



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

Centro de Ciências Exatas e da Terra

Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas

PPGCC

**INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO SOBRE A  
AMÉRICA DO SUL: CASOS DE EVENTOS DE VÍRGULA**

**Laís San Martins Schmalfuss**

Natal – RN

**Abril/2019**

# INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO SOBRE A AMÉRICA DO SUL: CASOS DE EVENTOS DE VÍRGULA

LAÍS SAN MARTINS SCHMALFUSS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, do Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Climáticas

Orientador: **Prof. Dr. David Mendes**

Co-orientador: **Prof. Dr. Weber Andrade Gonçalves**

COMISSÃO EXAMINADORA

**Prof. Dr. José Henrique Fernandez**

Examinador externo à Instituição

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Clênia Rodrigues Alcântara**

Examinadora externa à Instituição

**Pollyanne Evangelista da Silva**

Examinadora externa à Instituição

Natal – RN

Abril/2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Schmalfuss, Laís San Martins.

Investigação da dinâmica do ozônio estratosférico sobre a América do Sul: casos de eventos de vírgula / Laís San Martins Schmalfuss. - 2019.

104f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas. Natal, 2019.

Orientador: David Mendes.

Coorientador: Weber Andrade Golçalves.

1. Climatologia - Tese. 2. Quebra da tropopausa - Tese. 3. Eventos de intrusão - Tese. 4. Jato de altos níveis - Tese. I. Mendes, David. II. Golçalves, Weber Andrade. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 551.58

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CLIMÁTICAS**

LAÍS SAN MARTINS SCHMALFUSS

INVESTIGAÇÃO DA DINÂMICA DO OZÔNIO ESTRATOSFÉRICO SOBRE A  
AMÉRICA DO SUL: CASOS DE EVENTOS DE VÍRGULA

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de DOUTORA EM CIÊNCIAS  
CLIMÁTICAS, sendo aprovada em sua forma final.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao ECMWF pelos dados que utilizei neste trabalho (<https://www.ecmwf.int/>).

Agradeço ao programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade federal do Rio Grande do Norte.

Agradeço a CAPES pela bolsa de doutorado.

Agradeço ao Orientador e Co-orientador pelo suporte.

## RESUMO

Dada a importância da camada de ozônio para a vida na superfície, uma investigação sobre a dinâmica do ozônio estratosférico e sua interação com os sistemas da troposfera são realizadas neste estudo. Sendo o foco do trabalho os eventos de prolongamento do “buraco de ozônio” sobre a América do Sul, intitulados aqui como eventos de vírgula. O trabalho foi realizado para o período de 1979 a 2016, somente para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, que são os meses em que o buraco de ozônio se encontra instável. Os dados utilizados foram do ERA – INTERIM (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) médios diários com resolução espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$  para todo o Hemisfério Sul. Uma análise dos campos de coluna total de ozônio, temperatura a 100 hPa, vento zonal em 100 hPa e 200 hPa e vorticidade potencial (VP) em 600 K são realizadas através da média do período e da média para os dias com evento de vírgula, além da diferença entre essas duas médias e análise de alguns eventos. Nessas análises constatou-se que durante os eventos de vírgula um dipolo no campo de VP e vento zonal em 200 hPa estavam associados à quebra nas ondas de Rossby e a eventos de intrusão. Além da mistura de massa que ocorria entre o “braço” da vírgula e o cinturão das altas concentrações de ozônio. Em uma segunda parte foram realizadas análises de superfície nos campos de pressão e geopotencial em 500 hPa, vento zonal em 200 hPa e temperatura em 850 hPa, além do corte vertical na latitude de  $50^\circ\text{S}$  para o vento zonal e temperatura. Constatou-se a influência de vórtice polar sobre latitudes e altitudes menores, mostrando a ligação entre troposfera e estratosfera. Durante os eventos de vírgula sobre a América do Sul haviam anticiclones, associados a uma grande amplitude de onda entre crista e cavado.

**Palavras-chave:** quebra da tropopausa; eventos de intrusão; Jato de altos níveis

## **ABSTRACT**

Given the importance of the ozone layer to life on the surface, an investigation on the dynamics of stratospheric ozone and its interaction with troposphere systems are conducted in this study. Being the focus of work the events of "ozone hole" extension over South America, here titled as comma events. The work was conducted out for the period from 1979 to 2016 only for the months of August, September, October and November, those are the months in which the ozone hole is unstable. The data used were daily average ERA - INTERIM (*European Center for Medium - Range Weather Forecasts*) with spatial resolution  $1 \times 1^\circ$  for whole Southern Hemisphere. An analysis of the total ozone column, temperature in 100 hPa, zonal wind in 100 hPa and 200 hPa and potential vorticity (PV) in 600 K fields are performed through the mean of the period and the mean for days with a comma event, in addition to the difference between these two means and the analyse for some events. In these analyzes it was found that during the comma events a dipole in PV field and zonal wind in 200 hPa were associated with Rossby wave breaking and the intrusion events. In addition to the mass mixture that occurred between the "arm" of comma and the belt of high ozone concentrations. In a second part, surface analyzes were performed in the mean sea level pressure and geopotential (500 hPa) fields, zonal wind (200 hPa) and temperature (850 hPa), as well as the vertical cut in the latitude of  $50^\circ\text{S}$  for the zonal wind and temperature. The influence of the vortex was verified on smaller latitudes and altitudes, showing the connection between troposphere and stratosphere. During the coma events on South America there were anticyclones, associated to large amplitude between the crest and trough.

**Key-words:** Tropopause Break; Intrusion events; High level jet

## SUMÁRIO

	<b>Pags</b>
LISTA DE FIGURAS .....	XI
LISTA DE TABELAS .....	XIV
LISTA DE SIGLAS .....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XVI
 CAPÍTULO 1	
1. Introdução .....	17
1.2. Objetivos .....	20
1.2.1. Objetivos Específicos .....	20
 CAPÍTULO 2	
2. Revisão de literatura .....	21
2.1. O Ozônio .....	21
2.2. O “Buraco de Ozônio” na Antártica .....	21
2.3. Efeitos Secundários do “buraco de ozônio” Antártico .....	31
2.4. Vorticidade Potencial .....	33
2.5. Padrão de Vórgula associado ao Ozônio Estratosférico .....	35
2.6. Sistemas troposféricos e suas influências sobre o ozônio estratosférico .....	36
 CAPÍTULO 3 - Análise de Eventos de Vórgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério sul e interação com a troposfera pelos dados de Reanálise do ERA Interim .....	
	38

Resumo .....	39
Abstract .....	40
1. Introdução .....	41
2. Dados e Métodos .....	43
2.1. Dados .....	43
2.2. Metodologia .....	44
3. Resultados .....	44
4. Conclusões .....	55
5. Referências .....	57
CAPÍTULO 4 - Seleção, Análise Troposférica e Vertical dos Eventos de Vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério Sul .....	60
Resumo .....	61
Abstract .....	62
1. Introdução .....	63
2. Dados e Métodos .....	65
2.1. Área de estudo .....	65
2.2. Dados .....	65
2.3. Metodologia .....	66
3. Resultados .....	68
3.1. Análise dos campos médios .....	71

3.2. Análise dos eventos de vírgula .....	76
3.3. Análise do campo vertical .....	85
4. Conclusões .....	89
5. Referências .....	91
CAPÍTULO 5 – Conclusões Gerais e Perspectivas de trabalhos Futuros .....	96
REFERÊNCIAS .....	98

## LISTA DE FIGURAS

### FIGURAS CAPÍTULO 2

- Figura 1 - Perfil vertical de temperatura, típica de médias latitudes. Fonte: Adaptado de: WALLACE; HOBBS, 2006, p.10 ..... 21
- Figura 2 - Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio (UD) em função da latitude, altitude e níveis de pressão entre 1980 e 1989, pelos dados do satélite Nimbus-7 ..... 24
- Figura 3 - Média sazonal do ozônio estratosférico (UD – unidades Dobson) obtidas pelas imagens do sensor TOMS a bordo do satélite Nimbus7, para o período de 1978 a 1993: a) primavera, b) verão, c) outono e d) inverno ..... 26
- Figura 4 - Dados médios mensais de coluna total de ozônio em função da latitude para o período 1979 – 1992, obtidos através do sensor TOMS ..... 27
- Figura 5 - Representação dos perfis verticais das razões de mistura de algumas espécies selecionadas para condições em latitudes médias. A linha vermelha representa o ozônio ..... 27
- Figura 6 - Coluna total de ozônio, em Unidades Dobson – UD, sobre a Antártica no dia 02 de outubro de 2015 ..... 30
- Figura 7 - (a) Climatologia dos valores mínimos de coluna total de ozônio em UD. Linha preta: indica a média dos valores mínimos mensais de coluna total de ozônio. Sombras em cinza escura e clara: mostram os quartis. (b) Climatologia da área do buraco de ozônio. Linha preta indica as médias mensais do tamanho do buraco de ozônio na Antártica em milhões de km<sup>2</sup>. Sombras em cinza escura e clara mostram os quartis em torno da média. Ambos para o período de 1979 a 2016. As linhas azul e vermelha mostram a variação desses valores para o ano de 2015 e 2016 respectivamente ..... 31
- Figura 8 - Formação da vírgula (a), espacialização (b) e verticalização ..... 36
- Figura 9 - Vorticidade potencial sobre o vórtice Ártico em 520 K para o dia 19 de fevereiro de 2000 as 0000 UTC ..... 37

### FIGURAS CAPÍTULO 3

- Figura 1 - Distribuição do número de dias com evento de vírgula nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, entre os anos de 1979 e 2016 ..... 45
- Figura 2 - (a) média do quadrimestre ASON, (b) média dos dias com eventos de vírgula. As próximas são a diferença entre as médias de (a) e (b), para os dias (c) -2

dias, (d) -1 dia, (e) 0 dia e (f) +1 dia .....	46
Figura 3 - (a) campo da média do quadrimestre ASON da temperatura em 100 hPa. (b) campo da diferença da temperatura em 100 hPa entre os dias com eventos de vírgulas e a média do quadrimestre. (c) Idem (a), mas para o vento zonal em 100 hPa. (d) Idem (b), mas para o vento zonal em 100 hPa .....	49
Figura 4 - (a) média do quadrimestre para o vento zonal em 200 hPa. (b) média dos dias com vírgula. (c) e a diferença entre os campos (b) e (a). Unidade m/s ...	50
Figura 5 - (a) média do quadrimestre para a vorticidade potencial em 600 K. (b) média dos dias com a presença da vírgula. (c) diferença entre os campos (b) e (a) ...	53
Figura 6 - (a) média do quadrimestre para o corte vertical da vorticidade potencial em 50°S. (b) média dos dias com a presença da vírgula. (c) diferença entre (b) e (a) .....	54

#### FIGURAS CAPÍTULO 4

Figura 1 - Exemplo de campo de coluna total de ozônio para um dia com evento de vírgula sobre a América do Sul (dia 20 de outubro de 2000) .....	67
Figura 2 - Média de coluna total de ozônio dentro da grade de interesse, sobre a América do Sul e Península Antártica. Os quadrados azuis representam os dias para todo o período em que os valores estiveram abaixo de 220 UD. Os losangos laranjas mostram os dias catalogados como eventos de vírgula .....	69
Figura 3 - Eventos de vírgula catalogados para cada mês, o eixo das ordenadas mostra o número de eventos versus a quantidade de dias de cada evento no eixo das abscissas .....	70
Figura 4 - Campo médio de coluna total de ozônio, em UD, para os dias com evento de vírgula (a) e para os demais dias – dias sem evento de vírgula (b) .....	71
Figura 5 - Diferença dos campos médios de PNMM, entre os dias com e sem o evento de vírgula sobre a América do Sul .....	72
Figura 6 - Linhas de corrente do vento a 10 metros para (a) média dos dias com evento de vírgula, (b) média dos demais dias .....	73
Figura 7 - Vento zonal em 200 hPa para (a) média dos dias com evento de vírgula, (b) média dos demais dias .....	74
Figura 8 - Corte vertical na latitude de 50°S entre as longitudes de 0 e 90°W para os níveis padrão de pressão (1000 hPa a 10 hPa) para a vorticidade potencial (cores), vento zonal (linhas pretas) e temperatura (linhas brancas pontilhadas), sendo (a) média dos dias com evento de vírgula sobre a AS e (b) média dos demais dias .....	75
Figura 9 - Campo de coluna total de ozônio para os dias dos eventos de vírgula mostrados na tabela 1. (a) 21 agosto 1995. (b) 29 agosto 1995. (c) 10, (d) 11, (e) 12 setembro 1995. (f) 1 outubro 2003 e (g) 6 outubro 2003 .....	77
Figura 10 - Pressão ao nível médio do mar – PNMM (cores) e altura geopotencial em 500 hPa para os dias tempos -2, -1, 0, 0, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (e) 13 de setembro de 1995 .....	79

Figura 11 - Pressão ao nível médio do mar – PNMM (cores) e altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas) para os dias tempos -2, -1, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro 2003 .....	80
Figura 12 - Linhas de corrente para o vento a 10 metros para os tempos -3, -2, -1, 0, +1, +2 que são referentes aos dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (e) 13 de setembro de 1995 .....	81
Figura 13 - Linhas de corrente para o vento a 10 metros para os dias tempos -2, -1, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro 2003 .....	82
Figura 14 - Vento zonal no nível de 200 hPa para os dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (f) 14 de setembro de 1995 .....	84
Figura 15 - Vento zonal no nível de 100 hPa para os dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro de 2003 .....	85
Figura 16 - As cores indicam o Vento Zonal em m/s e as linhas pretas indicam temperatura, em °C, em um corte vertical na latitude de 50°S e variando entre as longitudes de -90°W e 0, para o dia do evento (a) 8, (b) 9, (c) 10 (d) 11, (e) 12 e (f) 13/09/1995 .....	87
Figura 17 - As cores indicam o Vento Zonal em m/s e as linhas pretas indicam temperatura, em °C, em um corte vertical na latitude de 50°S e variando entre as longitudes de -90°W e 0, para o dia do evento (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7/10/2003 .....	88

**LISTA DE TABELAS**

## TABELA CAPÍTULO 1

Tabela 1- Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de O <sub>3</sub> na estratosfera .....	23
---	----

## TABELA CAPÍTULO 3

Tabela 2 - Dias catalogados como evento de vírgula com os menores valores médios de CTO da grade de interesse .....	50
---	----

**LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS**

AS - América do Sul

ASON - agosto, setembro, outubro e novembro

ARG – Argentina

CFCs – Clorofluorcarbonetos

CTO - Coluna Total de Ozônio

ENOS - El Niño Oscilação Sul

ESBOA - Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico

HN - Hemisfério Norte

HS - Hemisfério Sul

JAN - Jato de Altos Níveis

lag - Atraso de tempo

M - Terceiro corpo ou gás

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NEPs - Nuvens estratosféricas polares

NO – Noroeste

OES - Observatório Espacial Sul

OMI - Ozone Monitoring Instrument

PNMM - Pressão ao Nível Médio do Mar

RS - Rio Grande do Sul

SO – Sudoeste

TOMS - Total Ozone Mapping Spectrometer

UMAG - Universidade de Maraghalhanes

UVP - Unidade de vorticidade potencial

UTC - Universal Time Coordinated

WHO - World Health Organization

VOCs - Compostos Orgânicos Voláteis

VP - Vorticidade Potencial

VPA - Vorticidade Potencial Absoluta

**LISTA DE SÍMBOLOS**

°C - Graus Celcius

Cl - Cloro

cm<sup>2</sup> - Centímetro quadrado

H - Hidrogênio

hPa - Hecto Pascal

*hν* - Fotodissociação

K - Kelvin

K/Kg<sup>-1</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> - Kelvin por quilograma, metro quadrado e segundo

km - Quilometro

km<sup>2</sup> - Quilometros quadrados

K/km - Kelvin por quilometro

mb - Milibares

μm - Micromêtro

m/s - Metros por segundo

°N - Graus Norte

N<sub>2</sub> - Nitrogênio

NO<sub>x</sub> - Óxido de nitrogênio

NO<sub>2</sub> - Dióxido de nitrogênio

O - oxigênio atômico

O<sub>2</sub> - Oxigênio

O<sub>3</sub> - Ozônio

ppmv - Partes por milhão de volume

°S - Graus Sul

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

UD - Unidades Dobson

UV - Ultravioleta

UV-B - Ultravioleta do tipo B

°W - Graus Oeste

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

O ozônio ( $O_3$ ) possui duas “faces”, uma boa e outra má e o que as distingue é a sua localização. O ozônio encontrado na troposfera é considerado um poluidor, mas o ozônio encontrado na estratosfera atua como filtro, interceptando a radiação ultravioleta (UV), sobretudo a radiação ultravioleta do tipo B – UV-B, localizada na faixa espectral entre 0,28 e 0,32  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda, absorvendo-a nos primeiros quilômetros da estratosfera e impedindo que grande parte chegue livremente à superfície (SALBY, 1995). Assim, uma rarefação na camada de ozônio implica em consequências para a saúde dos seres vivos em geral (WHO, 1994), pois ocorre um aumento da radiação UV que chega a superfície (GUARNIERI et al., 2004).

Esse tipo de radiação é nociva à saúde dos seres vivos, podendo causar diversas doenças como o câncer de pele, catarata, supressão do sistema imunológico, queimaduras solares e o aumento do risco de infecções. Pode prejudicar o desenvolvimento de plantas e causar danos no sistema aquático (WHO, 1994), pois a radiação UV prejudica a química molecular da fotossíntese, tanto de plantas terrestres como do fitoplâncton. Sendo que as reduções desses organismos fitoplanctônicos atingem diretamente a cadeia alimentar oceânica e a extração de dióxido de carbono da atmosfera, contribuindo assim para o aquecimento anormal da atmosfera (WHO, 1994).

Na década de 70, uma descoberta feita por Mário J. Molina e Frank S. Rowland associava os baixos conteúdos de ozônio na estratosfera da Antártica às grandes quantidades de Clorofluorcarbonos - CFCs emitidos pela ação antrópica. Os cientistas detectaram que a quantidade de CFCs concentrados na atmosfera era praticamente a mesma que fora produzida. Por possuírem tamanha estabilidade conseguiam alcançar a estratosfera, onde ao sofrerem um processo de decomposição pela radiação ultravioleta liberavam átomos de cloro (Cl). Molina e Rowland alertaram para a importância dessa descoberta, pois apenas um átomo de Cloro é capaz de destruir milhares de moléculas de ozônio. Mesmo assim, a devida importância ao fato só foi reconhecida anos mais tarde, com a descoberta do “buraco de ozônio da Antártica” na década de 80 (CHUBACHI, 1984; FARMAN et al., 1985). Desde então, o interesse científico se voltou para a investigação da dinâmica e da química da camada de ozônio e com avanço nas pesquisas e novas descobertas surgiu o Protocolo de Montreal (1989), que foi

assinado por cento de cinquenta países durante a Convenção de Viena em 1969, tendo como objetivo principal a proteção da camada de ozônio através da redução e eliminação do consumo de CFCs.

Algum tempo depois se descobriu que esse baixo ozônio da Antártica estava alcançando latitudes mais baixas (ATCKINSON et al., 1989), ou seja, áreas mais povoadas. Sobre a América do Sul (AS) há diversos relatos de chegadas de massas de baixo ozônio, as quais são chamadas de “Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico” - ESBOA (KIRCHHOFF et al., 1996). Durante a primavera quando o “buraco de ozônio” fica mais instável essas massas conseguem se desprender do vórtice sobre a Antártica e migrar para latitudes médias e baixas, onde conseguem permanecer por até 20 dias (PRATHER; JAFFE, 1990). Existem alguns estudos sobre as consequências desses eventos e alguns ainda investigam as consequências desses eventos nos sistemas troposféricos (IWABE, 2008; KANG et al., 2011). Porém a dinâmica dos eventos de baixo ozônio na América do Sul ainda não está bem consolidada e necessita de mais conclusões sobre alguns padrões carentes de literatura. Um padrão praticamente desconhecido é a extensão do “buraco de ozônio” que atinge o sul da América do Sul e possui um formato similar ao de uma vírgula, necessitando de maiores esclarecimentos sobre suas características físicas e dinâmicas, além de uma melhor discussão sobre sua formação, tempo de vida e dissipação.

Algumas pesquisas indicam que os baixos conteúdos de ozônio que chegam as latitudes mais baixas podem ser motivados pela quebra das ondas de Rossby (MCINTYRE; PALMER, 1983). Postel e Hitchman, (1999) conferiram que as maiores frequências de quebra da onda de Rossby ocorrem no verão de cada hemisfério, sobre os oceanos Pacífico e Atlântico nas proximidades de anticiclones. Dessa forma surge uma questão: Será que as extensões do “buraco de ozônio” que possuem formato de vírgula estão associados à quebra da onda de Rossby? Qual seriam as implicações da ocorrência desses eventos se estiverem associados a quebra da onda de Rossby? Porém os autores detectaram um baixo número de quebras de onda durante a primavera, justamente o período de maior instabilidade do “buraco de ozônio da Antártica” e conseqüentemente de maior ocorrência dos eventos de vírgula. Questão que deixa a pergunta anterior mais interessante, porque indicaria que o efeito seria inverso. Seria por causa dos eventos com formato de vírgula que aumentam as quebras de onda de Rossby?

Dessa forma, são os impactos sobre a natureza e sobre os seres humanos que motivam uma maior investigação sobre a dinâmica da camada de ozônio. Baseado nas consequências que a diminuição do ozônio sobre as latitudes médias pode causar no planeta, este trabalho visa ampliar os conhecimentos sobre a dinâmica deste elemento, assim como dar uma identidade aos eventos de prolongamento do “buraco de ozônio Antártico” sobre a América do Sul, os quais possuem formato de vírgula. Sendo que sobre esses eventos ainda há um vasto horizonte a ser estudado, principalmente em relação aos sistemas meteorológicos e a relevância da interação e da troca entre troposfera e estratosfera.

## 1.2. OBJETIVOS

Esse projeto teve como objetivo principal realizar uma caracterização da evolução e da dinâmica da coluna total de ozônio (CTO) sobre o Hemisfério Sul (HS) durante episódios em que o “buraco de ozônio Antártico” sofre um prolongamento sobre a América do Sul, assemelhando-se ao formato de uma vírgula quando visualizado pelos mapas de projeção polar. Para tal, foram analisadas as evoluções das massas de CTO durante os meses de primavera entre os anos de 1979 e 2016. Com a catalogação dos dias em que esse tipo de evento atingiu o continente Sul Americano foi possível realizar comparações entre os campos de CTO e outras variáveis meteorológicas e dessa forma, usar as análises comparativas como instrumento para verificar a interação troposfera-estratosfera durante os eventos. Essa caracterização dos eventos teve como objetivos secundários:

### 1.2.1. Objetivos Específicos

- i.* Caracterizar os eventos de prolongamento do “buraco de ozônio Antártico” sobre a América do sul, quanto as suas características espaciais e temporais;
- ii.* Caracterizar a evolução dos eventos de prolongamento do “buraco de ozônio Antártico” nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro<sup>1</sup> entre os anos de 1979 e 2016;
- iii.* Compreender qual a relação entre as quebras de onda de Rossby e os eventos em que o “buraco de ozônio” se prolonga sobre a América do Sul, através da análise das relações entre variáveis meteorológicas e a coluna total de ozônio durante esses eventos;
- iv.* Captar como ocorre a interação troposfera-estratosfera, através de análises de evolutivas de cortes verticais, para os eventos de prolongamento do “buraco de ozônio”;
- v.* Ainda analisar a função do Jato de Altos Níveis durante esses eventos.

## CAPÍTULO 1

### 2. REVISÃO DE LITERATURA

#### 2.1. O Ozônio

Na troposfera, camada onde ocorrem os principais processos meteorológicos, a temperatura diminui com a altura a uma taxa de 6,5 K/km, consequência direta do balanço radiativo e do transporte convectivo de energia da superfície para a atmosfera. A estratosfera localiza-se logo acima da tropopausa e é nessa camada que ocorrem os processos de formação do ozônio ( $O_3$ ), entre 20 e 50 km de altitude, resultante da interação da radiação solar e o gás oxigênio. Depois de formado o  $O_3$ , verifica-se a presença de uma inversão térmica na estratosfera, onde a temperatura sobe até aproximadamente 270 K, claramente observada na Fig. 1 (SALBY, 1995; LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

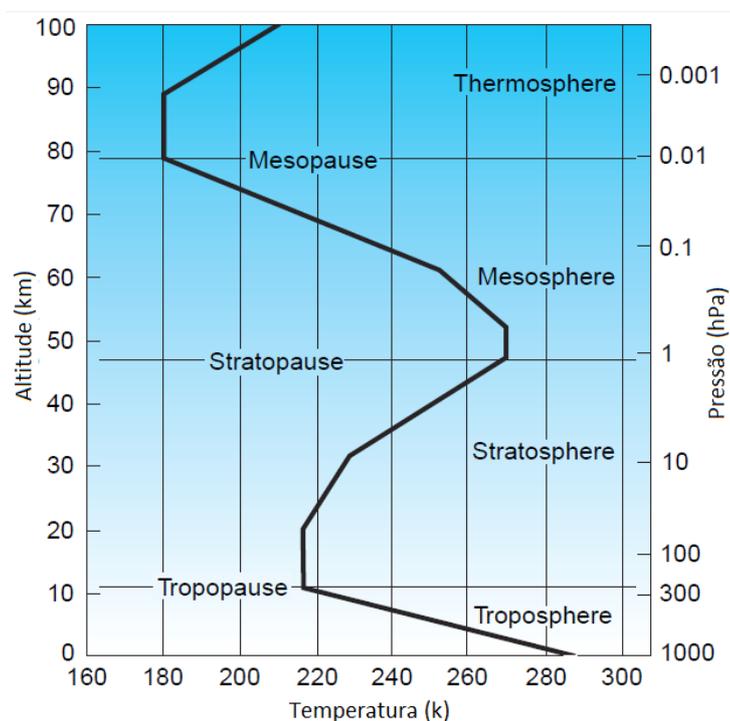


Figura 1 - Perfil vertical de temperatura, típica de médias latitudes. Fonte: Adaptado de: WALLACE; HOBBS, 2006, p.10

O  $O_3$  é formado a partir do processo de fotodissociação, cujas moléculas de oxigênio são dissociadas pela ação da radiação ultravioleta nos comprimentos de onda menores que  $0,24 \mu\text{m}$  (R1 – Tab. 1). Assim, é produzido o oxigênio atômico (O), que se recombina com  $O_2$ , gerando o ozônio a partir de uma reação termolecular (reação que envolve três moléculas). Dentro desse processo, verifica-se a existência de um terceiro corpo ou gás (denominado M), tal como  $N_2$  ou  $O_2$ , que serve para estabilizar a reação e levar o excesso de energia liberada pela combinação de O e  $O_2$  (R2 – Tab.1). O ozônio criado pela reação termolecular é dissociado pela radiação UV em outra reação (R5 – Tab. 1). A reação R5 ocorre nas bandas de absorção molecular do ozônio de Hartley (comprimentos de onda de  $0,20$  a  $0,31 \mu\text{m}$ ) e Huggins (comprimentos de onda de  $0,31$  a  $0,35 \mu\text{m}$ ). Outra reação envolvendo o oxigênio atômico e a molécula de ozônio, resulta na formação de dois oxigênios (R7 – Tab. 1) (CHAPMAN, 1930; SALBY, 1995; WALLACE; HOBBS, 2006). As reações de R1 a R7 (Tab. 1) representam os mecanismos de Chapman estendido (SOLOMON, 1999).

O ozônio pode ser também formado na troposfera, onde é considerado um poluente. Este ozônio é produzido tanto por fontes naturais, quanto por fontes antropogênicas, e esta última com maior parcela de produção. Sob o ambiente urbano, a produção de ozônio na superfície está condicionada a emissões de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) e compostos orgânicos voláteis ( $VOC_s$ ), que ocorrem na presença de luz solar. Suas principais fontes são oriundas das emissões de instalações industriais, exaustão de veículos motorizados, solventes químicos e vapor de gasolina (DERWENT et al., 2003). Contudo, a maior parcela de ozônio é produzida na estratosfera e este fato é consequência da forte incidência de radiação ultravioleta nessas altitudes.

A capacidade do  $O_3$  de absorver radiação UV, libera energia na forma de calor fazendo com que a temperatura aumente com a altura na estratosfera (SLUSSER et al., 1999). Por sua vez, a produção total de ozônio na estratosfera é contrabalançada por vários mecanismos de perda, sendo os principais a recombinação do ozônio com o oxigênio e ciclos catalíticos (SOLOMON et al., 1986).

Durante o dia existem pequenas variações no conteúdo da coluna total de  $O_3$ . Após o pôr do Sol, sua fonte (quebra da molécula de  $O_2$  – R1) e o seu dissipador (R3 e ciclos catalíticos - Tab. 1) são cessados e os átomos remanescentes de O (oxigênio) são convertidos em  $O_3$ . Quando o Sol nasce, algumas moléculas de ozônio são destruídas pelo dissipador, mas reformadas pelo mecanismo fonte, formando novamente  $O_3$  (WALLACE; HOBBS, 2006).

Tabela 1: Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de O<sub>3</sub> na estratosfera. Fonte: Adaptado de: SOLOMON, 1999

<i>Processo Químico</i>	<i>Número da reação</i>
<i>Chapman Chemistry<sup>a</sup></i>	
$O_2 + h\nu \rightarrow 2O$	R1
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	R2
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O(^1D)$	R3
$O(^1D) + M \rightarrow O + M$	R4
$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$	R5
$O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	R7
<i>Illustrative Odd Hydrogen Catalytic Cycles<sup>b</sup></i>	
$O + OH \rightarrow O_2 + H$	R8
$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$	R9
$O + HO_2 \rightarrow O_2 + OH$	R10
Net Cycle 1: $O + O + M \rightarrow O_2 + M$	R6
$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$	R11
$HO_2 + O_3 \rightarrow OH + 2O_2$	R12
Net Cycle 2: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
<i>Illustrative Odd Nitrogen Catalytic Cycle<sup>c</sup></i>	
$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$	R14
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$	R15
Net Cycle 3: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
<i>Illustrative Odd Chlorine Catalytic Cycles<sup>d</sup></i>	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$	R17
Net Cycle 4: $O + O_3 \rightarrow O_2$	R7
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$	R18
$Cl_2O_2 + h\nu \rightarrow Cl + ClO_2$	R19
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 5: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
<i>Illustrative Cl-Br Catalytic Cycle<sup>e</sup></i>	
$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$	R16
$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$	R21
$BrO + ClO \rightarrow Br + ClO_2$	R22
$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$	R20
Net Cycle 6: $2 O_3 \rightarrow 3O_2$	R13
<i>Some Important Coupling and Reservoir Reactions</i>	
$ClO + NO \rightarrow Cl + NO_2$	R23
$Cl + CH_4 \rightarrow HCl + CH_3$	R24
$HO_2 + ClO \rightarrow HOCl + O_2$	R25
$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M$	R26
$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$	R27
<i>Key Heterogeneous Reactions</i>	
$HCl + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2$	R28
$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3$	R29
$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl$	R30
$HCl + HOCl \rightarrow H_2O + Cl_2$	R31
$BrONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOBr$	R32
$HCl + BrONO_2 \rightarrow HNO_3 + BrCl$	R33
$HCl + HOBr \rightarrow H_2O + BrCl$	R34

<sup>a</sup>Chapman [1930].<sup>b</sup>Bates and Nicolet [1950]; Hampson [1964].<sup>c</sup>Crutzen [1970]; Johnston [1971].<sup>d</sup>Stolarski and Cicerone [1974]; Molina and Molina [1987].<sup>e</sup>McElroy et al. [1986]; Tung et al. [1986].

Dessa forma, sua razão de mistura zonal média aumenta com rapidez acima da tropopausa, atingindo valores máximos em torno de 16 ppmv (partes por milhão de volume), os quais variam de altitude conforme a latitude. Sendo que a “camada de ozônio” se encontra localizada aproximadamente em torno de 30 km de altitude. Por esse motivo, apenas 10% de

seu conteúdo está situado na troposfera, como mostra a Fig. 2 (SALBY, 1995; LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

Quanto a distribuição anual, o ozônio estratosférico apresenta máxima concentração sazonal sobre as latitudes médias. Nestas latitudes, esses máximos ocorrem durante a primavera, enquanto que a mínima concentração ocorre nos meses de outono. Nas regiões tropicais, a concentração de ozônio estratosférico praticamente não varia, devido à intensidade de radiação ser a mesma durante o ano todo (WAKAMATSU et al., 1989). A maior produção de ozônio na região tropical ocorre devido a contínua incidência de radiação UV, enquanto que a presença da circulação meridional de ozônio estratosférico explica a maior quantidade de conteúdo de ozônio em regiões de médias e altas latitudes. Essa circulação ocorre nas altitudes estratosféricas e é conhecida como circulação Brewer-Dobson, que transporta massas de ar estratosféricas em direção aos polos (BREWER, 1949; DOBSON, 1968). A circulação Brewer-Dobson consiste na convergência de massa na região tropical, gerando o transporte vertical de ar até atingir a estratosfera, por onde o ozônio é transportado até então divergir sobre as latitudes médias e altas (Fig. 2) (SOLOMON, 1999).

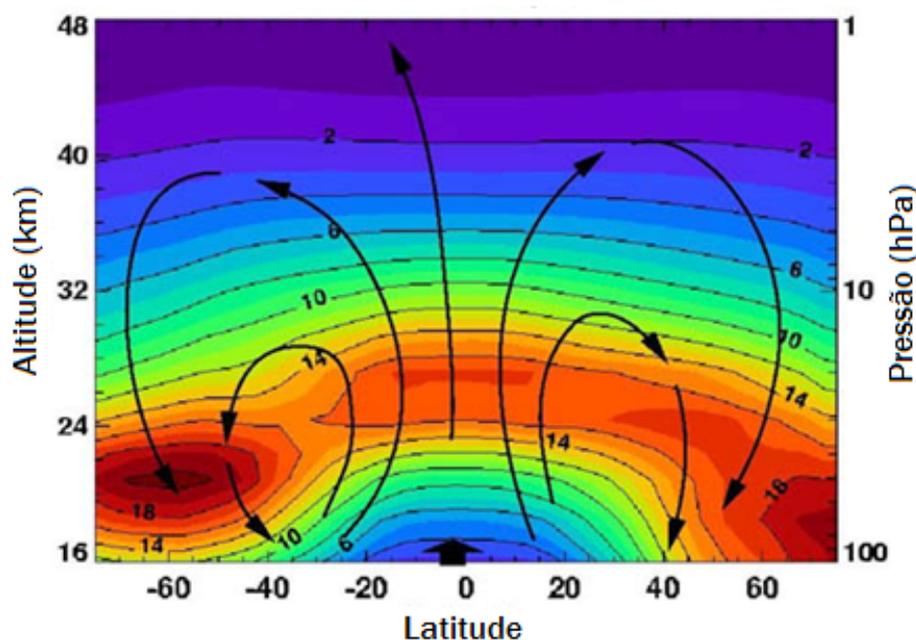


Figura 2 - Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio (UD) em função da latitude, altitude e níveis de pressão entre 1980 e 1989, pelos dados do satélite Nimbus-7. Fonte: Adaptado de: NASA, 2018.

Sazonalmente, a distribuição da concentração de ozônio é bem definida em ambos os hemisférios. Com a proximidade do inverno, a atmosfera polar tende a se resfriar ainda mais, aumentando a subsidência de ar, fazendo com que o gradiente latitudinal de pressão aumente entre o polo e as latitudes médias. Dessa forma, uma forte circulação de oeste é formada em torno do polo, denominada como vórtice polar (Fig. 3d), é nesse período que começa a aumentar a variação latitudinal do  $O_3$  e a destruição de ozônio nos polos (ATCKINSON et al., 1989; BOWMAN, 1990; WMO/ UNEP, 1992; WMO/ UNEP, 1994). Durante os meses da primavera Austral, verifica-se as maiores concentrações de ozônio estratosférico no Hemisfério Sul ao longo do cinturão de latitude de  $60^\circ S$ , cinturão de altas concentrações, que é a faixa de baixa pressão das frentes polares. Essa máxima concentração de ozônio ocorre devido ao vórtice polar formado sobre a Antártica, que barra o conteúdo de ozônio que vem de latitudes menores, trazido pela circulação Brewer-Dobson (Fig. 3a). Vale salientar que, seus valores em alguns anos podem atingir 500 UD (Unidades Dobson), contornando todo o hemisfério (DOBSON, 1968; ANDRÉ et al., 2003; WMO/UNEP, 2010).

No fim da primavera e início do verão, o vórtice polar sobre a Antártica enfraquece, tornando-se uma circulação inexpressiva (ATCKINSON et al., 1989; BOWMAN, 1990), assim, o conteúdo de ozônio sobre essa região começa a se recuperar, e conseqüentemente o cinturão de altas concentrações de ozônio tem seu conteúdo diminuído (Fig. 3b) (DOBSON, 1968). Durante todo o verão (Fig. 3b) e o outono (Fig. 3c), o vórtice desaparece e os conteúdos de  $O_3$ , sobre o globo, ficam mais homogêneos em relação à latitude, pois a circulação Brewer-Dobson atua livremente (WAKAMATSU et al., 1989).

Da mesma forma que o ozônio é formado na estratosfera, o mesmo também é destruído, a partir de processos fotoquímicos que envolvem os ciclos catalíticos de várias espécies de radicais livres, tais como óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), cloro ( $Cl$ ) e hidrogênio ( $H$ ) (Tab. 1). A perda e a produção de  $O_3$  formam a camada de ozônio, que tem valores máximos entre 24 a 44 km de altitude da atmosfera (Fig. 5) (SOLOMON, 1999; LIOU, 2002). A coluna de ozônio é expressa em Unidades Dobson (UD), que mede em milésimos de centímetros a profundidade que a coluna teria se estivesse à temperatura e pressão padrão (em mb ou hPa), sendo uma unidade Dobson igual a  $2,69 \times 10^{16}$  moléculas de ozônio por  $cm^2$  (SALBY, 1995).

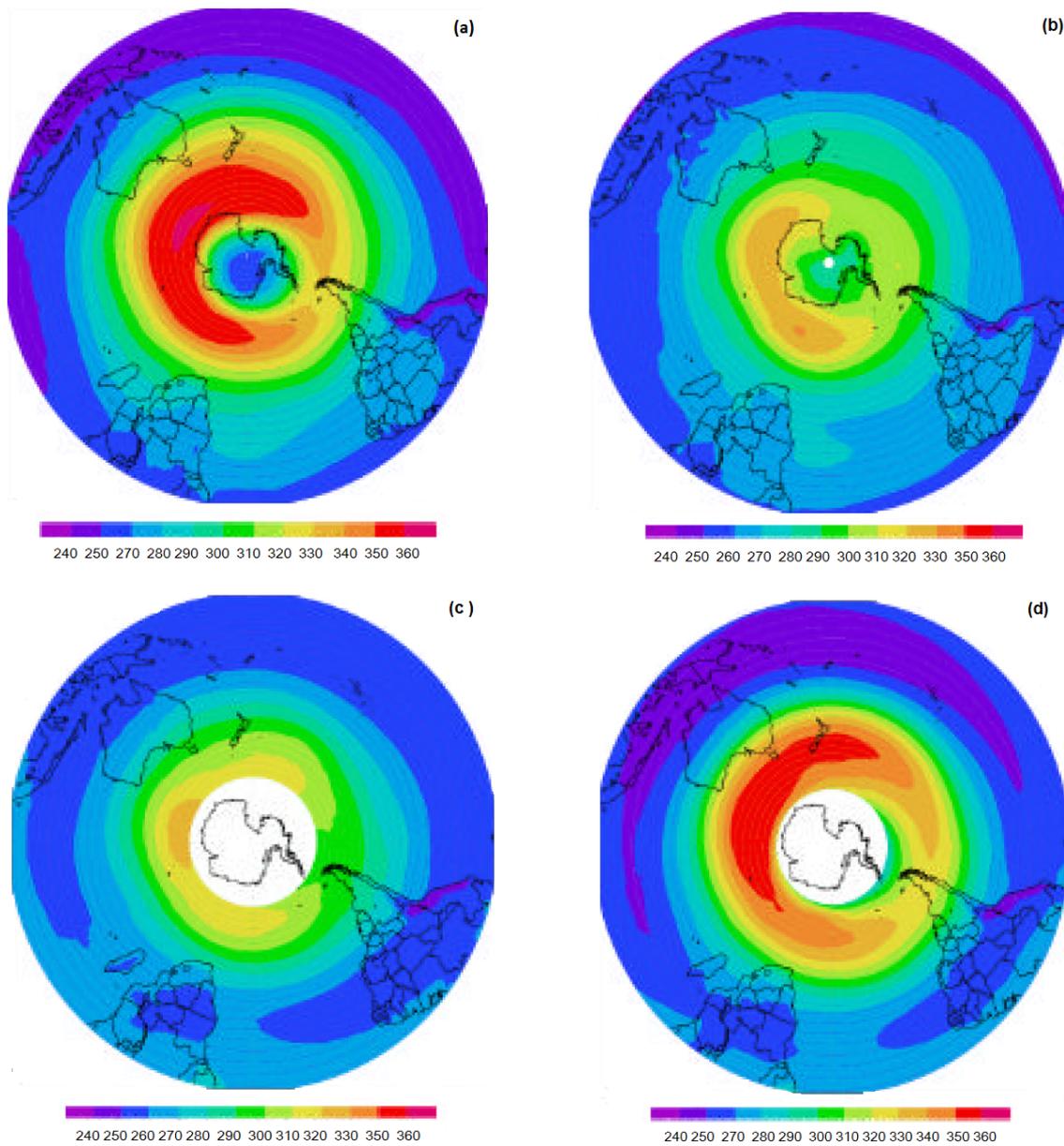


Figura 3 - Média sazonal do ozônio estratosférico (UD – unidades Dobson) obtidas pelas imagens do sensor TOMS a bordo do satélite Nimbus7, para o período de 1978 a 1993: a) primavera, b) verão, c) outono e d) inverno. Fonte: ANDRÉ et al., 2003.

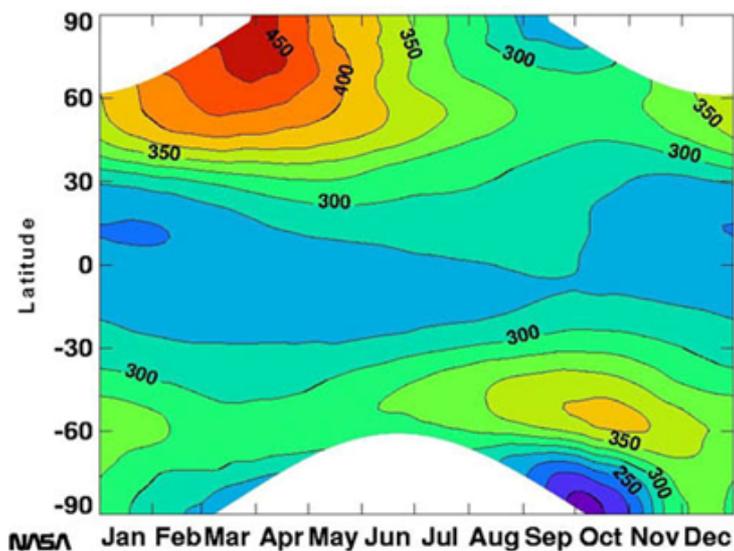


Figura 4 – Dados médios mensais de coluna total de ozônio em função da latitude para o período 1979 – 1992, obtidos através do sensor TOMS. Fonte: Adaptado de: NASA, 2018.

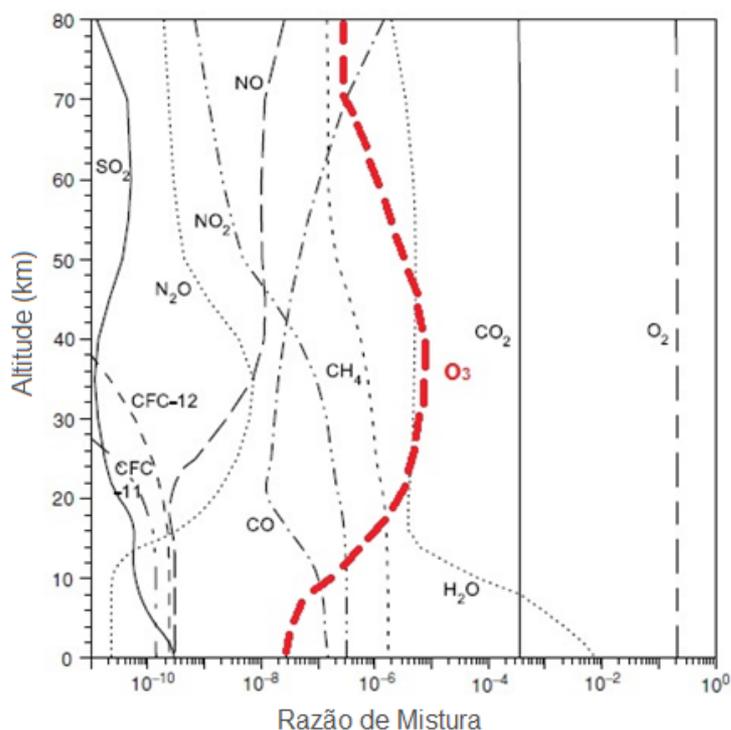


Figura 5 - Representação dos perfis verticais das razões de mistura de algumas espécies selecionadas para condições em latitudes médias. A linha vermelha representa o ozônio. Fonte: Adaptado de: LIOU, 2002, p.69.

## 2.2. O “Buraco de Ozônio” na Antártica

Na década de 1980, medidas do conteúdo de ozônio sobre a atmosfera da região Antártica mostraram uma redução desse conteúdo. A depleção estava ocorrendo desde o ano de 1977, o que atraiu as atenções para a química estratosférica e a suscetibilidade da estratosfera para tal modificação (FARMAN et al., 1985). A partir da década de 1990, surgiu uma grande preocupação na comunidade científica quanto à possibilidade de haver um aumento tanto da incidência de radiação ultravioleta (UV), quanto do "buraco de ozônio".

Dados coletados na estação britânica Halley Bay na Antártica (76°S, 26°W) mostraram que os valores totais da coluna de O<sub>3</sub> estavam diminuindo consideravelmente durante as primaveras Austrais, com médias mensais em outubro de 100 UD, quando o valor esperado deveria ser de 350 UD (FARMAN et al., 1985). Diversos fatores estão diretamente ligados a essa diminuição da camada de ozônio, como as reações químicas heterogêneas entre espécies derivadas de cloro a partir de CFCs de fontes antropogênicas (LIOU, 2002). Essa diminuição da coluna total de O<sub>3</sub> é também conhecida como “Buraco de ozônio Antártico” e consiste em uma redução da coluna total de ozônio para menos de 220 UD. Com essa descoberta, foi estabelecida uma área geográfica para o “buraco na camada de ozônio” delimitada por valores de O<sub>3</sub> menores que 220 UD, com maior evidência a 12 e 24 km de altitude (FARMAN et al., 1985).

Segundo Liou (2002), uma outra causa dessa diminuição da camada de ozônio pode estar associada ao ar frio que desce sobre a região polar, formando um vórtice com temperaturas muito baixas no seu interior, que se mantém durante todo o inverno devido à ausência de luz solar. O vórtice polar Antártico, forma um bloqueio entre a estratosfera da Antártica e das médias latitudes, fazendo com que a massa de ar dentro do vórtice fique isolada, impedindo o transporte de massa rica em ozônio vinda de latitudes menores (SCHOEBERL et al., 1992).

Com o fim da noite polar (início da Primavera no HS), esse vórtice tende a enfraquecer-se, quebrando-se a partir de agosto (ANDREWS et al., 1987). Kirchhoff et al. (1996), assinalaram que quando este vórtice polar quebra momentaneamente, esse ar pobre em O<sub>3</sub> pode mover-se para outras latitudes. O rompimento do vórtice é acompanhado por uma desaceleração ou até mesmo uma reversão dos ventos de oeste (ANDREWS et al, 1987; LIMPASUDAVAN et al, 2004) e o decaimento da temperatura dentro do vórtice ocorre apenas após a sua quebra (NEWMAN; RANDEL, 1988; TRENBERTH; OLSON, 1989; JONES;

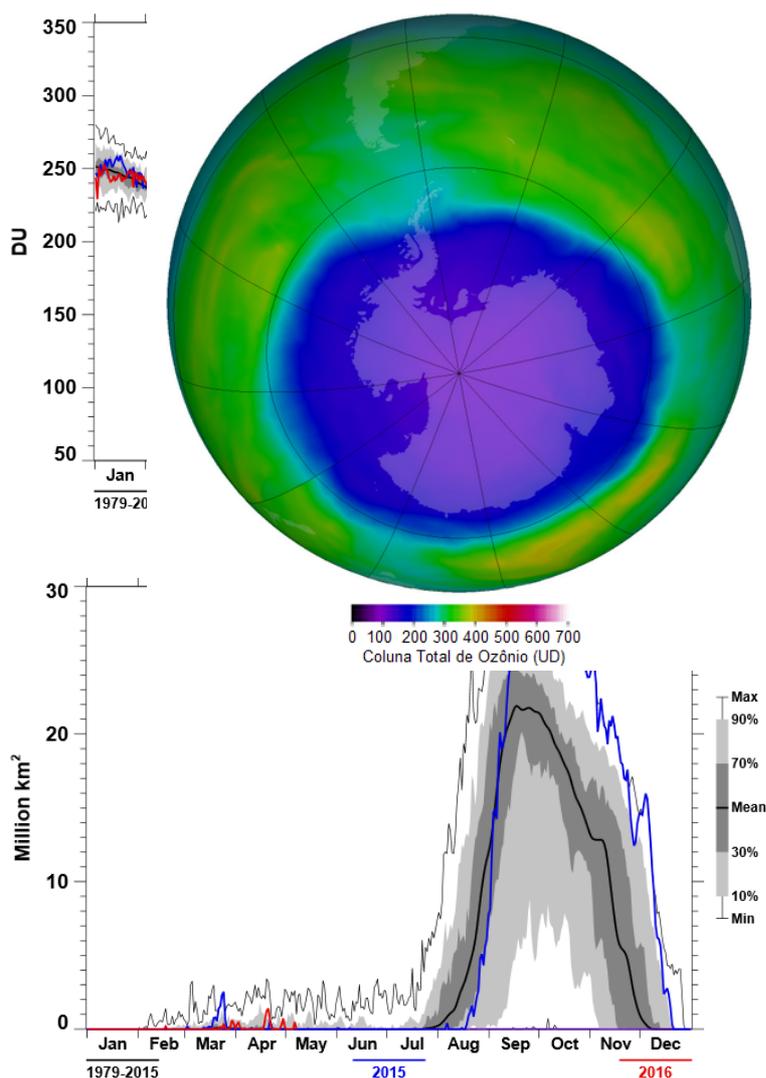
SHANKLIN, 1995; SOLOMON, 1999), sugerindo que essas mudanças são uma consequência ao buraco de ozônio Antártico (SOLOMON et al., 1999).

Dentro desses vórtices, observam-se nuvens estratosféricas polares - NEPs (SOLOMON, 1999) que se formam entre 15 e 20 km de altitude, com temperaturas da ordem de 183 K (em torno de  $-90^{\circ}\text{C}$ ) e colaboram para o seu fortalecimento, através do resfriamento. A formação dessas NEPs se deve, além das baixas temperaturas encontradas dentro do vórtice, a uma pequena quantidade de ácido nítrico e de vapor d'água no interior do vórtice Antártico.

Até o ano de 2010, o maior registro desse buraco foi na primavera de 2006, quando sua extensão atingiu 27,5 milhões de  $\text{km}^2$  (HANSEN, 2010). Segundo a NASA (National Aeronautics and Spatial Administration) e NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), a maior extensão da área do “buraco de ozônio Antártico” ocorreu em 2 de outubro de 2015, com uma extensão de 28,2 milhões de  $\text{km}^2$ . Em comparação com o período entre os anos de 1991 e 2014, o ano de 2015 apresentou um quarto a mais na área do “buraco de ozônio Antártico”, conforme o mostrado na Fig. 6.

Na Fig. 7 são apresentados os valores de ozônio entre os anos de 1979 e 2016. A média dos valores mínimos de ozônio entre estes anos vem sofrendo uma acentuada queda, começando no mês de agosto e continuando e se intensificando em setembro (Fig. 7a). Os mais baixos valores da CTO (Coluna Total de Ozônio) ficam em torno de 130 UD, apresentando uma maior área do buraco de ozônio nos mesmos meses (Setembro, Outubro, Novembro e início de Dezembro) (Fig. 7b), com uma média da área de aproximadamente 20 milhões de  $\text{km}^2$  (NASA, 2018). Dessa forma, fica notória uma possível ligação entre área do “buraco de ozônio” e a quantidade de ozônio existente, uma vez que, quanto maior a média da área do “buraco de ozônio” maior a queda nos valores de CTO.

Figura 6 - Coluna total de ozônio, em Unidades Dobson – UD, sobre a Antártica no dia 02 de outubro de 2015. Fonte: Adaptado: NASA, 2018.



(b)

Figura 7 – (a) Climatologia dos valores mínimos de coluna total de ozônio em UD. Linha preta: indica a média dos valores mínimos mensais de coluna total de ozônio. Sombras em cinza escura e clara: mostram os quartis. (b) Climatologia da área do buraco de ozônio. Linha preta indica as médias mensais do tamanho do buraco de ozônio na Antártica em milhões de  $\text{km}^2$ . Sombras em cinza escura e clara mostram os quartis em torno da média. Ambos para o período de 1979 a 2016. As linhas azul e vermelha mostram a variação desses valores para o ano de 2015 e 2016 respectivamente. Fonte: Adaptado de: NASA, 2018.

### 2.3. Efeitos Secundários do buraco de Ozônio Antártico

O buraco de ozônio da Antártica causa perturbações no conteúdo de  $\text{O}_3$  nas latitudes médias (ATCKINSON et. al., 1989), porém, desde o início da década de 1990, diversos artigos (ATCKINSON et. al., 1989, PRATHER; JAFFE, 1990; PRATHER et. al., 1990, THOMPSON, 1991; KANE, 1991; KIRCHHOFF et. al., 1996; KANG et. al., 2011;

FELDSTEIN, 2011) alertavam para a possibilidade desse “buraco” estar afetando as latitudes mais baixas. Cálculos feitos por Prather e Jaffe (1990) mostraram que as massas de ar vindas da Antártica, após se separarem do vórtice Antártico, podem permanecer isolados por um período de 07 até 20 dias, possuindo tempo suficiente para alcançar as médias e baixas latitudes. Portanto, a baixa concentração de  $O_3$  pode ser transportada através de massas de ar que se estendem ou desprendem do vórtice, formando-se sobre a Antártica durante a primavera austral (quando este vórtice está mais instável) e gerando consequências temporárias em latitudes mais baixas, que são chamados “efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico – ESBOA” (KIRCHHOFF, et al., 1996).

No Hemisfério Sul, principalmente para a região do sul da América do Sul, há trabalhos que mostram alguns eventos de decaimento da coluna total de  $O_3$ , identificados como efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico (KIRCHHOFF et al., 1996; BERTAGNOLLI et al., 2006; PEREIRA, 2009; HUPFER et al., 2011, KALL et al., 2011; PINHEIRO, et al., 2011; SCHMALFUSS et al., 2014). Essas análises foram realizadas para estudos locais, através de dados de superfície a partir do Espectrofotômetro Brewer, atualmente instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra - RS. Dados dos instrumentos TOMS e OMI foram utilizados apenas para preenchimento de descontinuidades nos dados do Brewer. O instrumento Brewer realiza medidas da radiação ultravioleta no espectro solar, examinando a absorção de diferentes comprimentos de onda da radiação UV-B, calculando assim, as colunas totais de  $O_3$ ,  $SO_2$  e  $NO_2$ . Dentre esses trabalho vale destacar o trabalho de Pinheiro et al., (2011) no qual os autores mostraram através dos dados do sensor OMI que a trajetória da massa de ar e o aumento da vorticidade potencial absoluta (VPA) indicaram a origem polar do buraco de ozônio.

Kirchhoff et al., (1996), em outubro de 1993, através dos dados de dois espectrofotômetros Brewer instalados em Santa Maria-RS (29,4°S; 53,5°W) observaram que, houve um decaimento na CTO de cerca de 60 UD em um período de 4 dias. Esta seria uma queda de grande significância, pois nesse período o comportamento normal do  $O_3$  deveria atingir seus valores máximos anuais em médias latitudes para o Hemisfério Sul (aproximadamente 290 UD). Os dois espectrofotômetros Brewer obtiveram resultados muito semelhantes e quando comparados aos mapas de dados de coluna total de ozônio do sensor TOMS da NASA mostraram que essa queda estava relacionada com o buraco de ozônio Antártico. Além da constatação dessa queda, pelos espectrofotômetros, Kirchhoff et al., (1996) ainda obtiveram a leitura vertical do que ocorria nos dias de queda brusca da CTO (19

e 28 de outubro de 1993). Eles notaram a escassez de  $O_3$  na estratosfera, sendo esta a principal característica para se poder constatar a ocorrência de ESBOA.

Bertagnolli et al., (2006) notaram que para o estudo da variabilidade temporal do ozônio e de fenômenos de pequena escala temporal, como os ESBOA, a análise de ondeletas mostrara-se eficiente. Nesse estudo os autores identificaram que no ano de 2000, sobre o OES, foi observada a influência de massas de ar com depleção de ozônio, com uma escala temporal de 2 e 3,5 dias, entre a chegada da massa de ar e a recuperação da camada sobre a região afetada, nos meses de primavera.

Salgado et al., (2010) fizeram um estudo sobre uma das regiões habitadas mais próximas ao buraco de ozônio da Antártica, a cidade de Punta Arenas no Chile. A partir dos dados do Espectrofotômetro Brewer, instalado na Universidade de Magallanes (UMAG), foram analisados os dados para o período que incluía os anos de 1992, 1993 e 1994 e comparados com a climatologia de 15 anos obtida para Punta Arenas. Essa climatologia foi construída através de dados do instrumento TOMS da NASA. Salgado et al., (2010) comprovaram que havia um grande aumento de radiação UV-B na superfície, decorrente da grande influência que o buraco de ozônio na Antártica exerceu sobre a cidade, sendo o valor da maior queda de coluna total de  $O_3$  de 145,8 UD, enquanto que a média para este mês é de aproximadamente 359 UD (diferença de 213,2UD, ou seja, aproximadamente 60% de queda nos valores de  $O_3$ , para essa cidade).

#### **2.4. Análise da Vorticidade Potencial**

A origem das massas de ar pobres em  $O_3$ , vindas da região Antártica torna-se mais evidente ao analisar suas trajetórias através da análise da vorticidade potencial (VP) em superfícies isentrópicas (NORTON, 1994). Estas superfícies apresentam uma configuração inclinada meridionalmente, que fica mais alta conforme a latitude aumenta. Com a conservação da temperatura potencial, se os processos forem adiabáticos, não há troca de massa e apenas o vento consegue atravessá-las (HOSKINS et al., 1985). A temperatura potencial pode ser utilizada como coordenada vertical, assim quando as superfícies isentrópicas estiverem mais próximas, o gradiente de temperatura será maior (NORTON, 1994). Desta forma, o transporte horizontal de conteúdo de ozônio pode ser associado à variação da VP, pois ao analisar temporalmente a evolução do campo de VP e um aumento for observado, pode constatar-se que a origem dessa massa de ar é polar (SEMANE et al., 2006;

PINHEIRO et al., 2011; BENCHERIFE et al., 2011; PERES, 2013). Sendo assim, a VP se mostra um bom indicador da dinâmica do O<sub>3</sub> (DANIELSEN, 1968; MCQUEEM, 1993; NORTON, 1994; NARAYANA RAO et. al., 2003), principalmente durante o inverno e primavera (DANIELSEN, 1968; LAMARQUE; HESS, 1994). Pois uma região de grande gradiente de VP sugere a borda do vórtice e conseqüentemente, o transporte horizontal de massa, que está associado à sua evolução temporal (SEMANE et al., 2006; PINHEIRO et al., 2011; BENCHERIFE et al., 2011; PERES, 2013).

As ondas de Rossby se propagam pelos ventos de oeste e quando adquirem grande amplitude pode haver a “quebra da onda” (MCINTYRE; PALMER, 1983). Essa quebra foi observada pelo campo de VP em superfícies isentrópicas (KILADIS; WEICKMANN, 1992; TOMAS; WEBSTER, 1994; NUMAGUTI, 1995), sendo melhor visualizado em 350 K (WAUGH; POLVANI, 2000). Como o campo de VP pode fornecer informações sobre a dinâmica desses vórtices, a propagação das ondas de Rossby pode mostrar quando as deformações são irreversíveis. Sendo a borda do vórtice mais instável, as massas que se depreendem e que se distanciam da borda, possivelmente devido à quebra da onda de Rossby tendem a se misturar com facilidade em latitudes médias (MCINTYRE; PALMER, 1983).

Segundo Reed (1955), envelopamento da tropopausa (também conhecido por eventos de intrusão) é quando ocorre a intrusão de ar estratosférico para níveis médios e baixos da troposfera, através de uma quebra na tropopausa. Alguns estudos mostram que, a passagem de sistemas frontais (sistemas meteorológicos), associados à ação da corrente de Jato em Altos Níveis, faz com que a tropopausa sofra esse envelopamento e dessa forma, logo após a passagem da frente fria, observa-se um evento de intrusão (KUNZ; SPETH, 1997; FONTINELE, 2012). Ao ocorrer uma quebra, podem ocorrer eventos de intrusão (REED, 1955; BARAY et. al., 2000) e segundo um estudo analisando o campo de VP em 330 K para o período de inverno e início da primavera no HN, as quebras afetam o equilíbrio da CTO, pois auxiliam no transporte latitudinal desse fluido, através da ruptura da onda de Rossby (POSTEL; HITCHMAN, 1999). A existência dessa estreita relação entre os campos de VP e CTO sugere que a variabilidade do ozônio ocorra com grande contribuição dinâmica (REED, 1955; HOOD et al., 1999).

A frequência, estrutura e tipo de evento de quebra da onda de Rossby podem ser percebidos pelo campo de vento zonal na estratosfera inferior e troposfera superior (THORNCROFT et al., 1993; NAKAMURA, 1994; PETERS; WAUGH, 1996; HOOD et al., 1999). Um mecanismo fortemente associado aos eventos de intrusão é o Jato de Altos Níveis,

que auxilia no transporte de massa (BUKIN et al., 2011; MANNEY et al., 2011; TRICKL et al., 2011), através da quebra da tropopausa. Anomalias positivas nos valores de ozônio na região da alta troposfera estão relacionados a quebra da tropopausa, que ocorre com maior frequência nas proximidades do JST (BARAY et al., 2000; TRAUB; LELIEVELD, 2003; TANG; PRATHER, 2010, PERES, 2013).

Sobre a região sul da AS, como relatado anteriormente, há diversas evidências da queda da CTO, possivelmente devido as passagens de sistemas frontais e sistemas convectivos sobre a região. O centro do Uruguai e o golfo de San Matias no litoral Argentino são regiões com forte tendência ciclogênica, que tendem a aumentar durante a fase negativa do ENOS (GAN; RAO, 1991; CAVALCANTI et. al., 2009, MENDES et al, 2010). Ao analisar a influência do fenômeno El Niño sobre a variabilidade do ozônio estratosférico e troposférico, Vougarakis, et al., (2011) constataram que durante um forte evento de El Niño no ano de 1998 (considerado de forte intensidade) a região extratropical sofreu um aumento de eventos de intrusão. Em contrapartida, quando ocorrem eventos de La Niña o efeito seria contrário, diminuindo os eventos de intrusão e por associação as quebras na tropopausa (ZENG; PYLE, 2005). Os autores identificaram um "lag" temporal de cerca de 6 meses, sendo que primeiro ocorre o ápice do El Niño e depois os mínimos valores de ozônio estratosférico (ZEREFOS, et al., 1992; BRONNIMANN et al., 2004; ZENG; PYLE, 2005). Sugerindo que esses mínimos são decorrentes da quebra da tropopausa, pois o El Niño pode estar causando anomalias no processo de transporte de massa de ar, impulsionando o fluxo na tropopausa (VOUGARAKIS, et al., 2011).

## **2.5. Padrão de Vírgula associada ao Ozônio Estratosférico**

Atkinson et al., (1989) identificaram uma grande diminuição no ozônio sobre a região sul da Austrália, tão significativa que afetava a média mensal da coluna total de ozônio. Como a diminuição do ozônio ocorreu apenas alguns dias após uma ruptura no vórtice da Antártica, o autor atribuiu essa diminuição ao prolongamento do "buraco de ozônio" sobre a Austrália, esse prolongamento apresentava um formato de vírgula. Esse formato de vírgula consiste em um alongamento do vórtice Ártico que se estende até as latitudes médias, curvando-se de leste para oeste (ANDREWS et al., 1987; WAUGH; POLVANI, 2010).

Waugh e Polvani (2010), ainda identificaram que a estrutura dinâmica desses "vórtices polares" desempenha um papel dominante na circulação estratosférica. Estes ocorrem nos meses de inverno e principalmente nos meses de primavera. São fundamentais para

determinar a distribuição dos gases traços, em particular, o ozônio, no acoplamento entre a estratosfera e a troposfera. Segundo Waugh e Polvani (2010), esse processo de "vírgula" é caracterizado por ondas estratosféricas que são deformadas (Fig. 8) e apresentam números de onda zonal entre 1 e 3. Já na troposfera, essas ondas variam de 5 a 7. Portanto, essas ondas são de baixa frequência na estratosfera e alta frequência na troposfera, ou seja, o vórtice estratosférico possui uma escala espacial muito maior do que a nível troposférico (ANDREWS et al., 1987).

Uma comparação entre os vórtices de ambos os hemisférios, através de mapas da média climatológica de VP, em superfícies isentrópicas de 850 K (~10 hPa), mostrou que o vórtice Antártico aparece maior e possui gradientes de VP mais intensos que o vórtice sobre o Ártico, assim como, uma maior simetria e centralização (NEWMAN; RANDEL, 1998; WAUGH et al., 1999).

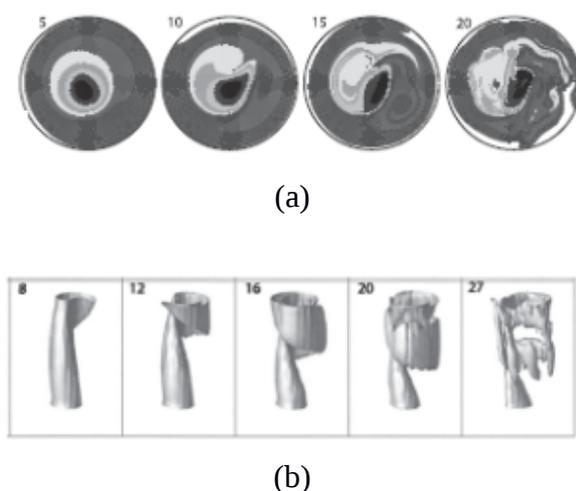


Figura 8 – Formação da vírgula (a), espacialização (b) e verticalização. Fonte: Adaptado de: WAUGH; POLVANI(2010).

## 2.6. Sistemas troposféricos e suas influências sobre o ozônio estratosférico

Após a passagem de uma frente fria pelo sul do Brasil houve uma queda do conteúdo de ozônio, relatada como ESBOA, em outubro de 2010 por Peres, (2013). Segundo o autor, a passagem da região pós-frontal e uma intensificação da corrente do jato subtropical causaram o envelopamento da tropopausa, carregando ar pobre em  $O_3$  vindo da estratosfera polar para dentro da troposfera sobre a região sul do Brasil. Em contraponto, Iwabe, (2008) sugere que os ciclones estratropicais formados na costa leste do sul do Brasil podem ser intensificados

por eventos de intrusão. Durante os eventos de intrusão, ocorre anomalia de vorticidade potencial em altos níveis (região da tropopausa) e se há baroclínia em baixos níveis, uma coluna de vorticidade ciclônica se estabelece por toda a troposfera, intensificando a atividade ciclônica. Logo após a passagem do ciclone, um anticiclone de forte intensidade se estabelece sobre a região, que é intensificada justamente por essa passagem de ar estratosférico para troposfera (ar rico em ozônio), que transporta ar bastante seco para níveis baixos.

Em uma análise sobre o conteúdo de ozônio na região polar do Hemisfério Norte, Koch et al., (2004) constataram que quanto maior o tempo que o vórtice estiver estável (fechado) maior a destruição da massa de ozônio. Nesse trabalho o autor observou que as massas de ar que saem do vórtice, a partir do final de janeiro, apresentam uma queda média de 8% em relação à média climatológica, porém dentro do vórtice a queda de ozônio chega a 28% até o final de fevereiro. Cerca de um quarto do ar do vórtice (HN) migra para as latitudes médias, interferindo significativamente no conteúdo de ozônio destas (KOCH et. al. 2004). A Fig. 9 para fevereiro do ano de 2000, mostra o vórtice Ártico se dividindo, fato que mostra a real interferência do vórtice sobre as latitudes médias. A borda do vórtice e da massa desprendida são delimitadas pela cor amarela (62 UVP – unidades de vorticidade potencial) e as estrelas em roxo mostram por onde a massa de baixo conteúdo de ozônio está deixando o vórtice (KOCH et al., 2004).

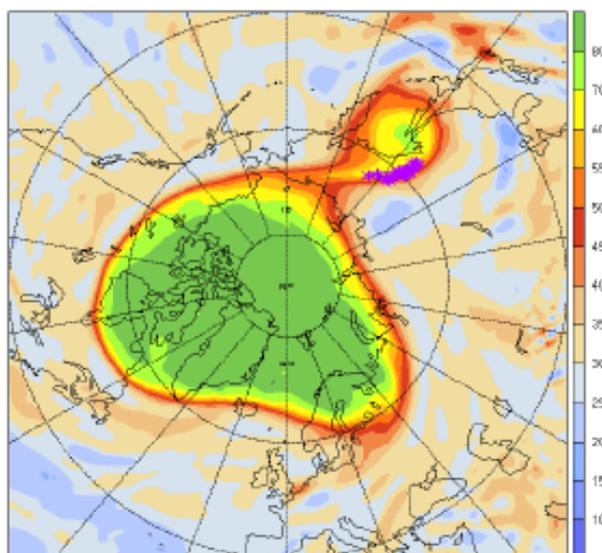


Figura 9 – Vorticidade potencial sobre o vórtice Ártico em 520 K para o dia 19 de fevereiro de 2000 as 0000 UTC. Fonte: Adaptado de Koch et al., 2004.

Alguns autores alertam para as consequências do declínio do ozônio na mudança climática (KANG et al., 2011; FELDSTEIN, 2011), como uma possível mudança no regime

hídrico das regiões subtropicais, durante o verão austral (KANG et al., 2011). Na AS há uma diminuição brusca do ozônio estratosférico em torno de 20°S e um aumento em torno de 30°S (SON et al., 2009; KANG et al., 2011). Essa mudança pode ser causada pelo deslocamento para sul do Jato Subtropical (JST) (FELDSTEIN, 2011; KANG et al., 2011), que é associado a uma expansão do polo da célula de Hadley. Pois o deslocamento de JAN para sul gera divergência em altos níveis levando a movimento ascendente anômalo nos subtrópicos (KANG et al., 2011).

### CAPÍTULO 3

Este capítulo refere-se ao artigo intitulado como “**Análise de eventos de vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério Sul e interação com a troposfera pelos dados de Reanálise do ERA Interim**”, aceito pelo **Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Anuário IGEO**. Este anuário está classificado pelos indicadores da **CAPES Qualis B1** na área de **GEOCIÊNCIAS** e fator de impacto **0.395**.

#### **Análise de eventos de vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério Sul e interação com a troposfera pelos dados de Reanálise do ERA Interim**

Analysis of Ozone Hole Comma Events in the South Hemisphere and interaction with troposphere by the ERA Interim Reanalysis data

Laís S. M. Schmalfluss<sup>1</sup>; David Mendes<sup>1</sup> & Weber Gonçalves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Avenida Senador Salgado Filho, 3000, Candelária, 59.078-970 Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

E-mails: [laisschmalfluss@hotmail.com](mailto:laisschmalfluss@hotmail.com); david.mendes22@gmail.com;  
weber.golcalves@ccet.ufrn

## RESUMO

A formação do ozônio ( $O_3$ ) ocorre na baixa estratosfera, camada essa acima da troposfera, o mesmo possui uma grande concentração de energia, o que interfere no perfil de temperatura em praticamente toda estratosfera. A partir da década de 80, foram identificados valores muito baixos de ozônio estratosférico sobre o Continente Antártico, principalmente nos meses de setembro e outubro. Essa diminuição foi denominada de "buraco de ozônio Antártico", que estava diretamente ligado a ação dos cloro-fluor-carbonetos (CFCs), que quebram as ligações de ozônio. Desta forma, este trabalho tem como finalidade estudar a presença desta anomalia na concentração de ozônio estratosférico, quando o "buraco" se estende até a América do Sul (AS) e possui um formato de "vírgula", bem como sua implicação nas condições troposféricas. Utilizamos 38 anos de dados entre os meses de agosto e novembro, onde identificamos 122 eventos de baixo ozônio sobre o sul da América do Sul, sendo que, tais eventos apresentavam um formato de "vírgula" sobre a AS. A temperatura em 100 hPa (ainda dentro da troposfera) mostrou uma diminuição durante os eventos de "vírgula", assim como os campos de vento zonal em 100 hPa. Observou-se através do vento zonal em 200 hPa que o Jato Subtropical sofre um enfraquecimento durante os eventos, que refletem em maiores amplitudes das ondas de Rossby. A vorticidade potencial apresenta um dipolo sobre o Atlântico, na região das quebras de onda de Rossby, levando a concluir que os eventos de vírgula tem relação direta com as trocas estratosfera-troposfera, pois ocorre a ruptura da tropopausa.

**Palavras-chave:** Buraco de Ozônio; Evento Vírgula; Quebra da onda de Rossby

**ABSTRACT**

The formation of ozone ( $O_3$ ) occurs in the lower stratosphere, in the layer above the troposphere, so does a large concentration of energy, which interferes in the temperature profile in practically all the stratosphere. From the 80's very low values of stratospheric ozone on the Antarctic Continent, especially in the months of September and October. This reduction was denominated the "Antarctic ozone hole", which was directly linked to chlorine-fluorocarbons (CFCs), which break down ozone bonds. Thus, this work aims to study the presence of this anomaly in the concentration of stratospheric ozone, when the "hole" extends to South America (SA) and has a "comma" format, as well as its implication in the conditions troposphere. We used 38 years of data between August and November, where we identified 122 low impact events in southern South America, and these events presented a "comma" format about AS. The temperature at 100 hPa (still within the troposphere) had a decrease during the "comma" events, like the zonal wind fields at 100 hPa. To observe the influence of wind in 200 hPa that the Subtropical Jet undergoes a weakening during the events, that reflects in greater amplitudes of Rossby waves. A potential vorticity presents a dipole over the Atlantic in the Rossby wave region, leading to comma events having direct access as stratosphere-troposphere changes, as a tropopause rupture occurs.

**Keywords:** Ozone hole; Virgule event; Rossby Wave break

## 1. Introdução

Os processos de formação do ozônio ( $O_3$ ) ocorrem em torno de 30 km de altitude e por serem altamente energéticos (SLUSSER et al., 1999) causam a inversão no perfil de temperatura da estratosfera (SALBY, 1995; SOLOMON, 1999). Essa produção de ozônio estratosférico é contrabalançada por vários mecanismos de perda, como a recombinação do ozônio com o oxigênio (SOLOMON, 1986) e processos de oxidação ao adentrar na troposfera (SALBY, 1995).

Durante o inverno há um resfriamento da estratosfera, o que aumenta a subsidência e o gradiente latitudinal de pressão (ANDREWS et al, 1987). Forma-se uma forte circulação de oeste em torno dos polos, denominada vórtice polar, que aumenta a variação latitudinal do  $O_3$  (WMO/UNEP, 1994). Na década de 1980, o British Antarctic Survey (BAS) identificou baixos valores de ozônio na estratosfera sobre a Antártica, presente nos meses de setembro e outubro (primavera austral) (CHUBACHI, 1984). Essa depleção, denominada “buraco de ozônio da Antártica” foi atribuída à ação dos cloro-fluor-carbonetos (CFCs), que quebram facilmente as ligações do  $O_3$  (MOLINA; ROWLAND, 1974). A partir desse fato, foi criado o protocolo de Montreal (1987), com a finalidade de proteger a camada de ozônio, através da redução do consumo dos CFCs.

No hemisfério sul (HS), o ozônio estratosférico apresenta máxima concentração nos meses de outubro e novembro (primavera austral), podendo também ter casos identificados nos meses de setembro e dezembro (PINHEIRO et al., 2011). Nas regiões tropicais, a concentração praticamente não varia, devido à incidência constante de radiação Solar (WAKAMATSU et al., 1989). Apesar de a região tropical ser a maior produtora de ozônio estratosférico, a circulação Brewer-Dobson transporta ozônio para as médias e altas latitudes (BREWER, 1949; DOBSON, 1968), formando um cinturão de altas concentrações sobre as latitudes médias (DOBSON, 1968). Na região Antártica, o vórtice forma um bloqueio entre o polo e as médias latitudes, impedindo o transporte de ozônio para dentro desse vórtice (SCHOEBERL et al., 1992). Com o fim da noite polar (Final do Inverno Austral), o vórtice enfraquece e pode romper-se (ANDREWS et al., 1987), sendo acompanhado por um súbito aquecimento da estratosfera superior e uma desaceleração ou até mesmo uma reversão dos ventos de oeste (ANDREWS et al, 1987; LIMPASUDAVAN et. al, 2004). Assim como, há um decaimento da temperatura dentro do vórtice (NEWMAN; RANDEL, 1988), que ocorre apenas após da quebra do vórtice e não antes de sua formação (NEWMAN; RANDEL, 1988), sugerindo que essas mudanças são uma consequência ao buraco de ozônio Antártico (SOLOMON, 1999).

Todavia, alguns autores alertavam que o “buraco” estaria causando anomalias na coluna total de ozônio (CTO) sobre latitudes mais baixas, ou seja, próximas a região tropical (FELDSTEIN, 2011). Sobre a América do Sul (AS) há diversos relatos (Peres et al. 2014), sendo que Kirchhoff et al., (1996) denominaram de “efeito secundário” do buraco de ozônio, os quais são temporários e podem ter duração entre 03 e 04 dias (KIRCHHOFF et al., 1996). Esse “efeito secundário” do buraco de ozônio sobre áreas mais povoadas provocaram preocupação, pois quando o ozônio se torna mais rarefeito, há um aumento na incidência de radiação UV-B (SALBY, 1995). Uma redução de 1% na CTO gera um aumento de 1,2% na incidência de radiação UV-B (GUARNIERI et al., 2004). Esse tipo de radiação afeta a saúde humana e vegetal, e os principais organismos prejudicados são os unicelulares, pois uma pequena mudança na incidência de UV é suficiente para danificá-los.

Alguns autores alertam para as consequências do declínio do ozônio na mudança climática (KANG et al., 2011), como uma possível mudança no regime hídrico das regiões subtropicais, durante o verão austral (KANG et al, 2011). Na AS há uma diminuição acentuada do buraco de ozônio em torno de 20°S e um aumento em torno de 30°S (KANG et al., 2011). Essa mudança pode ser causada pelo deslocamento para sul do Jato Sub-tropical (KANG et al., 2011). Esse deslocamento do Jato Sub-tropical para sul, gera divergência em altos níveis levando a movimento ascendente anômalo nos subtrópicos (KANG et al., 2011).

Atkinson et al., (1989) identificou uma grande diminuição no ozônio sobre a região sul da Austrália, tão significativa que afetava a média mensal da coluna total de ozônio. Como a diminuição do ozônio ocorreu apenas alguns dias após uma ruptura no vórtice da Antártica, o autor atribuiu essa diminuição ao prolongamento do “buraco de ozônio” sobre a Austrália, esse prolongamento apresentava um formato de vírgula.

Um bom indicador da dinâmica do ozônio estratosférico é a vorticidade potencial (VP) (ATCKINSON et al., 1989; NARAYANA RAO et al., 2003), principalmente durante o inverno e primavera. Uma região de grande gradiente de VP, sugere a borda do vórtice e consequentemente transporte horizontal de massa é associado à sua evolução temporal (PERES et al., 2014). Como o campo de VP pode fornecer informações sobre a dinâmica desses vórtices, a propagação das ondas de Rossby pode mostrar quando as deformações são irreversíveis. Sendo a borda do vórtice mais estável, os filamentos que se distanciam da borda, possivelmente devido à quebra da onda tendem a se misturar com facilidade em latitudes médias (MCINTYRE; PALMER, 1983). As ondas de Rossby se propagam pelos ventos de oeste e quando adquirem grande amplitude pode haver a “quebra da onda” (MCINTYRE; PALMER,

1993). Com a quebra da onda de Rossby, podem ocorrer eventos de intrusão (EI), que carregam ar estratosférico para a troposfera, levando a CTO a um súbito aumento (BARAY et al., 2000).

Um estudo analisando o campo de VP em 350 K (em torno de 200 hPa na latitude de 30°N) para o período de inverno e início da primavera no Hemisfério Norte (HN), mostrou que as quebras afetam o equilíbrio da CTO, pois auxiliam no transporte latitudinal desse fluido, através da ruptura da onda de Rossby (POSTEL; HITCHMAN, 1999). A frequência, estrutura e tipo de evento de quebra da onda de Rossby pode ser percebida pelo campo do vento zonal na estratosfera inferior e troposfera superior (HOOD et al., 1999). Pois outro mecanismo associado aos eventos de intrusão é o Jato de Altos Níveis (JAN), que auxilia no transporte de massa (TRICKL et al., 2011), através da quebra da tropopausa. Anomalias positivas nos valores de ozônio na região da alta troposfera estão relacionados a quebra da tropopausa, que ocorre com maior frequência nas proximidades do Jato Subtropical (PERES et al., 2014).

Outra possível ligação entre a quebra da tropopausa e a circulação da célula de Hadley é mencionada por Baray et al., (2000). Analisando a média do vento zonal em 200hPa, o autor observou que uma forte convergência dos ventos nas proximidades do JAN na América do Sul, aproximadamente na mesma localização da descendência da célula de Hadley.

Neste artigo, faremos uma análise mais detalhada dos eventos de diminuição da coluna total de ozônio, mas apenas quando estes tiverem o formato de "vírgula" sobre a América do Sul e realizar análises sobre a dinâmica desses eventos e as condições troposféricas.

## **2. Dados e Métodos**

### **2.1. Dados**

Para este trabalho foram utilizados dados do ERA – INTERIM (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (DEE et al., 2011): Coluna total de ozônio (coluna integrada), temperatura no nível de 100 hPa e vento zonal em 100 e 200 hPa e ainda vorticidade potencial no nível isentrópico de 600 K e nos níveis padrões entre 1000 hPa e 10 hPa. Todos os dados são para o quadrimestre de agosto, setembro, outubro e novembro (ASON), entre os anos de 1979 até 2016. Esses meses representam o fim do inverno quando o “buraco de ozônio” está presente na atmosfera da Antártica e começa a ficar instável e a primavera, que é quando ocorrem as maiores instabilidades antes da dissipação do “buraco” (ANDREWS et al., 1987 ; SCHOEBERL et al., 1992; KIRCHHOFF et al., 1996). A resolução temporal de média diária e a resolução espacial de 1°x1° para todo o Hemisfério Sul com mapas de projeção polar. Apesar do

enfoque do trabalho ser sobre a América do Sul, é imprescindível observar a movimentação sobre todo o hemisfério, para se ter uma visão mais ampla da dinâmica.

## 2.2. Metodologia

Para encontrarmos o padrão associado a eventos de quebra da CTO, seguimos os seguintes passos:

1) Catalogamos, a partir dos dados de CTO, todos os dias em que o buraco de ozônio se prolongou sobre o sul da América do Sul, apresentando o formato de "vírgula". Denominando esses eventos como eventos de vírgula;

2) Utilizamos os campos médios para o período de agosto, setembro, outubro e novembro, de 1979 até 2016 na realização das análises, os quais foram elaborados para todas as variáveis da seguinte forma:

2.1) Média do quadriênio para todos os dias do período estudado (denominado: média total);

2.2) Média do quadriênio apenas dos dias catalogados com eventos de vírgula (denominado: média vírgula);

2.3) Diferença entre média vírgula e média total.

3) Para a evolução temporal dos eventos de vírgula, utilizamos os tempos -2, -1, 0, 1, dias, como forma de compreender os momentos anteriores a diminuição do ozônio sobre o continente, pois segundo Kirchhoff *et al.*, (1996) esses eventos duram em torno de 3 a 4 dias sobre um ponto. O tempo 0 é o dia em que o evento de vírgula foi registrado sobre a América do sul, representado pela média das vírgulas, explicada em 2.2. Essa evolução foi analisada apenas para a variável CTO.

4) Para as análises de CTO, temperatura em 100 hPa, vento em 100 hPa e 200 hPa e vorticidade potencial em 600 K, utilizamos o mapa projeção polar. Para a vorticidade potencial entre os níveis padrões de pressão de 1000 hPa e 10 hPa foi feito um corte vertical na latitude de 50°S entre as longitudes de 0 e 90°W, com a finalidade de analisar o que ocorre na estrutura vertical.

Desta forma, foram analisadas as condições da troposfera durante a presença de um evento "vírgula" sobre a América do Sul.

## 3. Resultados

Foram catalogados 122 eventos de vírgula através da análise dos campos de CTO para todo o período de dados utilizado neste trabalho. Os eventos estão distribuídos em maior parte

nos meses de setembro, outubro e novembro, que tiveram 34, 47 e 33, respectivamente (Figura 11). O mês de agosto foi o que apresentou a menor quantidade de eventos, tendo apenas 8, pois durante o inverno o “buraco” fica mais estável e dessa forma a ocorrência desse tipo de evento se torna mais difícil.

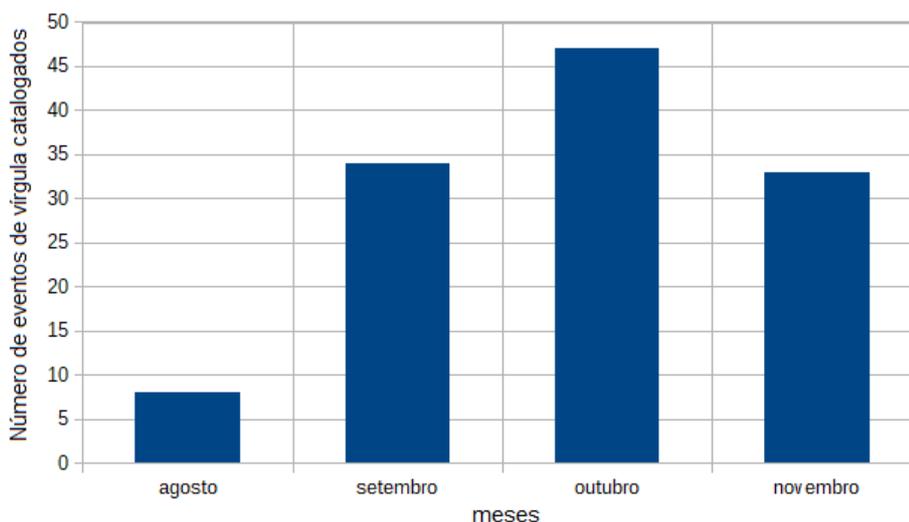


Figura 1 - Distribuição do número de dias com evento de vírgula nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, entre os anos de 1979 e 2016.

A média temporal do quadrimestre (agosto, setembro, outubro e novembro) para os dados de CTO é apresentada na Figura 2a. Identificamos um cinturão de altas concentrações de ozônio, que se encontra mais fortalecido sobre o lado oposto ao continente Sul Americano, localizado entre a Antártica e a Oceania. Isso sugere que os casos em que o buraco de ozônio da Antártica se prolonga sobre menores latitudes podem estar ocorrendo com maior frequência e/ou maior intensidade sobre a região da AS, fazendo com que os valores médios de CTO baixem sobre esta região.

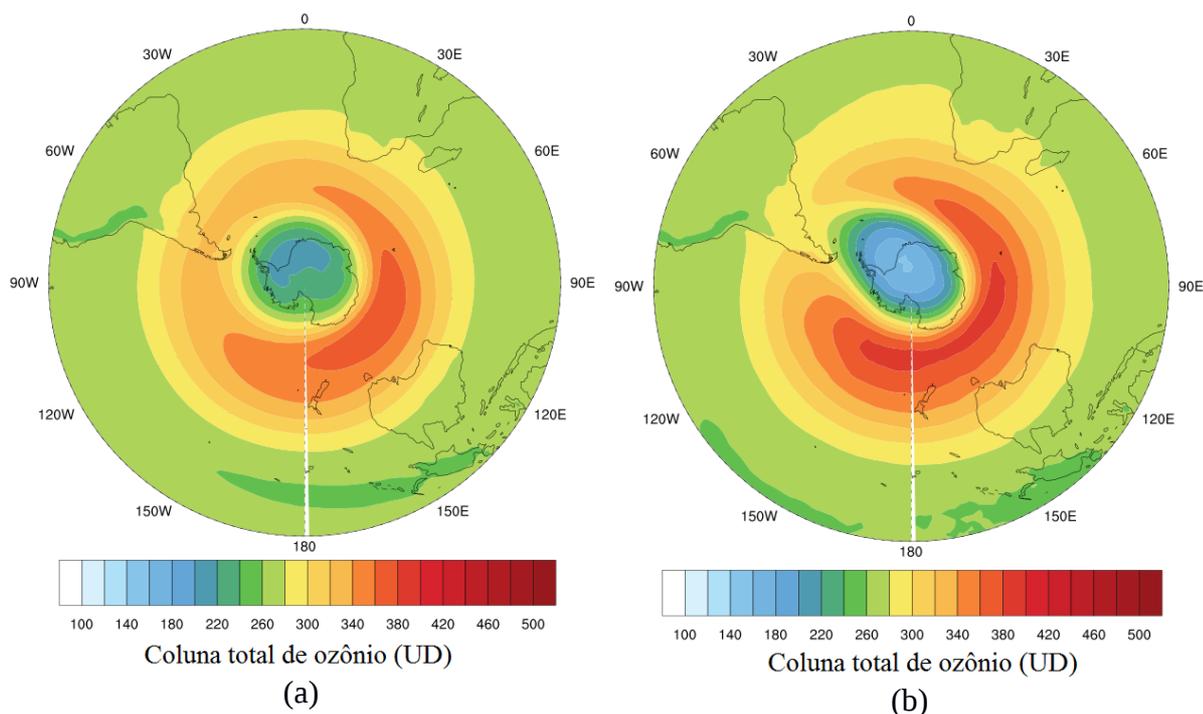
A partir dos 122 eventos de vírgula catalogados foi feita a média (Fig. 2b), que mostra claramente a extensão do buraco de ozônio sobre o continente Sul Americano. É mostrado também o cinturão das altas concentrações ao lado oposto desse continente, que tem uma configuração mais extensa longitudinalmente. O campo ainda mostra como esse prolongamento do buraco de ozônio baixa significativamente os valores de CTO sobre o Sul da AS.

O campo da diferença entre essas duas médias é apresentado na Figura 2e afim de uma melhor comparação. Esse campo apresenta dois núcleos negativos, sobre os continentes Sul Americano e Antártico e dois núcleos positivos, lado oriental e ocidental da Antártica.

Sobre a América do Sul, localiza-se o núcleo negativo mais intenso, apontando que sobre essa região, durante as vírgulas (Fig. 2c, d, e, f), CTO tinha valores mais distantes da média do que o núcleo sobre a Antártida. Assim, se estabelece que sobre a AS os eventos de vírgula têm decaimentos mais significativos. Contudo, durante os eventos de vírgulas a CTO também decai dentro do buraco de ozônio e desta forma, podemos atribuir essa diminuição a maior abrangência espacial que o buraco de ozônio tem durante os eventos de vírgula.

Ainda analisando o campo da diferença entre as médias, pode-se observar que, os núcleos positivos, ou seja, os valores de CTO acima da média (Fig. 2c, d, e, f) também apresentam-se distintos entre si. O núcleo mais forte, localizado no centro-sul do Pacífico, indica que durante os eventos de vírgula o cinturão de altas concentrações tinha valores de CTO muito maiores que a média, quando comparado ao núcleo positivo localizado no lado leste do continente antártico.

Na evolução temporal da diferença das médias (Fig. 2c, d, e, f) nota-se que os núcleos, tanto positivos quanto negativos movem-se de oeste para leste. Tais núcleos enfraquecem e equilibram-se no dia +1, indicando que a diferença entre as médias diminui logo após a passagem do evento de vírgula. Isso pode ocorrer devido ao prolongamento do buraco de ozônio para latitudes menores (evento de vírgula), deixando a atmosfera mais instável, o que possibilita a mistura da coluna total de ozônio.



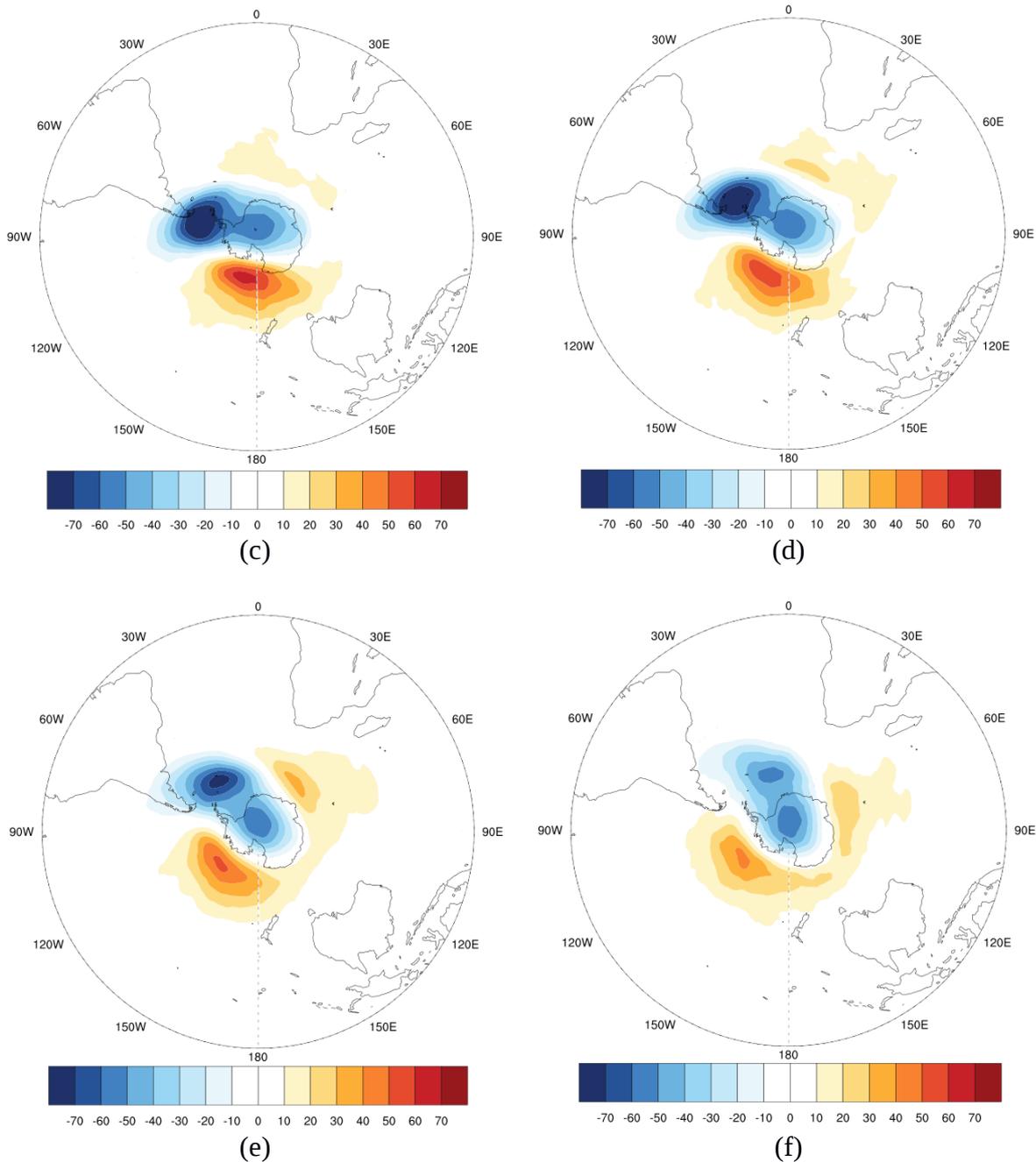


Figura 2 - (a) média do quadrimestre ASON, (b) média dos dias com eventos de vírgula. As próximas são a diferença entre as médias de (a) e (b), para os dias (c) -2 dias, (d) -1 dia, (e) 0 dia e (f) +1 dia.

Quando analisamos a temperatura e o vento zonal em 100 hPa, temos o intuito de identificar um possível resfriamento da baixa estratosfera conforme a quantidade de ozônio diminui, pois segundo Kang et al., (2011), o esgotamento do ozônio sobre a Antártica causa o resfriamento severo da estratosfera inferior (em torno de 100 hPa), logo abaixo da camada de ozônio.

O campo da diferença da temperatura em 100 hPa (Fig. 3a) entre os dias com evento de vírgula e a média do período sem a presença de vírgula mostra um cinturão mais quente ao redor da Antártica (em torno de 6°C mais quente), que acompanha o cinturão das altas concentrações de CTO da Figura 2a. Identifica-se também uma diminuição da temperatura em 100 hPa sobre o sul da América do Sul, nitidamente associado a presença da vírgula.

Dentro do vórtice, encontram-se as temperaturas mais baixas ( $\sim -5^{\circ}\text{C}$  – figura 3b e com média em torno de  $-78^{\circ}\text{C}$  figura 3a), assim como, os valores mais baixos de ozônio (Figura 2c, d, e, f), corroborando com o mencionado por Kang et al., (2011), onde o cinturão se fortalece e a vírgula adentra a AS, baixando os valores de temperatura e CTO.

A Figura 3d, mostra a diferença do vento zonal em 100 hPa idem a Figura 3b. Este campo mostra a intensa circulação de oeste que ocorre em torno do polo nesta época do ano, com aproximadamente 5m/s mais fortes que a média do quadrimestre (em torno de 35m/s e 45m/s Fig. 3c). Nos dias em que houve evento de vírgula o campo médio apresenta uma deformação dessa circulação de oeste, que sofre um prolongamento para menores latitudes em direção à AS. Tal deformação leva o campo a uma instabilidade que facilita a troca de massa entre as latitudes. A Figura 3b também mostra um grande núcleo positivo no Atlântico próximo a AS (vento zonal 5m/s a mais que a média do quadrimestre), representando um aumento dos ventos de oeste nos dias de vírgula (deformação da circulação de oeste em torno o polo). Nas proximidades da Península Antártica e no Pacífico a Sudoeste da AS podemos observar núcleos negativos (variação de  $\sim -4\text{m/s}$  e  $-7\text{m/s}$  em relação à média). Esta diminuição dos ventos de oeste nos remete a um enfraquecimento da circulação nessas regiões, ou até mesmo, uma inversão dos ventos.

Esses resultados aqui mostrados confirmam os resultados de Andrews et al., (1987) e Limpasudavan et al., (2004), em que na primavera austral o vórtice Antártico sofre rompimentos, o que causam um enfraquecimento ou até mesmo uma reversão do vento zonal e um súbito aquecimento da alta estratosfera, principalmente na borda oposta a presença do vórtice.

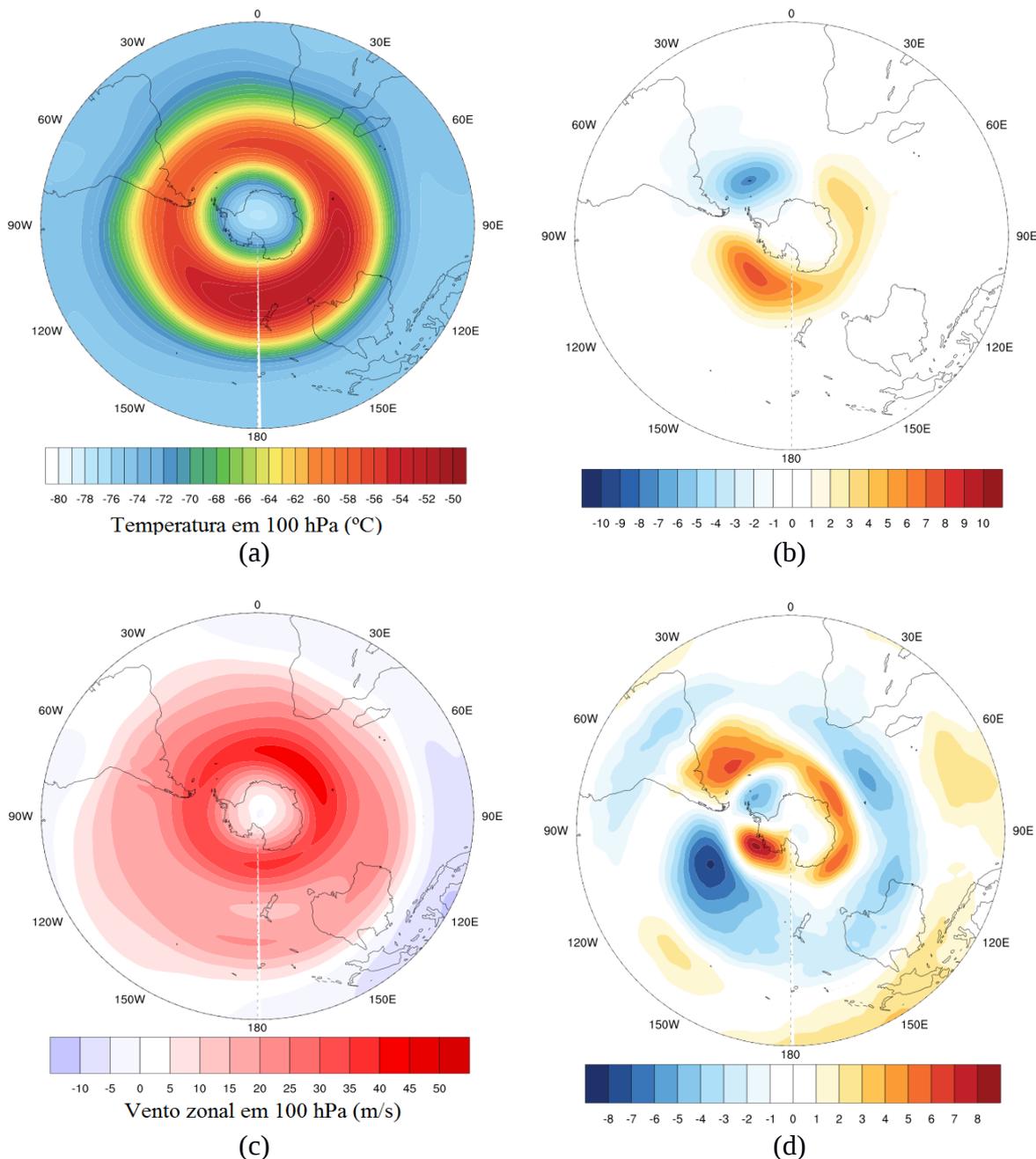
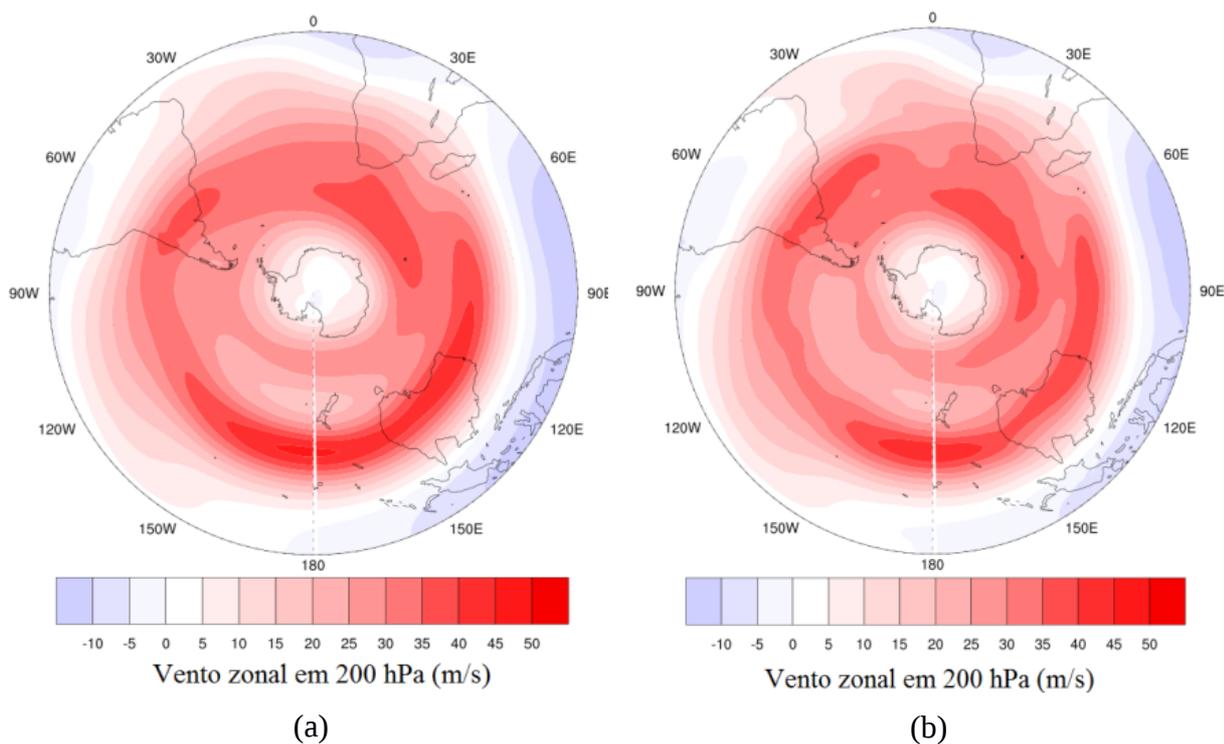


Figura 3 - (a) campo da média do quadrimestre ASON da temperatura em 100 hPa. (b) campo da diferença da temperatura em 100 hPa entre os dias com eventos de vírgulas e a média do quadrimestre. (c) Idem (a), mas para o vento zonal em 100 hPa. (d) Idem (b), mas para o vento zonal em 100 hPa.

O campo de vento zonal médio do quadriênio no nível de 200 hPa (Fig. 4) apresenta uma grande corrente de oeste no lado oposto ao continente Sul Americano. Os ventos são predominantes de oeste e valores entre 40m/s e 50m/s, onde os altos valores dos ventos de oeste (em torno de 35m/s) sobre a AS caracterizam a presença da corrente de jato subtropical (em torno de 30°S), que nessa época do ano se move para latitudes menores. Na diferença (Fig. 4c),

fica nítida a posição do Jato subtropical quando ocorre evento de vírgula, estendendo-se sobre o Atlântico, com sua localização ligeiramente mais a sul, em torno de 33°S.

Postel & Hitchman, (1999) afirmam que quando os ventos de oeste enfraquecem, há uma tendência das ondas de Rossby ganharem maior amplitude e quanto maior essa amplitude da onda, maior a chance de quebra da tropopausa. Assim, uma inversão nos ventos de oeste pode identificar uma possível zona de quebra (THORNCROFT et al., 1993, BARAY et al., 2000). Quando ocorre uma quebra, a média da CTO sofre uma reorganização, pois quando o ozônio da estratosfera penetra na troposfera ele começa a ser destruído por processos de oxidação (SALBY, 1995). Dessa forma, a diferença na extensão e posição do jato pode ser o diferencial para que os dias com evento de vírgula ocorram ou pode ser uma consequência, pois o enfraquecimento do jato observado durante os eventos de vírgula mostra o enfraquecimento dos ventos de oeste (KANG et al., 2011; FELDSTEIN, 2011).



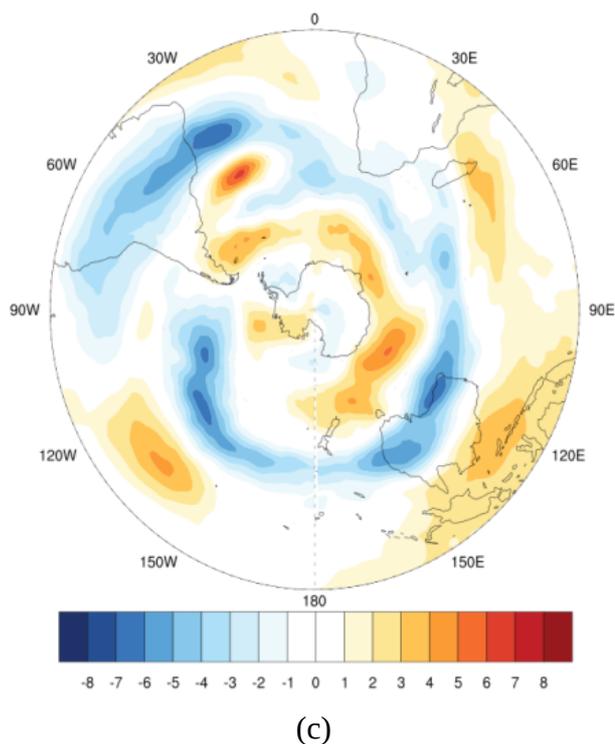


Figura 4 - (a) média do quadrimestre para o vento zonal em 200 hPa. (b) média dos dias com vírgula. (c) e a diferença entre os campos (b) e (a). Unidade m/s.

O campo de vorticidade potencial tem sido muito utilizado como traçador da dinâmica da coluna total de ozônio (DANIELSEN, 1968; HOSKINS et. al., 1985; NORTON, 1994; HOLTON et. al., 1995; PERES et al., 2014). Dessa maneira sua análise se torna de suma importância para a verificação dos padrões que ocorrem durante esses eventos de vírgula sobre a América do Sul.

A vorticidade potencial aumenta conforme a latitude aumenta, tendo valores que variam de  $-1,8 \times 10^{-4} \text{ K.kg}^{-1}.\text{m}^2.\text{s}^{-1}$  a zero. O campo médio de vorticidade potencial em 600 K (em torno de 30 km) (Fig. 5a) apresenta essa configuração, tendo uma região de forte gradiente de VP em torno do polo. É importante salientarmos que uma região com grande gradiente de VP pode ser utilizada para mostrar a borda do vórtice, assim como, o transporte horizontal de ozônio pode ser associado à variação temporal da VP (SEMANE et al., 2006; PINHEIRO et al., 2011; BENCHERIF, et al., 2011; PERES, 2013). Dessa forma ao analisar o campo para os dias com vírgula (Fig. 5b) identificamos uma perturbação desse gradiente, que se estende para menores latitudes. É nítido a presença de um efeito de vírgula, como mostrado na Figura 5b, onde há um prolongamento dos menores valores da VP saindo da borda continental da Antártica em direção ao sul da América do Sul.

Tal fato é ratificado pelo campo da diferença das médias (Fig. 5c), pois há um núcleo negativo de VP sobre a região afetada pela vírgula. Ele indica diminuição de VP nos dias de vírgula, assim como os núcleos positivos indicam um aumento. São observados dois núcleos positivos em torno do continente Antártico, sendo o núcleo ocidental mais intenso que o oriental, bem como alguns campos apresentados anteriormente. Um outro núcleo mais fraco é observado sobre a AS (em torno de 30°S e 50°W), formando um dipolo com o núcleo negativo mais a sul. Esse dipolo sobre o Atlântico coincide com a região das quebras de ondas de Rossby, relatadas por Postel e Hitchman, (1999) que afirmam essas rupturas auxiliam no transporte de ozônio da estratosfera para a troposfera.

Essa concordância entre esses campos mostra que estes são bons traçadores da dinâmica da coluna total de ozônio. A análise da evolução temporal do campo da diferença das médias, também mostrou o mesmo padrão desses dois campos. Com os núcleos positivos equilibrando-se e com um enfraquecimento de todos os núcleos. Esse enfraquecimento, novamente, dá-se devido à mistura que ocorre com a instabilidade do buraco de ozônio Antártico.

Alguns autores mencionaram anteriormente que o aumento da VP em uma superfície isentrópica em torno de 600 K, pode está associado a quebra da onda de Rossby e conseqüentemente a entrada de massa estratosférica para a troposfera, alterando o balanço de ozônio (KILADIS; WEICKMANN, 1992; TOMAS; WEBSTER, 1994; NUMAGUTI, 1995; POSTEL; HITCHMAN, 1999). Essas conclusões são coerentes com resultados aqui mostrados, onde há uma quebra significativa no padrão da VP em 600 K (Fig. 5) e na CTO (Fig. 2).

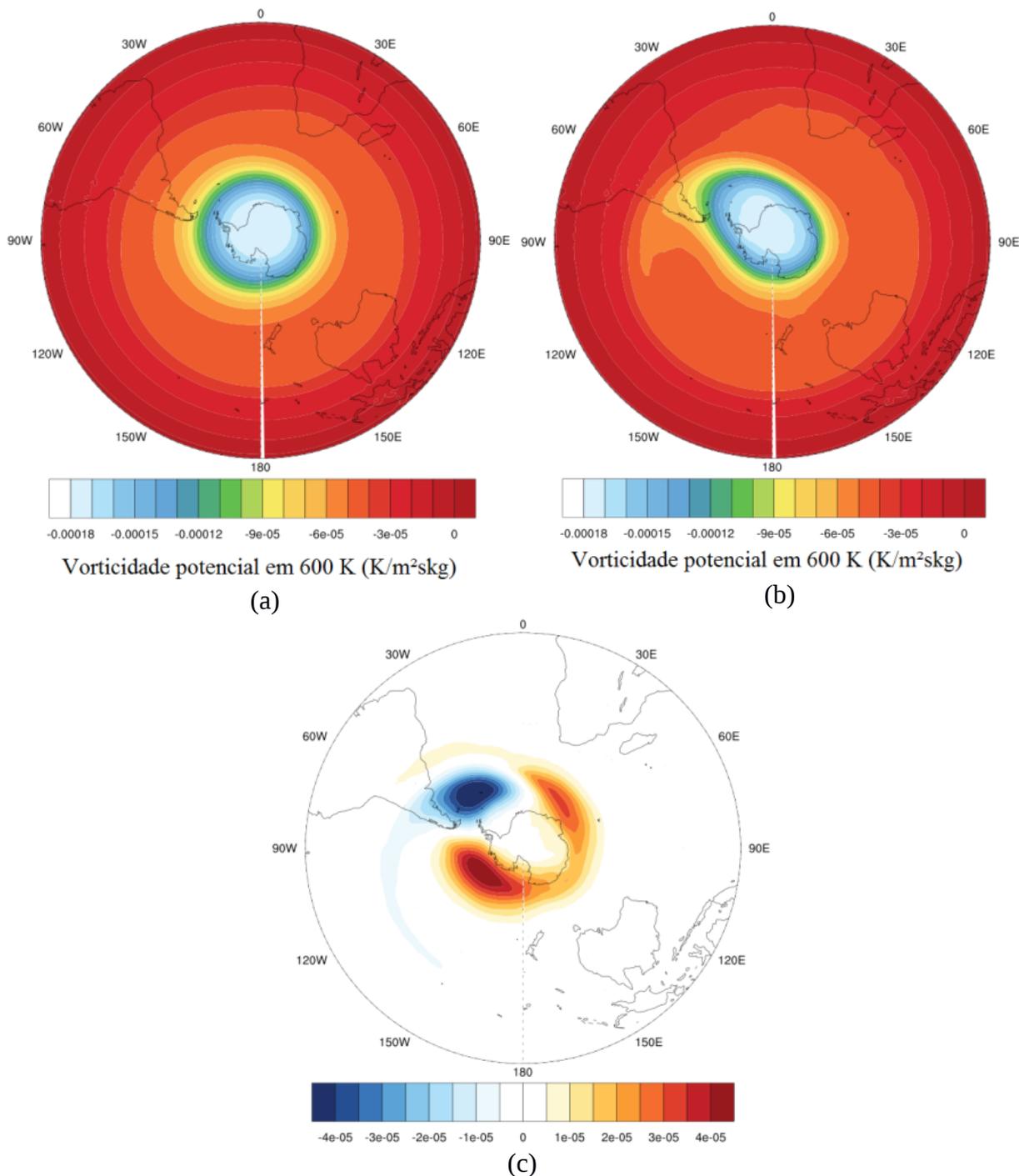


Figura 5 - (a) média do quadrimestre para a vorticidade potencial em 600 K. (b) média dos dias com a presença da vírgula. (c) diferença entre os campos (b) e (a).

Uma maneira de identificarmos essa quebra no padrão da VP é através do corte vertical da mesma (Fig. 6a, b, c). Esse corte vertical é localizado na latitude de 50°S, variando em longitudes. É notória a mudança no padrão da VP para os dias com vírgulas (Fig. 6b), onde verifica-se um aprofundamento dos valores mais negativos em torno de 45°W (sul da América do Sul), desta forma, há uma diminuição também do gradiente de VP na alta troposfera, em

torno de 100 hPa (Fig. 6b). A diferença entre o campo média quadrimestral e os dias com vírgula (Fig. 6c), é mais nitidamente identificado este padrão, onde o comportamento, valores negativos mostram que durante os dias com vírgulas os valores mais baixos representam uma diminuição, caracterizando uma possível quebra da tropopausa.

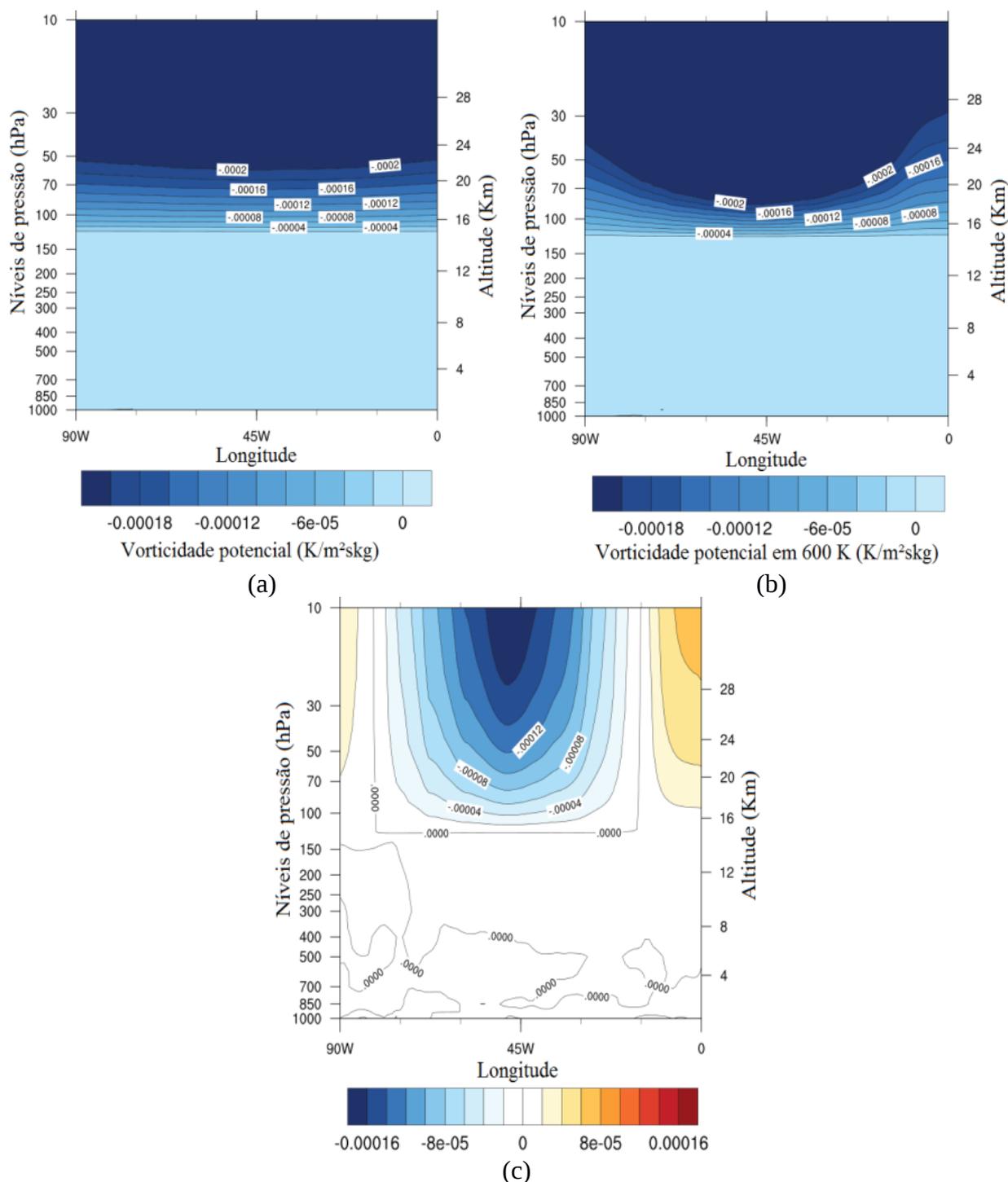


Figura 6 - (a) média do quadrimestre para o corte vertical da vorticidade potencial em 50° S. (b) média dos dias com a presença da vírgula. (c) diferença entre (b) e (a).

#### 4. Conclusão

Dentre os 38 anos de dados analisados para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro, 122 casos de evento de vírgula foram registrados sobre a América do Sul. Pelo campo médio já se pode notar uma diminuição da quantidade de CTO sobre a região da AS, sendo quando há a presença da vírgula, identifica-se ainda mais esses baixos valores da CTO sobre a região. O fato desses baixos valores aparecerem na média, mostra o quão significativo são os eventos de vírgula sobre essa região. Ao observar a diferença das médias, há um destaque para a região da AS, onde os baixos valores de ozônio sofrem um maior desvio da média do quadrimestre. Esses valores também caem dentro do “buraco de ozônio”, indicando que durante as vírgulas, por ter uma maior extensão espacial, o conteúdo de ozônio fica ainda mais baixo.

Ao analisarmos outras variáveis, observamos algumas conexões com as condições da CTO. Dessa forma, foi possível observar a interação entre outras variáveis atmosféricas com o comportamento do ozônio, por meio de outros campos em outros níveis e compreender sua dinâmica. Analisando a variável temperatura em 100 hPa, concluiu-se que durante os eventos de vírgula a temperatura nesse nível sobre a área do “buraco de ozônio” não sofre alteração. Contudo, a temperatura sobre a área do “braço” da vírgula tem uma diferença negativa bastante significativa, principalmente sobre o sul da América do Sul. Com a presença da vírgula, ocorre uma instabilidade que torna mais fácil a mistura entre as áreas com menor temperatura (menos ozônio) e as áreas com maior temperatura (mais ozônio). Sendo assim, esse campo de temperatura em nível de 100 hPa mostra-se eficiente em representar a movimentação média do ozônio estratosférico.

O campo de vento zonal em 100 hPa também apresenta uma mesma evolução dos campos da CTO e da temperatura em 100 hPa. Desta forma, deduzimos que há realmente uma mistura de massa devido à deformação da circulação de oeste, implicando diretamente na evolução do efeito vírgula, principalmente sobre o sul da América do Sul.

Quando analisamos as condições do vento mais abaixo, como em 200 hPa, identificamos a presença do Jato Subtropical em torno de 30°S de latitude. Quando ocorrem os eventos de vírgula, esse Jato sofre um enfraquecimento e um deslocamento para sul. Tal enfraquecimento indica que os ventos de oeste perderam força e que as ondas de Rossby estão sujeitas a ganhar maior amplitude meridional, podendo romper-se.

Sabendo que os eventos de quebra da tropopausa ocorrem com maior frequência nas proximidades do JAN, analisamos o campo de vorticidade potencial em superfícies isentrópicas. Nessa análise verificou-se que o campo de VP em nível de 600K é um bom

traçador da dinâmica do ozônio estratosférico. Neste nível isentrópico, identificou-se um dipolo de VP sobre o oceano Atlântico Sul, onde geralmente ocorrem as quebras de onda de Rossby. Esse dipolo indica que há advecção meridional de massa, representando o ganho de amplitude das ondas de Rossby. Isso leva a quebra da tropopausa e a entrada de massa estratosférica para a troposfera, fazendo com que a CTO sofra um súbito e tenha uma alteração no seu balanço. Essa entrada de massa da estratosfera para a troposfera foi observada verticalmente pelos campos médios de VP, em um corte vertical. Salientando ainda mais a mistura que ocorre, não somente no plano horizontal, como entre as camadas da atmosfera.

Há poucos estudos na literatura que apresentam a interação entre as camadas da atmosfera e menos ainda para o Hemisfério Sul. A interatividade do sistema de camadas da atmosfera começa a ser mais bem explorada e assim poderemos caminhar para melhores previsões do tempo e do clima. Ao analisar a interação entre a dinâmica do ozônio estratosférico e as variáveis estudadas neste trabalho podemos aprofundar mais o assunto sobre interação troposfera/estratosfera, pois ainda é um assunto pouco difundido pela sociedade acadêmica e de grande importância, pois a atmosfera é um sistema integrado.

## 5. Referências

- ANDREWS, D. G. HOLTON J. R.; LEOVY, C. B. In Middle Atmosphere Dynamics. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.115, n.486, p.421-422. 1987.
- ATCKINSON, R.J.; MATTHEWS, W.A.; NEWMAN, P.A.; PLUMB, R.A. Evidence of Mid-Latitude Impact of Antarctic Ozone Depletion, **Revista Nature**. v.340, n.6231, p.290-293, jul. 1989.
- BARAY, J.-L., DANIEL, V., ANCELLET, G., AND LEGRAS, B.: Planetaryscale tropopause folds in the southern subtropics, *Geophysical Research Letters*. v.27, n.3, p.353–356. Doi:10.1029/1999GL010788, 2000.
- BENCHERIF, H.; EL AMRAOUI, L.; KIRGIS, G.; DE BELLEVUE, J. L.; HAUCHECORNE, A.; MZÉ, N.; PORTAFAIX, T.; PAZMINO, A.; GOUTAIL, F. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4°S, 70.3°E). **Atmospheric Chemistry and Physics**. v.11, p.363–373, 2011.
- BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.75, p.351-363, 1949.
- CHUBACHI, S. Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. **Memoirs of National Institute Polar Research Japan Special**. v. 34, p. 13-20, 1984.
- DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFOR, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, N.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERG, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCLETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N. & VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.
- DOBSON, G.M.B. **Ozone in the Atmosphere**. Exploring the Atmosphere. 2ed. Oxford: University Press, 1968.
- FELDSTEIN, S. B. Subtropical Rainfall and the Antarctic Ozone Hole. **Atmospheric Science**. v.332, n.6032, p.925-926, 2011.
- GUARNIERI R. A.; GUARNIERI F. L.; CONTREIRA D. B.; PADILHA L. F.; ECHERE.; PINHEIRO D. K.; SCHUCH A. M. P.; MAKITA K.; SCHUCH N. J. Ozone and UVB radiation anticorrelations at fixed solar zenith solar angles in southern Brazil. **Geofísica Internacional**, v.43, n.1, p.17-22. 2004.
- HOOD, L.; ROSSI, S; BEULEN, M. Trends in lower stratospheric zonal winds, Rossby wave breaking behavior, and column ozone at northern midlatitudes. **Journal of Geophysical Research**. v.104, NO. D20, p.24,321-24,339. 1999.

- KANG, S. M.; POLVANI, L. M.; FYFE, J. C.; SIGMOND, M. Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation. **Science**. v.332, p.951-954, 2011.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N.J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J.M. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. **Atmospheric Environment**. v.30, n.9, p.1481-1488, 1996.
- LIMPASUDAVAN, V.; THOMPSON, D. W. J.; HARTMANN, D. L. The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warming. **Journal of Climate**. v.17, p.2584-2596. 2004.
- MCINTYRE, M. E.; PALMER, T N. Breaking planetary waves in the stratosphere. **Nature**. v.305, p.593-600, 1983.
- MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. Predicted present stratospheric abundances of chlorine species from photodissociation of carbon tetrachloride. *Journal Geophysical Research Letters*. v.1, n.7, p.309-312. DOI: 10.1029/GL001i007p00309. 1974.
- NARAYANA RAO, T.; KIRKWOOD, S.; ARVELIUS, J.; VON DER GATHEN, P.; KIVI, R. Climatology of UTLS ozone and the ratio of ozone and potential vorticity over northern Europe. **Journal of Geophysical Research**. p.4703, Doi:10.1029/2003JD003860. 2003.
- NEWMAN, P. A.; RANDER, W. J. Coherent ozone-dynamical changes during the Southern Hemisphere spring, 1979-1986. **Journal Geophysical Research**. v.12, p.585-12,606. 1988.
- SALBY M.L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. International Geophysics Series. v.61. Academic Press. 1995.
- SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E. The structure of the polar vortex. **Journal of Geophysical Research**. v.97, p.7859-7882, 1992.
- SLUSSER, J.; GIBSON, J.; BIGELOW, D.; KOLINSKI, D.; MOU, W.; KOENIG, G. & BEAUBIEN, A. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. **Applied Optics**. v.38, n.9, p.1543-1551, 1999.
- SOLOMON, S.; GARCIA, R. R.; ROWLAND, F. S.; WUEBBLES, D. J. On the depletion of Antarctic ozone. **Nature**. 321, p.755-758. 1986.
- PERES, L. V.; DOS REIS, N. C.; SANTOS, L. O.; BITTENCOURT, G. D.; SCHUCH, S. P.; ANABOR V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; PAES LEME, N. M. Análise Atmosférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil em 2012. Parte 2: Verificação Sinótica da Troposfera durante os Eventos. DOI: 10.5902/2179460X13151. 2014. **Revista Ciência e Natura**. Santa Maria – RS – Brasil. 2014.
- PINHEIRO, D. K.; LEME, N. P.; PERES, L. V.; KALL, E. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2008 and 2009. **Annual Active Report 2010 – National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**. v. 1, p. 33-37, 2011.

POSTEL, G. A.; HITCHMAN, M. H. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. **American Meteorological Society**. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin. Wisconsin. 1999.

TRICKL, T.; BÄRTSCH-RITTER, N.; EISELE, H.; FURGER, M.; MÜCKE, R.; SPRENGER, M.; STOHL, A. High-ozone layers in the middle and upper troposphere above Central Europe: potential import from the stratosphere along the subtropical jetstream. **Atmospheric Chemistry and Physics**. v.11, p.9343–9366, 2011.

WAKAMATSU, S., UNO, I., VEDA, H., UEHARA, K., and TATEISHI, H. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere, **Atmospheric Environment**. v.23, p.1815-1826, 1989.

WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Geneva, 1994.

## CAPÍTULO 4

Em continuidade este capítulo refere-se ao artigo intitulado como “**Seleção, Análise Troposférica e Vertical dos Eventos de Vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério Sul**”, será submetido ao **Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Anuário IGEO**. Este anuário está classificado pelos indicadores da **CAPES Qualis B1** na área de **GEOCIÊNCIAS** e fator de impacto **0.395**.

### **Seleção, Análise Troposférica e Vertical dos Eventos de Vírgula do Buraco de Ozônio no Hemisfério Sul**

Selection, Tropospheric and Vertical Analysis of Coma Events from Ozone Hole in Southern Hemisphere

Laís S. M. Schmalfluss<sup>1</sup>; David Mendes<sup>1</sup> & Weber Gonçalves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Centro de Ciências Exatas e da Terra. Avenida Senador Salgado Filho, 3000, Candelária, 59.078-970 Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

E-mails: [laisschmalfluss@hotmail.com](mailto:laisschmalfluss@hotmail.com); david.mendes22@gmail.com;  
weber.golcalves@ccet.ufrn

## RESUMO

O ozônio estratosférico forma uma camada que protege a superfície dos raios ultravioleta, que são prejudiciais à vida. Neste trabalho foi investigado um certo padrão que deriva do “buraco de ozônio da Antártica” e prolonga-se sobre a América do Sul, denominado aqui como evento de vírgula. Para tanto, foram utilizados dados do ERA Interim (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) com resolução temporal média diária e resolução espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , para todo o Hemisfério Sul e também para uma grade de interesse ( $0$  e  $90^{\circ}\text{S}$  e  $180^{\circ}\text{W}$  e  $180^{\circ}\text{E}$ ), na qual foi realizada uma média entre todos os pixels e que serviu para a seleção dos eventos que foram analisados. Todos os dados abrangem os meses de agosto, setembro, outubro e novembro no período de 38 anos entre 1979 e 2016. Os eventos selecionados coincidiram com anos de El Niño, fenômeno que induz um aumento na frequência dos eventos de intrusão. Os eventos de vírgula estão fortemente ligados à quebra das ondas de Rossby, que ocorre devido ao enfraquecimento do Jato de altos níveis, contribuindo para a quebra da tropopausa e conseqüentemente para os eventos de intrusão. Verticalmente, a corrente de ventos de NO se mostra eficiente na determinação da posição do vórtice Antártico, que adentra a troposfera durante os eventos de vírgula. Em superfície observou-se a presença de anticiclones sobre o sul da América do Sul durante a passagem da vírgula, que estavam associados a uma grande amplitude de onda entre cavado e crista.

**Palavras-chave:** Quebra da tropopausa; Eventos de Intrusão; El Niño

## **ABSTRACT**

The stratospheric ozone forms a layer that protects the surface from ultraviolet radiation, which are harmful to life. In this work was investigated a certain pattern that derives from the "Antarctic ozone hole" and extends over South America, termed here as a comma event. For this purpose, data from the ERA Interim (European Center for Medium-Range Weather Forecasts) were used with daily mean temporal resolution and  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  for spatial resolution, for the whole Southern Hemisphere and also for a grid of interest (0 and 90°S and 180°W and 180°E), in which an average of all the pixels was performed and that served to select the events that were analyzed. All data cover the months of August, September, October and November in the period of 38 years between 1979 and 2016. The selected events coincided with years of El Niño. The phenomenon induces an increase in frequency of intrusion events. Comma events are strongly linked to Rossby's breakdown, which occurs due to the weakening of the high-level jet, contributing to the breakdown of the tropopause and consequently to intrusion events. Vertically, the northwest Wind current show efficient to determine the position of the Antarctic vortex, that goes into the troposphere during the comma event. On the surface was observed anticyclones on the South of South America, which were associated with a large wave amplitude between the crest and trough.

**Keywords:** Tropopause Break; Intrusion Events; El Niño

## 1. Introdução

O ozônio ( $O_3$ ) possui duas “faces”, uma boa e outra má e o que as distingue é a sua localização. O ozônio encontrado na troposfera é considerado um poluidor, mas o ozônio encontrado na estratosfera atua como filtro, interceptando a radiação ultravioleta (UV), sobretudo a radiação ultravioleta do tipo B – UV-B, localizada na faixa espectral entre 0,28 e 0,32  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda, absorvendo-a nos primeiros quilômetros da estratosfera e impedindo que grande parte chegue livremente à superfície (SALBY, 1995). A rarefação da camada de ozônio implica em consequências para a saúde dos seres vivos em geral (WHO, 1994), pois ocorre um aumento da radiação UV que chega a superfície (GUARNIERI et al., 2004). Esse tipo de radiação é nociva à saúde dos seres vivos e pode causar diversas doenças como o câncer de pele e catarata, além de prejudicar o desenvolvimento de plantas e causar danos no sistema aquático, pois a radiação UV prejudica a química molecular da fotossíntese (WHO, 1994).

Uma descoberta feita na década de 70 pelos cientistas Mário J. Molina e Frank S. Rowland associava os baixos conteúdos de ozônio na estratosfera da Antártica às grandes quantidades de CFCs emitidos pela ação antrópica. Os cientistas detectaram que a quantidade de CFCs concentrados na atmosfera era praticamente a mesma que fora produzida. Por possuírem tamanha estabilidade conseguiam alcançar a estratosfera, onde ao sofrerem um processo de decomposição pela radiação UV, que é altamente energética, liberavam átomos de cloro (Cl) (MOLINA; ROWLAND, 1974). A dimensão da descoberta de Molina e Rowland, (1974) vem do fato de que apenas um átomo de Cloro é capaz de destruir milhares de moléculas de ozônio, porém apenas na década de 80 essa descoberta foi associada ao “buraco de ozônio da Antártica” (CHUBACHI, 1984; FARMAN et al., 1985).

Com o aumento das pesquisas e as novas descobertas sobre a relação entre “buraco de ozônio da Antártica” e o uso excessivo de Clorofluorcarbonetos - CFCs, veio o Protocolo de Montreal (1989), que foi criado na Convenção de Viena em 1969, tendo como objetivo principal a proteção da camada de ozônio através da redução e eliminação do consumo de CFCs. Algum tempo depois se descobriu que esse baixo ozônio localizado na estratosfera da Antártica estava acalçando latitudes mais baixas (ATCKINSON et al., 1989), ou seja, áreas mais povoadas. Durante a primavera quando o “buraco de ozônio” fica mais instável essas massas conseguem se desprender do vórtice sobre a Antártica e migrar para latitudes médias e baixas, onde conseguem permanecer por até 20 dias (PRATHER; JAFFE, 1990). Na América do Sul (AS) foram registrados diversos eventos temporários de baixo ozônio, os quais foram

intitulados primeiramente por Kirchoff et al., (1996) como “Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico” - ESBOA, que tem duração de aproximadamente 3 dias (KIRCHHOFF et al., 1996; BERTAGNOLLI, et al., 2006).

A interação entre os eventos de ESBOA e sistemas troposféricos é relatada por alguns autores. Após a passagem de sistemas frontais e sistemas convectivos sobre AS, foram registrados eventos de baixo ozônio sobre o Sul do Brasil (PERES, 2013). Alguns outros autores remetem que durante a passagem da frente sobre a região a intensificação do Jato Subtropical, quando houve a quebra da tropopausa, haveria a viabilização da passagem de ar da estratosfera para a troposfera (KUNZ; SPETH, 1997; FONTINELE, 2012; PERES, 2013), ou seja, o Jato de Altos Níveis auxilia na ocorrência de eventos de intrusão (REED, 1955; BARAY et. al., 2000). Na superfície, o desenvolvimento de ciclones secundários sobre a região sul da América do Sul foi associado aos eventos de intrusão, pois estes são acompanhados de uma anomalia de vorticidade potencial em altos níveis e uma região de baroclínia em superfície, que formam uma coluna de vorticidade ciclônica que se estabelece por toda a troposfera, criando a condição ideal para o desenvolvimento desse segundo ciclone (IWABE, 2008). Essa região do sul da América do Sul recebe frequentemente durante o fim do inverno e primavera Austrais eventos anômalos de baixo ozônio. Salienta-se que o centro do Uruguai e o golfo de San Matias no litoral Argentino são regiões com forte tendência ciclogênica, que tendem a aumentar durante a fase negativa do ENOS (GAN; RAO, 1991; CAVALCANTI et. al., 2009, MENDES et al, 2010). Sendo que o fenômeno El Niño foi associado a uma maior frequência nos eventos de intrusão na região extratropical (VOUGARAKIS et al., 2011), com uma diferença de 6 meses entre o pico do El Niño e os eventos de intrusão (ZEREFOS, et al., 1992; BRONNIMANN et al., 2004; ZENG; PYLE, 2005). Em contrapartida, quando ocorrem eventos de La Niña o efeito seria contrário, diminuindo a frequência desses e por associação as quebras na tropopausa (ZENG; PYLE, 2005). Sugerindo que esses mínimos são decorrentes da quebra da tropopausa, pois o El Niño pode estar causando anomalias no processo de transporte de massa de ar, impulsionando o fluxo na tropopausa (VOUGARAKIS, et al., 2011).

Outra relação atribui aos eventos de intrusão a quebra da onda de Rossby, que ao ganhar amplitude, tem condições facilitadas para seu rompimento (MCINTYRE; PALMER, 1983). Ainda foi observado que o rompimento do vórtice é acompanhado por uma desaceleração ou até mesmo uma reversão dos ventos de oeste (ANDREWS et al, 1987; LIMPASUDAVAN et al, 2004) e o decaimento da temperatura dentro do vórtice ocorre apenas

após a sua quebra (NEWMAN; RANDEL, 1988; TRENBERTH; OLSON, 1989; JONES; SHANKLIN, 1995; SOLOMON, 1999), sugerindo que essas mudanças são uma consequência ao buraco de ozônio Antártico (SOLOMON et al., 1999). Postel e Hitchman, (1999) conferiram que as maiores frequências de quebra da onda de Rossby ocorrem no verão de cada hemisfério, sobre os oceanos Pacífico e Atlântico nas proximidades de anticiclones, sendo que os eventos em que o “buraco de ozônio” se prolonga para latitudes mais baixas, por derivarem do “buraco de ozônio” ocorrem nos meses de primavera. Dessa forma surge uma questão: Será que esses eventos de prolongamento do “buraco de ozônio” só ocorrem quando há quebra da onda de Rossby? Porém o baixo número de quebras durante a primavera pode estar associado a uma maior estabilidade do “buraco de ozônio” nessa época. Questões como essa mostram como a dinâmica dos eventos de baixo ozônio na América do Sul ainda não está bem consolidada e necessita de mais conclusões sobre alguns padrões carentes de literatura, como a extensão do “buraco de ozônio” que atinge o sul da América do Sul e possui um formato semelhante ao de uma vírgula.

## **2. Dados e Métodos**

### **2.1. Área de estudo**

Todos os dados possuem resolução temporal média diária e resolução espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ , para todo o Hemisfério Sul (latitude entre 0 e  $90^{\circ}\text{S}$  e longitude entre  $180^{\circ}\text{W}$  e  $180^{\circ}\text{E}$  – Fig.1a), abrangendo os meses de agosto, setembro, outubro e novembro no período de 38 anos entre 1979 e 2016.

Foram catalogados todos os dias em que houve prolongamento do “buraco de ozônio Antártico” sobre a América do Sul, intitulado aqui como evento de vírgula, que tem esse nome devido ao seu formato quando visualizado no mapa com projeção sobre o Polo Sul para os dados de coluna total de ozônio (CTO) (Fig. 1(a)).

### **2.2. Dados**

Para este trabalho foram utilizados dados do ERA – INTERIM (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (DEE et al., 2011): Coluna Total de Ozônio (CTO), Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), Altura Geopotencial em 500 hPa, Vento a 10 metros e vento zonal em 200 hPa, além do corte vertical do vento, vorticidade potencial e temperatura nos níveis padrões entre 1000 hPa e 10 hPa para a latitude de  $50^{\circ}\text{S}$ . Todos os dados são para os

meses de agosto, setembro, outubro e novembro, entre os anos de 1979 até 2016. Esses meses foram utilizados por representarem o fim do inverno e a primavera. Nessa época o “buraco de ozônio” está formado na região da Antártica e começa a ficar instável e é quando ocorrem as instabilidades que podem levar a eventos de baixo ozônio em latitudes menores (ANDREWS et al., 1987; SCHOEBERL et al., 1992; KIRCHHOFF et al., 1996). Resolução temporal de média diária e a resolução espacial de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  para todo o Hemisfério Sul com mapas de projeção polar.

### 2.3. Metodologia

Para a análise dos padrões e características que envolvem os eventos de vírgula, primeiramente foram catalogados todos os dias em que o “buraco de ozônio” apresentou esse formato e apenas os dias em que esse prolongamento atingiu a área de interesse, mostrada na Figura 1(b), já que o enfoque do trabalho é a detecção desse tipo de evento sobre a América do Sul. As seguintes características foram pré-estabelecidas para a detecção dos eventos de vírgula:

- a) Valores de Coluna Total de Ozônio menor ou igual a 220 UD. Esse valor, segundo Farman et al., (1985) representa o limiar da borda do “buraco de ozônio da Antártica”;
- b) Tais valores devem atingir a grade de interesse para serem considerados como eventos de vírgula, que está localizada sobre o sul da América do Sul, entre as latitudes de  $30^{\circ}\text{S}$  e  $55^{\circ}\text{S}$  e as longitudes de  $40^{\circ}\text{W}$  e  $80^{\circ}\text{W}$ ;

Os eventos de baixo ozônio vindos da Antártica podem ocorrer sobre determinada região por mais de um dia. Segundo alguns autores as massas que se desprendem do “buraco de ozônio” podem permanecer isoladas de 7 até 20 dias (PRATHER; JAFFE, 1990) e ainda que uma massa de baixo ozônio pode permanecer sobre uma determinada localidade em torno de 3 dias (BERTAGNOLLI et al., 2006). Devido a isso, podem ocorrer sequências de dias com evento de vírgula sobre a AS e todos os dias são contabilizados para a catalogação.

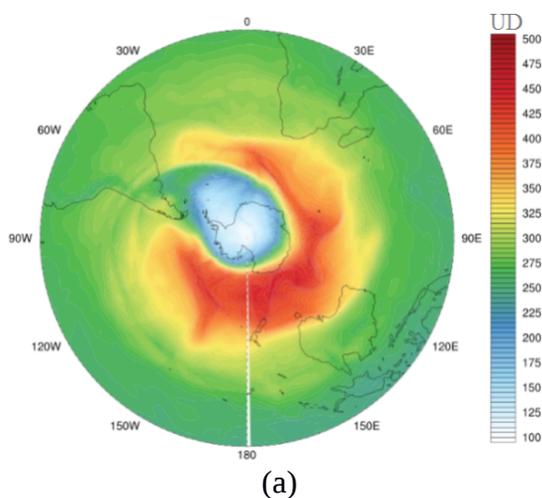
Como método de análise foram examinados dois tipos de campos médios. Um dos campos referente aos dias em que ocorreu evento de vírgula sobre a América do Sul e o outro para os demais dias, ou seja, os dias em que não houve o evento de vírgula sobre o continente. Dessa foi possível observar quais condições tanto troposféricas quanto estratosféricas estavam associadas aos eventos de vírgula sobre o continente.

Além da comparação dos campos médios, foram escolhidos dois eventos de vírgula significativos para mostrar as condições da atmosfera durante o evento (mais adiante será detalhado o método de escolha desses eventos). Esse evento conta com uma análise temporal,

em que os tempos -3, -2, -1, 0, +1, +2 correspondem a: três, dois e um dia anterior ao evento de vírgula, dia do evento, um e dois dias posterior ao evento, respectivamente.

Essa análise foi realizada pela observação dos campos de: pressão no nível médio do mar com geopotencial em 500 hPa e vento a 10 metros e vento zonal em 200 hPa. As análises desses campos permitem a compreender a situação sinótica durante os eventos (FELDSTEIN, 2011; KANG et al., 2011). Também foi feito um corte vertical na latitude de 50°S, localizado entre as longitudes de 0 e 90° W, para os níveis padrões de pressão (entre 1000 hPa e 10 hPa) para as variáveis de vento zonal, vorticidade potencial e temperatura. Tendo como intuito verificar a abrangência do evento de vírgula, associando o declínio do ozônio com deslocamento do Jato Subtropical (KANG et al., 2011).

Para a seleção dos eventos utilizou-se a média de todos os pixels da grade de interesse e a partir da análise desses valores, buscou-se os dias com as menores médias da grade para realizar uma análise das condições da atmosfera durante a atuação do evento sobre o continente. As análises contam com o exame dos campos de coluna total de ozônio, pressão ao nível médio do mar e altura geopotencial em 500 hPa, vento a 10 metro e vento zonal em 200 hPa, assim como um corte vertical na latitude de 50°S para vento zonal e temperatura.



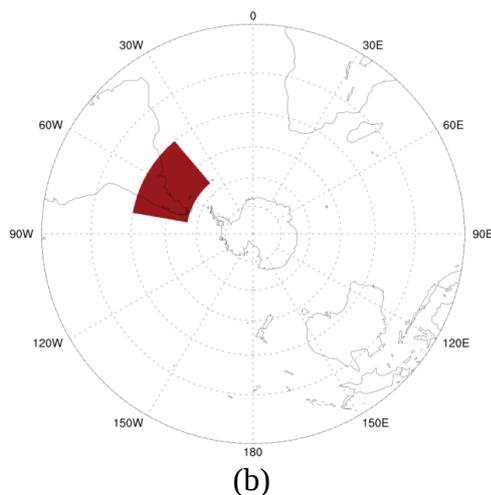


Figura 1 - Exemplo de campo de coluna total de ozônio para um dia com evento de vírgula sobre a América do Sul (dia 20 de outubro de 2000).

### 3. Resultados

A catalogação dos eventos de vírgula resultou em 122 dias com a presença do prolongamento do “buraco de ozônio da Antártica” sobre a América do sul dentre os 38 anos de dados analisados para os meses de agosto, setembro, outubro e novembro. Mais precisamente a catalogação captou os dias em que a extensão do “buraco de ozônio” atingiu a região da grade de interesse que fica entre as latitudes de 30°S e 55°S e as longitudes de 40°W e 80°W, utilizando o valor de 220 UD para delimitar a borda do “buraco de ozônio”. Assim, toda vez que o valor de 220 UD foi captado sobre a grade, o dia foi selecionado.

Valores médios diários de coluna total de ozônio foram calculados sobre a grade de interesse, entre todos os pixels, gerando apenas um valor representativo da grade. Ao analisar o resultado desses valores médios e comparar todos os dias em que esses valores estiveram abaixo de 220 UD (por este se o valor que delimita a borda do “buraco de ozônio da Antártica”) com os dias catalogados como eventos de vírgula, observa-se que apenas a partir do ano de 1991 começou-se a ter valores abaixo de 220 UD dentro dessa grade (Fig. 2). Isso mostra que a partir desse ano latitudes menores começaram a sofrer com as extensões do “buraco de ozônio”, como já mencionado por outros autores anteriormente (THOMPSON, 1991; KANE, 1991; KIRCHHOFF et. al., 1996; KANG et. al., 2011; FELDSTEIN, 2011), sendo uma consequência do acúmulo dos CFCs na estratosfera da Antártica, a qual foi percebida por dois cientistas na década de 70 (MOLINA; ROWLANDO, 1974). Os CFCs tem vida útil de 50 a 100 anos (DOUGLAS et al., 1995), dessa forma as consequências ocorrem com seu acúmulo. Strahan, (2018) mostra que os CFCs começaram a diminuir na estratosfera da Antártica desde 2005 viabilizando a recuperação da camada de ozônio e causando menos

destruição de ozônio estratosférico na região da Antártica. Isso pode ser observado na Fig. 2, onde os valores menos que 220 UD têm uma menor frequência a partir desse ano.

Houve cinco eventos com valores bastante baixos de média de CTO dentro da grade de interesse e ocorreram nos anos de 1995 e 2003, nas seguintes datas apresentadas na da tabela 1. Torna-se importante observar que os anos 1995 e 2003 coincidem com anos de El Niño. Os picos de El Niño para esses períodos ocorreram em janeiro de 1995 e novembro de 2002, respectivamente. Segundo alguns autores o fenômeno El Niño contribui para a ocorrência das quebras de onda de Rossby e conseqüentemente para a ocorrência de eventos de intrusão de ozônio estratosférico na troposfera. O fenômeno pode estar impulsionando o fluxo da tropopausa, através das mudanças na célula de Walker e causando anomalias no processo de transporte de massa (VOUGARAKIS, et al., 2011). Tais eventos de intrusão serão confirmados mais adiante, na análise dos campos de vento zonal. Atenta-se que todos os casos ocorreram mais de seis meses após o pico do fenômeno El Niño. Corroborando com alguns outros autores (ZEREFOS, et al., 1992), que haviam relatado sobre esse “lag” temporal.

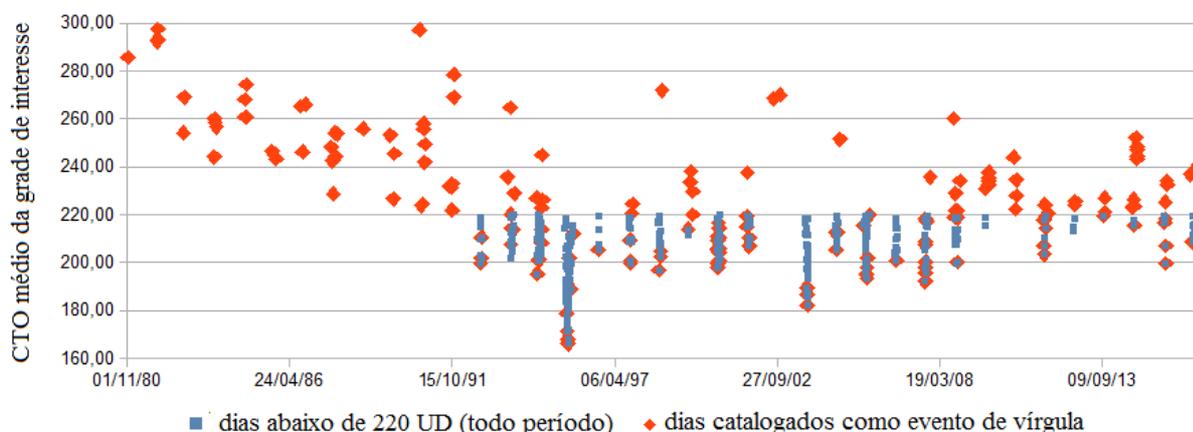


Figura 2 – Média de coluna total de ozônio dentro da grade de interesse. Os quadrados azuis representam os dias para todo o período em que os valores estiveram abaixo de 220 UD. Os losangos laranjas mostram os dias catalogados como eventos de vírgula.

Tabela 1 - Dias catalogados como evento de vírgula com os menores valores médios de CTO da grade de interesse.

Evento	Data	Valor médio de CTO dentro da grade de interesse (UD)	% de queda em relação a média mensal
1	21 agosto 1995	176	38
2	29 agosto 1995	169	40
3	10, 11, 12 setembro 1995	165, 163, 166	35, 35, 34
4	1 outubro 2003	182	29
5	6 outubro 2003	178	31

Na Figura 3 podemos observar o número de eventos de vírgula e quantos dias cada evento atuou sobre a América do Sul. Outubro foi o mês com maior número de eventos de vírgula (45 eventos) e com mais dias sequenciados de evento sobre o continente (1, 2, 3, 4 e 5 dias), seguido de novembro com 33 eventos de vírgula e sequencias de 1, 2, 4 e 5 dias (Fig. 3). Em relatos anteriores, outubro já havia sido cotado como o mês com mais eventos de baixo CTO sobre a América do Sul (KIRCHHOFF et al., 1996). Porém setembro apresentou dois eventos de vírgula com uma maior sequencia de dias (7 dias) e ainda o maior número de eventos com duração de 1 dia sobre a AS (28 dias) (Fig. 3). No mês de agosto apenas foram registrados eventos com duração de 1 dia, num total de 8 eventos. Esse baixo número de eventos para agosto esta relacionado com a formação do vórtice em torno da Antártica, que nessa época do ano está mais estável, impedindo o rompimento e a liberação do conteúdo de baixo ozônio do seu interior para as latitudes menores.

Em setembro a situação se mostra bastante interessante ao observar os dois casos com 7 dias sequenciados. Como o vórtice ainda possui certa estabilidade, quando há o seu rompimento, as massas que se estendem para menores latitudes tem maior “força” para permanecer com as características internas do “buraco de ozônio”, ou seja, conseguem permanecer por mais tempo com o conteúdo de ozônio baixo. Outubro e novembro tem o vórtice mais instável que setembro e isso torna mais fácil a ocorrência de mais eventos com permanência da vírgula sobre a AS em torno de 2 a 5 dias.

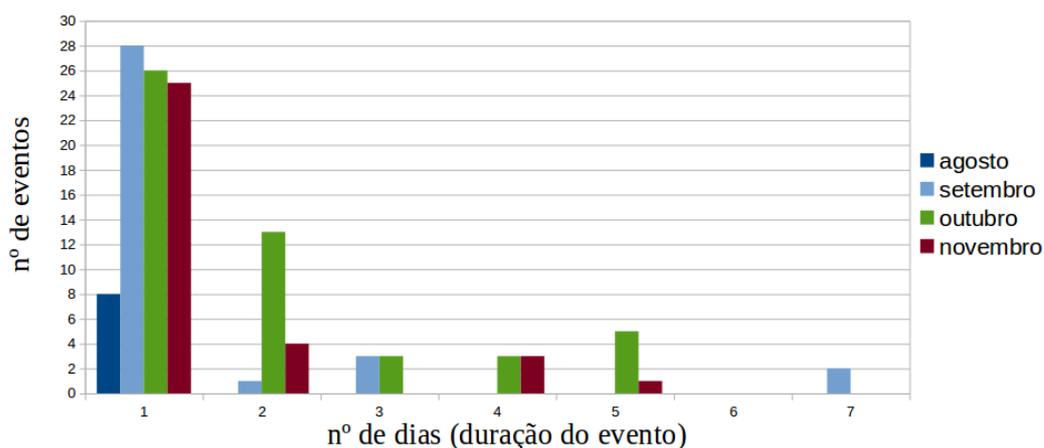


Figura 3 - Eventos de vírgula catalogados para cada mês, o eixo das ordenadas mostra o número de eventos versus a quantidade de dias de cada evento no eixo das abscissas.

### 3.1. Análise dos campos médios

Primeiramente, realizamos uma análise em superfície, com o intuito de compreender as condições dinâmicas ocorridas na troposfera durante um evento de vírgula. Após,

analisamos a troposfera média, assim como a alta pelos cortes verticais sobre a região da grade. Dessa forma poderemos encontrar uma possível conexão entre estratosfera e troposfera durante esse tipo de evento.

A Figura 4 apresenta os campos médios de CTO para os dias com evento de vírgula (Fig. 4(a)) e para o restante dos dias, ou seja, os dias em que não houve registro de evento do prolongamento do “buraco de ozônio” sobre o sul da América do sul (Fig. 4(b)). Observa-se que durante os eventos de vírgula a média da grade da coluna total de ozônio sobre a AS fica em torno de 300 UD enquanto a média para os demais dias fica em torno de 350 UD, uma redução média de 50 UD. Outro ponto importante a se destacar é a posição do cinturão das altas concentrações durante os eventos, pois este fica localizado no lado oposto a AS com maiores concentrações de CTO do que nos dias em que não há eventos de vírgula. Isso mostra que durante os eventos de vírgula há “um tipo de compressão” do cinturão das altas concentrações e a estratosfera sobre a AS fica com a camada de ozônio mais rarefeita. Ainda observou-se que os valores de CTO dentro do buraco de ozônio na Figura 4(a) ficam em torno de 175 UD enquanto na Figura 4(b) esses valores são 200 UD, mostrando que durante os eventos, não somente sobre a AS há um declínio de CTO, mas como também dentro do vórtice Antártico. Isso ocorre devido à expansão e quebra do vórtice, que deixa escapar o pouco ozônio que continha fazendo os valores baixarem ainda mais.

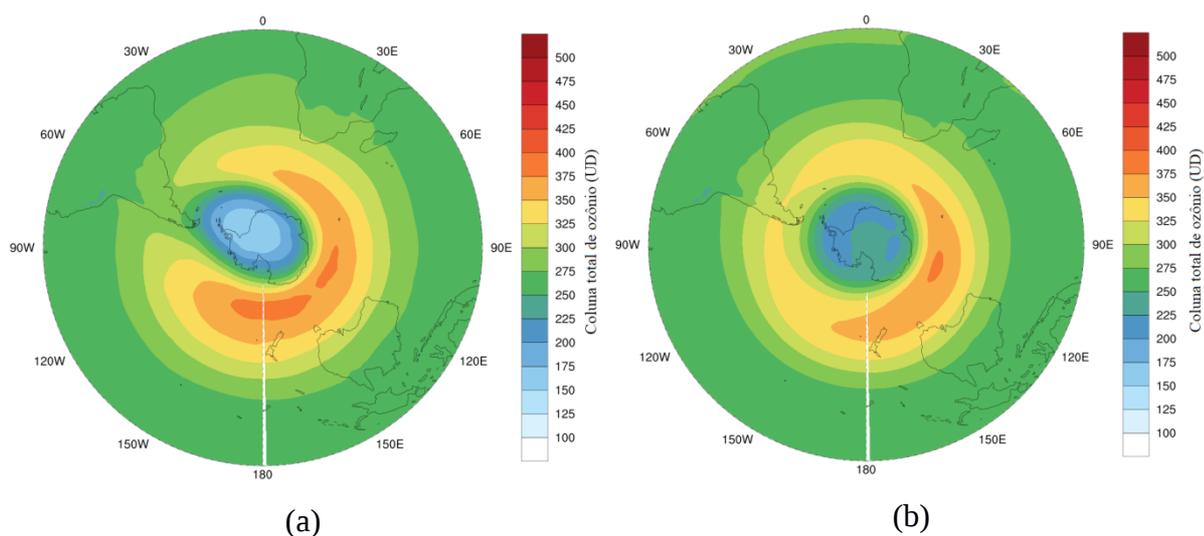


Figura 4 - Campo médio de coluna total de ozônio, em UD, para os dias com evento de vírgula (a) e para os demais dias – dias sem evento de vírgula (b).

A Figura 5 apresenta os dois campos médios de pressão ao nível médio do mar (PNMM), para os dias em que houve evento de vírgula sobre a América do sul (Fig. 5(a)) e para

os demais dias na Fig. 5(b). Observa-se um pequeno deslocamento para leste do Anticiclone centrado no Atlântico Sul, assim como um pequeno aumento da pressão que pode ser notado ao observar a costa que vai desde o Rio da Prata até os estados do sul do Brasil (Fig. 5(a)). A região de Bahia Blanca na Argentina tem um declínio da pressão durante os eventos de vírgula, indicando a presença de sistemas de baixa pressão em superfície, como o deslocamento de ciclones e a passagem de frentes frias, sendo que já havia sido citada como uma região bastante ciclogênica (GAN; RAO, 1991). Em torno do polo o gradiente de pressão quase não sofre mudanças, porém as regiões de baixas pressões em torno da Antártica ficam menos intensas durante os eventos de vírgula.

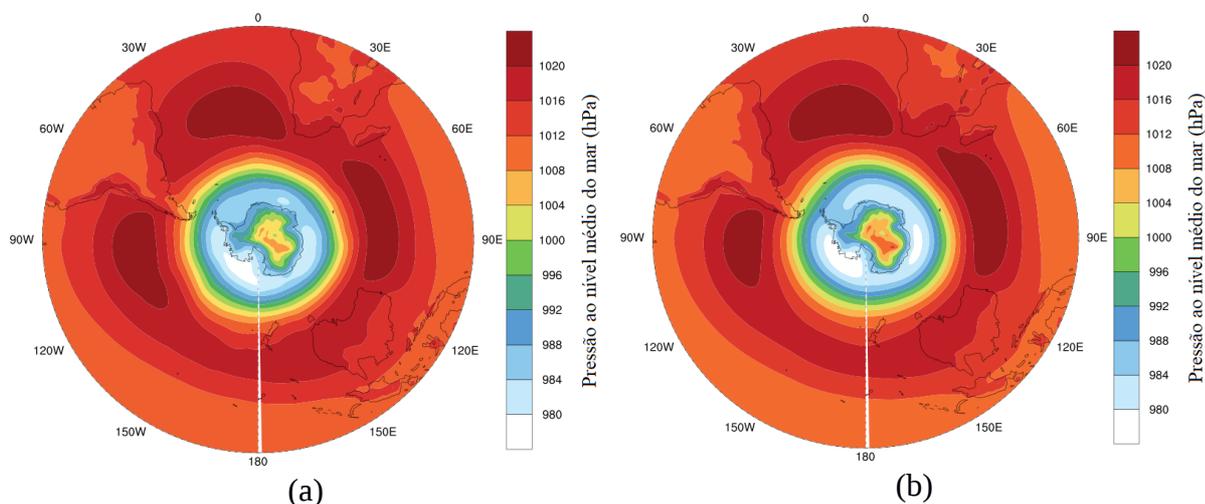


Figura 5 - Diferença dos campos médios de PNMM, entre os dias com e sem o evento de vírgula sobre a América do Sul.

As linhas de corrente do vento a 10 metros são apresentadas na Figura 6 como a média dos dias com evento de vírgula e a média dos demais dias (Fig. 6(a, b) respectivamente). Observa-se um enfraquecimento dos ventos de oeste em torno no Polo Sul no campo médio dos dias com vírgula, mostrando desde já que o enfraquecimento do vórtice pode estar ocorrendo desde a superfície. O anticiclone observado no Pacífico enfraquece durante os eventos, assim como o anticiclone localizado no Atlântico, que durante os eventos de vírgula além de enfraquecer, sofre um deslocamento para leste, ficando mais próximo à costa da África do que da América do Sul. Um sistema de giro anticiclônico é observado a leste do Uruguai no campo da média dos dias com evento de vírgula sobre a AS (Fig. 6(a)), ratificando o aumento de pressão observado no campo da Figura 5(a).

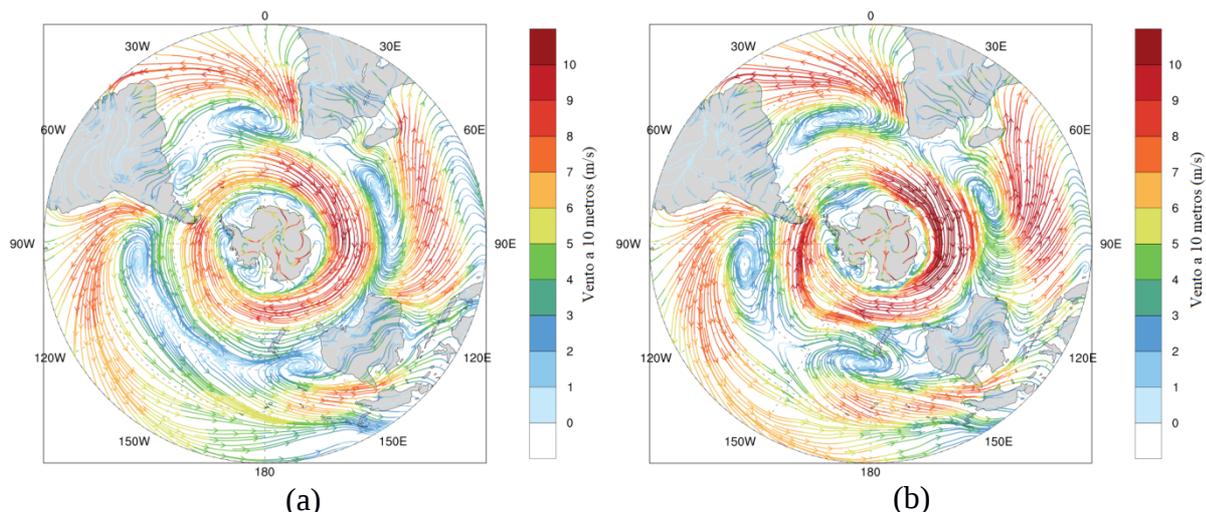


Figura 6 - Linhas de corrente do vento a 10 metros para (a) média dos dias com evento de vírgula, (b) média dos demais dias.

Os campos médios de vento zonal em 200 hPa mostram a posição e intensidade média do jato de altos níveis. Ao compara os campos médios dos dias com e sem evento de vírgula observa-se que nos dias em que houve evento (Fig.7(a)) o Jato sofria uma desintensificação do núcleo entre AS e o oceano Atlântico sudoeste (centrado aproximadamente em 25°S de latitude e 50°W de longitude), com valores em torno de 35 m/s, enquanto nos demais dias (Fig. 7(b)) o Jato se mostra mais fortalecido, com valores máximos de vento zonal de 40 m/s. Os menores valores de vento zonal na região que compreende o sudeste do Pacífico e o extremo sul da América do Sul corroboram com a ideia de que um enfraquecimento do JAN estaria relacionado à quebra da onda de Rossby (ANDREWS et al., 1987; LIMPASUDAVAN et al., 2004). Pois quando os ventos de oeste se tornam mais fracos, a amplitude da onda de Rossby tende a crescer até o ponto em que ocorre a quebra. Ocorrendo a quebra dessa onda, podem ocorrer os eventos de intrusão do ar da estratosfera para dentro da troposfera, pois a quebra viabilizou um caminho para a passagem de massa (MCINTYRE; PALMER, 1983) e assim reorganizar a coluna total de ozônio, pois na troposfera o ozônio é destruído facilmente por processos de oxidação (FARMAN et al., 1985).

A situação do JAN no lado oposto a AS mostra que há uma diminuição dos ventos de oeste nessa corrente, localizada na mesma região do cinturão das altas concentrações, porém em uma faixa de latitude mais a norte, contornando o cinturão observado na Figura 4(a).

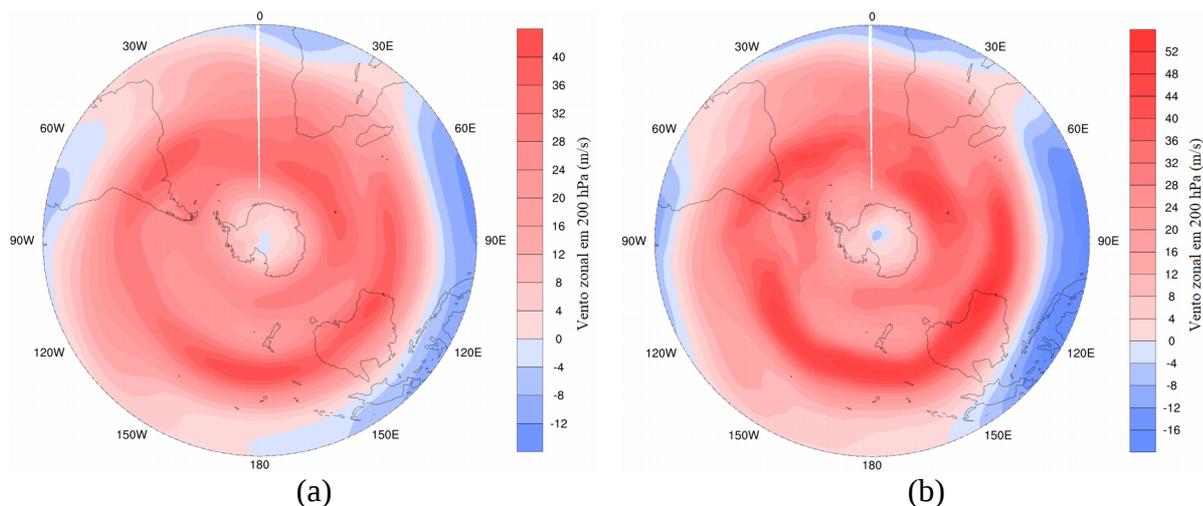


Figura 7 - Vento zonal em 200 hPa para (a) média dos dias com evento de vírgula, (b) média dos demais dias.

A Figura 8 mostra três variáveis, sendo que as cores representam a vorticidade potencial, as linhas pretas o vento zonal e as linhas brancas pontilhadas mostram a temperatura para esse corte vertical na latitude de 50°S, que corta o extremo sul do continente sul americano e oceano Atlântico adjacente, pois o corte fica entre as longitudes de 0 e 90°W. A deformação no campo da VP observada na Figura 8(a) que é quando ocorrem os eventos de vírgula mostra a incidência de vorticidade ciclônica (aumento da VP considerando valores absolutos) sobre a área do corte vertical, indicando a deformação do vórtice Antártico. Segundo Reed (1955), a VP tem maiores valores absolutos conforme a altitude aumenta, dessa forma observa-se que nos dias em que houve evento de vírgula há um aumento de VP em torno da altitude de 70 hPa (20 Km) e um aumento do gradiente de VP sobre a região entre o extremo sul da América do Sul e o oceano Atlântico sudoeste. Farman et al., (1985) sugere que um forte gradiente de VP serve como delimitador da borda do vórtice Antártico, sugerindo dessa forma que essa deformação mostra o prolongamento do “buraco de ozônio” sobre o sul da AS.

Porém ao analisar o vento zonal nesse corte vertical observou-se que um núcleo de corrente de ventos de oeste localizava-se a leste do gradiente de VP, centrado em 30 hPa (28 Km), aproximadamente a mesma altitude da camada de ozônio, mostrando a borda do vórtice Antártico e sua clara relação com o campo médio de CTO (Fig. 4(a)). Na relação entre a borda do vórtice, observada pelo vento zonal (linhas pretas), e o gradiente de VP (em cores) mostra um atraso da deformação no campo de VP em comparação a corrente de oeste que representa o vórtice, pois o sentido do movimento nessa latitude ocorre de oeste para leste. Dessa forma, constata-se que talvez o campo de vento zonal seja mais eficiente na busca pela localização das bordas do vórtice Antártico e sua dinâmica.

Continuando a análise, ao observar as linhas de temperatura nota-se um núcleo junto ao gradiente de vorticidade potencial, ligeiramente a leste, centrado entre as longitudes de 10°W e 70°W na altitude entre 200 hPa (12 Km) e 80 hPa (16 Km), ou seja, logo abaixo da borda do prolongamento do vórtice, detectada pela corrente de vento zonal de oeste. Esse núcleo de temperatura indica a posição da tropopausa, pois a temperatura é praticamente constante com a variação da altitude, sendo esta em torno de -64°C. Porém ao observar os dias sem evento de vírgula (Fig. 8(b)) não há esse núcleo de temperatura, apenas uma camada de temperatura constante entre as mesmas altitudes, de aproximadamente -56°C. Mostrando uma clara redução da temperatura entre as 12 e 16 km de altitude, que seria a altitude da tropopausa na latitude de 50°S, durante os eventos de vírgula. Autores como Newman e Randel, (1988) e Solomon, (1999) sugeriram em seus trabalhos que a redução da temperatura dentro do vórtice Antártico ocorria após a quebra do mesmo. Dessa forma, uma ligação entre a presença do núcleo de baixas temperaturas e a quebra do vórtice se torna mais evidente.

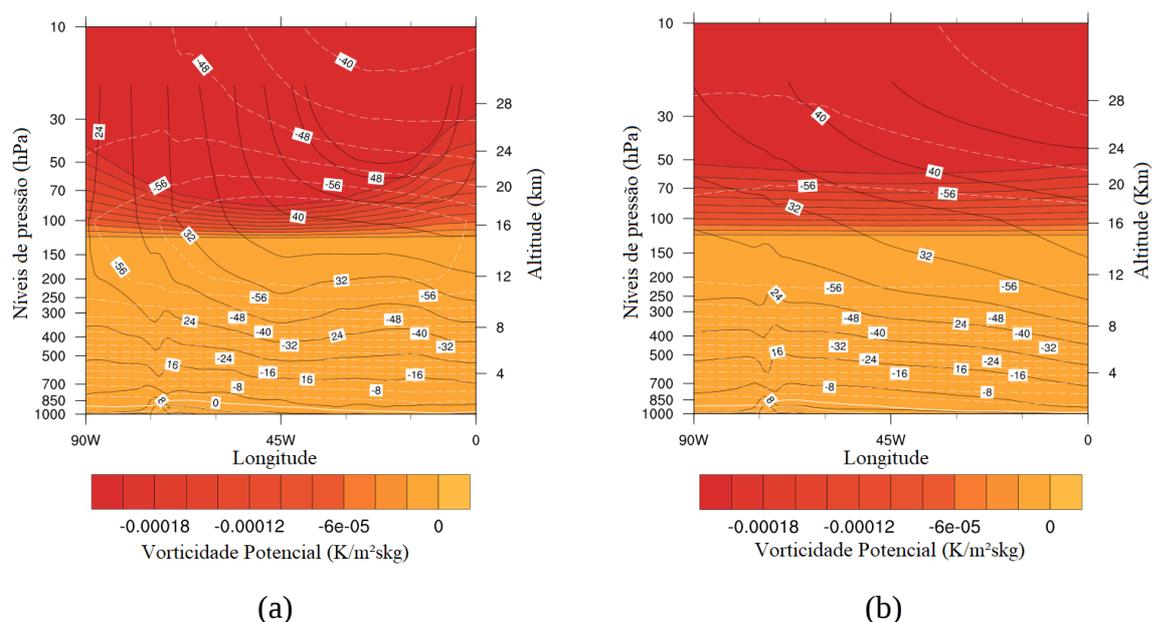


Figura 8 - Corte vertical na latitude de 50°S entre as longitudes de 0 e 90°W para os níveis padrão de pressão (1000 hPa a 10 hPa) para a vorticidade potencial (cores), vento zonal (linhas pretas) e temperatura (linhas brancas pontilhadas), sendo (a) média dos dias com evento de vírgula sobre a AS e (b) média dos demais dias.

### 3.2. Análise dos eventos

Os campos de coluna total de ozônio para os dias com eventos de vírgula são mostrados na Figura 9. Esses são os dias expressos na Tabela 1 e mostram a situação média diária da CTO no dia em que ocorreu o evento sobre a AS. Vê-se que apenas um caso possui

três dias de ocorrência sobre o continente (dias 10, 11, 12 setembro 1995 – Fig. 9(c, d, e)), sendo ainda o evento com o formato de uma vírgula em maior evidência, assim como também possui os menores valores médios de CTO dentro da grade de interesse, 165 UD, 163 UD, 166 UD, respectivamente. Isso representa uma queda de CTO em relação à média mensal de aproximadamente 35%. Outro caso que possui o formato de vírgula com bastante evidência é 1 outubro 2003, como pode ser observado na Figura 9(f) e com valores bastante baixos de CTO também (média da grade de interesse ~182 UD e porcentagem de queda em relação à média ~29%). Nos demais casos os valores médios da grade da mesma forma se mostram bastante baixos (Tabela 1 – evento 1, 2, 5), este também apresentam um prolongamento do “buraco de ozônio” sobre a América do Sul, como já esperado. O caso 2 tem uma maior porcentagem de queda em relação à média mensal, em torno de 40% (29 agosto 1995 - Figura 9(a)). Mais adiante, com as demais análises essas diferenças serão mais bem esclarecidas.

Um fato interessante a se notar é a variação do cinturão das altas concentrações no campo de CTO que muda de intensidade de um evento para outro. Fato que se deve a evolução da formação do “buraco de ozônio da Antártica”. Em agosto o acúmulo de ozônio em torno de vórtice ainda é recente, assim o cinturão das altas concentrações não tem valores de CTO tão altos quanto em outubro. Isso porque no mês de outubro o “buraco de ozônio” ainda está bem definido e o vórtice teve mais tempo para impedir que a circulação Brewer-Dobson transportasse ar rico em ozônio (vindo dos trópicos) para a região polar (BREWER, 1949; DOBSON, 1968; SCHOEBERL et al., 1992), como se observa nos casos de 2003 (Fig. 9(f, g)). Se o vórtice polar estava mais intenso, conseqüentemente os valores dentro dele ficaram mais baixos, pois Koch et al., (2004) e Kang et al., (2011) afirmam que quanto mais tempo o vórtice permanecer estável, maior será a destruição do ozônio dentro deste, porque com o isolamento a reposição de ozônio pela circulação Brewer-Dobson é cessada e o único mecanismo de produção de O<sub>3</sub> seria através da decomposição do oxigênio pela radiação UV. Pode-se observar que para esses eventos as quantidades de ozônio dentro vórtice são muito semelhantes, porém uma pequena diferença é vista entre os eventos de agosto (Fig. 9(a, b)) e setembro (Fig. 9(c, d, e)), onde este último apresenta valores menores no interior do vórtice, corroborando com os autores. Isso está associado à formação do “buraco” que começou no início do inverno, assim no mês de setembro o isolamento da região polar teve tempo suficiente para diminuir a quantidade de ozônio estratosférico, através que reações químicas com derivados de Cloro, além da falta do mecanismo produtor devido à noite polar (ATCKINSON et al., 1989; BOWMAN, 1990).

Apesar dessa diferença na intensidade, observa-se que em todos os casos a região de maior intensidade do cinturão de altas concentrações da CTO fica do lado oposto ao continente Sul Americano, proporcionando uma situação favorável aos baixos valores sobre este continente, tornando-se uma importante característica dos eventos de vírgula.

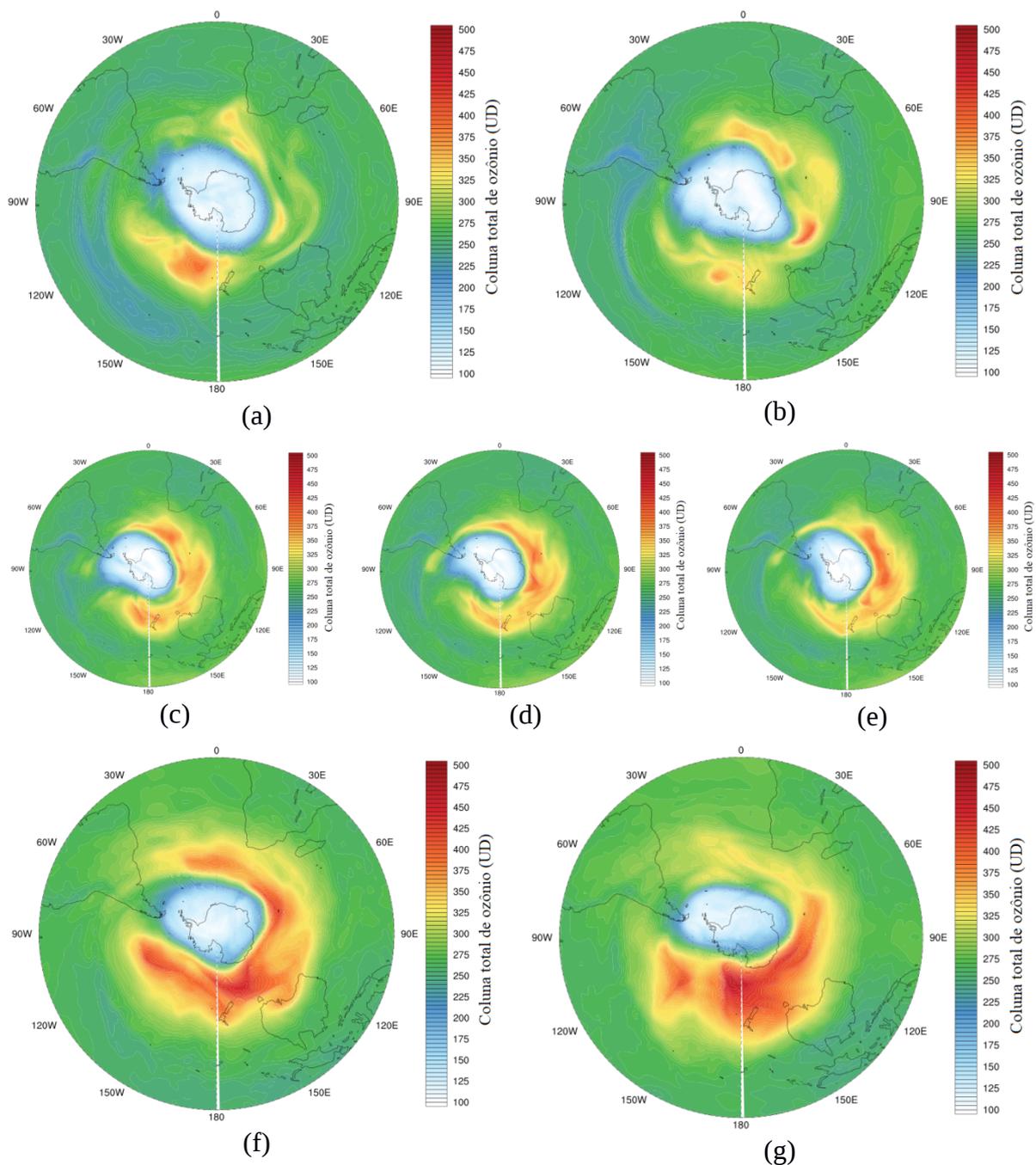


Figura 9 - Campo de coluna total de ozônio para os dias dos eventos de vírgula mostrados na tabela 1. (a) 21 agosto 1995. (b) 29 agosto 1995. (c) 10, (d) 11, (e) 12 setembro 1995. (f) 1 outubro 2003 e (g) 6 outubro 2003.

Foram escolhidos dois eventos da Tabela 1 para um estudo mais aprofundado. O evento 3 (setembro de 1995 – Fig. 9(c, d, e)), pois este apresentou 3 dias seguidos de queda de CTO sobre a AS, com os valores médios da grade de interesse abaixo de 170 UD, sendo que esses valores indicam uma queda de 35% em relação à média mensal dessa grade e os valores nessa época sobre a região da AS variam em torno de 300 UD. Além do mais esse evento possui um formato de vírgula bem definido e os padrões associados a este ainda precisam ser delineados. O evento 5 foi escolhido por ocorrer em outro ano (6 outubro 2003 – Fig. 9(g)) e por possuir queda de 31% em relação a média de outubro sobre a área da grade de interesse e ainda valores médios de CTO dentro da grade de aproximadamente 178 UD.

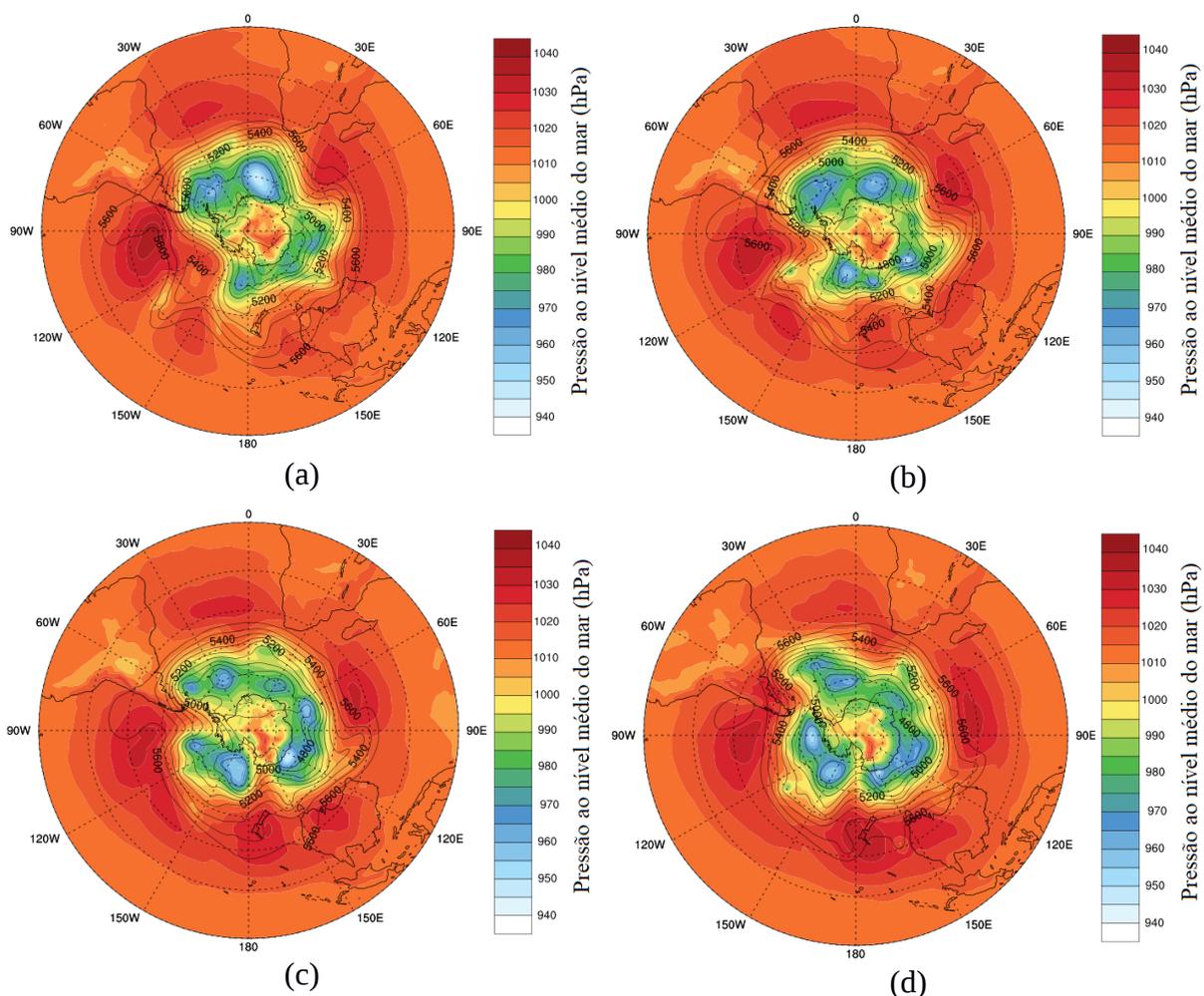
Os campos de pressão ao nível médio do mar (em cores) e altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas) são apresentados para os eventos de setembro 1995 (Fig. 10) e outubro 2003 (Fig. 11). Ao observar a evolução temporal de ambas, algumas semelhanças são percebidas no ciclo de passagem do prolongamento do “buraco de ozônio” sobre a América do Sul. Uma delas é o fortalecimento do Anticiclone sobre o Pacífico Sudeste (localizado aproximadamente em 40°S e 100°W), que atinge o sul da América do sul durante a passagem da vírgula, assim como o deslocamento da Alta do atlântico (em torno de 35°S e 15°W) para leste. Essa alta no Pacífico, no evento de outubro, se mostra com uma configuração do tipo Ômega, com duas baixas pressões a norte de uma alta. Mas em ambos os eventos os anticiclones adentram a AS durante a ocorrência dos eventos de vírgula, com uma grande amplitude entre cavado e crista, que pode ser observada pelas linhas de altura geopotencial em 500 hPa, com o aumento dessa amplitude conforme o dia 0 se aproxima.

Outro destaque são as baixas pressões que se formam entre o extremo sul da América do Sul e a Península Antártica, que se deslocam para o oceano Atlântico no dia 0, ou seja, no dia em que o prolongamento do “buraco de ozônio” atinge a AS, as baixas pressões ao extremo sul da AS são fortalecidas. Iwabe (2008) havia relacionado desenvolvimento de ciclones secundários aos eventos de intrusão de massa estratosférica para dentro da troposfera, sendo que estes ciclones teriam forte intensidade e logo atrás teriam anticiclones bastante expressivos. As respectivas frentes dessas baixas pressões atingem as regiões próximas ao Sudeste e Sul do Brasil. No evento de setembro de 1995, no dia 11 (Fig. 10(d)) a frente encontra-se aproximadamente sobre o Sul do Brasil assim como no dia 6 do evento de outubro de 2003 (Fig. 11(c)).

Um dia após o evento principal (Fig. 10(f) e Fig. 11(d)) foi observada a formação de novos sistemas de baixa pressão entre o extremo sul da AS e a Península Antártica, associadas

a cavados em 500 hPa, porém no caso de outubro de 2003, além do cavado havia um centro de geopotencial com valor de 4800m, sendo que esse sistema seria a baixa do sistema Ômega que estava sobre o Pacífico no dia anterior.

Intensos anticiclones continuam sobre o Pacífico nos casos de setembro de 1995, outubro de 1995, deixando a região do extremo sul da AS estável. Esses anticiclones sobre a AS um dia após o registro do evento de vírgula mostram a ligação entre o conteúdo de baixo ozônio e altas pressões. Peres, (2013) havia relatado que os eventos de baixo ozônio sobre o sul do Brasil ocorriam após a passagem de frentes sobre a região e que durante o evento o que se observava era o estabelecimento de um anticiclone de forte intensidade.



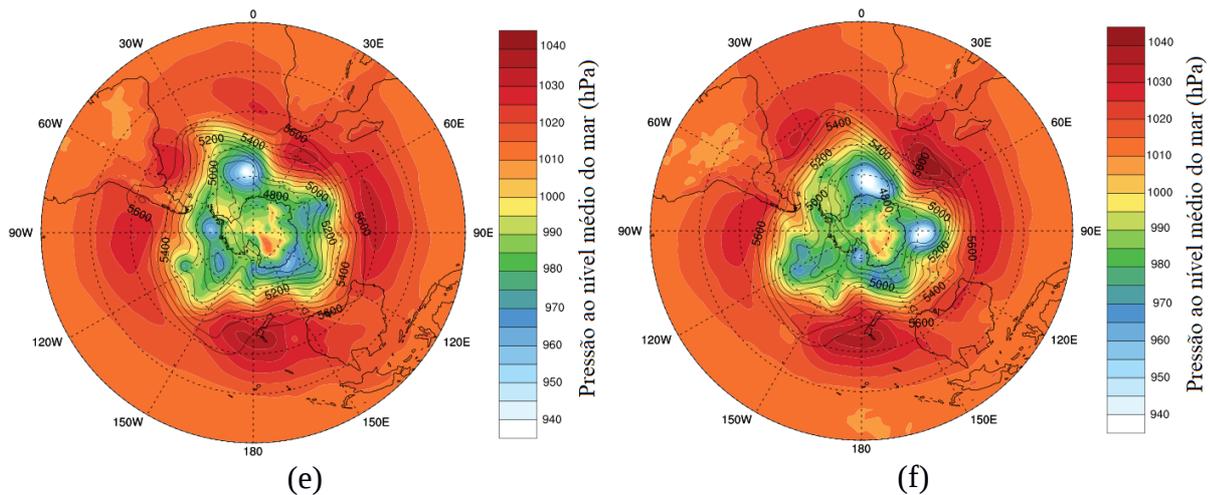


Figura 10 - Pressão ao nível médio do mar – PNMM (cores) e altura geopotencial em 500 hPa para os dias tempos -2, -1, 0, 0, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (e) 13 de setembro de 1995.

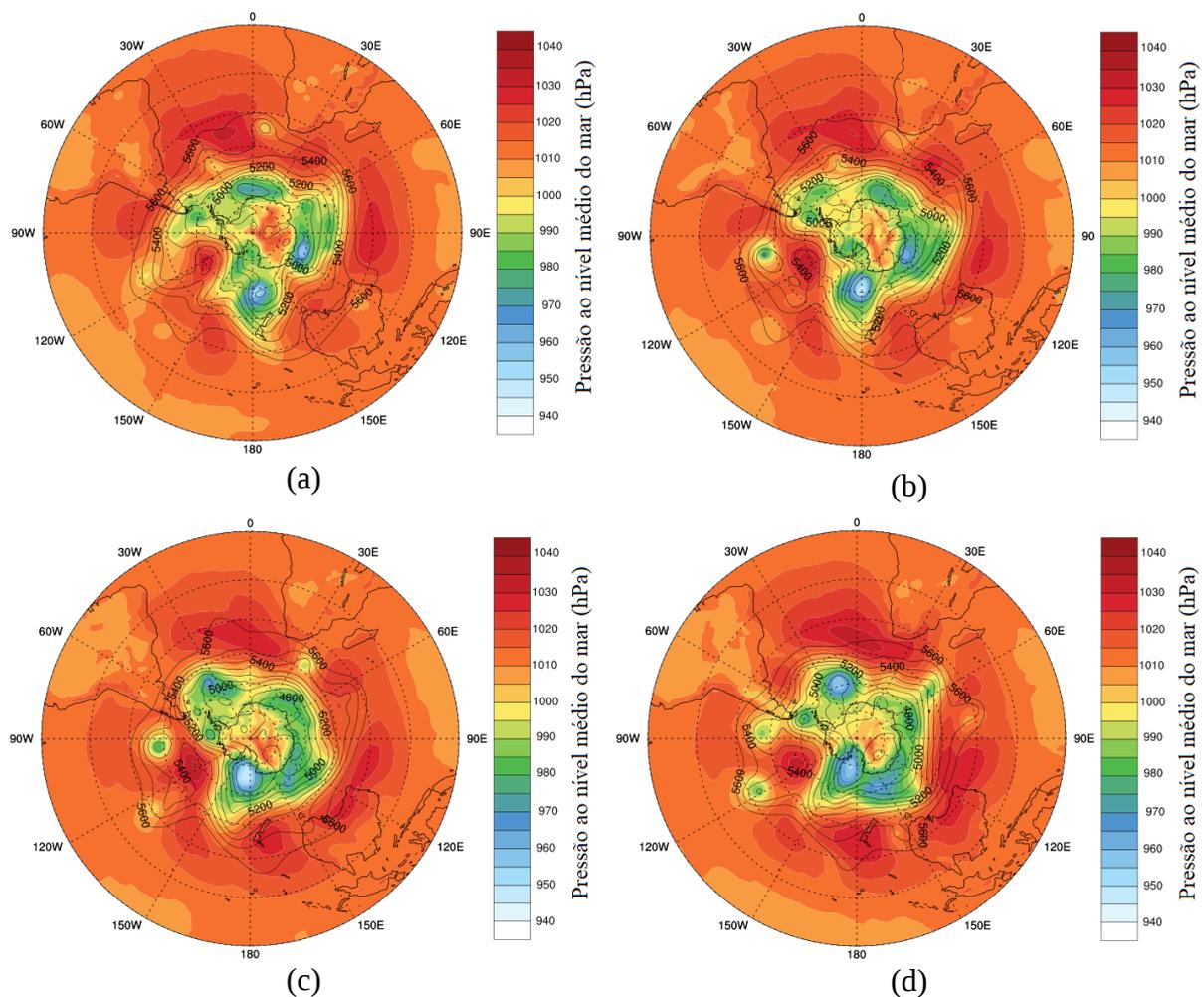
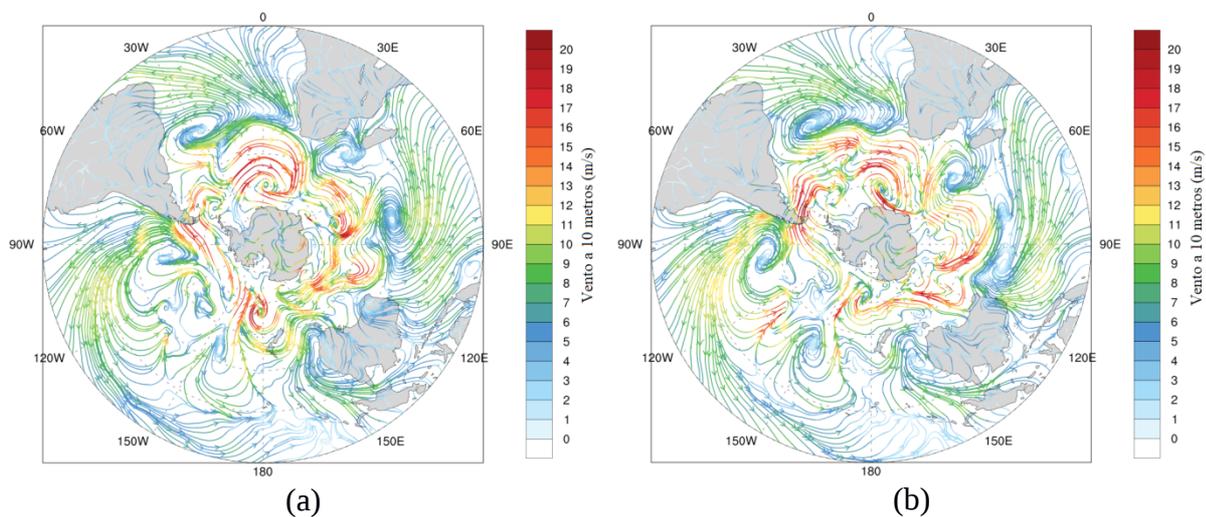


Figura 11 - Pressão ao nível médio do mar – PNMM (cores) e altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas) para os dias tempos -2, -1, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro 2003.

Para confirmar a situação da posição das frentes que cruzaram a América do Sul durante esses dois eventos, são apresentados os campos de linhas de corrente do vento a 10 metros. Em ambos os casos o anticiclone localizado no atlântico move-se na direção leste, afastando-se do continente sul americano conforme o dia 0 se aproxima, dando espaço para o Anticiclone do Pacífico Sudeste, que avança sobre o continente nos dias 11,12 de setembro de 1995 (Fig. 12(d, e)) e 6 outubro de 2003 (Fig.13(c)), deixando a região da grade de interesse estável. Porém, no evento de setembro esse anticiclone que adentrou a AS tem maior intensidade, com valores de PNMM em torno de 1030 hPa (Fig. 10(d, e)), enquanto no evento de outubro tem-se 1018 hPa (Fig. 11(c)). O gradiente do vento a 10 metros mostra a posição das frentes que estavam associada às baixas pressões entre o extremo sul da AS e a Península Antártica. Em ambos os eventos nota-se a baixa pressão deslocar-se para o oceano no dia em que a vírgula atinge a AS, com suas frentes sobre o sul do Brasil, ou seja, quase fora da grade de interesse. Nos dias -2 e -1 estas frentes se encontravam sobre o Uruguai, mostrando que nos dias anteriores ao evento havia a passagem de frentes sobre a região da grade. Este fato corrobora com a teoria de que os eventos de baixo ozônio estejam associados à região pós-frontal (PERES, 2013), tendo o estabelecimento de um anticiclone logo após sua passagem (IWABE, 2008; PERES, 2013).



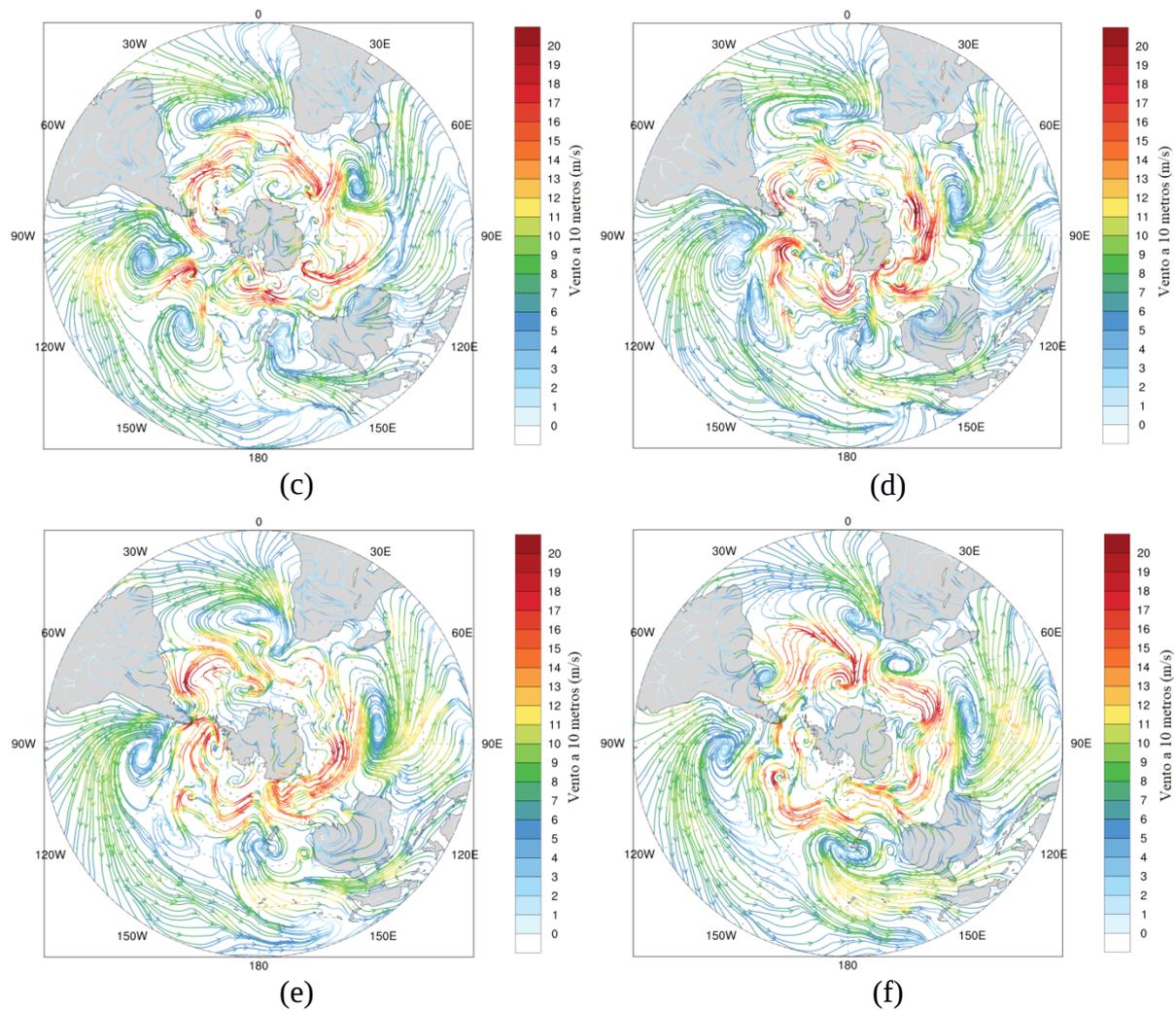
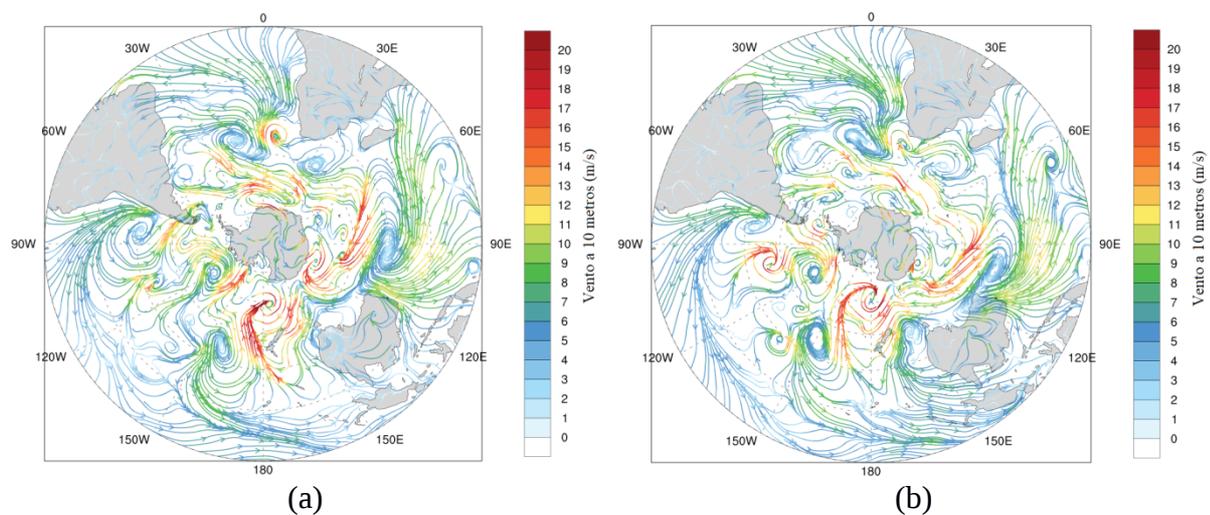


Figura 12 - Linhas de corrente para vento a 10 metros nos tempos -3, -2, -1, 0, +1, +2 que são referentes aos dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (e) 13 de setembro 1995.



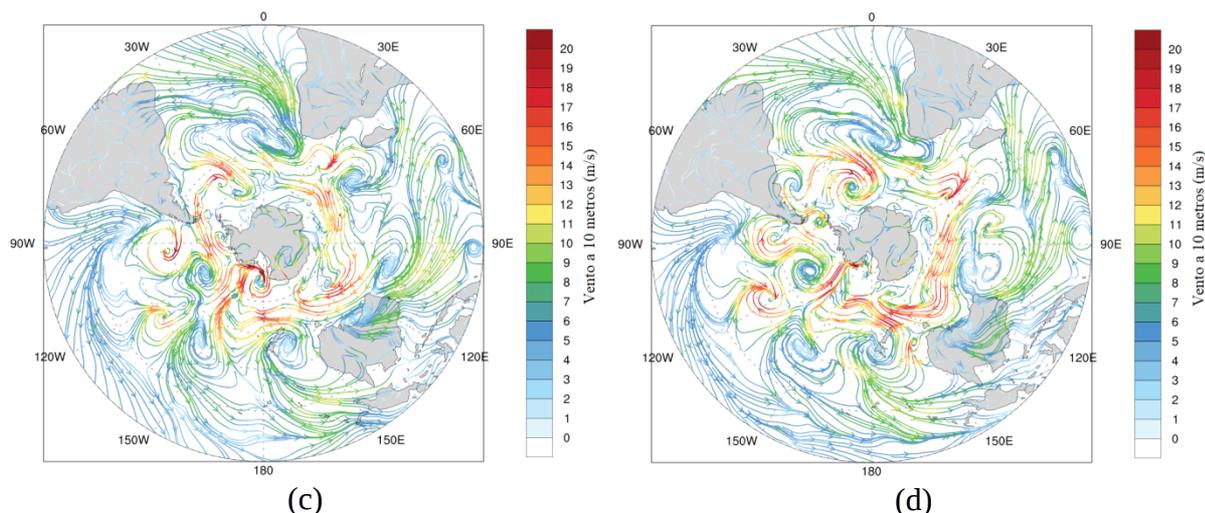


Figura 13 - Linhas de corrente para o vento a 10 metros para os dias tempos -2, -1, 0, +1, que são referentes aos dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro 2003.

Para ambos os eventos analisados, o vento zonal em 200 hPa (Fig. 14 e 15) mostra o fortalecimento do Jato de Altos Níveis no Atlântico Sul próximo ao extremo sul da AS, com sua jusante (zona ativa do Jato) levando energia dos trópicos para os sistemas de baixa pressão em superfície que se formaram entre o extremo sul da AS e a Península Antártica. A intensificação do JAN mostra uma região propícia a eventos de intrusão, pois segundo alguns autores (KUNZ; SPETH, 1997; FONTINELE, 2012; PERES, 2013) o JAN auxilia o transporte de ozônio estratosférico, através da quebra da tropopausa, ou seja, colabora para a ocorrência dos eventos de intrusão.

Conforme se aproxima o dia 0, nota-se a formação de um dipolo de ventos de oeste (núcleo em vermelho – valores positivos – Fig. 14(c, d, e)) e ventos de leste (núcleo em azul – valores negativos – Fig. 15(c)). Esse dipolo fica exatamente sobre a área de entrada do prolongamento do “buraco de ozônio” sobre a AS, como visto na Figura 9(c, d, e, g) e consiste em dois núcleos opostos, um com fortes ventos de oeste (em torno de 40m/s) e outro com a reversão destes ventos. Porém nessa altitude fica localizada a tropopausa e esse dipolo pode ser um indício da sua quebra, pois essa distinção entre os sentidos dos ventos pode representar a amplificação das ondas de Rossby, que quando ganham amplitude suficiente podem quebrar. Como visto anteriormente na análise do corte vertical na latitude de 50°S, a entrada de ar estratosférico para troposfera incide vorticidade ciclônica para as camadas mais baixas (IWABE, 2008). Dessa forma, a relação entre a forçante dinâmica, que a intrusão de ar estratosférico causa na troposfera, junto a uma zona baroclínica em superfície favorece a formação desses ciclones secundários de forte intensidade, devido à formação de uma camada de vorticidade ciclônica por toda a troposfera. Um dia após a passagem do evento de vírgula

sobre o continente, para ambos os eventos (dia 13 de setembro de 1995 - Fig. 14(f) e dia 7 de outubro de 2003 – Fig.15(d)) a configuração de dipolo se desfaz sobre o continente, relacionando o dipolo diretamente aos eventos de vírgula sobre a América do Sul.

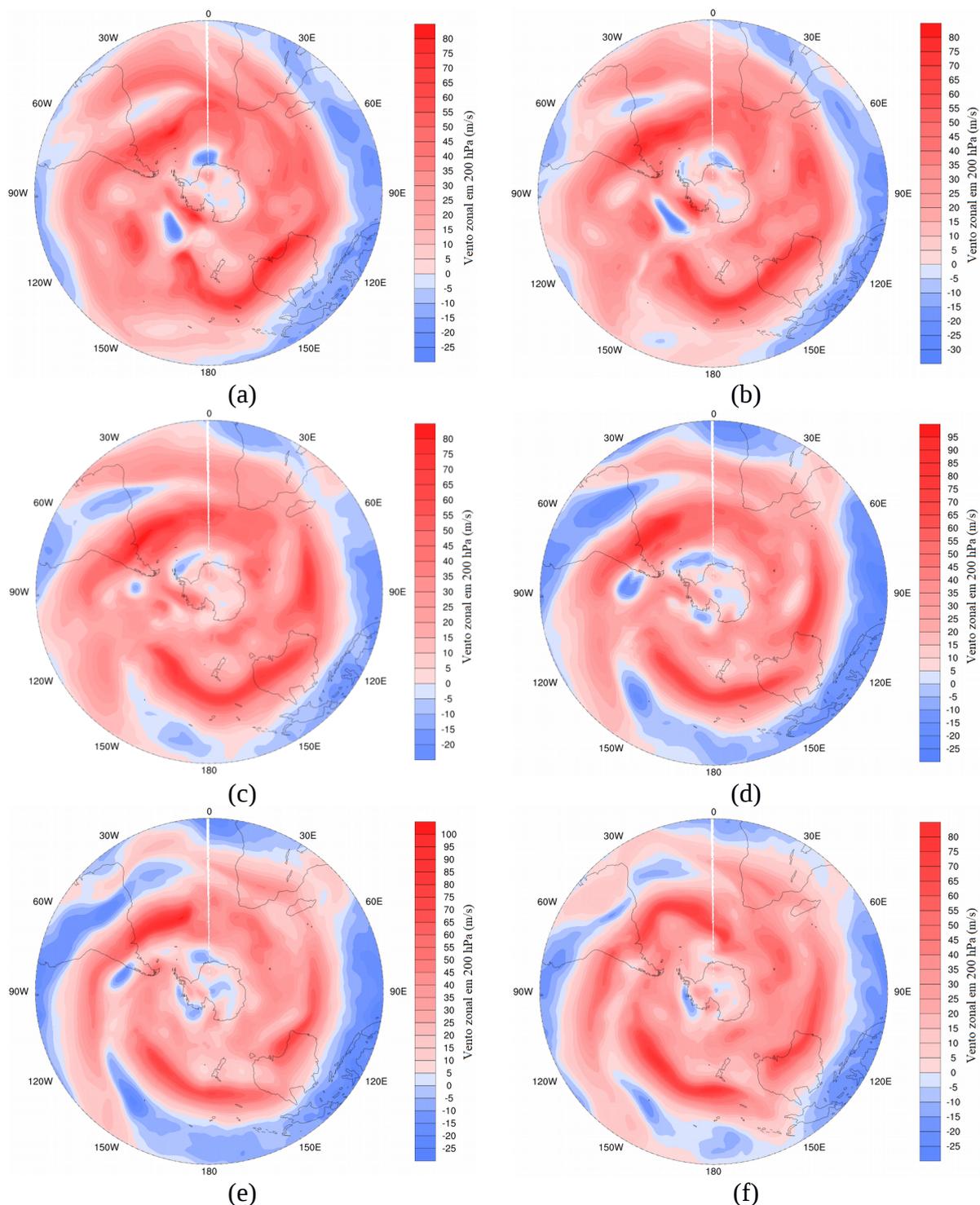


Figura 14 - Vento zonal no nível de 200 hPa para os dias (a) 8, (b) 9, (c) 10, (d) 11, (e) 12 e (f) 14 de setembro de 1995.

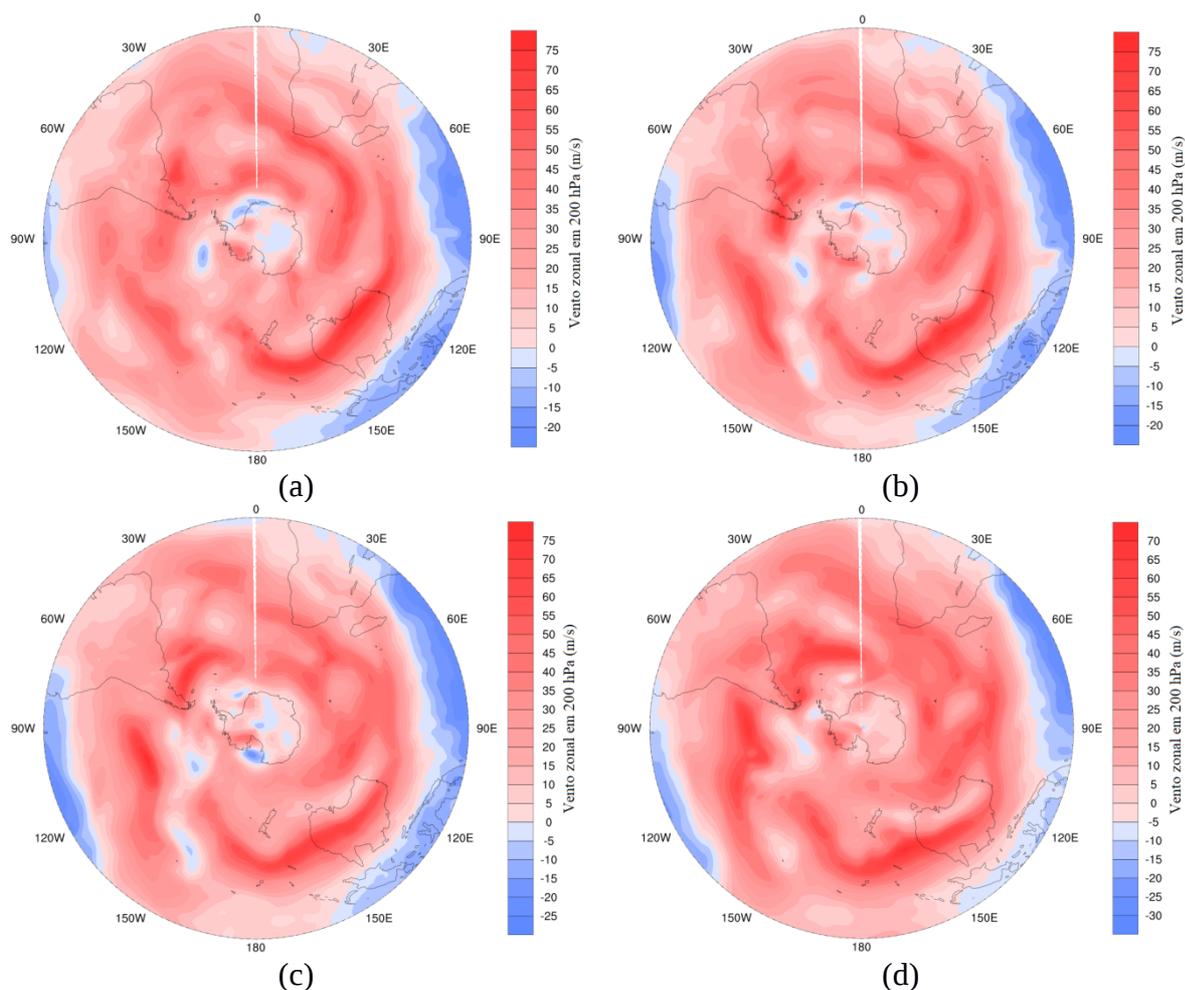


Figura 15 - Vento zonal no nível de 100 hPa para os dias (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7 de outubro de 2003.

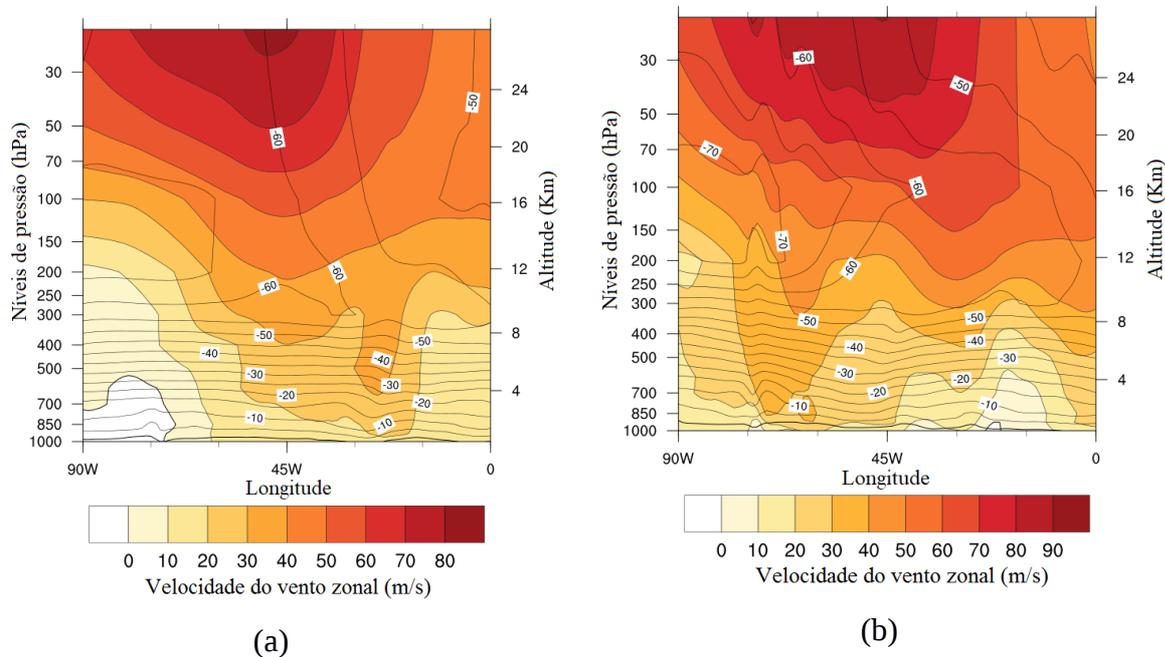
### 3.3. Análise do campo vertical

Na análise do corte vertical dos campos de vento zonal e temperatura, entre os níveis de pressão de 1000 e 10 hPa, os valores positivos (negativos) nos gráficos da Figuras 16 e 17 indicam que uma configuração de ventos de Noroeste – NO (Sudoeste – SO). Visualizando as figuras, quando os ventos de SO ficam a esquerda dos ventos de NO indicam a posição do vórtice, ou seja, a posição do seu prolongamento sobre latitudes mais baixas (o “braço” da vírgula sobre o continente). Os ventos nas correntes do vórtice chegam a 80 m/s e ficam a uma altitude aproximada de 30 hPa (~28 Km).

Nos dias principais de ambos os eventos (dia 0 - Fig. 16(d) e Fig. 17(c)) é possível observar através da posição da corrente de vento de NO que o prolongamento do “buraco de ozônio” situa-se sobre a América do Sul. Entre a corrente de ventos de NO e de SE nota-se a presença de um gradiente no campo de vento zonal, que fica mais intenso conforme se aproxima o dia principal dos eventos, isso porque a situação observada na superfície,

corroborar com a análise dos campos de pressão ao nível do mar na Figura 9, que mostrou o estabelecimento de um anticiclone durante a atuação da vírgula sobre a AS. A corrente de ventos de NO atinge altitudes menores conforme o dia 0 se aproxima, mostrando a ligação estratosfera-troposfera. Esse forte gradiente demonstra que a grande amplitude de onda não ocorre somente no plano horizontal como visto nos campos anteriores, como também no plano vertical, remetendo uma quebra de onda tridimensional. Outros autores já haviam relatado sobre essa amplificação das ondas de Rossby devido ao enfraquecimento ou até mesmo reversão dos ventos de oeste (POSTEL; HITCHMAN, 1999), assim como esse ganho de amplitude pode corresponder a uma zona de quebra (THORNCROFT et al., 1993, BARAY et al., 2000). Dessa forma, pode-se concluir claramente que nos eventos de setembro 1995, outubro 2003 ocorre quebra da onda de Rossby pelo enfraquecimento dos ventos de oeste, que causaram sua amplificação.

O núcleo de baixas temperaturas ( $\sim -70^{\circ}\text{C}$ ) que fica situado a oeste da corrente de ventos de NO, se move junto ela. Essas baixas temperaturas remetem ao interior do vórtice e a escassez de ozônio na estratosfera do vórtice Antártico, pois como alguns autores relataram anteriormente, quanto menor a quantidade de ozônio dentro do vórtice, menor a temperatura (KOCH et al., 2004; KANG et al., 2011).



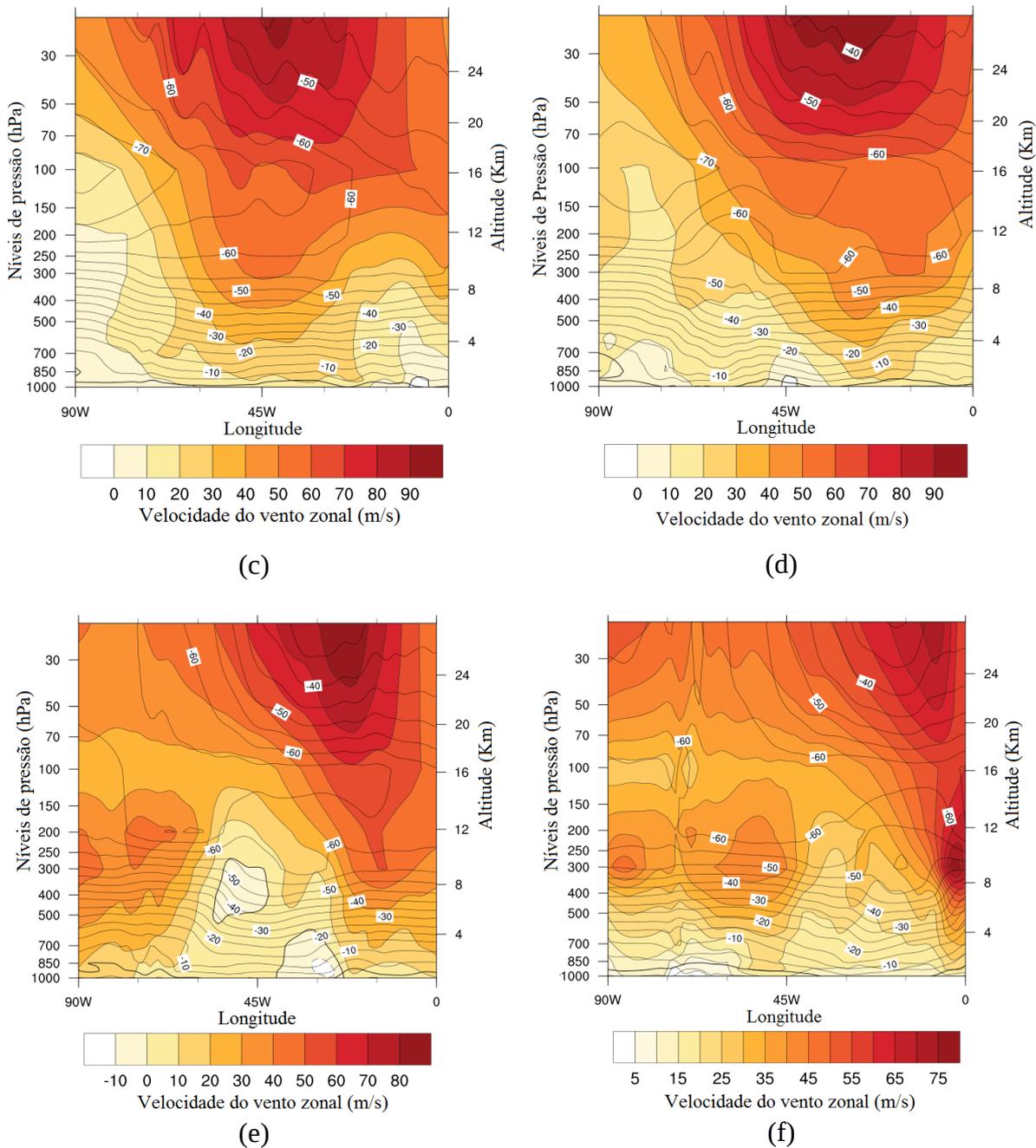


Figura 16 - As cores indicam o Vento Zonal em m/s e as linhas pretas indicam temperatura, em °C, em um corte vertical na latitude de 50°S e variando entre as longitudes de -90°W e 0, para o dia do evento (a) 8, (b) 9, (c) 10 (d) 11, (e) 12 e (f) 13/09/1995.

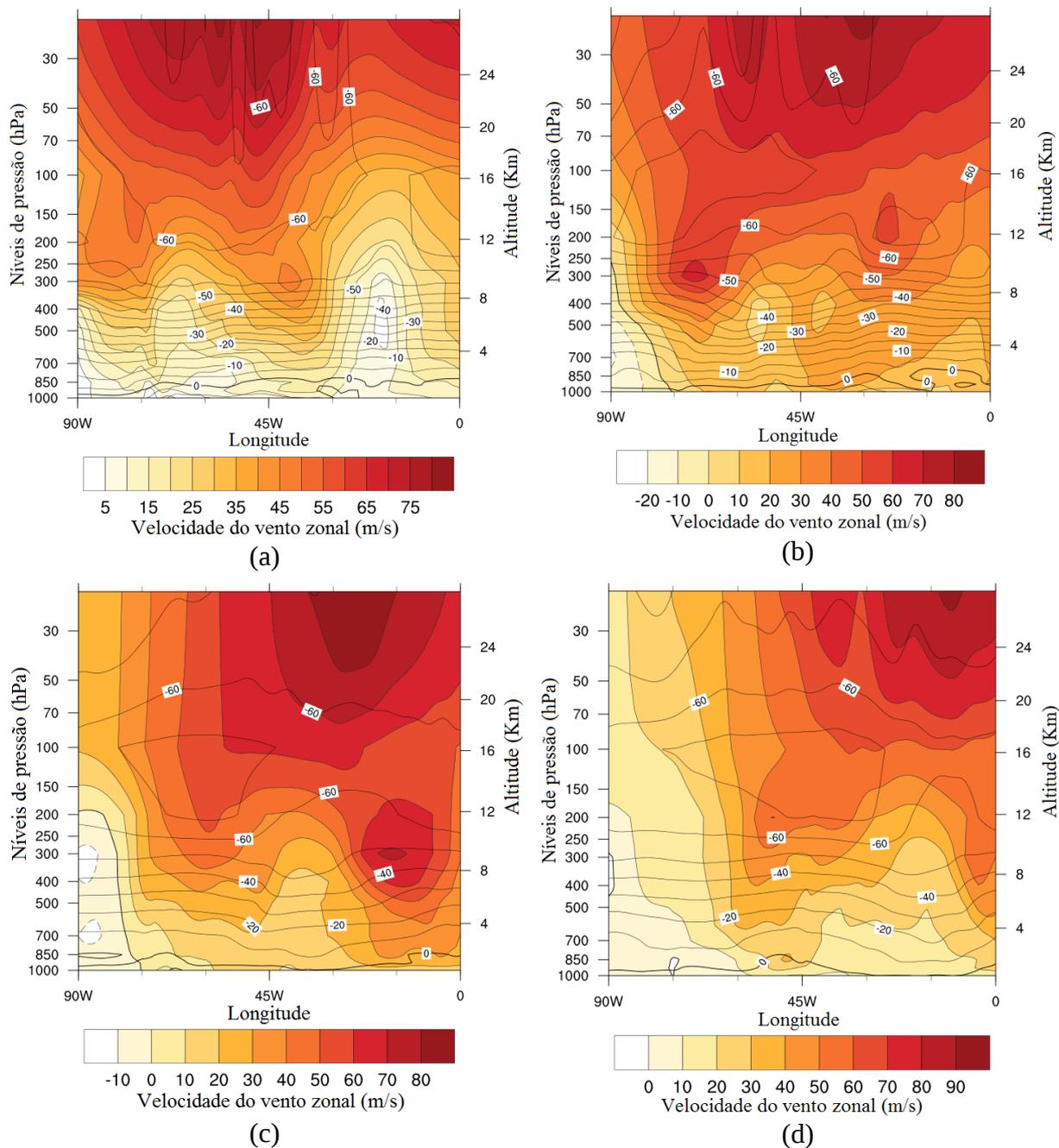


Figura 17 - As cores indicam o Vento Zonal em m/s e as linhas pretas indicam temperatura, em  $^{\circ}\text{C}$ , em um corte vertical na latitude de  $50^{\circ}\text{S}$  e variando entre as longitudes de  $-90^{\circ}\text{W}$  e  $0$ , para o dia do evento (a) 4, (b) 5, (c) 6 e (d) 7/10/2003.

#### 4. Conclusões

Foram catalogados 122 dias em que o evento de vírgula atingiu a região da grade de interesse, ou seja, 122 dias em que valores menores de 220 UD, que delimitam a borda do “buraco de ozônio” atingiram a região sul da América do Sul. Pelos valores médios da grade de interesse, constatou-se que a partir do ano de 1991 essas médias começaram a aparecer com valores menores que 220 UD, sugerindo a expansão do “buraco de ozônio, devido a sua

maior destruição pelo acúmulo de CFCs na estratosfera da Antártica. Alguns eventos apresentaram valores muito abaixo da média da grade de interesse e ocorreram nos anos de 1995 e 2003, que coincidindo com anos de El Niño. Os picos do El Niño ocorreram pelo menos 6 meses antes desses eventos de vírgula e como em relatos anteriores, o fenômeno contribui para um aumento nas quebras da tropopausa e conseqüentemente aumento dos eventos de intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera, pois esse influi sobre a intensidade do JAN.

A análise dos campos médios mostra que CTO durante os eventos de vírgula fica em torno de 300 UD, enquanto para os dias sem evento esses valores ficam em torno de 350 UD. O cinturão das altas concentrações apresentou-se mais intenso durante os eventos, parecendo sofrer um tipo de “compressão” ao longo da faixa de latitude, deixando o O<sub>3</sub> mais rarefeito sobre a América do Sul. Observa-se também o decaimento de CTO dentro do “buraco de ozônio” durante os eventos, que pode ser atribuído à expansão do vórtice Antártico e quebra da tropopausa, que deixa o já escasso ozônio escapar.

Durante os eventos, os campos médios de superfície mostraram o deslocamento do anticiclone do Atlântico sul para leste, aproximando-se mais da costa da África, assim como a presença de um pequeno anticiclone na costa do Rio da Prata e o enfraquecimento da alta do Pacífico sudeste. Ao sul do Rio da Prata um declínio de PNMM pode indicar a presença de sistemas de baixa pressão durante os eventos, assim como a passagem de frentes frias, diferentemente das baixas pressões em torno do continente Antártico, que ficam menos intensas. Os campos médios de vento a 10 metros mostraram um enfraquecimento dos ventos de oeste em torno do Polo. O sobre a AS e oceano Atlântico adjacente o Jato de Altos Níveis fica mais fraco durante os eventos de vírgula ( $\sim -5\text{m/s}$ ), enfraquecimento que colabora para o ganho de amplitude das ondas de Rossby e conseqüentemente para sua quebra.

O corte vertical na latitude de 50°S mostra a deformação no campo de VP, que sofre um aumento dos valores em módulo, em torno de 70 hPa (20 Km). O vento zonal no corte vertical mostra uma corrente de ventos de oeste que representa a borda do vórtice Antártico, numa altitude de  $\sim 30$  hPa (28 Km), aproximadamente a mesma altitude da camada de ozônio nessa região e fica a leste da deformação de VP, mostrando uma defasagem. Assim concluiu-se que, o campo de vento zonal parece ser mais eficiente na busca pela localização das bordas do vórtice Antártico e a posição do “buraco de ozônio”. Um núcleo com temperatura aproximadamente constante ( $\sim -64^\circ\text{C}$ ) representa a posição da tropopausa e se localiza ligeiramente a leste da corrente de vento de oeste que representa o vórtice polar, entre 12 e 16 Km, porém esse núcleo não é observado no campo médio dos dias sem vírgula, assumindo-se

assim que durante os eventos há um resfriamento na região da tropopausa sobre a região atingida pelo baixo ozônio.

Os eventos dos dias 10, 11 e 12 de setembro de 1995 e 6 de outubro de 2003 foram escolhidos para uma análise mais detalhada, sendo que o primeiro teve o formato de vírgula bem definido. O cinturão das altas concentrações apresentou-se semelhante em ambos os casos, com seu lado mais intenso no lado oposto a AS e as diferenças na sua intensidade se devem a evolução do “buraco de ozônio” entre os meses de agosto a novembro, juntamente com a circulação Brewer-Dobson. No dia -1 a alta no Pacífico começava a ganhar força e atinge o sul da AS no dia 0, sendo que para outubro a alta pertencia a uma configuração Ômega localizada no Pacífico sudeste. A alta do Atlântico sofre um enfraquecimento e se desloca para leste. No dia 0 para ambos os eventos, o anticiclone no Pacífico ganha força e começa a adentrar a AS e observa-se uma grande amplitude de onda entre o cavado e a crista, favorecendo a quebra de ondas e a interação troposfera-estratosfera. Entre o sul da AS e Península Antártica observou-se o desenvolvimento de sistemas de baixa pressão associados à região ativa do jato, que se fortalecem e migram para o Atlântico no dia 0. O fortalecimento é ligado à incidência de vorticidade ciclônica em altos níveis, devido ao evento de intrusão e suas frentes a partir do dia 0 ficam fora da grade interesse. Assim conclui-se que os eventos de vírgula estão ligados a uma região pós-frontal com o estabelecimento de um anticiclone no dia que atingem o sul do continente sul americano. No dia +1 os anticiclones continuam intensos e começa a formação de novas baixas pressões entre o sul da AS e a Península Antártica. Em 200 hPa pelo campo de vento zonal, observou-se um dipolo sobre a região da grade de interesse, com núcleo de ventos de oeste e outro núcleo reverso a sudoeste, mostrando uma região propícia à quebra das ondas de Rossby. O aumento observado no fluxo do JAN durante os eventos de vírgula auxilia o transporte de massa entre estratosfera-troposfera.

A análise do corte vertical em 50°S possibilitou compreender melhor a interação do vórtice polar com a superfície. A corrente de ventos de NO indica a posição do vórtice polar e tem velocidade de ~80 m/s em nível de 30 hPa (28 Km) localizada leste da AS, mostrando que o prolongamento do “buraco de ozônio” se encontra sobre o continente. Entre as correntes de NO e SE observa um gradiente no campo de vento zonal, que fica mais intenso conforme o dia 0 se aproxima, assim como a corrente de NO sofre um rebaixamento, mostrando o caminho da interação estratosfera-troposfera. Como esse gradiente foi observado tanto no plano horizontal como vertical, assim conclui-se a tridimensionalidade da quebra de onda. Desta maneira podemos concluir que os estudos sobre interação troposfera-estratosfera são importantes não somente para os eventos troposféricos, mas também para os eventos

estratosféricos como o evento de vírgula da camada de ozônio. Pois como mencionado anteriormente, o conteúdo da camada de ozônio é muito importante para a vida na superfície.

## 5. Referências

ANDREWS, D. G. HOLTON J. R.; LEOVY, C. B. In *Middle Atmosphere Dynamics*, p.489. Academic, San Diego, Calif. 1987.

ATCKINSON, R.J.; MATTHEWS, W.A.; NEWMAN, P.A.; PLUMB, R.A. Evidence of Mid-Latitude Impact of Antarctic Ozone Depletion, **Revista Nature**, v.340, n.6231, p.290-293, jul. 1989.

BARAY, J.-L., DANIEL, V., ANCELLET, G., AND LEGRAS, B.: Planetaryscale tropopause folds in the southern subtropics, **Geophysical Research Letters**, v.27, p.353–356, doi:10.1029/1999GL010788, 2000.

BERTAGNOLLI, C.; POSSANI, G.; PINHEIRO, D. K.; FERREIRA, N. J.; SCHUCH, N. J. “Observação de Perturbações do Buraco de Ozônio Antártico na Região Central do Rio Grande do Sul no Ano de 2000 através de Ondeletas”. CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, 21. 2006. Ijuí-RS. **Anais...Ijuí-RS**, 2006.

BOWMAN, K.P. Evolution of the total ozone field during the breakdown of the Antarctic circumpolar vortex, **Journal of Geophysical Research**, v.95, n.10, p.16529-16543, 1990.

BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.75, p.351-363, 1949.

BRONNIMANN, S.; LUTERBACHER, J.; STAEHELIN, J.; SVENDBY, T. M.; HANSEN, G.; SVENOE, T. Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940-42 related to El Nino. **Nature**. v.431, p.971-974. DOI: 10.1038/nature02982. 2004.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo – SP. Oficina de textos. 464p. 2009.

CHUBACHI, S. Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. **Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jpn. Spec.**, v. 34, p. 13-20, 1984.

CONRADO, H.; MARIANO, G. L.; CARVALHO, L. C. Veranicos no Rio Grande do Sul – Nova metodologia para quantificação de eventos. **Revista Ciência e Natura**. v.36, n.2, p.445-455. Doi: 10.5902/2179460X13152. 2014.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

DOBSON, G.M.B. **Ozone in the Atmosphere**. Exploring the Atmosphere. 2ed. Oxford: University Press, 1968.

DOUGLASS, A. R.; SCHOEBERL, M. R.; STOLARSKI, R. S.; WATERS, J. W.; RUSSEL III, J. M.; ROCHE, A. E.; MASSIE, S. T. Interhemispheric differences in springtime production of HCl and ClONO<sub>2</sub> in the Polar Vortices. **Journal Geophysical Research Atmospheric**. v.100, n. D7, p.13967-13978. Doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00698>.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J., D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. **Revista Nature**, v. 315, p. 207-210, mai. 1985.

FELDSTEIN, S. B. Subtropical Rainfall and the Antarctic Ozone Hole. **Atmospheric Science**, v.332, n.6032, p.925-926, 2011.

FONTINELE, J. L. **Envelopamento da tropopausa no Sul da América do Sul: Relações entre a corrente de jato em altos níveis e a coluna total de ozônio**. 2012.f.84. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **American Meteorological Society**. v.119, p.1293-1302. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2). 1991.

GUARNIERI R. A.; GUARNIERI F. L.; CONTREIRA D. B.; PADILHA L. F.; ECHERE.; PINHEIRO D. K.; SCHUCH A. M. P.; MAKITA K.; SCHUCH N. J. Ozone and UVB radiation anticorrelations at fixed solar zenith solar angles in southern Brazil. **Geofísica Internacional**, v.43, n.1, p.17-22. 2004.

IWABE, C. M. N. **Intrusão estratosférica associada com ciclogênese na Costa do Sul do Brasil: Uma análise utilizando o conceito de vorticidade potencial**. 2008. f.108. Dissertação: Mestrado em Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas – São Paulo – Brasil.

JONES, A. E., AND J. D. SHANKLIN. Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985. **Nature**. v.376, p.409-411, 1995.

KANG, S. M.; POLVANI, L. M.; FYFE, J. C.; SIGMOND, M. Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation. **Science**, v.332, p.951-954, 2011.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N.J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J.M. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. **Atmospheric Environment**, v.30, n.9, p.1481-1488, 1996.

KOCH, G.; WERNLI, H.; BUSS, S.; STAEHELIN J.; PETER, T.; LINIGER, M. A.; MEILINGER, S. Quantification of the impact in mid-latitudes of chemical ozone depletion in the 1999/2000 Arctic polar vortex prior to the vortex breakup. **Atmospheric Chemistry and Physics**. v.4, n.2, p.1911-1940. Doi: <https://doi.org/10.5194/acpd-4-1911-2004>. 2004.

KUNZ, H.; SPETH, P. Variability of near-ground ozone concentration during coldfront passages a possible effect of tropopause folding events. **Journal of Atmospheric Chemistry**. v.28, p.77-95. 1997.

- LIMPASUDAVAN, V.; THOMPSON, D. W. J.; HARTMANN, D. L. The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warming. **Journal of Climate**. v.17, p.2584-2596. 2004.
- MCINTYRE, M. E.; PALMER, T. N. Breaking planetary waves in the stratosphere. **Nature**. v.305, p.593-600, 1983.
- MENDES, D.; SOUZA, E. P.; MARENGO, J. A.; MENDES, M. C. D. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 100, n. 3, p. 239-250, 2010.
- MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. Predicted present stratospheric abundances of chlorine species from photodissociation of carbon tetrachloride. *Journal Geophysical Research Letters*. v.1, p.309-312, issue.7. DOI: 10.1029/GL001i007p00309. 1974.
- NEWMAN, P. A.; RANDER, W. J. Coherent ozone-dynamical changes during the Southern Hemisphere spring, 1979-1986. **Journal Geophysical Research**. v.12, p.585-12,606. 1988.
- PERES, L. V. **Efeito secundário do buraco de ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil**. 2013. 178f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- POSTEL, G. A.; HITCHMAN, M. H. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. **American Meteorological Society**. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin. Wisconsin. v.56, n.3, p.359-373. 1999.
- PRATHER M.; JAFFE H. Global impact of the Antarctic ozone hole: chemical propagation. **Journal of Geophysical Research**. v.95, p.3413-3492.1990.
- REED, R.J. A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. **Journal of Meteorology**. v.12, p.226-237. 1955.
- SALBY M.L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. International Geophysics Series. v.61. Academic Press. 1995.
- SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E. The structure of the polar vortex. **Journal of Geophysical Research**. v.97, p.7859-7882,1992.
- SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**. v.37, n.3, p.275-316, 1999.
- STRAHAN, S. E.; DOUGLASS, A. R. Decline in Antarctic Ozone Depletion and Lower Stratospheric Chlorine determined from Aura Microwave limb Sounder Observations. **Geophysical Research Letters**. v.45, n.1, p.382-390. Doi: 10.1002/2017GL074830.
- THORNCROFT, C. D.; HOSKINS, B. J.; MCINTYRE, M. E. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. *Royal Meteorological Society*. v.19, n.509, p.17-55. DOI: 10.1002/qj.49711950903. 1993.

TRENBERTH, K. E.; OLSON, J. G. Temperature trends at the South Pole and McMurdo Sound. **Journal of Climatology**. v.2, p.1196-1206, 1989.

WHO - World Health Organization. **Ultraviolet radiation**. Environmental Health Criteria160, Geneva, 1994.

VOUGARAKIS, A.; HADJINICOLAOU, P.; PYLE, J. A. Increases in global tropospheric ozone following an El Nino event: examining stratospheric ozone variability as a potential driver. **Royal Meteorological Society**. v.12, n.2, p.228-232. Doi: <https://doi.org/10.1002/asl.318>. 2011.

ZENG, G.; PYLE, J. A. Influence of El Niño Southern Oscillation on stratosphere/troposphere exchange and the global tropospheric ozone budget. **Geophysical Research Letter**. v.32: L01814, DOI:10.1029/2004GL021353. 2005.

ZEREFOS, C. S.; BAIS, A. F.; ZIOMAS, I. C.; BOJKOV, R. D. On the relative importance of quasi-biennial oscillation and El Nino/Southern Oscillation in the revised Dobson total ozone records. **Journal of Geophysical Research**. v.97, p.10135-10144. Doi:<https://doi.org/10.1029/92JD00508>. 1992.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados relatados em ambos os artigos, os quais foram realizados para o mesmo período, pode-se concluir que, os eventos de vírgula são bastante significativos sobre a América do Sul. Além de esses eventos serem visualizados no campo médio para os dias catalogados como eventos de vírgula, também foram reparados no campo médio para o período todo e no campo médio para os dias sem evento de vírgula. Sendo que durante os eventos os valores de coluna total de ozônio sobre o continente em questão baixavam consideravelmente, chegando a quedas de aproximadamente 35% em relação à média mensal e nos outros dois casos são bastante semelhantes. Os valores de CTO dentro do “buraco de ozônio” também diminuía durante os eventos de vírgula. As análises de caso puderam reforçar essas conclusões, mostrando claramente a posição do cinturão das altas concentrações no lado oposto a América do Sul, deixando sobre o continente valores anormalmente baixos e por causa de uma espécie de “compressão” do cinturão os valores neste ficam mais altos.

Quando ocorria um evento de vírgula observava-se que a temperatura em 100 hPa, sobre a AS diminuía e que os ventos de oeste eram deformados, de modo que, a mistura entre a massa vinda da Antártica e as demais latitudes ocorria com maior facilidade. O vento zonal em 200 hPa mostrou que o Jato de Altos Níveis sofre um deslocamento para sul quando ocorre eventos de vírgula, sendo que este fato foi relatado tanto na análise dos padrões médios como nas análises de caso. Porém, um dia antes dos eventos observa-se que o Jato enfraquece a oeste da AS e dessa forma colabora para a amplificação e quebra das ondas de Rossby e da tropopausa, por onde ocorrem os eventos de intrusão de massa estratosférica para a troposfera. Outro fato que corrobora com a ideia da quebra das ondas é o dipolo observado no vento zonal em 200 hPa, que mostra a reversão dos ventos de oeste na região da grade de interesse. No dia do evento, ou seja, no dia que a vírgula atingiu a AS, o jato sobre o Atlântico (a sudeste da AS) se encontra fortalecido, facilitando o transporte de massa estratosfera-troposfera. Um dipolo de Vorticidade potencial em 600 K foi notado sobre o oceano Atlântico Sul, representando a advecção de massa e o ganho de amplitude das ondas de Rossby. O corte vertical mostrou que VP sofre alterações entre os níveis da atmosfera, indicando que essa mistura de massa ocorre de forma vertical e horizontal.

Houve mais eventos de vírgula para o mês de outubro e novembro do que para agosto e setembro. Eventos com O<sub>3</sub> muito abaixo da média mensal foram observados para os anos de

1995 e um em 2003, que coincidem com anos de El Niño, sendo que este contribui para os eventos de intrusão, através do fortalecimento do JAN. Todos os eventos ocorreram mais de 6 meses após o pico do fenômeno El Niño.

As análises dos campos de superfície revelaram que um dia antes dos eventos em que a vírgula está bem definida, há um sistema de baixa pressão sobre o Atlântico a sudeste da AS, acoplado a jusante do JAN, bem como sistemas de alta pressão sobre o Pacífico. No dia do evento, os anticiclones que estavam no Pacífico adentram o continente sul americano e o anticiclone do Atlântico se move para leste conforme o dia do evento se aproxima. No dia seguinte ao dia principal do evento de vírgula, a corrente de Jato de Altos Níveis enfraquece, e os anticiclones continuam intensos sobre a AS.

Verticalmente, a corrente de ventos de oeste encontra-se mostra a posição do vórtice. A interação entre troposfera e estratosfera pode ser percebida no corte vertical, onde a corrente de ventos de oeste sofre um rebaixamento de altitude, que vai desde o nível de 10 hPa até 200 hPa. Ainda sobre a análise vertical, um gradiente no campo de vento zonal foi observado entre as correntes de vento de NO e SE, indicando a grande amplitude da onda. Podendo concluir assim a interação do padrão de vírgula com os anticiclones na troposfera.

Sabe-se que a média pode não ser a melhor representação para a grade de interesse, porém o propósito deste trabalho era apenas selecionar casos de baixo ozônio sobre a América do Sul para realizar as análises. Dessa forma, sugere-se futuramente a utilização de métodos mais sofisticados para analisar de forma mais específica à distribuição dos dados e dos eventos de vírgula.

Além disso, outra análise interessante seria um corte vertical meridional nos campos de divergência, em diferentes latitudes, a fim de diagnosticar o trânsito de massa entre estratosfera e troposfera, ou ainda um corte vertical latitudinal também poderia gerar resultados interessantes na análise do deslocamento do Jato de Altos Níveis e do vórtice polar.

## REFERÊNCIAS

- ANDRÉ, I.R.N.; FERREIRA, N.J.; CONFORTE, J.C. “Análise do comportamento do ozônio estratosférico na América do Sul e vizinhanças utilizando-se imagens do satélite NIMBUS7/TOMS”. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003. Belo Horizonte-MG. **Anais...**Belo Horizonte-MG, 2003.
- ANDREWS, D. G. HOLTON J. R.; LEOVY, C. B. In Middle Atmosphere Dynamics. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.115, n.486, p.421-422. 1987.
- ATCKINSON, R.J.; MATTHEWS, W.A.; NEWMAN, P.A.; PLUMB, R.A. Evidence of Mid-Latitude Impact of Antarctic Ozone Depletion, **Revista Nature**, v.340, n.6231, p.290-293, jul. 1989.
- BARAY, J.-L., DANIEL, V., ANCELLET, G., AND LEGRAS, B.: Planetaryscale tropopause folds in the southern subtropics, **Geophysical Research Letters**, v.27, p.353–356, doi:10.1029/1999GL010788, 2000.
- BENCHERIF, H.; EL AMRAOUI, L.; KIRGIS, G.; DE BELLEVUE, J. L.; HAUCHECORNE, A.; MZÉ, N.; PORTAFAIX, T.; PAZMINO, A.; GOUTAIL, F. Analysis of a rapid increase of stratospheric ozone during late austral summer 2008 over Kerguelen (49.4°S, 70.3°E). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.11, p.363–373, 2011.
- BERTAGNOLLI, C.; POSSANI, G.; PINHEIRO, D. K.; FERREIRA, N. J.; SCHUCH, N. J. “Observação de Perturbações do Buraco de Ozônio Antártico na Região Central do Rio Grande do Sul no Ano de 2000 através de Ondeletas”. CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, 21. 2006. Ijuí-RS. **Anais...**Ijuí-RS, 2006.
- BOWMAN, K.P. Evolution of the total ozone field during the breakdown of the Antarctic circumpolar vortex, **Journal of Geophysical Research**, v.95, n.10, p.16529-16543, 1990.
- BREWER, A. W. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.75, p.351-363, 1949.
- BRONNIMANN, S.; LUTERBACHER, J.; STAEHELIN, J.; SVENDBY, T. M.; HANSEN, G.; SVENOE, T. Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940-42 related to El Nino. **Nature**. v.431, p.971-974. DOI: 10.1038/nature02982. 2004.
- BUKIN, O. A.; SUAN AN, N.; PAVLOV, A. N.; STOLYARCHUK, S. Y.; SHMIRKO. K. A. Effect that Jet Streams Have on the Vertical Ozone Distribution and Characteristics of Tropopause Inversion Layer. **Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics**, v.47, n.5, p.610–618, 2011.
- CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo – SP. Oficina de textos. f.464. 2009.
- CHAPMAN, S. On ozone and atomic oxygen in the upper atmosphere. **Philosophical Magazine**. Series 7, v.10, p.369-383, abr. 1930.

CHUBACHI, S. Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February, 1982 to January, 1983. **Memoirs of National Institute Polar Research Japan Special**. v. 34, p. 13-20, 1984.

CONRADO, H.; MARIANO, G. L.; CARVALHO, L. C. Veranicos no Rio Grande do Sul – Nova metodologia para quantificação de eventos. **Revista Ciência e Natura**. v.36, n.2, p.445-455. Doi: 10.5902/2179460X13152. 2014.

DANIELSEN, E. F. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. **Journal of the Atmospheric Science**. v.25,p.502-518. 1968.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFOR, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, N.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERG, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCLETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N. & VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, 2011.

DERWENT, R.G.; JENKIN, M.E.; SAUNDERS, S.M.; PILLING, M.J.; SIMMONDS, P.G.; PASSANT, N.R.; DOLLARD, G.J.; DUMITREAN, P.; KENT, A.. Photochemical ozone formation in north west Europe and its control. **Atmospheric Environment**, v.37, p.1983-1991. 2003.

DOBSON, G.M.B. Ozone in the Atmosphere. Exploring the Atmosphere. 2ed. Oxford: University Press, 1968.

DOUGLASS, A. R.; SCHOEBERL, M. R.; STOLARSKI, R. S.; WATERS, J. W.; RUSSEL III, J. M.; ROCHE, A. E.; MASSIE, S. T. Interhemispheric differences in springtime production of HCl and ClONO<sub>2</sub> in the Polar Vortices. **Journal Geophysical Research Atmospheric**. v.100, n. D7, p.13967-13978. Doi: <https://doi.org/10.1029/95JD00698>.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J., D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. **Revista Nature**, v. 315, p. 207-210, mai. 1985.

FELDSTEIN, S. B. Subtropical Rainfall and the Antarctic Ozone Hole. **Atmospheric Science**, v.332, n.6032, p.925-926, 2011.

FONTINELE, J. L. **Envolvimento da tropopausa no Sul da América do Sul: Relações entre a corrente de jato em altos níveis e a coluna total de ozônio**. 2012.f.84. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **American Meteorological Society**. v.119, p.1293-1302. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<1293:SCOSA>2.0.CO;2). 1991.

GUARNIERI R. A.; GUARNIERI F. L.; CONTREIRA D. B.; PADILHA L. F.; ECHERE.; PINHEIRO D. K.; SCHUCH A. M. P.; MAKITA K.; SCHUCH N. J. Ozone and UVB radiation anticorrelations at fixed solar zenith solar angles in southern Brazil. **Geofísica Internacional**, v.43, n.1, p.17-22. 2004.

HANSEN, K. Ozone Hole Maximum Announced. Disponível em: <[https://www.nasa.gov/topics/earth/features/ozonemax\\_2008.html](https://www.nasa.gov/topics/earth/features/ozonemax_2008.html)>. Acesso em: 09 de nov. 2018. 2010.

HOLTON, J. R.; HAYNES, P. H.; MCINTYRE, M. E.; DOUGLASS, A. R.; ROOD, R. B.; PFISTER, L. Stratosphere-troposphere Exchange. **Reviews Geophysics**. v.3, n.3, p.403-439, 1995.

HOOD, L.; ROSSI, S; BEULEN, M. Trends in lower stratospheric zonal winds, Rossby wave breaking behavior, and column ozone at northern midlatitudes. **Journal of geophysical research**, v.104, NO. D20, p.24,321-24,339. 1999.

HOSKINS, B. J., MCINTYRE, M. E., and ROBERTSON, A. W.: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v.111, p.877-946, 1985.

HUPFER N.T.; KALL E.; PERES L.V.; PINHEIRO D.K.; SCHUCH N.J.; LEMES N.M.P. Comparação da radiação ultravioleta quando da ocorrência dos eventos defeitos secundários do buraco de ozônio Antártico sobre o sul do Brasil dos dias 16/10/2003 e 28/09/2008. CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 12. 2011, Rio de Janeiro-RJ. **Anais...** Rio de Janeiro-RJ, 2011.

IWABE, C. M. N. **Intrusão estratosférica associada com ciclogênese na Costa do Sul do Brasil: Uma análise utilizando o conceito de vorticidade potencial**. 2008. f.108. Dissertação: Mestrado em Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas – São Paulo – Brasil.

JONES, A. E., AND J. D. SHANKLIN. Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985. **Nature**. v.376, p.409-411, 1995.

KALL, E.; PERES, L.V.; PINHEIRO, D.K.; SCHUCH, N.J.; LEME, N.P. Análise defeitos secundários do buraco de ozônio Antártico em 2009 no sul do Brasil. 2011. Disponível em: <<http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm19/2011/01.12.18.56/doc/Poster%20JAI%202010%20-20Elenice%20Kall%20An%20E1lise%20dos%20Ventos....pdf>>. Acesso em: 28 de out. 2012.

KANE R.P. Extension of the Antarctic ozone hole to lower latitudes in the South-American region. **Pure and Applied Geophysics**. v.135, n.4, p.611-624. 1991.

KANG, S. M.; POLVANI, L. M.; FYFE, J. C.; SIGMOND, M. Impact of Polar Ozone Depletion on Subtropical Precipitation. **Science**, v.332, p.951-954, 2011.

KILADIS, G. N. WEICKMANN, K. M. Extratropical forcing of tropical Pacific convection during northern winter. **American Meteorological Society**. v.120, p.1924-1938. 1992.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N.J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J.M. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. **Atmospheric Environment**, v.30, n.9, p.1481-1488, 1996.

KOCH, G.; WERNLI, H.; BUSS, S.; STAEHELIN J.; PETER, T.; LINIGER, M. A.; MEILINGER, S. Quantification of the impact in mid-latitudes of chemical ozone depletion in the 1999/2000 Arctic polar vortex prior to the vortex breakup. **Atmospheric Chemistry and Physics**. v.4, n.2, p.1911-1940. Doi: <https://doi.org/10.5194/acpd-4-1911-2004>. 2004.

KUNZ, H.; SPETH, P. Variability of near-ground ozone concentration during coldfront passages a possible effect of tropopause folding events. **Journal of Atmospheric Chemistry**. v.28, p.77-95. 1997.

LAMARQUE, J. F.; HESS, P. G. Cross-Tropopause Mass Exchange and Potential Vorticity Budget in a Simulated Tropopause Folding. **American Meteorological Society**. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<2246:CTMEAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<2246:CTMEAP>2.0.CO;2). V.51, n15, 1994.

LIMPASUDAVAN, V; THOMPSON, D. W. J.; HARTMANN, D. L. The life cycle of the northern hemisphere sudden stratospheric warming. **Journal of Climate**. v.17, p.2584-2596. 2004.

LIOU K.N. An Introduction to Atmospheric Radiation. 2ed. International Geophysics Series. v.84. Academic Press. 2002.

MANNEY, G. L.; HEGGLIN, M. I.; DAFFER, W. H.; SANTEE, M. L.; RAY, E. A.; PAWSON, S.; SCHWARTZ, M. J.; BOONE, C. D.; FROIDEVAUX, L.; LIVESEY, N.J.; READ, W. G.; WALKER, K. A. Jet characterization in the upper troposphere/lower stratosphere (UTLS): applications to climatology and transport studies. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.11, p.6115-6137, 2011.

MCQUEEM, S. M. Using potential vorticity to detect stratospheric conditions that cause ozone depletion. National center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado. 1993. Disponível em: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/manuscripts%3A738/datastream/PDF/view>. Acesso em: 09 de jun. de 2016.

MCINTYRE, M. E.; PALMER, T N. Breaking planetary waves in the stratosphere. **Nature**. v.305, p.593-600, 1983.

MENDES, D.; SOUZA, E. P.; MARENGO, J. A.; MENDES, M. C. D. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3, p. 239-250, 2010.

MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. Predicted present stratospheric abundances of chlorine species from photodissociation of carbon tetrachloride. *Journal Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1029/GL001i007p00309. v.1, p.309-312, issue.7. 1974.

NAKAMURA, M. **Characteristics of potential vorticity mixing by breaking Rossby waves in the vicinity of a jet**. 1994. f.253. Tese: Doutorado em Ciência em Meteorologia. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts – Carolina do Norte – Estados Unidos da América.

NARAYANA RAO, T.; KIRKWOOD, S.; ARVELIUS, J.; VON DER GATHEN, P.; KIVI, R. Climatology of UTLS ozone and the ratio of ozone and potential vorticity over northern Europe. **Journal of Geophysical Research**, p.4703, doi:10.1029/2003JD003860. 2003.

NASA. Ozone watch 2018. Disponível em: <<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html>>. Acesso em: 22 de novembro de 2018.

NEWMAN, P. A.; RANDEL, W. J. Coherent ozone-dynamical changes during the Southern Hemisphere spring, 1979-1986. **J. Geophys. Res.** v.12, p.585-12,606. 1988.

NORTON, W. A. Breaking Rossby waves in a model stratosphere diagnosed by a vortex – following coordinate system and a technique for advecting material contours. **Journal Atmospheric Science**, v.51, p.654-673, 1994.

NUMAGUTI, A. Characteristics of 4-to-30-day period disturbances in the tropical Pacific region, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 48, 47–59. 1995.

PEREIRA, N. Análise da ocorrência de eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico sobre o sul do Brasil. 2009. 52f. Relatório final de projeto de iniciação científica PIBIT/INPE-CNPq/MCT. Curso de Meteorologia. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

PERES, L. V. **Efeito secundário do buraco de ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil**. 2013. 178f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)- Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PERES, L. V.; DOS REIS, N. C.; SANTOS, L. O.; BITTENCOURT, G. D.; SCHUCH, S. P.; ANABOR V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; PAES LEME, N. M. Análise Atmosférica dos Eventos de Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico Sobre o Sul do Brasil em 2012. Parte 2: Verificação Sinótica da Troposfera durante os Eventos. DOI: 10.5902/2179460X13151. 2014. **Revista ciência e natureza**. Santa Maria – RS – Brasil. 2014.

PETERS, D.; WAUGH, D. W. Influence of barotropic shear on the poleward advection of upper-tropospheric air. *American Meteorological Society*. v.53, n.21, p. 3013-3031. 1996.

PINHEIRO, D. K.; LEME, N. P.; PERES, L. V.; KALL, E. Influence of the Antarctic ozone hole over South of Brazil in 2008 and 2009. **Annual Active Report 2010 –National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research**, v. 1, p. 33-37, 2011.

POSTEL, G. A.; HITCHMAN, M. H. A Climatology of Rossby Wave Breaking along the Subtropical Tropopause. *American Meteorological Society*. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of Wisconsin. Wisconsin. 1999.

PRATHER M.; JAFFE H. Global impact of the Antarctic ozone hole: chemical propagation. **Journal of Geophysical Research**. v.95, p.3413-3492.1990.

PRATHER M.; GARCIA M. M.; SUOZZO R.; RIND D. Global impact of the Antarctic ozone hole: dynamical dilution with a three-dimensional chemical transport model. **Journal of Geophysical Research**. v.95. p.3449-3411. 1990.

REED, R.J. A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. **Journal of Meteorology**. v.12, p.226-237. 1955.

SALBY M.L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. International Geophysics Series. v.61. Academic Press. 1995.

SALGADO, C.A.C.; PAES LEME, N.M.; ZAMORANO, F.; QUEL, E.J.; VIANA, R. Influence of the ozone hole on the American South Cone 1992-2009. CONGRESS THE MEETING OF THE AMERICAS, 2010, Foz do iguaçu. **Anais...**Foz do iguaçu, 2010.

SCHMALFUSS, L. S. M; MARIANO, G. L.; PINHEIRO, D. K.; PERES, L. V. Análise dos principais fatores de decaimento da coluna total de ozônio sobre o sul da América do sul. **Revista Ciência e Natura**. v.36, ed. especial, p.415-442. 2014.

SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E. The structure of the polar vortex. **Journal of Geophysical Research**, v.97, p.7859-7882, 1992.

SEMANE, N.; BENCHERIF, H.; MOREL, B.; HAUCHECORNE, A. and DIAB, R. D. An unusual stratospheric ozone decrease in Southern Hemisphere subtropics linked to isentropic air-mass transport as observed over Irene (25.5° S, 28.1° E). **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.6, p.1927-1936, 2006.

SLUSSER, J.; GIBSON, J.; BIGELOW, D.; KOLINSKI, D.; MOU, W.; KOENIG, G. & BEAUBIEN, A. Comparison of column ozone retrievals by use of an UV multifilter rotating shadow-band radiometer with those from Brewer and Dobson spectrophotometers. **Applied Optics**, v.38, n.9, p.1543-1551, 1999.

SOLOMON, S.; GARCIA, R. R.; ROWLAND, F. S.; WUEBBLES, D. J. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*. 321, p.755-758. 1986.

SOLOMON, S. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v.37, n.3, p.275-316, 1999.

SON, S.-W.; TANDON, N. F.; POLVANI, L. M.; WAUGH, D. W. Ozone hole and Southern Hemisphere climate change. *Geophys. Res. Lett.* 36, L15705. 2009.

STRAHAN, S. E.; DOUGLASS, A. R. Decline in Antarctic Ozone Depletion and Lower Stratospheric Chlorine determined from Aura Microwave limb Sounder Observations. *Geophysical Research Letters*. v.45, n.1, p.382-390. Doi: 10.1002/2017GL074830.

TANG, Q.; PRATHER, M. J. Correlating tropospheric column ozone with tropopause folds: the Aura- OMI satellite data. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, v. 10, p. 14875-14896, 2010.

THOMPSON, A. M. New ozone hole phenomenon. **Revista Nature**. v.352, n.6333, p.282-283. 1991.

- THORNCROFT, C. D.; HOSKINS, B. J.; MCINTYRE, M. E. Two paradigms of baroclinic-wave life-cycle behaviour. Royal Meteorological Society. v.19, n.509, p.17-55. DOI: 10.1002/qj.49711950903. 1993.
- TOMAS, R. A.; WEBSTER, P. J. Horizontal and vertical structure of cross-equatorial wave propagation. American Meteorological Society. v.51, n.11, p.1417-1430. 1994.
- TRAUB, M.; LELIEVELD, J.: Cross-tropopause transport over the eastern Mediterranean, **J. Geophys. Res.**, 108, 4712, doi:10. 1029/2003JD003754, 2003.
- TRENBERTH, K. E.; OLSON, J. G. Temperature trends at the South Pole and McMurdo Sound. **J. Clim.** v.2, p.1196-1206, 1989.
- TRICKL, T.; BÄRTSCH-RITTER, N.; EISELE, H.; FURGER, M.; MÜCKE, R.; SPRENGER, M.; STOHL, A. High-ozone layers in the middle and upper troposphere above Central Europe: potential import from the stratosphere along the subtropical jetstream. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v.11, p.9343–9366, 2011.
- WAUGH, D. W.; POLVANI, L. M. Climatology of intrusions into the tropical upper troposphere. **Geophysical Research. Letter**, v. 27, n. 23, p. 3857-3860, Dec. 2000.
- WAUGH, D. W.; POLVANI, L. M. Stratospheric Polar Vortices. Geophysical Monograph Series 190. 2010. **American Geophysical Union**. DOI: 10.1029/2009GM000887. 2010.
- WAUGH, D. W.; RANDEL, W. J.; PAWSON, S.; NEWMAN, P. A.; NASH, E. R. Persistence of the lower stratospheric polar vortices. **Journal Geophysical Research Atmospheres**. v.104, n.D22, p.27191-27201. 1999.
- WAKAMATSU, S., UNO, I., VEDA, H., UEHARA, K., and TATEISHI, H. Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere, **Atmospheric Environment**, v.23, p.1815-1826, 1989.
- WALLACE J.M.; HOBBS P.V. **Atmospheric Science. An introductory survey**. 2ed. International Geophysics Series. v.92. Academic Press. 2006.
- WHO - World Health Organization. Ultraviolet radiation. Environmental Health Criteria 160, Geneva, 1994.
- WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991, Geneva, 1992.
- WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994. Geneva, 1994.
- WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Geneva, 2010.
- VOUGARAKIS, A.; HADJINICOLAOU, P.; PYLE, J. A. Increases in global tropospheric ozone following an El Niño event: examining stratospheric ozone variability as a potential driver. **Royal Meteorological Society**. v.12, n.2, p.228-232. Doi: <https://doi.org/10.1002/asl.318>. 2011.

ZENG, G.; PYLE, J. A. Influence of El Niño Southern Oscillation on stratosphere/troposphere exchange and the global tropospheric ozone budget. **Geophysical Research Letter**. v.32: L01814, DOI:10.1029/2004GL021353. 2005.

ZEREFOS, C. S.; BAIS, A. F.; ZIOMAS, I. C.; BOJKOV, R. D. On the relative importance of quasi-biennial oscillation and El Niño/Southern Oscillation in the revised Dobson total ozone records. **Journal of Geophysical Research**. v.97, p.10135-10144. Doi:<https://doi.org/10.1029/92JD00508>. 1992.