UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA

DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

CURSO DE METEOROLOGIA

MARIA LÍVIA LINS MATTOS GAVA

Uma análise da relação entre a Oscilação Quase-Bienal e o Modo Anular Sul e seus impactos no clima da América do Sul

MONOGRAFIA

Rio de Janeiro

2019

MARIA LÍVIA LINS MATTOS GAVA

Uma análise da relação entre a Oscilação Quase-Bienal e o Modo Anular Sul e seus impactos no clima da América do Sul

Monografia apresentada ao Departamento de Meteorologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientadora: Fernanda Cerqueira Vasconcellos

Rio de Janeiro

2019

UMA ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE A OSCILAÇÃO QUASE-BIENAL E O MODO ANULAR SUL E SEUS IMPACTOS NO CLIMA DA AMÁRICA DO SUL

Maria Lívia Lins Mattos Gava

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliada por:

_____

Prof.ª D. Sc. Fernanda Cerqueira Vasconcellos - IGEO/UFRJ
(Orientadora)

_____

D. Sc. Clóvis Angeli Sansigolo - INPE

_____

Prof.º D. Sc. José Ricardo de Almeida França - IGEO/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ
Fevereiro, 2019

Agradecimentos

A conclusão do curso de graduação foi algo esperado por mim desde os primeiros anos de escola, e sua obtenção não teria sido possível sem os esforços da minha mãe, por isso, a primeira dentre aqueles que preciso agradecer é ela.

O caminho que me trouxe até esse momento foi iluminado por meus guias espirituais, e a isso agradeço imensamente.

Amigos do Bonde do GG, Allana, Sofia, Carol, João Victor, Iasmin e Natália, a partir de agora sou obrigada a saber se vai fazer sol no fim de semana, já podem cobrar.

Esses anos de graduação trouxeram muitas amizades também, sendo elas tanto do corpo discente quanto do docente, e agradeço a todos os que tornaram possível que eu chegasse até aqui.

É preciso agradecer também ao Caio, que aturou os mais diversos surtos ao longo das aulas e provas, e foi o ombro amigo pra acalmar todo o meu desespero, muito obrigada.

E claro, minha mais maravilhosa orientadora, que foi orientadora, mãe e amiga. Que me incentivou, me ensinou e me ajudou a crescer, muito obrigada, Fernanda, parte desse momento eu devo a você também.

E por último, agradeço ao meu pai, que infelizmente está vendo esse momento de um outro plano, mas tenho certeza que está orgulhoso da sua criança. Obrigada, Pai.

If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency and vibration.

Nikola Tesla

Resumo

A Oscilação Quase-Bienal (QBO) e o Modo Anular Sul (SAM; ou Oscilação Antártica) se desenvolvem em diferentes partes do globo. A primeira ocorre na estratosfera tropical, enquanto que a segunda ocorre na região extratropical do Hemisfério Sul. O SAM se caracteriza pela alternância de massa atmosférica entre as regiões de latitudes médias e altas. A QBO é caracterizada pela variação na direção do vento zonal, com um período de aproximadamente 28 meses. Alguns estudos indicam a possibilidade de uma relação entre a QBO e o SAM, sem a obtenção de resultados conclusivos, se fazendo necessária a continuação dessa investigação. Este trabalho teve como objetivo verificar uma possível relação entre a QBO e o SAM e seus impactos sobre o clima na América do Sul (AS). Para isso, foram calculados os índices da QBO e do SAM, este último para vários níveis, utilizando os dados da Reanálise Era-Interim, para o período de 1981-2010. Foram então confeccionadas, para cada mês do ano, tabelas de contingência utilizando os índices da QBO e o do SAM - para cada nível, com e sem filtragem - de forma a avaliar o comportamento do SAM de acordo com as fases da QBO. Com os resultados das tabelas, foram gerados compostos para o mês central de cada estação utilizando a combinação das fases da QBO e do SAM, a fim de verificar a influência combinada dessas oscilações no clima da AS. Posteriormente, análises utilizando transformada de ondeleta contínua (CWT) e ondeletas cruzadas (XWT) foram realizadas para ratificar e aprofundar os resultados encontrados nas tabelas de contingência. Por fim, com as informações obtidas através da XWT, foram gerados campos de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa. Os resultados mostraram que, predominantemente, a fase negativa (positiva) da SAM é mais frequente durante a fase Leste (Oeste) da QBO, embora esse comportamento não ocorra durante todo o ano. Os resultados obtidos com a XWT indicam que as oscilações estão relacionadas no período de 2 anos com uma defasagem que varia ao longo da série temporal. Os compostos sem defasagens mostram que a influência do SAM e da QBO varia de acordo com a estação do ano. As Regiões Norte e Nordeste e o sudeste da AS são as áreas mais afetadas. E que, dependendo da região e da estação do ano, a influência do SAM, pode ser modificada pelas fases da QBO.

Palavras-chave: Oscilação Quase-Bienal, Modo Anular Sul, América do Sul.

Abstract

The Quasi-Biennial Oscillation (QBO) and Southern Annular Mode (SAM; or Antarctic Oscillation) develop in different regions of the globe. The first one occurs at tropical stratosphere, while the second one, at the Southern Hemisphere extratropics. The SAM refers to a meridional seesaw in atmospheric mass between midlatitudes and high latitudes. The QBO is characterized by oscillation of equatorial zonal wind between easterlies and westerlies, with a mean period of 28 months. A few studies suggest the possibility of a relationship between QBO and SAM, without obtaining conclusive results, making it necessary to continue this investigation. The goal of this study was verified the possible relationship between the QBO and the SAM and their impacts over South America climate. For this, the QBO and SAM indices, the latter one being calculated for different levels of troposphere and also for stratosphere, were calculated from monthly data of Era-Interim Reanalysis, considering the period of 1981-2010. For each month of the year, contingency tables were then constructed using the QBO index and the SAM index - for each level, with and without filtering - in order to evaluate the behavior of the SAM, according to the QBO phases. From the results of the tables, were built composites for the central month of each season, using the combination of QBO and SAM phases, in order to verify the combined influence of these oscillations in the South American climate. Posteriorly, analysis of continuous wavelets and cross-wavelets were built to ratify and deepen contingence tables results. Finally, with the lags information obtained through the XWT, geopotential height anomaly fields were generated at 30 hPa. Results have shown that, with few exceptions, SAM negative (positive) phase is more frequent during the Easterly (Westerly) QBO phase. The cross-wavelets indicate that the patterns are related in the period of 2 years with a lag that varies throughout the time series. The composites (without lags) show that the influence of SAM and QBO is different according to the season. The Northern and Northeastern Brazil and Southeastern South America are regions more affected by these patterns. And, depending on region and season, the SAM influence can be modified by QBO phases.

Palavras-chave: Quasi-Biennial Oscillation, Southern Annular Mode, South America.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Seção tempo-altura da média longitudinal do vento zonal mensal (m/s)..20

Figura 2 – Primeira EOF da anomalia mensal de altura geopotencial em 700hPa (1980-2006): julho - representativo da fase negativa do SAM (esquerda); janeiro - representativo da fase positiva do SAM (direita). Fonte: Vasconcellos (2012).....23

Figura 3 – Exemplo da tabela de contingência.....31

Figura 4 – Relação do ângulo de fase entre duas séries temporais. Fonte: (BARBOSA, 2007), adaptado.....35

Figura 5 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 30 hPa..... 38

Figura 6 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 200 hPa.....39

Figura 7 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 500 hPa.....39

Figura 8 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 700 hPa.....40

Figura 9 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 30 hPa.....41

Figura 10 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 200 hPa.....42

Figura 11 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 500 hPa. 42

Figura 12 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 700 hPa. 43

Figura 13 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....46

Figura 14 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....47

Figura 15 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.....48

Figura 16 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....49

Figura 17 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....50

Figura 18 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP..... 51

Figura 19 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....52

Figura 20 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....53

Figura 21 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.....54

Figura 22 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C.

Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent)...55
Figura 23 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).....56
Figura 24 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.....57
Figura 25 – Espectro de energia das ondeletas do índice da QBO (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....63
Figura 26 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 700 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....63
Figura 27 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 500 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....64
Figura 28 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 200 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....64
Figura 29 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 30 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....64
Figura 30 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 30 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....66
Figura 31 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 200 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....67
Figura 32 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 500 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....67
Figura 33 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 700 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).....67
Figura 34 – Anomalia de altura geopotencial para a fase Leste da QBO. (A) para o ano de 1987, utilizando uma defasagem de 315°; (B)para o ano de 1989, utilizando uma defasagem de 180°; (C) para o ano de 1994, utilizando uma defasagem de 75°; (D) para o ano de 2001, utilizando

uma defasagem de 285°; (E) para o ano de 2003, utilizando uma defasagem de 210°e (F) para o ano de 2007, sem defasagem.....69
Figura 35 – Anomalia de altura geopotencial para a fase Oeste da QBO. (A) para o ano de 1985, utilizando uma defasagem de 15°; (B) para o ano de 1986, utilizando uma defasagem de 345°; (C) para o ano de 1995, utilizando uma defasagem de 75°; (D) para o ano de 1999, utilizando uma defasagem de 45°; (E) para o ano de 2002, utilizando uma defasagem de 225°; (F) para o ano de 2004, utilizando uma defasagem de 195°e (G) para o ano de 2006, defasagem de 15°.....70
Figura 36 - Resumo dos resultados dos compostos.....73
Figura 37 – Série temporal dos índices da QBO e do SAM para 30 hPa (filtrado).....82

Lista de tabelas

Tabela 1 – Anos utilizados para a confecção dos compostos..... 33
Tabela 2 – Anos e defasagens utilizadas para a confecção dos mapas de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa. 37
Tabela 3 – Relação entre as fases da QBO com as fases do SAM através dos índices (sem filtragem). 40
Tabela 4 – Relação entre as fases da QBO com as fases do SAM através dos índices (filtrados).....44

Lista de abreviaturas e siglas

AAO	Oscilação Antártica (Antarctic Oscillation)
AO	Oscilação Ártica (Arctic Oscillation)
AS	América do Sul
CP	Componente Principal
CPC	Climate Prediction Center
CSU	Universidade do Estado do Colorado (Colorado State University)
CWT	Transformada em Ondeletas Contínuas (Continuous Wavelet Transform)
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EOF	Função Ortogonal Empírica (Empirical Orthogonal Function)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
LN	Leste-Negativo
LP	Leste-Positivo
NAM	Modo Anular Sul (Northern Annular Mode)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ON	Oeste-Negativo
OP	Oeste-Positivo
QBO	Oscilação Quase-Bienal (Quasi-Biennial Oscillation)
SAM	Modo Anular Sul (Southern Annular Mode)

SEAS Sudeste da América do Sul

XWT Transformada de Ondeleta Cruzada (Cross-Wavelet Transform)

ZCAS Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT Zona de Convergência Intertropical

Sumário

1 **INTRODUÇÃO** **14**
1.1 Objetivos **17**

2 **REVISÃO DA LITERATURA** **18**
2.1 Oscilação Quase-Bienal **18**
2.2 Modo Anular Sul **22**
2.3 A QBO e os extratrópicos **26**

3 **DADOS E MÉTODOS** **29**
3.1 Dados **29**
3.2 Métodos **30**
3.2.1 Análise através de tabelas de contingência 31
3.2.1.1 Tabelas de contingência sem filtragem 31
3.2.1.2 Tabelas de contingência com filtragem 31
3.2.2 Compostos 32
3.2.3 Análise com ondeletas 33
3.2.3.1 Transformada de Ondeleta Contínuas 33
3.2.3.2 Transformada de Ondeleta Cruzada 34

4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO** **38**
4.1 Análise utilizando tabelas de contingência **38**
4.1.1 Tabelas de contingência sem filtragem 38
4.1.2 Tabelas de contingência com filtragem 41
4.1.3 Compostos 45
4.2 Análise com ondeletas **62**
4.2.1 Transformada de ondeleta contínua 63
4.2.2 Transformada de ondeleta cruzada 65

5 **SUMÁRIO E CONCLUSÕES** **71**

REFERÊNCIAS **75**

APÊNDICES **81**

1 Introdução

A atmosfera é conhecida por ser um sistema complexo com interações em diferentes escalas temporais e espaciais. Identificá-las e estudá-las se impõe como uma necessidade, uma vez que suas influências na estrutura da circulação atmosférica podem ser úteis para a compreensão da ocorrência de eventos anômalos em várias regiões do globo. As teleconexões, padrões em que forçantes locais agem para influenciar regiões remotas, são um bom exemplo desse mecanismo.

Um dos primeiros estudos de teleconexões foram relacionados a Oscilação Sul. Analisando dados de pressão ao nível do mar, Walker (1932) encontrou correlações negativas entre as regiões do Oceano Pacífico Sul e da Austrália/Oceano Índico. Nas décadas posteriores, diversos estudos foram realizados a respeito dos padrões de teleconexões.

À Ebdon (1960) e Reed et al. (1961) é atribuída a descoberta da Oscilação Quase-Bienal (*Quasi-Biennial Oscillation* - QBO). Fenômeno que ocorre na estratosfera tropical, e é caracterizado pela alternância quase periódica entre ventos de leste e ventos de oeste, denominados, respectivamente, de fase Leste e fase Oeste. Os ventos oscilam de leste a oeste e de volta a leste, com um ciclo que varia de 22 a 34 meses, com média em torno de 28 meses (BALDWIN et al., 2001). Esse regime se propaga para a baixa estratosfera com o tempo, diminuindo a velocidade do vento com o decréscimo de altitude (NAUJOKAT, 1986). A amplitude e o período dessa oscilação variam razoavelmente de ciclo para ciclo e a transição entre as fases Leste e Oeste, ocorrem entre 30 e 50 hPa (NAUJOKAT, 1986). A fase Leste da QBO é a mais intensa, entretanto, durante a fase Oeste os ventos propagam mais rapidamente para baixo, favorecendo a prevalência dessa fase por mais tempo em níveis mais baixos da estratosfera (NAUJOKAT, 1986).

Vários estudos já foram realizados investigando os efeitos da QBO no clima. Gray (1984), estudando a aparente associação entre as fases da QBO e a temporada de furacões no Atlântico, concluiu que durante a fase Oeste da QBO, furacões são mais frequentes do que na fase Leste. Estudos apresentam ainda influências da QBO na variabilidade do El Niño-Oscilação Sul (ENOS), nas monções

do oeste africano, no sistema de monção da Índia e na cobertura de neve na região da Eurásia (GRAY, 1984; MUKHERJEE et al., 1985; JURY; MCQUEEN; LEVEY, 1994; PEINGS et al., 2013).

Na região extratropical, o Modo Anular destaca-se como principal padrão de variabilidade climática nos extratrópicos. Este fenômeno descreve uma oscilação Norte- Sul de massa atmosférica entre as latitudes médias e as regiões polares (GONG; WANG, 1999), em ambos os hemisférios. É então conhecido como Oscilação Ártica (*Artic Oscillation* - AO), ou Modo Anular Norte (*Northern Annular Mode* - NAM), no Hemisfério Norte (HN) e Oscilação Antártica (*Antarctic Oscillation* - AAO) ou Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* - SAM), no Hemisfério Sul (HS) (THOMPSON; WALLACE, 2000). A estrutura desse padrão de variabilidade é bem similar em ambos os hemisférios, ocorrendo na troposfera em todos os meses do ano. O SAM atinge sua "fase ativa" - máximo em intensidade na estratosfera - ao final da primavera, enquanto que para o NAM, esse estágio ocorre durante o inverno boreal (THOMPSON; WALLACE, 2000). A fase positiva do Modo Anular é caracterizada por anomalias negativas de altura geopotencial sobre regiões polares e anomalias positivas em latitudes médias. O oposto ocorre durante a fase negativa (THOMPSON; WALLACE, 2000).

Os impactos do SAM no clima do HS vêm sendo amplamente investigados. Gillet, Kell e Jones (2006) fizeram uma investigação destes impactos e demonstraram que a fase positiva do SAM está associada a um significativo resfriamento na Antártica e boa parte da Austrália e aquecimento na Península Antártica, Argentina, Tasmânia e sul da Nova Zelândia. A fase positiva está associada também a condições secas anômalas sobre o sul da América do Sul (AS), Nova Zelândia e Tasmânia, e condições chuvosas anômalas sobre a Austrália e África do Sul.

Vasconcellos e Cavalcanti (2010) identificaram a influência das fases do SAM na precipitação sobre parte da Região Sudeste do Brasil, durante o verão austral, através de compostos para verões extremos secos e chuvosos. Elas observaram que verões extremos chuvosos estão relacionados com a fase positiva do SAM, enquanto os secos estão relacionados a fase negativa.

Blázquez e Solman (2017) analisaram a variabilidade interanual da atividade frontal sobre o sul da AS. A análise teve como foco o inverno e primavera austral. As autoras mostraram que durante o inverno, a atividade frontal é modulada pelo SAM e pelo ENOS, enquanto que na primavera, apenas o sinal do ENOS foi encontrado. A

variabilidade da atividade frontal possui influência robusta na variabilidade interanual da precipitação sobre o sul da AS e oceanos adjacentes. Sobre o continente, foi encontrado que as anomalias do padrão de precipitação associadas a variabilidade dos sistemas frontais possuem um sinal significativo sobre o Sudeste da AS (SEAS), centro e sul do Chile, durante o inverno.

Ao analisar a influência mês-a-mês do SAM no clima da AS, Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2018) encontraram diferentes impactos, de acordo com o mês observado. Os resultados encontrados indicam que o SEAS e parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são as regiões mais afetadas pelo SAM. Embora, a maneira como ocorre esse impacto varie mês-a-mês.

Embora seja um fenômeno tropical, a influência da QBO na região extratropical vem sendo investigada por diversos autores, principalmente no HN. Holton e Tan (1980) apresentaram forte evidência da influência da QBO na estratosfera extratropical no HN. Eles mostraram que a altura geopotencial nas latitudes altas são significativamente menores durante a fase Oeste da QBO. Holton e Tan (1982) e Baldwin e Tung (1994) relacionaram variáveis da estratosfera extratropical, como concentração da coluna de ozônio e momento angular, com o sinal da QBO. Para o HN, Coughlin e Tung (2001) mostraram que existe uma influência estatisticamente significativa entre o sinal da QBO e cada nível do NAM, de 10 mb até 1000 mb, em que todos eles apresentam um pico com a mesma frequência da QBO.

Estudos variados analisaram a relação entre a QBO e o Modo Anular, mas em geral, eles têm como foco o NAM. Poucos trabalhos relacionam a QBO com o SAM, especificamente. Como exemplo, Roy e Haigh (2011), que utilizaram um modelo de regressão para analisar a influência de diversos fatores no SAM, dentre eles um índice que combina a atividade solar e as fases da QBO (solar*QBO). A partir dos resultados obtidos, eles apresentaram um sinal robusto da influência do índice solar*QBO, no entanto não apresentaram resultados de como esse índice influenciaria o SAM. Eles mostraram que a combinação de uma baixa atividade solar durante a fase Oeste da QBO e alta atividade solar durante a fase Leste da QBO estão associados ao fortalecimento das fases dos modos polares (fase positiva do SAM e do NAM). Enquanto que a combinação contrária corresponde ao enfraquecimento dos mesmos (fase negativa do SAM e do NAM).

1.1 Objetivos

Diversos estudos apontam para a influência da QBO e do SAM, separadamente, ao redor do globo, de forma que a compreensão de seus impactos no clima pode vir a auxiliar na melhoria da previsão de tempo e climática. Uma vez que a relação entre a QBO e o NAM vem sendo abordada, com resultados que apontam que as oscilações estão relacionadas entre si, torna-se necessário investigar se essa relação também se verifica para o HS, entre a QBO e o SAM. Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de verificar a possível relação entre a QBO e o SAM e a influência combinada das fases desses padrões de teleconexão no clima da AS.

Para alcançá-lo, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Verificar, com o auxílio de tabelas de contingência confeccionadas com os índices da QBO e do SAM, a possível relação entre as fases dessas oscilações;
- Identificar, através de compostos de variáveis meteorológicas, os impactos da combinação das fases da QBO e do SAM no clima da AS;
- Ratificar e aprofundar os resultados obtidos ao longo do trabalho com o uso de ondeletas;
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com os de outros autores.

2 Revisão da Literatura

2.1 Oscilação Quase-Bienal

As primeiras observações dos ventos estratosféricos equatoriais foram realizadas no evento da erupção do Krakatoa (1883), quando num período de 2 semanas, a fumaça injetada na atmosfera a partir da erupção circundou o globo de leste para oeste; ficando conhecido como *krakatau easterlies.* Em 1908, um meteorologista alemão - A. Berson - ao lançar balões de radiossondagem na África tropical, encontrou ventos de oeste em aproximadamente 15 km de altitude, próximos a tropopausa, ficando conhecidos como *Berson westerlies* (BALDWIN et al., 2001). Por aproximadamente 50 anos, havia apenas observações esporádicas para contradizer a existência dos ventos de leste na estratosfera tropical se sobrepondo aos ventos de oeste (HAMILTON, 1998). Os estudos realizados na época contavam com séries temporais curtas para que qualquer conclusão definitiva fosse realizada a respeito da variação dos ventos na estratosfera tropical (PALMER, 1954; GRAYSTONE, 1959; BALDWIN et al., 2001). Atribui-se à R. J. Reed e R. A. Ebdon a descoberta da QBO. Utilizando dados de radiossondagem da ilha Kanton (2.8°S), Reed et al. (1961) mostraram que ventos de leste e oeste que se originam acima de 30 km de altitude, se alternam e propagam para a baixa estratosfera a uma velocidade de 1 km por mês. Os autores pontuaram que tal alternância ocorre em aproximadamente 13 meses, sendo necessários 26 meses para um ciclo completo. Outros estudos, também utilizando dados da ilha Kanton, mas para um período maior e incluindo dados de outras estações na região equatorial, foram capazes de concluir: que a oscilação apresenta um período completo (fases Leste e Oeste) variável, ligeiramente superior a 2 anos; que as flutuações nos ventos ocorrem simultaneamente ao redor de todo o cinturão equatorial e que leva cerca de 1 ano para que o regime dos ventos descenda de 10 para 60 hPa (EBDON, 1960; EBDON; VERYARD, 1961).

O nome do fenômeno (QBO) foi originalmente cunhado por Angell e Korshover (1964). Segundo Wallace (1973), a variação no regime completa um ciclo, ou seja, os ventos oscilam de leste a oeste e de volta a leste, em intervalos de 22 a 34 meses, com uma média em torno de um pouco mais de 28 meses. Zonas de cisalhamento de

oeste (em que os ventos de oeste aumentam com a altura) descendem de maneira mais regular e mais rapidamente do que as zonas de cisalhamento de leste. A amplitude da QBO apresenta uma pequena dependência relativa à latitude, se estendendo a partir o equador, 12° para norte e 12° para sul, de forma aproximadamente gaussiana (WALLACE, 1973). Naujokat (1986), utilizando dados de diversas estações na região equatorial, realizou um estudo com um período mais abrangente que os anteriores, compreendendo de 1953 a 1985, o que possibilitou que a autora destacasse algumas características anteriormente não ressaltadas. A máxima amplitude da oscilação é encontrada em 20 hPa; a fase Leste de modo geral é mais intensa do que a fase Oeste; o intervalo entre o máximo dos ventos de leste e o máximo dos ventos de oeste é muito mais curto do que o inverso; em ambos os regimes, a velocidade diminui conforme a altura diminui; nos níveis mais altos (baixos) da estratosfera, a fase Leste (Oeste) tende a permanecer por mais tempo, enquanto nos níveis mais baixos (altos) permanece por menos (mais) tempo. Essas características podem ser observadas na Figura 1. Apesar da QBO não ser literalmente uma oscilação bienal, existe uma tendência de estação preferencial para a reversão das fases. Considerando o nível de 50 hPa, o *onset* tanto da fase Leste quanto da fase Oeste ocorre principalmente no final da primavera boreal (DUNKERTON, 1990).

Salby e Callaghan (2000) encontraram, usando dados de radiossondagem próximos ao equador em 45 hPa, de 1956 a 1996 (da *Free Universit of Berlin*), uma variação decadal na duração da fase Oeste, oscilando de 12 a 23 meses, sendo mais curta durante o máximo solar e mais longa durante o mínimo solar. A fase Leste desse nível, por outro lado, parece ter sempre cerca de 12 meses de duração. Os autores sugeriram que a propagação descendente dos ventos de leste tende a parar próximo de 30 hPa durante o mínimo solar, em vez de descer e substituir os ventos de oeste abaixo, prolongando assim a fase Oeste de cerca de 45 hPa. Hamilton (2002) apresentou que essa aparente conexão se mostra mais fraca para o máximo solar de 1981, e essa relação se enfraquece quando uma série temporal maior é analisada. Hamilton sugere que outros mecanismos não relacionados ao ciclo solar podem ser os responsáveis por gerar essa variação quase-decadal na fase da QBO, tais como variações de aerossóis na estratosfera devido à inserção associada a erupções vulcânicas, ou variações sistemáticas nas forçantes de ondas troposféricas.

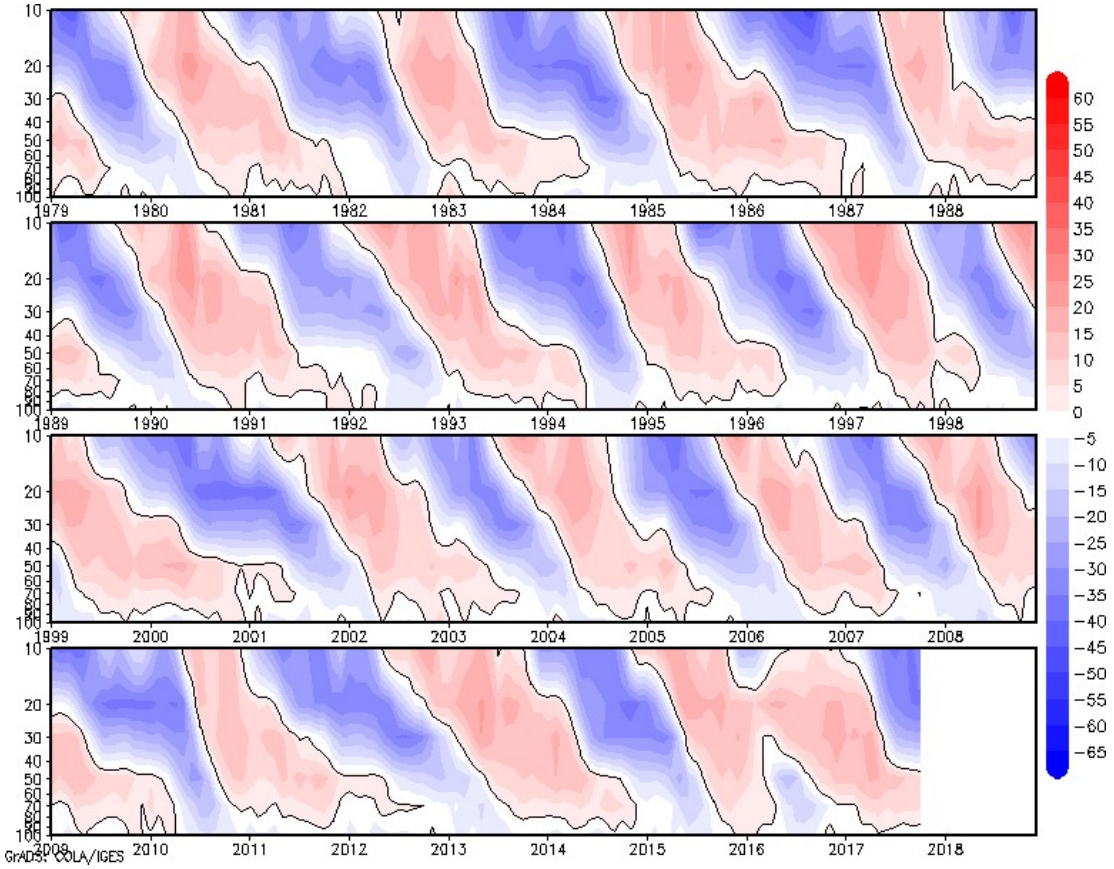

Figura 1 – Seção tempaltura da média longitudinal do vento zonal mensal (m/s).

nível, por outro lado, parece ter sempre cerca de 12 meses de duração. Os autores sugeriram que a propagação descendente dos ventos de leste tende a parar próximo de 30 hPa durante o mínimo solar, em vez de descer e substituir os ventos de oeste abaixo, prolongando assim a fase Oeste de cerca de 45 hPa. Hamilton (2002) apresentou que essa aparente conexão se mostra mais fraca para o máximo solar de 1981, e essa relação se enfraquece quando uma série temporal maior é analisada. Hamilton sugere que outros mecanismos não relacionados ao ciclo solar podem ser os responsáveis por gerar essa variação quase-decadal na fase da QBO, tais como variações de aerossóis na estratosfera devido à inserção associada a erupções vulcânicas, ou variações sistemáticas nas forçantes de ondas troposféricas.

Acredita-se que a QBO seja impulsionada pela propagação vertical de ondas planetárias (Kelvin, ondas mistas de Rossby-gravidade e possivelmente ondas de gravidade) no guia de onda equatorial (HOLTON; LINDZEN, 1972). Através de um modelo 1D, esses autores simularam a QBO sendo gerada através da propagação

vertical de ondas de Kelvin, que contribuem com a forçante de oeste, e ondas mistas de Rossby-gravidade, que contribuem com a forçante de leste. A amplitude observada dessas ondas, apesar de pequenas, se mostraram grandes o suficiente para gerar a QBO (HOLTON; LINDZEN, 1972). Plumb e McEwan (1978) montaram um experimento que consistia em um grande recipiente em formato de anel, preenchido com um fluido salino estratificado, a fim de simular a atmosfera. O fundo do recipiente era formado de uma membrana flexível que poderia oscilar para cima e para baixo, para produzir ondas de gravidade se propagando verticalmente. Essas ondas viajavam tanto no sentido horário quanto anti-horário, representando as ondas de Kelvin e de Rossby-gravidade, respectivamente. Para ondas com amplitudes grandes o suficiente, um fluxo médio induzido por onda se estabelecia no fluído, caracterizado por reversões periódicas progredindo para baixo, se assemelhando ao que é encontrado na QBO. Tal resultado fornece suporte para o modelo conceitual de Holton e Lindzen (1972).

Ao analisar o impacto da QBO no clima, Ebdon (1975) mostrou que a fase Leste da QBO coincide com um aquecimento estratosférico súbito, jatos do Atlântico enfraquecidos e invernos mais frios no norte da Europa e leste dos Estados Unidos; enquanto que a fase Oeste frequentemente está associada com invernos menos intensos no leste dos Estados Unidos, jatos do Atlântico mais intensos e invernos com um número elevado de tempestades no norte da Europa.

Gray (1984) investigou a aparente associação entre as fases da QBO e a temporada de furacões no Atlântico; concluiu que durante a fase Oeste da QBO, ou enquanto a QBO começa a se tornar de Oeste, a atividade de ciclones tropicais no Atlântico é mais intensa quando em comparação com a fase Leste. Como resultado, foram desenvolvidas previsões sazonais da atividade de ciclones tropicais por Gray na Universidade do Estado do Colorado (*Colorado State University* - CSU), usando a QBO como um de seus preditores. Entretanto, posteriormente as previsões da CSU cessaram o uso da QBO como preditor (KLOTZBACH, 2007). Camargo e Sobel (2005), utilizando uma série temporal de dados mais longa, mostraram que a relação da QBO com a atividade de ciclones não se mantinha para os anos após 1983. Os autores em sua análise excluíram os anos de ENOS, diferentemente de Gray (1984), e apontam que influência dos anos de ENOS na série temporal possa ser um dos motivos para não encontrarem a mesma relação. Os autores sugerem ainda que a variabilidade decadal da QBO pode ser a razão pela qual o resultado encontrado

difere do anterior, uma vez que a série de dados utilizada anteriormente não seria grande o suficiente para capturá-la.

Brönnimann et al. (2016) utilizaram uma série de dados reconstruída da QBO desde 1908 para investigar os efeitos da QBO no sistema climático. Em seus resultados, os autores encontraram algumas conexões, embora com fraca significância estatística. O sinal da QBO no vórtice polar estratosférico do HN, que é encontrado quando dados recentes são utilizados, não é verificado no período de 1908 a 1957. Opostamente, é encontrada uma relação entre a temperatura do ar em superfície em Berlim e a série da QBO para o período de 1908 a 1957, que não se verifica para o período mais recente. Durante a fase Leste da QBO, a temperatura do ar em Berlim seria mais alta em relação a fase Oeste.

Gray et al. (2018) investigaram a teleconexão entre a QBO e a precipitação tropical no HN. Uma vez que a escolha do nível para a definição do índice da QBO pode alterar os resultados encontrados, os autores utilizaram uma abordagem objetiva através do emprego da Função Ortogonal Empírica (*Empirical Orthogonal Function* - EOF) dos ventos equatoriais em um intervalo de pressão, dessa maneira, dependências na altura podem ser capturadas. Eles encontraram que um aumento da precipitação ocorre no Pacífico tropical oeste durante a fase Oeste da QBO, particularmente durante o verão boreal, com um máximo de sensibilidade relativo aos ventos da QBO definidos em 70 hPa. A banda de precipitação associada a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) de desloca para sul durante a fase Oeste. Os resultados obtidos a partir da análise baseada no EOF, sugerem que esta resposta da ZCIT é mais sensível ao cisalhamento vertical do vento nas proximidade de 70 hPa.

2.2 Modo Anular Sul

Na região extratropical, o Modo Anular destaca-se como principal padrão de variabilidade climática nos extratrópicos. Esse termo é utilizado para descrever uma simetria zonal em ambos os hemisférios e um balanço Norte-Sul de massa atmosférica entre altas latitudes e médias. Esse padrão é conhecido como SAM no HS, e NAM no HN (THOMPSON; WALLACE, 2000). A estrutura desse padrão de variabilidade é bem similar em ambos os hemisférios, ocorrendo na troposfera em

todos os meses do ano. O SAM atinge seu “período ativo” - máximo em intensidade na estratosfera - ao final da primavera austral, enquanto que para o NAM, esse estágio se dá durante o inverno boreal (THOMPSON; WALLACE, 2000). A fase positiva do Modo Anular é caracterizada por anomalias negativas de altura geopotencial sobre regiões polares e anomalias positivas em latitudes médias. O oposto ocorre durante a fase negativa (THOMPSON; WALLACE, 2000), como visto na Figura 2.

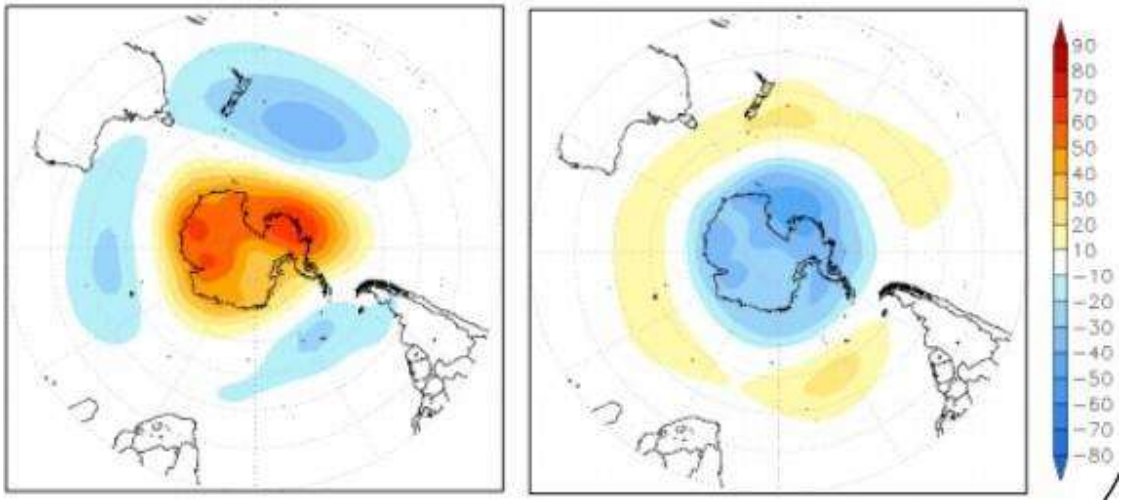

Figura 2 – Primeira EOF da anomalia mensal de altura geopotencial em 700 hPa (1980-2006): julho - representativo da fase negativa do SAM (esquerda); janeiro - representativo da fase positiva do SAM (direita). Fonte: Vasconcellos (2012).

Kodera e Koide (1997) avaliaram tendências lineares no HN da altura geopotencial em 500 hPa, temperatura da baixa troposfera e média zonal do vento zonal para o período de 1965-1993. Em sua análise, os autores destacam um padrão do tipo dipolo nas tendências de altura geopotencial em 500 hPa similar ao NAM positivo. Forçado pelas tendências de altura geopotencial, a distribuição do vento zonal apresenta tendências negativas nos subtrópicos e valores positivos nas latitudes altas durante o inverno. Eles apontam para o fato de que tais tendências surgem primeiro na alta estratosfera, e então se propagam para a troposfera.

As anomalias de altura geopotencial desde a superfície até a média estratosfera extratropical no HN são moduladas pelo NAM (BALDWIN; DUNKERTON, 1999). Na média estratosfera, a assinatura do NAM é um padrão quase zonalmente simétrico representando um vórtice polar intenso ou fraco. A associação do padrão NAM na

troposfera com a modulação da intensidade do vórtice polar estratosférico fornece talvez a melhor medida do acoplamento entre a estratosfera e a troposfera. Ao examinarem separadamente a assinatura do NAM em diferentes níveis na troposfera e estratosfera, Baldwin e Dunkerton (1999) puderam mostrar que as anomalias típicas do NAM surgem primeiro na estratosfera e se propagam para baixo. Os autores mostraram que, no inverno, a correlação de anomalias de geopotencial filtradas para 90 dias entre o nível de 10 hPa e o nível de 1000 hPa excede 0,65 quando a série temporal na superfície está defasada em cerca de três semanas.

Como evidenciado por diversos autores, o SAM é responsável por alterar a circulação atmosférica no HS, representando um importante papel na variabilidade climática de diferentes regiões do hemisfério (SILVESTRI; VERA, 2009). Estudos sugerem que durante a fase positiva dos modos anulares, há uma intensicação dos ventos de oeste e da baroclinia nas altas latitudes, enquanto as latitudes médias experimentam um enfraquecimento dos mesmos; um deslocamento em direção ao pólo sul do limite polar da célula de Hadley e do limite equatorial da célula de Ferrel, em relação à sua posição climatológica; um aquecimento anômalo nas latitudes médias e resfriamento anômalo das latitudes polares e uma anomalia negativa da coluna total de ozônio nas altas latitudes, indicando um aumento da tropopausa nesta região (THOMPSON; WALLACE, 2000).

Silvestri e Vera (2003) analisaram o impacto das fases do SAM no clima do SEAS. Os autores concluíram que a influência do SAM é particularmente intensa durante o inverno e final da primavera, apesar de aprensentarem sinais opostos. Durante o final da primavera, há uma correlação negativa entre o SAM e a precipitação sobre o SEAS. Entretanto, Silvestri e Vera (2009) analisaram a estabilidade temporal dos impactos do SAM no clima da AS durante a primavera austral. Seus resultados apontam que o padrão de circulação típica associado ao SAM, varia entre as décadas de 1960-70 e 1980-90, principalmente na região da Austrália e AS. Nas primeiras décadas, o SAM positivo está associado ao desenvolvimento de uma circulação anticiclônica anômala em superfície sobre o Atlântico subtropical sudoeste, promovendo a advecção de umidade e aumento da precipitação no SEAS. Nas décadas mais recentes, no entanto, a anomalia anticiclonica induzida pelo SAM positivo se localiza sobre parte do sul da AS e Atlântico adjacente, enfraquecendo a convergência de umidade e consequentemente diminuindo

a precipitação no SEAS.

Carvalho, Jones e Ambrizzi (2005) utilizaram regressões das anomalias de vento zonal em 200 hPa e de altura geopotencial em 700 hPa para os meses de verão austral, afim de verificar a influência das fases do SAM nos jatos subtropical e polar. Segundo o estudo, a intensicação do jato subtropical, seu deslocamento em direção ao equador e o enfraquecimento do jato polar, são observados durante o SAM negativo; já na fase positiva, o jato subtropical desloca-se em direção ao polo sul e o jato polar intensifica-se. Os autores investigaram também a influência da oscilação nos transientes, e seus resultados indicam que as fases distintas do SAM modulam a latitude de formação dos ciclones e seu deslocamento máximo em direção ao equador. O deslocamento do jato subtropical para o equador durante a fase negativa do SAM favorece o deslocamento da localização de frontogênese e de dissipação de ciclones para latitudes mais baixas. Assim como Carvalho, Jones e Ambrizzi (2005), Reboita, Ambrizzi e Rocha (2009) também observaram que, na fase negativa do SAM, a trajetória dos ciclones em todo o HS deslocaffse para norte, quando comparado com a fase positiva. Os autores também encontraram que, durante a fase negativa do SAM, na região da AS e Atlântico Sul ocorre intensa atividade frontogenética e anomalias positivas de precipitação ocorrem na costa SEAS. O oposto é observado na fase positiva.

Santos e Franco (2010) estudaram compostos do vento troposférico e de campos cinemáticos sobre a AS e entorno. Para o cálculo dos compostos, os autores realizaram médias ponderadas, utilizando o índice SAM como peso. Seus resultados indicam que a fase positiva do SAM conduz a uma configuração de bloqueio, que se inicia nos setores central e leste do Oceano Pacíco Sul e persiste sobre a costa leste da AS e sobre o Oceano Atlântico Sul. Essa configuração faz com que ocorram períodos de subsidência e estiagens quando comparado à fase negativa, ao bloquear os ciclones extratropicais em sua travessia por este cinturão.

Cardozo, Reboita e Garcia (2015) analisaram a ocorrência de frentes frias na AS e sua relação com as fases do SAM. Para quase todas as cidades do estudo, a ocorrência de frentes frias apresenta uma preferência pela fase positiva do SAM na estação de verão e pela fase negativa, nas estações de inverno e primavera.

Holz et al. (2017) analisaram a relação entre as fases do SAM e incêndios florestais no sul da AS. Os autores utilizaram dados *proxy* [1] para reconstruir o índice

[1] Técnicas indiretas com uso de testemunhos – baseados em informações biológicas, geológicas ou geofísicas – que possibilitam, com maior confiabilidade, reconstruir e obter estimativas bastante próximas das condições climáticas reais ocorridas no passado

SAM para o período de 1531 a 2010, e uma rede de dados de anéis de árvores, consistindo em 1767 árvores com cicatrizes de fogo de 97 localizações (de 22°S a 54°S) no sul da AS. Eles constataram que, tanto na escala interanual como na multidecadal, um elevado gradiente latitudinal de atividade de incêndios ocorre sincronizadamente com a fase positiva do SAM nos anos de 1665 a 1995. A fase positiva do SAM está associada a condições quentes nas florestas ricas em biomassa, favorecendo um grande espalhamento do fogo em circunstâncias em que há combustível para queima.

Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2018) avaliaram os impactos do SAM no clima da AS. Para isso, os autores confeccionaram compostos de anomalia de temperatura do ar a 2m e precipitação para ambas as fases do SAM, excluindo os anos de ENOS, e analisaram os impactos mês-a-mês. Seus resultados indicam que o SEAS e parte das Regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil são as áreas mais afetadas pelo SAM. Entretanto, a maneira como ocorre esse impacto varia de acordo com o mês, desde a intensidade das anomalias observadas até influências opostas para uma mesma região.

Schossler et al. (2018) analisaram a influência do SAM e do ENOS nas anomalias de precipitação da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, dividindo-a em três regiões: sul, central e norte. As anomalias de precipitação média na Planície Costeira do RS e na costa sul possuem correlação com o ENOS e o SAM. Entretanto, as anomalias obtidas somente para a região central apresentam correlação apenas com o SAM. Durante a fase negativa do SAM são, no geral, observadas anomalias positivas de precipitação. As anomalias de precipitação da região definida como norte não são correlacionadas com nenhum dos dois índices. Em períodos com mais de 5 meses de anomalia de precipitação, positivas ou negativas, SAM e ENOS muito intensos foram identificados.

2.3 A QBO e os extratrópicos

A influência da QBO na estratosfera extratropical vem sendo investigada por diversos autores. Holton e Tan (1982) e Van Loon e Labitzke (1987) sugerem que a fase Leste (Oeste) da QBO está associada a vórtices polares estratosféricos enfraquecidos (mais intensos). Holton e Tan (1980), Holton e Tan (1982) mostraram que a intensidade do jato polar noturno e as ondas planetárias na alta troposfera e na

baixa estratosfera estão correlacionadas com a QBO tropical. Além disso, eles mostraram que no HN durante o início do inverno, quando a fase QBO é de leste em 50 hPa, as alturas geopotenciais em latitudes altas são significativamente maiores e o vórtice polar mais fraco do que durante a fase Oeste da QBO. Naoe e Shibata (2010) também investigaram a relação entre a QBO e o vórtice polar estratosférico, igualmente focando no HN e nos meses de inverno. Os autores, diferentemente dos anteriores, utilizaram dados de reanálise, sendo elas o ERA-40 para o período de setembro de 1957 a agosto 2002 e o ERA-interim para o período de setembro de 2002 a dezembro 2004. Eles analisaram compostos de vento zonal, temperatura e fluxo de Eliassen-Palm, gerados a partir da diferença da fase Leste menos a fase Oeste. Os resultados encontrados ratificaram os estudos anteriores.

Labitzke (1987) e Labitzke e VanLoon (1988) encontraram uma intensa relação entre a modulação do vórtice polar estratosférico pela QBO e o ciclo solar de 11 anos durante os meses de janeiro e fevereiro, sugerindo que a influência do ciclo solar modifica a relação anteriormente encontrada no final do inverno. A significância estatística do sinal da QBO no inverno do HN tem sido amplamente investigada. Os detalhes da forma como a fase da QBO é definida, a seleção dos meses para análise, a série temporal, entre outros fatores podem influenciar os resultados obtidos. Por exemplo, o efeito da QBO no vórtice polar estratosférico é bastante intenso para os meses de dezembro e janeiro, mas é fraco para fevereiro (BALDWIN; O'SULLIVAN, 1995).

Holton e Tan (1980) utilizaram dados de estações no HS, próximos à Austrália, para mostrar que de setembro a novembro (primavera no HS), como resposta extratropical à QBO (definida em 50 hPa), são observados ventos mais intensos na estratosfera (50 hPa) durante a fase Oeste da QBO em relação à fase Leste, embora com significância estatística fraca. Também examinando a primavera do HS, Garcia e Solomon (1987) sugeriram que uma aparente modulação bienal dos valores mínimos do ozônio polar em outubro pode ser devido à influência da QBO, e Newman e Randel (1988) notaram essa variabilidade como coerente com as variações na forçante de ondas planetárias.

Estudos relacionando a QBO e o Modo Anular já foram realizados, no entanto, no geral são focados no HN. Holton e Tan (1980), ao examinarem compostos de geopotencial em 50 hPa no HN, gerados a partir das fases da QBO, encontraram um padrão semelhante ao NAM. Utilizando dados de 1964 a 1996,

período mais abrangente do que o utilizado por Holton e Tan (1980), Baldwin e Dunkerton (1999) mostraram que o padrão encontrado anteriormente persiste para uma série temporal maior. Os autores geraram mapas de correlação entre o NAM e os ventos zonais da baixa estratosfera, seus resultados apontam que a QBO pode ser responsável por modular o NAM. Indicaram ainda que as fases da QBO, através da modulação do vento zonal médio, afetam a propagação de ondas de escala planetária.

Coughlin e Tung (2001) mostraram que existe uma influência entre o sinal da QBO e cada nível do NAM, de 10 mb até 1000 mb, em que todos eles apresentam um pico com a mesma frequência da QBO com significância estatística. No entanto a relação entre o NAM e a QBO não está bem estabelecida para a superfície. Somente quando usadas apenas médias mensais e considerando os meses de inverno boreal (DJFM, quando a altura geopotencial apresenta maior variância nesse hemisfério) é que se torna possível encontrar um pico de mesma frequência entre as oscilações em todos os níveis analisados. Para essa análise, os autores utilizaram a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourrier Transform* - FFT) com a janela de Hanning para processar os dados.

Ruzmaikin et al. (2005), usando dados assimilados da reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), mostraram que a assinatura extratropical da QBO é vista principalmente no NAM, estando a fase positiva no NAM associada a fase Oeste da QBO e a fase negativa associada a fase Leste da QBO. Scaife et al. (2014) mostraram, através de compostos da diferença média na pressão do nível do mar no inverno entre os casos de fase Leste e Oeste (L-O), pressão acima do normal sobre o Ártico e abaixo do normal sobre as latitudes médias, particularmente na região do Atlântico, indicam um NAM mais negativo na fase Leste em relação a Oeste.

Poucos estudos foram realizados focando o SAM. Labitzke (2004) mostrou que durante a fase Oeste da QBO, quando o sinal do ciclo solar é máximo são observados invernos mais quente e um vórtice polar enfraquecido, correspondendo a uma fase negativa do SAM.

Roy e Haigh (2011) utilizaram um modelo de regressão afim de analisar a influência de diversos fatores no SAM. A partir dos resultados obtidos, os autores mostraram que através do método empregado, utilizando apenas o índice da QBO, nenhuma relação foi encontrada. Entretanto, ao utilizar um índice combinando a atividade solar e

as fases da QBO (solar*QBO) eles mostram um sinal robusto da influência do índice solar*QBO. Contudo, eles não apresentam resultados de como esse índice influencia o SAM. Os autores mostraram também que a combinação de uma baixa atividade solar durante a fase Oeste da QBO e alta atividade solar durante a fase Leste da QBO estão associados ao fortalecimento das fases dos modos polares (fase positiva do SAM e do NAM). Enquanto que a combinação contrária corresponde ao enfraquecimento dos mesmos (fase negativa do SAM e do NAM).

Os estudos anteriores sugerem que exista a influência das fases da QBO na modulação do SAM, fazendo necessária uma maior investigação sobre essa relação. Além do mais, diversas análises foram realizadas a respeito da influência tanto da QBO, tanto do SAM no clima, este último inclusive sendo responsável por parte da variabilidade climática AS. Desta forma, uma investigação da influência conjunta dessas oscilações no clima da AS apresenta-se como imprescindível.

3 Dados e Métodos

3.1 Dados

Para o desenvolvimento desse estudo, foram usadas saídas mensais da Reanálise Era-Interim do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF): geopotencial em 700, 500, 200 e 30 hPa, temperatura do ar em 850 hPa, componentes zonal e meridional do vento em 850 hPa e componente zonal do vento em 30 hPa. Essa reanálise inclui uma grande variedade de parâmetros de superfície a cada 3 horas, descrevendo o tempo e condições de ondas oceânicas e de superfície da terra; parâmetros de ar superior a cada 6 horas, cobrindo a troposfera e a estratosfera; integrais verticais dos fluxos atmosféricos e médias mensais para diversos parâmetros. Outros campos derivados também são produzidos. A resolução horizontal utilizada foi de 0,5°x 0,5° lat./lon e o período considerado para o estudo de 1981-2010. Maiores informações sobre essa reanálise em Dee et al. (2011).

Para as análises a cerca da precipitação, foram utilizados dados mensais do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). O GPCP é um conjunto de dados de precipitação mensal global amplamente utilizado. Possui cobertura global em uma grade de 2,5°x 2,5°. O conjunto de dados começa em 1979 e continua até o presente,

com algum atraso para o processamento. O GPCP combina medições de microondas e infravermelho, e saídas de radiação de onda longa de satélites e, sobre a terra, também incorpora observações de pluviômetro. O período considerado para o estudo foi de 1981-2010. Maiores informações sobre os dados podem ser obtidas em Adler et al. (2003).

3.2 Métodos

Após a obtenção dos dados, foram calculados primeiramente o índice da QBO em 30hPa e os índices SAM para 4 diferentes níveis na troposfera e estratosfera sendo eles: 700, 500, 200 e 30 hPa.

Para o cálculo do índice da QBO, realizou-se uma média zonal (0°-360°) da velocidade da componente zonal do vento, na latitude 0°, para o nível de 30 hPa. Na fase Leste, os valores do índice são negativos, enquanto que na fase Oeste, os valores são positivos. Essa metodologia foi baseada no trabalho de Naujokat (1986).

O conceito de EOF foi introduzido por Lorenz (1986) como metodologia ao realizar um estudo com a finalidade de encontrar uma maneira eficaz de extrair uma representação simplificada ou compacta de um conjunto de dados. O objetivo era uma representação otimizada do estado da atmosfera, em função do tempo e do espaço, ou seja, uma sequência temporal de campos meteorológicos. Através do método de EOF, pode-se obter padrões espaciais de variabilidade e a variação temporal de um único campo escalar (BJÖRNSSON; VENEGAS, 1997).

O índice SAM, em cada nível, foi obtido a partir da EOF da anomalia de altura geopotencial no nível correspondente (BALDWIN; THOMPSON, 2009). A série temporal do índice SAM em cada nível foi obtida através da primeira Componente Principal (CP) do EOF no nível equivalente. Os valores positivos (negativos) do índice SAM representam anomalias positivas (negativas) de altura geopotencial nas latitudes médias e anomalias negativas (positivas) em altas latitudes, ou seja, a fase positiva (negativa) do SAM. Quando o padrão da EOF apresentou o sinal oposto ao citado acima, a série temporal da CP foi multiplicada por -1. Esse índice é uma adaptação do apresentado na literatura e fornecido pelo *Climate Prediction Center* (CPC)/ *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA)[1], onde a área utilizada para o cálculo do índice é de 20°-90°S (THOMPSON; WALLACE, 2000). Neste trabalho, a área foi reduzida para 30°-90°S, de forma a minimizar a

[1] Índice disponibilizado em: http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/history/method.shtml

influência de fenômenos da região tropical, como por exemplo, o ENOS, no cálculo do EOF (VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2018). O estudo foi dividido em 2 etapas: na primeira, foi realizada uma análise estatística simples e a confecção de compostos, na segunda, foi utilizada a transformada contínua de ondeletas e a tranformada cruzada de ondeletas para uma análise estatística mais aprofundada. Segue a descrição dos procedimentos.

3.2.1 Análise através de tabelas de contingência

3.2.1.1 Tabelas de contingência sem filtragem

Com os índices calculados, foram realizadas comparações entre as séries temporais do índice QBO e dos índices SAM através de tabelas de contingência, para todos os meses do ano, sem defasagem. Foram utilizadas tabelas 2x2, em que o quadrado acima, à esquerda, corresponde aos casos de ocorrência de fase negativa do SAM durante a fase Leste da QBO (fase LN); o quadrado acima, à direita, corresponde aos casos de ocorrência de fase negativa do SAM durante a fase Oeste da QBO (fase ON); o quadrado de baixo, à esquerda, corresponde aos casos de ocorrência de fase positiva do SAM durante a fase Leste da QBO (fase LP); e o quadrado de baixo, à direita, corresponde aos casos de ocorrência de fase positiva do SAM durante a fase Oeste da QBO (fase OP), como pode ser observado na Figura 3.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG		
	POS		

Figura 3 – Exemplo da tabela de contingência.

3.2.1.2 Tabelas de contingência com filtragem

O SAM é um padrão que sofre influência de diversas escalas temporais (SCHENZINGER; OSPREY, 2015). Sua série temporal é o resultado do somatório

dessas influências diversas. A QBO é um padrão de baixa frequência e uma vez que deseja observar uma possível relação entre ambos os padrões, torna-se interessante comparar não somente as séries em seu estado natural, mas também utilizando um filtro para excluir do índice SAM de cada nível a variabilidade de alta frequência. Após análise, decidiu-se por utilizar a média móvel, como o método de filtragem da alta frequência. A média móvel é um filtro linear simples que converte uma série temporal $\{X_t\}$, em outra $\{Y_t\}$, pela operação linear:

$$Y_t = \sum_{r=-q}^{+s} a_r x_{t+r} \quad (3.1)$$

Na Equação acima, *q* e *s* representam os limites do somatório, para esse estudo *q*=*s*. $\{X_t\}$ representa a série que será filtrada, $\{Y_t\}$ a série resultante e a_r são os pesos utilizados na média móvel. Para esse estudo, a_r é dada pela expansão de $(\frac{1}{2} + \frac{1}{2})^{2q}$, em que *q* é o limite do somatório descrito anteriormente. Dessa maneira, o peso dos termos mais próximos ao central são maiores, dando a eles maior importância. A escolha do *q* é feita de acordo com o tipo de filtragem que se deseja realizar. Para a filtragem de 24 meses (2 anos), o valor correspondente é *q*=12, no entanto, para valores muito grandes de *q*, os termos mais distantes do central ficam cada vez menores em relação a este e se tornam desprezíveis para o cálculo. Por isso, na filtragem da série foi utilizado *q*=4, valor suficientemente grande. Essa metodologia foi baseada no livro de Chatfield (1989).

Foram confeccionadas então novas tabelas de contingência para comparação dos índices QBO e SAM. Para a confecção das tabelas nesta etapa, o número de dados foi reduzido por causa do filtro utilizado, em que se perdem os primeiros e últimos 4 meses.

3.2.2 Compostos

Utilizando a informação obtida através das tabelas de contingência confeccionadas com o índice SAM para 30 hPa filtrado, foram confeccionados compostos - para os meses centrais de cada estação - de precipitação, temperatura e ventos em baixos níveis, para cada uma das combinações das oscilações: fase LP, fase OP, fase LN e fase ON. Como o número de eventos para cada uma das

combinações varia, foi utilizada a base de 6 anos para a confecção dos compostos. Na ocasião de uma combinação possuir mais do que 6 anos, foram selecionados os anos em que a QBO se encontrava mais intensa. Em alguns poucos casos, a ocorrência da combinação das fases não contabilizou 6 anos. Nessa situação, todos os anos foram utilizados. A Tabela 1 apresenta o número de membros para a confecção de cada composto.

	janeiro	abril	julho	Outubro
Fase LP	1994, 1996, 1997, 1998, 2008	1982, 1987, 1996, 1998, 2001, 2010	1983, 1989, 1998, 2000, 2001, 2003	1989, 1983, 1995, 1996, 1998, 2001
Fase OP	1986, 1988, 1991, 2000, 2002, 2009	1985, 1988, 1993, 1995, 1999, 2006	1985, 1997, 1999, 2006, 2008	1985, 1987, 1990, 1999, 2006, 2008
Fase LN	1982, 1987, 1992, 2001, 2006, 2010	1984, 1992, 1994, 2007	1984, 1991, 1994, 1996, 2005, 2007	1981, 1984, 2000, 2003, 2005, 2007
Fase ON	1983,1993,1995	1983, 1990, 1997 2002, 2004, 2008	1990, 1995, 2002, 2004	1982, 1992, 2002, 2004

Tabela 1 – Anos utilizados para a confecção dos compostos.

Para testar a significância estatística dos resultados, foi aplicado o teste *t*-student aos compostos, considerando um nível de significância de 95% (WILKS, 2006).

3.2.3 Análise com ondeletas

Ao utilizar técnicas mais minuciosas, o resultado encontrado se torna mais robusto. Por esse motivo, optou-se por utilizar as ondeletas para aprofundar o estudo realizado, buscando ratificar os resultados das tabelas de contingência e avaliar possíveis defasagens.

3.2.3.1 Transformada de Ondeleta Contínuas

Torrence e Compo (1998) destacaram que a ondeleta pode ser interpretada

como um filtro passa-banda, que permite a identicação dos modos dominantes de variabilidade que apresentam uma maior contribuição para o sinal observado em um determinado período. A transformada de ondeleta pode ser usada para analisar séries temporais que contenham variabilidade não-estacionária em muitas frequências distintas (TORRENCE; WEBSTER, 1999).

A Transformada em Ondeletas Contínuas (*Continuous Wavelet Transform* - CWT) possui janelas móveis, no tempo ou no espaço, que se dilatam ou se comprimem para capturar sinais de baixa e alta frequência, respectivamente. Se tornando assim uma ferramenta útil, por ser capaz de capturar a contribuição de cada frequência para a série temporal, mesmo que essa contribuição varie ao longo da série (LABAT, 2005).

Obtém-se, através da CWT, uma figura em que no eixo x está o tempo e no eixo y a frequência ou o período. A imagem apresenta cores que variam do azul ao amarelo, em que as cores frias representam menor contribuição para a série, e as cores quentes, o que é chamado “picos de energia”, ou seja, as frequências que mais contribuem para a variabilidade do sinal. A imagem ainda apresenta o cone de influência, delimitado por contornos pretos, que representa uma região em que o sinal obtido não é confiável (fora do cone de influência). Contornos pretos também são encontrados em outras regiões da figura, eles representam os sinais obtidos que possuem 95% de significância através do teste de Monte Carlo (TORRENCE; COMPO, 1998).

Por ser o SAM, um padrão influenciado por diferentes escalas temporais, é útil uma ferramenta que permita encontrar as diferentes escalas que contribuem para a maior variabilidade do fenômeno. A fim de verificá-las, foram geradas figuras da CWT a partir da série temporal de seu índice, nos níveis anteriormente citados. Uma figura da CWT também foi confeccionada para o índice da QBO. Para o cálculo da CWT foi utilizada a *toolbox* disponibilizada no endereço eletrônico: http://grinsted.github.io/wavelet-coherence/, baseada na metodologia descrita em Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004).

3.2.3.2 Transformada de Ondeleta Cruzada

A partir de duas CWT, pode ser construída a Transformada de Ondeleta Cruzada (*Cross Wavelet Transform* — XWT). A XWT exibe as regiões em que duas séries temporais variam de forma conjunta e revela informações a respeito da relação

entre suas fases através dos vetores de fase, o que significa que mesmo que a relação entre os dois sinais não ocorra ao mesmo tempo, a XWT é capaz de identificá-la. A análise cruzada de ondeletas permite identificar o grau de similaridade entre dois sinais, quantificando o grau de relacionamento entre esses sinais no tempo (LABAT, 2005).

A figura obtida através da XWT é similar à obtida com a CWT. Os locais com picos de energia exibem as regiões em que as séries temporais estão relacionadas. Diferentemente das figuras da CWT, as da XWT também apresentam setas, os chamados vetores de fase, que são responsáveis por indicar a defasagem das duas séries temporais. Para analisar os vetores de fase é necessário o conhecimento de qual série temporal foi processada primeiro. A análise dos vetores de fase pode ser entendida com o auxílio da figura a seguir (os vetores podem apresentar ângulos intermediários aos apresentados):

1 - Série 1 completamente em fase com a série 2.

2 - Série 1 avançada 45º da série 2. A série 2 responde em 1/8 do período.

3 - Série 1 avançada 90º da série 2. A série 2 responde em 1/4 do período.

4 – Série 1 avançada 135º da série 2. A série 2 responde em 3/8 do período.

5 - Série 1 e série 2 estão em fases opostas.

6 – Série 1 avançada 225º da série 2. A série 2 responde em 5/8 do período.

7 - Série 1 avançada 270º da série 2. A série 2 responde em 3/4 do período.

8 - Série 1 avançada 315º da série 2. A série 2 responde em 7/8 do período.

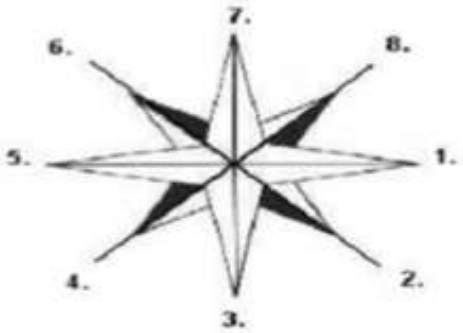

Figura 4 – Relação do ângulo de fase entre duas séries temporais. Fonte: (BARBOSA, 2007),

Adaptado.

Com o objetivo de encontrar as frequências que os índices da QBO e do SAM estão relacionadas, foram confeccionadas as figuras de XWT entre o índice da QBO e do índice do SAM, uma para cada nível em que esse último índice foi calculado. O índice da QBO foi escolhido para ser processado primeiro, uma vez que se espera que a relação entre os fenômenos se dê da QBO (de maior escala temporal) para o SAM. Para o cálculo da XWT também foi utilizada a toolbox que se encontra no endereço eletrônico: http://grinsted.github.io/wavelet-coherence/, baseada em Grinsted, Moore e Jevrejeva (2004).

Um gráfico com as séries temporais do índice da QBO e do índice SAM - calculado para 30 hPa, filtrado através da média móvel - foi gerado para comparação dos índices. O nível de 30 hPa foi escolhido por ter sido verificado através da XWT ser o nível que apresenta maior relação com o índice da QBO. A filtragem ocorreu uma vez que foi verificado que a relação entre os dois índices ocorre para o período em torno de 2 anos.

Para corroborar os resultados da XWT, também foram realizados estudos de caso avaliando o comportamento da estratosfera extratropical - através da anomalia de altura geopotencial em 30 hPa - em eventos intensos de QBO. Para isso, primeiramente, foram selecionados todos os casos em que se verificaram fases Leste e Oeste intensas para os anos que, de acordo com a XWT, possuem significância estatística. A escolha das fases intensas da QBO baseou-se no critério estabelecido por Raphael (2003): fases Leste intensas são as que superam 29 $m.s^{-1}$ e fases Oeste intensas, as que superam 13 $m.s^{-1}$. Para ser considerado um evento intenso, verificou-se o mês ou meses em que os critérios citados acima foram superados. Então, foram confeccionadas figuras de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa, levando em consideração a defasagem entre o índice da QBO e o índice SAM obtida através da XWT. A série temporal de anomalia de altura geopotencial foi filtrada de maneira similar a série do índice SAM. Para anos onde o limiar ocorreu durante mais de um mês, foi confeccionada a média de cada caso das anomalia de altura geopotencial em 30 hPa (filtrada), respeitando as defasagens apresentadas em cada mês, formando assim um único evento. A Tabela 2 mostra os eventos para os quais os campos foram gerados e quais as defasagens utilizadas.

Fase Leste Intensa		Fase Oeste Intensa	
Ano	Defasagem	Ano	Defasagem
maio/1987	315° (21 meses)	abr, mai/1985	15° (1 mês)
ago, set, out, nov/1989	180° (antifase)	fev, mai/1986	345° (23 meses)
mai, jun, jul, ago/1994	75° (5 meses)	abr, mai, jun/ 1995	75° (5 meses)
mai, jun, jul, ago/2001	285° (19 meses)	abr, mai/1999	45° (3 meses)
jul, ago, set, out/2003	210° (14 meses)	mar, abr, mai/2002	225° (15 meses)
jul, ago, set, out, nov/2007	0° (em fase)	abr, mai/2004	195° (13 meses)
-	-	mai, jun/2006	15° (1 mês)

Tabela 2 – Anos e defasagens utilizadas para a confecção dos mapas de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa.

4 Resultados e Discussão

Os resultados foram divididos em duas Seções: Análise utilizando tabelas de contingência (Seção 4.1) e análise com ondeletas (Seção 4.2). A Seção 4.1 se subdivide em tabelas de contingência sem filtragem (Seção 4.1.1), tabelas de contingência com filtragem (Seção 4.1.2) e compostos (Seção 4.1.3). A Seção 4.2 se subdivide em CWT (Seção 4.2.1) e XWT (Seção 4.2.2).

4.1 Análise utilizando tabelas de contingência

4.1.1 Tabelas de contingência sem filtragem

Antes de discutir os resultados das tabelas de contingência, devemos ressaltar o fato de que a frequência das fases do SAM em relação às fases da QBO varia ligeiramente de nível para nível. A explicação para isso se deve ao fato de o sinal dos Modos Anulares surgirem primeiro na estratosfera e se propagar para baixo com o tempo (KODERA; KOIDE, 1997), de maneira que num mesmo mês a propagação até os níveis mais baixos pode não ter se dado por completa ainda.

As Figuras 5-8 apresentam as tabelas de contingência mês a mês, com o índice SAM nos níveis 30, 200, 500 e 700 hPa, respectivamente, como descrito na Seção 3.2.1.1.

Figura 5 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 30 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	5
	POS	7	7

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	5	10

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	6	10
	POS	6	8

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	5	10
	POS	8	7

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	6
	POS	8	7

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	5
	POS	11	5

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	3
	POS	10	6

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	4
	POS	9	8

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	7	8

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	6	6
	POS	12	6

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	5
	POS	7	7

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	3
	POS	7	9

dezembro

Figura 6 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 200 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	5
	POS	10	7

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	5
	POS	6	10

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	6	10
	POS	6	8

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	7	11
	POS	6	6

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	6
	POS	8	7

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	10	5

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	3
	POS	10	6

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	4
	POS	9	8

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	11	5
	POS	6	8

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	7	6
	POS	11	6

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	5
	POS	9	7

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	4
	POS	9	8

dezembro

Figura 7 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 500 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	6
	POS	10	6

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	6
	POS	7	9

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	5	11
	POS	7	7

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	7	10
	POS	6	7

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	7
	POS	9	6

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	10	5

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	3
	POS	9	6

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	3
	POS	10	9

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	13	5
	POS	4	8

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	7	6
	POS	11	6

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	5
	POS	9	7

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	4
	POS	9	8

dezembro

Figura 8 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM para o nível de 700 hPa.

Ao analisar as tabelas de contingência, deve-se observar qual o comportamento do SAM relativo às fases da QBO, uma vez que a QBO é o fenômeno que possui maior duração. Para isso observam-se as colunas de cada tabela e verifica-se qual fase do SAM é mais frequente em cada fase da QBO, a fim de estabelecer uma relação entre eles. Quando ocorre de uma fase do SAM ser mais frequente durante a QBO Leste e, durante a fase Oeste, a fase oposta do SAM ser mais frequente (comportamento enviesado nas tabelas de contingência), sugere-se uma relação entre as fases dos fenômenos.

Com o auxílio da Tabela 3, podemos ver que de modo geral o padrão que mais se repete é: a fase do SAM mais frequente durante a fase Leste (Oeste) da QBO é a negativa (positiva). Os meses que não constam na tabela, não o fazem por não apresentarem um comportamento enviesado.

	QBO LESTE/SAM NEGATIVO QBO OESTE/SAM POSITIVO	QBO LESTE/SAM POSITIVO QBO OESTE/SAM NEGATIVO
30 hPa	jan, mai, jun, nov, dez	mar, abr
200 hPa	jan, fev, mai, jul, set, nov, dez	abr
500 hPa	fev, mai, jul, set	-
700 hPa	fev, jul, set	mar, mai

Tabela 3 – Relação entre as fases da QBO com as fases do SAM através dos índices (sem filtragem).

4.1.2 Tabelas de contingência com filtragem

Como explicado na metodologia, filtrar o índice SAM permite extrair os sinais de alta frequência para uma melhor comparação com o índice da QBO, por ser este último um fenômeno de baixa frequência. Os resultados encontrados neste Seção se assemelham àqueles encontrados na Seção anterior (4.1.1). É encontrada também uma pequena diferença na distribuição das fases do SAM em cada nível em relação as fases da QBO. Explicação que se dá similarmente como a descrita na Seção anterior.

As Figuras 9-12 apresentam às tabelas de contingência mês a mês, nos níveis 30, 200, 500 e 700 hPa (índice SAM filtrado), respectivamente. Estas tabelas estão organizadas da mesma maneira das que foram elaboradas com os dados sem filtragem.

Figura 9 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 30 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	14	5
	POS	4	6

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	8
	POS	5	6

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	6	10
	POS	6	7

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	4	9
	POS	9	7

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	7
	POS	7	6

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	13	3
	POS	7	7

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	4
	POS	9	5

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	8	7

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	3
	POS	7	9

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	4
	POS	6	7

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	8	6

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	13	2
	POS	5	9

dezembro

Figura 10 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 200 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	13	5
	POS	5	6

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	8
	POS	6	6

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	7	8
	POS	5	9

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	5	9
	POS	8	7

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	6
	POS	7	7

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	14	3
	POS	6	7

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	4
	POS	9	5

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	9	6
	POS	9	6

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	4
	POS	7	8

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	6
	POS	6	5

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	8	6

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	3
	POS	6	8

dezembro

Figura 11 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 500 hPa.

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	13	5
	POS	5	6

janeiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	8
	POS	7	6

fevereiro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	6	8
	POS	6	9

março

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	5	8
	POS	8	8

abril

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	6
	POS	7	7

maio

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	14	3
	POS	6	7

junho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	4
	POS	9	5

julho

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	8	6
	POS	10	6

agosto

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	4
	POS	7	8

setembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	5
	POS	6	6

outubro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	10	5
	POS	8	6

novembro

		QBO	
		LESTE	OESTE
SAM	NEG	12	3
	POS	6	8

dezembro

Figura 12 – Tabelas de contingência entre os índices QBO e o SAM (filtrado) para o nível de 700 hPa.

Assim como nas tabelas de contingência para os dados sem filtragem (Figuras 5-8), os resultados encontrados nessa Seção se dispõem como os explicados na Seção 4.1.1. Os que nos trazem maior informação são aqueles que relacionam uma das fases do SAM à uma determinada fase da QBO. E o padrão que representa esse comportamento apresenta uma distribuição enviesada dos eventos.

A Tabela 4 foi confeccionada a partir dos resultados das tabelas de contingência com filtragem. Em uma coluna estão listados os meses que apresentaram durante a fase Leste da QBO uma maior frequência da fase negativa do SAM, enquanto durante a fase Oeste da QBO, a fase positiva do SAM ocorre com mais frequência. Na outra coluna, os meses que em que as combinações apresentaram o padrão oposto. Essa Tabela foi confeccionada com o intuito de facilitar a visualização dos resultados obtidos. Podemos observar a partir dela que o padrão mais frequente é o que apresenta a fase negativa do SAM relacionada à fase Leste da QBO, e a fase positiva do SAM relacionada à fase Oeste da QBO (os meses que não constam não tabela, não o fazem por não apresentarem o comportamento enviesado).

	QBO LESTE/SAM NEGATIVO QBO OESTE/SAM POSITIVO	QBO LESTE/SAM POSITIVO QBO OESTE/SAM NEGATIVO
30 hPa	jan, mai, jul, ago, set, out, nov, dez	mar, abr
200 hPa	jan, jun, jul, ago, set, out, nov, dez	abr
500 hPa	jan, mar, mai, jun, jul, set, nov, dez	abr
700 hPa	jan, mai, jun, jul, set, out, nov, dez	-

Tabela 4 – Relação entre as fases da QBO com as fases do SAM através dos índices (filtrados).

Os resultados encontrados são coerentes com outros apresentados na literatura que relacionam a QBO e o NAM, em que durante a fase Leste da QBO encontram-se anomalias de pressão positivas sobre o Ártico e anomalias negativas sobre latitudes temperadas, o que corresponde a fase negativa do NAM (RUZMAIKIN et al., 2005). No entanto, os resultados apresentados no presente estudo, ao analisar mês-a-mês, mostram que essa relação não é constante para todos os meses do ano.

Além do padrão enviesado observado nas tabelas de contingência, podemos observar também uma maior frequência absoluta da fase negativa do SAM durante a fase Leste da QBO, com exceção dos meses de março e abril, nos níveis de 30 e 200 hPa, e março, abril e agosto nos níveis de 500 e 700 hPa. Uma possível explicação para este comportamento se dá através do fato de a QBO de Leste ser, geralmente, mais intensa que a QBO Oeste (NAUJOKAT, 1986). Por estar o índice do SAM filtrado, a influência da baixa frequência se torna mais evidente, portanto o impacto da fase Leste é visto mais claramente.

Compostos foram gerados com os resultados obtidos nesta Seção, afim de acessar o impacto da combinação do sinal da QBO e do SAM no clima da AS. Estes resultados são vistos na Seção seguinte.

4.1.3 Compostos

Devido ao fato dos compostos terem sido confeccionados utilizando poucos anos, pela limitação da série temporal, as áreas que possuem significância estatística são afetadas, de forma que poucos resultados são estatisticamente significativos. Além disso, o impacto da QBO na troposfera, embora existente, é encontrado com pouca significância (HOLTON; TAN, 1980; COUGHLIN; TUNG, 2001).

As Figuras 13-24 correspondem aos compostos confeccionados de acordo com a metodologia descrita na Seção 3.2.2. Todas as figuras foram organizadas de forma que no canto superior esquerdo, seja mostrado o composto para a fase LN (A); no canto superior direito, o composto para a fase LP (B); no canto inferior esquerdo, o composto para a fase ON (C); e no canto inferior direito, seja mostrado o composto para a fase OP (D). Para os compostos de anomalia de temperatura em 850 hPa, as anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas, ao contorno azul tracejado. Os compostos de precipitação apresentam as anomalias positivas com contorno verde contínuo e as anomalias negativas com contorno vermelho tracejado. Para os compostos descritos anteriormente, o sombreado representa o nível de 95% de significância. O mês central de cada estação foi utilizado como representativo da mesma, desta forma, o mês de janeiro representa o verão; abril, o outono; julho, o inverno e outubro, a primavera.

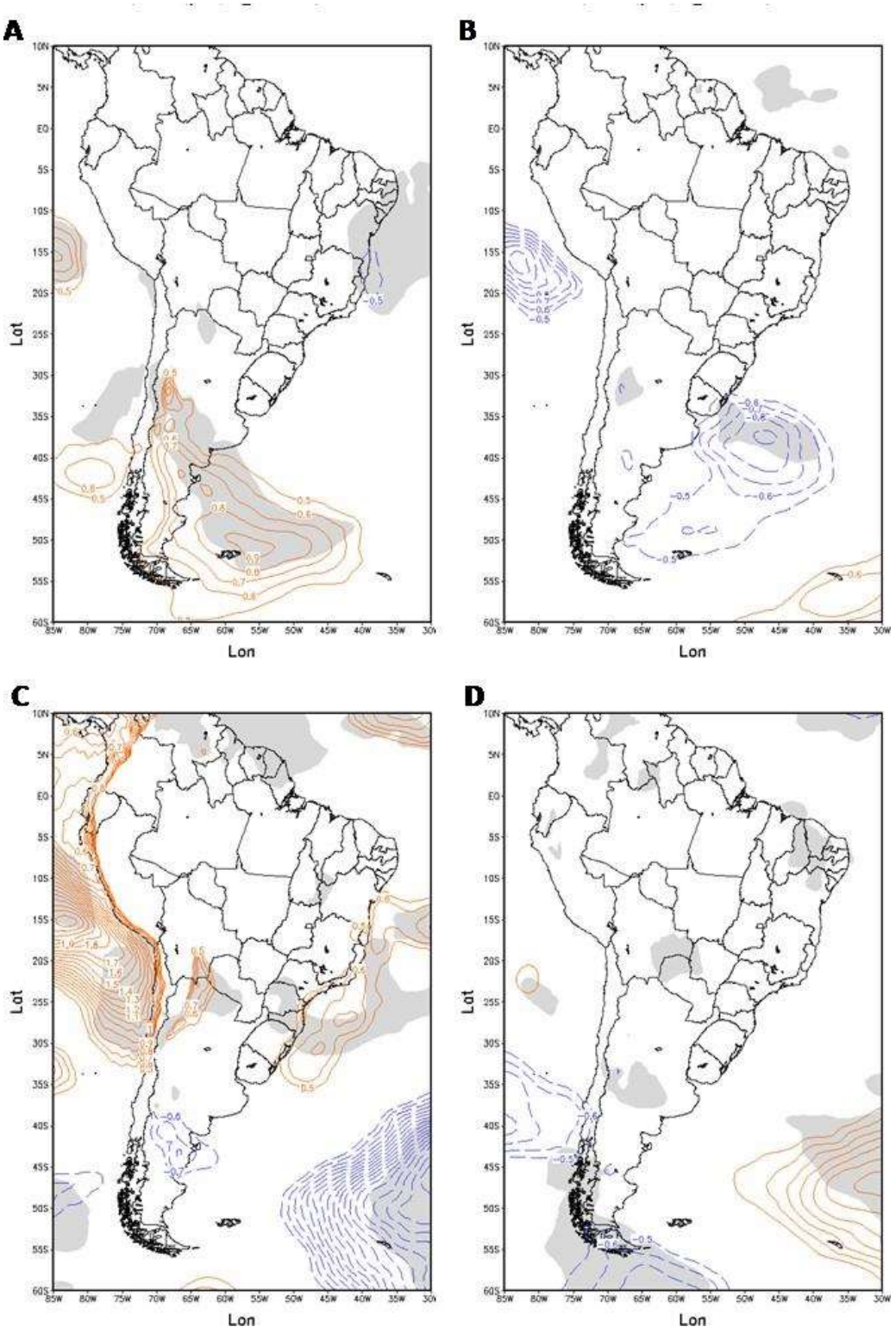

Figura 13 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

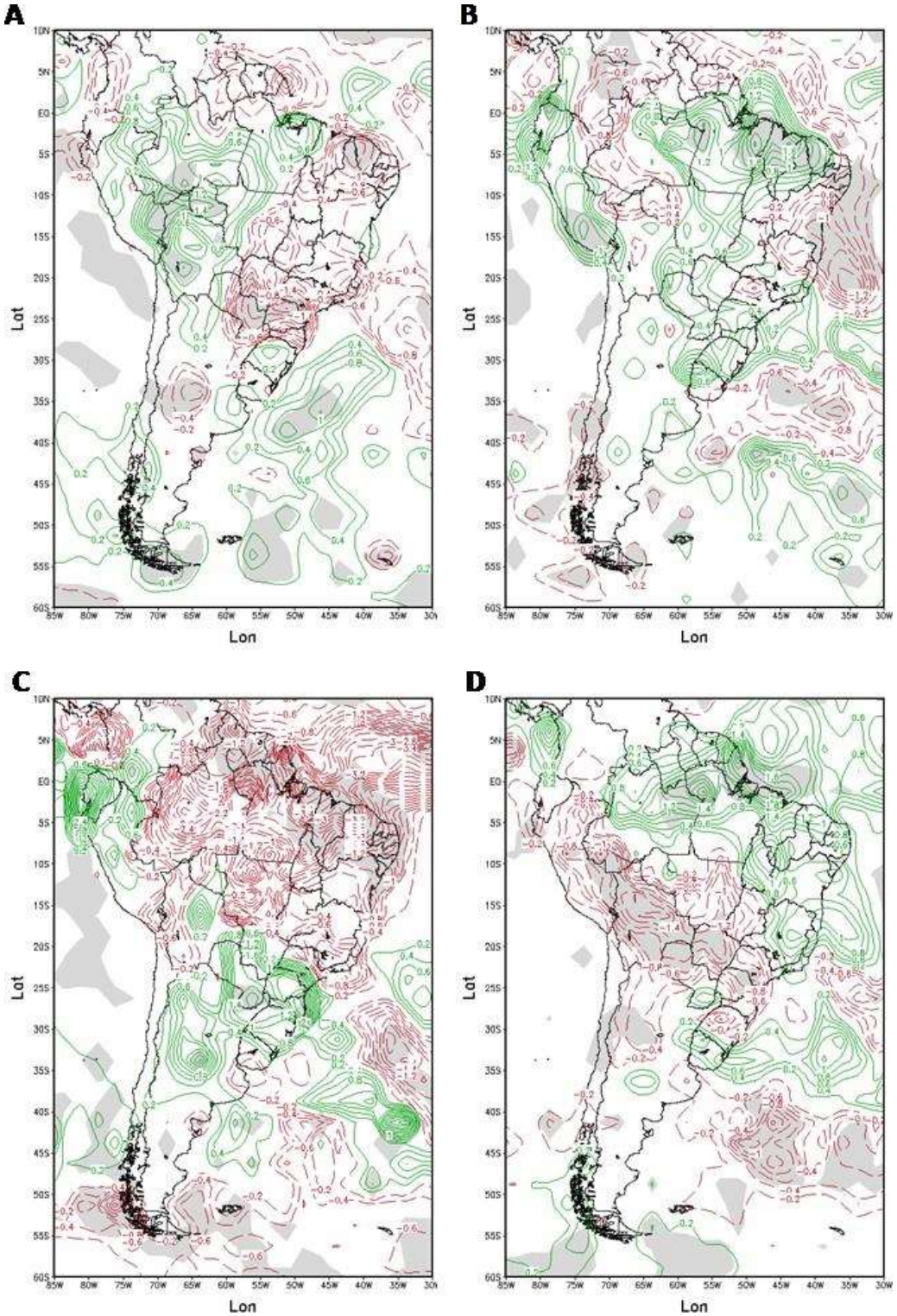

Figura 14 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

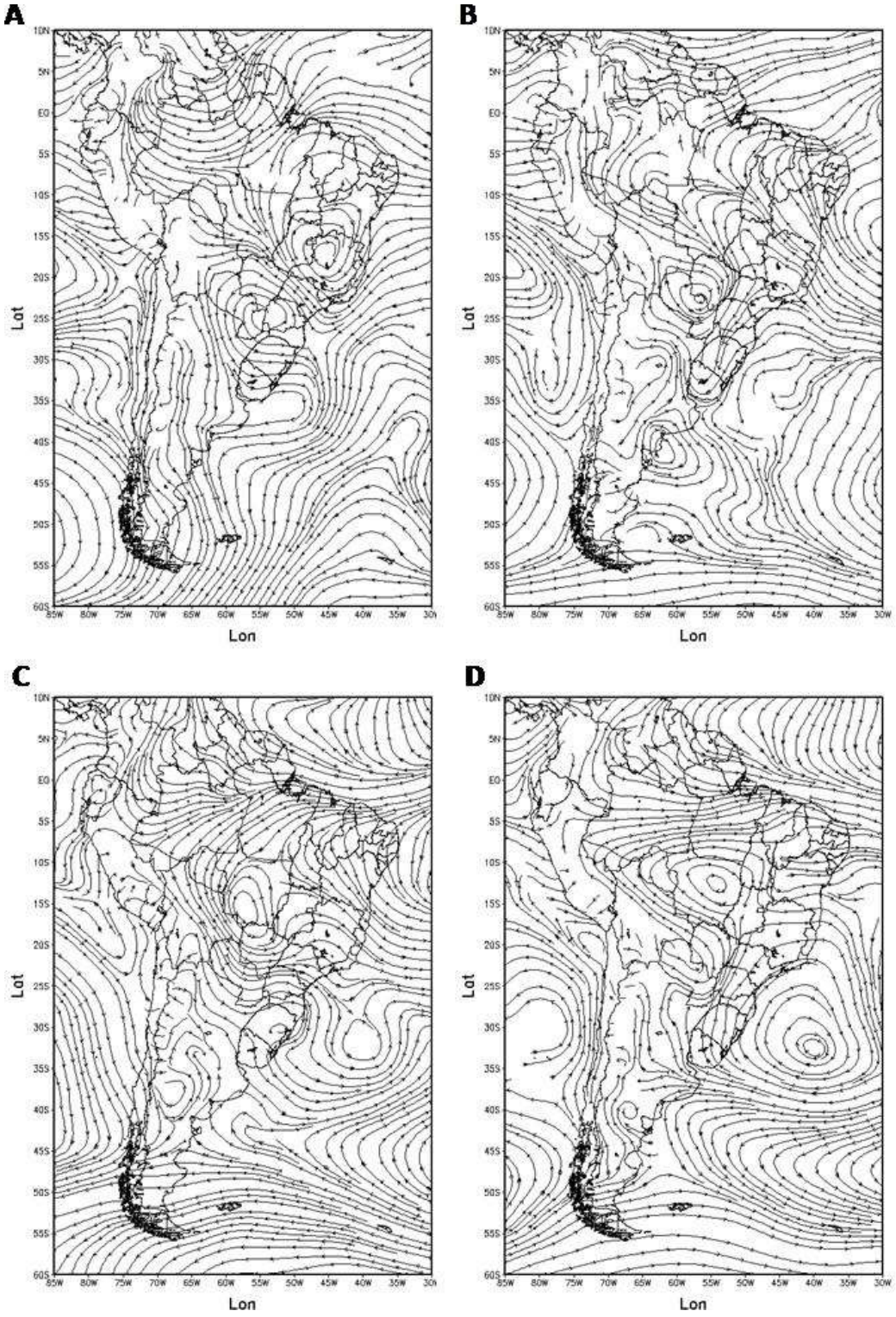

Figura 15 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de janeiro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.

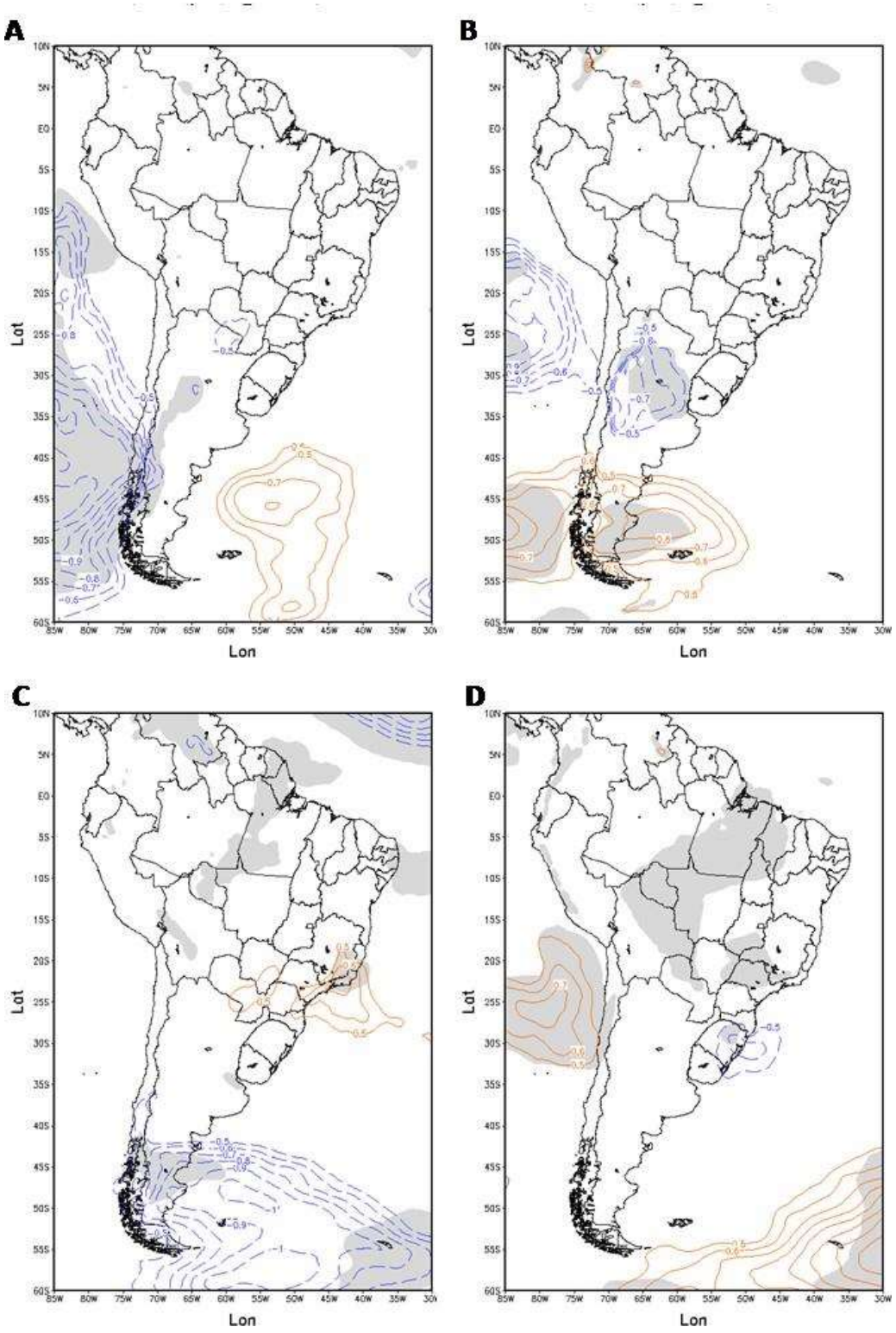

Figura 16 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

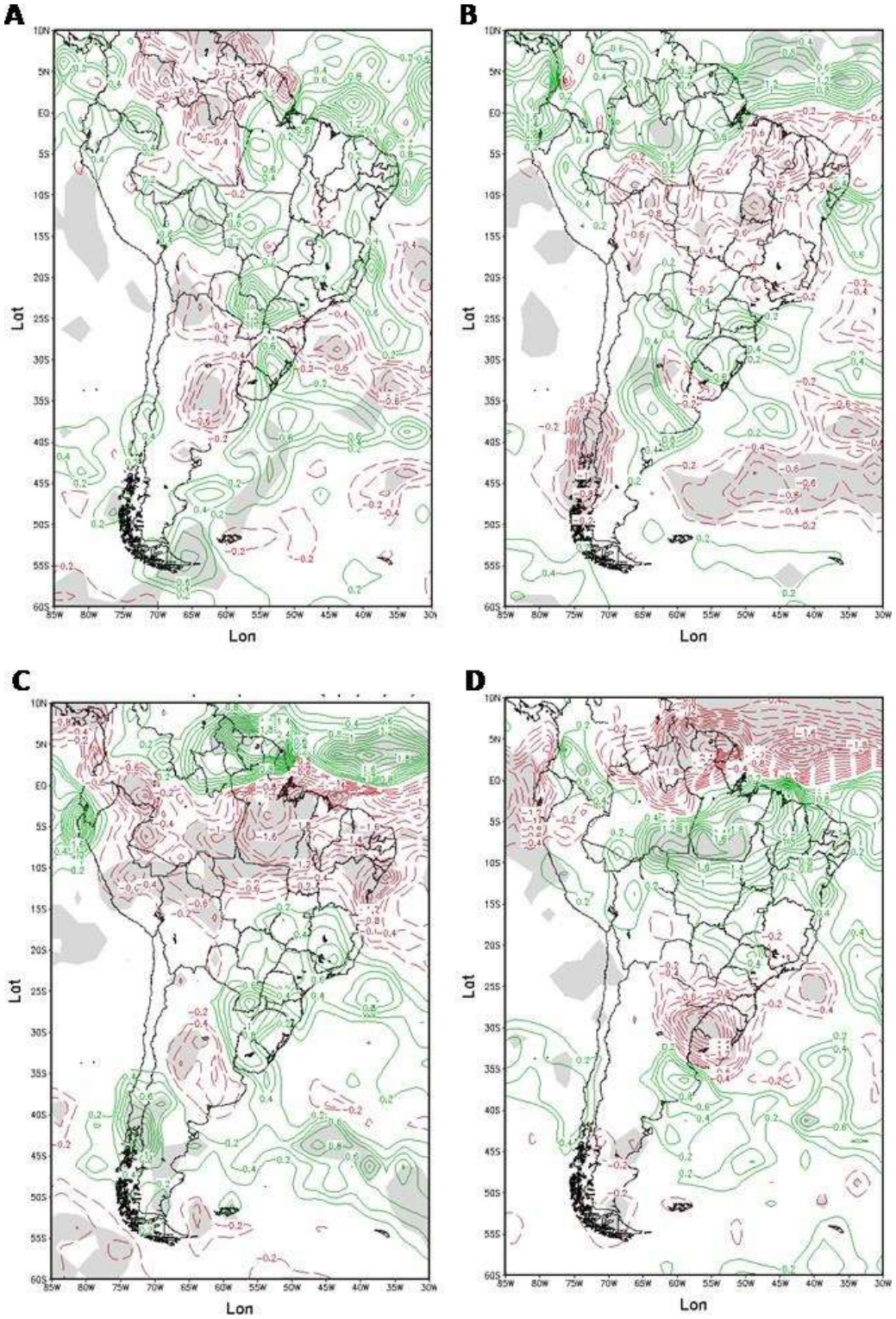

Figura 17 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

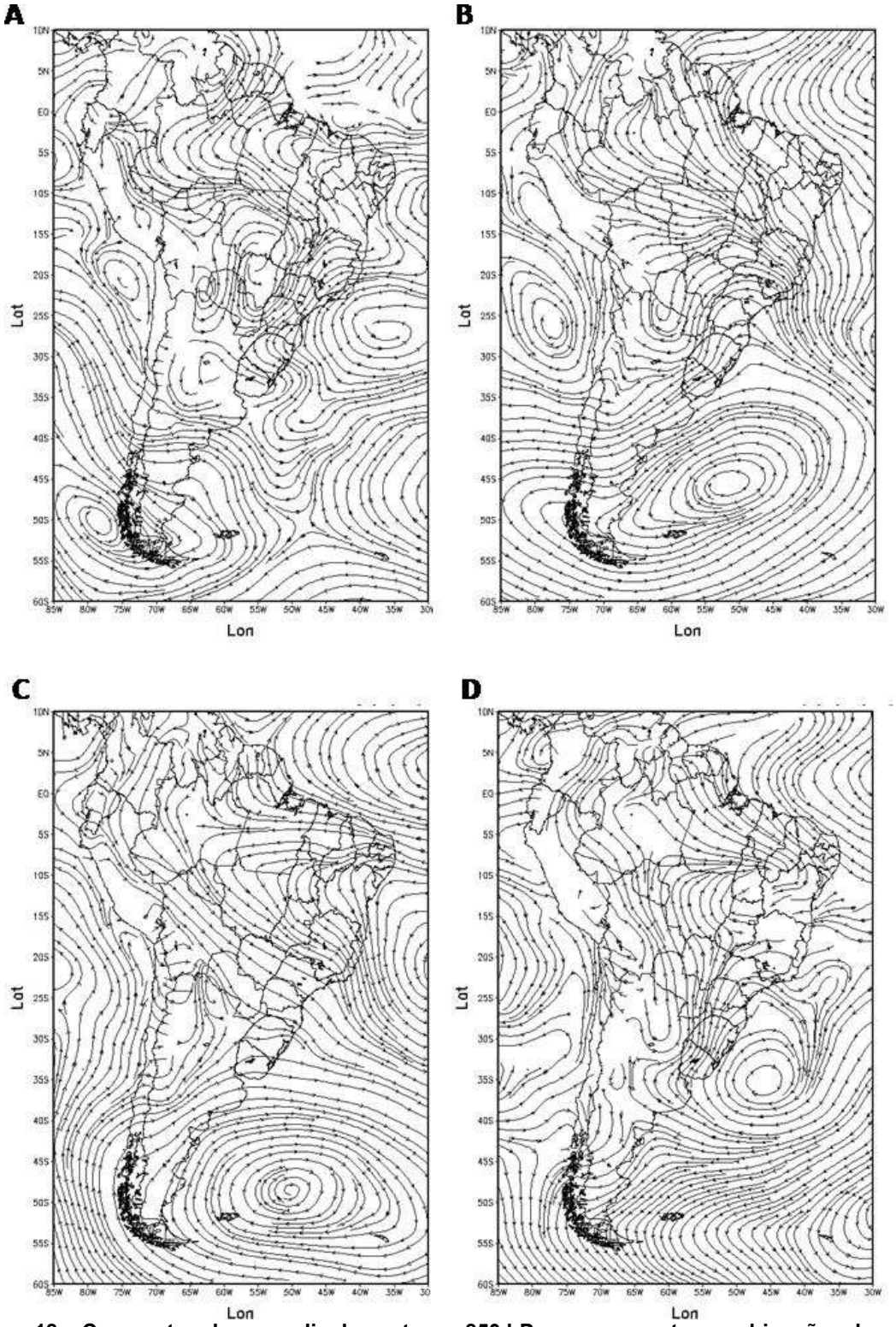

Figura 18 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de abril. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.

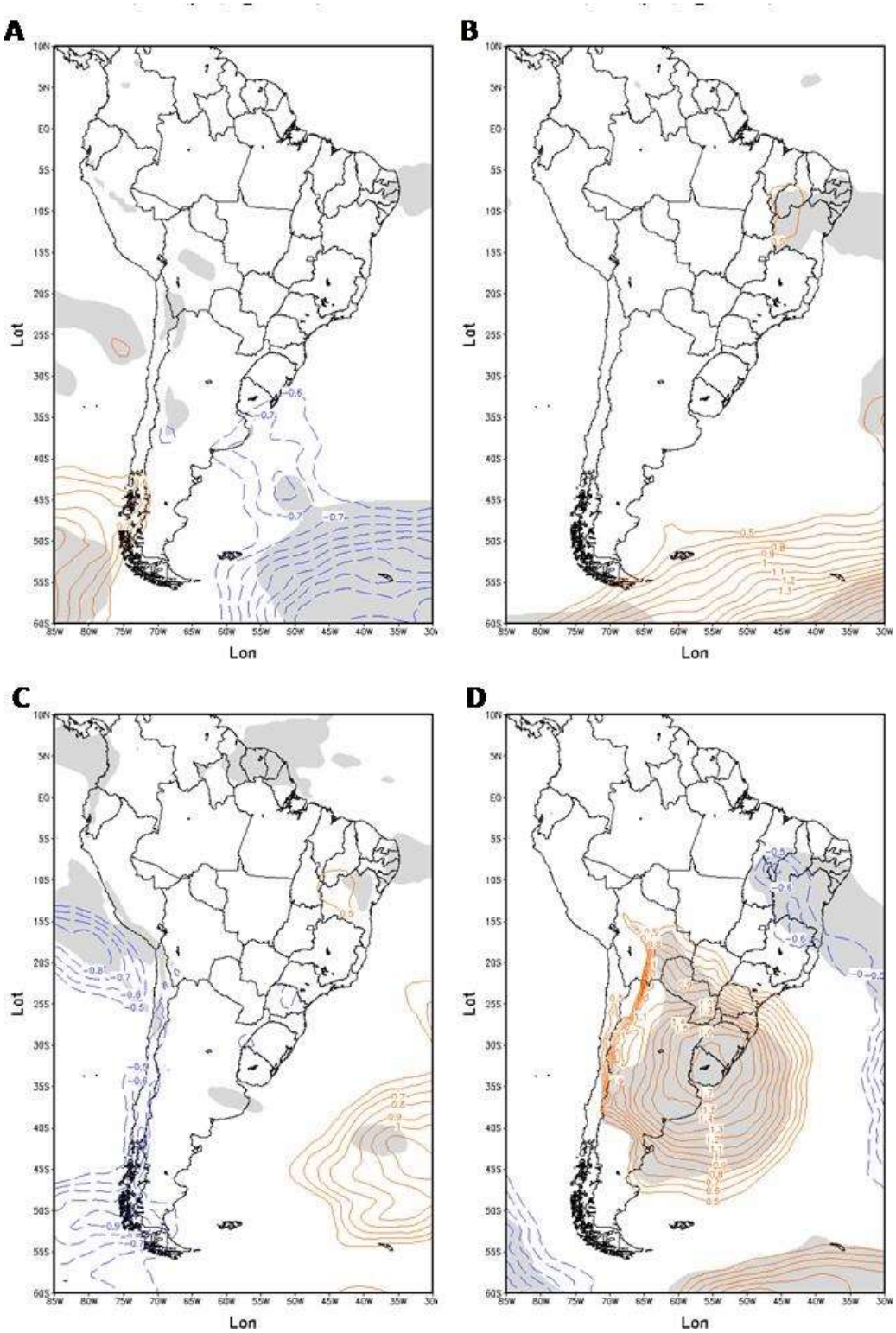

Figura 19 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao contorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

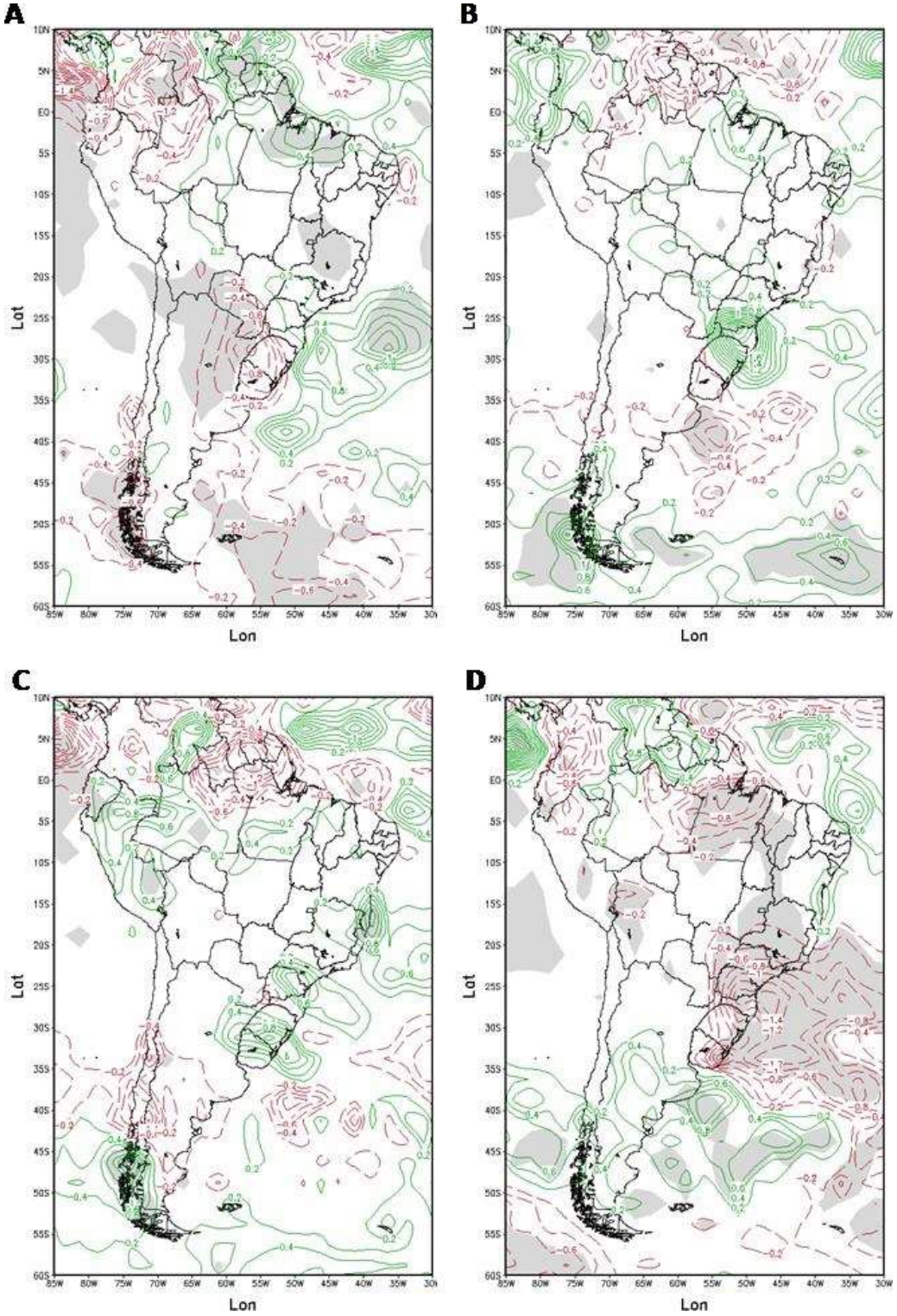

Figura 20 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

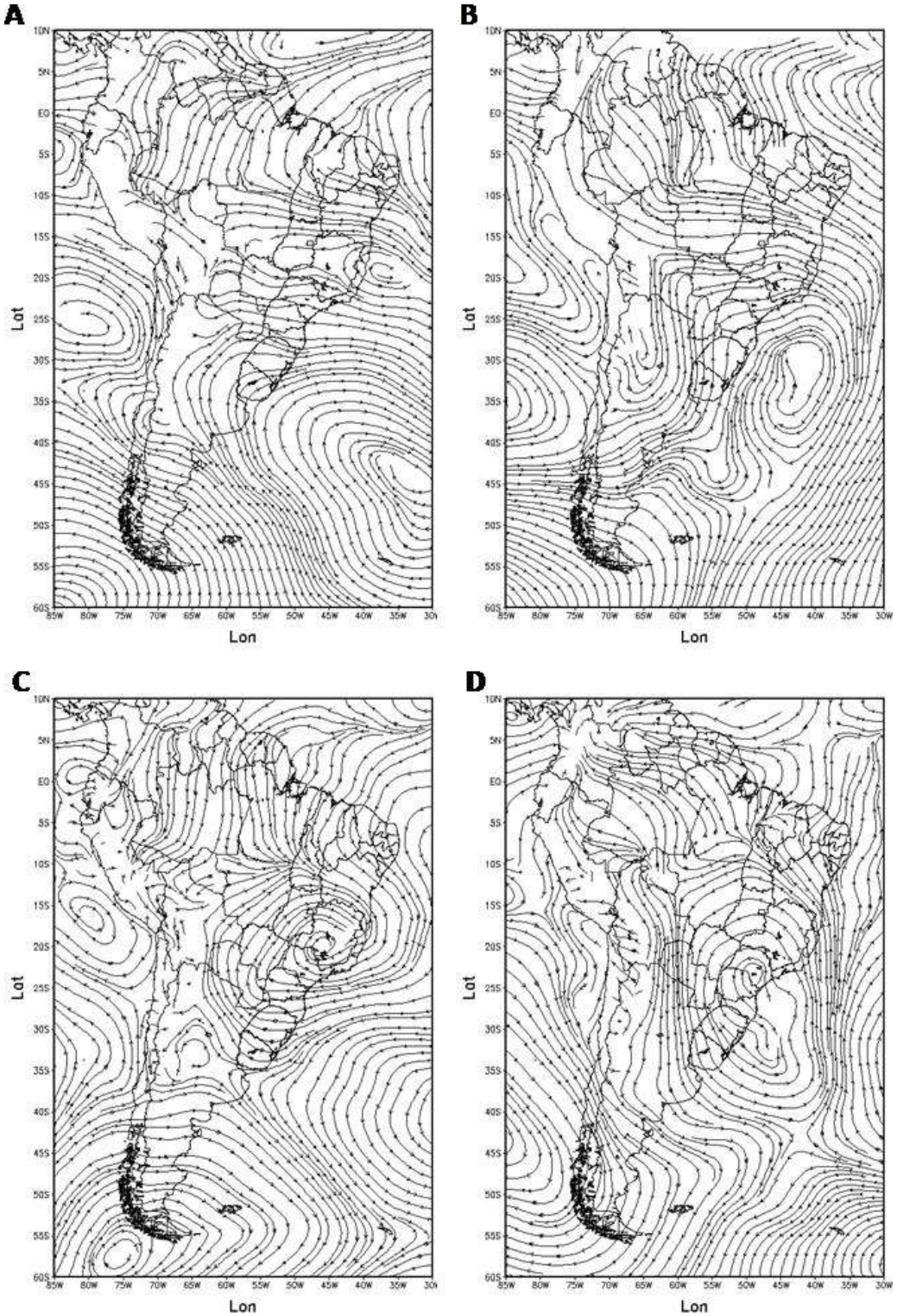

Figura 21 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de julho. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.

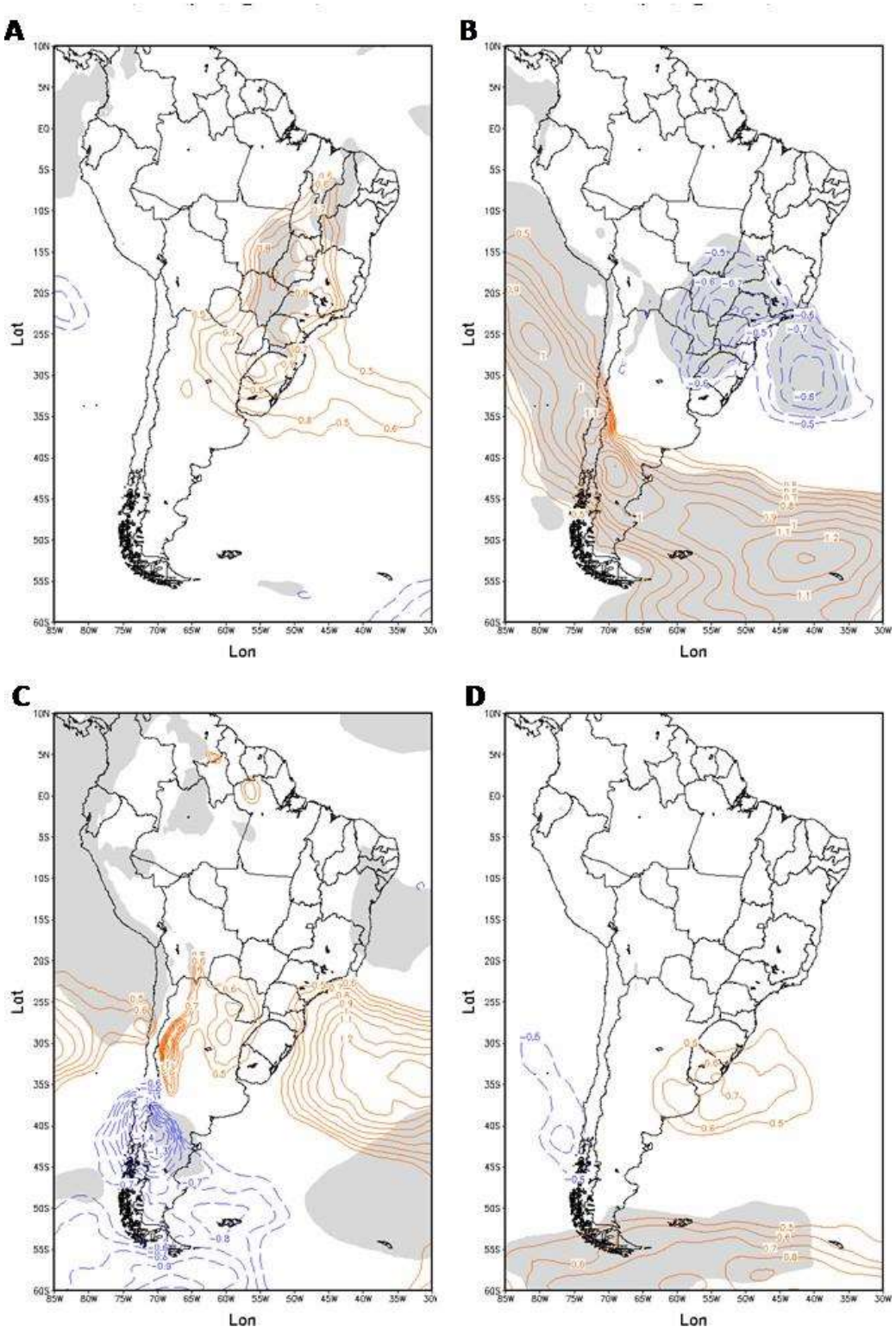

Figura 22 – Compostos de anomalia de temperatura (°C) em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno laranja contínuo e anomalias negativas ao ontorno azul tracejado. Intervalos de 0,1°C. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t- student).

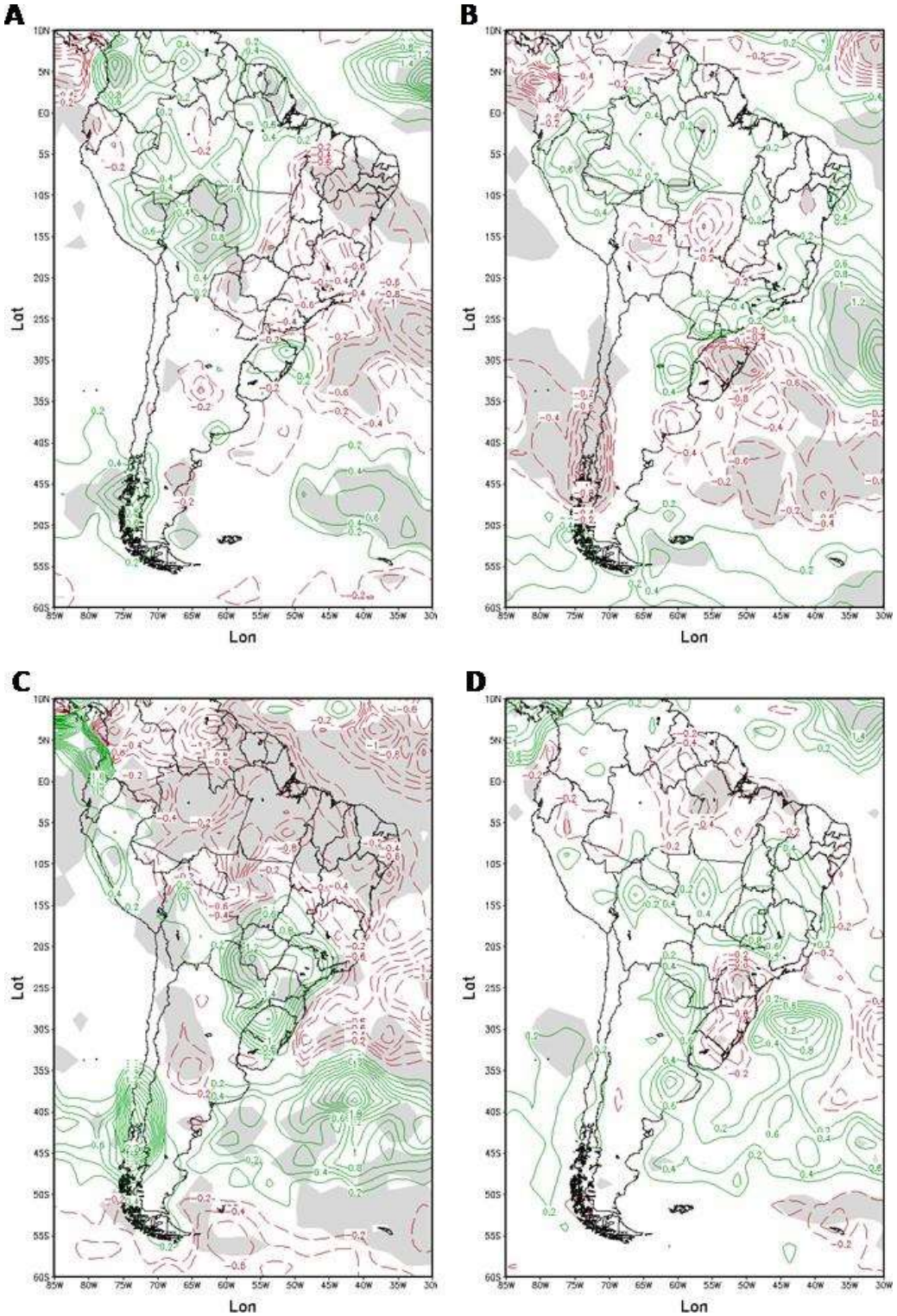

Figura 23 – Compostos de anomalia de precipitação (mm/dia) para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP. Anomalias positivas correspondem ao contorno verde contínuo e as anomalias negativas ao contorno vermelho tracejado. Intervalos de 0,2 mm/dia. Sombreado representa o nível de 95% de significância (t-sudent).

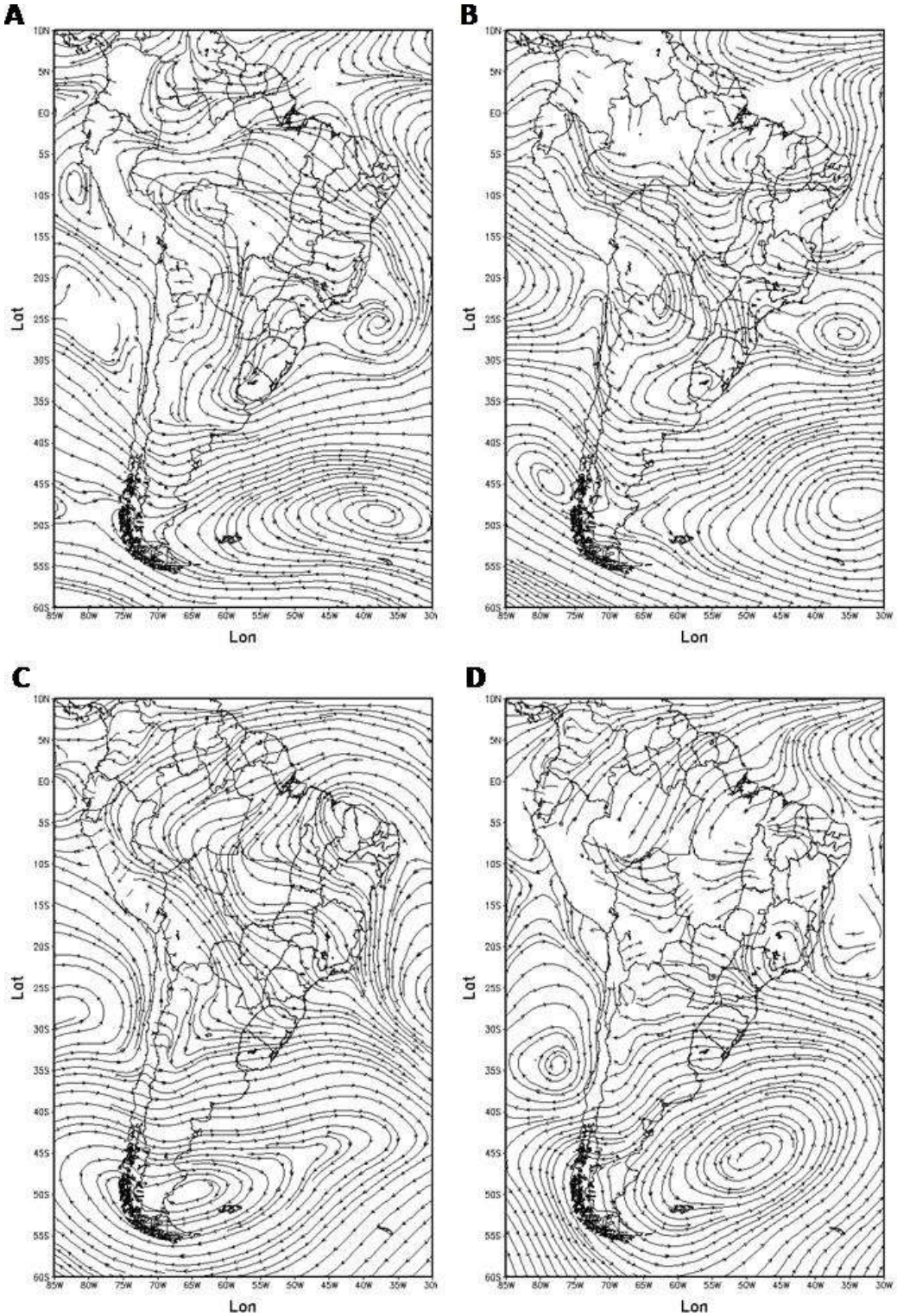

Figura 24 – Compostos de anomalia de vento em 850 hPa para as quatro combinações das fases da QBO e do SAM para o mês de outubro. (A) fase LN; (B) fase LP; (C) fase ON e (D) fase OP.

Analisando primeiramente janeiro, os compostos de anomalia de temperatura (Figura 13), no geral, não apresentam anomalias estatisticamente significativas expressivas sobre o continente sul-americano. Na fase LN, são observadas anomalias positivas em parte da Argentina e uma anomalia negativa no sul da Bahia. Inversamente, durante a fase ON, na região da Bahia é observada anomalia positiva, apesar de não ser estatísticamente significativa. Ainda nesta fase, anomalias positivas são encontradas no norte da Argentina e sul da Bolívia. Na fase OP, no extremo sul da AS é observada uma anomalia negativa.

Na análise dos compostos de anomalia de precipitação para janeiro (Figura 14), apesar dos diversos sinais de anomalias encontrados sobre o continente, em sua maioria eles não apresentam significância estatística. Durante as fases LN/ON são observadas anomalias negativas no norte do Nordeste brasileiro (principalmente na região do Ceará), e durante as fases LP/OP, a mesma região apresenta anomalias positivas. Quando há ocorrência da fase LP, o leste da Região Nordeste brasileira exibe anomalias negativas. Para parte do SEAS, o sinal das anomalias se inverte de acordo com a fase da QBO. Durante a fase LN (ON) as anomalias observadas na região citada são negativas (positivas), na fase LP (OP) as anomalias são positivas (negativas). Entretanto, nem todos os casos há significância de 95%. Trabalhos prévios já mostraram a influência do SAM no SEAS (VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI, 2018).

Os resultados obtidos aqui ratificam os encontrados por Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2018) para o Nordeste brasileiro. Para o SEAS, no entanto, os resultados dos compostos mostram que as fases da QBO afetam a maneira como o SAM influência a região e isso pode explicar porque o sinal encontrado pelos autores para essa região, durante o mês de janeiro, não ficou claro.

Os compostos de anomalia de ventos em 850 hPa em janeiro (Figura 15) se apresentam coerentes às anomalias de precipitação encontradas (Figura 14). Focando primeiramente na Região Nordeste, há um escoamento anômalo de leste e de nordeste, observado durante a fase LN, o que transportaria a umidade para a região mais ao norte do Brasil e mais para o interior do continente (confluência anômala nessas regiões), causando as anomalias negativas de precipitação observadas no norte do Nordeste. Durante a fase LP, o escoamento é invertido em relação à fase LN e a confluência anômala ocorre no norte da Região Nordeste, dando suporte aos resultados

encontrados nos compostos de anomalia de precipitação. Para a fase ON, o escoamento anômalo de nordeste apresentado adentra bastante o continente, promovendo uma difluência anômala em todo o norte do continente, causando as anomalias negativas de precipitação. E para fase OP, o sentido do escoamento é oposto, promovendo uma confluência anômala e favorecendo a precipitação no Nordeste brasileiro.

No SEAS, os sinais das anomalias de precipitação (Figura 14) encontradas também são coerentes com o escoamento em baixos níveis (Figura 15): anomalia anticiclônica no composto da fase LN e que se torna ciclônica no composto da fase LP. É válido destacar que na direção NO-SE, região marcada pela ocorrência de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão (CAVALCANTI et al., 2009), o escoamento anômalo varia de SE-NO na fase LN para NO-SE na fase LP, sugerindo um (des)favorecimento da ocorrência de ZCAS durante a fase (LN) LP. Na fase ON, uma anomalia anticiclônica na região central do continente (próxima ao MT) induz um fluxo meridional anômalo, da Região Norte e do Atlântico tropical para o SEAS. Este fluxo anômalo sugere um favorecimento da ocorrência de jatos de baixos níveis, gerando anomalias positivas de precipitação nessa região. Na fase OP, a região central do continente apresenta uma circulação ciclônica anômala gerando uma anomalia do fluxo meridional oposta ao da fase ON. Isso mostra um desfavorecimento de episódios de jatos de baixos níveis, enfraquecimento do transporte de umidade da Amazônia para o SEAS, gerando a anomalia negativa de precipitação.

Assim como para os compostos de anomalia de temperatura do mês de janeiro (Figura 13), o mês de abril não apresenta anomalias de temperatura estatisticamente significativas expressivas sobre o continente sul-americano (Figura 16). Para a fase LP, uma anomalia negativa é observada na região central da Argentina e anomalia positiva no sul da AS. Na fase ON, esta anomalia no sul da AS inverte de sinal. Também para a fase ON, em parte da Região Sudeste do Brasil e parte do SEAS são observadas anomalias positivas, entretanto somente próximo ao Rio de Janeiro que essas anomalias possuem significância estatística. Para a fase LN, observam-se anomalias negativas no sul do Chile.

Em abril, apesar dos diversos sinais de anomalias de precipitação encontrados sobre o continente, em sua maioria eles não apresentam significância estatística (Figura 17). Assim como em janeiro, a fase Oeste da QBO, em geral,

apresenta anomalias negativas na parte norte do Brasil e positivas na parte sul, na fase ON, e o oposto na fase OP. No extremo norte da AS e Atlântico, durante a fase ON, são observadas anomalias positivas de precipitação, ao passo que durante a fase OP, as anomalias observadas são negativas para a mesma região. Durante esse mês, a ZCIT está na sua posição climatológica mais ao sul (CAVALCANTI et al., 2009). Os resultados acima sugerem que a ZCIT está deslocada mais para norte (sul) da sua posição climatológica durante a fase ON (OP). Esse resultado é similar ao encontrado por Gray et al. (2018), entretanto aqui é mostrado que o impacto da fase Oeste na região da ZCIT varia de acordo com a fase do SAM. Também para a fase Oeste da QBO, há um dipolo positivo (negativo) de anomalia de precipitação no SEAS na fase ON (OP). Porém, não há significância estatística em toda a região. Durante a fase Leste da QBO, para o nordeste e norte da AS, ocorre inversão do sinal das anomalias de acordo com a fase do SAM. Na fase LN (LP), o norte da AS apresenta anomalias negativas (positivas) e o nordeste, anomalias positivas (negativas). O mesmo não ocorre para o SEAS. Em geral, ambas as fases do SAM apresentam anomalias positivas (essas anomalias encontradas não apresentam significância estatística).

Assim como nos compostos para o mês de janeiro (Figura 15), os compostos obtidos para abril apresentam de maneira geral escoamento em baixos níveis variando com a fase do SAM (Figura 18). Observa-se que escoamento anômalo durante a fase ON adentra o continente, o que transportaria a umidade para interior, favorecendo a ocorrência de precipitação na metade sul do Brasil e causando as anomalias observadas. Durante a fase OP, o escoamento anômalo se apresenta de maneira oposta, promovendo uma confluência anômala nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Para o inverno (Figura 19), uma ampla área de anomalia positiva significativa de temperatura é observada sobre o SEAS, na fase OP. Entretanto, esse sinal não é identificado nas outras fases. Observa-se também uma anomalia positiva de temperatura em parte da Região Nordeste do Brasil, para a fase LP. Nesta mesma região, o sinal da anomalia persiste durante a fase ON (sem significância estatística) e inverte o sinal durante a fase OP.

Ao analisar a Figura 20, que apresenta as anomalias de precipitação para o mês de julho, observa-se que em geral, as regiões que possuem significância estatística são ainda mais restritas comparada aos meses anteriores. Na fase LN,

são encontradas anomalias positivas sobre as Guianas, o Suriname e a Região Norte do Brasil, e anomalias negativas na Colômbia, Venezuela e Equador. O sinal encontrado nas Guianas inverte o sinal nas fases LP e ON (sem significância estatística). Já o sinal observado na Região Norte, persiste na fase LP (sem significância estatística) e inverte na fase OP e ON (sem significância estatística nesta última). Também são encontradas anomalias negativas em parte do SEAS nas fases LN e OP e o sinal inverte nas fases LP e ON. Diferentemente da fase Oeste, os sinais sobre o SEAS não estendem para o oceano na fase Leste. Na fase LN, há anomalias positivas no Atlântico subtropical, adentrando, sem significância estatística, a parte norte do SEAS (logo acima das anomalias negativas citadas anteriormente). Já na fase LP, as anomalias negativas deslocam-se para o Atlântico Subtropical e as anomalias positivas adentram o SEAS.

Na Figura 21 são vistas as anomalias de vento em 850 hPa para o mês de julho. As anomalias de precipitação observadas neste mesmo mês (Figura 20) são coerentes com o escoamento em baixos níveis. De uma forma geral, o escoamento na parte norte mostra padrões de confluência (difluência) onde há anomalias positivas (negativas) de precipitação. Observa-se uma anomalia ciclônica (anticiclônica) anômala, centrada sobre a Região Sudeste do Brasil (abrangendo o SEAS) na fase ON (OP), condizente com o padrão de precipitação na região. Na fase Leste da QBO, observa-se uma anomalia ciclônica sobre centrada sobre o Atlântico subtropical em ambas as fases (LN e LP), entretanto, essa anomalia encontra-se mais próxima ao continente na fase LP, o que explicaria as anomalias positivas de precipitação encontradas sobre o SEAS nessa fase.

A Figura 22 apresenta as anomalias de temperatura para outubro. Na fase LN, anomalias positivas são encontradas sobre SEAS e parte do Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste brasileiro. Tal anomalia inverte de sinal na fase LP, entretanto, não se estende até o Nordeste. Também na fase LP, anomalias positivas são observadas no sul da AS. Na fase ON, esta última anomalia troca de sinal, embora tenha significância estatística numa região mais restrita em relação à observada na fase LP. Na fase OP, é encontrada anomalia positiva no extremo sul da AS, sinal oposto ao observado na fase ON (sem significância estatística neste último).

As anomalias de precipitação para o mês de outubro podem ser vistas na Figura 23, onde poucas regiões apresentam significância estatística. Na fase LN, são encontradas anomalias positivas sobre uma ampla região do norte da AS,

sendo significativa somente em algumas regiões como a Bolívia, sul do Peru, Guiana Francesa e partes da Colômbia e do Brasil. O sul do Chile também apresenta anomalias positivas significativas nessa fase. Apesar de não ser estatisticamente significativa em todas as regiões, uma anomalia negativa se estende por grande parte do Brasil com exceção da Região Norte e do RS, onde são observadas anomalias positivas. Na fase LP, as anomalias anteriormente observadas sobre o sul do Chile, Bolívia, MT, RS e grande parte da Região Sudeste invertem de sinal. Na fase ON, no norte da AS pode ser visto uma grande região com anomalias negativas estatisticamente significativas e a região SEAS apresenta anomalias positivas. Por último, a fase OP apresenta na região norte da AS e Sul do Brasil anomalias negativas, e nas outras regiões brasileiras, anomalias positivas. Entretanto não há significância estatística em praticamente nenhuma região (apenas no PA e em SP).

Assim como para os outros meses analisados, as anomalias de vento em 850 hPa (Figura 24) são, em geral, coerentes com as anomalias de precipitação observadas. Na fase LN, o escoamento mostra uma confluência (difluência) anômala no noroeste (nordeste) da AS, além de uma circulação anticiclônica anômala próximo a costa do Sudeste do Brasil. Na fase LP, mantém a confluência anômala sobre o noroeste, entretanto, a circulação anômala próximo a costa do Sudeste do Brasil se torna ciclônica, o que explicaria a mudança do sinal da anomalia de precipitação nessa região da fase LN para a LP. Os ventos anômalos observados na fase ON, mostram uma anomalia anticiclônica na parte norte, centrada sobre o Nordeste Brasileiro. Além disso, essa fase apresenta um escoamento meridional anômalo, que adentra a costa no norte do Brasil no sentido do SEAS, sugerindo um transporte a umidade o SEAS.

4.2 Análise com ondeletas

As tabelas de contingência (Seções 4.1.1 e 4.1.2), mostraram que, em geral, há uma relação entre as fases da QBO e do SAM. No entanto, como visto através da diferença dos resultados obtidos com as tabelas de contingência sem e com filtragem, ao utilizar técnicas mais minuciosas, o resultado encontrado se torna mais robusto. Por esse motivo optou-se por utilizar as ondeletas a fim de ratificar e para aprofundar os resultados encontrados anteriormente.

4.2.1 Transformada de ondeleta contínua

As Figuras 25-29 apresentam as CWT de cada índice. Para o espectro de energia das ondeletas, as cores quentes apresentam o pico de energia, ou seja, onde a maior parte da energia da série está concentrada, e o contorno preto representa o nível de 95% de significância.

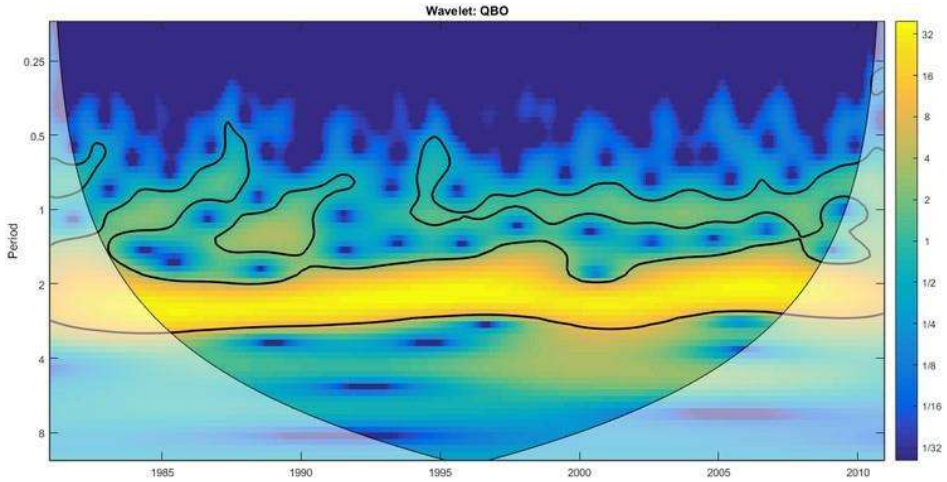

Figura 25 – Espectro de energia das ondeletas do índice da QBO (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

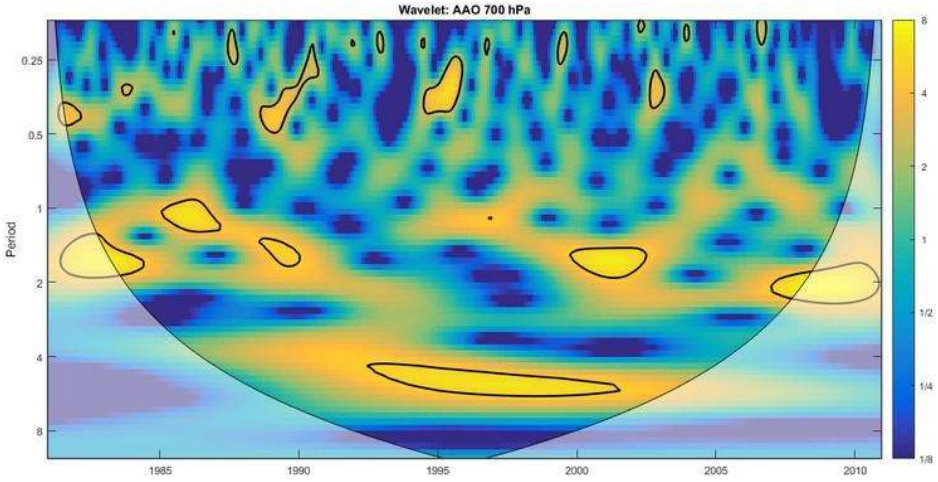

Figura 26 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 700 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

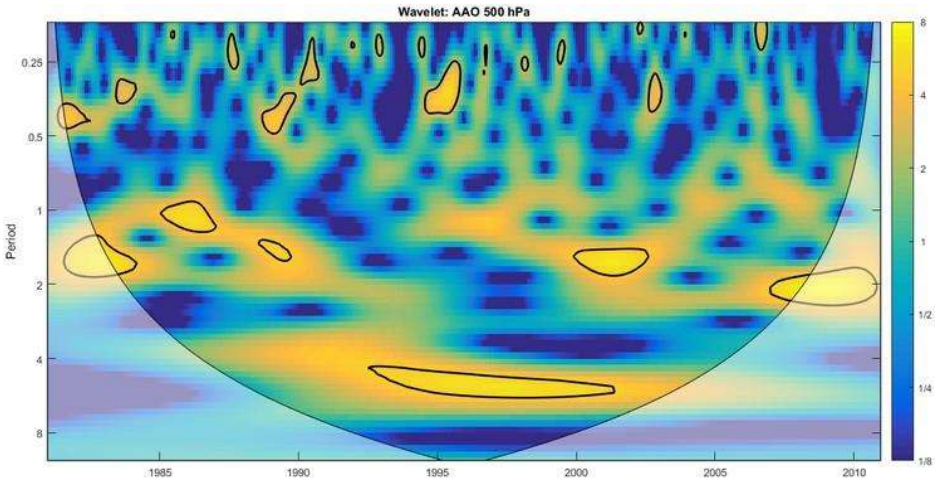

Figura 27 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 500 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

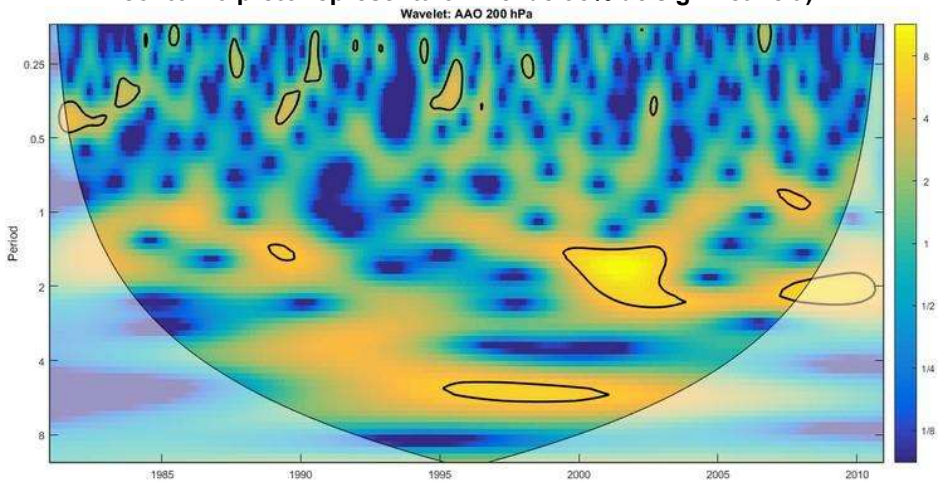

Figura 28 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 200 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

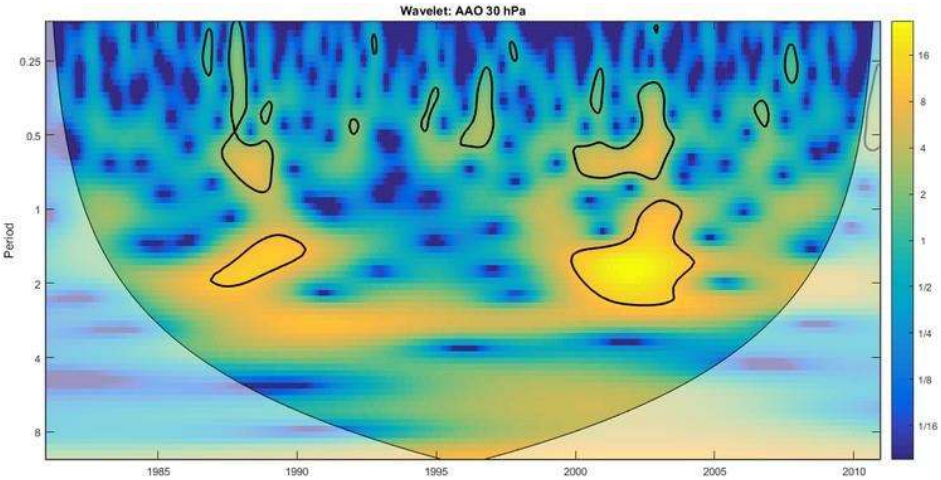

Figura 29 – Espectro de energia das ondeletas do índice SAM, para o nível de 30 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

Ao analisar a Figura 25 (CWT para o índice da QBO), é possível observar um intenso pico de energia na escala de 2 anos, algo que já era esperado devido a natureza da QBO e seu período de oscilação. É possível verificar ainda, um segundo pico de energia na escala de aproximadamente 1 ano, em praticamente todo o período analisado. Este pico, no entanto, possui baixa intensidade.

As Figuras 26-29 apresentam os resultados para os 4 níveis em que o índice do SAM foi calculado. A Figura 26, apresenta o espectro de energia das ondeletas do índice SAM para o nível de 700 hPa. Nele observamos picos nos períodos de 1-6 meses em diversos anos da série temporal, cessando em aproximadamente 2007.

Também apresenta algumas regiões com altos valores de energia no intervalo de 1 a 2 anos, no período de 1985-1990, 2000-2003 e 2007; e ainda um pico um pouco acima de 4 anos entre 1993 e 2001.

Os resultados das ondeletas obtidos para o índice SAM no nível de 500 hPa (Figura 27) são similares aos encontrados para o nível de 700 hPa (Figura 26). A Figura 28 (200 hPa) apresenta, todos os picos citados anteriormente porém com períodos mais restritos. O pico de 1-6 meses cessa em 2002; o de 1-2 anos é observado em 1989, 2000-2003 e 2007; o levemente superior a 4 anos, se estende de 1995-2001 e, diferentemente das figuras anteriores, o índice SAM em 200 hPa apresenta um pico no período de 2 anos entre 2000 e 2004.

As ondeletas obtidas para o índice do SAM para o nível de 30 hPa apresentam significativas diferenças em relação as anteriores, como podemos observar na Figura 29. Primeiramente, os picos significativos de energia na escala de até 3 meses se apresentam menos frequentes. Destacam-se agora picos significativos de energia no período de 6 meses, 1 e 2 anos e os picos em torno de 4 anos não são mais verificados.

Como verificado nesta Seção, todas as CWT obtidas para os índices apresentam um pico de energia em torno de 2 anos. A próxima Seção analisará a relação da QBO com os índices SAM, através das XWT.

4.2.2 Transformada de ondeleta cruzada

As Figuras 30-33 apresentam os resultados obtidos a partir das XWT do índice da QBO e o índice do SAM (30, 200, 500 e 700 hPa, respectivamente). O que

podemos observar é que o comportamento observado nas quatro figuras é bastante similar.

Na Figura 30, correspondente a XWT do índice da QBO e índice do SAM calculado para 30 hPa, podem ser observados picos intensos de energia entre 1984-1996 e de 1999 ao fim da série temporal analisada, no período em torno de 2 anos, o que indica que as séries temporais estão relacionadas neste período. Ao analisar os vetores de fase, diferenças de fase entre as séries temporais do índice QBO e SAM podem ser vistas. Avaliando especificamente a linha de 2 anos, no período 1985-1989, o vetor passa de 15°(1 mês) à 180°(antifase), passando pelos ângulos intermediários. Entre 1994-1996, a diferença de fase observada começa em 75° (5 meses) e termina com 90°(6 meses). Em 1999 e 2000, os vetores possuem inclinação de aproximadamente 45°(3 meses) e 0°(em fase), respectivamente. No período de 2001-2004, o vetor varia de aproximadamente 285° (19 meses) à 195° (13 meses), passando pelos ângulos intermediários e após 2006 até o fim da série, o vetor inicia com um ângulo de 15°(1 mês) e passa a 0°(em fase).

Para as ondeletas cruzadas entre o índice QBO e outros níveis do índice SAM (Figuras 31-33), os resultados são semelhantes, exceto que não mostram os picos significativos no período aproximadamente de 1985-1987 e os outros picos observados anteriormente apresentam menor intensidade. De uma forma geral, as figuras para a troposfera apresentam aproximadamente a mesma diferença de fase da descrita para o nível de 30 hPa.

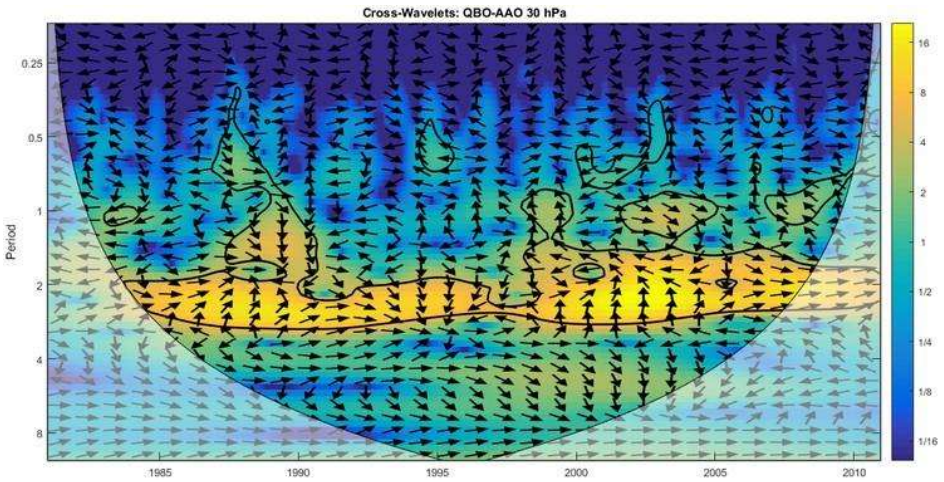

Figura 30 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 30 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

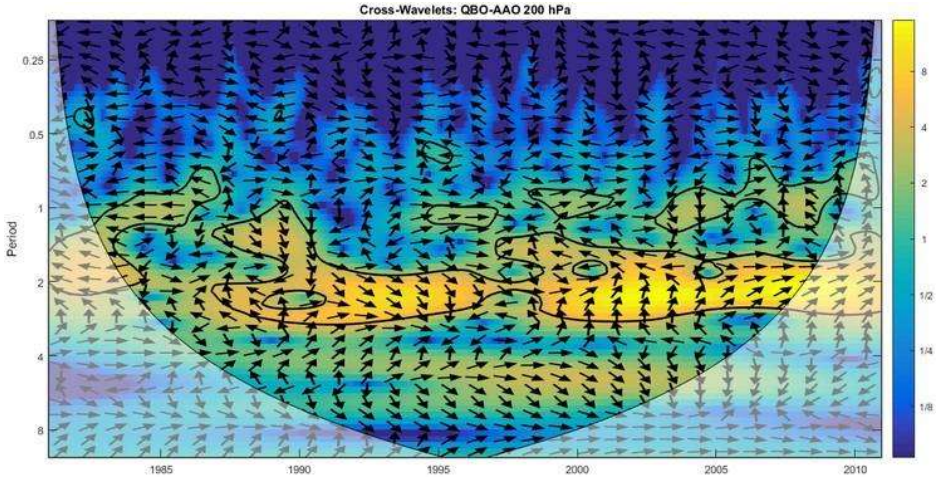

Figura 31 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 200 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

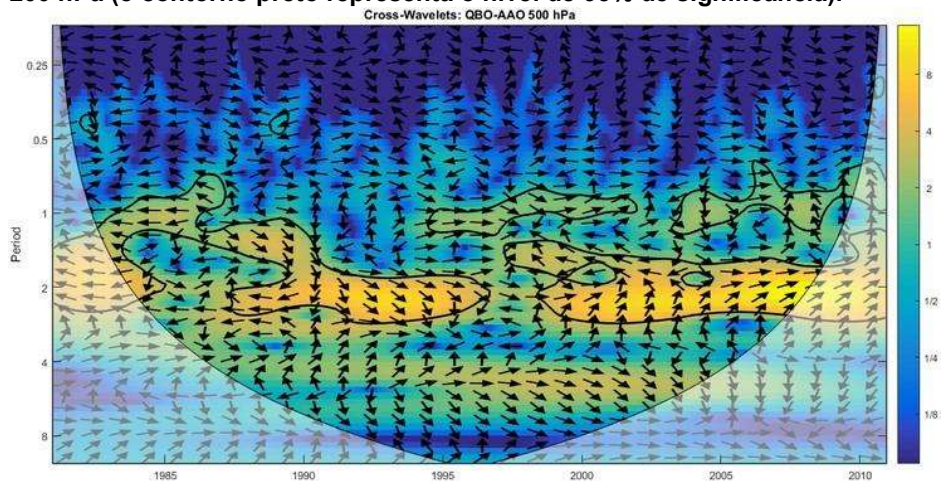

Figura 32 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 500 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

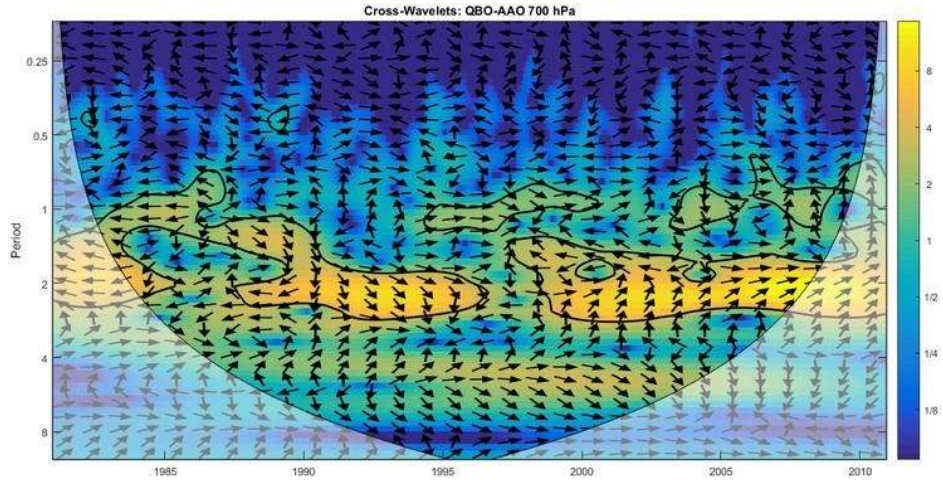

Figura 33 – Espectro de energia das ondeletas cruzadas do índice da QBO e do índice SAM em 700 hPa (o contorno preto representa o nível de 95% de significância).

Um gráfico com as séries temporais do índice da QBO e do índice SAM calculado para 30 hPa filtrado (o nível de 30 hPa foi escolhido por apresentar um espectro de energia mais intenso) encontra-se no Apêndice.

A fim de verificar o sinal da QBO nos extratrópicos do HS, com o auxílio da informação de defasagem obtido através da XWT, foram gerados os campos de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa. A série de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa foi filtrada de maneira similar ao índice SAM.

Observando a Figura 34, que apresenta as anomalias de altura geopotencial em 30 hPa para os anos em que a fase Leste da QBO foi considerada intensa, com as devidas defasagens indicadas pela XWT, observamos que, com exceção das Figuras 34(B,F), as anomalias representam a fase negativa do SAM, ratificando os resultados obtidos anteriormente. A Figura 34(B) apresenta um padrão de fase positiva do SAM, uma vez que a diferença de fase indicada pela XWT indica que nesse período as séries estão em antifase. A Figura 34(F) não apresenta um padrão bem definido, no entanto, sobre a maior parte da Antártica são observadas anomalias positivas, o que poderia levar a SAM negativo.

Ao analisar a Figura 35, similar à figura anterior, porém para a fase Oeste da QBO, as Figuras 35(B,E) apresentam o padrão da fase positiva do SAM definidos. As Figuras 35(A,C,D) apesar de não apresentarem exatamente o padrão do SAM, exibem anomalias negativas sobre a Antártica, sinal indicativo também da fase positiva. Já os padrões das Figuras 35(F,G) não são possíveis de classificar , pois não estão bem confi- gurados. É necessário pontuar que a fase Oeste da QBO é menos intensa (NAUJOKAT, 1986) o que pode se refletir no sinal observado.

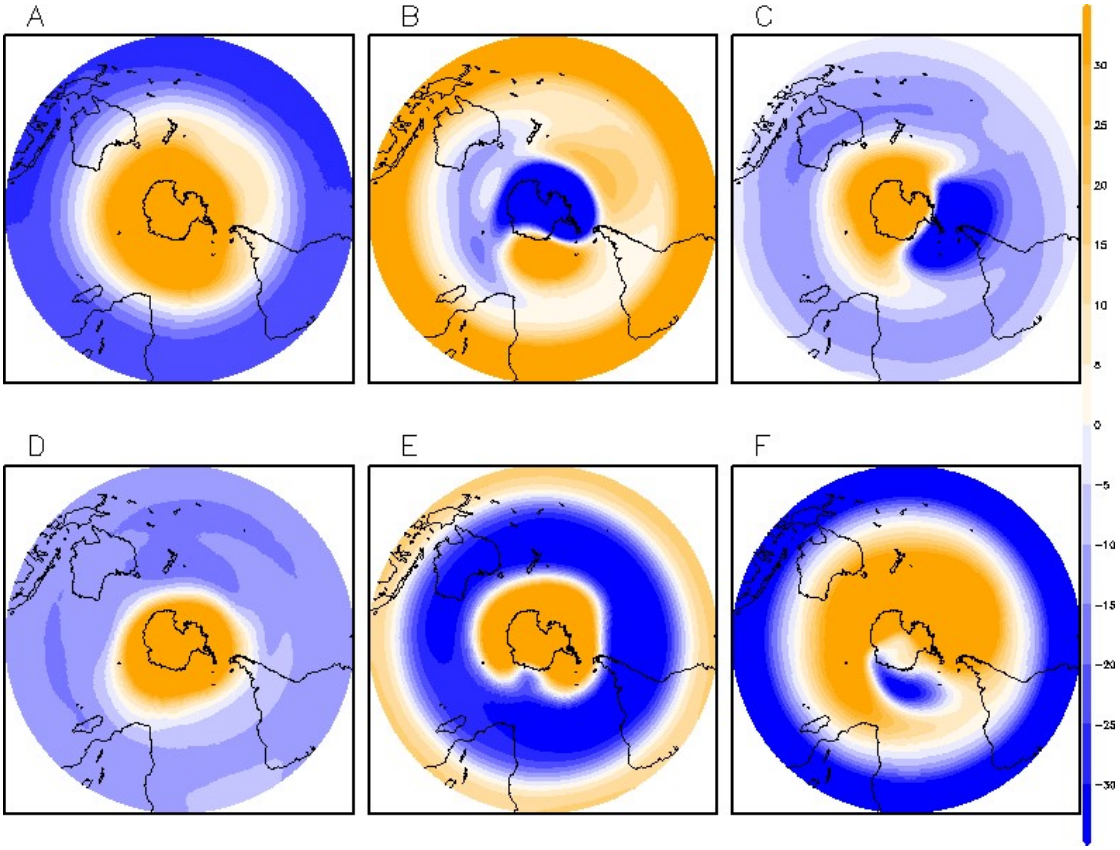

Figura 34 – Anomalia de altura geopotencial para a fase Leste da QBO. (A) para o ano de 1987, utilizando uma defasagem de 315°; (B) para o ano de 1989, utilizando uma defasagem de 180°; (C) para o ano de 1994, utilizando uma defasagem de 75°; (D) para o ano de 2001, utilizando uma defasagem de 285°; (E) para o ano de 2003, utilizando uma defasagem de 210°e (F) para o ano de 2007, sem defasagem.

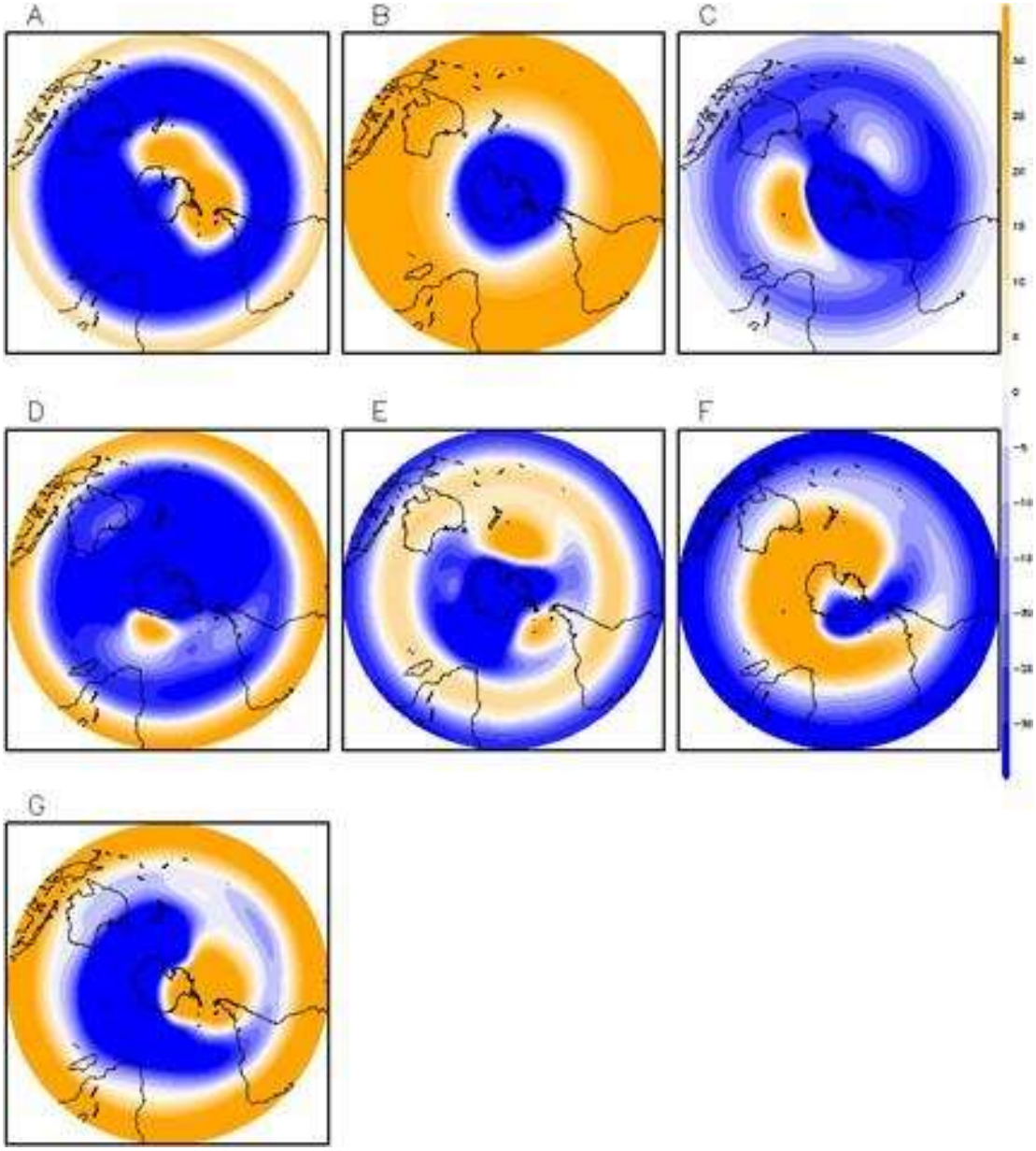

Figura 35 – Anomalia de altura geopotencial para a fase Oeste da QBO. (A) para o ano de 1985, utilizando uma defasagem de 15º; (B) para o ano de 1986, utilizando uma defasagem de 345º; (C) para o ano de 1995, utilizando uma defasagem de 75º; (D) para o ano de 1999, utilizando uma defasagem de 45°; (E) para o ano de 2002, utilizando uma defasagem de 225°; (F) para o ano de 2004, utilizando uma defasagem de 195°e (G) para o ano de 2006, defasagem de 15°.

5 Sumário e conclusões

Este trabalho foi desenvolvido buscando verificar a possível relação entre a QBO e o SAM e avaliar o impacto combinado dessas oscilações no clima da AS.

As tabelas de contingência entre o índice QBO e os índices SAM em diversos níveis (30, 200, 500 e 700 hPa), mostraram que, para a maioria dos meses, durante a fase Leste da QBO, há uma maior ocorrência da fase negativa do SAM, enquanto que durante a fase Oeste, há uma maior ocorrência da fase positiva do SAM, resultado que indica uma relação entre os sinais destas oscilações. Ao observar as tabelas de contingência com os dados filtrados, vemos uma maior homogeneidade nos resultados, o que possivelmente acontece por ter sido removido da série as altas frequências. Esse resultado está de acordo com trabalhos prévios (EBDON, 1975; HOLTON; TAN, 1980; RUZMAIKIN et al., 2005; WALLACE; GUTZLER, 1981). Porém, acrescenta a informação que esta relação não é verdadeira para todos os meses. Vemos ainda uma maior frequência absoluta da fase negativa do SAM durante a fase Leste da QBO, comportamento que não foi observado nas tabelas de contingência com os dados sem filtragem. Sendo, em geral, a fase Leste mais intensa (NAUJOKAT, 1986), é possível que sua influência no SAM seja mais evidente.

Os compostos gerados a partir da combinação das fases da QBO e do SAM não mostraram uma relação significativa na temperatura do ar. Já para a precipitação, algumas relações interessantes são encontradas.

Pode-se observar que para o mês de janeiro, a Região Nordeste do Brasil responde à variação das fases do SAM, independente das fases da QBO. Quando o SAM se encontra na fase negativa (positiva), nesta região são observadas anomalias negativas (positivas) de precipitação. Os resultados encontrados para esse mês ratificam os encontrados por Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2018) para o Nordeste brasileiro. Para parte do SEAS, o sinal das anomalias de precipitação se inverte de acordo com a fase da QBO. Durante a fase LN (ON), as anomalias observadas na região citada são negativas (postivas). Na fase LP (OP), as anomalias são positivas (negativas). Esses resultados podem explicar porque Vasconcellos, Pizzochero e Cavalcanti (2018) não encontraram um sinal claro do SAM no SEAS

em janeiro. Os resultados para janeiro sugerem que durante o verão na AS, a influência do SAM nas latitudes mais baixas, ocorre independente da fase da QBO. Enquanto que a influência conjunta da QBO e do SAM é melhor observada nas latitudes superiores.

Para o mês de abril, assim como em janeiro, a fase Oeste da QBO, em geral, apresenta anomalias negativas de precipitação na parte norte do Brasil e positivas na parte sul, na fase ON, e o oposto na fase OP. As anomalias de precipitação na região equatorial também indicam uma influência do SAM, durante a fase Oeste, na posição da ZCIT. O que sugere novamente a influência do SAM nas latitudes mais baixas. Os resultados apontam para um deslocamento da ZCIT mais para norte (sul) da sua posição climatológica durante a fase ON (OP). Gray et al. (2018) também encontraram influência da fase Oeste da QBO na região da ZCIT, entretanto aqui é mostrado que o impacto varia de acordo com a fase do SAM.

Em julho, durante a fase Leste (LN e LP), a Região Norte do Brasil apresenta anomalias positivas de precipitação, já durante a fase Oeste (ON e OP), negativas. Esse resultado sugere que nessa região a QBO domina o sinal, independente da fase do SAM. No SEAS, nas fases LP e ON (LN e OP), são observadas anomalias positivas (negativa), sugerindo que a QBO modula o impacto do SAM no SEAS também no inverno.

Na primavera, a Região Norte do Brasil apresenta anomalias positivas (negativas) de precipitação nas fases LN e LP (ON e OP). No RS, nas fases LN e ON (LP e OP), são observadas anomalias positivas (negativas) de precipitação, indicando que no mês de outubro, a QBO é responsável por influenciar o norte e o SAM o sul do Brasil.

Ressalta-se que, em geral, o escoamento em baixos níveis encontrado em todos os meses corrobora as anomalias de precipitação apresentadas nos compostos, inclusive quando as mesmas não possuem significância estatística no nível de 95%. Os resultados do escoamento em baixos níveis também sugerem que, em janeiro, a fase Leste (Oeste) impacta na ZCAS (nos jatos de baixos níveis). O escoamento anômalo na fase (LN) LP indica um (des)favorecimento da ZCAS, enquanto a fase (OP) ON indicaria um (des)favorecimento da ocorrência de jatos de baixos níveis. Um padrão do tipo gangorra é conhecido entre a ZCAS e os jatos de baixos níveis, de forma que a ocorrência do primeiro um desfavorece a ocorrência do segundo e vice-versa (CAVALCANTI et al., 2009).

Os resultados descritos acima estão sumarizados na Figura 36.

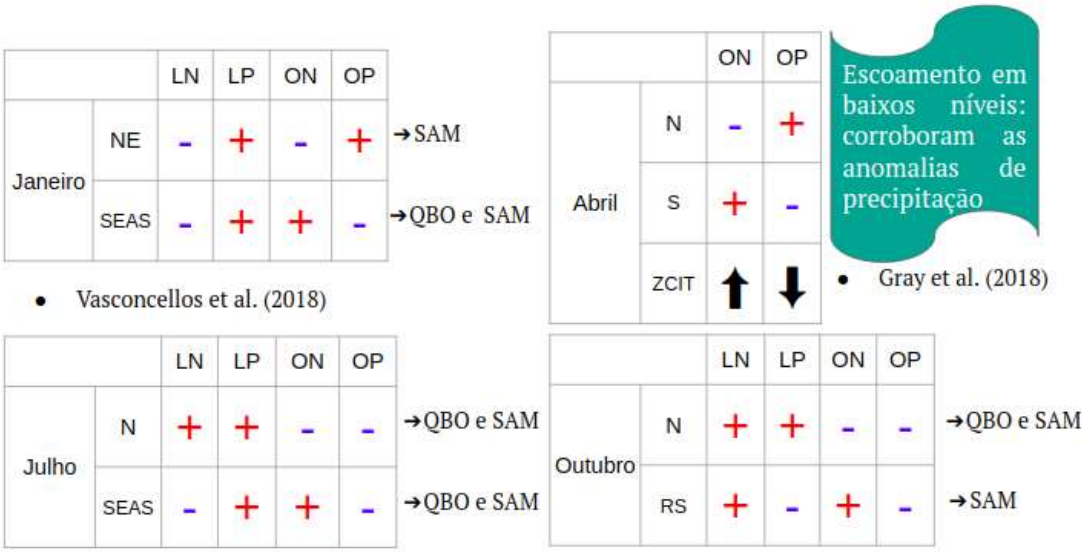

Figura 36 - Resumo dos resultados dos compostos.

Para aprofundar os resultados obtidos nas tabelas de contingência, confeccionou-se figuras com transformadas de ondeletas (CWT e XWT). As ondeletas permitem a identificação dos modos de variabilidade dominantes que apresentam maior contribuição para o sinal observado em um determinado período. A partir da CWT do índice da QBO, encontramos um pico de energia no período de 2 anos, como era esperado devido a natureza dessa oscilação. Observamos pelas CWT geradas para os índices do SAM calculados em diferentes níveis, que todas elas apresentam picos de energia no período de 1-6 meses, 2 anos e ligeiramente superior à 4 anos, com exceção da CWT de 30 hPa que não apresenta este último pico. Ao analisar as figuras de XWT obtidas, podemos ver um pico de energia no período em torno de 2 anos para todos os resultados obtidos. A partir dos vetores de fase da XWT para o nível de 30 hPa, observamos variações na defasagem entre as séries ao longo do período analisado, inclusive com períodos em fase. É importante ressaltar que sem o auxílio da XWT, a correlação entre as séries não teria sido identicada, uma vez que uma análise de correlação simples não seria capaz de relacionar os dois sinais, já que a maneira como as séries covariam se modifica ao longo do tempo. Para a XWT dos outros níveis do SAM o resultado é similar, porém não apresentam alguns dos picos e os outros observados possuem menor intensidade.

Analisando os campos de anomalia de altura geopotencial em 30 hPa

gerados com o auxílio das defasagens obtidas através da XWT, é possível observar a relação entre a QBO de Leste e a fase negativa do SAM e a fase Oeste da QBO e a fase positiva do SAM. Esses resultados ratificam os resultados encontrados anteriormente neste trabalho e são coerentes com diversos outros encontrados na literatura que relacionam a QBO e o NAM, em que durante a fase Leste da QBO encontram-se anomalias de pressão positivas sobre o Ártico e anomalias negativas sobre latitudes temperadas, o que corresponde à fase negativa do NAM (EBDON, 1975; HOLTON; TAN, 1980; RUZMAIKIN et al., 2005; WALLACE; GUTZLER, 1981).

Através dos métodos estatísticos utilizados neste estudo foi possível encontrar uma relação entre as fases da QBO e as fases do SAM, relação esta coerente com a encontrada no HN (para o NAM). Ao utilizar compostos para observar os efeitos da combinação das fases desses fenômenos no clima da AS, encontrou-se um impacto principalmente na precipitação e no escoamento em baixos níveis, e foi visto que estes impactos variam de acordo com a estação do ano. Dessa maneira, o objetivo geral proposto para este trabalho foi alcançado.

Referências

ADLER et al. The version-2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–present). **Journal of hydrometeorology**, v. 4, n. 6, p. 1147 – 1167, 2003. Citado na página 28.

ANGELL; KORSHOVER. Quasi-biennial variations in temperature, total ozone, and tropopause height. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 21, n. 5, p. 479 – 492, 1964. Citado na página 18.

BALDWIN; DUNKERTON. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D24, p. 30937 – 30946, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 26.

BALDWIN et al. The Quasi-Biennial Oscillation. **Reviews of Geophysics**, v. 39, n. 2, p. 179 – 229, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.

BALDWIN; O'SULLIVAN. Stratospheric effects of ENSO-related tropospheric circulation anomalies. **Journal of Climate**, v. 4, p. 649 – 667, 1995. Citado na página 26.

BALDWIN; THOMPSON. A critical comparison of stratosphere–troposphere coupling indices. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 135, n. 644, p. 1661 – 1672, 2009. Citado na página 29.

BALDWIN; TUNG. Extra-tropical QBO signals in angular momentum and wave forcing. **Geophysical research letters**, v. 21, n. 24, p. 2717 – 2720, 1994. Citado na página 16.

BARBOSA. **Estudo da variabilidade acoplada oceano-atmosfera no Atlântico tropical**. 2007. 139 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo (USP). Citado 2 vezes nas páginas 6 e 33.

BJÖRNSSON; VENEGAS. **A manual for EOF and SVD analysis of climatic data**. Montreal: McGill University, 1997. (247 p.). Citado na página 29.

BLÁZQUEZ; SOLMAN. Interannual variability of the frontal activity in the Southern Hemisphere: relationship with atmospheric circulation and precipitation over southern South America. **Climate Dynamics**, v. 48, p. 2569 – 2579, Abril 2017. Citado na página 15.

BRÖNNIMANN et al. Multidecadal variations of the effects of the Quasi-Biennial Oscillation on the climate system. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 16, p. 15529 – 15543, Dezembro 2016. Citado na página 21.

CAMARGO; SOBEL. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. **Journal of Climate**, v. 18, n. 15, p. 2996 – 3006, 2005. Citado na página 21.

CARDOZO; REBOITA; GARCIA. Climatologia de frentes frias na América do Sul e sua relação com o modo anular sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 2015. Citado na página 24.

CARVALHO; JONES; AMBRIZZI. Opposite phases of the antarctic oscillation and relationships with intraseasonal to interannual activity in the tropics during the austral summer. **Journal of Climate**, v. 18, n. 5, p. 702 – 718, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

CAVALCANTI et al. **Tempo e clima no Brasil**. 1. ed. [S.l.]: Oficina de textos, 2009. ISBN 978-85-86238-92-5. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 69.

CHATFIELD. **The Analysis of Time Series**: An introduction. [S.l.]: Chapman and Hall, 1989. (241 p.). Citado na página 30.

COUGHLIN; TUNG. QBO signal found at the extratropical surface through northern annular modes. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 24, p. 4563 – 4566, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 16, 26 e 43.

DEE et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553 – 597, 2011. Citado na página 28.

DUNKERTON. Annual variation of deseasonalized mean flow acceleration in the equatorial lower stratosphere. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 68, n. 4, p. 499 – 508, 1990. Citado na página 19.

EBDON. Notes on the wind ow at 50 mb in tropical and subtropical regions in January 1957 and in 1958. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, n. 86, p. 540 – 542, 1960. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.

EBDON. The quasi-biennial oscillation and its association with tropospheric circulation patterns. **Meteorological Magazine**, v. 104, p. 282 – 297, 1975. Citado 3 vezes nas páginas 20, 68 e 70.

EBDON; VERYARD. Fluctuations in equatorial stratospheric winds. **Nature**, v. 189, n. 4767, p. 791 –, 1961. Citado na página 18.

GARCIA; SOLOMON. A possible relationship between interannual variability in Antarctic ozone and the quasi-biennial oscillation. **Geophysical Research Letter**, v. 14, p. 848 – 851, 1987. Citado na página 26.

GILLET; KELL; JONES. Regional climate impacts of the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 23, 2006. Citado na página 15.

GONG; WANG. Definition of Antarctic Oscillation index. **Geophysical Research Letters**, v. 26, p. 459 – 462, 1999. Citado na página 15.

GRAY. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 9, p. 1649 – 1668, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 14, 20 e 21.

GRAY et al. Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 18, p. 8227 – 8247, Junho 2018. Citado 3 vezes nas páginas 21, 57 e 69.

GRAYSTONE. Meteorological office discussion—Tropical meteorology. **Australian**

Meteorological Magazine, v. 88, p. 113 – 119, 1959. Citado na página 18.

GRINSTED; MOORE; JEVREJEVA. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 11, p. 561 – 566, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.

HAMILTON. Observations of tropical stratospheric winds before World War II. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 7, p. 1367 – 1372, 1998. Citado na página 18.

HAMILTON. On the quasi-decadal modulation of the stratospheric QBO period. **Journal of climate**, v. 15, p. 2562 – 2565, 2002. Citado na página 20.

HOLTON; LINDZEN. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences, v. 29, n. 6, p. 1076-1080, 1972.**, v. 29, n. 6, p. 1076 – 1080, 1972. Citado na página 20.

HOLTON; TAN. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 10, p. 2200 – 2208, 1980. Citado 6 vezes nas páginas 16, 25, 26, 43, 68 e 70.

HOLTON; TAN. The quase-biennal oscillation in the Northern Hemisphere lower stratosphere. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 60, p. 140 – 148, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 25.

HOLZ et al. Southern Annular Mode drives multicentury wildfire activity in southern South America. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 36, p. 9552 – 9557, 2017. Citado na página 24.

JURY; MCQUEEN; LEVEY. SOI and QBO signals in the African region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 50, n. 1, p. 103 – 115, 1994. Citado na página 14.

KLOTZBACH. Recent developments in statistical prediction of seasonal Atlantic basin tropical cyclone activity. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 59, n. 4, p. 511 – 518, 2007. Citado na página 21.

KODERA; KOIDE. Spatial and seasonal characteristics of recent decadal trends in the northern hemispheric troposphere and stratosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D16, p. 19443 – 19447, Agosto 1997. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 36.

LABAT. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1, p. 275 – 288, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
LABITZKE. Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the North Polar region. **Geophysical Research Letter**, v. 14, p. 535 – 537, 1987. Citado na página 25.

LABITZKE. On the Signal of the 11-Year Sunspot Cycle in the Stratosphere and its Modulation by the Quasi-Biennial Oscillation (QBO). **Met. Z**, 2004. Citado na página 27.

LABITZKE; VANLOON. Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the northern

hemisphere in winter. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 50, n. 3, p. 197 – 206, 1988. Citado na página 25.

LORENZ. Rotation of principal components. **International Journal of Climatology**, v. 6, n. 3, p. 293 – 335, 1986. Citado na página 28.

MUKHERJEE et al. Quasi-Biennial Oscillation in Stratospheric Zonal Wind and Indian Summer Monsoon. **Monthly weather review**, v. 113, n. 8, p. 1421 – 1424, 1985. Citado na página 14.

NAOE; SHIBATA. Equatorial quasi-biennial oscillation influence on northern winter extratropical circulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, 2010. Citado na página 25.

NAUJOKAT. An update of the observed quasi-biennial oscillation of the stratospheric winds over the tropics. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 17, p. 1873 – 1877, 1986. Citado 6 vezes nas páginas 14, 18, 28, 42, 66 e 68.

NEWMAN; RANDEL. Coherent ozone-dynamical changes during the Southern Hemisphere spring 1979-1986. **Journal of Geophysical Research**, v. 93, p. 12585 – 12606, 1988. Citado na página 26.

PALMER. The general circulation between 200 mb and 10 mb over the equatorial Pacific. **Weather**, v. 9, n. 11, p. 341 – 349, 1954. Citado na página 18.

PEINGS et al. How stationary is the relationship between Siberian snow and Arctic Oscillation over the 20th century? **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 1, p. 183 – 188, 2013. Citado na página 14.

PLUMB; MCEWAN. The instability of a forced standing wave in a viscous stratified fluid: A laboratory analogue of. the quasi-biennial oscillation. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 35, n. 10, p. 1827 – 1839, 1978. Citado na página 20.

RAPHAEL. A possible influence of the tropical quasi-biennial oscillation on the variability of the extratropical circulation in the Southern Hemisphere. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 108, n. D22, 2003. Citado na página 34.

REBOITA; AMBRIZZI; ROCHA. Relationship between the southern annular mode and the southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48 – 55, 2009. Citado na página 24.

REED et al. Evidence of a downward-propagating, annual wind reversal in the equatorial stratosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 3, p. 813 – 818, 1961. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.

ROY; HAIGH. The influence of solar variability and the quasi-biennial oscillation on sea level pressure. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 10, n. 12, p. 30453 – 30471, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 27.

RUZMAIKIN et al. Extratropical signature of the quasi-biennial oscillation. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D11111, 2005. Citado 4 vezes nas páginas 26, 42, 68 e 70.

SALBY; CALLAGHAN. Connection between the solar cycle and the QBO: The missing link. **Journal of climate**, v. 13, p. 2652 – 2662, 2000. Citado na página 19.

SANTOS; FRANCO. Uso do índice mensal da oscilação antártica para avaliação de algumas interações com a circulação troposférica na américa do sul e oceanos próximos. In: ANAIS DO XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2010, Belém. **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**. Belém, 2010. Citado na página 24.

SCAIFE et al. Predictability of the quasi-biennial oscillation and its northern winter teleconnection on seasonal to decadal timescales. **Geophysical Research Letters**, n. 41, p. 1752 – 1758, Março 2014. Citado na página 27.

SCHENZINGER; OSPREY. Interpreting the nature of Northern and Southern Annular Mode variability in CMIP5 Models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 21, 2015. Citado na página 30.

SCHOSSLER et al. Precipitation anomalies in the Brazilian southern coast related to the SAM and ENSO climate variability modes. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, 2018. Citado na página 25.

SILVESTRI; VERA. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South America. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 21, 2003. Citado na página 23.

SILVESTRI; VERA. Nonstationary Impacts of the Southern Annular Mode on Southern Hemisphere Climate. **Journal of Climate**, v. 22, p. 6142 – 6148, 2009. Citado na página 23.

THOMPSON; WALLACE. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. **Journal of climate**, v. 13, n. 5, p. 1000 – 1016, 2000. Citado 4 vezes nas páginas 15, 22, 23 e 29.

TORRENCE; COMPO. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61 – 78, Janeiro 1998. Citado na página 32.

TORRENCE; WEBSTER. Interdecadal changes in the enso-monsoon system. **Journal of Climate**, v. 12, n. 8, p. 2679 – 2690, Agosto 1999. Citado na página 32.

VANLOON; LABITZKE. The Southern Oscillation. Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in winter and a comparison with the quasi-biennial oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 2, p. 357 – 369, 1987. Citado na página 25.

VASCONCELLOS. **A oscilação antártica-mecanismos físicos e a relação com características atmosféricas sobre a América do Sul/oceanos adjacentes**. 2012. 164 p. Tese (Curso de Pós-Graduação em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Citado 2 vezes nas páginas 6 e 22.

VASCONCELLOS; CAVALCANTI. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 21 – 26, 2010. Citado na página 15.

VASCONCELLOS; PIZZOCHERO; CAVALCANTI. Month-to-month impacts of Southern Annular Mode over South America climate. **Anuário de Instituto de Geociências da UFRJ**, Aceito, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 15, 24, 29, 56 e 68.

WALKER. World Weather. **Royal Meteorological Society**, v. 4, p. 53 – 84, 1932. Citado na página 14.

WALLACE. General circulation of the tropical lower stratosphere. **Reviews of Geophysics**, v. 11, n. 2, p. 191 – 222, 1973. Citado na página 18.

WALLACE; GUTZLER. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 784 – 812, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.

WILKS. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. San Diego, CA: Academic Press, 2006. v. 91. (International Geophysics Series, v. 91). ISBN 978-0-12-751966-. Citado na página 31.

Apêndices

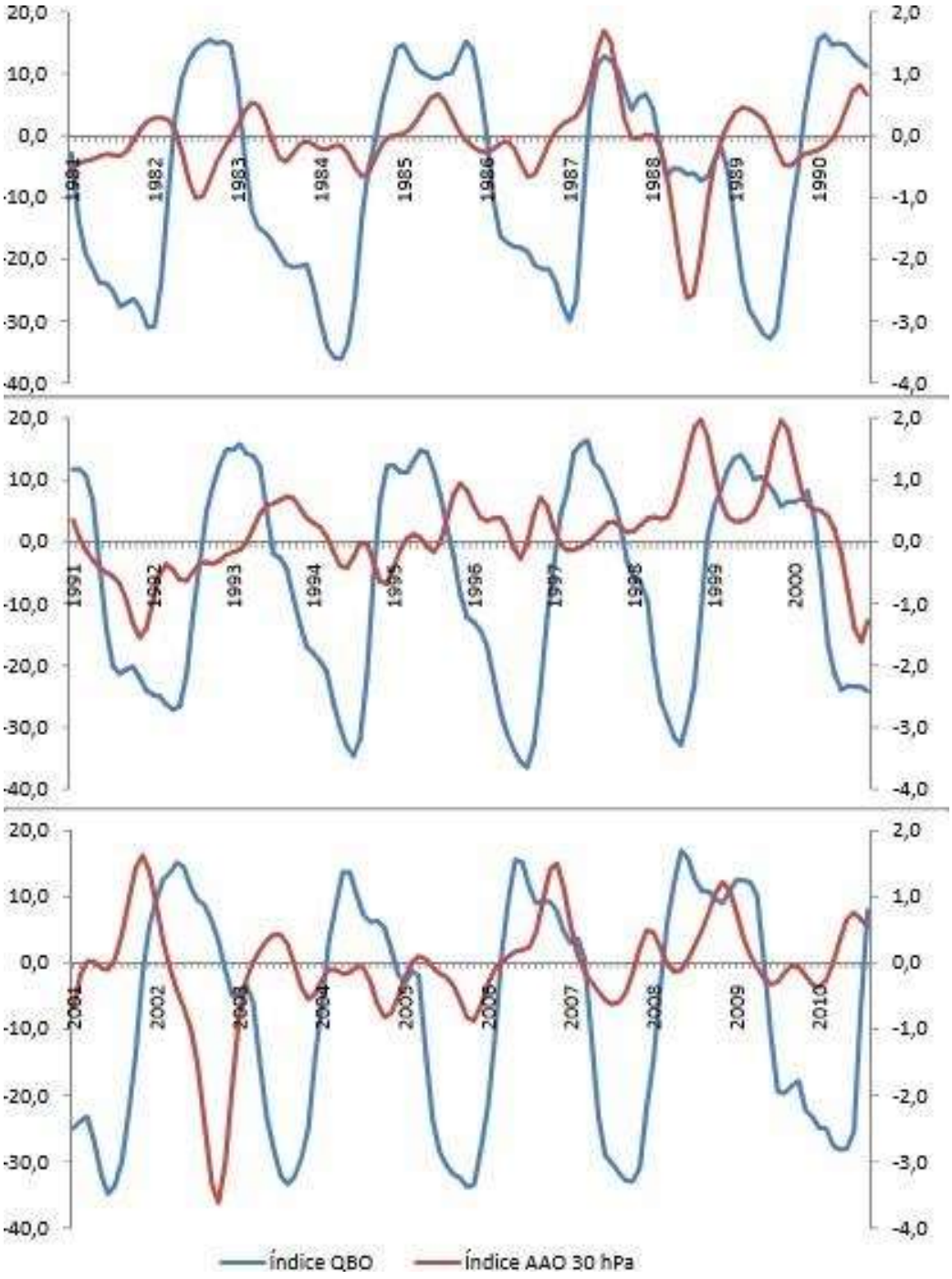

Figura 37 – Série temporal dos índices da QBO e do SAM para 30 hPa (filtrado).