the cold phase (La Niña) the disturbances in the two temporal scales act in phase, intensifying the trough of the SACZ, while in the hot phase (El Niño) the opposite is observed. The SACZ event composition at the 200 hPa level of the wind components highlights the interaction between La Niña events and the absence of the Upper Level Cyclone Vortex (ULCV), through a anticyclone of the interannual time scale in the characteristic region of ULCV formation, a fact not observed during the events of SACZ El Niño and Neutral. The EOF correlations in the ROLE data in the South American domain shows SACZ as the main convective system and their interaction with the Madden-Julian Oscillation, for the unfiltered and intraseasonal correlations. It is suggested in this study that the intraseasonal and interannual time scales work together either through the intensification of atmospheric systems or by weakening established patterns.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
	1.1.–Objetivo.....	2
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
	2.1 – Teleconexões Atmosféricas do Hemisfério Sul	3
	2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul.....	5
	2.2.1 – Efeitos Remotos	7
	2.2.2- Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vortice Ciclônico de Altos Níveis	7
	2.2.3 – Variabilidade Intrassazonal	8
	2.2.4 – Variabilidade Interanual - ENOS	10
	2.3 – Propagação de ondas de Rossby atmosféricas	11
	2.4 – Ondas de Rossby e ZCAS	14
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
	3.1 – Ondas de Rossby	16
	3.2 – Forçante de Ondas de Rossby	19
	3.3 – Função Ortogonal Empírica	20
4	DADOS E METODOLOGIA	21
	4.1 – Dados.....	21
	4.2 – Análise e Observação dos Dados.....	21
	4.3 – Cálculo de Anomalias	22
	4.4 – Composição Média.....	22
	4.5 – Filtro de Lanczos.....	22
	4.6 – Aplicação de EOF	23
	4.7 – Fluxograma da metodologia utilizada.....	24
5	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATMOSFÉRICAS NA AMÉRICA DO SUL.....	25
	5.1 – Padrão de ondas de Rossby atmosféricas durante o verão no Hemisfério Sul	25
	5.2 – Verão 1985-1999.....	25

5.3 – Verão 2000-2015	27
5.4 – Verão 1985-2015.....	29
5.5 – Composições médias interanuais dos verões de 1985-1999 e 2000-2015	31
6 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATMOSFÉRICAS E A ZCAS.....	33
6.1 – Padrões ZCAS	33
6.1.1 – Altura Geopotencial.....	33
6.1.2 – Altura Geopotencial (Intrassazonal).....	34
6.1.3 – Altura Geopotencial (Interanual)	35
6.1.4 – Altura Geopotencial (Intrassazonal x Interanual)	37
6.2 – Padrões de ZCAS em altos níveis na América do Sul	39
7 PADRÕES DE ANOMALIAS DE ROLE NA AMÉRICA DO SUL.....	44
7.1 – Padrões de anomalias de ROLE na América do Sul (Intrassazonal)	47
7.2 – Padrões de anomalias de ROLE no Pacífico (Intrassazonal)	50
7.3 – Padrões de anomalias de ROLE na América do Sul (Interanual)	52
8 CONCLUSÕES.....	55
9 REFERÊNCIAS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Padrão PSA, a) Função Ortogonal Empírica (EOF) 1 e b) EOF 2, para os dados de função de corrente em 200 hPa, evidenciando os padrões PSA 1 e PSA 2. Fonte: Mo e Higgins (1998).....	4
Figura 2 – Guias de ondas apresentador por Hoskins e Ambrizzi (1993), setas rachuradas guias de ondas a partir dos jatos do Hemisfério Sul, Atlântico Norte e Norte da África – Ásia, setas pretas, regiões preferenciais de propagação.....	12
Figura 3 – Guias de ondas apresentador por Ambrizzi et. al. (1995), setas rachuradas guias de ondas a partir dos jatos do Hemisfério Sul sub tropical e polar, Atlântico Norte e Norte da África – Ásia, setas pretas, regiões preferenciais de propagação	13
Figura 4 – Esquema proposto por Van der Wiel (2015), em uma análise climatológica de eventos de ZCAS e ZCPS de 1979 a 2013, para 12 níveis verticais entre 100 e 1000 hPa.....	15
Figura 5 - Esquema proposto por Van der Wiel (2015), vento zonal em 200 hPa, em cinza claro corresponde a áreas onde $(U^-c) < 0$ (escoamento de leste para oeste)..	18
Figura 6 – Fluxograma da metodologia utilizada.....	24
Figura 7 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 1985-1999, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias ; b) Modo 1 da (EOF) ; c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.....	26
Figura 8 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 2000-2015, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias ; b) Modo 1 da (EOF) ; c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.....	28
Figura 9 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 1985-2015, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias ; b) Modo 1 da (EOF) ; c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.....	30
Figura 10 – Composto médio de anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 200 dias passa baixa dos verões de; a) 1985-1999; b) 2000-2015.....	31
Figura 11 – Série temporal dos verões de 1985 a 2015 das regiões; a) 45°S – 140°E; b) 40°S – 20°E; c) 35°S – 150°E.....	32

Figura 12 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial não filtrada, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.....	34
Figura 13 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial filtrada 20-90 dias, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.....	35
Figura 14 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial filtrada 200 dias passa baixa, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.....	36
Figura 15 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño – 20 – 90 dias, b) El Niño – 200 dias passa baixa, c) La Niña – 20 – 90 dias d) La Niña – 200 dias passa baixa.....	38
Figura 16 – Composição média de anomalia de U e V em 200 hPa não filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) Neutro.....	40
Figura 17 – Composição média de anomalia de U e V em 500 hPa não filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) Neutro.....	41
Figura 18 – Composição média de anomalia de U e V em 200 hPa filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño - Intrassazonal, b) El Niño – Interanual, c) La Niña – Intrassazonal, d) La Niña – Interanual, e) Neutro – Intrassazonal, f) Neutro - Interanual.....	43
Figura 19 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE não-filtrada a) 1º Modo – 10,3% de variância, b) 2º Modo – 7,29% de variância, c) 3º Modo – 7,05% de variância.....	45
Figura 20 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE não-filtrada; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.....	46
Figura 21 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias; a) 1º Modo – 16,88% de variância, b) 2º Modo – 10,55% de variância, c) 3º Modo – 8,70% de variância.....	48

Figura 22 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.....	49
Figura 23 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias no domínio Pacífico América do Sul; a) 1º Modo – 8,20% de variância, b) 2º Modo – 6,01% de variância.....	51
Figura 24 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda interanual 200 dias passa baixa; a) 1º Modo – 62,43% de variância, b) 2º Modo – 12,99% de variância, c) 3º Modo – 7,0% de variância.....	53
Figura 25 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE filtrada na banda interanual 200 dias passa baixa; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

EA	East Atlantic
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EOF	Funções Ortogonais Empíricas
GrADS	Grid Analysis and Display System
INPE	Instituto de Pesquisas Espaciais
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NAO	North Atlantic Oscillation
NCEP	National Centers of Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPO	North Pacific Oscillation
NZCAS	Não- ZCAS
OMJ	Oscilação Madden-Julian
ONI	Índice Nino Oceânico
OS	Oscilação Sul
PNA	Pacific North Oscillation
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
PSA	Pacific South America
ROLE	Radiação de Onda Longa Emergente
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIS	Zona de Convergência do Índico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

ZCPS Zona de Convergência do Pacífico Sul

WA West Atlantic

WP West Pacific

1 -INTRODUÇÃO

Os estudos de ondas atmosféricas, inicialmente propostos por Rossby (1939), são de fundamental importância para o entendimento de perturbações nas escalas planetária e sinótica. Tais ondas afetam o tempo e o clima de acordo com seus mecanismos de produção e propagação. Ondas de Rossby de mais baixa frequência podem ser estimuladas por fontes tropicais de calor e suas rotas de propagação são dadas por padrões de teleconexões atmosféricas. Um exemplo clássico de teleconexão refere-se ao identificado por Walker (1923) e Walker e Bliss (1932), que apresentaram uma espécie de gangorra barométrica no hemisfério sul, posteriormente denominada Oscilação-Sul.

O desenvolvimento de pesquisas relacionadas as teleconexões atmosféricas permitiu um maior entendimento sobre a relação das regiões tropicais e extratropicais da atmosfera, onde as fontes de calor tropicais podem servir como forçante para os trens de ondas de Rossby, os quais se propagam nas médias e altas latitudes. Tal propagação está relacionada a diversos padrões de teleconexão, que atuam como guias de ondas atmosféricas (Hoskins e Ambrizzi, 1993). De acordo com Grimm e Silva Dias (1995b), existe um transporte de energia trópico-extratropical associado à variabilidade intrassazonal e interanual da Zona de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) para a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Esses resultados fazem parte de uma abordagem observacional (Casarin e Kousky, 1983) e numérica por meio de um modelo barotropical (Grimm e Silva Dias, 1995b).

Vale destacar que a ZCAS é o principal sistema atmosférico na escala de tempo intrassazonal durante o verão austral da América do Sul e que a atuação dessa perturbação condiciona fortemente o regime de precipitação nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, apresentando padrões distintos da respectiva atividade convectiva (ZCAS continental/oceânica) dependendo da variabilidade interanual, como discutido por Ferreira et al. (2004).

A partir da compreensão da teoria linear das ondas de Rossby e das diferenças entre os padrões de ZCAS na ocorrência das fases quente e fria do El Niño Oscilação Sul (ENOS), abre-se a hipótese que padrões de ondas podem se comportar de forma diferente devido a variabilidade interanual. Desta forma, o presente estudo visa caracterizar não só a relação estatística, mas também a relação dinâmica entre a

propagação de ondas e a ZCAS, de modo a prover uma melhor caracterização desse sistema.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar padrões de ondas de Rossby no domínio Pacífico-América do Sul na escala de tempo intrassazonal durante episódios de ZCAS em períodos de ENOS nas fases quente e fria. Desta forma, busca-se compreender a atuação entre essas escalas temporais, especialmente da variabilidade interanual sobre a intrassazonal. Para investigar tal questão, propõe-se a compreensão dos seguintes pontos.

- Analisar a climatologia das propagações de ondas de Rossby no domínio Pacífico-América do Sul na escala de tempo intrassazonal;
- Avaliar a relação entre as propagações de ondas de Rossby nas escalas de tempo intrassazonal e interanual durante eventos ZCAS;
- Analisar os padrões de ZCAS em altos níveis nas escalas de tempo intrassazonal e interanual;

2 -REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1– Teleconexões Atmosféricas no Hemisfério Sul

As teleconexões atmosféricas representam a conexão a distância, a partir da existência de correlações entre variações temporais simultâneas em parâmetros meteorológicos medidos em pontos da terra notadamente separados (Cunningham e Cavalcanti, 2006). As observações destas teleconexões são dadas por meio de análises estatísticas, como mapas de correlação, que fornecem evidências empíricas da ação de padrões de baixa frequência na troposfera (Hoskins e Ambrizzi, 1993). Estas análises permitem uma compreensão geral da circulação atmosféricas e têm sido utilizadas na compreensão das flutuações de grande escala e de baixa frequência na atmosfera. O conhecimento sobre as teleconexões atmosféricas também possuem um papel importante do ponto de vista meteorológico operacional e social, que se dá a partir de sua utilidade na melhor acurácia nas previsões do tempo de longo prazo. Opsteegh e Doel (1980), demonstram que após as considerações das teleconexões no Hemisfério Norte em um modelo de previsão, as anomalias encontradas em uma escala temporal superior a escala sinótica foram adequadamente previstas.

Os primeiros estudos atmosféricos relacionados a teleconexões foram discutidos por Walker (1923) e Walker e Bliss (1932), através de uma gangorra barométrica no Hemisfério Sul, a partir de correlações negativas entre as regiões do Oceano Pacífico Sul e da Austrália, posteriormente denominada Oscilação-Sul. Além da Oscilação-Sul também foram observadas oscilações entre o Oceano Atlântico Norte e o Polo Norte – North Atlantic Oscillation (NAO) , e entre o Polo Norte e o Oceano Pacífico Norte – North Pacific Oscillation (NPO).

Outros cinco padrões teleconectivos foram descobertos por Wallace e Gutzler (1980), a partir de técnicas de correlação em anomalias mensais nos dados de altura geopotencial em 500 hPa e pressão à superfície durante o inverno do Hemisfério Norte, esses padrões apresentavam uma estrutura horizontal do tipo ondulatória, com fortes dipolos entre latitudes altas e subtropicais sobre os Oceanos Pacífico e Atlântico Norte, com máxima correlação negativa sendo denominados como Pacific North América (PNA), West Atlantic (WA), East Atlantic (EA) e West Pacific (WP).

Namias (1978), identificou o padrão PNA sem mencionar a teleconexão, por meio de um padrão quase estacionário de onda longa, ao analisar o inverno anômalo de 1976-77 nos Estados Unidos, a partir de um dipolo de anomalias negativas de pressão e temperatura sob o Norte do Oceano Pacífico e sudeste dos EUA e condições opostas sob o noroeste norte americano.

No Hemisfério Sul, há um padrão de teleconexão semelhante, denominado Pacific South America (PSA) identificado por Mo e Ghill (1987). O padrão foi identificado em vários estudos sobre a circulação de grande escala no Hemisfério Sul durante o fim dos anos de 1980 e início dos anos 1990, (Kidson, 1988, Ghill and Mo, 1991, Lau et. al., 1994). O PSA estaria relacionado com dois modos de baixa frequência, os quais são caracterizados pelo número de onda zonal 3, e oscilam em quadraturas (Mo e Higgins, 1998; Cunningham e Cavalcanti, 2006). A presença dominante do número de onda zonal 3, já havia sido observada em outros estudos de grande escala sobre o Hemisfério Sul, como em Trenberth (1980), Van Loon e Jenne (1972), Fraedrich e Lutz (1986) e Cavalcanti (1992).

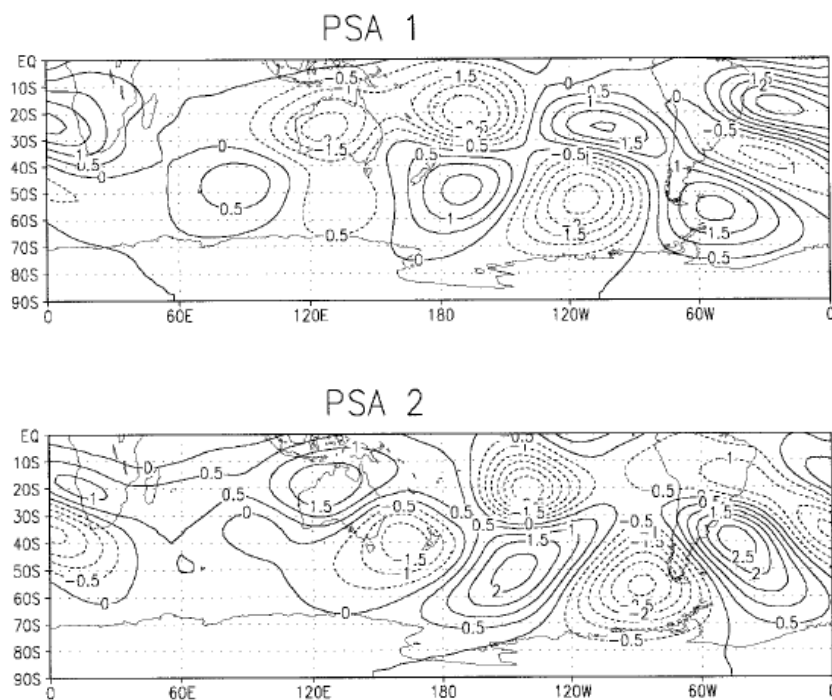


Figura 1 – Padrão PSA, a) Função Ortogonal Empírica (EOF) 1 e b) EOF 2, para os dados de função de corrente em 200 hPa, evidenciando os padrões PSA 1 e PSA 2. Fonte: Mo e Higgins (1998).

Cavalcanti (1992), realizou um estudo sobre as teleconexões no Hemisfério Sul e suas influências na circulação da América do Sul, a partir de dados filtrados nas bandas 10-90 dias, observando que durante o verão o número de onda zonal 4 foi identificado pelo primeiro modo da EOF e características do padrão PSA e ZCAS representada pelo segundo modo, enquanto que o terceiro modo apresentava um trem de ondas do Pacífico para o Atlântico passando pela América do Sul, sendo semelhante aos resultados obtidos nas análises de correlação.

As principais diferenças e características entre o Hemisfério Sul e o Hemisfério Norte são definidas a partir da sua distribuição geográfica, uma vez que o Hemisfério Sul é apresenta uma distribuição mais homogênea, com maior porção oceânica e mais livre para propagação de ondas, com menos perturbações orográficas e menores regiões de contraste entre o oceano e o continente. Van Loon e Jenne (1972), comparam as ondas estacionárias do Hemisfério Sul com as do Hemisfério Norte, encontrando na região de 50°S, ondas planetárias zonais de número 1 e 3, e essencialmente barotrópicas.

2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS

Nesta sessão são abordadas as características gerais da ZCAS do ponto de vista observacional e dinâmico, assim como suas influências remotas. Segundo Cavalcanti (1992) a ZCAS é um sistema de sinal característico em estudos de propagações de ondas com foco na América do Sul, sendo então uma perturbação atmosférica importante nas análises de interações com a grande escala.

Principal sistema de grande escala responsável pela precipitação na região Sul e Sudeste do Brasil durante os meses de primavera e verão austral é definida como uma banda de nebulosidade persistente de no mínimo 4 dias com orientação noroeste-sudeste, que se estende da Amazônia até o sudoeste do Atlântico Sul (Kodama, 1992, 1993; Satyamurty et al., 1998; Liebmann et al., 1999; Carvalho et al., 2002a, 2004); estruturas semelhantes a ZCAS são encontradas no Pacífico Sul e Índico Sul, embora a ZCIS não seja tão marcante quanto a ZCAS e a ZCPS.

A ZCAS possui um importante papel na transferência de calor, momento e umidade dos trópicos para as latitudes médias, estando relacionada ao transporte de umidade na baixa troposfera e a presença de um cavado à leste da Cordilheira dos Andes, orientado na direção noroeste-sudeste em 850 hPa, também associada a sistemas

como a Alta de Bolívia em altos níveis e a um cavado sobre a região Nordeste ou até mesmo um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) e uma média mensal caracterizada por uma banda de Radiação de Onda Longa Emergente (ROLE) mínima ligada a Amazônia (Ferreira et al., 2004; Kodama, 1992.)

O sistema é observado através do canal de infravermelho dos produtos gerados por satélites, sendo uma banda frontal situada sobre a região Sul e Sudeste do Brasil, e parte do Oceano Atlântico Sul, durante um período de 4 a 20 dias (Figuerola et al., 1995; Figuerola, 1997; Carvalho et al., 2002; Ninomiya, 2007). Para estabelecer a consistência física da ZCAS 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 VCAN; 5) nebulosidade persistente e semi-estacionária em imagens de satélite (Quadro, 1994; Ambrizzi e Ferraz, 2015).

Todd et al. (2003) mostram as características do posicionamento da ZCAS a partir da precipitação diária sobre a América do Sul durante o verão, sendo sua variabilidade associada com: a) a estrutura de ondas de médias latitudes, b) o posicionamento do centro de baixa pressão continental e c) o posicionamento zonal da alta subtropical do Atlântico Sul.

A ZCAS possui ligação e similaridade com outras bandas de nebulosidade como por exemplo a ZCPS. Kodama (1992, 1993) sugere duas condições para ocorrência destas zonas convectivas nas latitudes médias, a primeira é que haja um escoamento do jato subtropical entre 30° e 35° S, e a segunda se refere a um escoamento polar em baixos níveis prevalecendo ao longo da borda oeste das altas subtropicais. Estas condições intensificam a convergência devido ao escoamento de baixos níveis atuando juntamente com o jato subtropical favorecendo a frontogênese e a instabilidade convectiva. Caso estas condições não forem dinamicamente satisfeitas, as taxas de precipitação tendem a ser inferiores, refletindo em um enfraquecimento da zona de convergência. Geralmente, tais condições são satisfeitas no período de verão austral quando há uma maior liberação de calor latente devido ao aquecimento continental, favorecendo a formação da Baixa do Chaco.

2.2.1– Efeitos Remotos

Vários autores apontam para uma influência remota do Oceano Pacífico na atividade convectiva da ZCAS, a partir de teleconexões de escalas intrassazonais. Grimm e Silva Dias (1995b), notaram que a convecção sobre a ZCPS associada a Oscilação Madden-Julian - OMJ (ou ainda oscilação 30-60 dias), poderia disparar ondas de Rossby, que influenciaram na convecção da ZCAS. Liebmann et al. (1999) encontrou evidências que a variação na atividade convectiva da ZCAS durante o período de 6-30 dias é influenciada pela propagação de trem ondas na região extratropical.

A OMJ é um mecanismo de escala intrassazonal, que ocorre na região tropical. Segundo Nógues-Peagle e Mo (1997), a intensificação da ZCAS está relacionada com a fase na qual a OMJ se encontra, havendo maior convecção quando está se localiza sobre a região leste e central do Pacífico, e com condições secas a oeste do Pacífico e Indonésia.

Cunningham e Cavalcanti (2006) investigaram a interação do comportamento da convecção tropical na Indonésia e a circulação extratropical no Hemisfério Sul associada a convecção na ZCAS revelando, na América do Sul, características de um trem de onda de Rossby do tipo Pacific South America (PSA) originado a partir de um distúrbio convectivo da Indonésia, com um período de aproximadamente 25 dias sob condição favorável, este trem estabelece um ciclone anômalo em altos níveis que pode contribuir para reforçar o cavado característico de um episódio de ZCAS. A relação convectiva entre a Indonésia e a ZCAS se manifesta de duas maneiras; diretamente a partir de uma progressão para leste da OMJ e indiretamente, ao formar um trem de ondas tipo PSA sobre o Oceano Pacífico, ligando a Indonésia à América do Sul, o que ocorre quando as regiões Tropical, Subtropical e Extratropical do Hemisfério Sul se acoplam favoravelmente.

2.2.2 – Zona de Convergência do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

Assim como a ZCAS os vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN) já tem sido amplamente estudado devido a sua ação no regime de precipitação no nordeste brasileiro (Kousky e Gan, 1981; Rao e Bonatti, 1987; Mishira et. al., 2001; Brito et. al., 2011, Fedorova et. al., 2017). Os VCAN constituem um sistema característico dentre os

meses de primavera e verão localizado no Atlântico Sul, sendo este similar aos que ocorrem no Hemisfério Norte (nas regiões do Pacífico e Atlântico Norte - Palmer, 1951; Kousky e Gan, 1981).

Figuroa (1997) menciona em seu estudo o acoplamento clássico entre a ZCAS, Alta da Bolívia e o VCAN, concluindo que este acoplamento possui uma dependência em cadeia, (a) VCAN depende da ZCAS, (b) a alta da Bolívia depende da convecção tropical e da ZCAS, (c) a ZCAS depende da convecção da Amazônia e dos transientes de latitudes médias e (d) a convecção tropical ou amazônica depende dos fatores transientes de grande escala.

A formação do VCAN sobre o Atlântico Sul na região nordeste do Brasil foi proposta por Kousky e Gan (1981), a partir do deslocamento equatorial das frentes frias na América do Sul que geram uma intensificação da crista em altos níveis, porém Valverde Ramirez 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 por sua vez devido a conservação de vorticidade o centro do ciclone tende a se desenvolver ao nordeste. A ação em conjunto das ZCAS com os VCAN pode impactar desde a região sudeste até o nordeste do Brasil sendo esse padrão determinado como ZCAS-VCAN (Valverde et. al., 2004, Valverde Ramirez et. al., 1996, 1999, 2006).

2.2.3 – Variabilidade Intrassazonal

Carvalho et al. (2004) constataram que as variações intrassazonais são mais evidentes sobre a América do Sul tropical e subtropical, em especial para região sul e sudeste do Brasil e demonstraram que as modulações da variabilidade intrassazonal diferem para cada tipo de evento, (a) nos casos intensos a variabilidade pode ser modulada pelo regime de ventos de oeste quando o Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) está ativo, em contra partida, (b) os eventos fracos ocorrem em regime de ventos de leste ou seja SMAS inativo, (c) em eventos de ZCAS oceânica, a modulação é dada pela propagação de ondas de Rossby de latitudes médias e o padrão gangorra é estabelecido, enquanto que (d) em eventos de ZCAS continental, a variabilidade também é modulada por ondas de Rossby, exceto com sinal oposto ao da oceânica e ausência do padrão gangorra da precipitação.

De forma similar, Figueroa (1997) observou a variabilidade intrassazonal quando há ocorrência de ZCAS e encontrou duas teleconexões com a ZCPS, a primeira com relação a oscilação 30-60 dias, devido a propagação de um trem de ondas desde a parte sul da ZCPS para região da ZCAS através das latitudes médias com período médio de 42 dias, e a segunda na escala de tempo 20-30 dias, enfatizando uma relação entre a região oeste da ZCPS e a área da ZCAS através de latitudes extratropicais com um período de 21 dias.

Cunningham e Cavalcanti (2006), mostraram que o posicionamento mais ao sul ou mais ao norte da ZCAS pode estar ligado a propagação de ondas por meio de teleconexões dentro da escala intrassazonal, sendo a ZCAS posicionada ao sul sob influência do padrão teleconectivo PSA e ZCAS norte sob a influência da OMJ.

Cerne (2010), em um estudo sobre a variabilidade intrassazonal das ondas de calor na América do Sul, destacou que 73% das ondas de calor que são desenvolvidas neste subtropico estão associadas com a atividade da ZCAS, a partir do desenvolvimento e intensificação de uma anomalia anticiclônica. Essa circulação anômala estaria ligada a propagação de ondas de Rossby pelo sul do Oceano Pacífico, ligando anomalias do oeste equatorial ao Pacífico Central, onde essa anomalia anticiclônica é intensificada por movimentos de subsidência promovidas pela atividade da ZCAS.

Carvalho et al. (2010) ao examinarem as monções da América do Sul interligadas ao transporte de umidade destacaram que a ZCAS tem sua componente intrassazonal associada ao transporte de umidade extratropical do Hemisfério Sul, e que eventos úmidos com a presença tanto da ZCAS como das monções estão associados ao transporte de umidade do sudoeste do oceano Atlântico subtropical.

Marton (2000), ao avaliar oscilações intrassazonais durante períodos de ZCAS, também destacou a importância da OMJ como uma componente intrassazonal da convecção da ZCAS, além da existência da propagação de trem de ondas de Rossby em latitudes médias, com comportamentos diferentes em cada caso com relação ao padrão climatológico. Meehl (2001), em um estudo conceitual sobre o sistema climático, decadal e de grande escala, concluiu que a escala interanual, influenciada pelo ENOS, pode interagir em conjunto com os ciclos anuais e com a variabilidade intrassazonal, demonstrando que o sistema climático não é linear.

Diaz e Acetuno (2003) e Nogués-Peagles e Mo (1997), investigaram a relação de um dipolo na região Sudeste da América do Sul, relacionado a ocorrência de ZCAS e não-ZCAS (NZCAS) ou ZCAS fraca, por meio de observações de dados de ROLE, denominando períodos secos e úmidos neste dipolo, através da propagação de ondas da OMJ. Onde ao depender da fase de propagação da onda há um dipolo de anomalias positivas(negativas) de ROLE sob o Sudeste do Brasil e anomalias negativas(positivas) sobre o Uruguai e Argentina, desta forma enfraquecendo (intensificando) a ZCAS.

Ferraz (2004) ao investigar a variabilidade intrassazonal da precipitação de verão na América do Sul, filtradas e intercaladas nas bandas, 10-20 dias, 20-30 dias, 30-70 dias e 10-100 dias, destacou a relação entre a ZCAS e um trem de ondas em latitudes mais altas provenientes do Pacífico Oeste/Austrália/Índico e do Pacífico Central, característicos da banda 30-70 dias.

Muza (2005) definiu a banda 20-90 como de baixa frequência e responsável pela variabilidade intrassazonal, estando assim semelhante com Van der Wiel (2015), que utilizou a banda de 20 dias passa alta em uma análise de ondas baroclínicas ligada a intrassazonalidade. Matthews (2012) ao analisar a ZCPS de um ponto de vista interanual optou pela banda 200 dias passa baixa em busca de sinais relacionados ao ENOS.

2.2.4 – Variabilidade Interanual – ENOS

Walker (1923) e Walker e Bliss (1932) foram os primeiros a determinar o regime oscilatório denominado como Oscilação Sul (OS), utilizando as relações em fase e fora de fase a partir da Pressão ao Nível Médio do Mar (PNNM), caracterizando um balanço leste-oeste de anomalia entre o oceano Pacífico Central (Taiti) e o Pacífico Oeste (Darwin/Austrália).

Bjerknes (1966, 1969) foi primeiro a propor a conexão entre o fenômeno do El Niño e a OS, denominando o ENOS como um fenômeno interanual com duração de 9 a 36 meses, que envolve interações oceânicas e atmosféricas, podendo ser quantificado por intensidade e fase. O fenômeno é determinado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS) que representa a diferença de anomalia de PNNM entre o Pacífico Central e Pacífico Oeste. Valores negativos (positivos) de IOS são indicadores da fase quente (fria) do ENOS com a ocorrência de El Niño (La Niña).

Liebman et. al. (2001), observaram que durante o verão austral a quantidade de eventos extremos de precipitação associados a variabilidade interanual, no estado de São Paulo, possui correlação positiva com as anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM), no pacífico equatorial.

O ENOS possui grande influência no comportamento da ZCAS de acordo com alguns estudos. Carvalho et al. (2004) observaram que durante a fase quente há uma ZCAS com um caráter e nebulosidade mais oceânica, enquanto na fase fria se observa uma ZCAS mais continental. Ferreira et al. (2004) também corroboraram com os resultados de Carvalho et al. (2004), verificando que eventos de La Niña estão relacionados a presença da ZCIT, enquanto o mesmo não é verificado para os casos Neutros e de El Niño. Em altos níveis, é possível observar vortacidade negativa sobre uma área mais extensa e com valores mais intensos na fase quente, na região ao norte da ZCAS, enquanto para fase fria essa vortacidade é sobre uma área e, em geral mais fraca, levando a crer que o escoamento de grande escala imposto aos eventos de La Niña inibem os movimentos de subsidência nesta região.

Barreiro et al. (2002) observaram a circulação em altos níveis na região da ZCAS com o propósito de investigar a variabilidade do sistema nas escalas interanual e decadal, concluindo que a escala interanual é influenciada de forma remota pela presença do ENOS, onde anomalias quentes estariam relacionadas à maior atividade convectiva na região da ZCAS, corroborando os resultados encontrados por Ferreira et al. (2004).

2.3 – Propagação de ondas de Rossby atmosféricas

As ondas de Rossby são amplamente discutidas na literatura, tanto pela sua ação nas teleconexões atmosféricas, quanto por alterar os escoamentos em altos níveis e modular as características dos sistemas sinóticos (Muller et. al. 2009). As teleconexões são associadas a características do estado básico da atmosfera, podendo fornecer um guia de ondas preferenciais de propagação, sendo estas propagações padrões de teleconexão que coincidem com as localidades dos dutos de oeste (Hoskins e Ambrizzi, 1993).

Os guias de ondas preferenciais foram propostos a partir de um experimento linearmente barotrópico com base nos dados de escoamento em 300 mb de Dezembro a

Fevereiro, estes guias se referem as regiões preferências e principais de propagação a partir dos Jatos das regiões do Atlântico Norte - Norte da Europa, Norte da África – Ásia e o jato do Hemisfério Sul, as setas pretas se referem as regiões preferências de propagação e por vezes demonstrando propagações inter-hemisféricas, como as que se propagam pelo Oceano Pacífico. (Hoskins e Ambrizzi, 1993).

A figura 2 do esquema de Hoskins e Ambrizzi também destaca as regiões que não são favoráveis as propagações de ondas, que são aquelas com contornos pretos maiores nas regiões equatoriais, regiões em que os ventos são preferencialmente de leste.

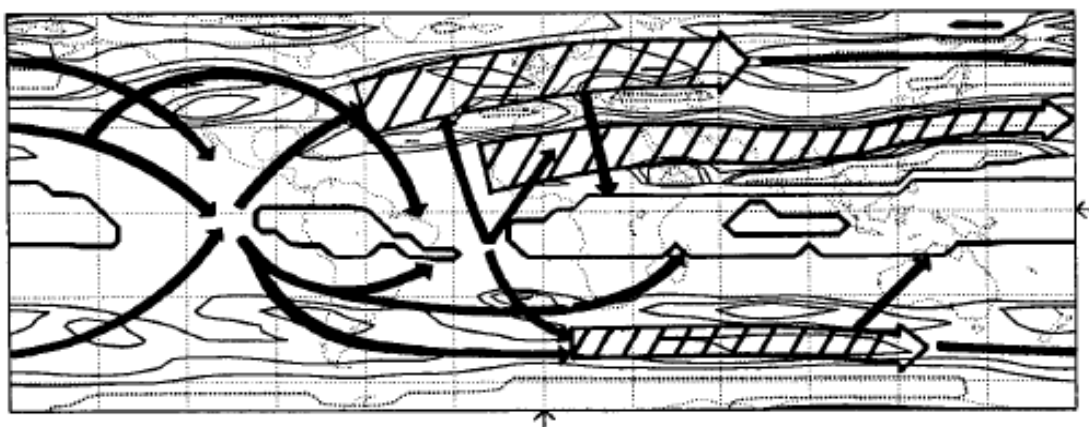


Figura 2 – Guias de ondas apresentado por Hoskins e Ambrizzi (1993), setas hachuradas representam guias de ondas a partir dos jatos do Hemisfério Sul, Atlântico Norte e Norte da África – Ásia, setas pretas, regiões preferenciais de propagação.

As características necessárias para propagação de ondas em geral são encontradas ao longo das correntes de jatos subtropicais durante o inverno em ambos os hemisférios e nas regiões de maior escoamento de oeste, também descritas na literatura como dutos de oeste, que se estende das latitudes médias às equatoriais, durante o inverno e primavera boreal sobre o Pacífico e Atlântico (Kiladis e Weickman, 1997).

Ambrizzi et. al (1995), ao observarem as propagações de ondas durante o inverno austral a partir dos dados de escoamento em 300 mb de Junho a Agosto, destacou guias de ondas no Hemisfério Sul a partir do jato subtropical e polar, e sobre o Hemisfério Norte a partir dos jatos das regiões do Atlântico Norte - Norte da Europa e Norte da África – Ásia, e destacando como regiões preferências de propagação de ondas sob a América do Sul com direção a África, também foi observado a ausência de propagações inter-hemisféricas.

As forçantes destas ondas podem ser localizadas tanto nas latitudes tropicais como extratropicais, sendo a divergência causada pelas fontes de calor uma das principais forçantes para os trens de ondas de Rossby que podem se propagar tanto pelas médias e altas latitudes (Nogués-Paegle e Mo, 1988; Mo e Higgins, 1998; Killadis, 1999; Cunningham e Cavalcanti, 2006). Regiões de forte gradiente meridional do vento, também podem atuar como fonte de energia para o trem de ondas de Rossby a partir da advecção de vorticidade do vento divergente (Sardeshmukh e Hoskins, 1988).

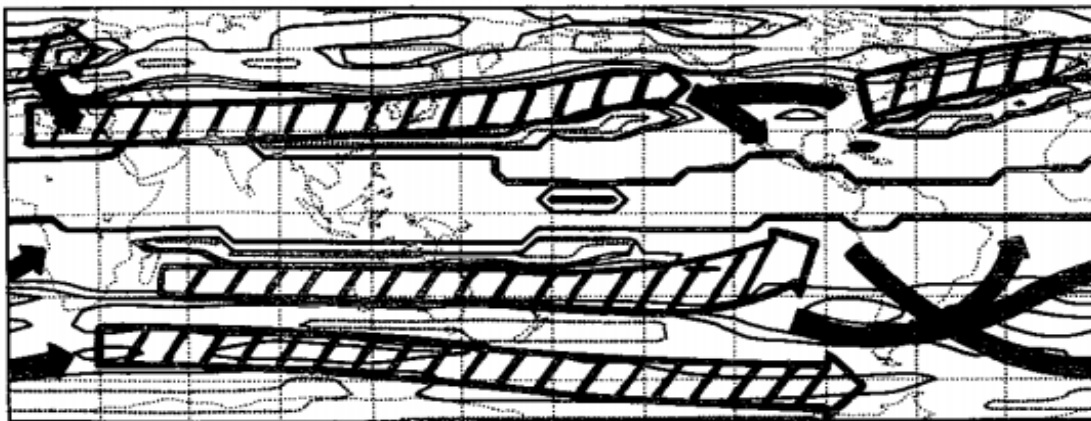


Figura 3 – Guias de ondas apresentado por Ambrizzi et. al. (1995), setas hachuradas indicam guias de ondas a partir dos jatos do Hemisfério Sul subtropical e polar, Atlântico Norte e Norte da África – Ásia, setas pretas, regiões preferenciais de propagação

De acordo com o modelo conceitual de Meehl et. al. 2001, as ondas de Rossby de escala sinótica se propagam pelo estado básico e a partir de influência tanto da escala temporal interanual quanto da escala intrassazonal (ENOS e OMJ). Cunningham e Cavalcanti (2006), ao investigar a escala intrassazonal encontrou padrões de teleconexão Indonésia/América do Sul através da OMJ e de um trem de ondas do tipo PSA.

Muller e Ambrizzi (2007) investigaram a ação da grande escala na região do Pampa Úmido a leste da Argentina durante o inverno, mostrando que os eventos de geadas generalizadas estão associados a um duplo trem de ondas com origem no oceano Índico Tropical que se propaga pelo jato subtropical e polar no Hemisfério Sul e suas fases se unem perto do continente.

2.4 - Ondas de Rossby e ZCAS

Vários estudos relacionam a propagação de ondas de Rossby e eventos de baixa frequência com as zonas convectivas (ZCAS, ZCPS e ZCIS). Algumas metodologias clássicas para analisar esta relação podem ser observadas em Cunningham e Cavalcanti (2006), onde foram utilizadas: a técnica de filtragem 30-90 dias, a de componentes principais e funções ortogonais empíricas para analisar a influência da Oscilação Madden-Julian (OMJ) na ZCAS e, por conseguinte, na convecção tropical da América do Sul. Van der Wiel et al. (2015) e Matthews (2012) utilizaram a mesma metodologia, porém com a filtragem de 20 dias passa alta e 200 dias passa baixa para analisar a influência da propagação de ondas de Rossby na ZCPS.

Todd et al. (2003), a partir de análises harmônicas no campo de altura geopotencial em 200 hPa, observaram estruturas anômalas nas médias latitudes que indicaram que as reversões na estrutura no dipolo de precipitação estariam associadas primeiramente a propagação de onda zonal 4, havendo evidências de um trem de ondas nas médias latitudes que se estende por todo Pacífico oeste com direção a região da ZCAS.

De acordo com Puaud et al. (2016), a co-variabilidade da convecção atmosférica consiste na ligação com a grande escala sobre os setores da América do Sul e da África Austral, resultando no desenvolvimento de um trem de ondas de Rossby contínuo sobre o Atlântico Sul nas latitudes médias, afetando tanto as Zonas de Convergência do Atlântico Sul quanto as do Índico Sul.

Van der Wiel et al. (2015) destacaram a ligação da propagação do trem de ondas de Rossby e a divergência na ZCAS, representado na figura 4. Na América do Sul, um trem de ondas se propaga em direção ao escoamento de oeste no Atlântico (1), as anomalias de vorticidade originalmente quase-circulares obtêm uma estrutura diagonal alongada devido ao cisalhamento na extremidade norte do jato, possuindo assim uma propagação equatorial que é sugerida pela técnica do Traçado de Ondas de Rossby que é demonstrada dinamicamente por uma atmosfera seca, barotrópica e não-divergente, Hoskins e Ambrizzi (1993). A partir de uma anomalia de vorticidade ciclônica, o vento ascende e desencadeia a convecção de forma diagonal (2) e força uma divergência em altos níveis. No entanto, o cálculo do estiramento dos vórtices (vortex stretching) neste caso mostra que a divergência forçada pelas ondas não é forte o suficiente para que ela

3- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – Ondas de Rossby

As ondas de Rossby, também caracterizada como ondas de baixa frequência ou ondas planetárias, foram descobertas em uma análise de distúrbios nos ventos de oeste em médias latitudes por Rossby (1939). A onda de Rossby é uma onda de vorticidade devido a variação do parâmetro de Coriolis com a latitude, que nada mais é do que uma variação da vorticidade planetária na direção meridional, também conhecido como efeito β . De forma mais didática pode ser definida como “famílias de ciclone e anticiclones” devido a existência de movimentos ondulatórios em escala sinótica caracterizado pela alternância de vorticidade negativa e positiva. É uma onda que apenas possui velocidade de fase positiva e, portanto, tem sua propagação de oeste, enquanto para sua velocidade de grupo pode ser tanto para o oeste quanto para leste, caracterizando assim como ondas curtas as que possuem velocidade de grupo para leste e as ondas longas para oeste.

Sua compreensão dinâmica parte da equação de vorticidade barotrópica: sem divergência e derivada para uma solução em uma onda plana no eixo x,y. Neste caso, o fluido tem um movimento puramente horizontal sendo o movimento vertical nulo ($W = 0$).

$$\frac{Dh(\zeta+f)}{Dt} = 0 \quad (1)$$

Sendo assim, uma onda de conservação da vorticidade absoluta, uma vez que não existe divergência, sendo sua existência devido a presença do efeito β , onde sua variação é maior no equador e nula nos polos.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}\right) \zeta + \beta v = 0 \quad (2)$$

Ao assumir um estado básico do vento zonal perturbado, u', v' .

$$u = \bar{u} + u'$$

$$v = v'$$

$$\zeta' = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y}$$

Definindo função de corrente (Ψ)

$$u' = -\frac{\partial \Psi'}{\partial y}$$

$$v' = \frac{\partial \Psi'}{\partial x}$$

Sendo então ζ'

$$\zeta' = \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial^2 x} - \frac{\partial^2 \Psi'}{\partial^2 y} = \nabla^2 \Psi'$$

Então, a partir das perturbações:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^2 \Psi' + \beta \frac{\partial \Psi'}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Assumindo uma solução ondulatória:

$$\Psi(x, y, t) = \psi e^{i(kx - ly + \omega t)}$$

Sendo Ω a frequência da onda, onde k e l são números de onda, zonal e meridional:

$$(\omega - k\bar{u})(k^2 + l^2) + k\beta = 0 \quad (4)$$

A equação de dispersão para ondas de Rossby barotrópicas sem divergência em um escoamento zonal básico de oeste (\bar{U}), é a seguinte:

$$\omega = \bar{U}k - \frac{\beta k}{K^2} \quad (5)$$

Onde K é o número de onda total.

Sendo a velocidade de fase $c = \frac{\omega}{k}$

$$c = \bar{U} - \frac{\beta}{K^2} \quad (6)$$

Organizando alguns termos, obtém-se:

$$\bar{U} - c = \frac{\beta}{K^2}$$

Propagações de oeste para leste são referentes à seguinte condição:

$$\bar{U} - c > 0$$

O termo K^2 também pode ser representado como segue:

$$K^2 = \frac{\beta}{\bar{U} - c}. \quad (7)$$

Para onda de Rossby estacionária, torna-se necessário considerar $\omega = 0$ e, conseqüentemente, $c = 0$. Portanto, tem-se a expressão do número de onda estacionário Ks .

$$Ks = \left(\frac{\beta}{\bar{U}}\right)^{1/2} \quad (8)$$

Desta forma, a propagação de ondas só é possível perante escoamentos de oeste e limitada à áreas onde $\bar{U} - c > 0$ e em regiões onde $\beta > 0$. Sendo esta a relação de guia de ondas proposta por Hoskins e Ambrizzi (1993) e por Yang e Hoskins (1996), pode-se observar na Figura 5, os guias de trem de ondas, baseado no termo Ks conforme apresentado por Van der Wiel (2015), sendo as regiões em cinza claro aquelas que não são favoráveis a propagação de ondas.

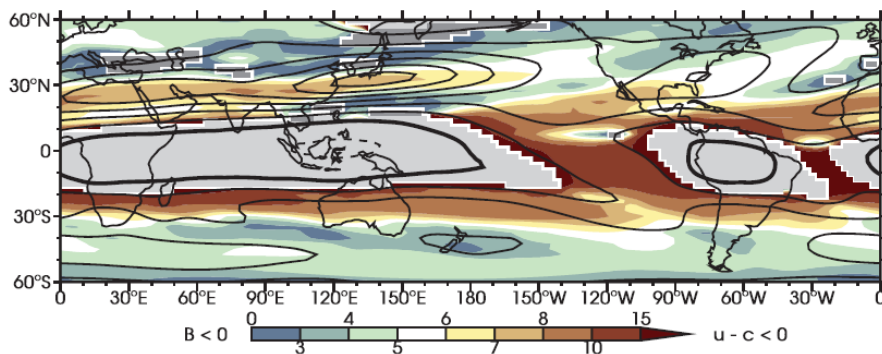


Figura 5 - Esquema proposto por Van der Wiel (2015), vento zonal em 200 hPa, em cinza claro corresponde a áreas onde $(\bar{U} - c) < 0$ (escoamento de leste para oeste).

3.2 - Forçante de Ondas de Rossby

Hoskins e Karoly (1981) e Simons (1982) concluem que as repostas extratropicais resultam das dispersões de ondas de Rossby no globo, com fontes de ondas relacionadas a divergência de altos níveis na troposfera tropical. Grimm e Silva Dias (1995a), ao incluírem a divergência como forçante ao invés da vorticidade em um modelo barotrópico, observaram trens de ondas extratropicais forçados por uma divergência em altos níveis nos trópicos.

Sardeshmukh e Hoskins (1988) determinaram, a partir de um modelo barotrópico de uma camada, que a energia cinética de um escoamento em latitudes médias com um pico próximo de 250 hPa, sendo assim o nível mais apropriado para estudos de interligações trópico-extratrópico. Moon e Ha (2004), seguindo a equação de vorticidade não linear descrita por Sardeshmukh e Hoskins (1985), chegaram ao termo de estiramento dos vórtices (vortex stretching) a partir do termo da divergência e advectivo, descrito na equação (10).

Partindo da equação da vorticidade com divergência, em escala sinótica, obtiveram:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}\right) \zeta - \beta v = -(\zeta + f) \nabla_H \cdot \vec{V} \quad (9)$$

ou

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla_H \zeta - \beta v - (\zeta + f) \nabla_H \cdot \vec{V} \quad (10)$$

Onde: Termo local de tendência de vorticidade relativa $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$; Advecção de vorticidade relativa $-\vec{V} \cdot \nabla_H \zeta$; Advecção de vorticidade planetária $-\beta v$; termo de estiramento dos vórtices $-f \nabla_H \cdot \vec{V}$

Segundo Matthews (2012) e Van der Wiel et al (2015), o termo fonte de ondas de Rossby é dado pelo estiramento dos vórtices, conforme destacado acima.

3.3 - Funções Ortogonais Empíricas (EOF)

A técnica multivariada de análise de componentes principais ou funções ortogonais empíricas (Empirical Orthogonal Function em Inglês - EOF), nomeada por Lorenz (1956) tem como principal objetivo criar um número menor de novas variáveis que representem a maior fração da variabilidade contida nos dados originais, ou seja, a partir de uma série inicial com um grande número de variáveis é então criada uma nova série mas que representam melhor a variabilidade do objeto submetido a esta técnica multivariada para apenas uma maior clareza dos padrões que já estão contidos na série (Wilks, 2006).

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. Em seguida, a covariabilidade restante é sujeita a mesma decomposição com restrição de que seja ortogonal ao primeiro padrão. A técnica é representada por autovetores e autovalores, que representam os modos e a variância explicada por cada modo, na prática apenas os primeiros modos são robustos e com restrição de ortogonalidade e fisicamente significativos (Deser et al., 2010).

O dado de saída da EOF é uma matriz quadrada que representa a variabilidade da série de entrada, ou seja, os diferentes campos de variabilidade que compõem o dado original (modos). Para sua solução, é necessário determinar autovalores e autovetores de uma matriz de covariância, onde L é a matriz que indica a contribuição em percentual de cada EOF, sendo EOF1 a que reconstrói a maior parte da variabilidade dos dados, e por sequência EOF2, EOF3 e EOF4 o restante dos dados significativos da série (Albuquerque, 2013).

A descrição matemática deste método é baseada a partir de uma matriz de dados iniciais, onde seu resultado produz autovetores e autovalores (Peixoto e Oort, 1992). Os autovetores representam padrões espaciais ortogonais que possuem uma variabilidade dada por uma série temporal, enquanto os autovalores são proporcionais a fração da variância total do campo, demonstrada por cada modo da EOF (Shimizu, 2012).

4 – DADOS E METODOLOGIA

4.1 – Dados

Foram calculadas as anomalias dos campos de altura geopotencial, componentes zonal e meridional do vento com base na climatologia calculada de 1985 a 2015 a partir dos dados diários da Reanálise II do National Centers of Environmental Prediction - NCEP (Kanamitsu et al., 2002). Também foram utilizados dados interpolados diários de radiação de onda longa emergente (ROLE) dos satélites do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que são disponíveis até o ano de 2013, para o cálculo da composição de anomalias diárias de ROLE e, por conseguinte, para definição da zona de nebulosidade associada à ZCAS.

Nos resultados apresentados no capítulo 6, foram utilizados os dados no período de 2000 a 2015, para investigar a hipótese abordada no estudo e as relações entre ZCAS e VCAN, enquanto que as análises das propagações de ondas atmosféricas são referentes aos anos de 1985 a 2015. Ambos os conjuntos de dados utilizados são distribuídos em uma grade regular de 2,5 x 2,5 graus de latitude e longitude, com enfoque no Oceano Pacífico e na América do Sul.

4.2 – Análise e Observação dos Dados

Neste contexto, as variáveis de altura geopotencial, componentes zonal e meridional do vento, para o nível de 200 hPa foram analisadas e então separadas entre a ocorrência de ZCAS sob atuação de El Niño, La Niña e períodos neutros do primeiro ao último dia do episódio durante o verão austral dos anos de 2000 a 2015. No total 472 episódios de ZCAS foram analisados, sendo 139 episódios sob atuação de El Niño, 151 episódios sob atuação de La Niña e 181 episódios em anos neutros.

Vale ressaltar que os eventos de ZCAS foram identificados a partir de uma análise técnica e registrados no Boletim Climanálise (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE) e pelo Boletim Agroclimatológico disponibilizado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), enquanto a caracterização de anos de atuação El Niño/La Niña foi realizada a partir do Índice Nino Oceânico (Oceanic Nino Index, *ONI*) disponível pela NOAA. (www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensos_tuff/ensoyears.shtml).

4.3 – Cálculo de Anomalias

Primeiramente foi calculada a média mensal climatológica e posteriormente realizada interpolação linear para valores diários dessa climatologia. A seguir, anomalias diárias foram calculadas a partir da série climatológica e os campos totais diários. Tendo assim anomalias diária de ROLE, altura geopotencial, vento zonal e meridional.

4.4 – Composições Médias

Após a definição dessas anomalias e da ocorrência de eventos, calculou-se um campo médio anômalo para cada variável, onde foram geradas três composições médias para cada variável: uma composição de El Niño, uma composição de La Niña e uma composição de anos neutros, sendo descritos na equação abaixo:

$$CM = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{n} \quad (11)$$

- CM – Composto médio.
- φ – Variável anômala (geopotencial, componentes zonal e meridional do vento).
- n – quantidade de dias sobre atuação de El Niño ($n = 139$), La Niña ($n = 151$) e anos neutros ($n = 181$).

Com a definição das composições médias, foram observadas as diferenças entre estes campos, porém para resultados mais consistentes os dados foram filtrados para a realização de um novo campo médio anômalo, mantendo-se apenas as variabilidades nas bandas intrassazonal (20-90 dias) e interanual (acima de 200 dias).

4.5 – 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 $\Omega(f)$ determinado pela transformada de Fourier dos pesos dados pela expressão (12).

$$\omega(n) = \frac{\text{sen}(2\pi f_{c2}n)}{\pi n} - \frac{\text{sen}(2\pi f_{c1}n)}{\pi n} \quad (12)$$

Onde f_{c2} e f_{c1} 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 (13).

$$n \geq \frac{1.3}{f_{c2} - f_{c1}} \quad (13)$$

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 das 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 (11.687 dias, 31 anos), gerando uma nova série filtrada de 11.427 dias que encobre todos os verões destes 31 anos.

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

Após a filtragem foram realizados novos campos médios anômalos, comparando assim a variabilidade interanual e a intrassazonal isoladamente, com intuito de compreender a propagação das ondas de Rossby em meio ao escoamento atmosférico durante a ocorrência dos eventos ZCAS considerados.

4.6 - Aplicação das Funções Ortogonais Empíricas (EOF)

A técnica de EOF é uma técnica estatística em grande uso na meteorologia, uma vez que determina sinais de variabilidade espacial e temporal. O resultado dessa análise é uma nova série temporal dividida em modos ortogonais, ou seja, uma nova série temporal dividida em modos a partir da sua variância e que não são correlacionados entre si, porém ambas partem da mesma matriz inicial, sendo assim uma divisão da

série inicial em modos estatísticos auxiliando desta forma a interpretação e compreensão de propagação de ondas.

O cálculo das EOF foi efetuado por meio de uma implementação da linguagem Fortran ao GrADS, sendo aplicado nas séries temporais anômalas e nas séries filtradas, durante o período de 1985 a 2015, com o propósito de uma melhor compreensão da propagação de ondas de Rossby no Hemisfério Sul e das anomalias de ROLE na América do Sul.

4.7 – Fluxograma da Metodologia utilizada

No fluxograma apresentado Figura 6, podem ser observados de forma resumida os passos da metodologia utilizada neste trabalho.

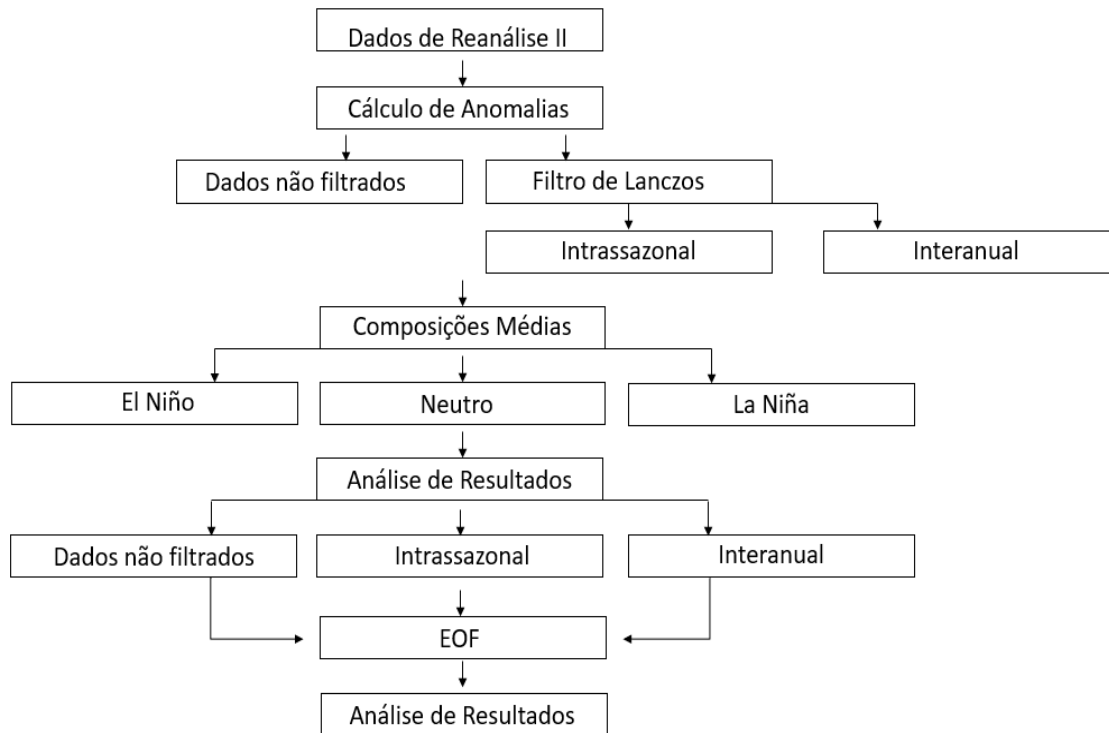


Figura 6 – Fluxograma da metodologia utilizada.

5 – RESULTADOS PROPAGAÇÕES DE ONDAS

5.1 - Padrão de ondas de Rossby atmosféricas durante o verão no Hemisfério Sul

Neste capítulo são observados os padrões de ondas de Rossby, durante o DJF de 1985 a 2015, a partir dos dados de anomalia de geopotencial em 200 hPa, filtrados na banda intrassazonal (20-90 dias), com o objetivo de observar de forma singular a propagação destes trens de ondas no Hemisfério Sul, a partir da aplicação da técnica de EOF não rotacionada, as análises a seguir são divididas em dois conjuntos referente aos períodos de 1985-1999 e 2000-2015, com o objetivo de ressaltar possíveis diferenças entre os conjuntos de dados provocadas por uma flutuação interdecadal.

5.2 – Verão 1985 – 1999

Os padrões de verões (DJF) durante os anos de 1985 a 1999, são destacados na figura 7, representada pelo campo médio o qual corresponde a quase todo Hemisfério Sul (Figura 7.a) e pelos modos das EOF na área de 15° S a 80° S, 120° E a 0° W, esta área foi delimitada a somente a região de atuação da propagação de ondas do tipo PSA, com intuito de melhor caracterização destes padrões.

A composição média (Figura 7.a) destaca uma propagação de onda clássica do padrão PSA (Figura 1), e pode ser melhor compreendida pelos modos da EOF. Os três modos permitem a compreensão de que estes trens de ondas partem do sul da Austrália ou do oceano Índico com direção a América do Sul, e continuam a se propagar pelo Atlântico Sul. O primeiro e segundo modo (Figura 7.a, b.) representam bem esta continuidade de propagação com direção ao Atlântico Sul, além de representarem o mesmo tipo de propagação de onda, porém com origem diferente, ambos os modos partem do sul da Austrália, mas o segundo modo parte de uma região mais ao sul que o primeiro modo e mais próxima da Nova Zelândia.

O terceiro modo (Figura 7.d) é o que representa uma propagação mais longa que os anteriores e com origem ao sudoeste da Austrália/Oceano Índico e não apresenta sinais de continuação de propagação para além da América do Sul. Este modo também é representado nos verões de 2000 a 2015 e com a menor variância entre os padrões, sendo assim um padrão de propagação característico destes trens de ondas.

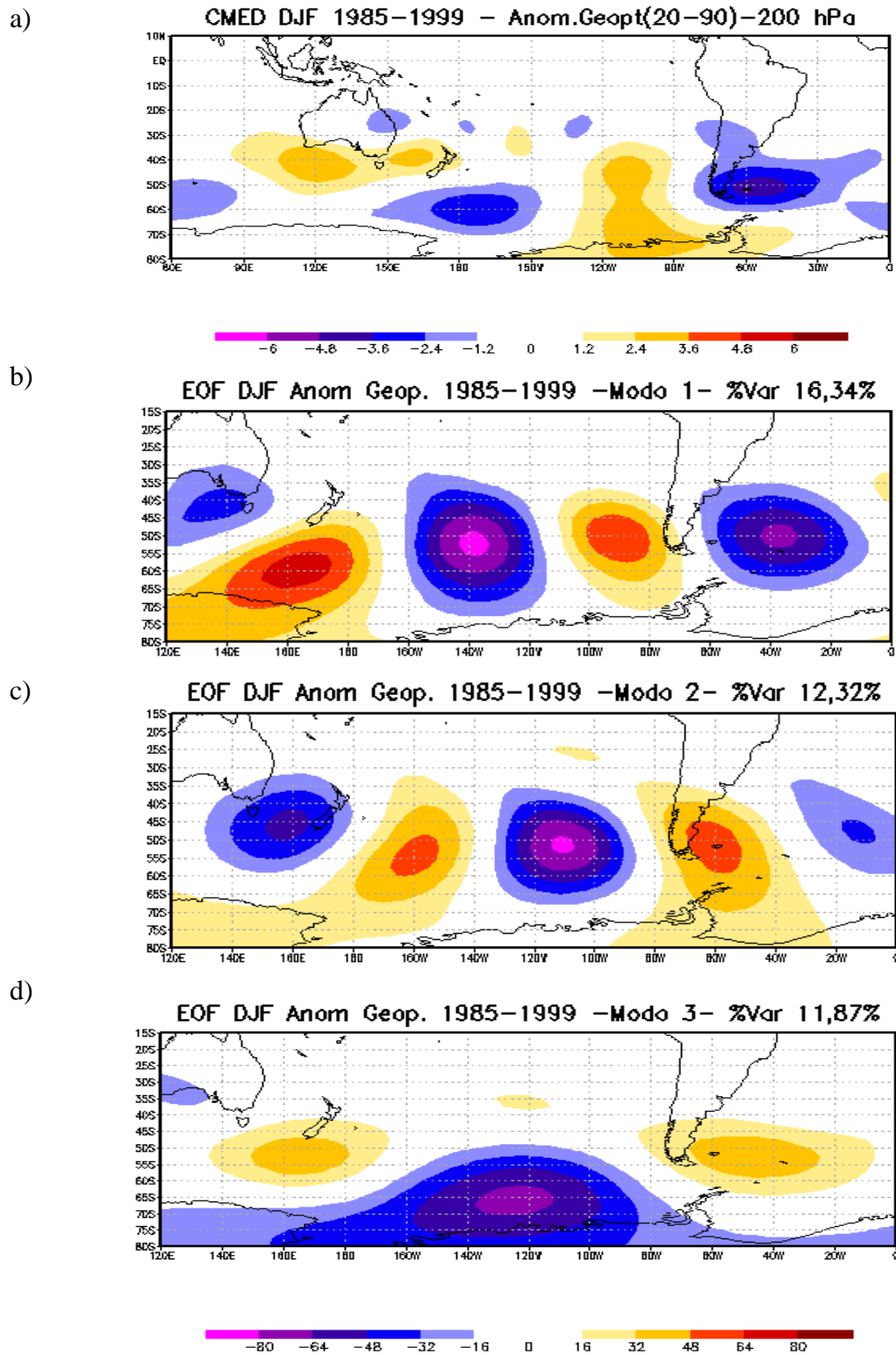


Figura 7 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 1985-1999, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias; b) Modo 1 da (EOF); c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.

5.3 – Verão 2000 – 2015

Os padrões de verões (DJF) durante o período de 2000 a 2015, estão representados na Figura 8. Assim como na sessão anterior, também é observado o campo médio sob a maior parte do Hemisfério Sul, e a área delimitada aos padrões de ondas entre o Oceano Pacífico e América do Sul.

Nas composições da Figura 8, o campo médio possui um padrão PSA mais clássico com relação as composições de 1985 a 1999, e tendo como semelhança a região de início da propagação localizada ao sul da Austrália. Outro fator interessante é que as anomalias de altura geopotencial em 200 hPa estão mais distantes da média, com anomalias positivas e negativas mais intensas do que o padrão de 85-99.

Os modos da EOF também têm algumas semelhanças e diferenças com o padrão 85-99. A principal diferença é que o modo de maior variância (Figura 8.b) apresenta um padrão de onda mais longa, porém pelo mesmo caminho, sendo um padrão de onda não identificado nos principais modos do padrão anterior, sendo este um indício de uma diferente forma das ondas se propagarem durante o período de 2000 a 2015.

O Segundo modo o qual é representado pela Figura 8.c, é semelhante aos dois primeiros modos do padrão anterior, demonstrando assim uma persistência da propagação de uma onda zonal 3. O terceiro modo também tem semelhanças com o padrão anterior, sendo uma propagação de onda mais longa, porém durante este período localizado mais a Oeste com relação ao padrão 85-99.

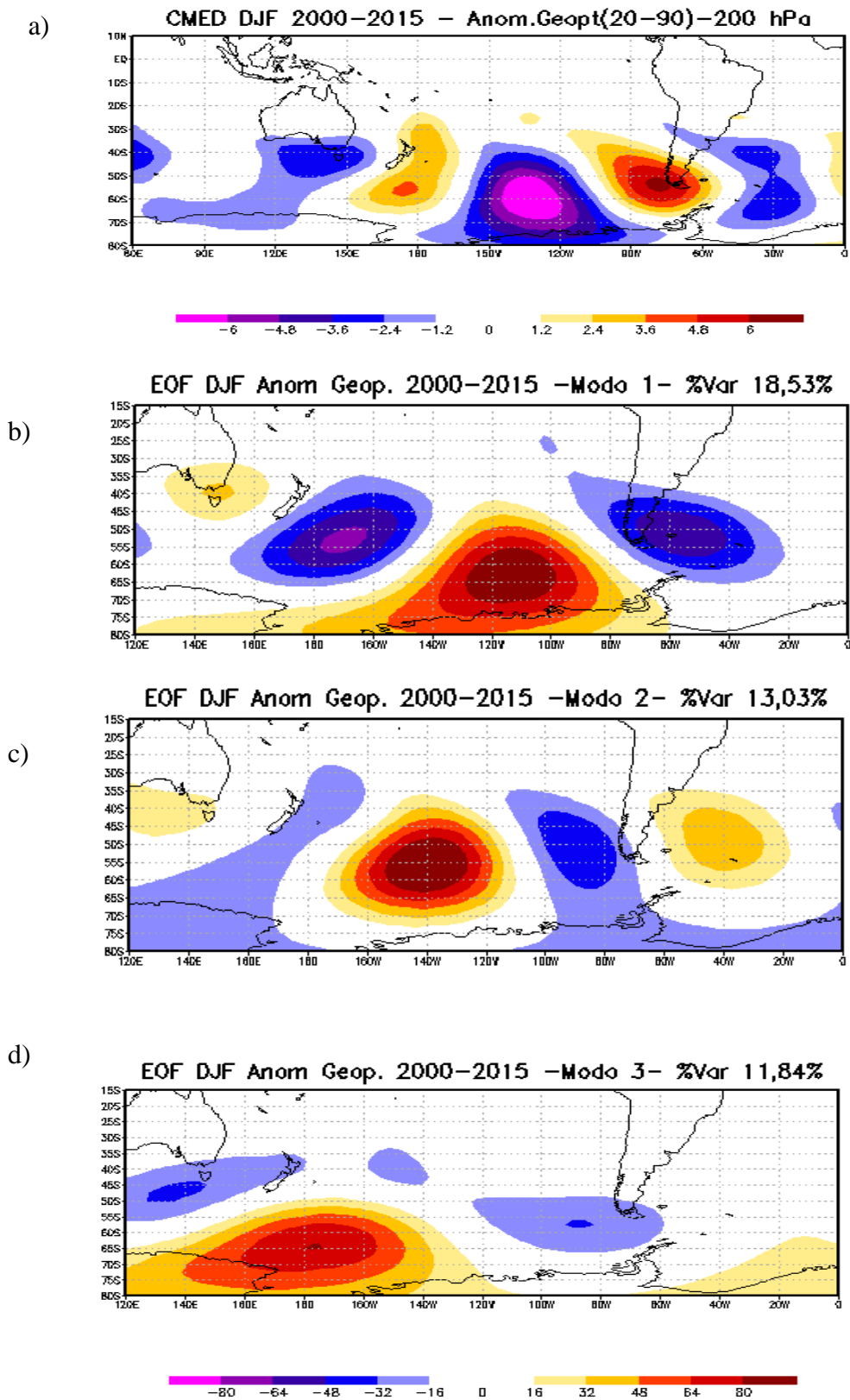


Figura 8 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 2000-2015, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias; b) Modo 1 da (EOF); c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.

5.4 – Verão 1985 – 2015

As análises de todo o período de verão (DJF) de 1985 a 2015 também foi observada e aplicada a mesma técnica e nas mesmas condições com o intuito de compreender esses modos em uma escala temporal maior durante a variabilidade intrassazonal nos dados de anomalia de geopotencial em 200 hPa, de modo a caracterizar os principais tipos de propagação de onda de Rossby com direção a América do Sul.

O composto médio (Figura 9.a) é semelhante a ambos padrões tanto de 85-99 como de 2000-2015, sendo um padrão clássico de propagação de ondas do tipo PSA, e com mesma estrutura e sendo uma onda zonal 3 sob o Oceano Pacífico, exatamente como nos compostos anteriores. Com relação aos modos de EOF, os três principais modos citados também são observados, porém o primeiro modo (Figura 9.b) é semelhante ao primeiro modo representado pela Figura 8.b, sendo que em polaridade invertida. Como as análises de EOF não possuem dependência física das variáveis, então é possível dizer que foi identificado o mesmo padrão de ondas, mas com 15,24% de variância, aproximadamente 3% a menos que o modo apresentado no padrão 2000-2015, porém em uma escala de tempo maior.

O segundo modo (Figura 9.c) possui 14,13% de variância e sendo exatamente aquele que representa o padrão de onda mais curto identificado no primeiro modo durante os verões de 1985 a 1999 (Figura 7.b), e como segundo modo durante os verões de 2000 a 2015 (Figura 8.c). Assim como o segundo modo, o terceiro também é observado nos padrões anteriores como a propagação de onda mais longa, porém mais a oeste com relação ao verão de 1985 a 1999, sendo semelhante ao terceiro modo dos verões de 2000 a 2015 (Figura 8.d).

Estes resultados sugerem que os trens de ondas do tipo PSA, possuem diferentes formas de propagação de acordo com o seu número de onda, e alguns destes relevantes apenas durante o período de 2000 a 2015, como o padrão ondulatório mais longo observado pelas figuras 8.b e 9.b, possivelmente em resposta aos sinais de baixa frequência interanual ou interdecal, visto que este mesmo padrão ondulatório não é observado durante o período de 1985 a 1999.

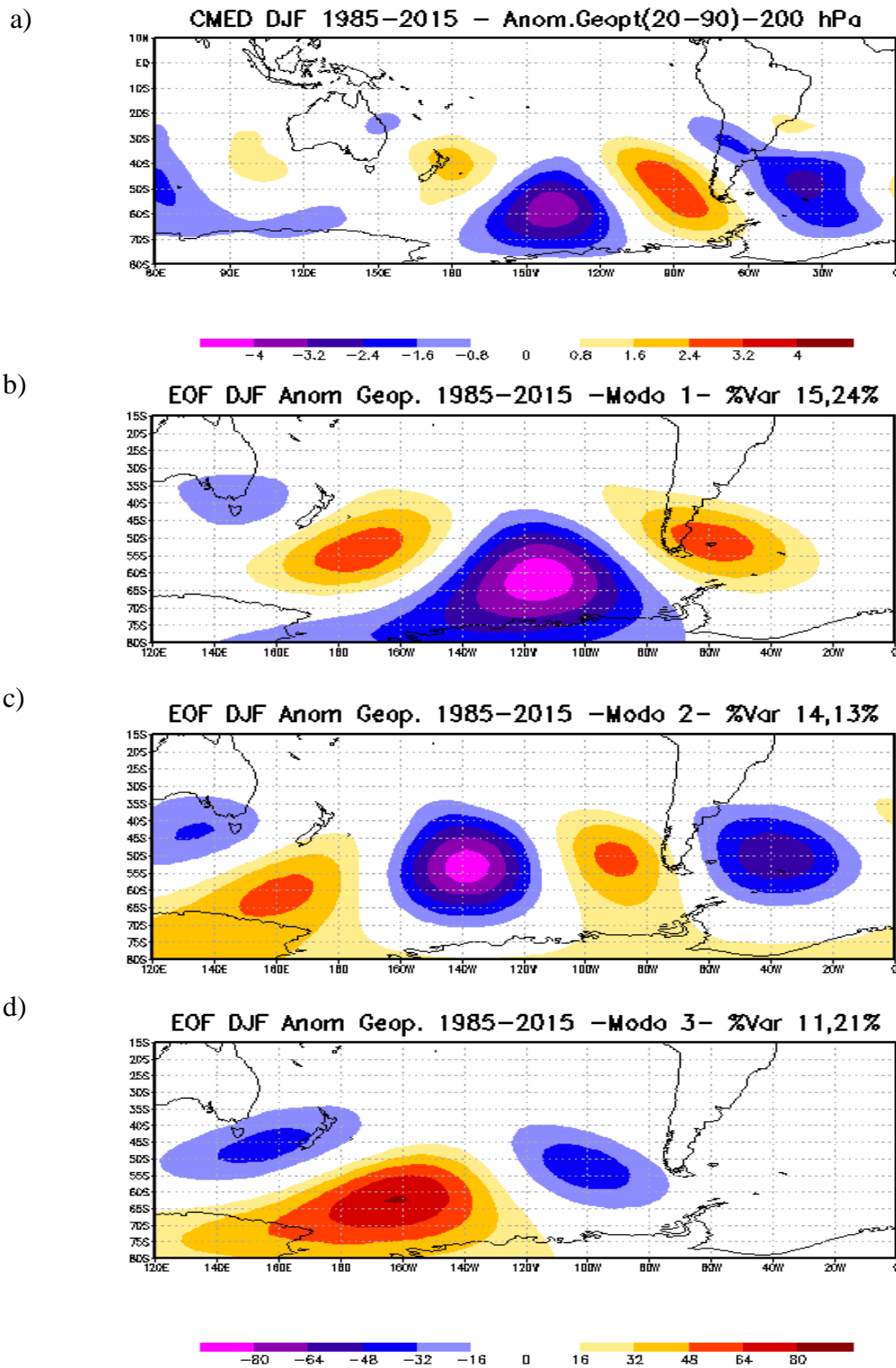


Figura 9 –Anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 20-90 dias dos verões de 1985-2015, a) Composição média de DJF - 20 – 90 dias; b) Modo 1 da (EOF); c) Modo 2 da EOF; d) Modo 3 da EOF.

5.5 – Composições médias interanuais dos verões 1985-1999 e 2000-2015

Nesta sessão são analisados compostos semelhantes ao da sessão 5.3, porém sendo considerado campos filtrados na banda 200 dias passa baixa, que são representativos da escala interanual. Esta análise foi realizada com o intuito de compreender a diferença entre as propagações dentre os dois períodos observados, a partir do sinal da baixa frequência.

As composições da variabilidade interanual de cada período analisado podem ser observadas na Figura 10, onde é de fácil visualização a predominância de anomalias negativas durante os verões de 1985 a 1999 (Figura 10.a), predominância de anomalias positivas durante os verões de 2000 a 2015 (Figura 10.b). Sendo este um sinal de escala interanual ou interdecadal. Estes resultados são consistentes com o período de atividade das fases da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), que esteve presente durante a fase quente no período de 1985 a 1999 e fria de 2000 a 2015 (NCEP/NOAA).

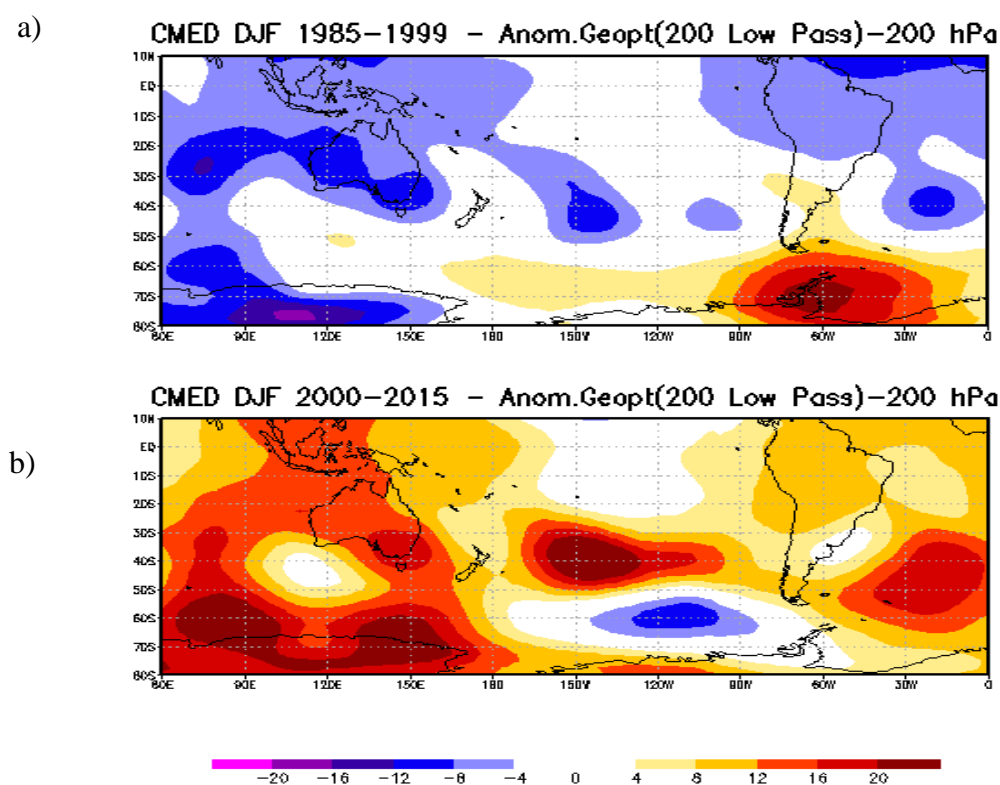


Figura 10 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 200 dias passa baixa dos verões de; a) 1985-1999; b) 2000-2015.

Com intuito da compreensão dos padrões destacados na Figura 10, foram observadas as séries temporais dos verões das anomalias de geopotencial em 200 hPa filtrada na banda 200 dias passa baixa nos pontos de maior contraste, de modo a caracterizar a tendência desta série. Sendo assim selecionadas as regiões de 35°S – 150°W, 40°S – 20°W e 45°S – 140°E, representados pela Figura 11, a qual destaca uma tendência de anomalias positivas na série observada, onde a partir dos anos 2000 é evidenciado o aumento destas anomalias.

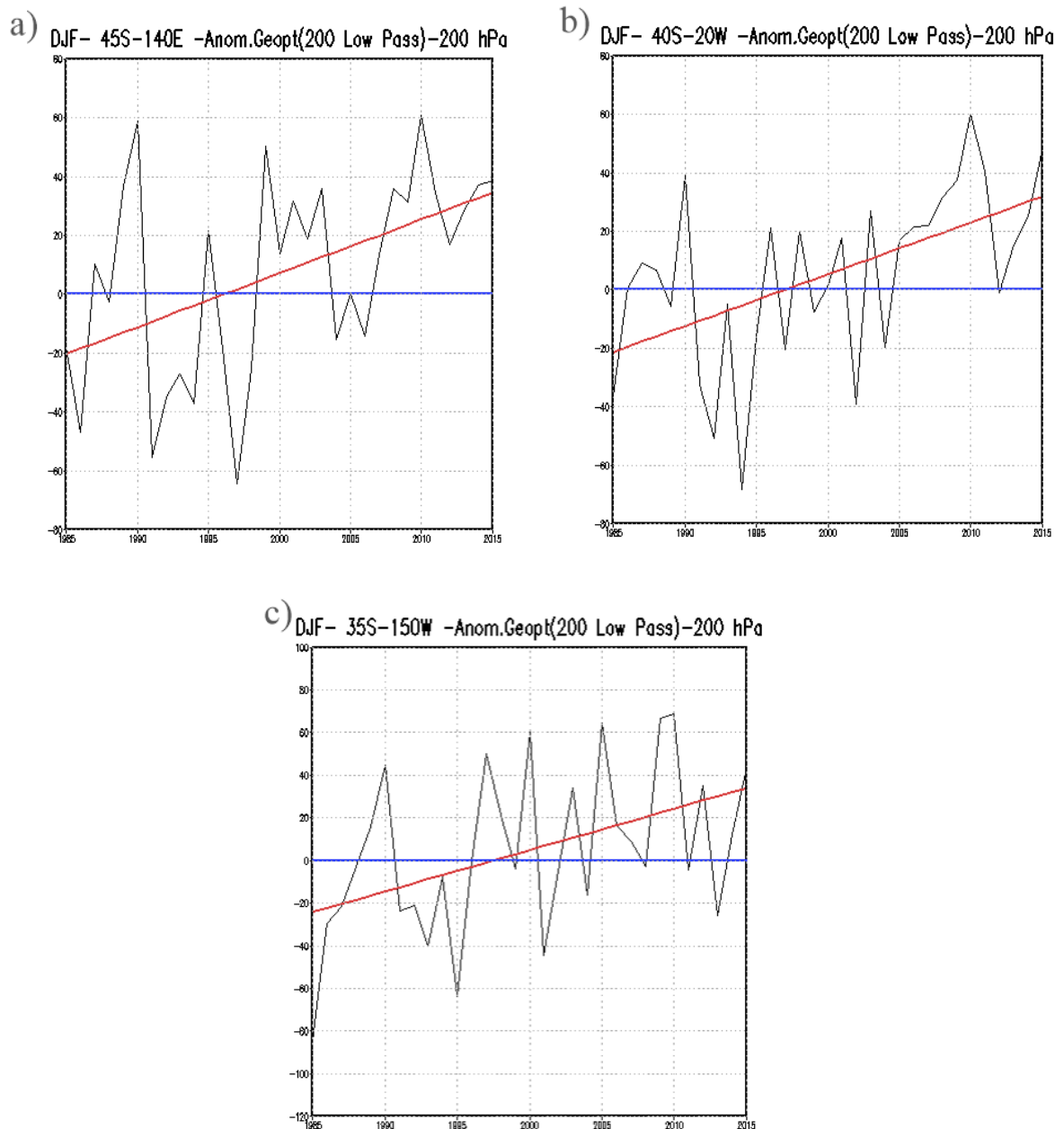


Figura 11 – Série temporal dos verões de 1985 a 2015 das regiões; a) 45°S – 140°E; b) 40°S – 20°W; c) 35°S – 150°W.

6 - PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATMOSFÉRICAS E A ZCAS

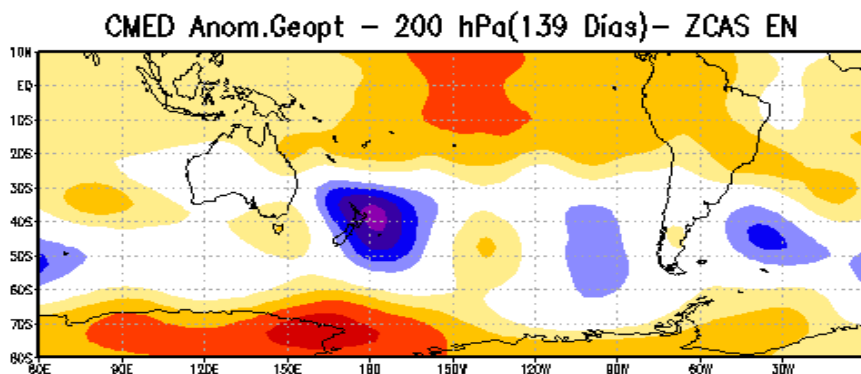
6.1- Padrões de ZCAS

Neste capítulo são abordados os padrões de ZCAS na grande escala referentes a ocorrência de El Niño, La Niña e anos neutros, através de uma análise subjetiva e visual, entre a comparação destas composições médias a partir das variabilidades interanual e intrassazonal. Foram analisados 472 episódios (dias de ocorrência) de ZCAS durante o período de 2000 a 2015, sendo 139 dias durante o período de El Niño, 151 dias durante o período de La Niña e 182 dias em anos neutros.

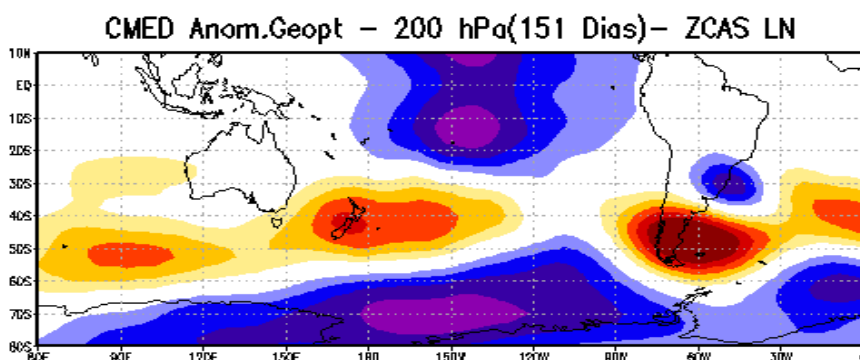
6.1.1- Altura Geopotencial

De acordo com as composições médias de anomalias de altura geopotencial (Figura 12) são destacados padrões opostos tanto na América do Sul quanto no Pacífico Central quando comparado as composições em fases distintas do ENOS. A Figura 12 ainda destaca a semelhança entre as composições não filtradas com as filtradas passa baixa, o que está de acordo com os resultados já esperados para esta análise individualmente, uma vez que as composições médias anômalas não filtradas foram separadas entre anos de El Niño e La Niña, enfatizando assim a variabilidade interanual.

a)



b)



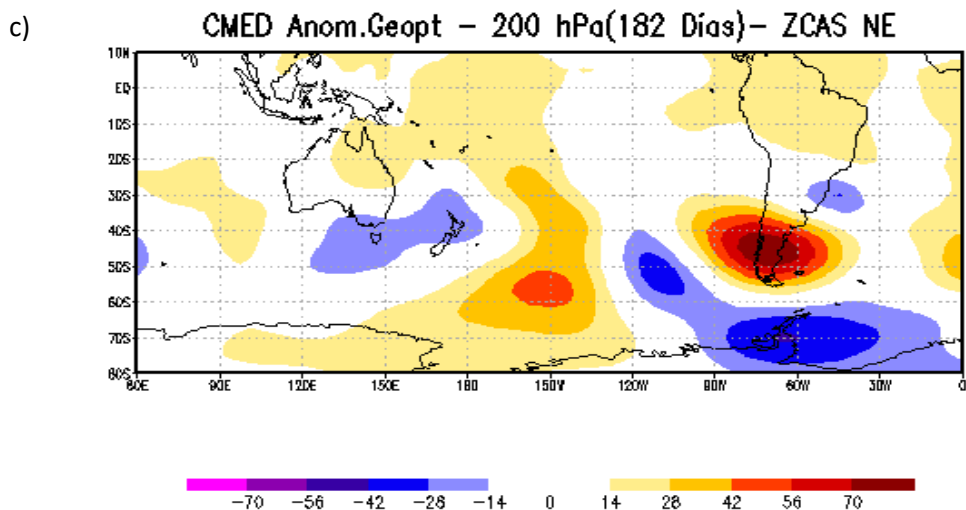
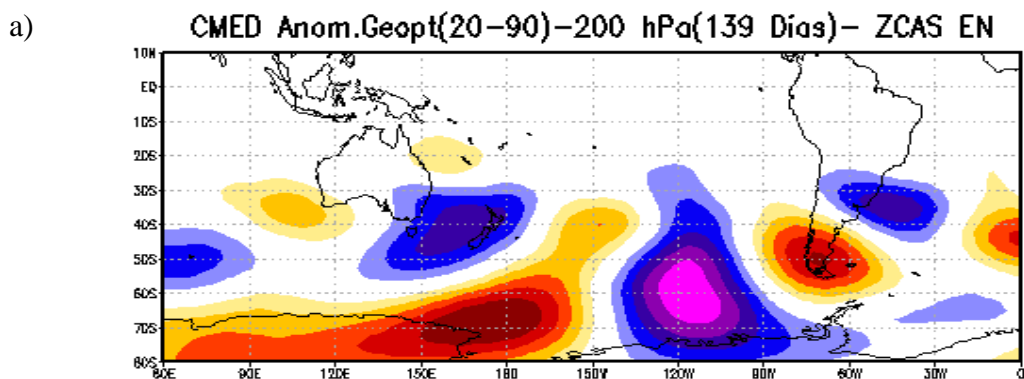


Figura 12 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial não filtrada, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.

6.1.2- Altura Geopotencial (Intrassazonal)

De acordo com o campo médio de anomalia da altura geopotencial em 200 hPa filtrada pelo filtro de Lanczos na banda 20-90 dias (intrassazonal) observado pela Figura 13, nota-se que em ambas as composições é representado um padrão PSA (Pacific South América) de trem de ondas de Rossby que parte do sul da Austrália com direção a América do Sul. Outro ponto em destaque destas composições refere-se ao cavado associado as anomalias de altura geopotencial negativas na América do Sul que possui um prolongamento continental observado de 30°W 35°S a 60°W 30°S em eventos ZCAS sob a ocorrência de El Niño (Figura 13.a), fato não observado no campo médio referente aos eventos que ocorreram durante anos de La Niña, sendo representado apenas por um cavado sob a região oceânica em 30°W 30°S. Este resultado é semelhante aos de Carvalho et. al. (2004) onde define como ZCAS continental (oceânica) episódios que ocorreram durante anos de El Niño (La Niña). A análise dos anos neutros é semelhante a verificada para os casos com ocorrência de La Niña.



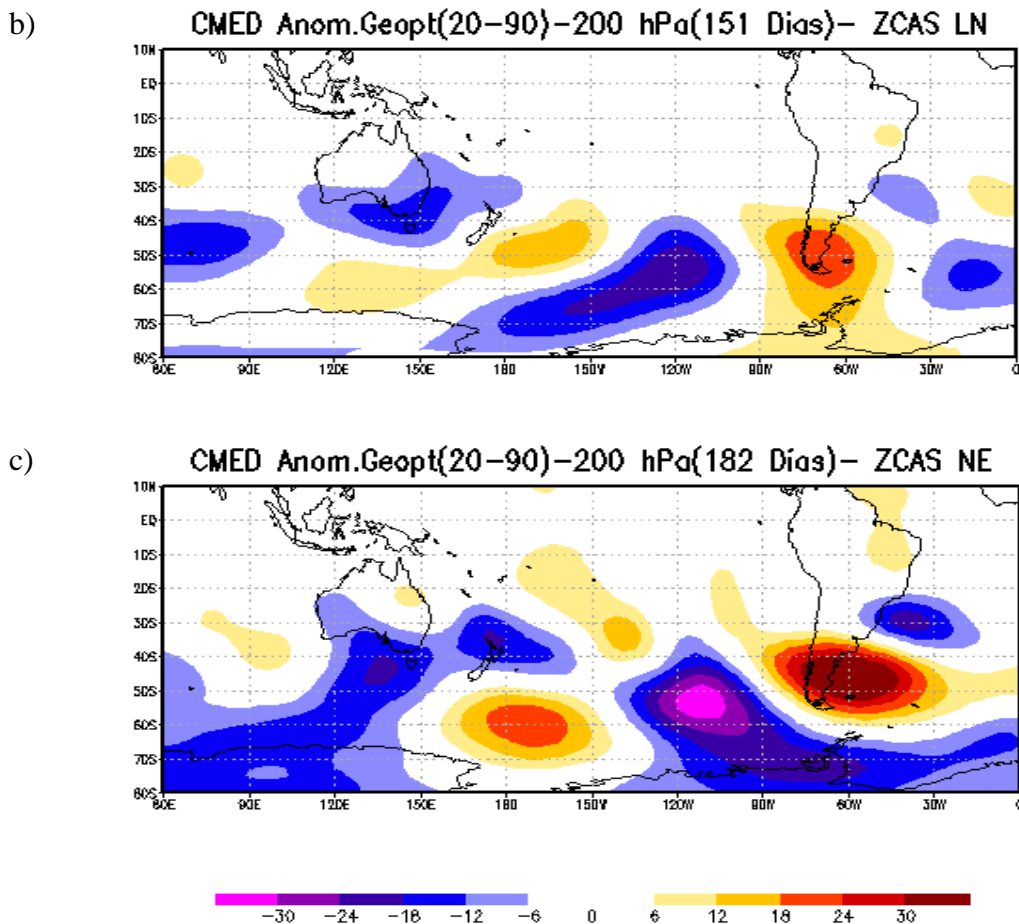


Figura 13 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial filtrada 20-90 dias, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.

6.1.3 - Altura Geopotencial (Interanual)

A análise referente a variabilidade interanual é representada pela Figura 14, através do filtro de Lanczos na banda 200 dias passa baixa, sendo apenas observado a baixa frequência de acima de 200 dias. Neste composto é bem nítida o a ação do El Niño com anomalias positivas na alta troposfera no Pacífico Central e ao Sul do Hemisfério Sul (Figura 14.a) e anomalias negativas quase que opostas quando há ação da La Niña (Figura 14.b). Também é possível observar a ausência de anomalias negativas e apenas fraca anomalias positivas nos anos neutros, demonstrando assim a ausência de sistemas atmosféricos que afetem a baixa frequência na escala de tempo interanual.

Ainda na Figura 14.a, é possível notar uma inversão de fase de propagação de onda se comparado com a variabilidade intrassazonal (Figura 13.a), que pode ser observada em mais detalhes na Figura 15.

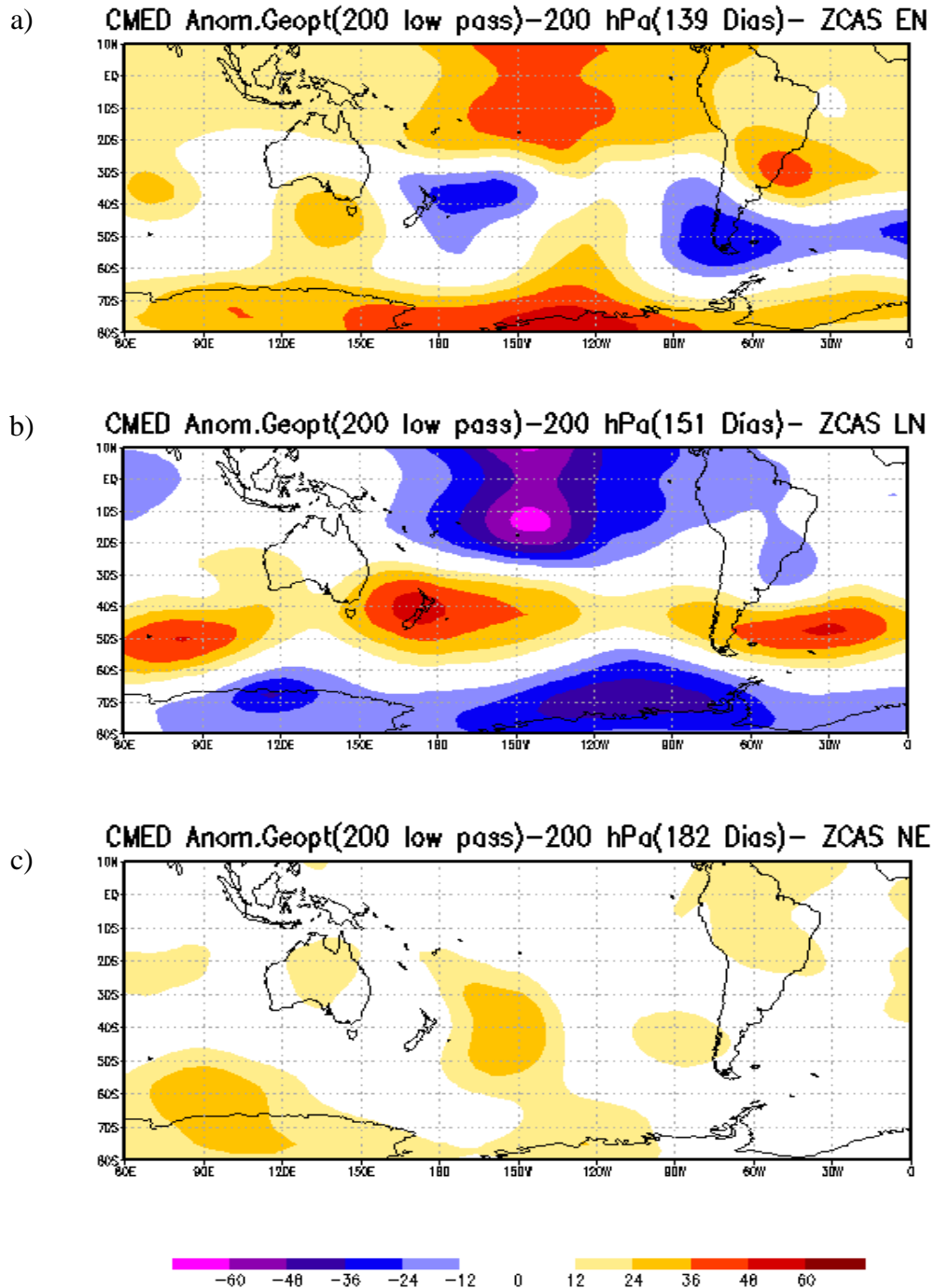


Figura 14 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial filtrada 200 dias passa baixa, em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) anos neutros.

6.1.4 - Altura Geopotencial (Intrassazonal x Interanual)

A propagação de ondas de Rossby na escala interanual e intrassazonal durante eventos de ZCAS sob a ocorrência de El Niño se encontram com polaridade invertida (fora de fase), sendo possível de se observar na Figura 15.a.b com enfoque na América do Sul. A variabilidade intrassazonal destaca a presença de um cavado (anomalia de geopotencial negativa – Figura 15.a), enquanto que, no interanual pode-se observar a presença de uma crista (anomalia de geopotencial positiva – Figura 15.b). Durante a ação da La Niña essa inversão de polaridade entre as variabilidades temporais intrassazonal e interanual não é observada, sendo então uma ação em conjunto, desta forma a variabilidade interanual atua como um reforço a variabilidade intrassazonal.

Ferreira et. al. (2004) destaca que eventos ZCAS sob atuação de El Niño possuem menos dias ativos, com no máximo de 3 episódios por ano, enquanto sob ação de La Niña, há mais dias ativos com no mínimo 3 episódios por ano e podendo chegar até 5 episódios de ZCAS.

Através da Figura 15, é possível verificar que a quantidade de dias ativos de ZCAS a partir da variabilidade interanual pode ocorrer de acordo com a fase em que a onda se encontra em relação com a variabilidade intrassazonal. Sendo assim, os eventos de ZCAS durante a ocorrência de La Niña possuem mais dias ativos uma vez que o cavado associado a ZCAS em altos níveis é favorecido pela variabilidade interanual, fato que não ocorre durante a ação do El Niño, pois a variabilidade intrassazonal precisa ser forte o suficiente para manter a ZCAS em uma condição que é desfavorecida pela variabilidade interanual.

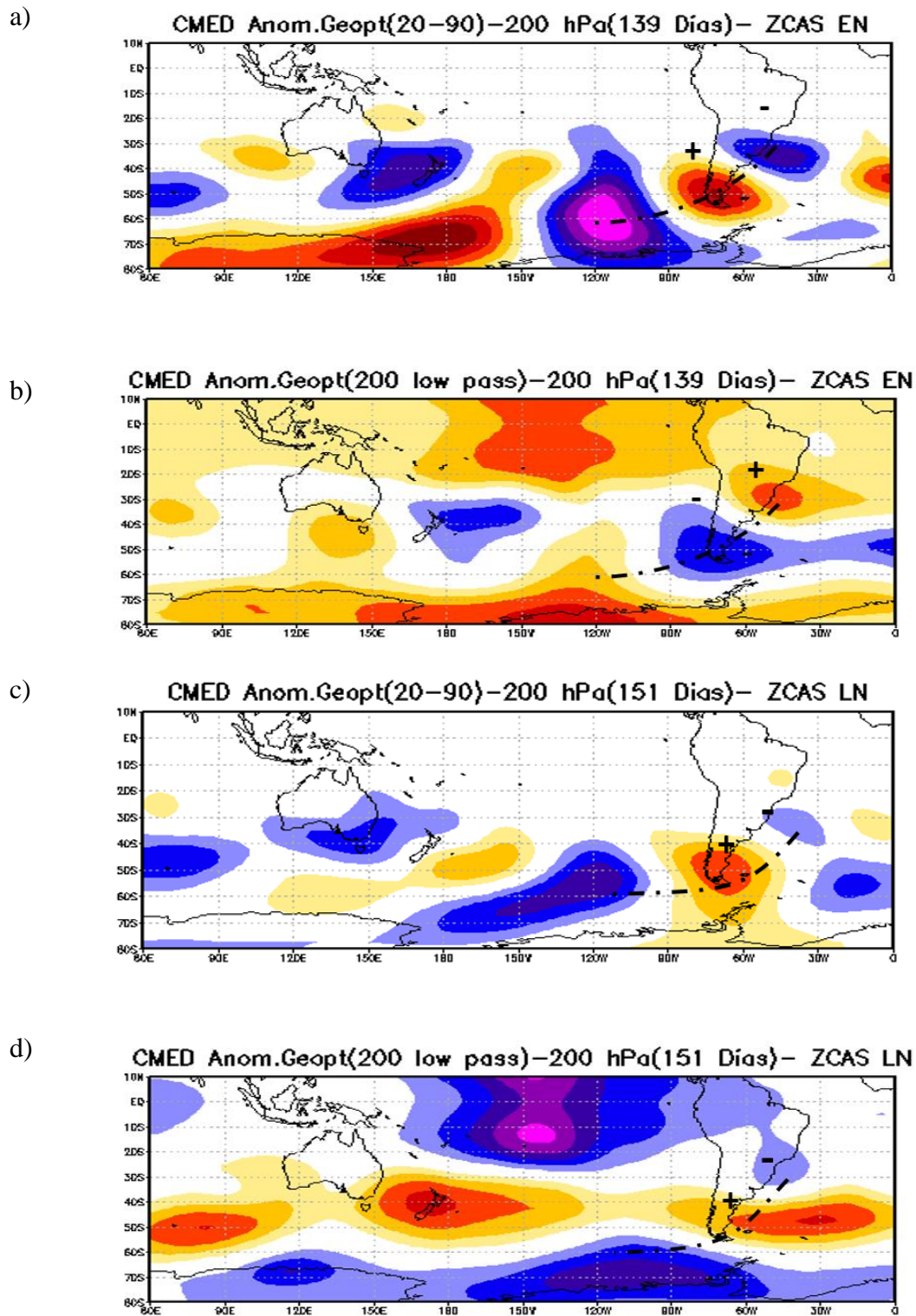


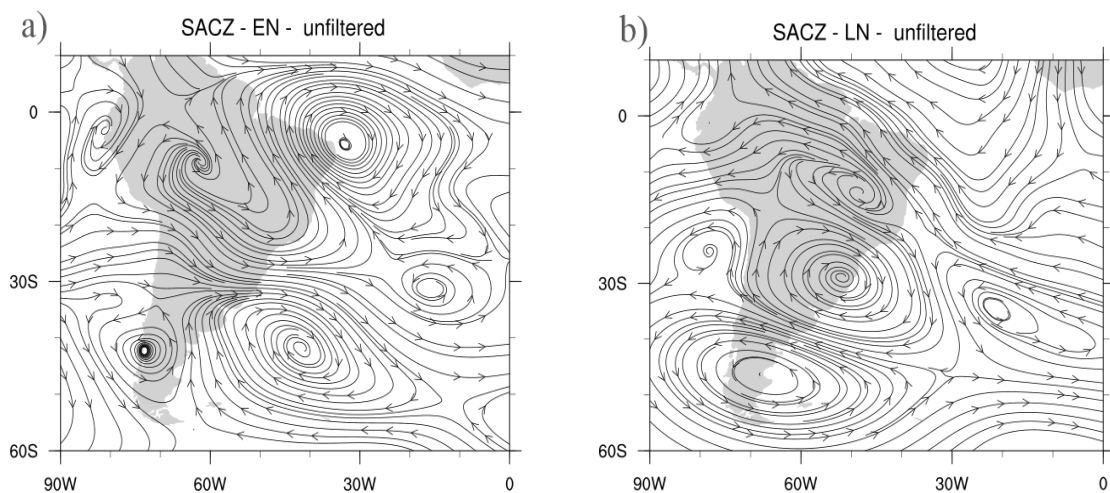
Figura 15 – Composição média de anomalia diária de Altura Geopotencial em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño – 20 – 90 dias, b) El Niño – 200 dias passa baixa, c) La Niña – 20 – 90 dias, d) La Niña – 200 dias passa baixa.

6.2- Padrões de ZCAS em altos níveis na América do Sul

Nesta sessão são abordados os padrões de ZCAS referentes a ocorrência de El Niño, La Niña e Neutro, com enfoque na América do Sul, através da mesma metodologia de análise da sessão anterior com as composições médias e as escalas temporais.

A análise da composição média das anomalias de linhas de corrente de vento (u e v) em 200 hPa sob a atuação de ZCAS representadas pela Figura 16, evidenciam padrões diferentes da circulação em altos níveis. Destaca-se na América do Sul um VCAN bem definido em eventos ZCAS sob atuação do El Niño (Figura 16.a), enquanto em eventos de La Niña apresenta-se apenas um cavado invertido oceânico na região de atuação do VCAN (Figura 16.b). Ambas as composições evidenciam a Alta da Bolívia e uma circulação ciclônica no Sul/Sudeste brasileiro, sendo este ciclone oceânico (continental) sob atuação de El Niño (La Niña).

Fica evidente na Figura 16 que o VCAN em períodos El Niño é melhor estabelecido/organizado em comparação aos de períodos La Niña e anos neutros. O trabalho de Ramirez (1996) também destaca que o VCAN é mais profundo (200-500 hPa) e extenso em anos de El Niño. Portanto, é possível que essa maior profundidade do VCAN também esteja refletida na melhor organização do padrão VCAN durante eventos ZCAS-El Niño, como destacado na Figura 16.



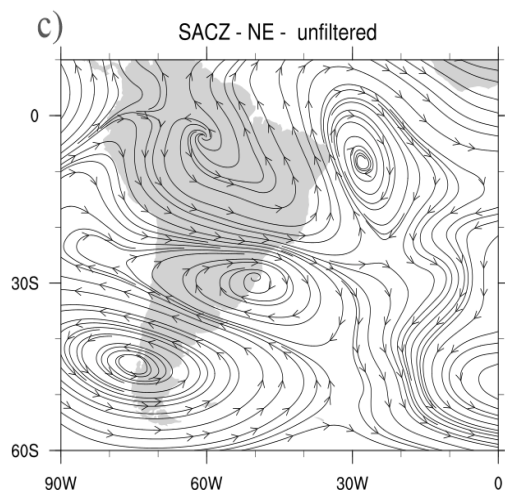


Figura 16 – Composição média de anomalia de U e V em 200 hPa não filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) Neutro.

A circulação atmosférica média anômala em altos níveis referente aos eventos de ZCAS neutra, apresenta um VCAN bem definido semelhante as composições de ZCAS-EN e uma circulação ciclônica continental na região Sul/Sudeste do Brasil, semelhante as composições de ZCAS-LN, destacando assim a semelhança entre a composição em anos neutros e de El Niño (La Niña) nos trópicos (subtrópicos), sugerindo que a atuação da variabilidade interanual é regionalmente diferente a partir da fase do ENOS.

Para caracterização do VCAN, foi também observada a circulação média anômala em 500 hPa, representado pela Figura 17, onde não é caracterizado o aprofundamento da circulação ciclônica na região referente ao posicionamento do VCAN, confirmando assim sua existência apenas em altos níveis. Assim como na Figura 16, a circulação ciclônica na região Sul/Sudeste do Brasil possui as mesmas características oceânico/continental.

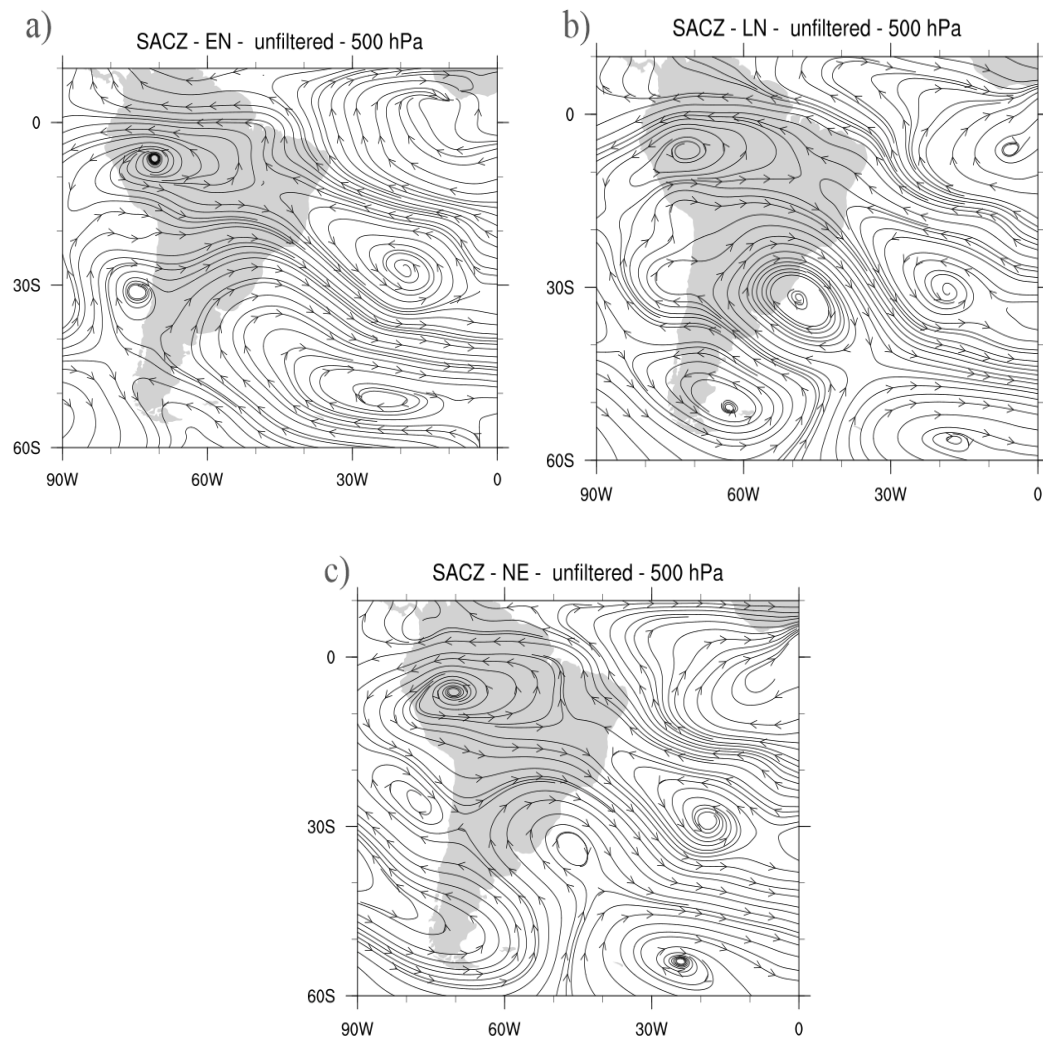


Figura 17 – Composição média de anomalia de U e V em 500 hPa não filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño, b) La Niña, c) Neutro.

As composições filtradas são representadas pela Figura 18, a partir de composições médias anômalias intrassazonais e interanuais dos eventos de ZCAS. A banda 20-90 dias é referente a componente intrassazonal (Figura 18.a.c.e), e em todas composições é bem representado o posicionamento do VCAN, Alta da Bolívia e do ciclone na região Sul/Sudeste do Brasil, com pequenas diferenças em relação a intensidade e posicionamento da Alta da Bolívia e do VCAN.

O posicionamento médio do VCAN em eventos de ZCAS La Niña (Figura 18.c) é localizado sobre o Oceano Atlântico Sul (5° Sul, 35° Oeste) sendo assim mais ao Sul e mais a Leste com relação a ZCAS El Niño e ZCAS Neutras.

A variabilidade interanual é representada pela banda 200 dias passa baixa (Figura 18.b.d.f) e destaca algumas diferenças entre as composições: 1) a ocorrência de um anticiclone na região Sul/Sudeste do Brasil para eventos de ZCAS sob atuação de El Niño (Figura 18.b); 2) a ocorrência de um anticiclone na região característica do VCAN (Figura 18.d) e um cavado invertido em 5° Sul e 25° Oeste em eventos de ZCAS sob atuação de La Niña; e 3) Posicionamento mais ao Sul do Ciclone na região Sul/Sudeste do Brasil em eventos de ZCAS neutra.

Verifica-se também que os sistemas analisados e discutidos, VCAN, ZCAS e Alta da Bolívia, são sistemas característico da escala de tempo intrassazonal que podem receber influência da variabilidade interanual. A ausência do VCAN nas composições de ZCAS em anos de La Niña (Figura 16.b.) pode ser devido ação do Anticiclone representado pela banda interanual (Figura 18.d) que não permite que este VCAN se forme próximo do continente, permitindo assim apenas o desenvolvimento do cavado invertido oceânico o qual é localizado na mesma região do VCAN da banda intrassazonal (Figura 18.c), este fato não é observado em eventos de ZCAS El Niño e ZCAS Neutra, onde o VCAN é intensificado tanto pela variabilidade intrassazonal quanto pela interanual.

A continentalidade do Anticiclone na região Sul/Sudeste do Brasil em eventos de ZCAS El Niño – Interanual (Figura 18.b) é um fator para que o ciclone da região Sul/Sudeste em eventos de ZCAS El Niño (Figura 16.a) esteja localizado apenas sob o oceano, visto que o interanual não contribui para que esse ciclone esteja sob o continente. Tal fato não é observado em eventos de ZCAS sob atuação de La Niña onde o ciclone continental é intensificado pela ação da variabilidade interanual, esta mesma relação é destacada na Figura 15, onde é representada a inversão de fase de propagação de onda, nesta mesma região, tendo o cavado da região Sul/Sudeste do Brasil em fase para anos de La Niña, e uma defasagem de sinal nos anos de El Niño. Padrão semelhante ao verificado por Carvalho et. al. (2004), que define como ZCAS oceânico(continental) os episódios ocorridos durante anos de El Niño (La Niña).

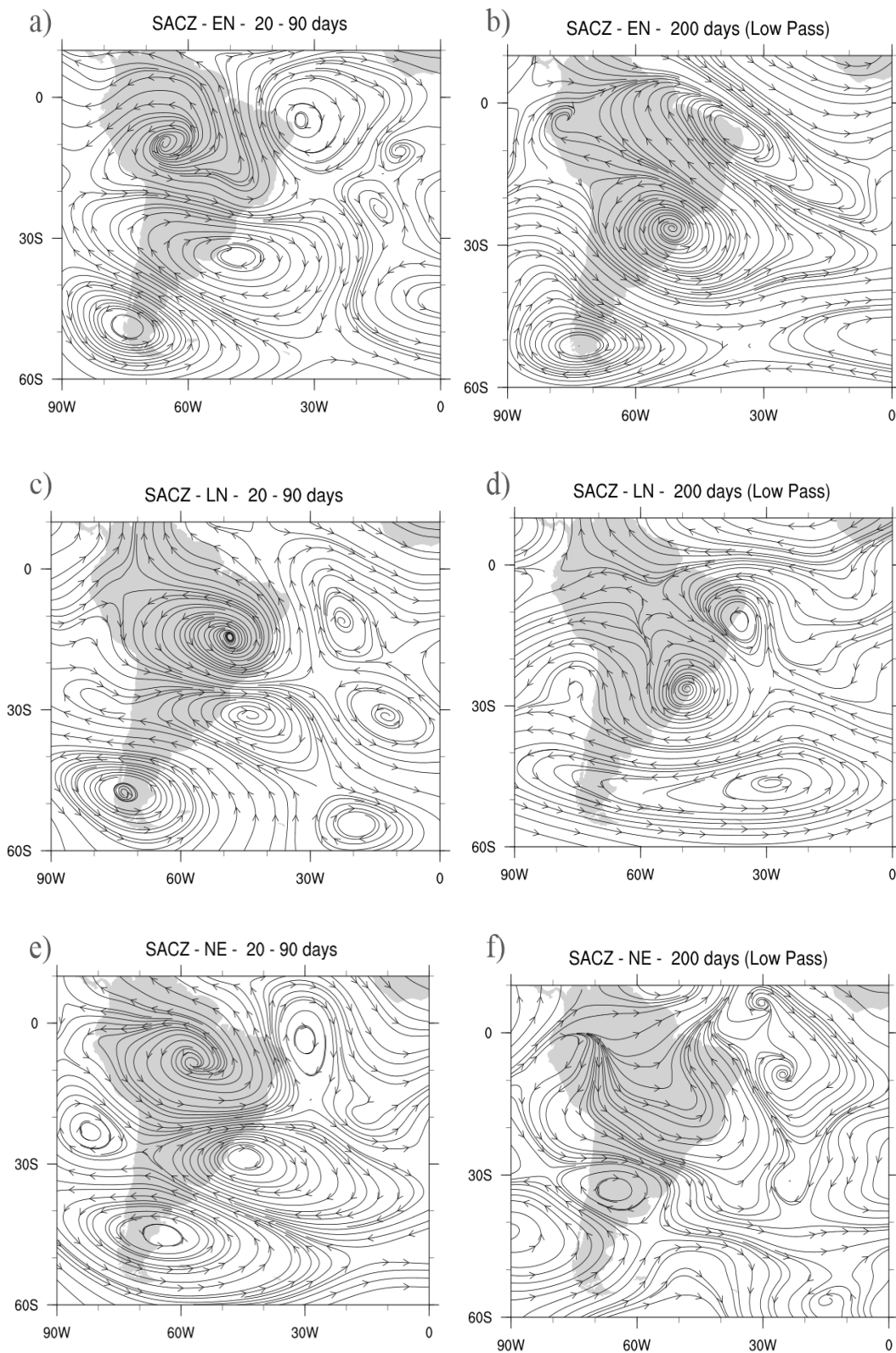


Figura 18 – Composição média de anomalia de U e V em 200 hPa filtrada em eventos de ZCAS, quando há ocorrência de: a) El Niño - Intrassazonal, b) El Niño – Interanual, c) La Niña – Intrassazonal, d) La Niña – Interanual, e) Neutro – Intrassazonal, f) Neutro - Interanual.

7 – PADRÕES DE ANOMALIA DE ROLE NA AMÉRICA DO SUL

Nesta sessão são avaliados de maneira complementar ao estudo os três primeiros modos dos padrões de anomalia de ROLE por meio da técnica da EOF não rotacionadas, durante os verões de 1985 a 2013 na América do Sul, com enfoque no Brasil, com o objetivo de ressaltar os principais sistemas convectivos atuantes durante a climatologia analisada.

As imagens das EOF não possuem relação física com a variável observada, pois é um artifício matemático para interpretação dos dados, desta forma os resultados positivos e negativos das anomalias de ROLE, podem ser analisados e discutidos a partir das séries das componentes principais (Figura 20), desta forma o entendimento e interpretação dos sistemas que atuam na América do Sul partem da observação dinâmica e sinótica. A ZCAS é um sistema que possui sentido Noroeste-Sudeste sendo assim diagonal, com atuação durante o verão austral, então é possível relacionar o primeiro, segundo e terceiro modo a ZCAS.

Na Figura 19 são destacados os três primeiros modos da EOF, onde demonstram de forma significativa com variância de 10,30% um sinal semelhante a representação da ZCAS no primeiro modo e no terceiro modo, que possui variância de 7,05%, estes modos são semelhantes aos encontrados por Van der Wiel (2015), que realizou a mesma metodologia, porém para os meses de novembro a março durante o período de 1979 a 2013, encontrando padrões de ZCAS com variância de 10,1% no primeiro modo e 7,0% no segundo. Estes modos podem ser característicos tanto de eventos ZCAS como de eventos NZCAS, a depender da interpretação entre os modos da EOF e das componentes principais.

O segundo modo corresponde a 7,29% de variância e representado por um sinal negativo sob o nordeste brasileiro, este sinal pode ser representativo de uma ação conjunta entre a ZCAS e a OMJ. A ação conjunta destes sistemas é melhor discutida e observada quando filtrada na escala intrassazonal (Figura 21 e 22), visto que a OMJ é melhor representada nesta banda temporal.

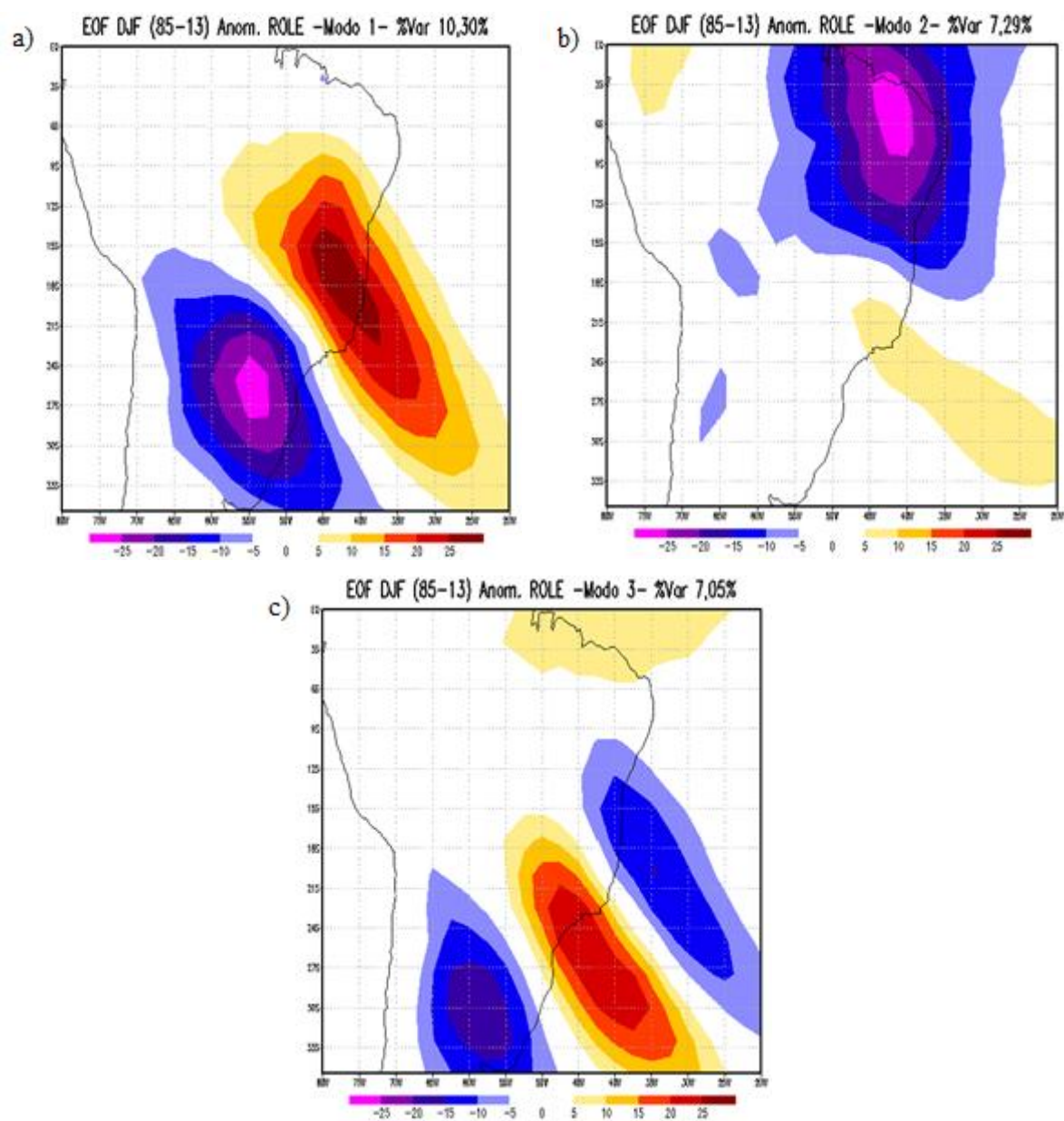


Figura 19 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE não-filtrada a) 1º Modo – 10,3% de variância, b) 2º Modo – 7,29% de variância, c) 3º Modo – 7,05% de variância.

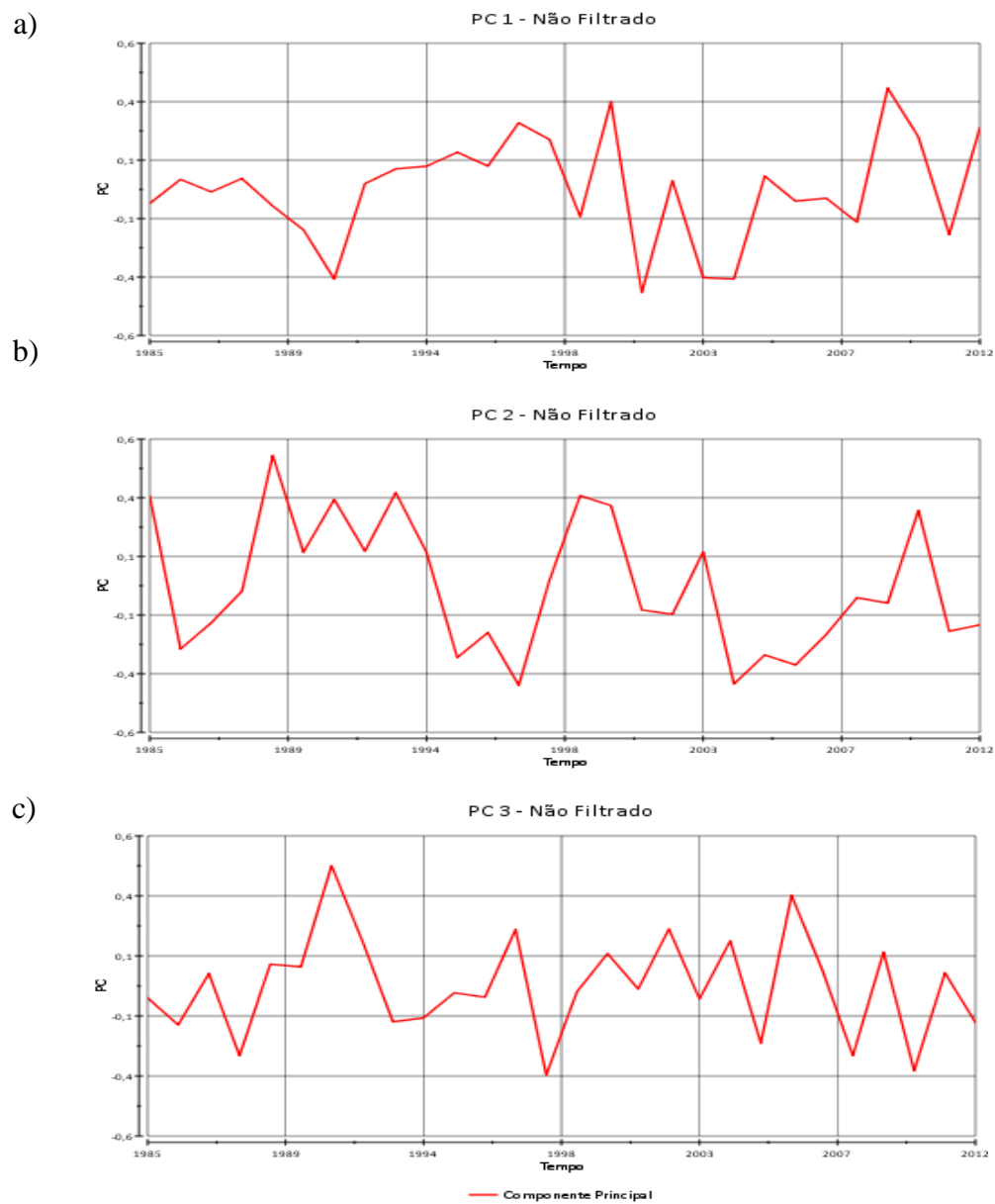


Figura 20 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE não-filtrada; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.

7.1 – Padrões de Anomalia de ROLE na América do Sul (Intrassazonal)

As análises de anomalias de ROLE filtrada na banda intrassazonal (20-90) são representadas pela Figura 21. Assim como na Figura 19 os resultados das EOF possuem uma interpretação física que depende das séries temporais das componentes principais (Figura 22), sendo então o primeiro, segundo e terceiro modo uma representação da ZCAS e do fluxo de umidade da Amazônia em direção a região sudeste do Brasil, assim como atuação de sistemas de nebulosidade na região nordeste do Brasil que pode estar relacionado as fases da OMJ.

O primeiro modo corresponde a 16,88% de variância, sendo o modo de maior variabilidade na escala de tempo intrassazonal e evidência toda nebulosidade atuante durante o verão no Brasil, com sinais de fluxo de umidade na região Amazônica e ZCAS, sendo está a maior área de nebulosidade presente na região sudeste do Brasil, que se estende até o sul da Bahia, que é justamente a área de maior atuação da ZCAS.

O segundo e terceiro modo destacam o padrão ZCAS clássico, com orientação noroeste-sudeste e conexão com o fluxo convectivo da Amazônia e as regiões de subsidência ao norte e sul do sistema. O padrão ondulatório com origem do pacífico também é observado demonstrando a ligação entre a propagação de ondas de Rossby na escala intrassazonal e a ação da ZCAS, assim como observado nos estudos de Van der Wiel et. al. (2015), o qual demonstra que estas ondas se propagam com origem no Pacífico Sul por meio dos dutos de oeste em direção a América do Sul.

O terceiro modo com a menor variância 8,70%, é oposto e semelhante ao segundo modo, o qual pode estar sendo representado pela fase oposta de propagação de ondas durante eventos ZCAS. Sendo assim o segundo e terceiro modo são representações da ZCAS, porém em fases opostas, onde tanto o segundo quanto o terceiro modo podem representar uma ZCAS ou NZCAS.

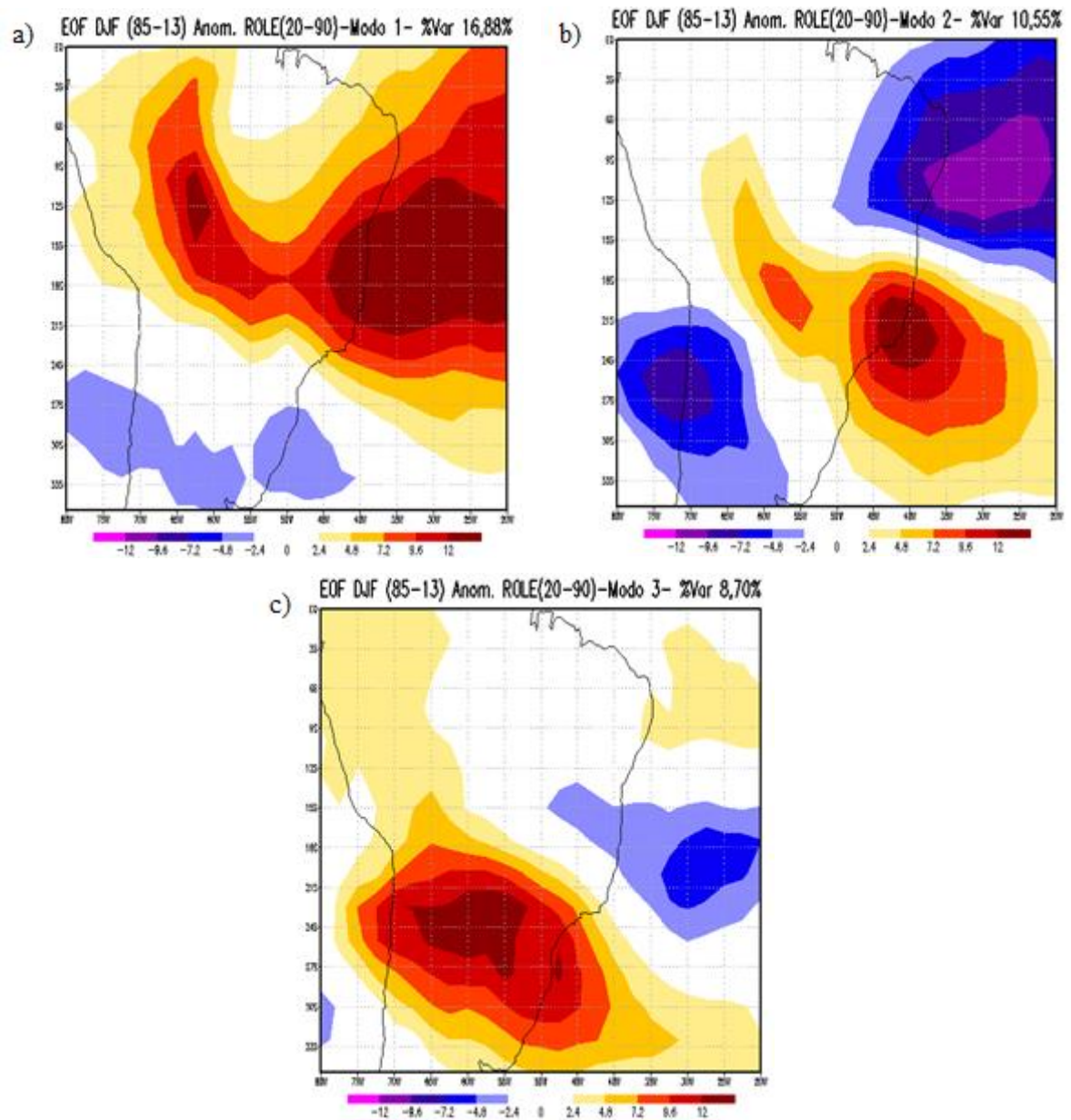


Figura 21 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias; a) 1º Modo – 16,88% de variância, b) 2º Modo – 10,55% de variância, c) 3º Modo – 8,70% de variância.

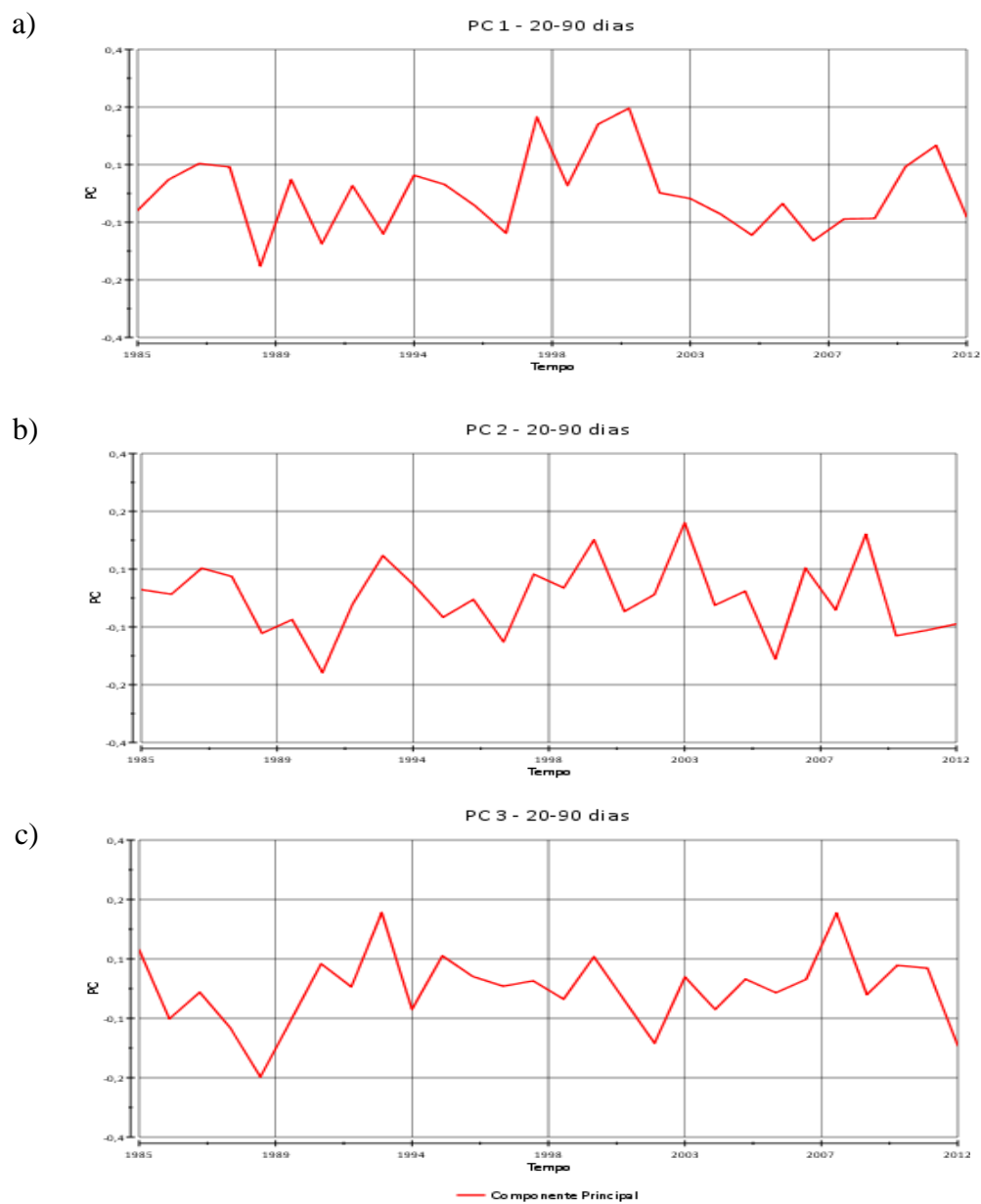


Figura 22 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.

7.2 – Padrões de Anomalia de ROLE no Pacífico - América do Sul (Intrassazonal)

Com intuito da compreensão da OMJ também foi analisado o domínio de toda região da Oceania, Oceano Pacífico Sul e América do Sul, aplicados a técnica da EOF, filtrados na banda intrassazonal de modo a caracterizar a ocorrência ou não da persistência deste sistema, e como poderia ser o seu sinal característico na América do Sul, visto que o segundo modo da EOF não filtrada (Figura 19.b) poderia ser referente ao sinal da OMJ.

A Figura 23 é característica das fases da OMJ e semelhantes aos resultados de Cunningham e Cavalcanti (2006), porém a semelhança se dá apenas nos sinais dos modos, a partir de anomalias com sinais opostos (iguais) ao leste da Austrália e do Nordeste Brasileiro no primeiro (segundo) modo. Enquanto que as diferenças são dadas a partir da variância encontrada nos modos, e do sinal da ZCPS, resultado esperado visto que a banda de filtragem e o período utilizado para esta análise foram diferentes. Ferraz (2004) em suas análises sugere que o enfraquecimento do sinal da ZCPS, pode ser devido a superposição de variabilidades entre as bandas 30-70 dias e 20-30 dias.

O primeiro modo (Figura 23.a) possui a variância de 8,20%, e é representativo da OMJ, praticamente igual ao primeiro modo que foi relacionado apenas a ZCAS na Figura 21, se observado apenas a América do Sul isoladamente, neste caso esse modo é característico da ação conjunta ZCAS e OMJ, desta forma o primeiro e principal modo das anomalias de ROLE filtrado na banda intrassazonal é característicos da ação conjunta entre a ZCAS e a OMJ.

O segundo modo (Figura 23.b) também é característico da OMJ e possui variância de 6,01%, é um modo com representação de sinal semelhante ao segundo modo de anomalias de ROLE não filtrado (Figura 19.b) e ao segundo modo de anomalias de ROLE filtrados na banda intrassazonal (Figura 21.b) na região do nordeste brasileiro.

A Figura 23, representa de forma direta e concisa a ação da OMJ nos dados e padrões observados de acordo com a técnica da EOF filtrados e não filtrados, demonstrando assim a ação e relevância deste sistema de escala intrassazonal na nebulosidade na América do Sul e no Nordeste Brasileiro, além de sua ação conjunta com a ZCAS.

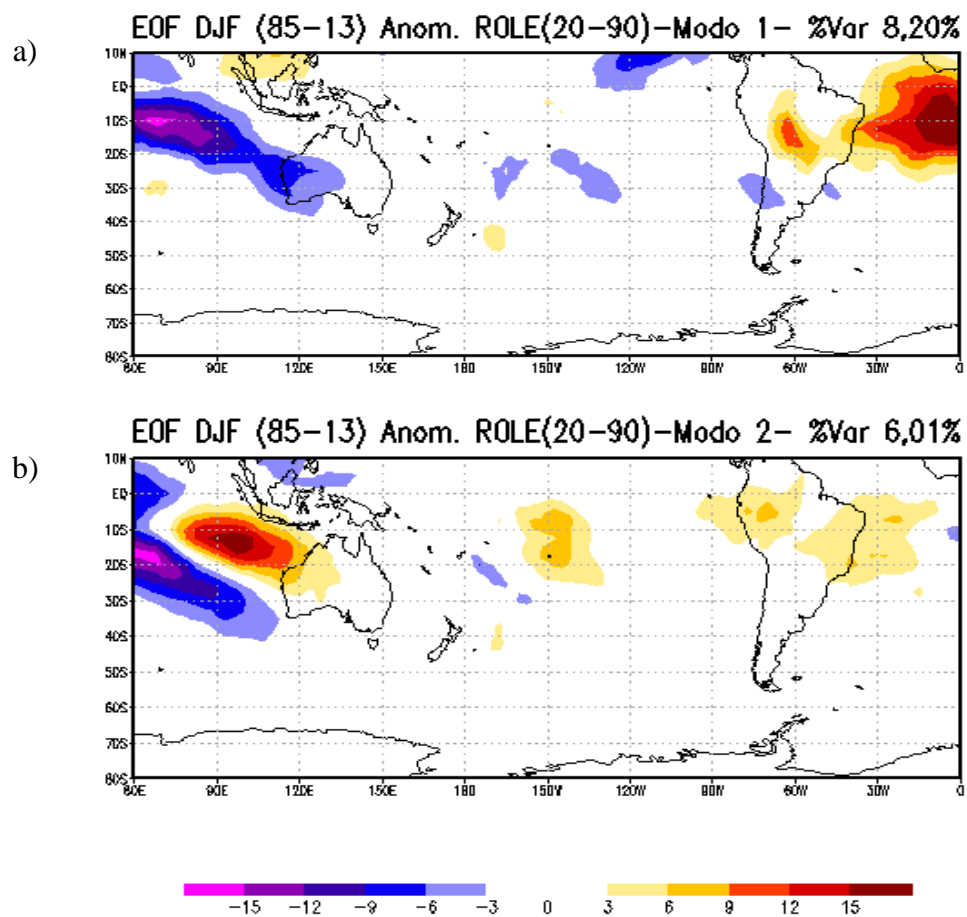


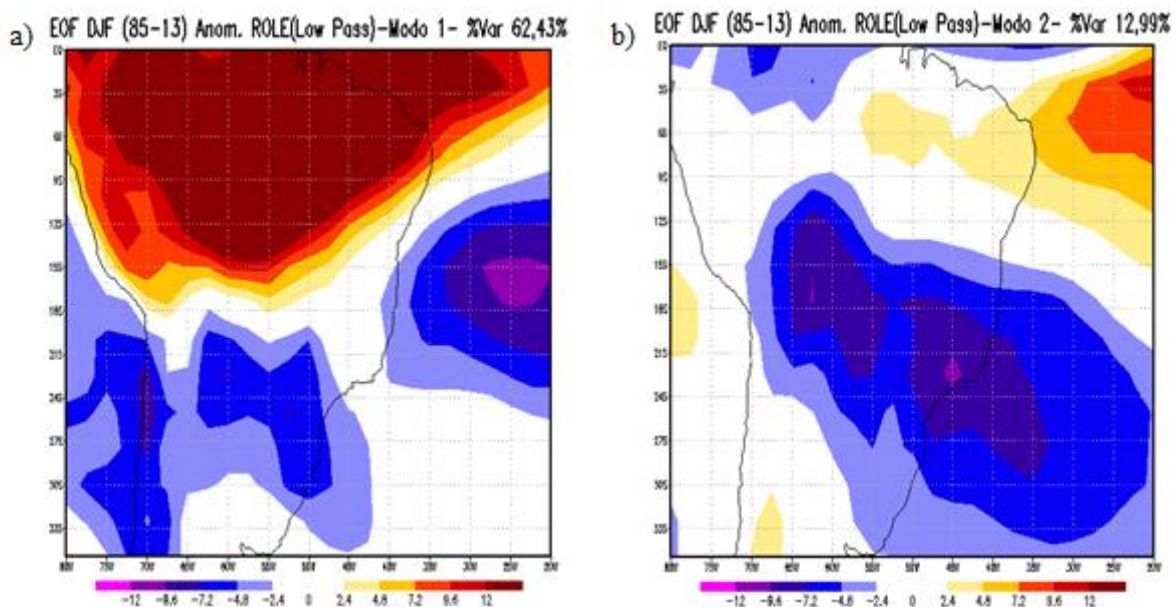
Figura 23 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda intrassazonal 20-90 dias no domínio Pacífico América do Sul; a) 1º Modo – 8,20% de variância, b) 2º Modo – 6,01% de variância.

7.3 – Padrões de Anomalia de ROLE na América do Sul (Interanual)

As EOFs das variabilidades interanuais (200 dias passa baixa) são representadas pela Figura 24, a partir dos dados filtrados de anomalia de ROLE, possuindo o mesmo tipo de análise que os resultados anteriores da sessão 7.

O primeiro modo que representa a maior variabilidade destaca uma variância de 64,43% sendo este o maior percentual de variância observado durante todo o estudo e análises de EOF, demonstrando assim a forte ação da variabilidade interanual em toda região Amazônica e em quase toda a parte do Nordeste Brasileiro, além das regiões de atuação da ZCIT, e sinal oposto nas regiões ao Sul da América do Sul. Desta forma representando um dipolo convectivo entre a região Amazônica e a região Sul da América do Sul a partir da variabilidade interanual.

O segundo modo com variância de 12,99%, destaca a ação da baixa frequência na região da ZCAS e da ZCIT, regiões a qual a variabilidade interanual é amplamente discutida na literatura e já destacadas nas análises anteriores. Com relação ao terceiro modo o qual é representado pela menor variância de 7,00%, sugere-se uma possível representação da ação da ZCAS e seu deslocamento ao norte do Brasil.



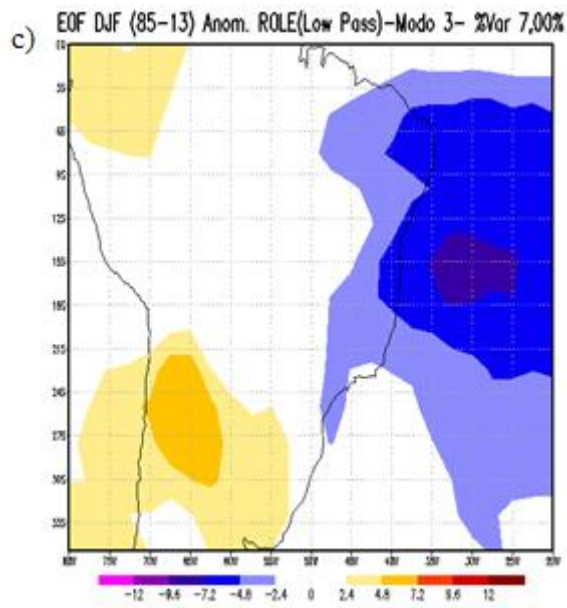
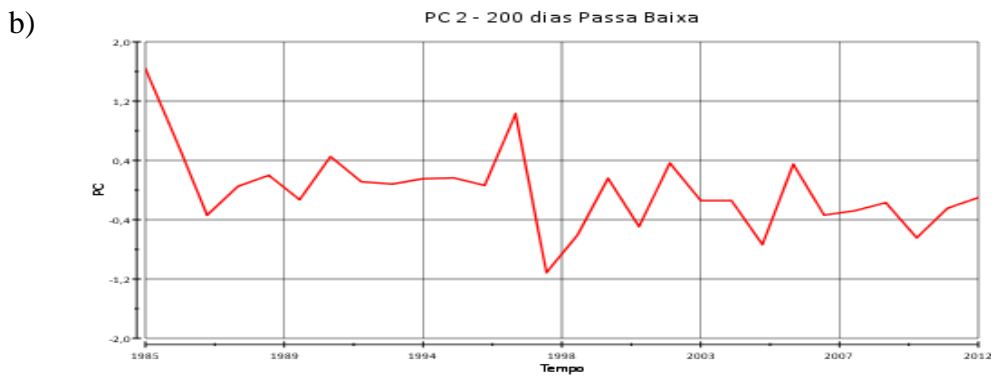
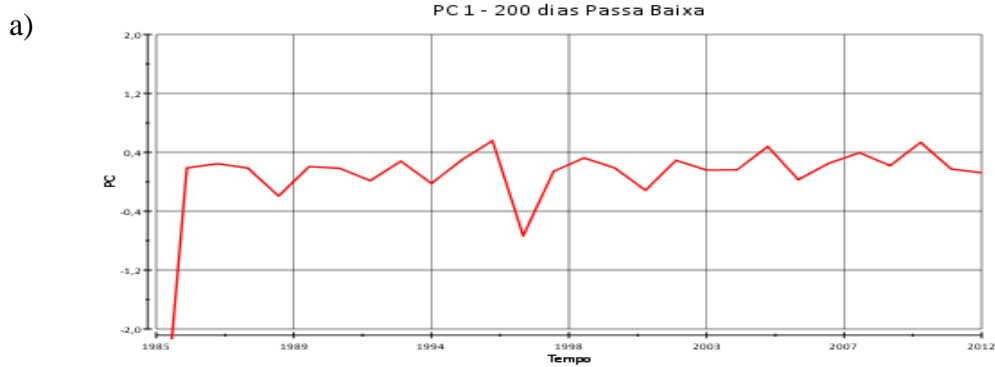


Figura 24 – Função ortogonal empírica (EOF) da anomalia de ROLE filtrada na banda interanual 200 dias passa baixa; a) 1º Modo – 62,43% de variância, b) 2º Modo – 12,99% de variância, c) 3º Modo – 7,0% de variância.



c)

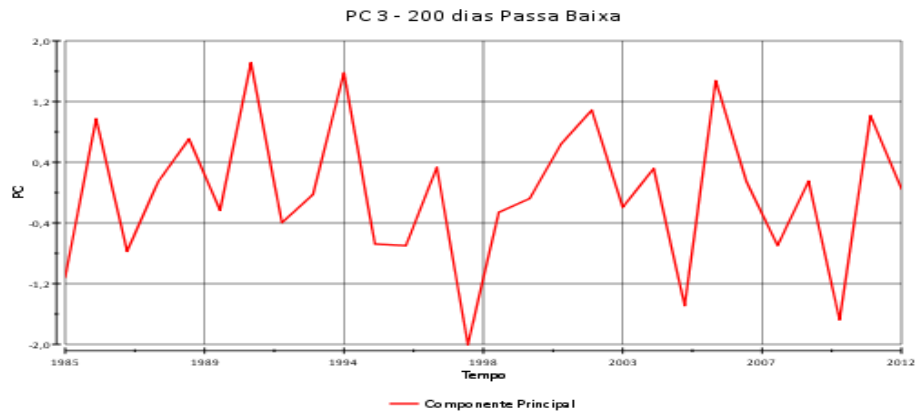


Figura 25 – Série temporal das componentes principais de DJF da anomalia de ROLE filtrada na banda interanual 200 dias passa baixa; a) 1ª Componente Principal, b) 2ª Componente Principal, c) 3ª Componente Principal.

8 – CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisado a partir de um ponto de vista da grande escala a relação das propagações de ondas atmosféricas e os principais sistemas convectivos atuantes na América do Sul nas escalas temporais intrassazonal e interanual. Para isto foram investigados os padrões atmosféricos por meio da técnica da EOF, com o objetivo de ressaltar semelhanças e diferenças entre estes padrões nas respectivas variabilidades temporais. Os resultados deste trabalho foram divididos em quatro blocos; I – Os padrões de ondas de Rossby da região do Pacífico a América do Sul; II – Os padrões de ondas de Rossby da região do Pacífico América do Sul e a ZCAS; III – Os padrões ZCAS em altos níveis em diferentes escalas temporais; IV – Os principais sistemas convectivos da porção trópico-subtrópico da América do Sul e as variabilidades temporais.

O primeiro bloco, que trata dos padrões de ondas de Rossby na região do Pacífico América do Sul (PSA), na escala de tempo intrassazonal, destaca diferentes modos de propagação de ondas possivelmente a partir da variabilidade interdecadal, uma vez que ao observar os padrões de propagações de ondas entre os verões austrais de 1985 a 1999 e de 2000 a 2015 representam modos diferentes. Onde o primeiro modo do padrão 2000-2015, é representado por uma onda mais longa do tipo onda zonal 2 na região do Oceano Pacífico, padrão ondulatório que não esteve presente em nenhum dos modos do padrão 1985-1999, sendo este um sinal de uma propagação de onda diferente ao padrão climatológico anterior possivelmente devido a ação da variabilidade interdecadal, que durante este período esteve em uma fase oposta da Oscilação Decadal do Pacífico.

As propagações de ondas de Rossby e a ZCAS durante o verão austral nas diferentes escalas temporais demonstram, uma relação de fase inversa quando comparado a interação entre a variabilidade interanual e a intrassazonal, onde os eventos de ZCAS sob a atuação de El Niño não favorecem a permanência do cavado associado a ZCAS em altos níveis por meio de uma crista na banda interanual, enquanto os eventos de ZCAS sob atuação de La Niña intensificam o cavado da ZCAS em altos níveis por meio da variabilidade interanual. Sendo está uma possível resposta devido a interação entre as variabilidades intrassazonal e interanual, do porquê que os eventos de

ZCAS sob a atuação de La Niña possuem mais dias ativos que os eventos de ZCAS sob a atuação de El Niño.

Na observação e análise dos padrões de ZCAS em altos níveis nas escalas temporais intrassazonal e interanual, é destacada uma relação entre a variabilidade interanual e o VCAN, fato que não é de comum discussão na literatura. Os compostos médios desta análise destacam a interação entre as escalas temporais intrassazonal e interanual (intrassazonal vs interanual) onde revelam que o VCAN é intensificado tanto nos eventos de ZCAS El Niño quanto nos eventos de ZCAS Neutra, enquanto a variabilidade interanual dos eventos de ZCAS sob a atuação de La Niña inibe a formação do VCAN próximo ao continente, por meio de um anticiclone nesta área.

Outro ponto desta análise é a respeito do ciclone na região Sul/Sudeste do Brasil, durante eventos de ZCAS La Niña tanto a escala de tempo intrassazonal quanto a interanual intensificam o seu posicionamento continental, fato não observado nas composições de ZCAS El Niño, onde há um anticiclone próximo do continente na região Sul/Sudeste do Brasil na escala de tempo interanual, fato que contribui para que o ciclone da escala intrassazonal nesta mesma região se mantenha apenas na região oceânica, sendo esta uma possível resposta do posicionamento oceânico (continental) da ZCAS em anos de El Niño (La Niña).

Nas análises dos padrões anômalos de ROLE no domínio trópico-subtrópico na América do Sul é destacada a ação conjunta da ZCAS e da OMJ como principais regiões convectivas durante o verão austral, assim como também a forte ação da variabilidade interanual na Amazônia e na região da atuação da ZCAS, destacando assim a importância da análise de baixa frequência para compreensão dos padrões atmosféricos em dados climáticos.

Finalmente, para linhas de pesquisas futuras sugere-se análises dinâmicas e termodinâmicas, dos padrões encontrados neste estudo, com o intuito de melhor caracterização e compreensão destes padrões atmosféricos, de modo a prover uma melhor previsão de tempo a longo prazo durante o verão austral. Com relação ao padrão ZCAS-VCAN tem-se como sugestão a observação dos compostos na média e baixa troposfera com intuito de compreender melhor a interação entre estes sistemas.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBRIZZI, T.; HOSKINS, B. J.; HSU, H. H. **Rosby wave propagation and teleconnection patterns in the austral winter.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 52, p. 3661-3672, 1995.

ALBUQUERQUE, M. G. **Análise espaço-temporal das causas da variabilidade da linha de costa e erosão na praia do hermenegildo** , Tese de Doutorado. 2013.

BARREIRO, M.; CHANG, P.; SARAVANAN, R. **Variability of the South Atlantic convergence zone simulated by an atmospheric general circulation model.** Journal of Climate, v. 15, n. 7, p. 745–763, 2002.

BJERKNES, J. A. **A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature.** Tellus, 18, 820-829, 1966.

BJERKNES, J. A. **Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific.** More. Wea. Rev., 97, 163-172, 1969.

BARREIRO, M.; CHANG, P.; SARAVANAN, R. **Variability of the South Atlantic convergence zone simulated by an atmospheric general circulation model.** Journal of Climate, v. 15, n. 7, p. 745–763, 2002.

CAI, W. et al. **More extreme swings of the South Pacific convergence zone due to greenhouse warming.** Nature, v. 488, p. 365–369, 2012.

CAVALCANTI, I.F.A., 1992. **Teleconexões no Hemisfério Sul e suas influências na circulação da América do Sul.** Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 28 set-2 out, 1992.

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, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.

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, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004.

- CERNE, S. B.; VERA, C. S. **Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America.** *Climate Dynamics*, v. 36, n. 11–12, p. 2265–2277, 2011.
- CUNNINGHAM, C. A. C. **Interações trópicos-extratrópicos na escala de tempo intrassazonal durante o verão austral e seus efeitos na América Do Sul.** Dissertação de Mestrado, 2002.
- CUNNINGHAM, C. A. C.; CAVALCANTI, I. F. DE A. **Intraseasonal modes of variability affecting the South Atlantic Convergence Zone.** *International Journal of Climatology*, v. 26, n. 9, p. 1165–1180, 2006.
- DESER, C. et al. **Sea Surface Temperature Variability : Patterns and Mechanisms.** *Annun. Rev. Marine.* v. 2, p. 115-143, 2010.
- DUCHON, C. E. **Lanczos Filtering in One and Two Dimensions.** *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1016-102, 1979.
- FERRAZ, S. E. T. **Variabilidade intrasazonal no Brasil e Sul da América do Sul.** Tese de Doutorado, 2004.
- FERRAZ, S. E. T. et al. **Analysis for precipitation climate prediction on south of Brazil.** *Ciência e Natura*, ed. especial de Dezembro, p. 496-500, 2013.
- FERREIRA, N.; SANCHES, M.; SILVA, D. MAF. **Composição da zona de convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19, n. 1, p. 89–98, 2004.
- FIGUEROA, S. N. **Estudo dos sistemas de circulação de verão sobre a América Do Sul e suas simulações com modelos numéricos.** Tese de Doutorado, 1997.
- FIGUEROA, S. N.; SATYAMURTY, P.; DA SILVA DIAS, P. L. **Simulations of the summer circulation over the South American Region with an Eta Coordinate Model.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1995.
- FOLLAND, C. K. **Relative influences of the Interdecadal Pacific Oscillation and ENSO on the South Pacific Convergence Zone.** *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 13, p. 2–5, 2002.

- FRAEDRICH K. E M. LUTZ, 1986. **Zonal teleconnections and longitude-time lag correlation of the 500 mb geopotential along 50oS.** J. Atmos. Sci., 43: 2116-2126.
- GHILL, M. E K.MO, 1991. **Intraseasonal Oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern Hemisphere.** J.Atmos.Sci., 48: 780-790.
- GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. **Use of Barotropic Models in the Study of the Extratropical Response to Tropical Heat Sources.** Journal of Meteorological Society of Japan, v. 73, n. 4, p. 765 - 780. 1995a.
- GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. **Analysis of Tropical–Extratropical Interactions with Influence Functions of a Barotropic Model.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 52, n. 20, p. 3538 - 3555, 1995b.
- HOSKINS, B. J.; AMBRIZZI, T. **Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 50, p. 1661-1671, 1993.
- KALNAY, E. et al. **The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project.** Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, n. 3, p. 437-471, 1996.
- KANAMITSU, M. et al. **NCEP DOE AMIP-II reanalysis (R-2).** Bulletin of the American Meteorological Society, v.83, p. 1631–1643, 2002.
- KODAMA, Y. **Large-scale 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, v. 70, p. 813–835, 1992.
- KODAMA, Y-M. **Large-scale common features of subtropical precipitation 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, v.71, p. 581-610, 1993.
- KIDSON, J. W., 1988: **Interannual variations in the Southern Hemisphere circulation.** J. Climate, 1, 1177–1198.
- KILADIS, G. N.; WEICKMANN, K. M. **Circulations anomalies associated with tropical convection during northern winter.** Monthly Weather Review, v.120, p.1900-1923, 1992a.

KILADIS, G. N.; WEICKMANN, K. M. **Extratropical Forcing of Tropical Convection during Northern Winter.** Monthly Weather Review, v.120, p.1924-1938,1992b.

KILADIS, G. N. **Observations of Rossby Waves Linked to Convection over the Eastern Tropical Pacific.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 55, n. 3, p. 321–339, 1998.

LAU, K.-M., P.-J. SHEU, E I.-S. KANG, 1994: **Multiscale low-frequency circulation modes in the global atmosphere.** J. Atmos. Sci., 51, 1169–1193.

LIEBMANN, B. et al. **Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone.** Journal of Climate, v. 12, n. 7, p. 1877–1891, 1999.

MARTON, E. **Oscilações intrasazonais associadas à Zona de Convergência do Atlântico Sul no Sudeste Brasileiro.** Tese de Doutorado, 2000.

MATTHEWS, A. J. **A multiscale framework for the origin and variability of the South Pacific Convergence Zone.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 138, n. 666, p. 1165–1178, 2012.

MO, K.C., M. GHIL, 1987: **Statistics and dynamics of persistent anomalies.** J. Atmos. Sci., 44, 877-901

MOON, J.-Y.; HA, K.-J. **Association between tropical convection and boreal wintertime extratropical circulation in 1982/83 and 1988/89.** Advances in Atmospheric Sciences, v. 20, n. 4, p. 593–603, 2003.

NAMIAS, J., 1978. **Multiple causes of the N.A. abnormal winter 1976-1977.** Mon Wea. Rev., 106: 279-295.

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, v. 85, n. 3, p. 277–299, 2007.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. **Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer.** Monthly Weather Review, v. 125, p. 279–291, 1997.

OPSTEEGH J.D., V.D.DOEL,H.M., 1980. **Seasonal differences in the stationary response of a linearized primitive equation model: Prospects for long range weather forecasting?**. J.Atmos.Sci. 37: 2169-2185.

PUAUD, Y. et al. **Climate co-variability between South America and Southern Africa at interannual, intraseasonal and synoptic scales.** Climate Dynamics, n. Streten 1973, p. 1–22, 2016.

QUADRO, M. F. L. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul.** Dissertação de Mestrado. 1994.

ROSSBY, C.-G. **Planetary flow patterns in the atmosphere.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society (suppl), 1940.

SARDESHMUKH, P. D.; HOSKINS, B. J. **The Generation of Global Rotational Flow by Steady Idealized Tropical Divergence.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 45, n. 7, p. 1228-1251, 1988.

SHIMIZU, M. H. **Fontes de ondas de Rossby: aspectos observacionais, simulações numéricas e projeções futuras.** Tese de Doutorado. 2012.

TRENBERTH, K.E., 1980. **Planetary waves at 500 mb in the Southern Hemisphere.** Mon. Wea. Rev., 108:1378-1389.

TODD, M. C.; WASHINGTON, R.; JAMES, T. **Characteristics of summertime daily rainfall variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone.** Meteorology and Atmospheric Physics, v. 83, n. 1–2, p. 89–108, 2003.

VAN DER WIEL, K. et al. **A dynamical framework for the origin of the diagonal South Pacific and South Atlantic Convergence Zones.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 141, n. 691, p. 1997–2010, 2015.

VAN DER WIEL, K. et al. **Why the South Pacific Convergence Zone is diagonal.** Climate Dynamics, v. 46, n. 5–6, p. 1683–1698, 2016.

VAN LOON, H., E R. L. JENNE, 1972: **The zonal harmonic standing waves in the Southern Hemisphere.** J. Geophys. Res., 77, 3846-3855.

WALLACE, J.M., D.S. GUTZLER, 1981: **Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter.** Mon. Wea. Rev., 109, 785-812.

WALKER, G. T. **Correlation in seasonal variations of weather.** VIII Mem. Ind. Meteor. Dept., v.24, p.75-131, 1923.

WALKER, G. T.; BLISS, E. W. **World Weather.** V. Mem. Royal Meteor. Soc., v.4,p. 53-84, 1932.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.** International Geophysics Series, v. 91, p. 626, 2006.