

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



Dissertação

**Análise do decaimento da coluna total de ozônio sobre a América
do Sul**

Laís San Martins Schmalfuss

Pelotas, fevereiro de 2014

LAÍS SAN MARTINS SCHMALFUSS

**Análise do decaimento da coluna total de ozônio sobre a América
do Sul**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Meteorologia (M. M.)

Orientador: Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano

Pelotas, 2014

Dados de catalogação na fonte:
Ubirajara Buddin Cruz – CRB-10/901
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

S347a Schmalfuss, Laís San Martins

Análise do decaimento da coluna total de ozônio sobre a América do Sul / Laís San Martins Schmalfuss. – 92f. ; il. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Faculdade de Meteorologia. Pelotas, 2014. – Orientador Glauber Lopes Mariano.

1.Meteorologia. 2.Coluna total de ozônio. 3.OMI. 4.Efeito secundário do buraco de ozônio Antártico. I.Mariano, Glauber Lopes. II.Título.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Glauber Lopes Mariano

Prof.^a Dr.^a Damaris Kirsch Pinheiro

Prof.^a Dr.^a Ericka Voss Chagas Mariano

Dedicatória

À minha família e a todos que sempre acreditaram em mim e me incentivaram

Agradecimentos

Agradeço à minha família que sempre esteve ao meu lado e me incentivou ao longo da minha vida.

À Universidade Federal de Pelotas pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação.

Ao Professor Dr. Glauber Lopes Mariano, responsável pela minha orientação, e também por toda a sua organização, paciência e sugestões essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos e a todos que direta e indiretamente contribuíram com a realização deste trabalho.

Resumo

SCHMALFUSS, Laís San Martins. **Análise do decaimento da coluna total de ozônio sobre a América do Sul**. 2014. 92f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Meteorologia. Universidade federal de Pelotas.

O ozônio (O_3) representa muito menos de 1% dos gases da atmosfera terrestre, entretanto é indispensável para a vida na Terra, pois absorve radiação ultravioleta do tipo B (UV-B), que é prejudicial para a saúde de seres vivos. A região tropical é a maior produtora de ozônio estratosférico, entretanto devido à circulação Brewer-Dobson a região apresenta baixos valores de coluna total de ozônio, os quais podem se estender para maiores latitudes. Em 1985, foi identificada uma grande depleção no conteúdo de ozônio na atmosfera da Antártica. Massas de ar com baixa concentração de ozônio podem se desprender do vórtice Antártico e migrar para latitudes mais baixas, principalmente durante as primaveras austrais, são os efeitos secundários do buraco de ozônio da Antártica. Este trabalho tem como objetivo principal analisar o decaimento da coluna total de ozônio sobre a América do Sul ($20^{\circ}N$ e $60^{\circ}S$; $30^{\circ}W$ e $80^{\circ}W$), através do cálculo das médias e limiares mensais da coluna total de ozônio pelos dados do sensor OMI (médias diários e $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ de resolução espacial). A partir da média mensal e limiares pode-se observar a maior variabilidade meridional da coluna total de ozônio durante os meses próximos à primavera e menor variabilidade durante os meses próximos ao outono, entre as latitudes polares e médias. Na quantificação dos dias abaixo do limiar foram observados eventos de decaimento da coluna total de ozônio sobre a região próxima a Antártica, onde os meses entre setembro e fevereiro tiveram mais dias abaixo do limiar. Os meses de maio, julho e dezembro apresentaram maior número de dias abaixo do limiar entre as latitudes de $20^{\circ}S$ e $40^{\circ}S$, sobre a área continental, principalmente maio, sobre o centro-norte da Argentina. A análise da vortacidade potencial indicou 06 casos com origem tropical da massa de ar (fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro), e 06 com origem polar (janeiro, abril, maio, outubro, novembro e dezembro), sendo julho o mês com maior queda em relação à média mensal. Praticamente todos os meses tiveram seus decaimentos de coluna total de O_3 associadas à presença de anticiclones, com exceção de janeiro e maio, em que a queda ocorreu logo após a passagem do sistema frontal, ainda tendo nebulosidade e dezembro, com o sistema frontal sobre o ponto com decaimento.

Palavras-chave: Coluna total de ozônio, OMI, efeito secundário do buraco de ozônio Antártico.

Abstract

SCHMALFUSS, Laís San Martins. Analysis of the decay of total ozone over South America. 2014. 92f. Thesis (MA) - Post-graduate degree in Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Ozone (O₃) is less than 1% of Earth's atmospheric gases. However it is essential for life on Earth because it absorbs ultraviolet radiation of the UV-B type, which is detrimental to the health of living beings. The tropical region is the biggest producer of stratospheric ozone; however, due to the Brewer-Dobson circulation there is a depletion of ozone total column in this region, which may extend to higher latitudes. In 1985 a great depletion was identified in the ozone content in the Antarctic atmosphere, where air masses with low ozone concentration may detach the Antarctic vortex and migrate to lower latitudes, especially in austral spring. These are the so-called side effects of the Antarctic ozone hole. This work has the main objective to analyze the decay of total ozone over South America (20°N and 60°S; 30°W and 80°W), through monthly averages and thresholds of ozone total column data from the OMI sensor (daily average and 1°x1° spatial resolution). From the monthly average and thresholds, can be observed the greatest meridional variability in total column ozone during the months near the spring and less variability during the months of near fall, between the polar and middle latitude. On quantification of days below the threshold of decay events are observed total ozone column over the region near Antarctica, where the months between September and February had more days below the threshold. The months of May, July and December showed a higher number of days below the threshold between latitudes 20 ° S and 40 ° S, on the continental area, especially in May, on the north-central Argentina. The analysis of potential vorticity indicated 06 cases of tropical origin of the air mass (February, March, June, July, August and September), and 06 with polar origin (January, April, May, October, November and December), and July is the month with the highest depletion compared to the monthly average. Almost all months had their decays total column O₃ associated with the presence of anticyclones, with the exception of January and May, when the fall occurred shortly after the passage of the frontal system, still having cloudy and December, with the frontal system over point to decay.

Keywords: Ozone total column, OMI, side-effects of the Antarctic ozone hole.

Lista de figuras

Figura 1	Perfil vertical de temperatura, típico de médias latitudes.....	21
Figura 2	Representação dos perfis verticais das razões de mistura de algumas espécies selecionadas para condições em latitudes médias. A linha vermelha representa o ozônio.....	22
Figura 3	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.....	25
Figura 4	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 5	Dados médios mensais de coluna total de ozônio em função da latitude para o período 1979 – 1992, obtidos através do sensor TOMS.....	27
Figura 6	Razão de mistura média zonal do ozônio (contornos) e densidade de O ₃ ou coluna total (sombreado), onde os níveis correspondem a 20, 40 e 60% do valor máximo. Calculados sobre Janeiro e Fevereiro de 1979, com funções de latitude e pressão obtido a partir do Limb Infrared Monitor of the Stratosphere (LIMS) a bordo do NIMBUS-7.....	28
Figura 7	Área do buraco de ozônio Antártico de 1979 a 2010.....	31
Figura 8	Valores mínimos de coluna total de ozônio, medida em unidades Dobson, no continente Antártico de 1979 a 2010.....	32

Figura 9	(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 em porcentagens as variações dessa média. (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 ² . Sombras em cinza escura e clara: mostram em porcentagens as variações dessa média. Ambos para o período de 1979 a 2012. As linhas azul e vermelha mostram a variação desses valores para o ano de 2012 e 2013 respectivamente.....	32
Figura 10	Variação sazonal de ozônio estratosférico (UD) plotado com 19 anos de dados para Cachoeira Paulista e 13 anos de dados para Natal. Barras verticais são os desvios padrão.....	39
Figura 11	Coluna total de ozônio (UD) (a), e radiação ultravioleta (índice UV) (b) em Punta Arenas-CI, de setembro a dezembro de 2009.....	40
Figura 12	Ilustração da região de estudo, a qual abrange a região mais ao sul da América do Sul (retângulo vermelho), localizada entre as latitudes de 21°S e 60°S e as longitudes de 30°W e 80°W.....	42
Figura 13	Exemplo de quantificação de dias abaixo do limiar, referente ao mês de janeiro.....	44
Figura 14	Climatologia mensal da coluna total de ozônio (em UD) realizada para o período de Outubro de 2004 a Dezembro de 2011. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.....	48
Figura 15	Coluna total de ozônio (em UD) média nos meridianos de 70° (azul), 60° (vermelho) e 50°W (verde), para os meses de março (linha contínua) e outubro (linha pontilhada), entre as latitudes de 20°S e 60°S.....	50
Figura 16	Limiar de seleção calculado a partir da média menos 1,5 de desvio padrão (em UD). (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.....	51
Figura 17	Número de dias abaixo do limiar mensal. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro...	53
Figura 18	Coluna total de ozônio para o dia 24/01/2005 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	56

Figura 19	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 21, (b) 22, (c) 23, (d) 24 de janeiro de 2005, a 620K.....	56
Figura 20	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 24 de janeiro de 2005.....	57
Figura 21	Coluna total de ozônio para o dia 23/02/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	58
Figura 22	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 20, (b) 21, (c) 22, (d) 23 de fevereiro de 2006, a 620K.....	58
Figura 23	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 23 de fevereiro de 2006.....	59
Figura 24	Coluna total de ozônio para o dia 26/03/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	60
Figura 25	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 23, (b) 24, (c) 25, (d) 26 de março de 2006, a 620K.....	60
Figura 26	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 26 de março de 2006.....	61
Figura 27	Coluna total de ozônio para o dia 27/04/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	62
Figura 28	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 24, (b) 25, (c) 26, (d) 27 de abril de 2006, a 640K.....	62
Figura 29	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 27 de abril de 2006.....	63
Figura 30	Coluna total de ozônio para o dia 05/05/2007 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	64
Figura 31	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 05 de maio de 2007, a 640K.....	64

Figura 32	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 05 de maio de 2007.....	65
Figura 33	Coluna total de ozônio para o dia 16/06/2008 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	66
Figura 34	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 13, (b) 14, (c) 15, (d) 16 de junho de 2008, a 630K.....	66
Figura 35	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 16 de junho de 2008.....	67
Figura 36	Coluna total de ozônio para o dia 19/07/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	68
Figura 37	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19 de julho de 2006, a 630K.....	69
Figura 38	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 19 de julho de 2006.....	69
Figura 39	Coluna total de ozônio para o dia 04/08/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	70
Figura 40	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04 de agosto de 2006, a 640K.....	71
Figura 41	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 04 de agosto de 2006.....	71
Figura 42	Coluna total de ozônio para o dia 10/09/2009 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	72
Figura 43	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 07, (b) 08, (c) 09, (d) 10 de setembro de 2009, a 620K.....	73
Figura 44	Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida GOES-10, para o dia 10 de setembro de 2009.....	73

Figura 45	Coluna total de ozônio para o dia 11/10/2005 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	74
Figura 46	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 08, (b) 09, (c) 10, (d) 11 de outubro de 2005, a 620K.....	75
Figura 47	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 11 de outubro de 2005.....	75
Figura 48	Coluna total de ozônio para o dia 30/11/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	77
Figura 49	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 27, (b) 28, (c) 29, (d) 30 de novembro de 2006, a 640K.....	77
Figura 50	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa e (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 30 de novembro de 2006.....	77
Figura 51	Coluna total de ozônio para o dia 02/12/2006 (a) e ponto selecionado no quadrado vermelho (b).....	79
Figura 52	Vorticidade potencial e linhas de corrente para os dias (a) 29, (b) 30, (c) 01, (d) 02 de dezembro de 2006, a 630K.....	79
Figura 53	Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa e (d) divergência em 200hPa, para o dia 02 de dezembro de 2006.....	79

Lista de tabelas

Tabela 1	Processos químicos chave e ciclos catalíticos. Fonte: Adaptado de: Solomon, 1999.	23
Tabela 2	Médias da coluna total de ozônio (UD), segundo as estações do ano e os períodos de 1978 a 1987, de 1978 a 2010 e de 2010. Fonte: Adaptado de: SALGADO, et al., 2010.....	39
Tabela 3	Valores de coluna total de ozônio e suas datas de ocorrência referentes aos 16 dias que estiveram abaixo do limiar para o mês de janeiro. A linha marcada em verde indica o dia com menor valor de coluna total de ozônio.....	45
Tabela 4	Data e localização do pixel com menor valor de coluna total de ozônio para cada mês.....	55
Tabela 5	Situação atmosférica sobre o ponto selecionado para cada mês nos casos de origem de massa polar.....	82
Tabela 6	Situação atmosférica sobre o ponto selecionado para cada mês nos casos de origem de massa tropical.....	83

Lista de abreviaturas e siglas

μm	Micrômetro
BrO	Hipobromito
BUV	Backscatter Ultraviolet
CFCs	Clorofluorcarbonetos
CHI	Chile
Cl	Cloro
CO ₂	Dióxido de carbono
EOS	Earth Observations System
FMI	Finnish Meteorological Institute
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
H	Hidrogênio
H ₂ O	Vapor d'água
HCHO	Formaldeído
HIRDLS	High Dynamics LimbSunder
h ν	Fóton (representa fotodissociação)
K	Kelvin
MLS	Microwave Limb Sounder
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIVR	Netherlands's Agency for Aerospace Programs
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NEPs	Nuvens Estratosféricas Polares
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O	Oxigênio Atômico
O ₂	Oxigênio molecular
O ₃	Ozônio
OES	Observatório Espacial do Sul
OMI	Ozone Monitoring Instrument
RN	Rio Grande do Norte
RS	Rio Grande do Sul
SBUV	Solar Backscatter Ultraviolet
SO ₂	Dióxido de enxofre
SP	São Paulo
TES	Tropospheric Emission Spectrometer
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer
UMAG	Universidade de Magallanes, Chile

UV	Ultravioleta
UV-B	Ultravioleta do tipo B
VP	Vorticidade Potencial
VPA	Vorticidade Potencial Absoluta

Sumário

1 Introdução.....	17
2 Revisão de literatura.....	20
2.1 Atmosfera e o ozônio.....	20
2.2 Variação espacial e temporal do ozônio.....	23
2.3 Sensor OMI.....	28
2.4 Buraco de ozônio na Antártica.....	30
2.5 Efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico.....	33
2.6 Sistemas sinóticos e suas influências sobre o conteúdo de ozônio no sul da América do Sul.....	36
2.7 Tendência do ozônio global e consequências da queda de ozônio estratosférico.....	37
3 Dados e metodologia.....	41
3.1 Dados do sensor OMI.....	41
3.2 Região de estudo.....	41
3.3 Médias e limiares mensais.....	42
3.4 Quantificação de dias com decaimento da coluna total de ozônio e seleção de casos.....	43
3.5 Análise dos casos selecionados.....	45
4 Resultados e discussões.....	47
4.1 Médias da coluna total de ozônio.....	47
4.2 Quantificação de dias com decaimento significativos da coluna total de ozônio.....	52
4.3 Análise dos casos.....	55
4.4 Discussão dos resultados.....	80
5 Conclusões.....	84
Referências.....	86

Introdução

O ozônio forma-se basicamente a partir da reação entre uma molécula de oxigênio (O_2) e uma molécula de oxigênio atômico (O), representando menos de 1% dos gases da atmosfera terrestre, seu maior conteúdo localiza-se na estratosfera entre 20 e 50 km de altitude, onde a atmosfera sofre um processo de inversão térmica devido à forte absorção de radiação ultravioleta (UV) pelo processo de formação do ozônio. Nessa altitude os clorofluorocarbonetos (CFCs) decompõem-se por influência da radiação UV, liberando átomos de cloro (também produzidos por fontes naturais), que quebram facilmente as ligações do O_3 . Assim, apenas um átomo de cloro é suficiente para eliminar muitos milhares de moléculas de ozônio (MOLINA; ROWLAND, 1974).

Na década de 80, o Levantamento Antártico Britânico relatou que existia uma depleção na camada de ozônio sobre a região Antártica, que aparecia nos meses de setembro e outubro (CHUBACHI, 1984; FARMAN, 1985). Assim, ocorreu a convenção de Viena (1969) e foi criado o protocolo de Montreal (1989) com a finalidade de proteger a camada de ozônio, estabelecendo que houvesse um corte de 50% do consumo de CFCs não essenciais, depois que alguns países, como Estados Unidos, Canadá, Noruega e Suécia decidiram diminuir o consumo em excesso. Este corte no consumo de CFCs deu-se devido à descoberta do buraco de ozônio Antártico, associada ao artigo, de 1974, realizado pelos cientistas F. Sherwood Rowland e Mário Molina de que havia grandes quantidades de CFCs na estratosfera, e que estes eram produzidos pela ação antrópica desde os anos 20 (MOLINA; ROWLAND, 1974).

Uma análise da climatologia dos dados de superfície do espectrofotômetro Dobson (1964 a 1994) mostra que havia uma queda global de ozônio nas latitudes médias (tendência de queda entre os anos) (BOJKOV et al., 1995) e que essa queda

estava ocorrendo entre a década de 80 e 90 quando essa queda global se estabilizou (CHUBACHI et al., 2005). Apesar de a região tropical ser a maior produtora de ozônio estratosférico, devido à maior incidência de radiação, uma circulação meridional de ozônio estratosférico explica a maior concentração de seu conteúdo na região Antártica, pela circulação Brewer-Dobson, e os baixos valores da coluna total de ozônio sobre os trópicos, que podem se estender para latitudes maiores (BREWER, 1949; DOBSON, 1968). Essa circulação consiste em uma convergência na região tropical que atinge a estratosfera e faz o transporte horizontal de massas de ar até divergir sobre as latitudes médias e altas (SOLOMON, 1999).

Kirchhoff et al. (1996) descobriram que a queda da coluna total de ozônio que afetava o sul do continente Sul Americano, durante as primaveras austrais, era influência do buraco de ozônio da região Antártica, sendo denominadas como efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico.

Quedas do conteúdo total de ozônio mostram-se muito importantes à saúde dos seres vivos, pois quando se diminui o conteúdo de ozônio, a incidência de radiação UV-B (comprimento de onda entre 0,28 e 0,32 μm) aumenta (KIRCHHOFF et al., 1996), o que gera um alerta quanto à maior incidência de radiação ultravioleta, pois uma redução de 1% na coluna total de ozônio 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 (WHO, 1994).

A região sul da América do Sul é bastante afetada por efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico durante as primaveras austrais, ou seja, quando o vórtice que envolve o buraco de ozônio da Antártica perde suas forças devido ao fim da noite polar, permite que massas de ar pobres em ozônio se desprendam e migrem para latitudes menores (LIOU, 2002). Estudos sobre ozônio ainda são muito recentes. Um reconhecimento mais preciso de como este gás se comporta e como se distribui sobre a região sul da América do Sul se mostra de grande importância nesse momento, pois é uma região bastante afetada pelas quedas temporárias de coluna total de O_3 .

O interesse por estudar a região mais ao sul da América do Sul vem devido aos registros de casos de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico

reportados por diversos autores como Kirchhoff et al. (1996), Bertagnolli et al. (2006), Pereira (2009), Peres (2010), Hupfer et al. (2011), os quais mostram quedas da coluna total de ozônio sobre regiões em médias latitudes. Porém estes trabalhos abrangem apenas dados pontuais, utilizando o instrumento Brewer instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra-RS, que realiza medidas indiretas da coluna total de ozônio a partir do solo. Os dados de sensores instalados em satélite como o sensor TOMS e OMI, serviram apenas para complementar as falhas do sensor em solo, além de alguns casos com uso de ozoniossondas (KIRCHHOFF et al., 1996).

O objetivo principal deste trabalho é analisar o decaimento da coluna total de ozônio sobre a América do Sul, através do cálculo de uma média mensal da coluna total de ozônio e determinar as principais regiões afetadas por quedas na coluna total de O_3 a partir dos dados dos sensores *Ozone Monitoring Instrument (OMI)* da National Aeronautics and Space Administration (NASA) para o período de Outubro de 2004 a Dezembro de 2011. Como objetivos específicos:

- Obter valores limiares mensais para determinação de eventos significativos de decaimento do ozônio.
- Quantificar e identificar as áreas com maior quantidade de dias abaixo do limiar para a região de estudo.
- Identificar a presença do maior número de dias com decaimento significativo da coluna total de ozônio sobre a área continental que não é afetada pelo buraco de ozônio da Antártica.
- Selecionar e analisar os casos de decaimento de coluna total de ozônio sobre a América do Sul, identificando a origem da massa de ar e as características troposféricas.

Revisão de Literatura

2.1. Atmosfera e o ozônio

Uma mistura de gases constitui a atmosfera terrestre, dos quais 78% são nitrogênio molecular e 21% são oxigênio molecular. O 1% restante contém argônio (Ar), vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3) entre outros constituintes (SALBY, 1995; LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

O perfil vertical de temperatura da atmosfera é dividido em quatro camadas (Fig. 1): troposfera (altitude de aproximadamente 10 km), estratosfera (entre 20 e 50 km de altitude), mesosfera (entre 50 e 80 km) e termosfera (acima de 85 km), e no topo de cada uma dessas camadas tem-se: a tropopausa, estratopausa, mesopausa e termopausa, respectivamente (LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

Na troposfera, camada onde ocorrem os principais processos meteorológicos, a temperatura diminui com a altura a uma taxa de 6,5 K/km (Kelvin por quilômetro), consequência do balanço radiativo e do transporte convectivo de energia da superfície para a atmosfera. A estratosfera fica localizada logo acima da tropopausa (camada de temperatura constante em relação à altura). É nessa camada da atmosfera onde ocorrem os processos de formação do ozônio, entre 20 e 50 km de altitude. Devido aos processos de formação do O_3 , há uma inversão térmica na estratosfera, onde a temperatura sobe até aproximadamente 270K (Kelvin) (SALBY, 1995; LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

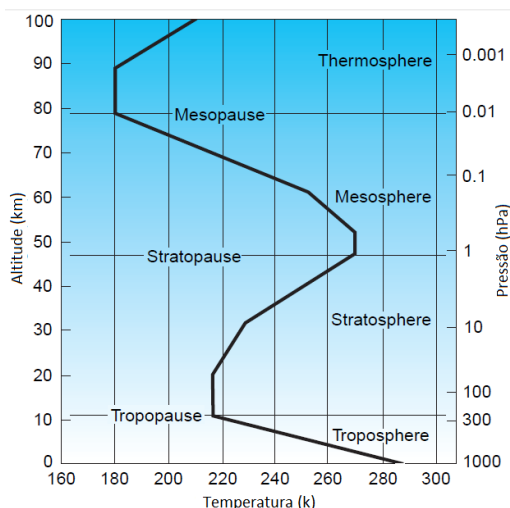


Figura 1 – Perfil vertical de temperatura, típica de médias latitudes.

Fonte: Adaptado de: WALLACE; HOBBS, 2006, p.10

A manutenção da vida na Terra depende fundamentalmente do ozônio (O_3) existente na estratosfera. Este gás atmosférico intercepta a radiação ultravioleta (UV) que é nociva (sobretudo a radiação ultravioleta do tipo B – UV-B, localizada na faixa espectral entre 0,28 e 0,32 μm de comprimento de onda) absorvendo-a nos primeiros quilômetros da estratosfera impedindo que grande parte chegue livremente à superfície (SALBY, 1995), ou seja, a radiação ultravioleta solar incidente é inversamente proporcional à coluna total de ozônio.

A radiação UV-B é nociva à saúde dos seres vivos, podendo causar diversas doenças como o câncer de pele e catarata; supressão do sistema imunológico, queimaduras solares e aumento do risco de infecções, além de prejudicar o desenvolvimento de plantas e causar danos no sistema aquático, pois a radiação ultravioleta prejudica a química molecular da fotossíntese tanto de plantas terrestres como do fitoplâncton. As reduções desses organismos 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).

O O_3 é formado a partir de fotodissociação ($h\nu$) de moléculas de oxigênio pela radiação ultravioleta nos comprimentos de onda menores que 0,242 μm (R1 – Tab. 1). Assim, é produzido oxigênio atômico (O), que se recombina com O_2 e forma o ozônio em uma reação termolecular (reação que envolve três moléculas). A existência de um terceiro corpo (M) é necessária 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). Reação que ocorre nas bandas de absorção molecular do ozônio de Hartley (comprimentos de onda de 0,2 a 0,31 μm) e Huggins (comprimentos de onda de 0,31 a 0,35 μm). Outra reação envolvendo o oxigênio atômico e a molécula de ozônio resulta em 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).

Ciclos catalíticos de várias espécies de radicais livres, ou seja, efeitos aceleradores da destruição do ozônio, tais como óxidos de nitrogênio (NO_x), cloro (Cl) e hidrogênio (H) também causam a destruição do ozônio (Tab. 1). Então a perda e a produção de O_3 formam a camada de ozônio, que tem valores máximos de 24 a 44 km de altitude (Fig. 2), e é a grande responsável pelo equilíbrio térmico do planeta (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, sendo uma unidade Dobson igual a $2,69 \times 10^{16}$ moléculas de ozônio por cm^2 (SALBY, 1995).

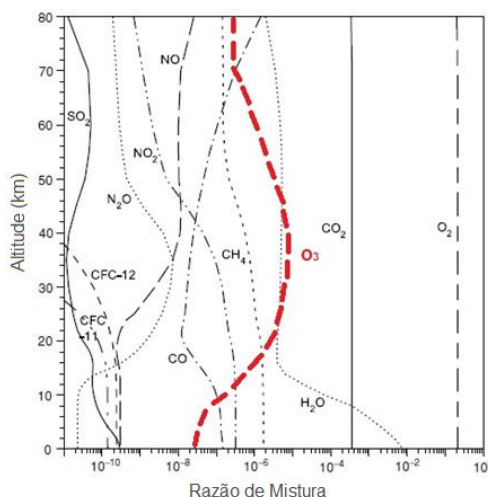


Figura 2 - Representação dos perfis verticais das razões de mistura de algumas espécies selecionadas para condições em latitudes médias. A linha vermelha representa o ozônio.

Fonte: Adaptado de: LIOU, 2002, p.69.

Tabela 1: Processos químicos chave e ciclos catalíticos envolvendo a molécula de O₃ na estratosfera.

Processo Químico	Número da reação
<i>Chapman Chemistry^a</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^b</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^c</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^d</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^e</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

^aChapman [1930].

^bBates and Nicolet [1950]; Hampson [1964].

^cCrutzen [1970]; Johnston [1971].

^dStolarski and Cicerone [1974]; Molina and Molina [1987].

^eMcElroy et al. [1986]; Tung et al. [1986].

Fonte: Adaptado de: Solomon, 1999.

2.2. Variação espacial e temporal do ozônio

O ozônio é centrado na estratosfera devido à forte incidência de radiação ultravioleta, a qual é necessária para dissociar as moléculas de oxigênio existentes nessa camada, e assim produzir seu conteúdo. Sua capacidade 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). Sua razão de mistura zonal média aumenta com rapidez acima da tropopausa, atingindo um valor máximo

de 10 ppmv (partes por milhão de volume) nas proximidades de 30 km: é a chamada “camada de ozônio” que está localizada aproximadamente entre 20 e 40 km de altitude, com valores máximos em 24km. Por esse motivo, apenas 10% de seu conteúdo está situado na troposfera, como mostra a Fig. 2 (SALBY, 1995; LIOU, 2002; WALLACE; HOBBS, 2006).

Existem pequenas variações diurnas 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 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). O tempo de vida fotoquímico do O_3 varia com a altitude. Na baixa estratosfera é de várias semanas e na alta estratosfera é de apenas uma hora (SALBY, 1995).

À noite, as correntes de ar para baixo (*downdrafts*), por convecção, carregam da troposfera média superior para a superfície conteúdos de ar com baixa temperatura potencial equivalente e também carregam junto um ar com maior concentração de ozônio (BETTS et al., 2000). Esse O_3 que chega à superfície é destruído por diversos processos de oxidação e por esse motivo, a troposfera é considerada um dissipador de ozônio estratosférico (SALBY, 1995).

O ozônio também pode ser produzido na troposfera (onde é considerado um poluente) 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 à emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOC_s) na presença de luz solar, os quais têm como principais fontes as emissões de instalações industriais, exaustão de veículos motorizados, solventes químicos e vapor de gasolina (DERWENT et al., 2003).

A máxima concentração sazonal de ozônio estratosférico sobre as latitudes médias ocorre na primavera e a mínima concentração ocorre no outono, sendo que as regiões tropicais praticamente não variam seu conteúdo devido à intensidade de radiação ser a mesma durante o ano todo (WAKAMATSU et al., 1989). Apesar de a região tropical produzir mais ozônio, devido à maior incidência de radiação UV, uma circulação meridional de ozônio estratosférico explica a maior concentração de seu conteúdo em regiões polares, circulação estratosférica conhecida como circulação Brewer-Dobson, que transporta massas de ar estratosféricas em direção aos pólos

(BREWER, 1949; DOBSON, 1968). Essa circulação Brewer-Dobson consiste em uma convergência na região tropical, fazendo o transporte vertical de massas de ar até atingir a estratosfera, por onde o ozônio é transportado até então divergir sobre as latitudes médias e altas (Fig. 3) (SOLOMON, 1999).

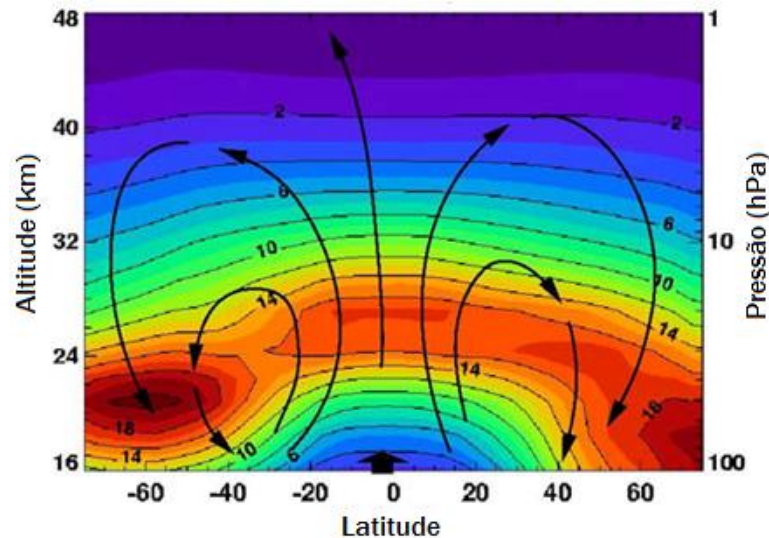


Figura 3 - Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio (UD) em função da latitude, altitude e níveis de pressão entre 1980 e 1989, pelos dados do satélite Nimbus-7.

Fonte: Adaptado de: NASA, Junho de 2000.

Com a proximidade do inverno, a atmosfera polar tende a se resfriar ainda mais, aumentando a subsidência de ar e fazendo com que o gradiente latitudinal de pressão aumente entre o pólo e as latitudes médias. Uma forte circulação de oeste é formada em torno do pólo, denominada como vórtice polar (Fig. 4d), e nesse período começa a aumentar a variação latitudinal do O_3 (WMO/ UNEP, 1992; WMO/ UNEP, 1994). As maiores concentrações de ozônio estratosférico no Hemisfério Sul ocorrem durante a primavera 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 que ocorre na primavera é 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. 4a). Seus valores em alguns anos chegam a atingir 500 UD, contornando todo o hemisfério (DOBSON, 1968; ANDRÉ, 2003; WMO/UNEP, 2010).

No fim da primavera e início do verão, o vórtice polar sobre a Antártica enfraquece, tornando-se uma circulação inexpressiva (ATKINSON, 1989; BOWMAN, 1990), assim o conteúdo de ozônio sobre essa região começa a se recuperar, e consequentemente o cinturão de altas concentrações tem seu conteúdo diminuído (Fig. 4b) (DOBSON, 1968). Durante todo o verão (Fig. 4b) e o outono (Fig. 4c), o vórtice desaparece e os conteúdos de O_3 sobre o globo ficam mais homogêneos em relação à latitude, pois a circulação Brewer-Dobson ocorre livremente (WAKAMATSU et al., 1989).

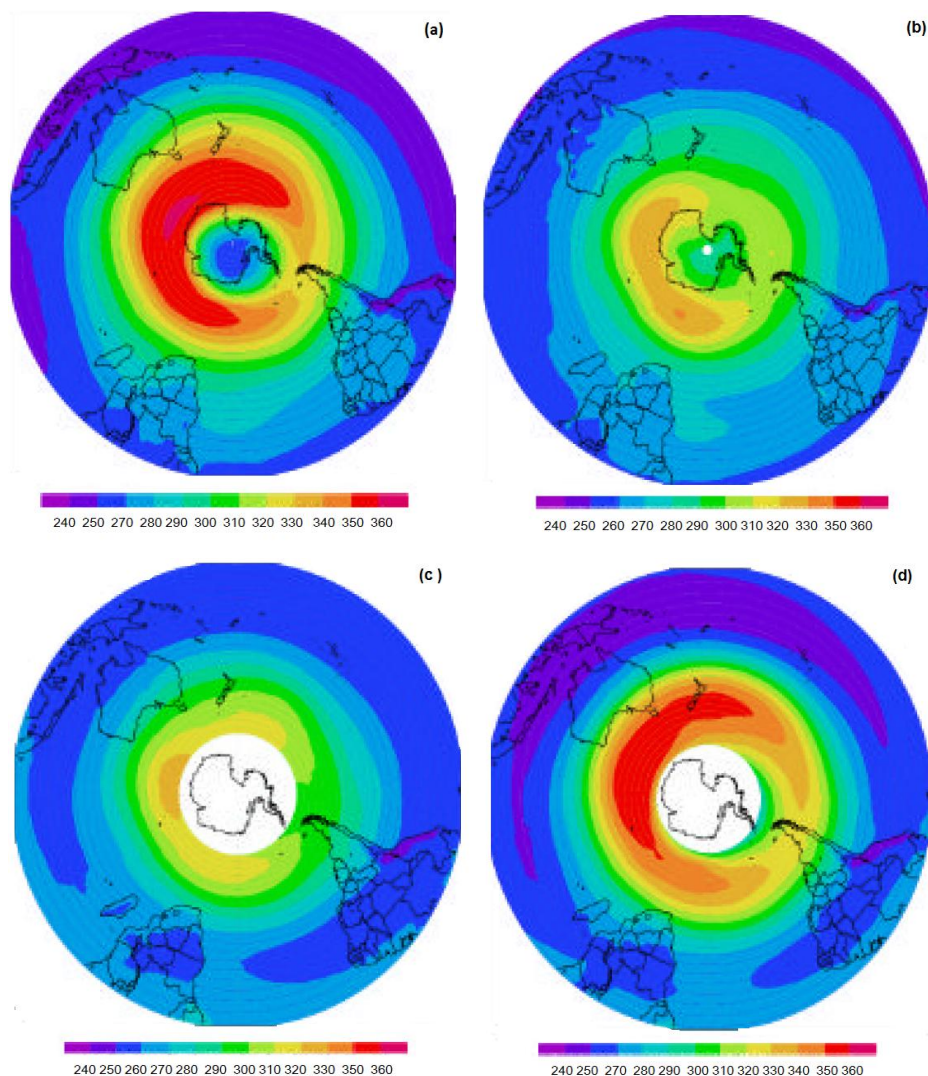


Figura 4 - Média sazonal do ozônio estratosférico (UD – unidades Dobson) obtidas pelas imagens do sensor TOMS a bordo do satélite Nimbus7, para o período de 1978 a 1993: a) primavera, b) verão, c) outono e d) inverno.

Fonte: ANDRÉ et al., 2003.

Uma representação das médias mensais de dados obtidos a partir do sensor TOMS da NASA mostra a distribuição latitudinal da coluna total de ozônio para o período entre 1979 e 1992 na Fig. 5. A faixa equatorial mostra-se com valores mais homogêneos durante o ano todo e as maiores variações ocorrem nas primaveras de ambos os hemisférios, para as latitudes maiores que 30°N e 30°S, sendo que os valores mais elevados de coluna total de ozônio ocorrem no Hemisfério Norte, com valores em torno de 450 UD e no Hemisfério Sul em torno de 350 UD.

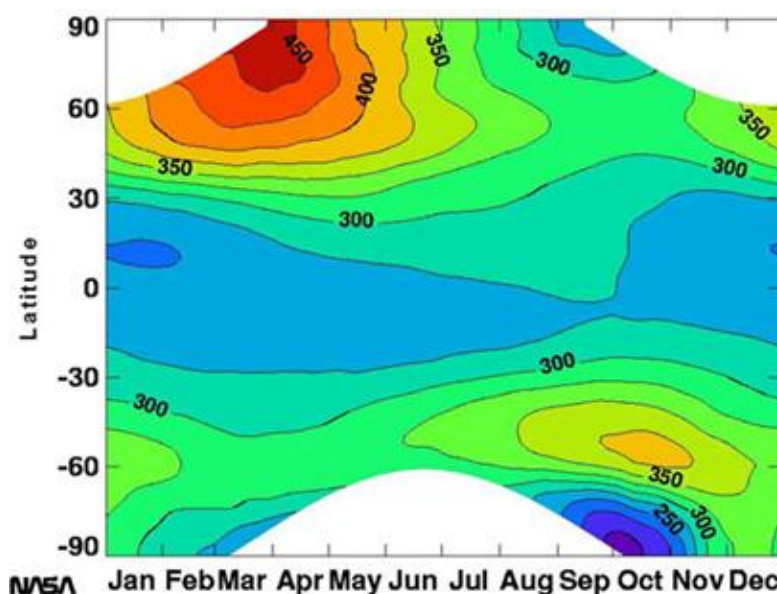


Figura 5 – Dados médios mensais de coluna total de ozônio em função da latitude para o período 1979 – 1992, obtidos através do sensor TOMS.

Fonte: Adaptado de: NASA, 2000a.

Meridionalmente, os valores de ozônio podem variar de 250 UD nas proximidades do equador, onde a intensidade de radiação é praticamente constante o ano todo, para mais de 400 UD nos pólos, porém essa distribuição está sujeita a variações devido à dinâmica da atmosfera, pois a maior produção de O_3 estratosférico é nos trópicos. A Fig. 6 ilustra os maiores valores de coluna total de ozônio em função de latitude e níveis de pressão, que estão em uma camada rasa perto dos 30 mb nos trópicos, descendo e se aprofundando nas regiões tropicais, obedecendo a circulação Brewer-Dobson (WAKAMATSU et al., 1989; SALBY, 1995).

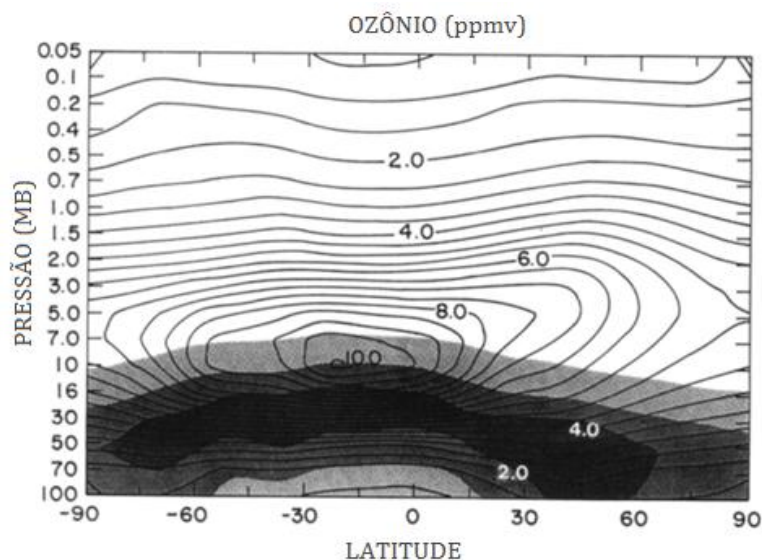


Figura 6 – Razão de mistura média zonal do ozônio (contornos) e densidade de O_3 ou coluna total (sombreado), onde os níveis correspondem a 20, 40 e 60% do valor máximo. Calculados sobre Janeiro e Fevereiro de 1979, com funções de latitude e pressão obtido a partir do Limb Infrared Monitor of the Stratosphere (LIMS) a bordo do NIMBUS-7.

Fonte: Adaptado: Salby, 1995, p.31.

2.3. Sensor OMI

O satélite Aura, lançado em 15 de Julho de 2004, é o terceiro principal componente do *Earth Observing System* (EOS), sendo os dois primeiros o satélite Terra, lançado em 1999, e o Aqua, lançado em 2002. Esse sistema compõe a missão que tem por objetivo estudar a composição química e dinâmica da atmosfera da Terra. O satélite Aura monitora interações de constituintes atmosféricos (fontes naturais e artificiais) que contribuem para as mudanças globais e criação e destruição do ozônio. Possui uma órbita polar sincronizada com o Sol em um ciclo de repetição exata de 16 dias, a uma altitude de 705 km, cobrindo latitudinalmente de 82°N a 82°S, porém com apenas uma passagem por dia sobre cada região (OMI, 2010).

A bordo do satélite estão os instrumentos: *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), *High Resolution Dynamics Limb Sounder* (HIRDLS), *Microwave Limb Sounder* (MLS) e *Tropospheric Emission Spectrometer* (TES) (OMI, 2010).

Segundo OMI (2010), os objetivos da missão OMI estão diretamente ligados aos objetivos da missão Aura, que procuram compreender melhor as variações da camada de ozônio, a importância para o clima global do ozônio troposférico, quais

fontes comprometem a qualidade do ar, como elas são transportadas e como varia a radiação UV-B na superfície.

O instrumento OMI começou a coleta de dados no dia 9 de Agosto de 2004, sendo uma contribuição do Programa Aeroespacial da Netherlands's Agency (NIVR) em colaboração com o Finnish Meteorological Institute (FMI) para a Missão Aura EOS dando continuidade às medidas do *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS), do *Global Ozone Monitoring Experiment* (GOME) e *Solar Backscatter Ultraviolet* (SBUV), quando estes cessaram suas operações. O sensor TOMS operou em três períodos, iniciando em 1978 até 1993, depois de 1991 até 1994 e por fim de 1996 até o ano de 2005, quando cessou suas atividades. O sensor GOME opera desde 1995 e o sensor SBUV desde 1978 (NASA, 2002).

O espectrômetro OMI faz a medição da quantidade de radiação solar que é dispersa pela atmosfera da Terra e pela sua superfície, a partir de uma técnica chamada *Backscatter Ultraviolet* (BUV), com duas imagens alimentando sua grade. Essas medidas são efetuadas em duas faixas (UV - 0,270 a 0,314 μm e UV - 0,306 a 0,380 μm), com uma resolução espectral entre 0,00042 e 0,00063 μm (OMI, 2010).

Backscatter Ultraviolet é um método que determina o ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre em direção ao satélite. O sensor observa vários comprimentos de onda, proporcionando melhor qualidade das medidas espaciais, fornecendo mapeamentos das colunas de ozônio a 13km x 24km, em continuação aos registros de coluna total de ozônio do TOMS e GOME e resolução temporal de um dia (OMI, 2010).

O sensor OMI, além do O_3 , faz medições dos componentes NO_2 , SO_2 , BrO , HCHO e aerossol (continuando as medições do GOME). Consegue distinguir entre diferentes tipos de aerossóis e pode medir a capacidade de absorção de um aerossol em termos de profundidade de absorção ótica ou albedo de espalhamento simples. Faz medidas da pressão e da cobertura de nuvens, e pode mapear a distribuição global de radiação UV-B e suas tendências, fazendo medições quase que em tempo real do ozônio (OMI, 2010).

2.4. Buraco de ozônio na Antártica

Observações no ano de 1985 identificaram que uma depleção significativa do conteúdo de ozônio na estratosfera da Antártica estava ocorrendo desde 1977, o que atraiu as atenções para a química estratosférica e a suscetibilidade da estratosfera para tal modificação (FARMAN et al., 1985). Os dados coletados na estação britânica Halley Bay na Antártica (76°S, 26°W) mostravam que os valores totais da coluna de O₃ haviam diminuído consideravelmente durante as primaveras Austrais, com médias mensais em outubro de 100 UD quando o valor esperado seria 350 UD, e a maior queda entre 10 e 20 km de altitude, quando o esperado deveria ocorrer entre as altitudes de 35 e 45 km (FARMAN et al., 1985).

Diversos fatores causam o aparecimento dessa diminuição (ou como ficou popularmente conhecido, buraco). Uma das causas, segundo Liou (2002), é pelo ar frio que desce sobre o pólo e forma um vórtice polar com temperaturas muito baixas no seu interior, mantendo-se durante o inverno devido à ausência de luz solar, além de reações químicas heterogêneas entre espécies derivadas de cloro a partir de CFCs de fontes antropogênicas. Dentro desse vórtice há presença de nuvens estratosféricas polares - NEPs (SOLOMON, 1999) que se formam entre 15 e 20km de altitude, com temperaturas da ordem de 183K e colaboram para o seu fortalecimento. 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 a uma altitude de 20 km. As NEPs formam-se a partir da tropopausa e apenas nas regiões polares no período de inverno e início da primavera (DESSLER, 2000).

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 das latitudes médias (SCHOEBERL et al., 1992). Com o fim da noite polar esse vórtice tende a enfraquecer, quebrando-se a partir de agosto. Segundo Kirchhoff et al. (1996), quando este vórtice polar quebra momentaneamente, esse ar pobre em O₃ pode mover-se para outras latitudes.

Essa diminuição da coluna total de O₃ é nomeada “Buraco na camada de Ozônio” ou “Buraco de ozônio Antártico”, e consiste em uma redução da coluna total de ozônio para menos de 220UD. Com essa descoberta foi estabelecida uma área

geográfica para o “buraco na camada de ozônio” delimitada por valores de O_3 menores que 220UD, com maior evidência a 12 e 24 km de altitude (FARMAN et al., 1985). Até o ano de 2010, o maior registro desse buraco foi na primavera de 2006, quando sua extensão atingiu 27,5 milhões de quilômetros quadrados (HANSEN, 2010).

A evolução do buraco de ozônio Antártico desde o ano de 1979 até 2010 (Fig. 7) foi mostrada por Salgado et al. (2010), onde puderam observar que a área do buraco cresceu de um milhão de quilômetros quadrados em 1979 para quase 30 milhões em 2006. No ano de 1979, sobre a região da Antártica a coluna total de ozônio tinha uma média de valores mínimos de 190UD, decrescendo até 1996, quando ocorreu o valor mais crítico, de apenas 73UD (Fig. 8).

Observações realizadas sobre a cidade de Punta Arenas – Chile (54°S , 71°W), para os anos de 1992, 1993 e 1994 através do instrumento Brewer e do sensor TOMS, mostram um declínio da coluna total de ozônio de -0,5%. Esta queda encontrada pode ser considerada de grande significância, pois apresenta o dobro da tendência global, que é de -0,25% ao ano. Este fato está ligado, diretamente, ao buraco de ozônio Antártico, podendo assim ser classificado como efeito primário do buraco de ozônio Antártico. (KIRCHHOFF et. al., 1997). Portanto, o efeito primário consiste na extensão do buraco de ozônio Antártico até as latitudes mais baixas sobre o continente sul americano, provocando quedas inferiores a 220UD (HOFMANN et al., 1997).

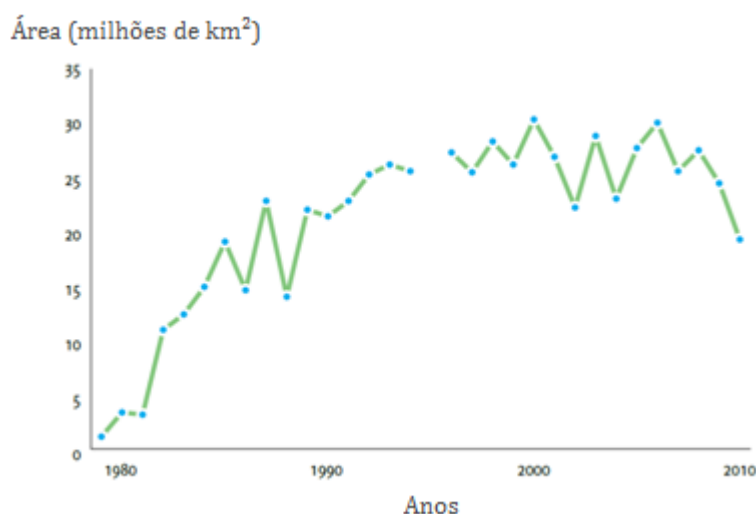


Figura 7 - Área do buraco de ozônio Antártico de 1979 a 2010.

Fonte: Adaptado de: SALGADO et al., 2010.

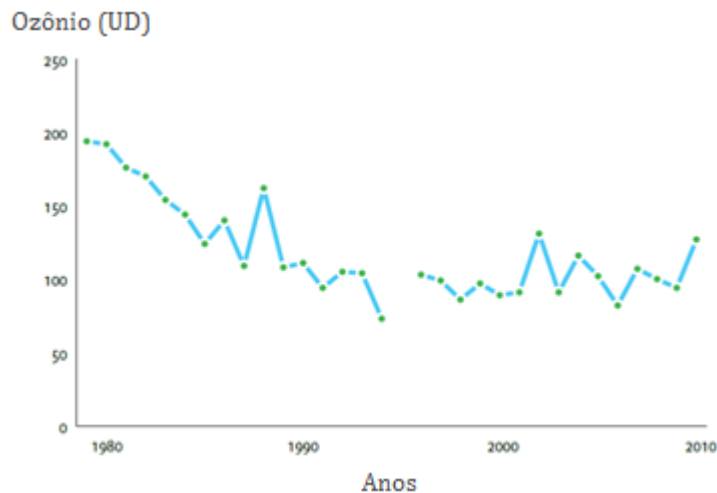


Figura 8 - Valores mínimos de coluna total de ozônio, medida em unidades Dobson, no continente Antártico de 1979 a 2010.

Fonte: Adaptado de: SALGADO et al., 2010.

A Fig. 9a mostra a média dos valores mínimos de ozônio entre os anos de 1979 até 2012, evidenciando a queda que ocorre durante os meses de setembro e outubro com uma média de valor de conteúdo de ozônio de 130UD, que coincide com a Fig. 9b, que mostra a maior área do buraco de ozônio nos mesmos meses, com uma média da área de 20 milhões de km².

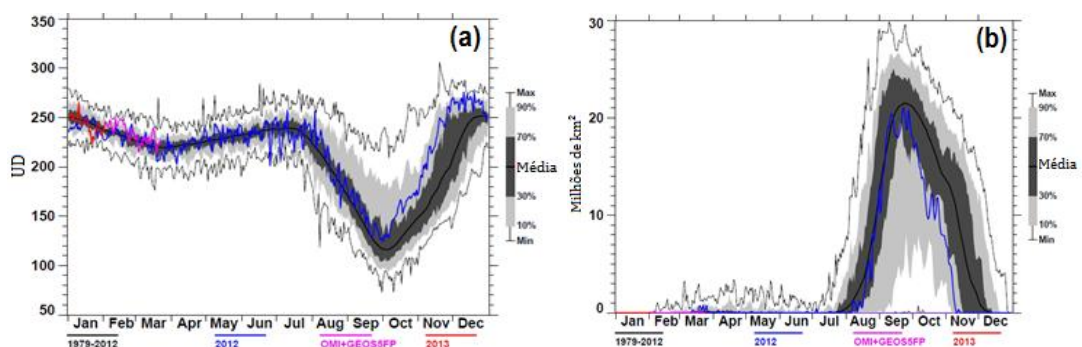


Figura 9 – (a) Climatologia dos valores mínimos de coluna total de ozônio em UD. Linha preta: indica a média dos valores mínimos mensais de coluna total de ozônio. Sombras em cinza escura e clara: mostram em porcentagens as variações dessa média. (b) Climatologia da área do buraco de ozônio. Linha preta indica as médias mensais do tamanho do buraco de ozônio na Antártica em milhões de km². Sombras em cinza escura e clara: mostram em porcentagens as variações dessa média. Ambos para o período de 1979 a 2012. As linhas azul e vermelha mostram a variação desses valores para o ano de 2012 e 2013 respectivamente.

Fonte: Adaptado de: NASA. Ozone Hole Watch. 2013.

2.5. Efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico

O buraco de ozônio da Antártica causa perturbações no conteúdo de O_3 nas latitudes médias (ATKINSON et. al., 1989), porém desde o início da década de 90 diversos artigos, tais como Prather e Jaffe (1990), Prather et al. (1990), Thompson (1991) e Kane (1991) alertavam para a possibilidade desse buraco estar afetando as latitudes 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 isoladas por um período de 07 até 20 dias, ou seja, possuindo tempo suficiente para alcançar médias e baixas latitudes. Portanto, a baixa concentração de O_3 pode ser transportada através de massas de ar que se desprendem do vórtice formado sobre a Antártica, durante a primavera (quando este vórtice está mais instável), gerando consequências temporárias em latitudes mais baixas, são os chamados “efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico”. Esses efeitos são temporários, duram em torno de 03 a 04 dias (BERTAGNOLLI et.al. 2006), e são atribuídos a eventos em que a coluna total de O_3 apresenta valores menores que as médias mensais da localidade, e podem ocorrer durante os meses entre agosto e novembro (KIRCHHOFF et al. 1996).

Sobre a região do Sul da América do Sul há trabalhos que mostram alguns eventos de decaimento da coluna total de O_3 . Esses casos foram identificados como efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico (KIRCHHOFF et al., 1996; BERTAGNOLLI et al., 2006; PEREIRA, 2009; VAZ, 2010; HUPFER et al., 2011, KALL et al., 2011). Entretanto essas análises foram realizadas para estudos locais, feitos 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/ou 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 as colunas totais de O_3 , SO_2 e NO_2 .

Uma climatologia feita com 19 anos de dados pelo instrumento Brewer, para Cachoeira Paulista-SP (22,4°S e 45°W) e 13 anos de dados para Natal-RN (5,4°S; 35,1°W) mostrou que a máxima variação sazonal do ozônio é de 30 UD para estas

regiões (KIRCHHOFF et al. 1996), sendo que os maiores valores ocorrem em setembro e outubro (em torno de 293 UD) e um mínimo ocorre em maio (265 UD). Kirchhoff et al., (1996) observaram, em Outubro de 1993, através de dados de dois espectrofotômetros Brewer instalados em Santa Maria-RS (29,4°S; 53,5°W), que houve um decaimento na coluna total de O₃ de cerca de 60 UD em um período curto de quatro dias, queda de grande significância, pois nesse período o comportamento normal desse gás seria de atingir seus valores máximos anuais em médias latitudes, no Brasil, que seria aproximadamente 290 UD. Os dois espectrofotômetros Brewer obtiveram resultados iguais e quando comparados aos mapas de dados de coluna total de ozônio do sensor TOMS da NASA mostraram que essa queda está 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 dois dias de queda brusca da coluna total de ozônio (19 e 28 de outubro de 1993) e notaram a escassez de gás na estratosfera, principalmente, que é característica do perfil Antártico, podendo constatar assim a ocorrência de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico.

A origem das massas de ar pobres em O₃ vindas da região Antártica fica mais evidente ao se analisar as trajetórias dessas massas, através de observações por imagens de satélite e 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, e com a conservação da temperatura potencial, se os processos forem adiabáticos, não há troca de massa e apenas o vento consegue atravessá-las (HOSKINS, 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). Portanto, o transporte horizontal de conteúdo de ozônio pode ser associado à variação da Vorticidade Potencial Absoluta em superfície isentrópica, pois uma queda nos valores dessa variável mostra que a origem da massa de ar é tropical, e um aumento nos valores de VPA mostram que a origem dessa massa de ar é polar (BENCHERIFE et al., 2003; SEMANE et al., 2006; PINHEIRO et al., 2011; PERES, 2013).

No período entre os anos de 1998 e 2008, Peres (2010) observou, no Observatório Espacial do Sul – OES, em São Martinho da Serra-RS, que grande parte dos eventos de queda da coluna de O₃ são realmente “efeitos secundários do

buraco de ozônio Antártico” principalmente nos meses de setembro e outubro, e apesar desses meses terem as maiores ocorrências desses tipos de casos, são os que têm as maiores médias climatológicas de coluna de ozônio do ano. As médias climatológicas calculadas para esse período na região do OES para setembro e outubro são $295,6 \pm 10,2$ UD e $291,5 \pm 8,9$ UD, respectivamente.

Pinheiro et al. (2011) analisaram a coluna total de ozônio para os dias em que o ozônio fosse inferior à média climatológica de vinte anos para setembro e outubro sobre o Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra-RS ($29,3^{\circ}\text{S}$; $53,5^{\circ}\text{W}$). Apenas os dias em que houve queda inferior à média climatológica menos 1,5 de desvio padrão nos anos de 2008 e 2009 foram analisados. Foram registrados três eventos de queda em 2008 e dois eventos em 2009, com uma diminuição média de $9,7 \text{ UD} \pm 3,3\%$ quando comparado à climatologia. Os cinco dias mostraram ter influência do buraco de ozônio Antártico, pois os dados do sensor OMI, a trajetória da massa de ar e um aumento da vorticidade potencial absoluta indicaram a origem polar.

Fazendo uma análise no espectro contínuo de ondeletas nos dados do espectrofotômetro Brewer (Observatório Espacial do Sul- OES em São Martinho da Serra-RS) para dados de coluna total de O_3 no ano de 2000, Bertagnolli et al. (2006) puderam notar que, para o estudo da variabilidade temporal do ozônio e de fenômenos de pequena escala temporal, como os efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico, essa análise de ondeletas era eficiente. Seu estudo mostrou que no ano de 2000, sobre o Observatório Espacial do Sul 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. Essas oscilações ocorreram principalmente entre os dias julianos de 200 e 300, correspondentes à primavera.

Salgado et al. (2010) fizeram um estudo sobre uma das regiões habitadas fisicamente 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 para Punta Arenas, realizada através dos dados do instrumento TOMS da NASA. Pode-se comprovar que havia um grande aumento de radiação UV-B na superfície, decorrente da grande influência que o buraco de ozônio na Antártica

exerce 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 seria de aproximadamente de 359 UD.

2.6. Sistemas sinóticos e suas influências sobre o conteúdo de ozônio no sul da América do Sul

Trabalhos recentes (BERTAGNOLLI et al., 2006; PEREIRA, 2009; PERES, 2010; PINHEIRO et al., 2011, PERES, 2013) estudaram as causas sinóticas dos “efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico” através de uma análise da dinâmica da troposfera e das condições de tempo para cada dia em que há ocorrência desses eventos com o intuito de encontrar padrões que possam ser aliados na previsão desse tipo de fenômeno (OHRING et al., 2010).

A previsão eficaz de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico sobre o sul do Brasil durante a primavera do ano de 2012 foi realizada por Peres (2013), onde foram utilizados dados de saída do modelo de previsão numérica de tempo Global Forecast System (GFS) para a confecção de mapas de vorticidade potencial que possibilitaram prever a chegada da massa de ar pobre em O_3 , com pelo menos quatro dias de antecedência. O sucesso dessa previsão foi possível em virtude da análise de 66 casos de quedas de coluna total de ozônio, entre os anos de 1979 e 2011, pelos dados de satélite (sensor TOMS) e pelos dados do espectrofotômetro Brewer, a partir de 1992, instalado no Observatório Espacial do Sul (OES), os quais tiveram uma queda média de $8,66 \pm 3,13 \%$ na coluna total de O_3 .

Foi constatado que um dos padrões atmosféricos responsáveis por essas quedas temporárias no conteúdo de ozônio é o deslocamento da corrente de jato de latitudes maiores em direção ao sul do Brasil, porque auxilia o transporte das massas de ar estratosféricas pobres em ozônio, pois com a quebra da tropopausa há uma passagem de ar estratosférico para a troposfera, e um anticiclone que se estabelece após a passagem da frente, impedindo a formação de nebulosidade (PERES, 2013).

A passagem de sistemas frontais dinâmicos associados à ação da corrente de jato em altos níveis faz com que a tropopausa tenha um envelopamento, que é, segundo Reed (1955), a intrusão de ar estratosférico, que desce para os níveis médios e baixos da troposfera, o que viabiliza o transporte de ar estratosférico para

a troposfera, fazendo com que a coluna total de ozônio tenha um aumento logo após a passagem da frente fria (KUNZ; SPETH, 1997; FONTINELE, 2012).

Eventos como bloqueios atmosféricos podem causar anomalias negativas no conteúdo de ozônio (CANZIANI et al., 2002), assim como a formação de ciclones, onde a queda ocorre antes e durante a sua formação, e no seu pico de intensidade (MIDYA et al., 2012). A corrente de jato atua no transporte de massas entre a troposfera e a estratosfera (TANG; PRATHER, 2010; MANNEY et al., 2011; TRICKL et al., 2011), assim a distribuição vertical do ozônio é afetada diretamente por esse padrão troposférico (BUKIN et al., 2011).

O transporte de massas entre troposfera e estratosfera está associado à corrente de jato. Essa troca pode ocorrer a partir de sistemas pré-frontais e convecção tropical (DE BELLEVUE et al., 2006) (transporta massa da troposfera para a estratosfera) e a partir de sistemas mais profundos como os ciclones extratropicais e baixas desprendidas (transporta massa da estratosfera para a troposfera) que causam o deslocamento dessa corrente (HOLTON et al, 1995).

Peres (2013) pôde constatar que após a passagem de uma frente fria pelo sul do Brasil houve uma queda do conteúdo de ozônio, relatada como efeito secundário do buraco de ozônio Antártico, em outubro de 2010. Essa passagem da região pós-frontal da corrente do jato subtropical fez com que houvesse transporte de ar estratosférico para dentro da troposfera, carregando ar pobre em O_3 . Casos como este mostram a importância do monitoramento do conteúdo de ozônio nas regiões polares, pois podem interferir significativamente em regiões além da Antártica, como no regime hídrico das regiões subtropicais durante o verão austral (KANG et al., 2011), que ocorre em razão do aumento do buraco de ozônio Antártico que causa o deslocamento para sul da corrente de jato extratropical (FELDSTEIN, 2011).

2.7. Tendências do ozônio global e consequências da queda de ozônio estratosférico

Bojkov et al. (1995) realizaram uma análise da climatologia elaborada a partir dos dados de medidores em superfície mostrando que o ozônio em nível global possuía durante o período entre 1964 e 1994 uma tendência de decréscimo. Foram analisadas 46 estações utilizando o Espectrofotômetro Dobson para o

período, e assim mostrou-se que havia um declínio de ozônio nas latitudes médias (entre 35° e 60° de latitude) durante todo o ano, tendo queda de -4,1% por década para o Hemisfério Sul e queda de -4,3% por década para o Hemisfério Norte, desde janeiro de 1979. Atualmente essa queda não existe, pois no final da década de 90 ela foi estabilizada. (CHUBACHI et al., 2005).

É estimado que uma redução de 1% na coluna total de O₃ pode causar um aumento médio de 1,2% na radiação UV biologicamente ativa, devido ao ozônio absorver fortemente na faixa espectral do UV-B (GUARNIERI et al., 2004). Portanto, se houver uma queda apreciável deste constituinte atmosférico, um aumento significativo no fluxo de radiação UV-B solar irá ocorrer na superfície terrestre.

Um estudo de Salgado (2010) mostra que não há grandes variações da coluna total de ozônio para as cidades chilenas selecionadas (tab. 2), exceto para as mais próximas à região Antártica, onde as médias são influenciadas pelos valores baixos ocorridos durante a primavera e verão. Em geral, a tab. 2 mostra que os valores médios da coluna total de ozônio nas regiões mais próximas ao equador são menores e aumentam na direção dos pólos (SALGADO, 2010).

Essa variação da coluna total de O₃ sob as cidades chilenas não influenciadas pelo buraco de ozônio antártico da tab. 2 pode ser representada pelo resultado gerado por duas estações Dobson brasileiras que mostram a variação sazonal do O₃, como mostra a Fig. 10. Uma das estações se encontra em Cachoeira Paulista-SP (22,7°S e 45°W), com médias mensais de 19 anos, e outra em Natal-RN (58°S e 45°W), que mostra médias mensais de 13 anos. As barras verticais mostram os desvios padrão, que variam aproximadamente 15UD (KIRCHHOFF et al., 1996).

Os autores acima mencionados afirmaram que é possível observar, através da Fig. 10, que em maio há um mínimo e em setembro e outubro estão as maiores médias, sendo a variação sazonal de aproximadamente 30UD. Uma observação importante a se fazer é que as duas estações estão separadas por cerca de 17° de latitude, porém mostram características bem semelhantes, com um mesmo padrão de oscilação, visto estarem ambas em baixas latitudes, em regiões tropicais.

Tabela 2 - Médias da coluna total de ozônio (UD), segundo as estações do ano e os períodos de 1978 a 1987, de 1978 a 2010 e de 2010.

	Verão (Dez-Fev)			Outono (Mar-Mai)			Inverno (Jun-Ago)			Primavera (Set-Nov)		
	1978-1987	1978-2010	2010	1978-1987	1978-2010	2010	1978-1987	1978-2010	2010	1978-1987	1978-2010	2010
Arica (18,3°S; 70,2°W)	263	262	263	257	255	255	265	263	263	276	275	279
Iquique (20,1°S; 70°W)	268	266	267	261	258	261	276	273	274	288	286	286
Copiapó (27,2°S; 70,2°W)	274	272	271	267	263	266	292	287	287	302	299	297
Valparaíso – Santiago (33,2°S; 71°W)	281	278	277	273	269	273	309	303	302	317	313	310
Concepción (36,5°S; 73,3°W)	288	284	283	280	275	278	324	317	317	333	327	322
Valdivia – Puerto Montt (40°S; 73°W)	296	290	289	287	280	282	331	325	324	346	340	331
Aysén (45,4°S; 72,6°W)	305	298	296	294	286	286	334	327	326	357	349	338
Punta Arenas (54°S; 70,3°W)	318	306	304	301	292	291	331	322	291	365	353	342
Base Frei-Antártica (62°S; 58,5°W)	323	311	307	305	297	295	321	310	212	363	345	334

Fonte: Adaptado de: SALGADO, et al., 2010.

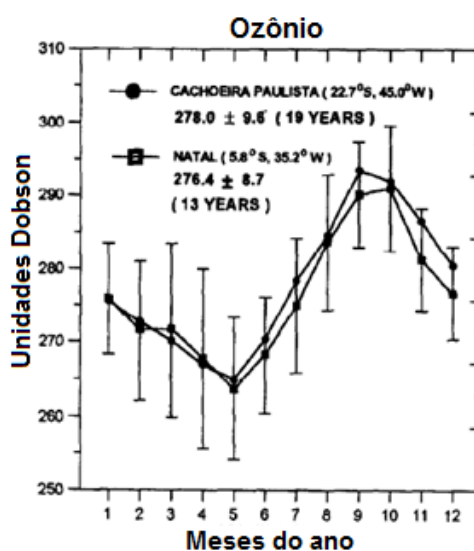


Figura 10 - Variação sazonal de ozônio estratosférico (UD) plotado com 19 anos de dados para Cachoeira Paulista e 13 anos de dados para Natal. Barras verticais são os desvios padrão.

Fonte: Adaptado de: Kirchhoff et al., 1996.

A evolução da coluna total de ozônio, de setembro a dezembro de 2009, para Punta Arenas-Chile (Fig. 11a) mostra que o decaimento de ozônio devido ao posicionamento do buraco de ozônio Antártico fez a radiação UV-B aumentar sobre a cidade (Fig. 11b) (SALGADO, 2010).

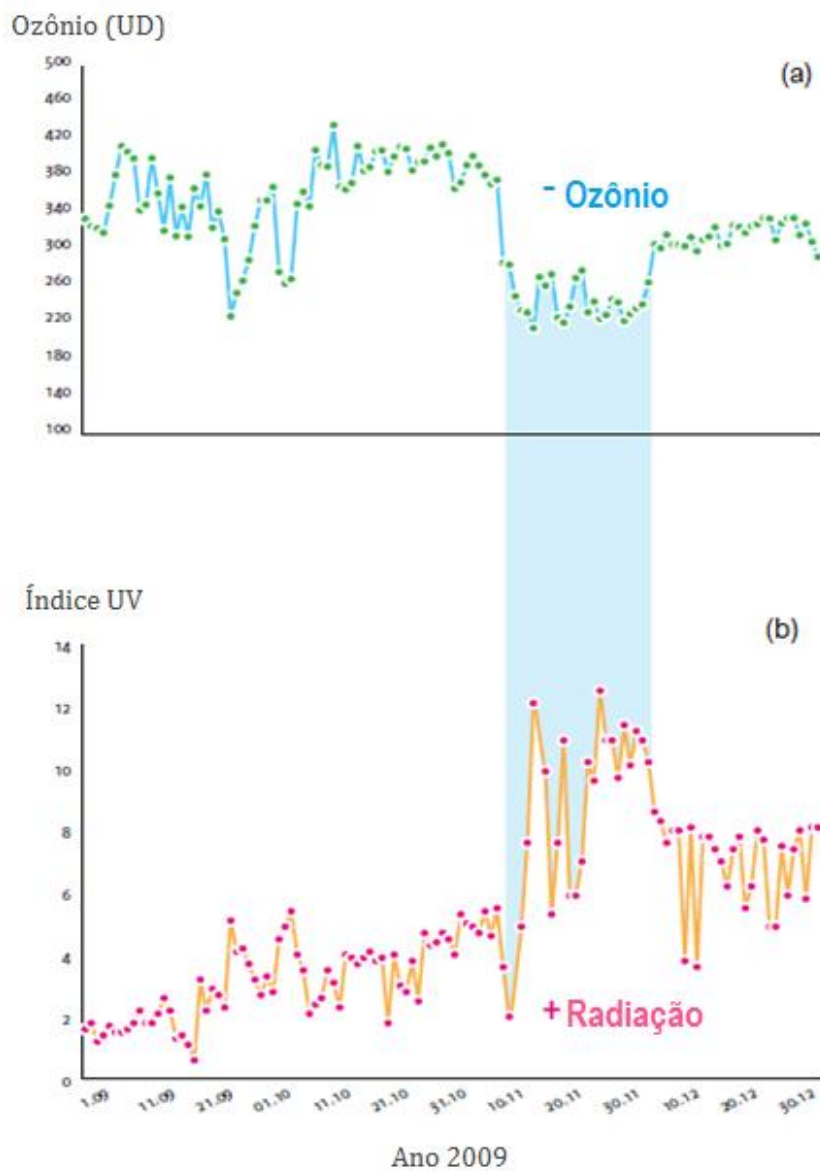


Figura 11 - Coluna total de ozônio (UD) (a), e radiação ultravioleta (índice UV) (b) em Punta Arenas-CHI, de setembro a dezembro de 2009.

Fonte: SALGADO et al. 2010.

Dados e Metodologia

3.1. Dados do sensor OMI

Utilizou-se dados brutos de coluna total de ozônio, em unidades Dobson, disponibilizados pelo sensor OMI do Earth Observations System (EOS) da NASA. O sensor OMI iniciou suas atividades em agosto de 2004, quando o sensor TOMS ainda atuava, e continua em funcionamento até os dias atuais, fornecendo dados diariamente quase em tempo real.

O sensor OMI determina a coluna total de ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera da Terra de volta para o satélite, nas faixas espectrais de radiação ultravioleta entre 0,270 a 0,314 μm e 0,306 a 0,380 μm . Os dados utilizados são coletados por este sensor e correspondem ao período entre os dias 1º de Outubro de 2004 até o dia 31 de Dezembro de 2011. São dados globais de alta resolução de todo o ozônio contido na atmosfera terrestre, tendo resolução temporal diária e resolução espacial de 1º por 1º, e uma resolução espectral entre 0,00042 e 0,00063 μm disponibilizados pela variável coluna total de ozônio (Ozone Total Column).

3.2. Região de estudo

Para uma melhor análise dos resultados a região de estudo foi dividida em três áreas. A primeira e maior área abrange a América do Sul (entre as latitudes 20°N e 90°S e longitudes de 0º e 140°W, Fig. 12) e foi utilizada para a análise das médias mensais. A segunda área fica sobre a região sul da América do Sul, representada pelo retângulo azul na Fig. 12 (entre as latitudes de 20°S e 60°S e entre as longitudes de 30°W e 80°W), a qual apresenta diversos registros de casos

de quedas temporárias de coluna total de ozônio que foram relatados por diversos autores como sendo efeitos primários e secundários do buraco de ozônio Antártico, além dos baixos valores de coluna total de ozônio existentes na região tropical devido à circulação Brewer-Dobson que podem se estender para as regiões mais ao sul. A terceira área é delimitada entre as latitudes de 20°S e 40°S e entre as longitudes de 30°W e 80°W (Fig. 12, região mostrada pelo retângulo vermelho), a qual abrange os seguintes países: Uruguai, Paraguai, Argentina, Chile e o Sul da Bolívia e ainda o sul e parte da região sudeste do Brasil (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e parte do Espírito Santo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul), onde foi realizada a escolha e a análise dos casos, que são descritos nos itens a seguir.

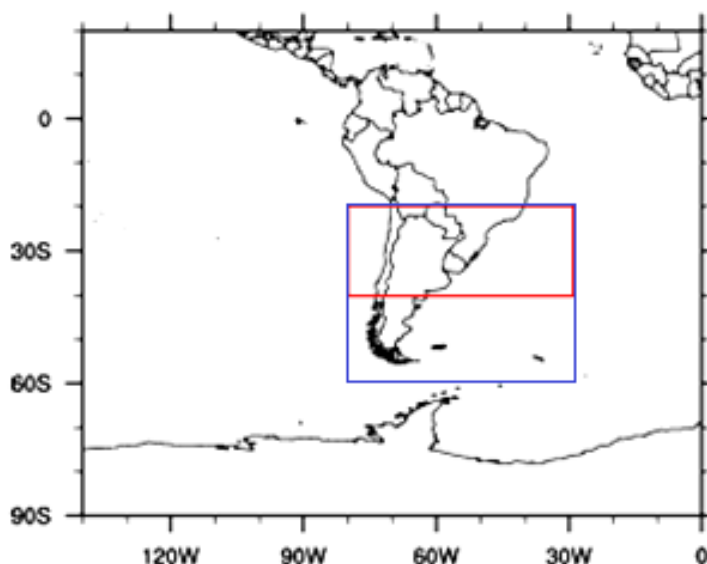


Figura 12 - Ilustração da região de estudo, a qual abrange a região mais ao sul da América do Sul (retângulo vermelho), localizada entre as latitudes de 21°S e 60°S e as longitudes de 30°W e 80°W.

3.3. Médias e limiares mensais

A média mensal calculada utilizou dados de coluna total de ozônio, disponibilizados pelo sensor OMI, sendo calculada a partir da média para cada mês do ano com sete anos de dados (2004-2011), para a América do Sul (primeira área de estudo, localizada entre latitudes de 20°N a 90°S e longitudes de 0 a 140°W). Esta média foi calculada por pixel para todos os anos, obtendo a média mensal em cada pixel.

Para fins de determinação de eventos de decaimento da coluna total de ozônio foram calculados o valor de 1,5 de desvio padrão abaixo dessa média mensal, e assim calculou-se a diferença entre a média e 1,5 de desvio padrão para cada pixel da área entre as latitudes 20°S e 60°S e longitudes de 30°W e 80°W (segunda área de estudo, mostrada pelo retângulo azul na Fig. 12) (equação 1).

Segundo Pinheiro et al. (2011), esse limiar serve como limite para valores de coluna total de O₃ significativamente abaixo da média mensal, os quais podem acusar ocorrências de efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico ou decaimento por massas de ar vindas da região tropical. Assim, este limiar é utilizado uma vez que, se fosse utilizado apenas 1,0 desvio padrão, as flutuações em torno da média seriam em torno de 3% (variação esta que usualmente ocorre devido à variação do ozônio troposférico). Se fosse utilizado 2,0 desvios padrões as flutuações em torno da média seriam de 7%, porcentagem que provavelmente excluiria eventos de efeito secundário do buraco de ozônio Antártico (PINHEIRO, 2011; PERES, 2013). Então devido a essas massas de ar, com decaimento da coluna total de ozônio, serem polares ou tropicais, a confirmação de sua origem foi realizada através de uma análise dos casos, os quais são escolhidos através de uma contagem de número de dias abaixo do limiar.

$$\text{Limiar} = \text{média mensal} - 1,5\text{desvio padrão} \quad (\text{equação: 1})$$

3.4. Quantificação de dias com decaimento da coluna total de ozônio e seleção de casos

Uma contagem dos dias com valores abaixo do limiar de 1,5 de desvio padrão é feita por pixel sobre a segunda área de estudo (latitudes de 20°S a 60°S e longitudes de 30°W a 80°W, mostrada na Fig.12 pelo retângulo azul), com o intuito de quantificar o número de ocorrências de valores baixos de coluna total de ozônio e identificação das principais áreas afetadas por essa diminuição. Com a quantificação da ocorrência de decaimento foi produzido uma figura mensal com os números de ocorrências de casos com valores abaixo do limiar de 1,5 de desvio padrão para cada pixel.

Para a escolha dos casos é realizada a escolha de um pixel por mês, que é selecionado devido ao seu maior número de ocorrências de decaimento da coluna

total de ozônio, ou seja, é selecionado o pixel com maior número de dias abaixo do limiar. Como critério de seleção, esse pixel deve estar localizado acima da latitude de 40°S, pois deseja-se excluir as regiões onde o buraco de ozônio Antártico age diretamente. Assim, os pixels ficaram localizados entre as latitudes de 20°S e 40°S e entre as longitudes de 30°W e 80°W, sobre a área continental (Fig. 12, terceira área de estudo, mostrada pelo retângulo vermelho). Como o pixel selecionado contém vários dias com valores abaixo do limiar, apenas o dia com o menor valor de coluna total de O_3 foi analisado. Dessa forma, selecionou-se 12 casos de decaimento da coluna total de O_3 , um para cada mês do ano, onde são analisadas as trajetórias das massas de ar com o intuito de constatar a origem de cada massa, que podem ser Antárticas ou tropicais, e ainda analisar a situação sinótica de cada evento.

Para um melhor entendimento de como foi realizada a escolha dos casos é apresentado um exemplo que mostra a quantificação de dias abaixo do limiar para o mês de janeiro (Fig. 13a), onde o quadrado vermelho mostra a localização do pixel que foi selecionado (conforme critérios apresentados neste tópico). Na tab. 3 são apresentados os 16 dias que estiveram abaixo do limiar, para esse pixel, no caso do mês de janeiro, com seus respectivos valores de coluna total de ozônio e suas datas de ocorrência. Desses 16 dias, o que apresentou valor de coluna total de ozônio foi o dia 24 de janeiro de 2005, com 242,9UD (linha marcada em verde na tab. 3). Assim, esse foi o dia escolhido para análise representativo de janeiro.

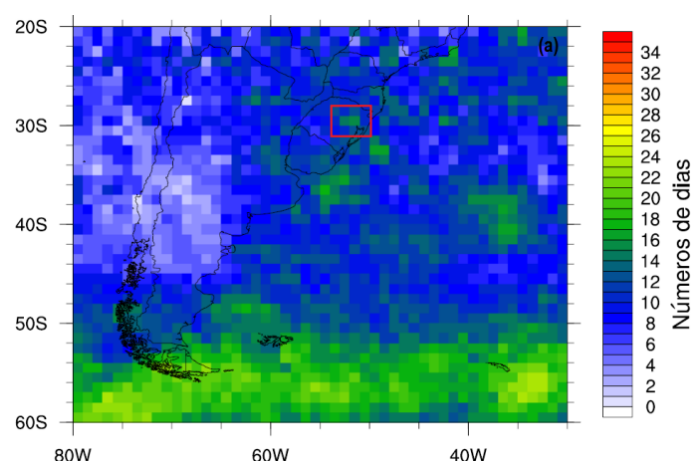


Figura 13 – Exemplo de quantificação de dias abaixo do limiar, referente ao mês de janeiro.

Tabela 3 – Valores de coluna total de ozônio e suas datas de ocorrência referentes aos 16 dias que estiveram abaixo do limiar (29,5°S e 51,5°W) para o mês de janeiro. A linha marcada em verde indica o dia com menor valor de coluna total de ozônio.

	Coluna total de ozônio (UD)	Data
1	242,9	24/01/2005
2	247,6	15/01/2005
3	248,0	22/01/2005
4	248,2	23/01/2005
5	245,7	30/01/2005
6	247,3	31/01/2005
7	245,2	04/01/2007
8	244,5	11/01/2007
9	246,2	25/01/2007
10	244,3	27/01/2007
11	245,8	28/01/2007
12	246,8	29/01/2007
13	247,2	30/01/2007
14	247,7	01/01/2008
15	245,6	05/01/2010
16	247,7	19/01/2010

3.5. Análise dos casos selecionados

Na realização da análise dos casos com os menores valores de coluna total de O₃ foram analisadas as imagens do campo de vorticidade potencial (VP) sobre superfícies isentrópicas de 620K, 630K e 640K. Para a realização dessa análise são utilizados parâmetros diários para diversos níveis de pressão (1000-10mb) das seguintes componentes: temperatura, vento meridional e vento zonal. Esses dados de vento e temperatura são fornecidos pelo National Centers for Environmental Prediction/ Atmospheric Research (NCEP/NCAR) com resolução espacial de 2,5° x 2,5° e temporal de média diária.

Ao analisar a variação da vorticidade potencial absoluta (VPA), ou o módulo da vorticidade potencial (VP, tratado apenas por vorticidade potencial a partir desse ponto), de uma superfície isentrópica, para os níveis de 620K, 630K e 640K, pode-se constatar a origem de uma massa de ar. Quando há um aumento dos valores da vorticidade potencial sobre o ponto selecionado pode-se classificar a massa de ar

como polar, mas se há uma diminuição da VP, então essa massa de ar é considerada tropical (BENCHERIFE et al. 2003; 2011; SEMANE et al., 2006; BRACCI et al., 2012).

Além da análise da origem da massa de ar, é feita a análise sinótica para cada evento de decaimento da coluna total de ozônio, a fim de investigar as possíveis características troposféricas dos baixos valores de ozônio na atmosfera. São utilizados os dados da NCEP/NCAR com resolução média diária e resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, para pressão em superfície (reduzida ao nível do mar), geopotencial e ômega em 500hPa, e os dados de vento (meridional e zonal) para gerar o campo de divergência em 200hPa.

Resultados e discussões

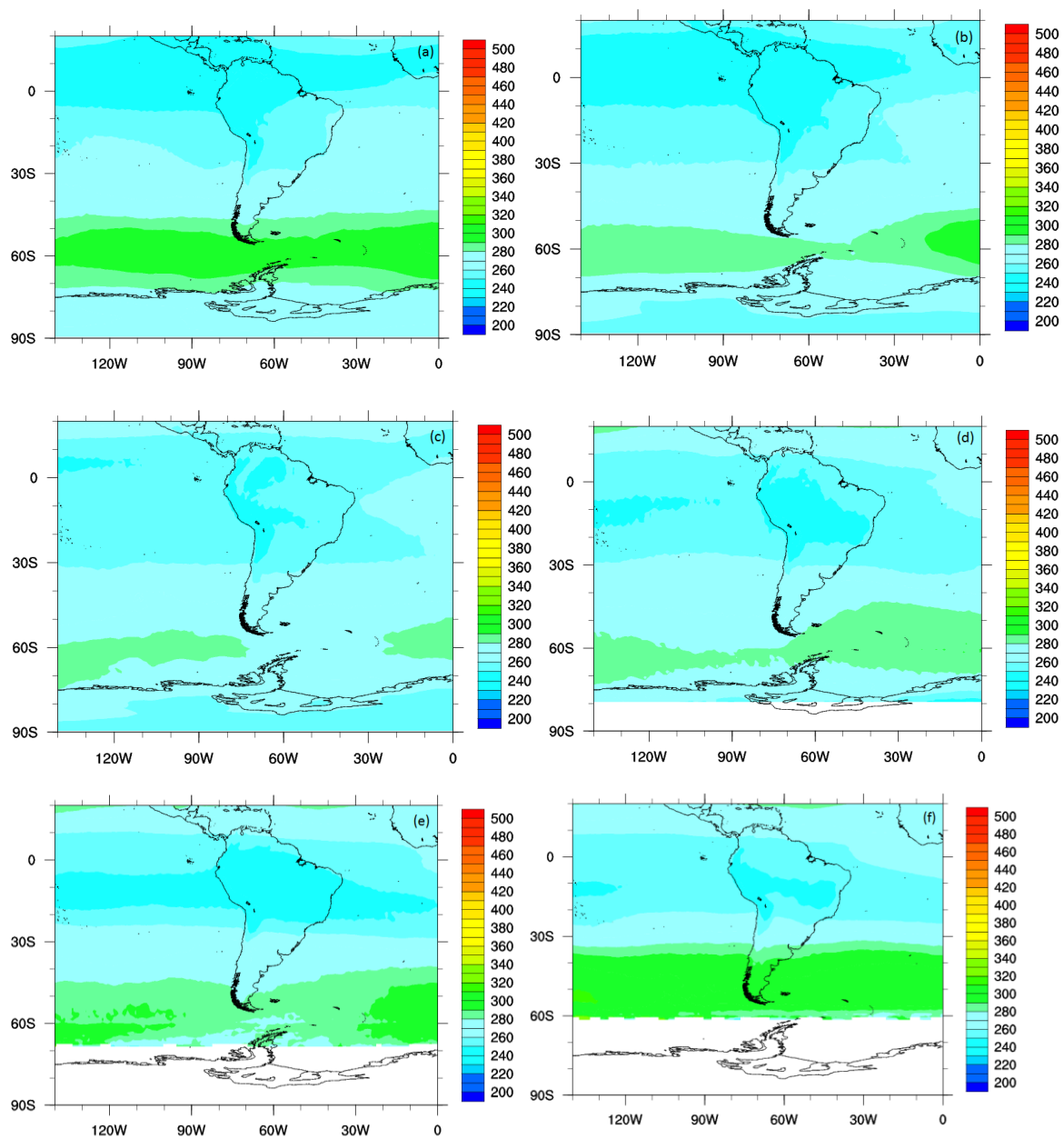
4.1 Médias da coluna total de ozônio

A Fig. 14 representa a climatologia mensal, em unidades Dobson, da coluna total de ozônio para o período compreendido entre outubro de 2004 e dezembro de 2011, a partir dos dados do sensor OMI. Nota-se que quanto mais se aproximam os meses próximos à primavera (agosto, setembro, outubro e novembro), há uma maior variabilidade da coluna total de O_3 ao longo das faixas de latitudes na região mais ao sul do continente Sul Americano (Fig. 14h, 14i, 14j, 14k). Conforme destacado por Dobson (1968), essa maior variabilidade próxima à primavera ocorre devido à forte circulação de oeste do vórtice que se forma durante o inverno e impede que ocorra transporte meridional de conteúdo de O_3 , assim há uma maior concentração desse componente entre as latitudes de $30^\circ S$ e $70^\circ S$. Os meses com menor variabilidade de coluna total de ozônio, sobre a região de estudo, são os meses mais próximos ao outono (fevereiro, março, abril e maio. Fig. 14b, 14c, 14d, 14e, respectivamente). Isso ocorre devido à maior homogeneidade de incidência de radiação solar na estação do verão, e ao desaparecimento do vórtice na região Antártica, tendo assim um transporte meridional sem barreiras.

Enquanto a variabilidade meridional da coluna de ozônio durante os meses próximos a primavera (Fig. 14h, 14i, 14j, 14k) é de aproximadamente 150UD em cada mês (valores entre latitudes polares e médias entre 200 e 350UD), a variabilidade meridional dos meses próximos ao outono (Fig. 14b, 14c, 14d, 14e) é de 50UD em cada mês (ocorre entre 250 e 300UD), uma diferença de aproximadamente 100UD de variação entre esses períodos.

Quanto à variabilidade meridional, os meses próximos à primavera apresentam 200UD nas latitudes polares, e que aumenta progressivamente até as

latitudes de 45-50°S, onde alcançam seus máximos valores de 350UD. Os meses próximos ao outono, com sua menor variabilidade meridional, possuem valores de 250UD na região polar. Diferente dos meses próximos à primavera, que têm uma homogeneidade quanto à variação meridional, esses meses são mais irregulares com relação a essa variação ao longo das latitudes, e seus máximos valores de coluna total de ozônio encontram-se nas proximidades do cinturão de 60°S, com valores próximos a 300UD.



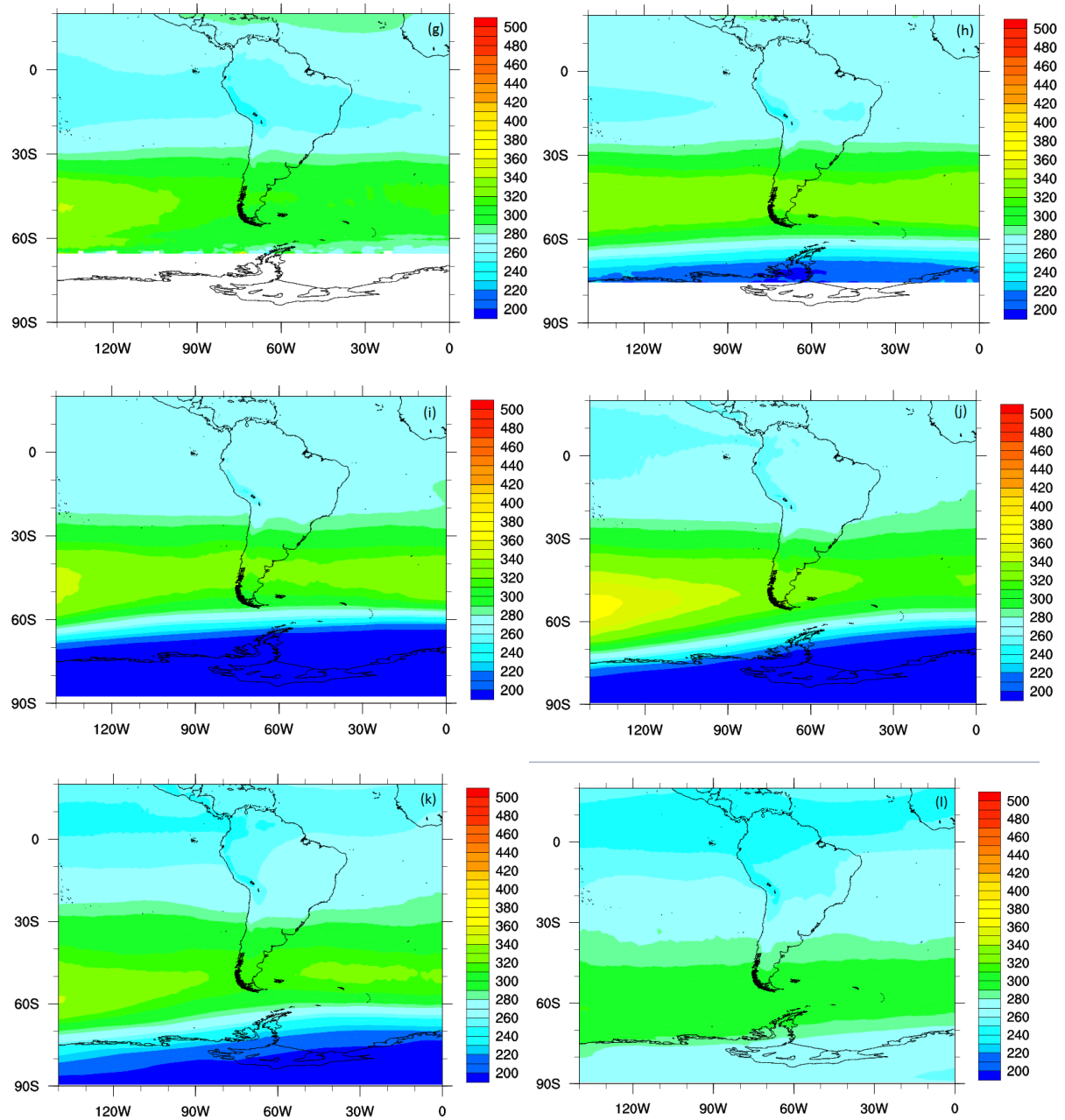


Figura 14 – Climatologia mensal da coluna total de ozônio (em UD) realizada para o período de Outubro de 2004 a Dezembro de 2011. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

A Fig. 15 representa as médias da coluna total de ozônio para três cortes meridionais nas longitudes de 70°W, 60°W e 50°W, para a região entre as latitudes de 20°S e 60°S, assim pode-se comprovar o comportamento da coluna total de ozônio ao longo das faixas latitudinais. Através dos mapas mensais de climatologia da Fig. 14 puderam ser identificados os dois meses com menor e maior variação mensal de coluna total de ozônio, que correspondem aos meses de março (linha contínua) e outubro (linha tracejada), respectivamente.

Comparando os cortes meridionais de março e outubro (Fig. 15), o mês de março se mostra mais linear, porém com maior variação meridional (com maiores flutuações da média mensal ao longo das latitudes). Percebe-se ainda a menor variação entre as latitudes analisadas quando comparado com os valores apresentados para outubro. Enquanto em outubro a coluna total varia, aproximadamente, entre 270 e 330UD (60UD), março varia entre 250 e 280UD (30UD). Em outubro, as três longitudes representadas no gráfico mostram a mesma configuração, com seus menores valores de coluna total de ozônio nas latitudes próximas a 20°S, com uma subida gradativa até os 45-50°S e uma queda posterior. Possivelmente, esse comportamento se deve ao vórtice formado durante os meses de inverno sobre a região antártica, que barra o transporte de ozônio meridionalmente, fazendo com que este acumule entre as médias latitudes (DOBSON, 1968; ANDRÉ, 2003).

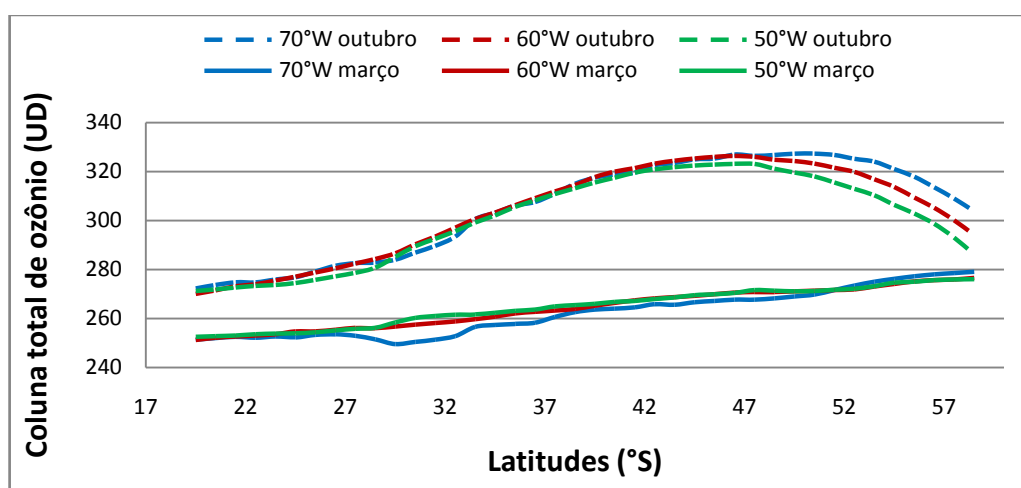
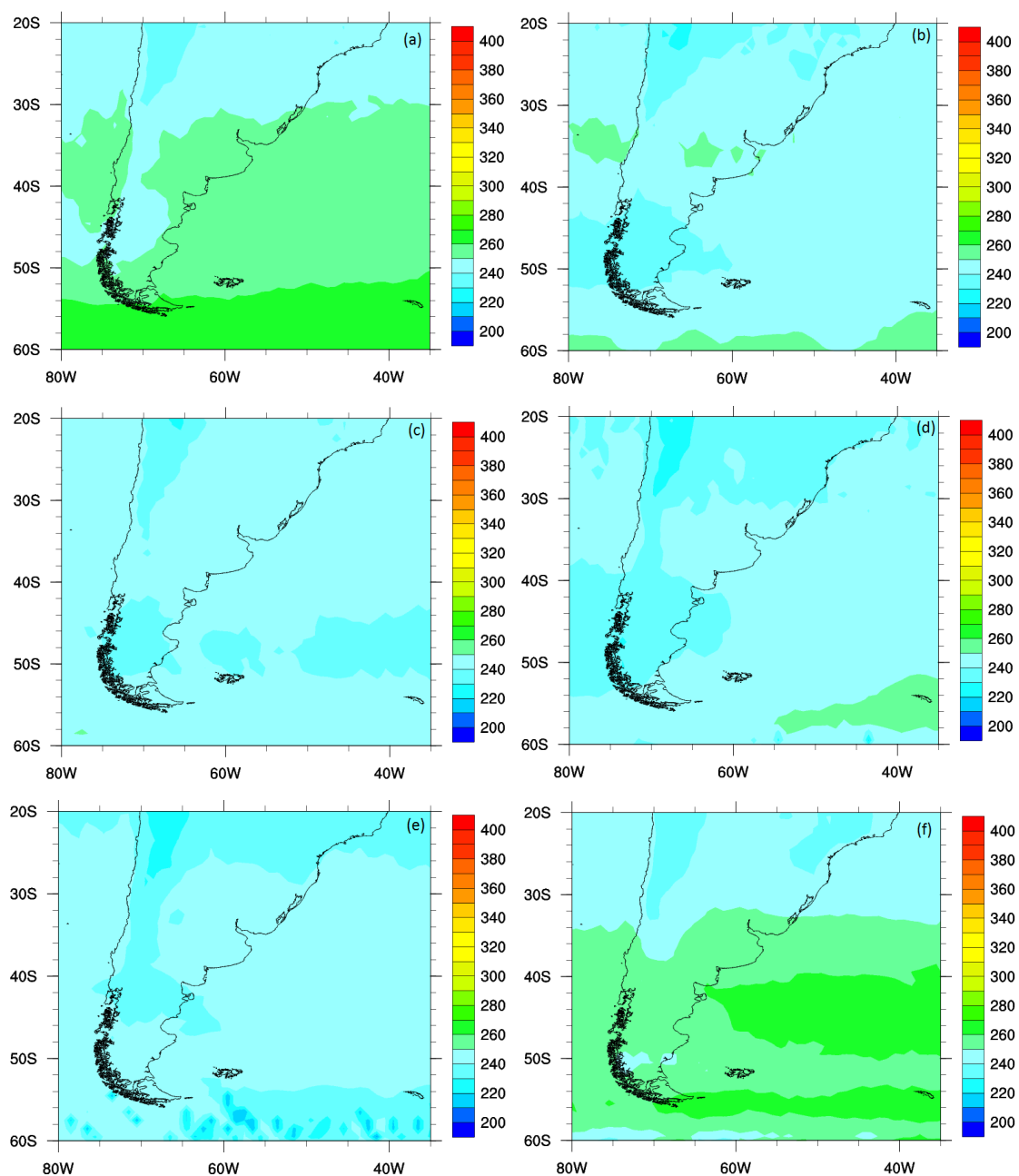


Figura 15 – Coluna total de ozônio (em UD) média nos meridianos de 70° (azul), 60° (vermelho) e 50°W (verde), para os meses de março (linha contínua) e outubro (linha pontilhada), entre as latitudes de 20°S e 60°S.

Os limiares mensais calculados pelas médias (Fig. 14) menos 1,5 de desvio padrão estão representados pela Fig. 16, onde valores de coluna total de ozônio abaixo desses limiares são considerados como quedas significativas de coluna total de ozônio. A partir desses limiares, são selecionados os casos e a quantificação destes pode ser realizada.

Semelhante aos resultados apresentados na Fig. 14, os meses com maior variabilidade do limiar são os mais próximos à estação da primavera: agosto,

setembro, outubro e novembro, referentes às Fig. 16h, 16i, 16j, 16k, e a menor variabilidade ocorre nos meses mais próximos ao outono: fevereiro, março, abril e maio (Fig. 16b, 16c, 16d, 16e). Os valores do limiar durante os meses próximos à primavera variam de 200UD na região mais próxima ao pólo a 300-320UD nas proximidades das latitudes de 40° e 50° S, uma diferença de mais de 100UD ao longo das latitudes. Nos meses próximos ao outono, essa variação é menor e menos homogênea meridionalmente, pois varia de 240UD nas latitudes próximas ao pólo, até 280UD em torno do cinturão de 60° S, tendo uma variação de 40UD apenas.



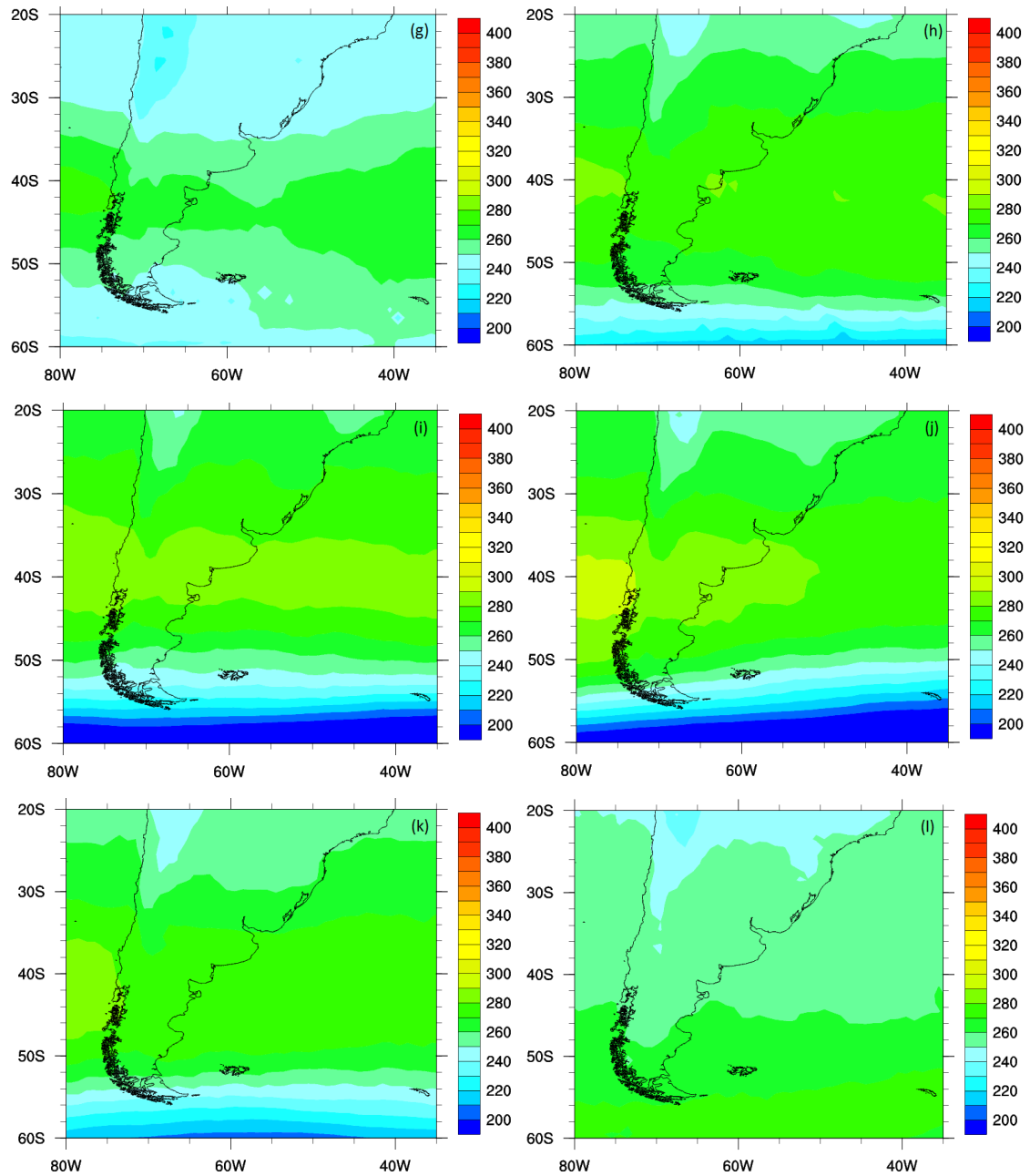


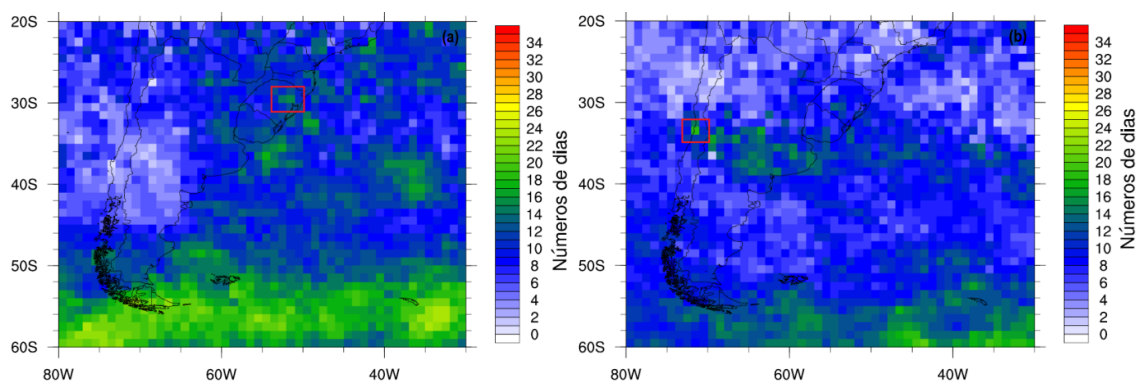
Figura 16 – Limiar de seleção calculado a partir da média menos 1,5 de desvio padrão (em UD). (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

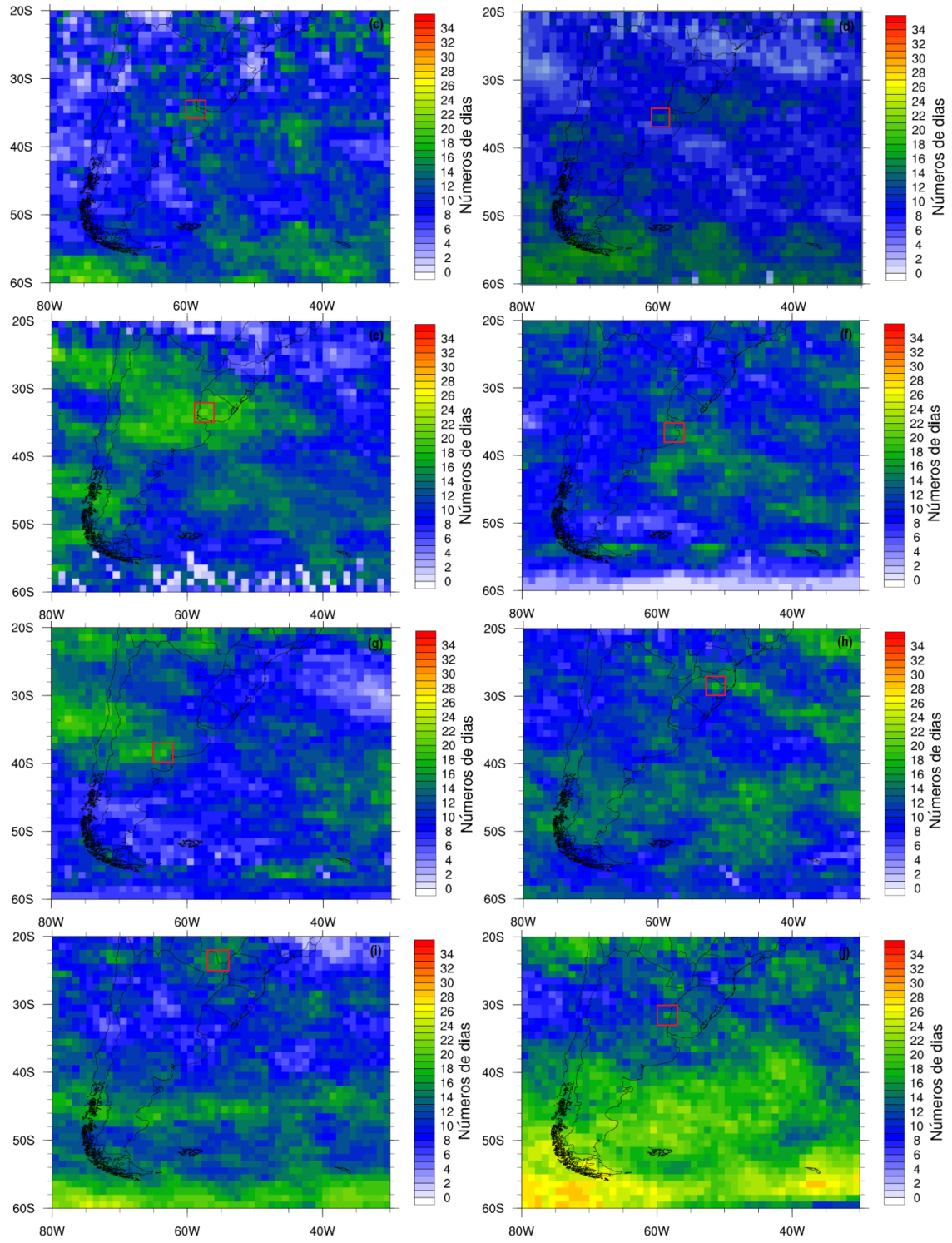
4.2 Quantificação de dias com decaimento significativo da coluna total de ozônio

A quantificação dos dias abaixo do limiar é mostrada na Fig. 17. Ressalta-se que essa quantificação, foi realizada para cada pixel de latitude e longitude dentro da segunda área de estudo (latitudes de 20°S a 60°S e longitudes de 30°W a 80°W).

O quadrado vermelho mostrado nas imagens da Fig. 17 representa o pixel com maior número de dias abaixo do limiar para as latitudes acima de 40°S, sobre a área continental e são mostrados na tab. 4 (como especificado no item 3.4).

Os valores médios da coluna total de O_3 , próximas à região Antártica, são afetadas durante a primavera e verão devido aos baixos valores de coluna total de ozônio que ocorrem por causa do vórtice sobre a Antártica com baixo conteúdo de ozônio. Mesmo esses valores médios sendo afetados, ainda são observados eventos de decaimento da coluna total de ozônio, os quais ocorrem nos meses de setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro (Fig. 17i, 17j, 17k, 17l, 17a, 17b). Observam-se maiores valores na quantidade de dias abaixo do limiar na região mais próxima ao pólo, nos meses citados acima, devido ao enfraquecimento do vórtice polar. Este enfraquecimento instabiliza a região fronteira ao buraco de ozônio Antártico, causando mais eventos de decaimento do conteúdo de O_3 na região mais ao sul do continente Sul Americano pela ação direta (o buraco de ozônio em si) ou indireta (efeito secundário) do buraco de ozônio. Nos meses de maio, junho e julho (Fig. 17e, 17f, 17g), em maiores latitudes (50°S a 60°S) praticamente não há grande quantidade de casos com decaimento significativo de ozônio, pois o vórtice polar foi extinto durante o verão, deixando a circulação Brewer-Dobson agir livremente entre as latitudes. Porém os meses de maio, julho e dezembro (Fig. 17e, 17g, 17l) apresentam um maior número de dias com decaimento da coluna total de ozônio entre as latitudes de 20°S e 40°S, sobre a área continental, em torno de 20 a 25 dias abaixo do limiar, sendo maio o mês que abrange maior área continental com esses valores (especificamente sobre o centro-norte da Argentina).





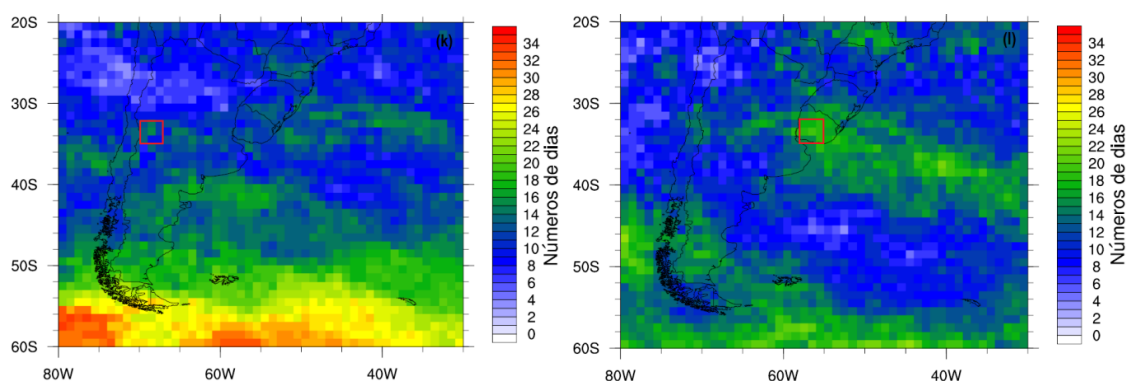


Figura 17 – Número de dias abaixo do limiar mensal. (a) janeiro, (b) fevereiro, (c) março, (d) abril, (e) maio, (f) junho, (g) julho, (h) agosto, (i) setembro, (j) outubro, (k) novembro, (l) dezembro.

Tabela 4 – Data e localização do pixel com menor valor de coluna total de ozônio e percentuais de queda em relação à média para cada mês.

Data	Localização do pixel	Coluna total de ozônio (UD)	Valores percentuais de queda da coluna total de ozônio em relação à média mensal (%)
24 janeiro 2005	29,5°S e 51,5°W	242,9	7%
23 fevereiro 2006	33,5°S e 71,5°W	244,3	7%
26 março 2006	34,5°S e 58,5°W	231,3	11%
27 abril 2006	35,5°S e 59,5°W	231,7	13%
05 maio 2007	33,5°S e 57,5°W	227,5	15%
16 junho 2008	36,5°S e 56,5°W	245,2	14%
19 julho 2006	38,5°S e 63,5°W	237,9	21%
04 agosto 2006	28,5°S e 51,5°W	256,0	10%
10 setembro 2009	23,5°S e 55,5°W	258,7	7%
11 outubro 2005	31,5°S e 58,5°W	251,3	13%
30 novembro 2006	33,5°S e 68,5°W	259,6	11%
02 dezembro 2006	33,5°S e 56,5°W	243,1	12%

4.3 Análise dos casos

Conforme descrito no item 3.5 da metodologia, foram desenvolvidos estudos de casos, um para cada mês, para os pixels estipulados na tab. 4.

Para o mês de janeiro, o pixel selecionado (29,5°S e 51,5°W) ficou sobre a cidade de Porto Alegre – RS, e ocorreu no dia 24 do ano de 2005 (Fig. 18). Neste dia, a coluna total de ozônio apresentou valor de 242,9UD, enquanto a média para o mês em análise apresentou neste pixel o valor de 260,8UD (queda de 7% em relação à média mensal). De acordo com a Fig. 19 a vorticidade potencial absoluta para o nível de 620K, sobre o pixel selecionado para janeiro indicou um leve

aumento de 60 para 80, do dia 21 ao dia 24, indicando origem Antártica da massa de ar.

Nota-se, através da Fig. 20a, a presença de um sistema de baixa pressão em superfície que se estende sobre os estados do sul e sudeste do Brasil e se aprofunda até o nível de 500hPa, onde está ligado a um cavado mais a oeste (Fig. 20a, 20b), apresentando ascendência nesse nível (conforme indicado pelo valor de ω negativo na Fig. 20c) sobre os estados de Santa Catarina (SC) e Paraná (PR) e divergência em 200hPa acoplada ao sistema, mas deslocada a sudoeste (em cima do Uruguai) (Fig. 20d). Pela imagem de satélite (Fig. 20e) é possível observar o sistema frontal sobre os estados de SC e PR, trazendo um anticiclone na retaguarda (à sudoeste da Argentina, com centro sobre o Pacífico). Sobre o pixel selecionado percebeu-se neste dia (Fig. 20e) presença de nebulosidade (conforme imagem de satélite do GOES-12) e forte gradiente de pressão e ω (Figs. 20a, c).

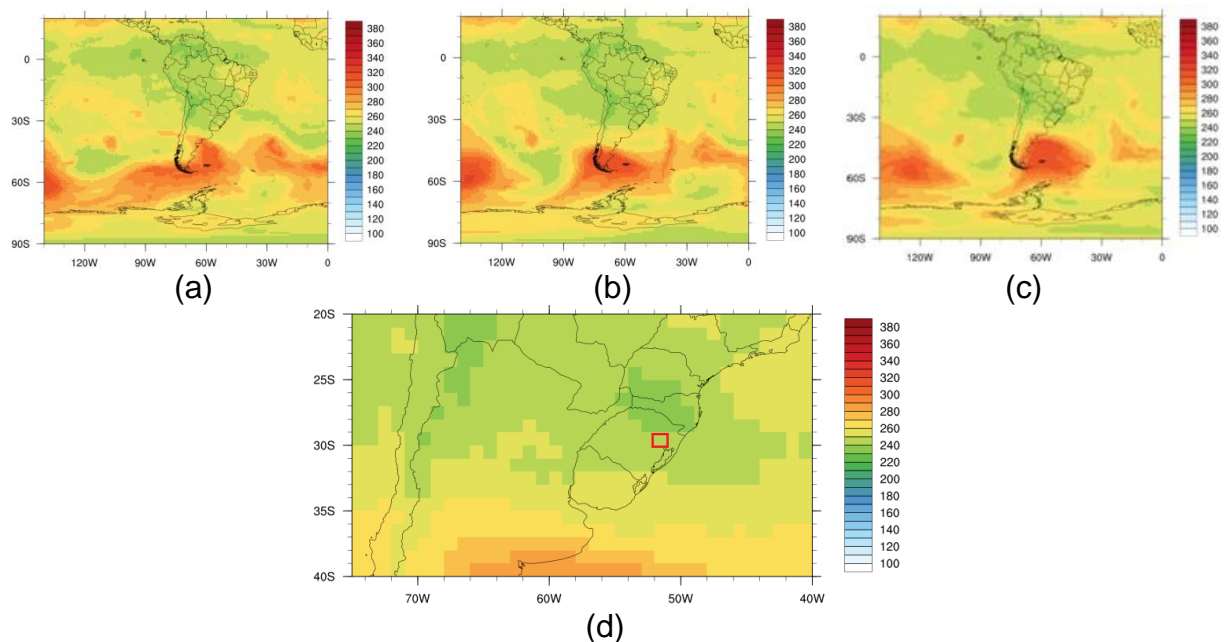
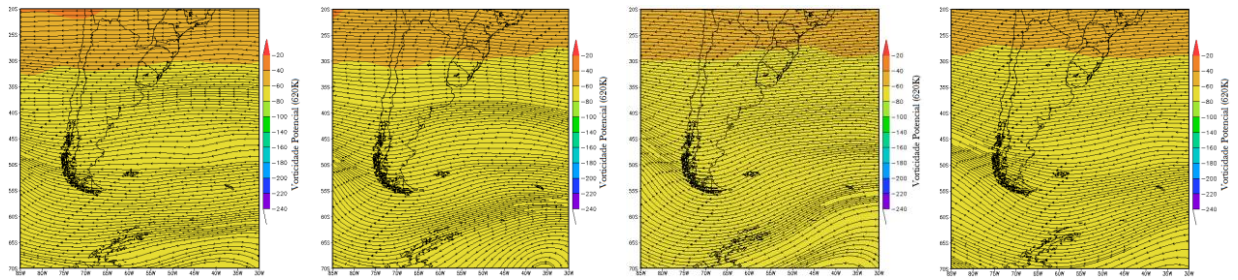
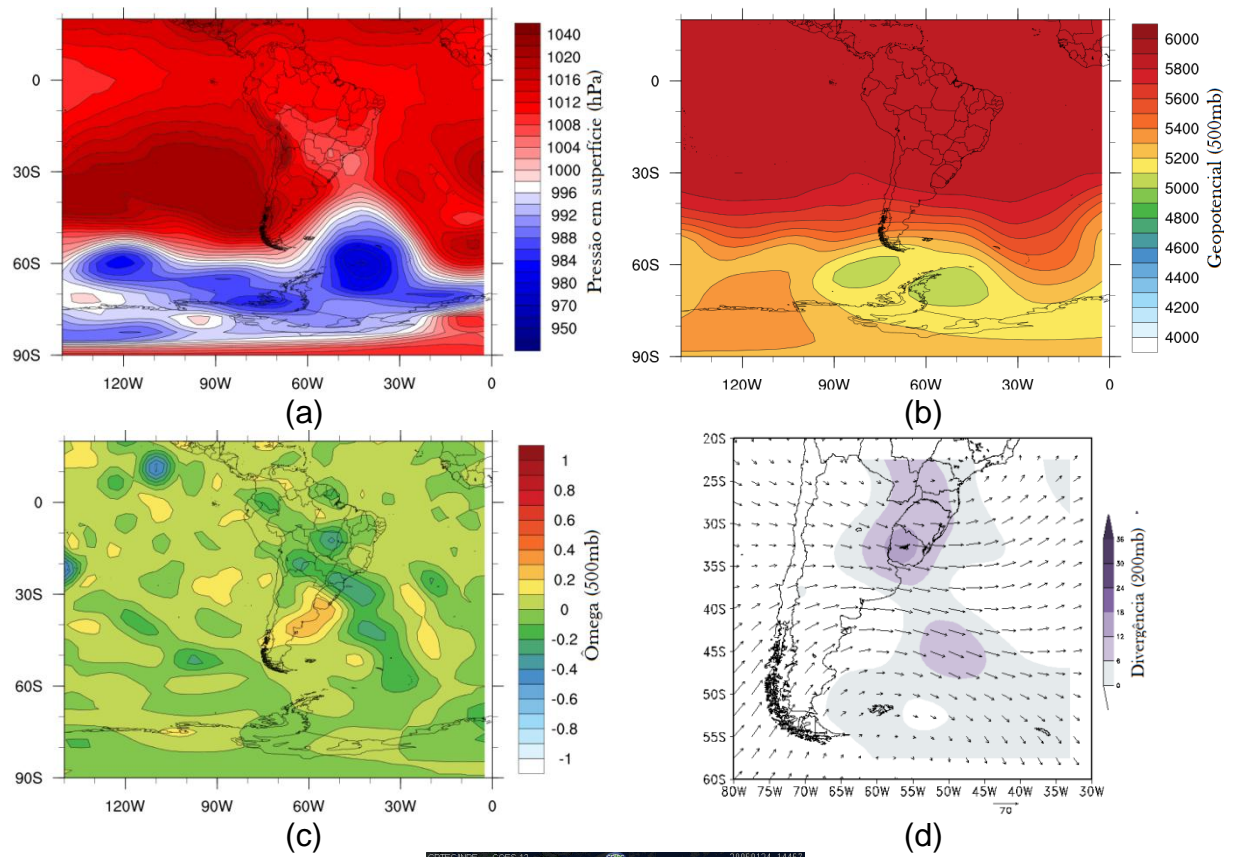


Figura 18 – Coluna total de ozônio para os dias 22 (a), 23 (b) e 24/01/2005 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a região de Porto Alegre - RS (d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 19 – Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 21, (b) 22, (c) 23, (d) 24 de janeiro de 2005, a 620K.

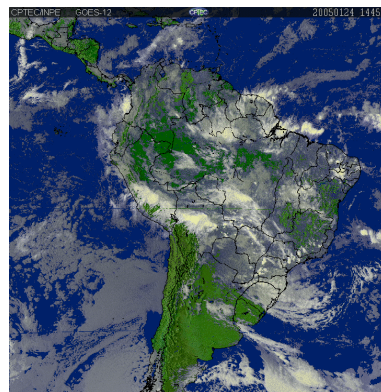


(a)

(b)

(c)

(d)



(e)

Figura 20 – Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 24 de janeiro de 2005.

O pixel escolhido para a análise no mês de fevereiro situa-se sobre a cidade de Valparaíso no Chile e está localizado a 33,5°S e 71,5°W, para o dia 23 de fevereiro de 2006, com coluna total de ozônio apresentando valor de 244,3UD para o dia 23/02/2006, enquanto seu valor médio mensal é 262,5UD (Fig. 21) (queda de 7% em relação à média mensal de fevereiro). Percebeu-se sobre o pixel escolhido, uma diminuição da vorticidade potencial absoluta de 80 para 60 entre os dias 20 e 23 de fevereiro, sugerindo que a origem da massa de ar é tropical (Fig. 22).

Um anticiclone encontra-se sobre grande parte do centro da Argentina (40°S, 50°S e 50°W, 60°W), enquanto nota-se a presença de um cavado que se estende sobre o RS, ambos em superfície, os quais estão ligados a uma crista e um cavado em 500 hPa, respectivamente (Fig. 23a, b). Há presença de uma ascendência em 500 hPa (Fig. 23c), porém esse sistema não se aprofunda muito, e não mostra divergência de massa em 200 hPa (Fig. 23d), apenas nebulosidade sobre o Uruguai e o RS (Fig. 23e). Sobre o pixel selecionado nota-se um gradiente de ômega e de pressão em superfície, assim como divergência em 200 hPa.

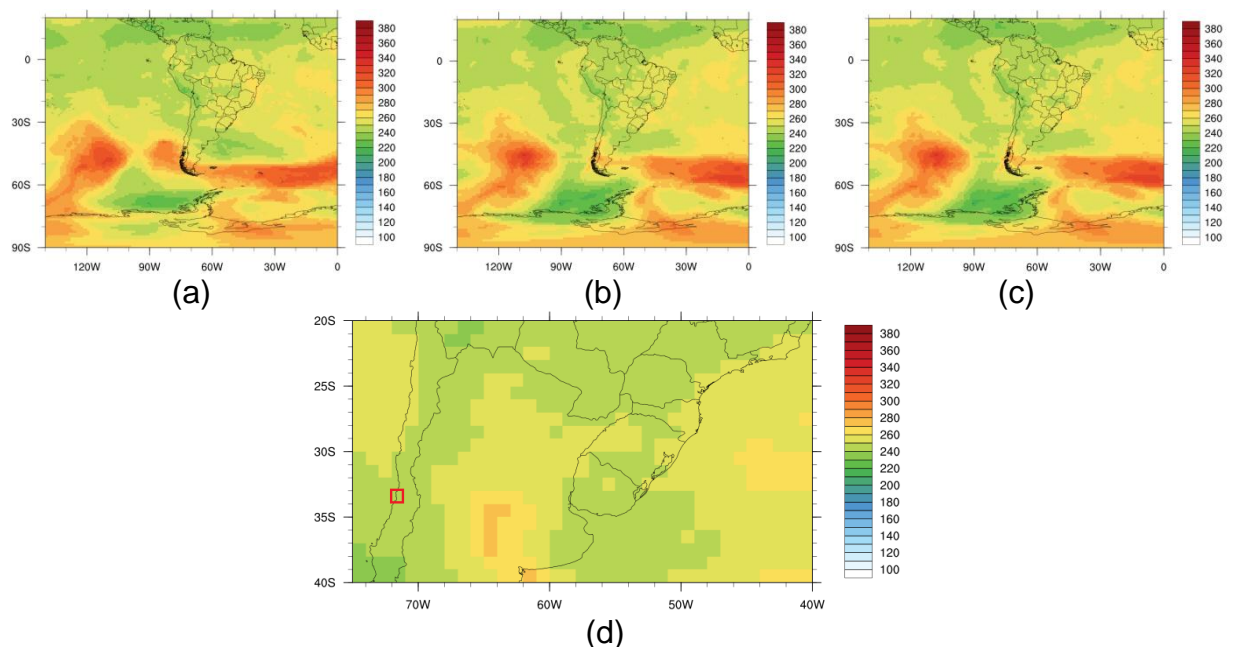


Figura 21 – Coluna total de ozônio para os dias 21 (a), 22 (b) e 23/02/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho, sobre a cidade de Valparaíso - Chile (d).

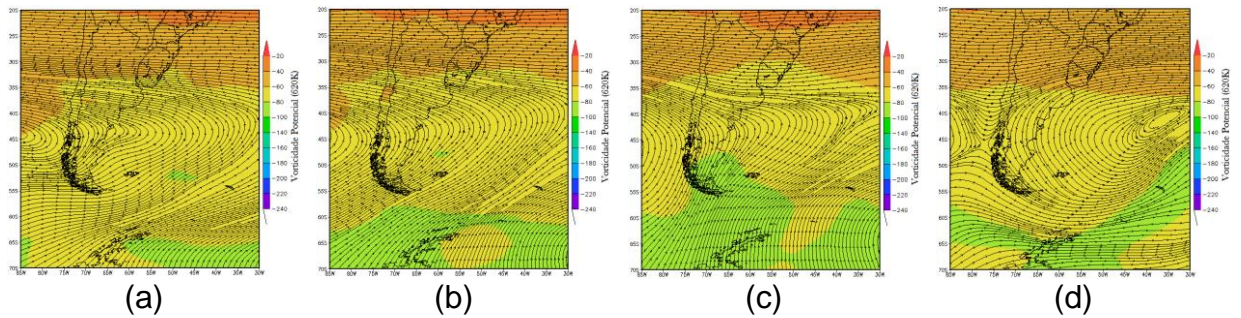


Figura 22 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 20, (b) 21, (c) 22, (d) 23 de fevereiro de 2006, a 620K.

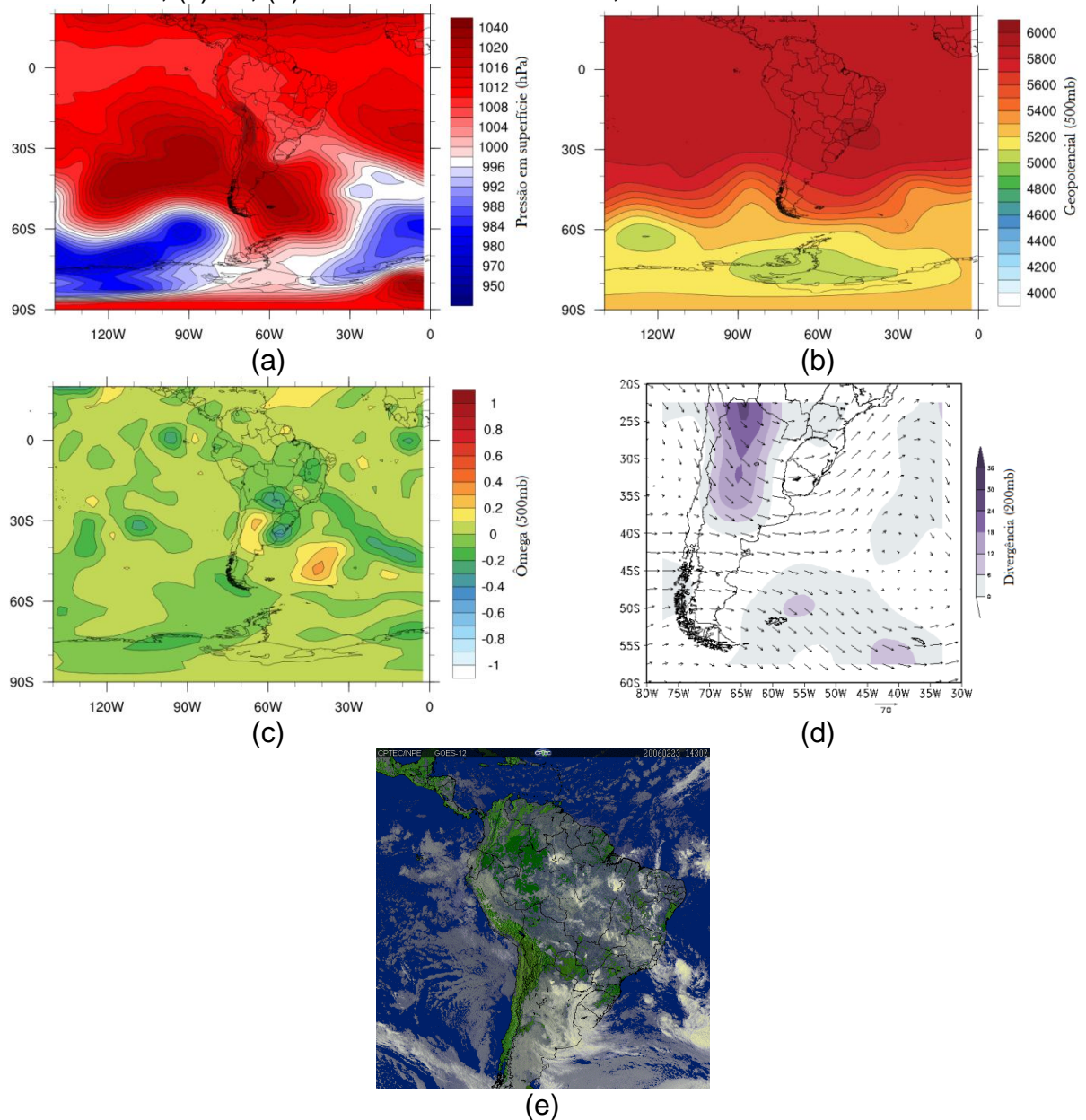


Figura 23 – Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 23 de fevereiro de 2006.

Para o mês de março o pixel selecionado para o dia 26 do ano de 2006, fica sobre a cidade de Buenos Aires – Argentina ($34,5^{\circ}\text{S}$ e $58,5^{\circ}\text{W}$), com valor de coluna total de ozônio de 231,3UD e média mensal de 260,8UD, o que representa uma queda de 11% (Fig. 24). Pela Fig. 25 pode-se notar uma diminuição nos valores de vorticidade potencial absoluta de 80 para 60 no nível de 620K entre os dias 23 e 26 de março. Essa diminuição nos valores de vorticidade potencial absoluta indica a origem da massa de ar pobre em conteúdo de ozônio sendo da região tropical.

Um ciclone no nível médio do mar atua sobre o oceano Atlântico ao sul do continente associado a um cavado em 500hPa, onde percebeu-se uma faixa de nebulosidade que se estende sobre o centro da Argentina, em torno de 40°S e 65°W (Figura 25a, b, e), com ascendência de massa em 500hPa, que faz o ar divergir em altos níveis (Figuras 26c, d) gerando instabilidade na atmosfera. Um anticiclone atua junto a uma crista em 500hPa sobre a porção sudoeste do continente, onde há subsidência de massa. Outro sistema de baixa pressão, já em dissipação, encontra-se sobre o oceano Atlântico, associado a um cavado em 500hPa, estendendo uma banda de pouca nebulosidade sobre os estados do sudeste brasileiro. Sobre o pixel selecionado percebeu-se pouca nebulosidade e gradiente de ômega.

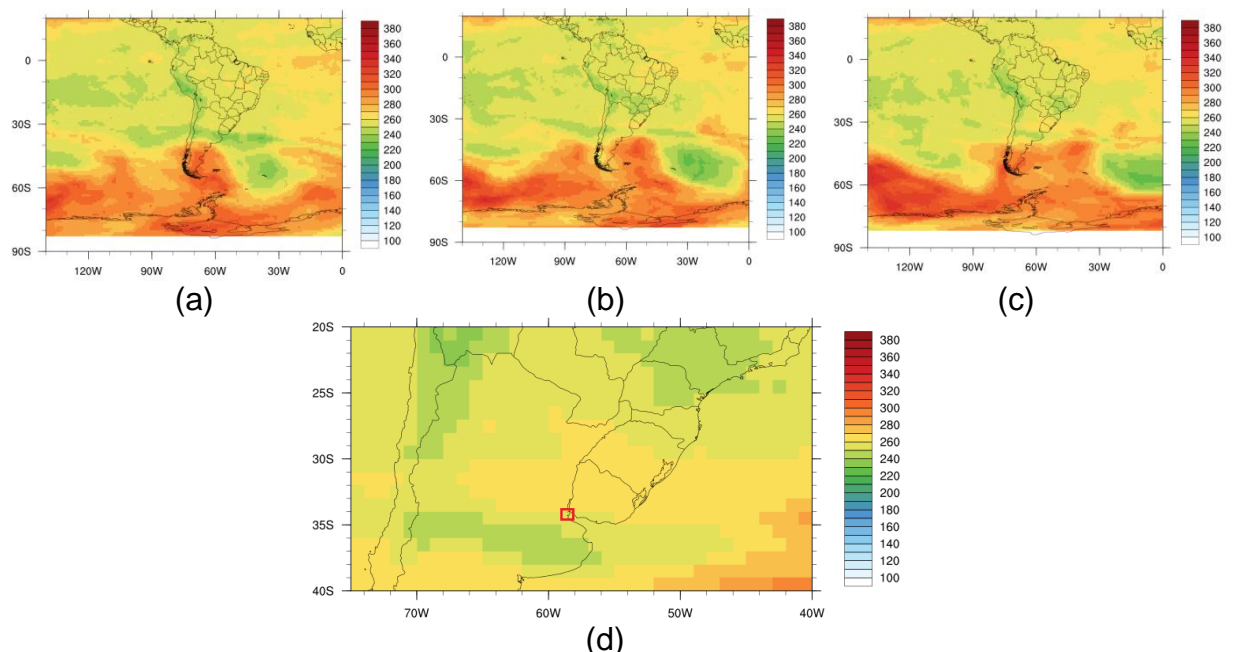


Figura 24 - Coluna total de ozônio para os dias 24 (a), 25 (b) e 26/03/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Buenos Aires - Argentina (d).

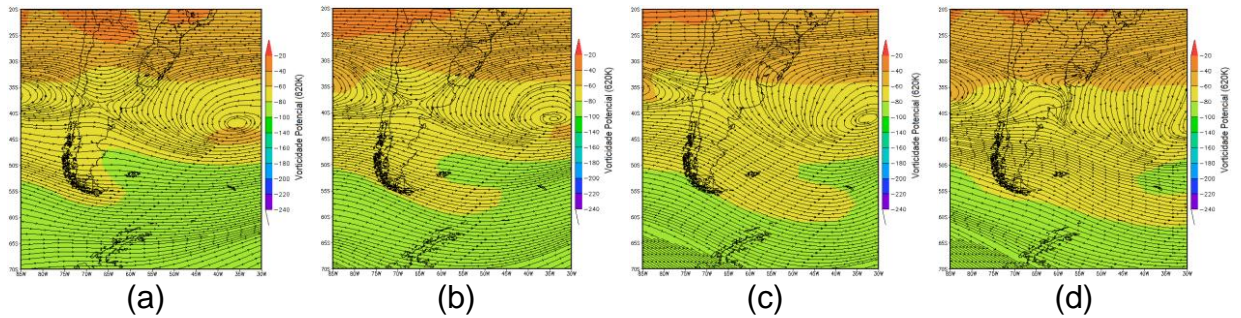


Figura 25 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 23, (b) 24, (c) 25, (d) 26 de março de 2006, a 620K.

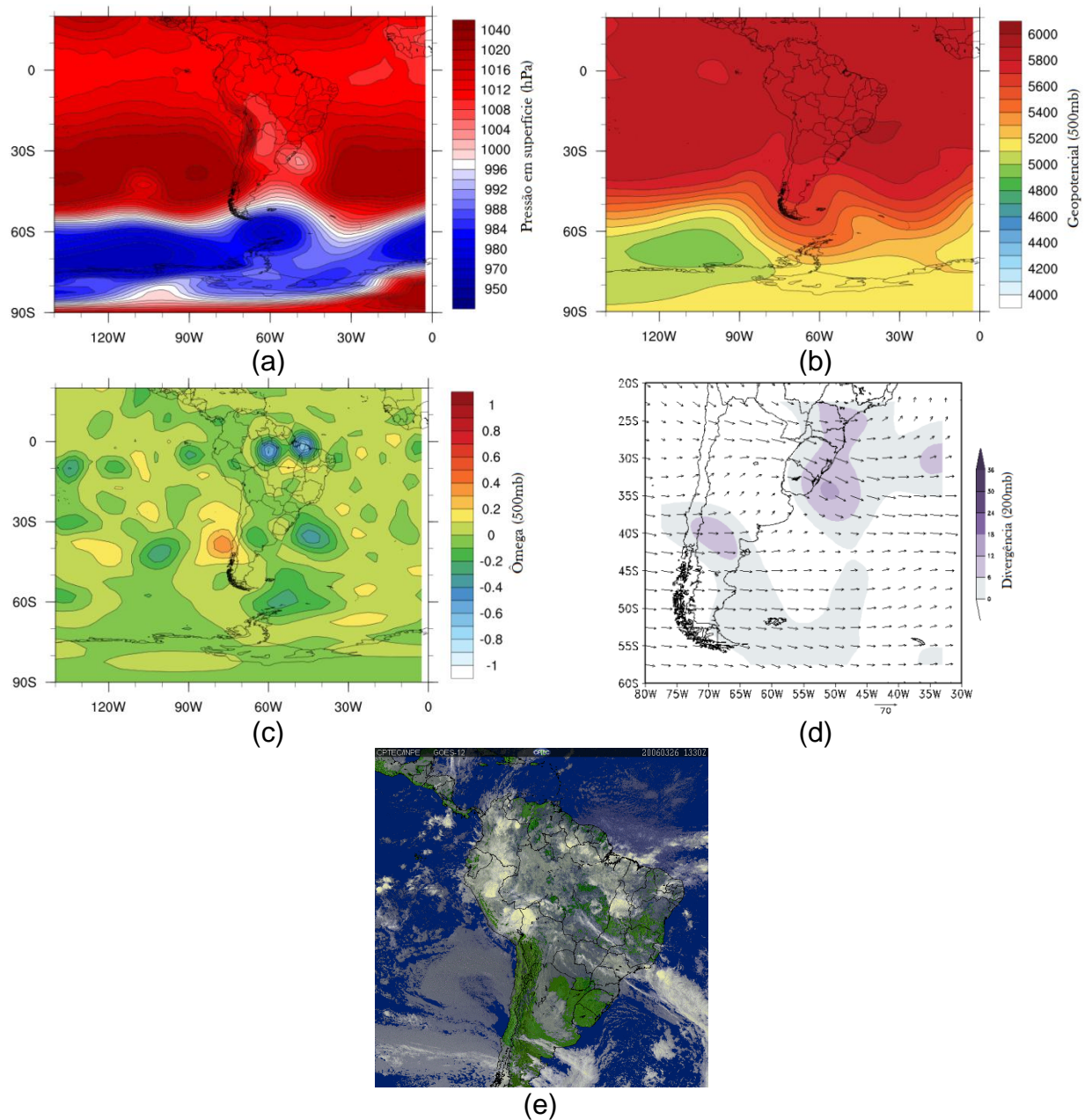


Figura 26 – Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 26 de março de 2006.

A Fig. 27 representa a coluna total de ozônio para o dia 27 de abril de 2006, onde o pixel selecionado fica aproximadamente 350 km a sudoeste de Buenos Aires – Argentina ($35,5^{\circ}\text{S}$ e $59,5^{\circ}\text{W}$), com 231,7UD e média mensal de 267,2UD (queda de 13% em relação à média). Há um aumento da vorticidade potencial absoluta no nível de 640K, indicando a origem polar da massa de ar sobre o pixel (aumento de VP de 80 para 100), que pode ser observada pela Fig. 28.

Percebeu-se no dia selecionado, a presença de um ciclone ao nível médio do mar no extremo sul do continente associado a um cavado em 500 hPa (Fig. 29a, b). A imagem de satélite apresenta uma faixa de nebulosidade no extremo sul da Argentina e Chile, com divergência em 200hPa (ascendência de massa em superfície) confirmada pelos valores de ômega em torno de $-0,5$ (Fig. 29c, d), e sobre o pixel selecionado forte gradiente de pressão e ômega.

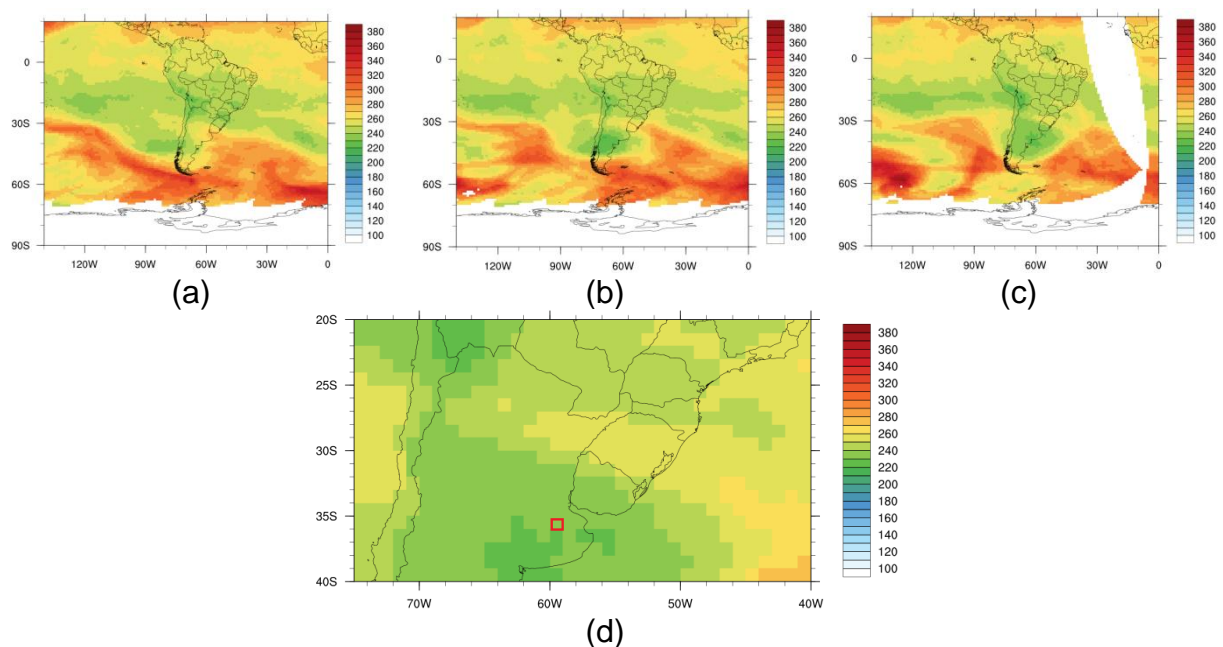


Figura 27 - Coluna total de ozônio para os dias 25 (a), 26 (b) e 27/04/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho a sudoeste de Buenos Aires - Argentina (d).

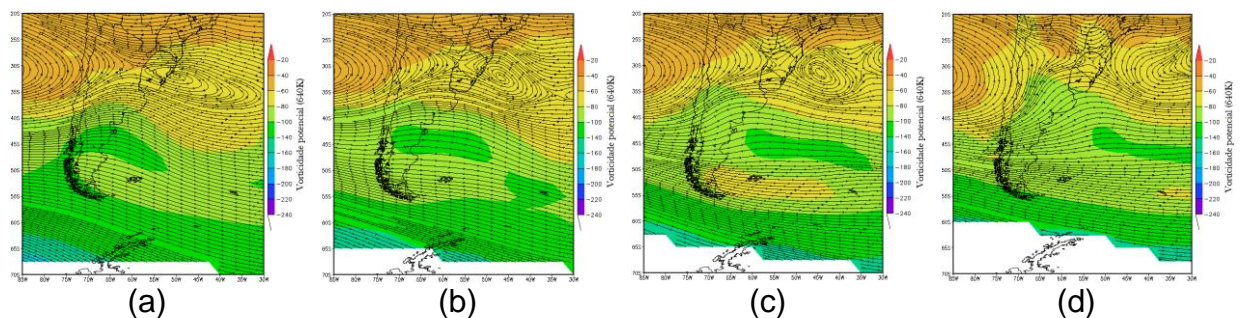


Figura 28 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 24, (b) 25, (c) 26, (d) 27 de abril de 2006, a 640K.

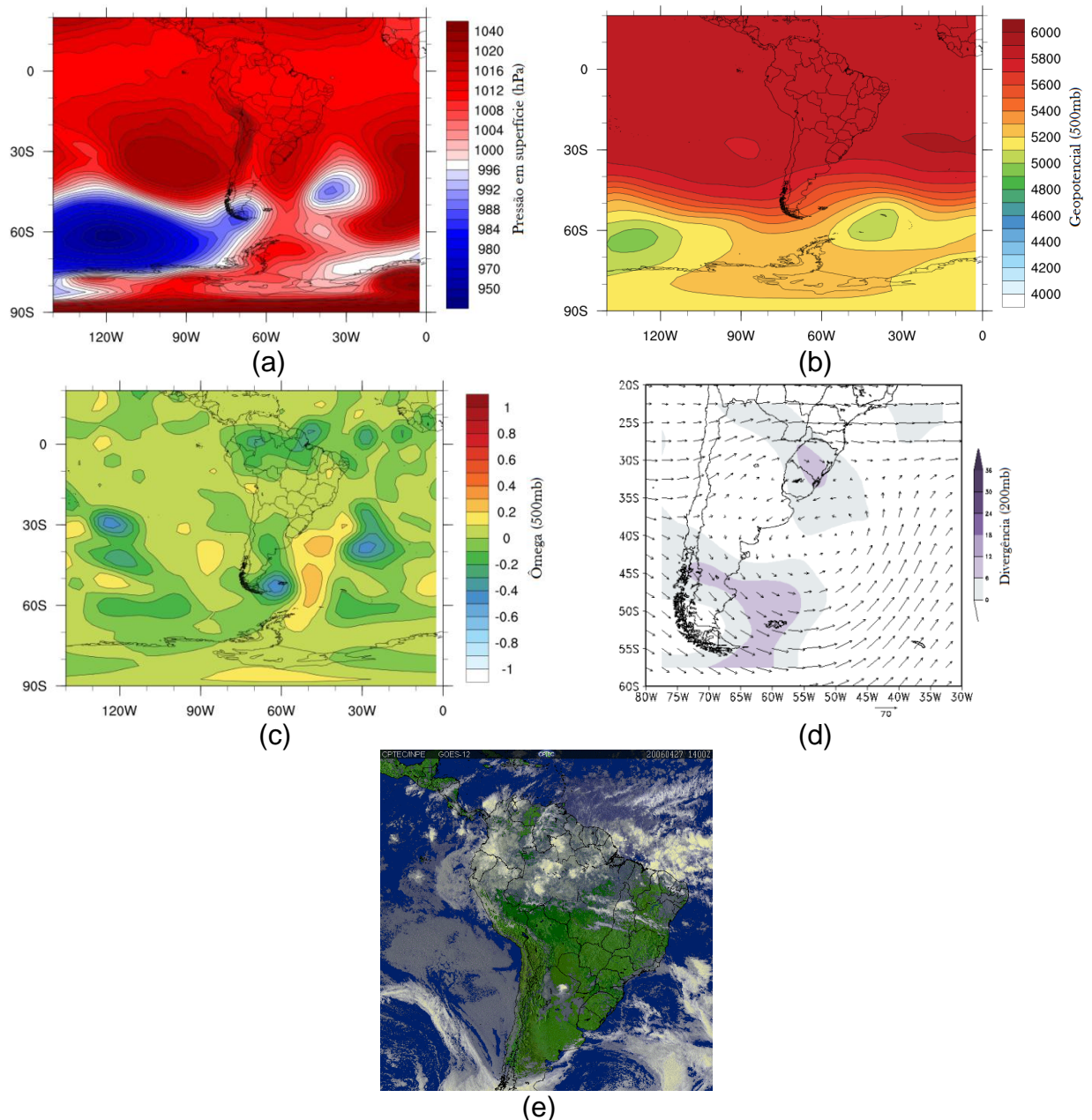


Figura 29 - Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 27 de abril de 2006.

Para o mês de maio selecionou-se o pixel localizado ao norte de Colonia Del Sacramento – Uruguai ($33,5^{\circ}\text{S}$ e $57,5^{\circ}\text{W}$) para o dia 05 do ano de 2007, com coluna total de ozônio de 227,5UD e média mensal de 270UD, representando assim uma queda de 16% em relação à média mensal (Fig. 30). Através da Fig. 31 percebeu-se, sobre o pixel selecionado um aumento da vorticidade potencial absoluta de 80 para 100 indicando a origem da massa de ar como sendo do pólo.

Um ciclone no oceano Atlântico tem seu ramo frio atuando sobre a fronteira entre o Uruguai e RS, com um cavado em 500hPa (Fig. 32a, b) deslocado para

oeste, e sobre o pixel selecionado percebeu-se presença de uma extensa faixa de nebulosidade (Fig. 32e). Um intenso movimento vertical ascendente (em torno de $-0,4\text{Pa/s}$) sobre o sistema frontal faz o ar divergir em 200hPa, indicando um sistema que se aprofunda na atmosfera (Fig. 32c, d).

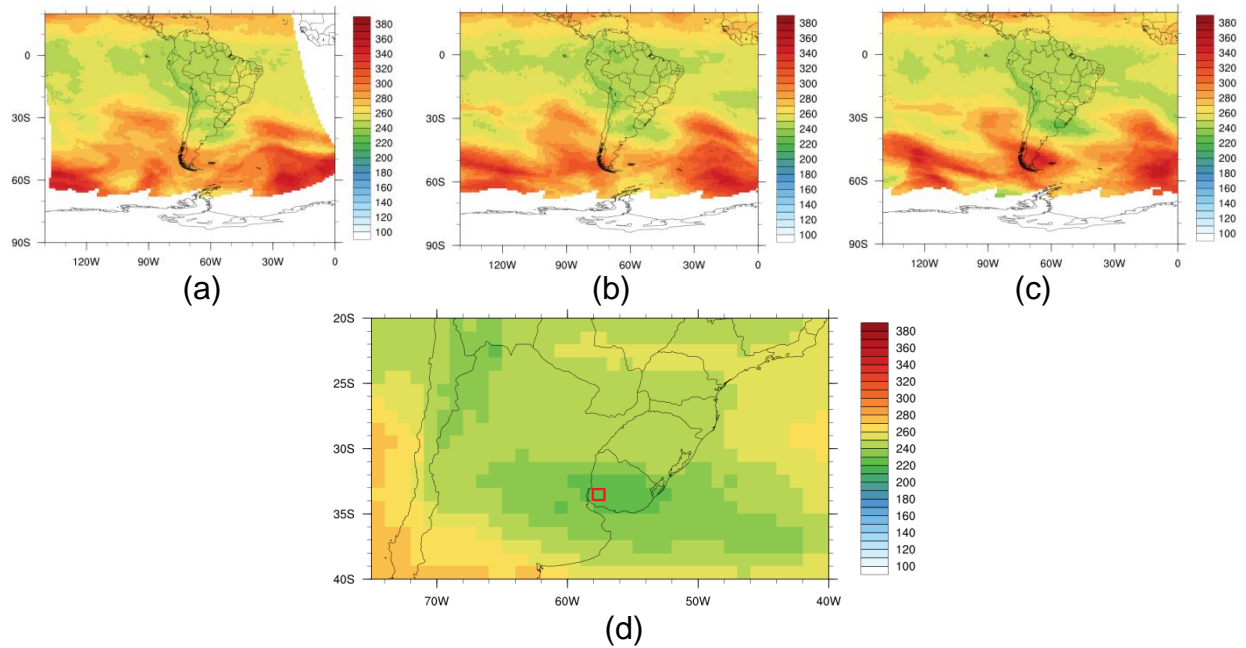


Figura 30 - Coluna total de ozônio para os dias 03 (a), 04 (b) e 05/05/2007 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho ao norte de Colonia Del Sacramento - Uruguai (d).

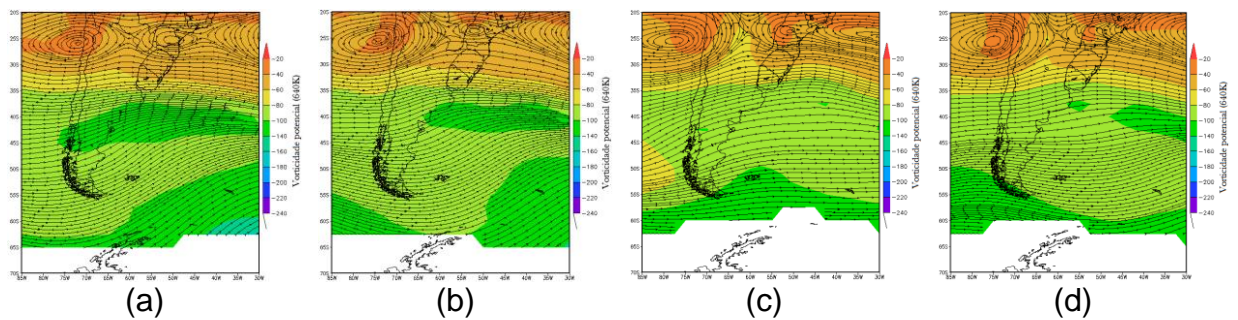


Figura 31 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 02, (b) 03, (c) 04, (d) 05 de maio de 2007, a 640K.

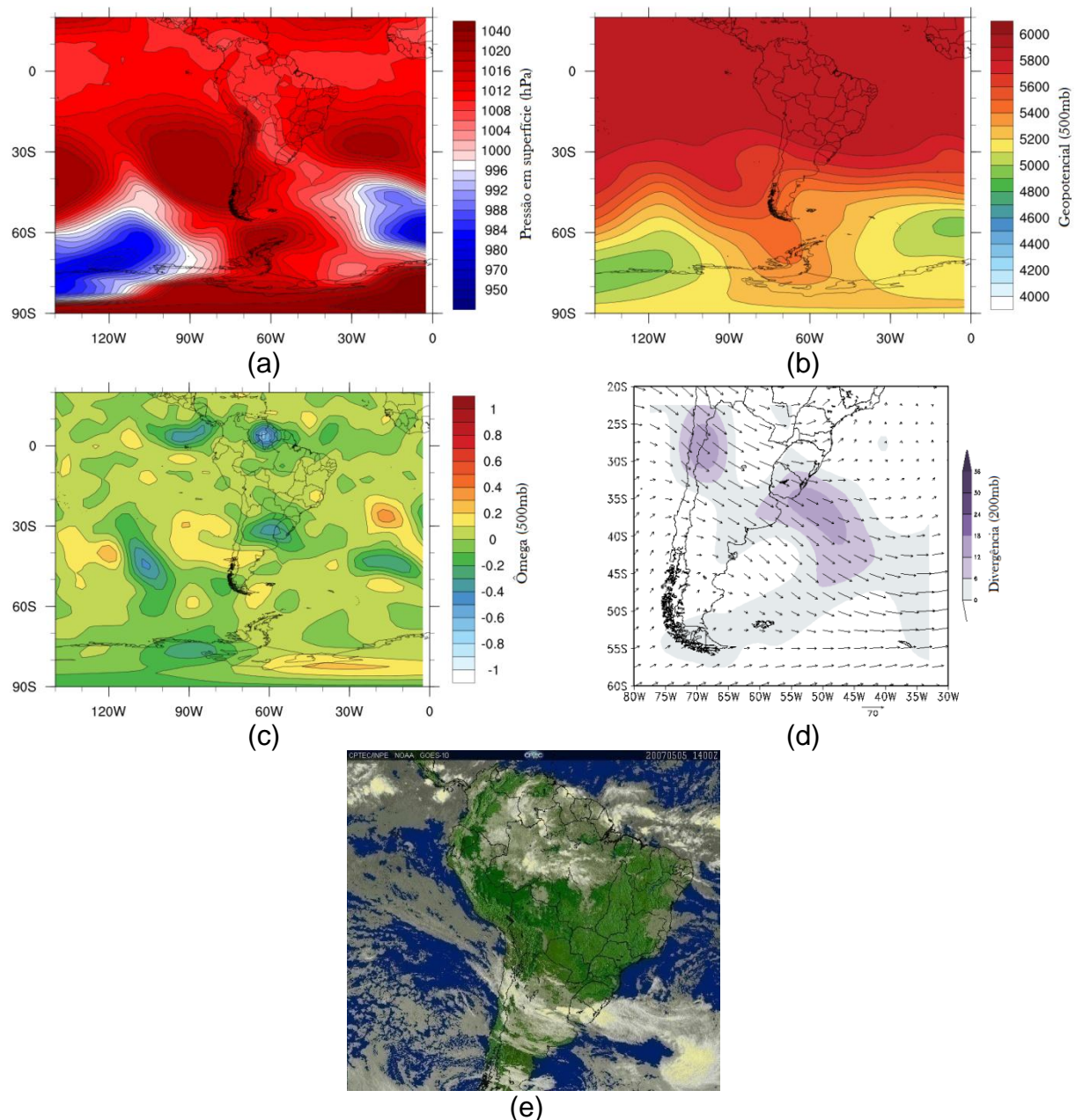


Figura 32 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 05 de maio de 2007.

O pixel selecionado para análise referente ao mês de junho fica aproximadamente 330km a sudeste de Buenos Aires – Argentina (36,5°S e 56,5°W), com média mensal de 285,7UD e valor do dia 16 de junho de 2008 de 245,2UD, 14% de queda em relação à média mensal (Fig. 33). A vorticidade potencial absoluta sofre uma queda entre os dias 14, 15 e 16 de junho, de 100 para 80, indicando a origem tropical da massa de ar pobre em conteúdo de ozônio (Fig. 34).

Sobre o centro da Argentina há presença de um cavado em superfície (Fig. 35a), o qual apresenta movimento vertical ascendente, com divergência de massa no nível de 200hPa (Fig. 35c, d). Esse cavado em superfície está associado a faixa de nebulosidade mais ao sul da Argentina (em torno de 40°S e 65°W) e a um cavado em 500hPa (Fig. 35b). Sobre o pixel selecionado não percebe-se a ocorrência de nebulosidade. Entretanto, existe movimento vertical ascendente e um gradiente de pressão em superfície.

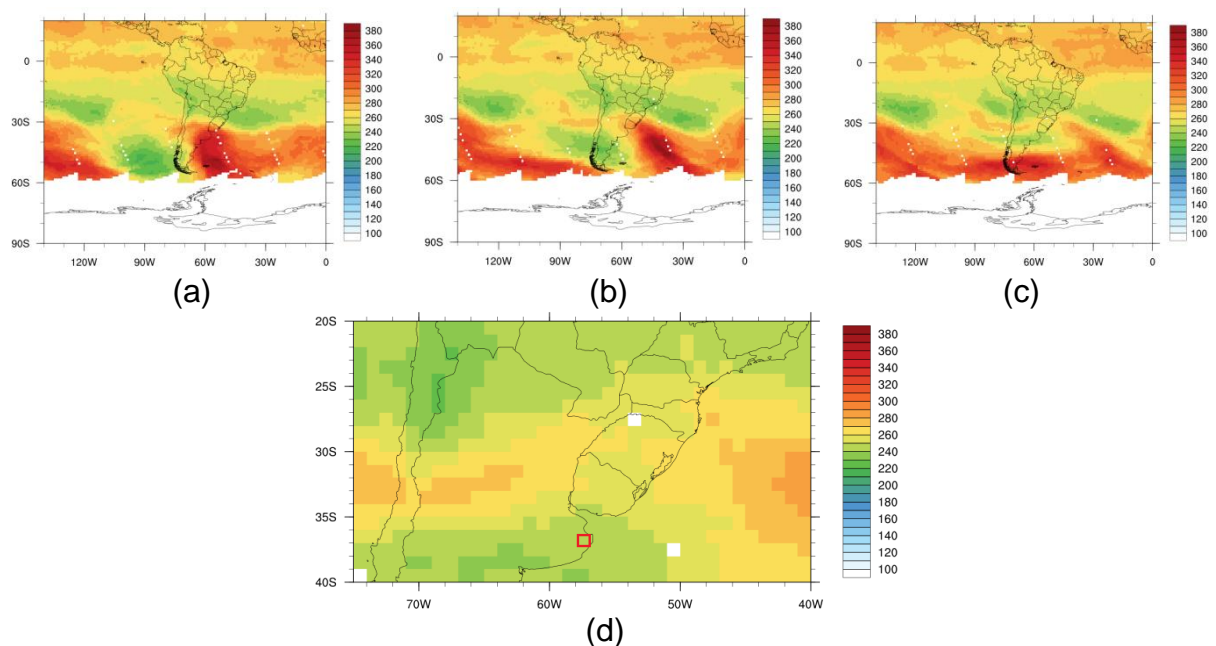


Figura 33 – Coluna total de ozônio para os dias 14 (a), 15 (b) e 16/06/2008 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelha sudeste de Buenos Aires - Argentina (d).

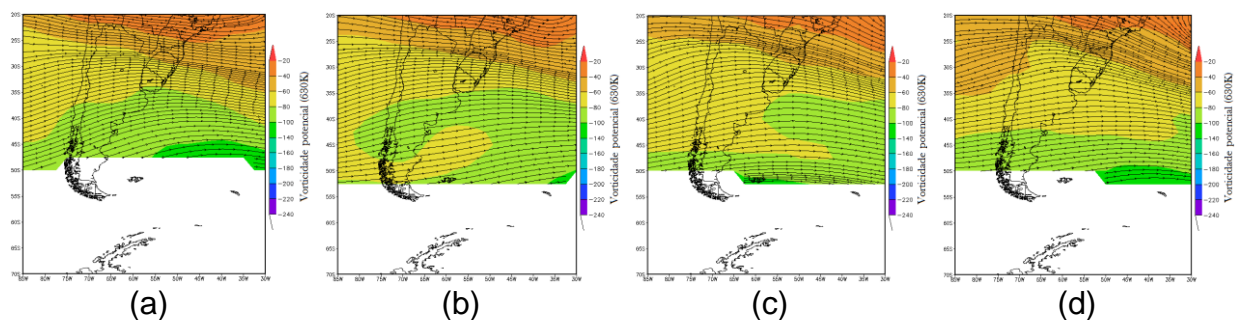


Figura 34 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 13, (b) 14, (c) 15, (d) 16 de junho de 2008, a 630K.

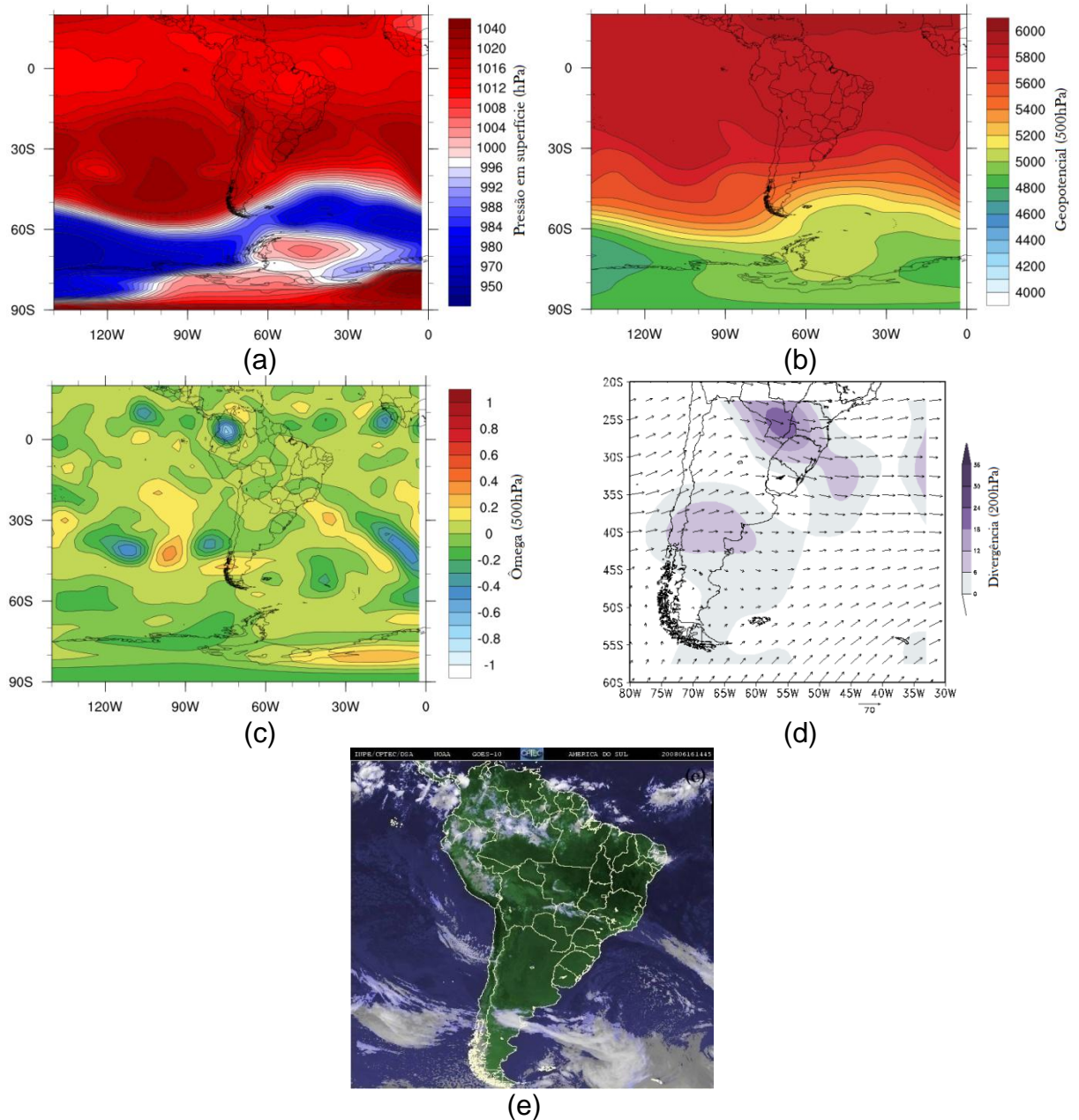


Figura 35 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 16 de junho de 2008.

Para o dia 19 de julho de 2006 selecionou-se o pixel próximo a cidade de Bahía Blanca – Argentina, que aproximadamente 100 km a oeste desta cidade ($38,5^{\circ}\text{S}$ e $63,5^{\circ}\text{W}$, Fig. 36), com coluna total de ozônio de 237,9UD enquanto o valor médio mensal neste pixel para o mês de julho é de 301,6UD (queda de 21% em relação à sua média mensal). A vorticidade potencial absoluta sobre o pixel selecionado, entre os dias 16 e 19 de julho de 2006, apresentou uma queda de 100

para 80, o que indica a origem tropical da massa de ar com baixos valores de coluna total de ozônio (Fig. 37).

A presença de um centro de baixa pressão sobre o oceano Pacífico, a sudoeste do continente, que se estende sobre o sul da Argentina (em torno de 50°S e 70°W) ocasiona a ocorrência de muita nebulosidade. Esse sistema está acoplado a um cavado em 500hPa (Fig. 38a, b) e percebe-se um movimento vertical com divergência em 200hPa (como observado pelas Fig. 38c e 38d). Nota-se também a presença de outro sistema de baixa pressão ao nível médio do mar, ao sul do continente sobre o oceano Atlântico, que se estende até as proximidades da costa dos estados de SC e RS. Esse sistema atua juntamente com um cavado em 500hPa (Fig. 38a, b), e gera um intenso movimento vertical (em torno de -0,4Pa/s) ascendente que faz o ar divergir em 200hPa (Fig. 38c, d), deixando a atmosfera bastante instável. Através da imagem de satélite para o dia em análise (Fig. 38e) observa-se sobre o oceano Atlântico próximo a costa de SC e RS uma banda de nebulosidade. Sobre o pixel selecionado foi observado gradiente de pressão em ao nível médio do mar, gradiente de ômega e nenhuma nebulosidade.

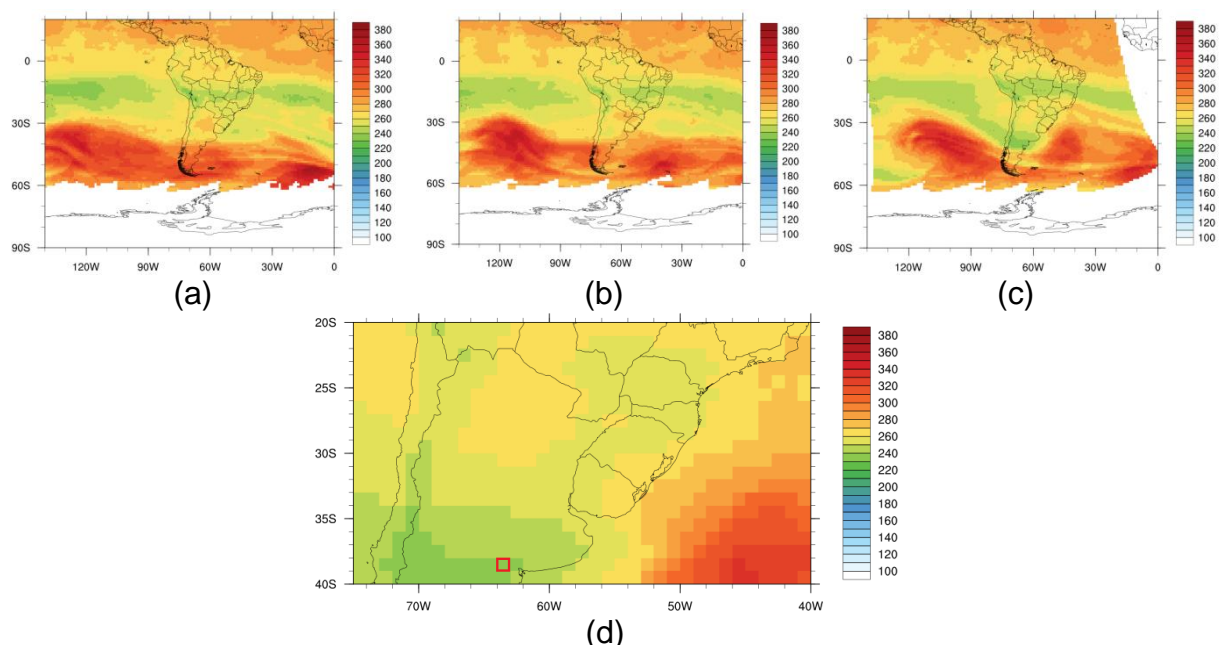


Figura 36 - Coluna total de ozônio para o dia 16 (a), 17 (b) e 19/07/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho próximo a cidade de Bahía Blanca – Argentina (b).

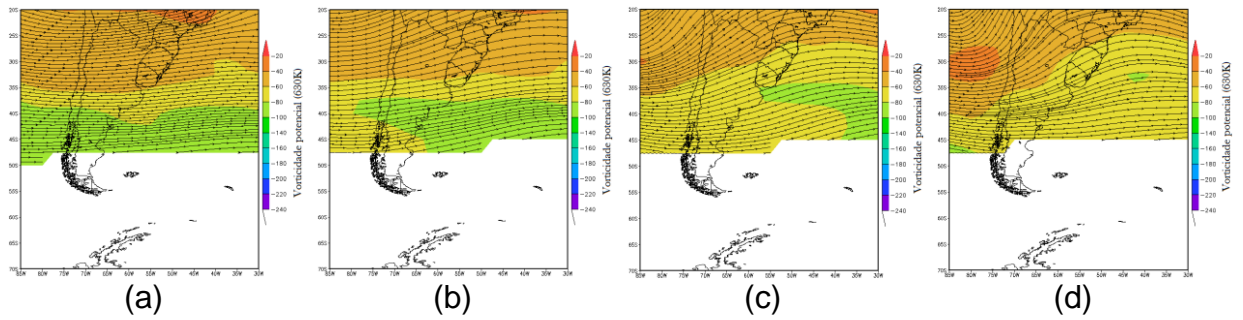


Figura 37 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 16, (b) 17, (c) 18, (d) 19 de julho de 2006, a 630K.

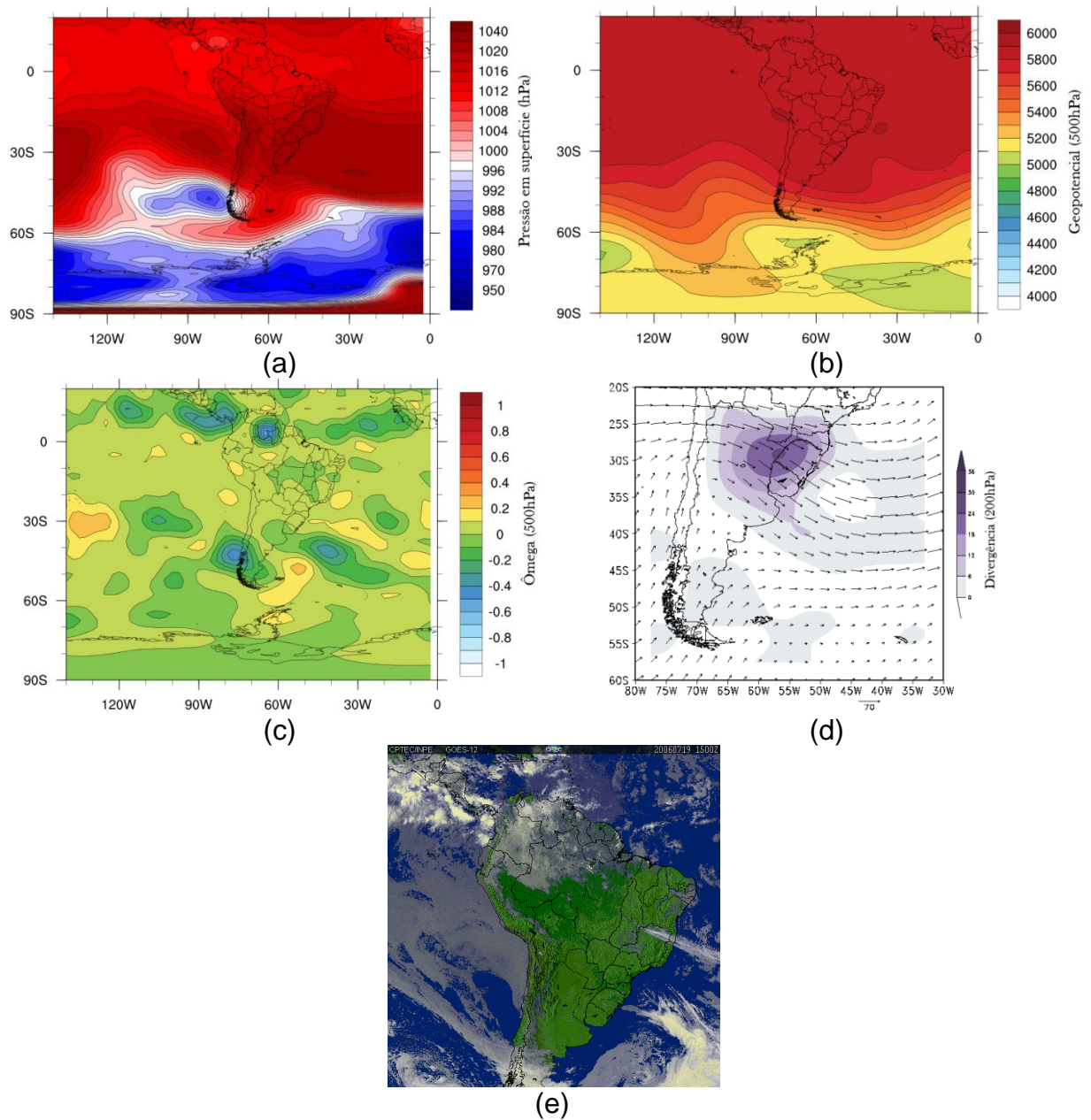


Figura 38 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 19 de julho de 2006.

Para a análise referente ao mês de agosto selecionou-se o pixel para o dia 04 do ano de 2006 (Fig. 39), sobre a cidade de Lagoa Vermelha – RS (28,5°S e 51,5°W). O pixel, para o dia em análise, apresentou valor de coluna total de ozônio de 256UD e média mensal de 285,8UD (queda de 10% em relação à sua média). A vorticidade potencial absoluta (Fig. 40) apresenta queda de 80 para 60 entre os dias 01 e 04 de agosto de 2006, indicando a origem tropical da massa de ar pobre em coluna total de ozônio.

Um sistema de baixa pressão sobre o Pacífico está acoplado a um centro em 500mb, conforme indicado pelo campo de geopotencial (Fig. 41a, b). Na Fig. 41e é possível observar uma banda de nebulosidade entrando pelo sudoeste do Chile e Argentina. Um forte movimento vertical é verificado para o sistema, apresentando divergência em altos níveis (200hPa) (Fig. 41c, d), caracterizando-o como um sistema profundo. Sobre o continente há presença de um anticiclone, associado a uma crista em 500hPa, e próximo ao pixel selecionado percebeu-se subsidência de massa.

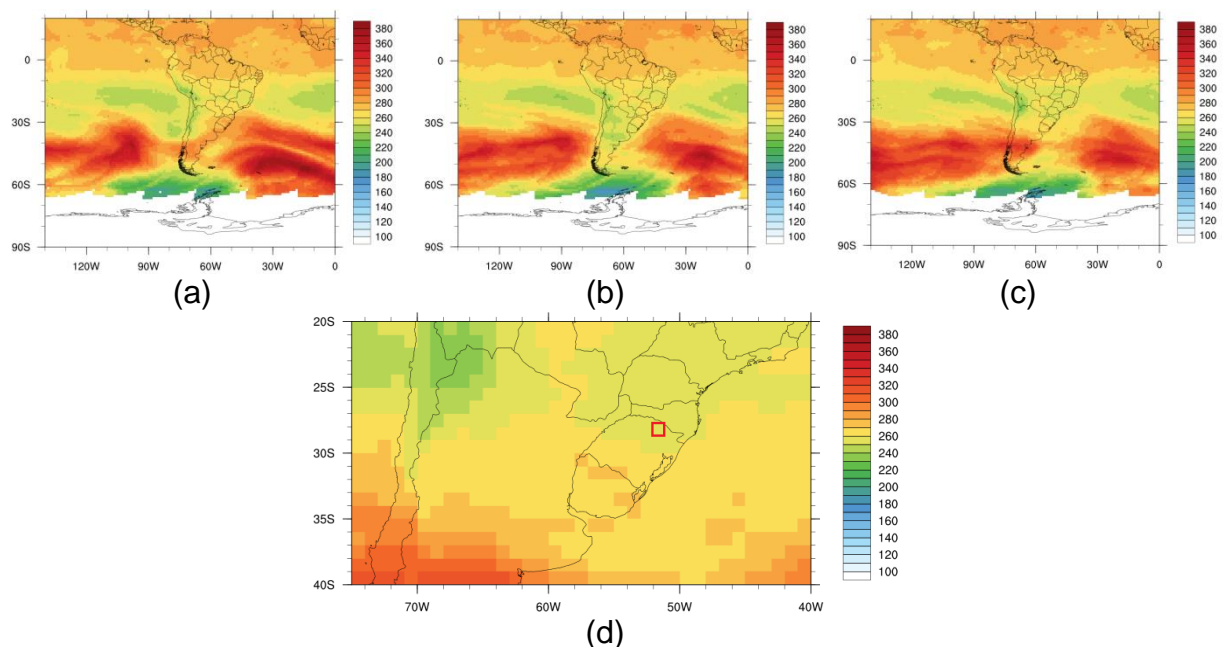


Figura 39 – Coluna total de ozônio para os dias 02 (a), 03 (b) e 04/08/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Lagoa Vermelha – RS (d).

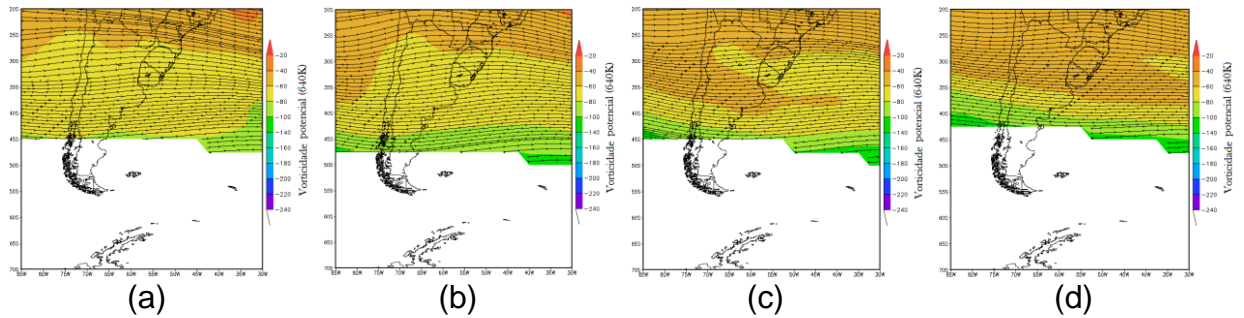


Figura 40 – Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 01, (b) 02, (c) 03, (d) 04 de agosto de 2006, a 640K.

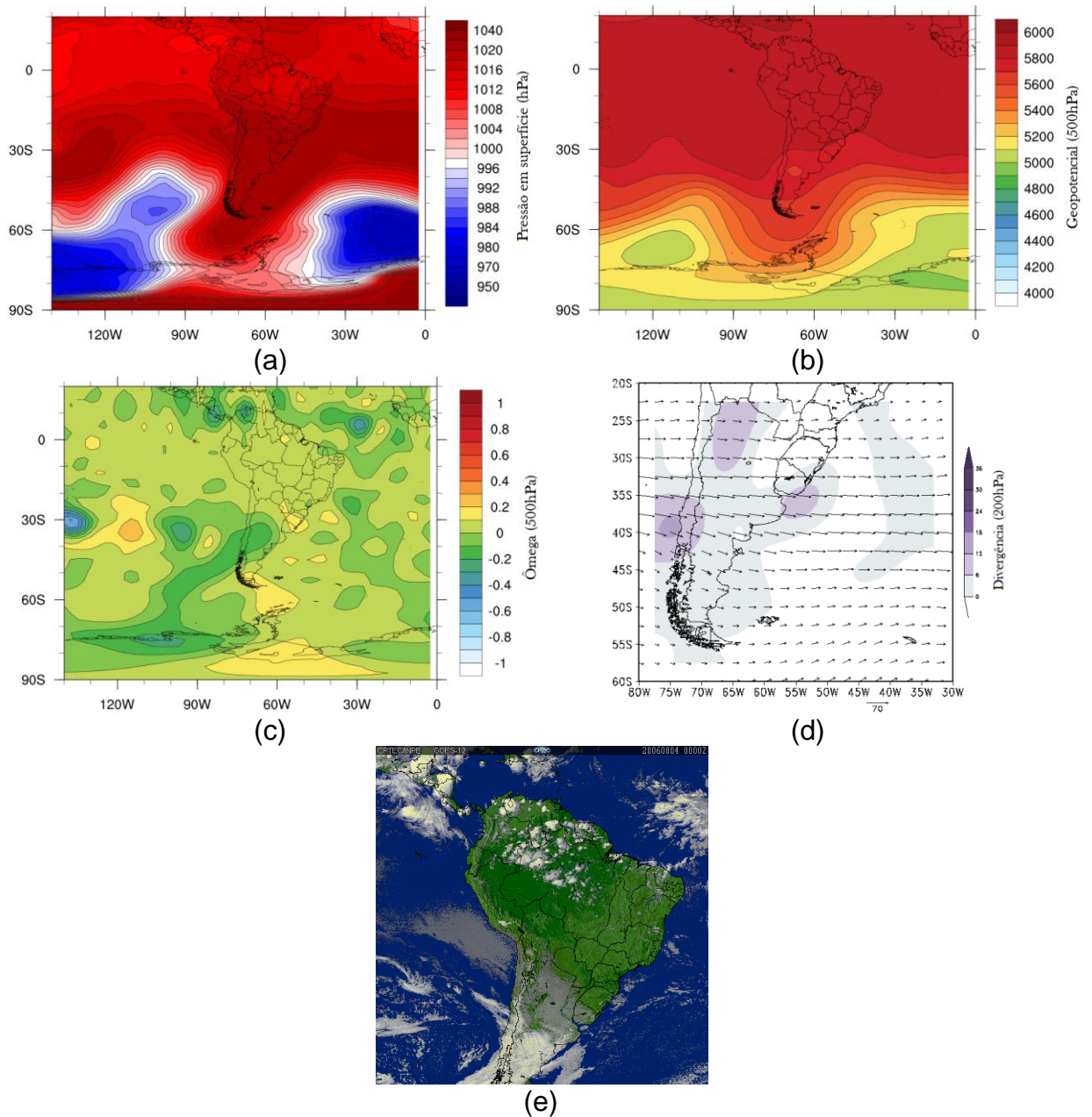


Figura 41 – Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 04 de agosto de 2006.

Selecionou-se o pixel para o dia 10 do mês de setembro de 2009, aproximadamente a 150 km da cidade de Coronel Sapucaia – Mato Grosso do Sul, na divisa com o Paraguai (23,5°S e 55,5°W), onde o valor da coluna total de ozônio foi de 258,7UD enquanto sua média mensal é de 278,4UD, queda de 7% em relação à média mensal da localidade (Fig. 42). Ao analisar a vorticidade potencial absoluta percebe-se uma diminuição de 80 para 60, entre os dias 07 e 08 de setembro, indicando a origem tropical da massa de ar (Fig. 43).

No dia em análise, um grande sistema de baixa pressão em superfície situava-se sobre o oceano Pacífico (sudoeste da América do Sul) e o mesmo estava associado a um cavado em 500hPa, cobrindo o sul do continente com nebulosidade (Fig. 44a, b, e). O sistema sobre o oceano Atlântico, à sudeste do continente, está associado a um cavado em 500hPa que se estende sobre o continente (Fig. 44a, b). Esse sistema frontal apresenta uma banda de nebulosidade sobre os estados do sul e sudeste do Brasil, mostrando uma forte ascendência de massa (500hPa) que diverge em 200hPa sobre os estados de SC e RS e Uruguai (Fig. 44c, d, e). Sobre o pixel selecionado praticamente não há nebulosidade, mas percebeu-se ascendência de massa.

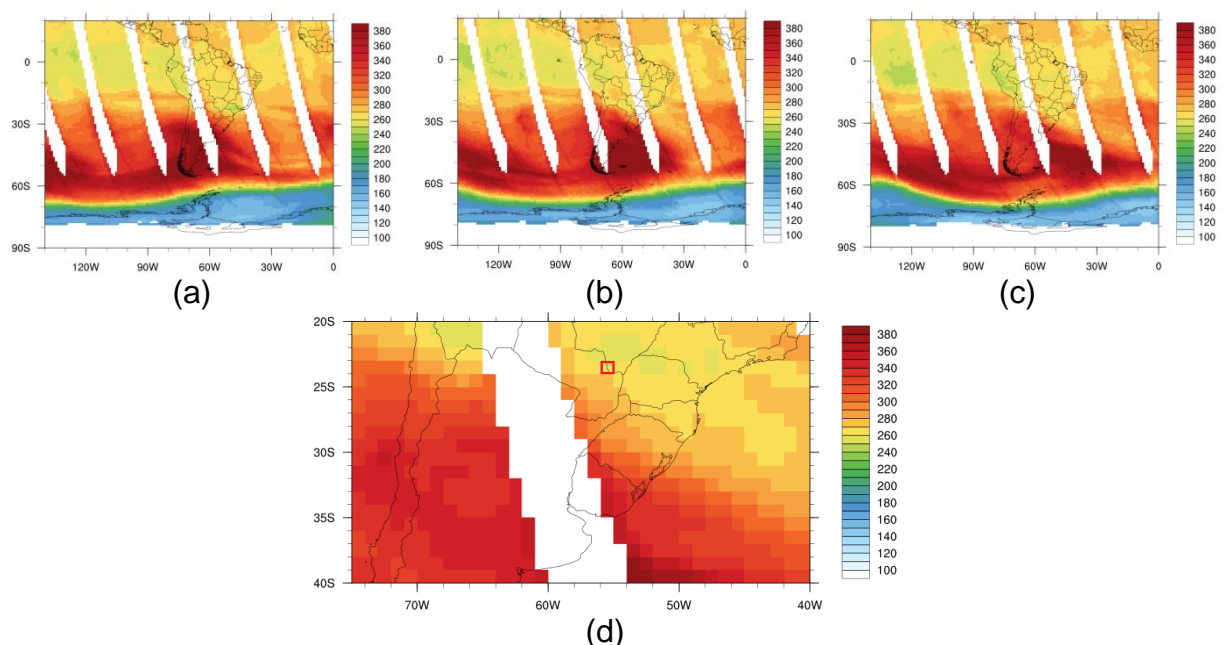


Figura 42 – Coluna total de ozônio para os dias 08 (a), 09 (b) e 10/09/2009 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Coronel Sapucaia – MS (d).

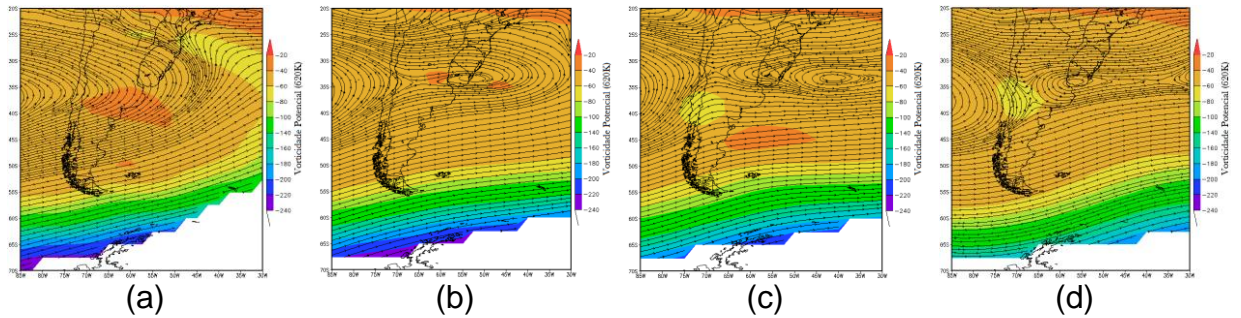


Figura 43 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 07, (b) 08, (c) 09, (d) 10 de setembro de 2009, a 620K.

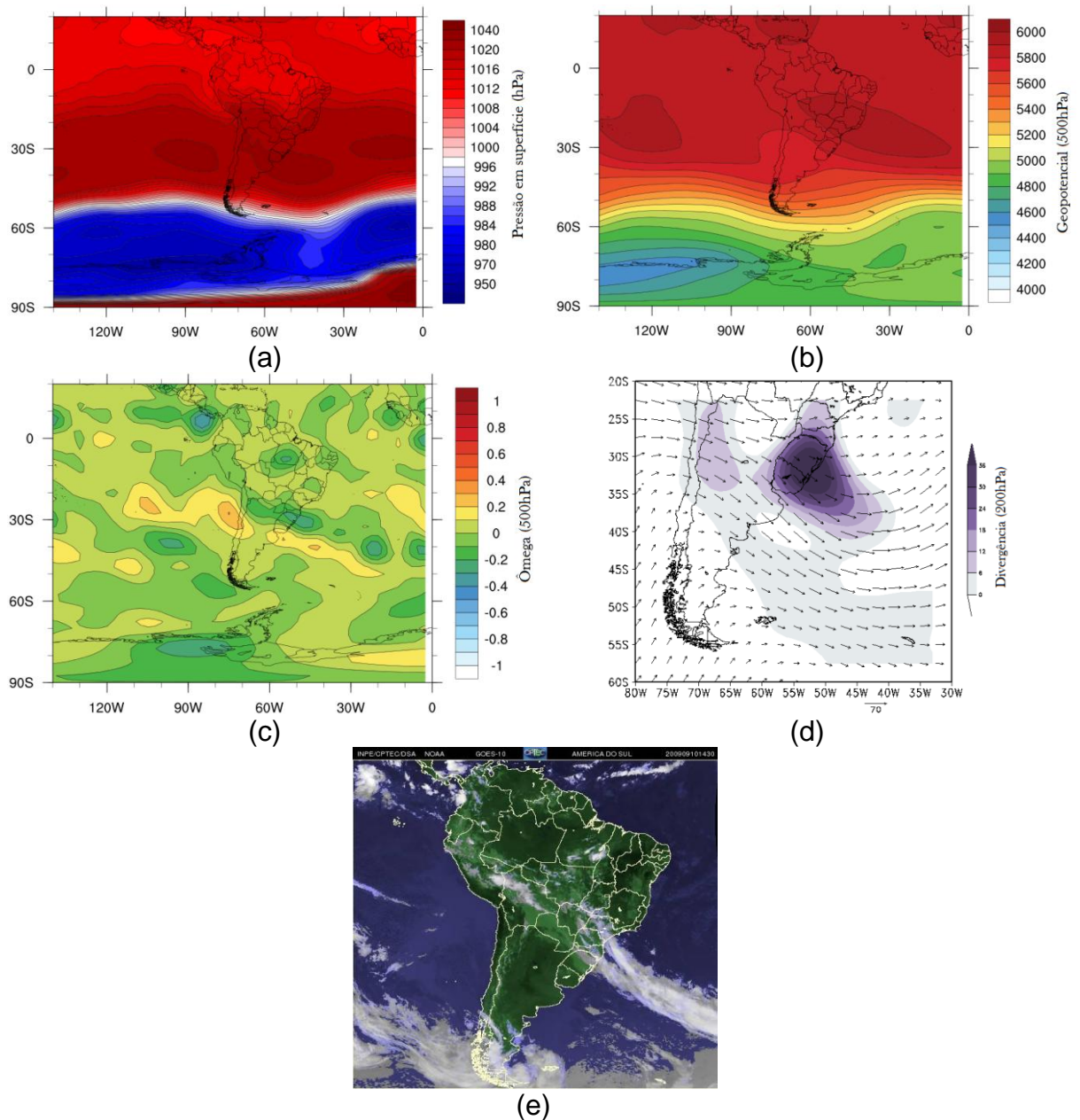
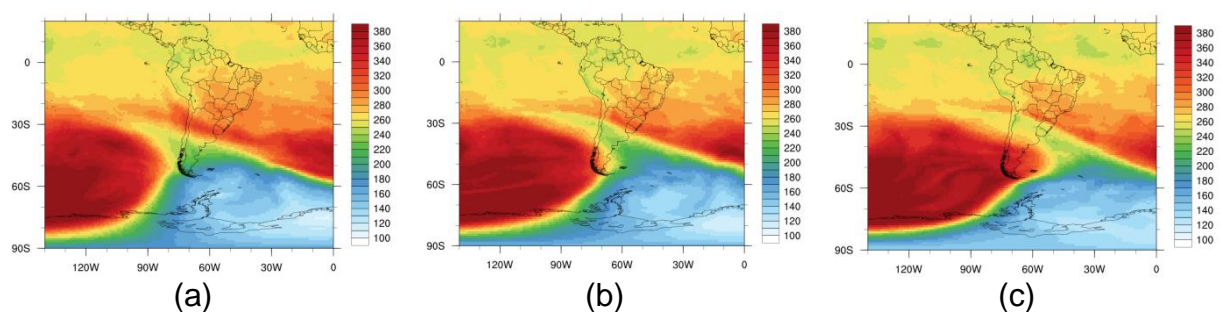


Figura 44 – Campos de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida GOES-10, para o dia 10 de setembro de 2009.

Para o mês de outubro o pixel selecionado com depleção da coluna total de ozônio (maior número de dias abaixo do limiar) está localizado sobre a cidade de Concordia – Argentina, que faz fronteira com a cidade de Salto – Uruguai ($31,5^{\circ}\text{S}$ e $58,5^{\circ}\text{W}$). De acordo com a Fig. 45 nota-se a uma massa de ar pobre em conteúdo de ozônio sobre o continente, atingindo o pixel próximo a Salto. O valor médio da coluna total de ozônio, para esse pixel, para outubro é de 291,3UD, mas o valor encontrado no dia da análise foi de 251,3UD (queda de 13% em relação à média mensal do pixel). Pela análise do campo de vorticidade potencial absoluta (Fig. 46) nota-se aumento de 60 para 100 sobre o pixel, indicando entrada de massa de ar de origem polar entre os dias 10 e 11, caracterizando o efeito secundário do buraco de ozônio Antártico. O resultado encontrado corrobora com o encontrado por Peres (2013), sobre a cidade de Santa Maria – RS pelos dados do instrumento Brewer, onde no dia 11 de outubro de 2005 foi registrado efeito secundário do buraco de ozônio Antártico, com coluna total de ozônio 274UD e uma redução de 6,4% em relação à média.

Pelos campos de pressão e geopotencial nota-se a um sistema de baixa pressão no centro da Argentina, associado a um cavado em 500 hPa ainda sobre o oceano Pacífico (Fig. 47a, b). Com forte movimento ascendente em 500 hPa sobre o continente (Fig. 47c) uma divergência em 200 hPa é mostrada a oeste do sistema na Fig. 47d, e a faixa de nebulosidade se aproximando pelo sudoeste do Uruguai é vista na Fig. 47e. Sobre o pixel selecionado existe apenas ascendência de massa e nenhuma presença de nebulosidade.



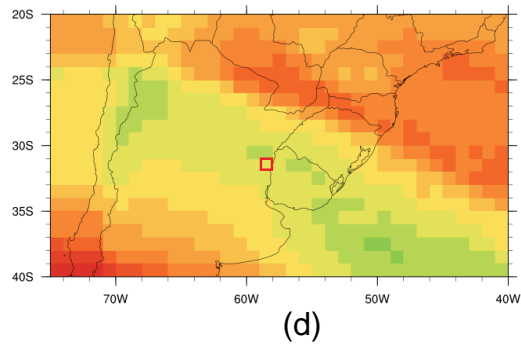


Figura 45 - Coluna total de ozônio para os dias 09 (a), 10 (b) e 11/10/2005 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Concordia – Argentina (d).

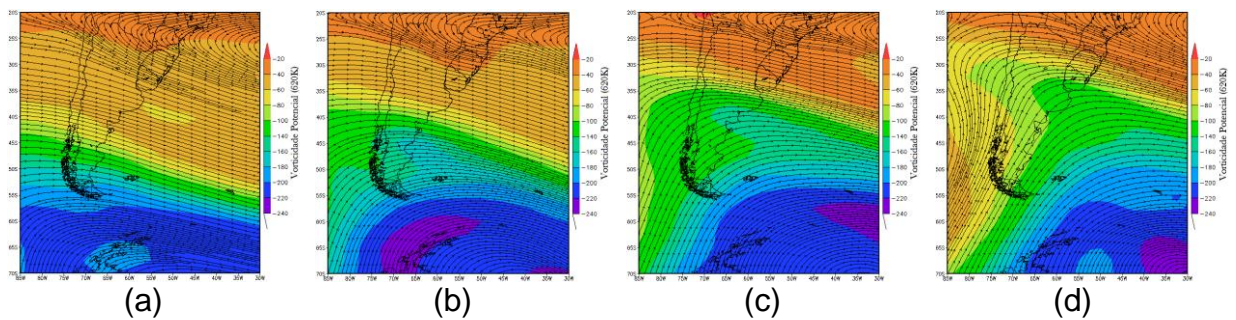
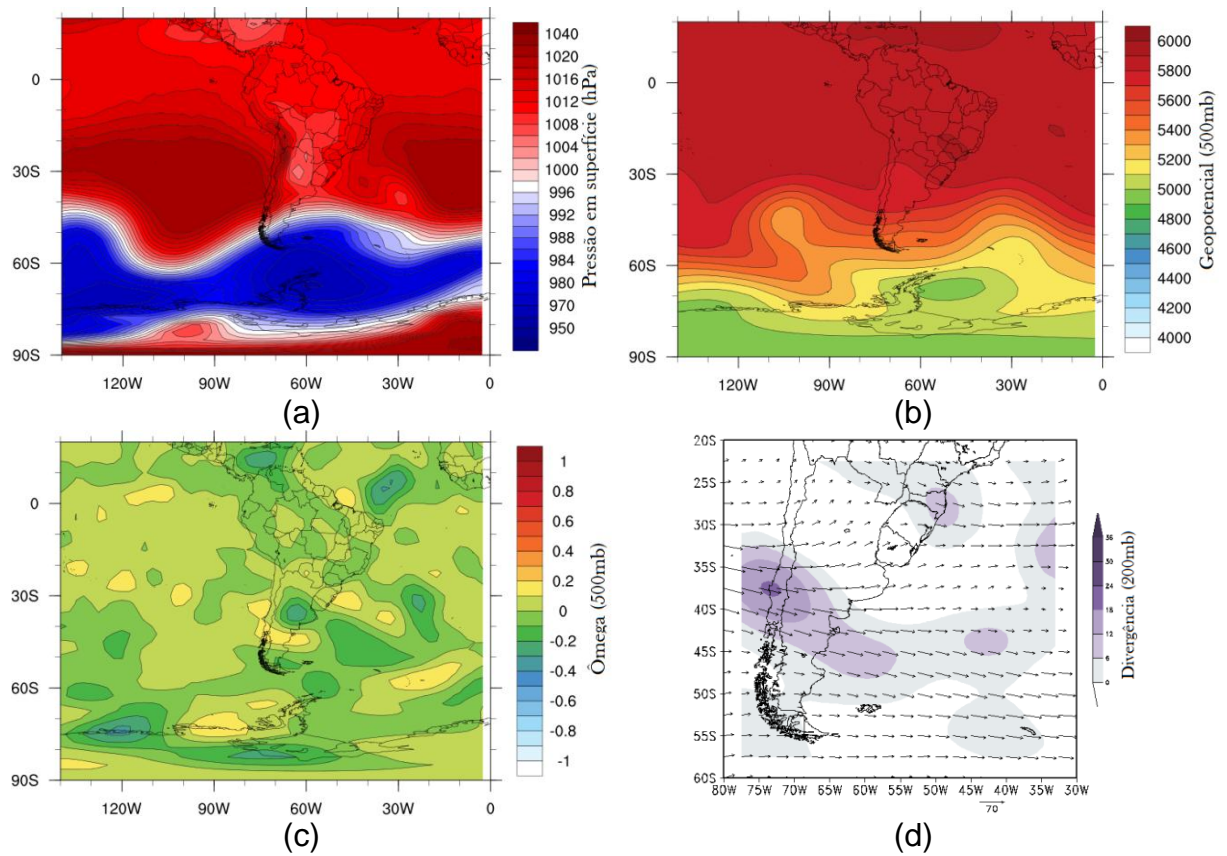
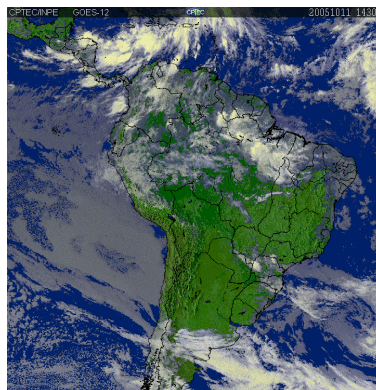


Figura 46 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 08, (b) 09, (c) 10, (d) 11 de outubro de 2005, a 620K.





(e)

Figura 47 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa, (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-12, para o dia 11 de outubro de 2005.

O pixel selecionado para novembro fica localizado sobre a cidade de Mendoza – Argentina (33,5°S e 68,5°W, Fig. 48), e apresenta média mensal de 293,2UD e para o dia selecionado (30/11/2006) o valor encontrado para a coluna total de ozônio foi de 259,6UD representando uma queda em relação à média mensal de 11%. A origem da massa de ar é confirmada pelo campo de vorticidade potencial absoluta, que apresenta aumento de 80 para 100 no nível de 640K (Fig. 49). Portanto, o decaimento da coluna total de ozônio, nesse caso, é decorrente de efeito secundário do buraco de ozônio Antártico.

A análise sinótica do dia mostra um sistema de baixa pressão no oceano Atlântico, já distante do continente (situado em torno de 60°S e 0°W), porém sua banda de nebulosidade é extensa e continua sobre o continente, atingindo os estados do sudeste e região sul do nordeste (Fig. 50a, e). Este sistema está acoplado a um cavado em 500 hPa (Fig. 50b), com ascendência de ar em 500 hPa e diverge em 200 hPa (Fig. 50c, d). O sistema de baixa pressão em superfície, no extremo sul da América do Sul, começa a ganhar força devido ao cavado em 500 hPa deslocado para oeste. O movimento vertical ascendente sobre o centro sul da Argentina, onde uma banda de nebulosidade pode ser observada pela Fig. 50 e. Sobre o pixel selecionado existe a presença de forte gradiente de ômega, assim como de pressão em superfície, mas sem presença de nebulosidade.

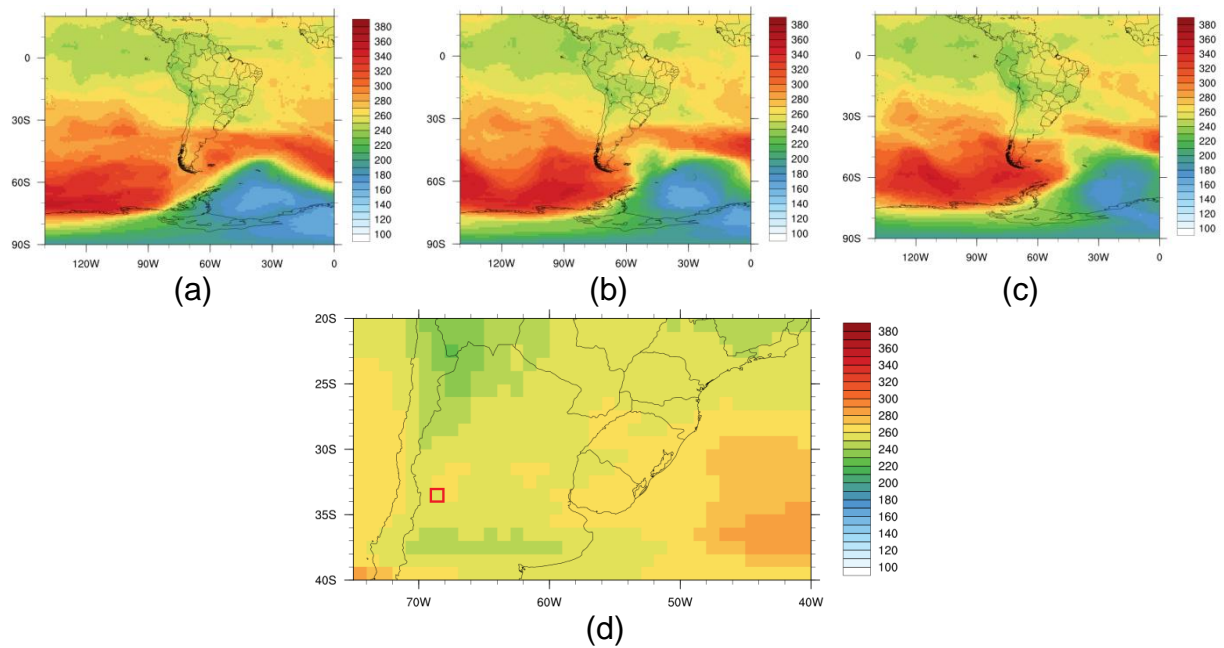


Figura 48 - Coluna total de ozônio para os dias 28 (a), 29 (b) e 30/11/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Mendoza – Argentina (d).

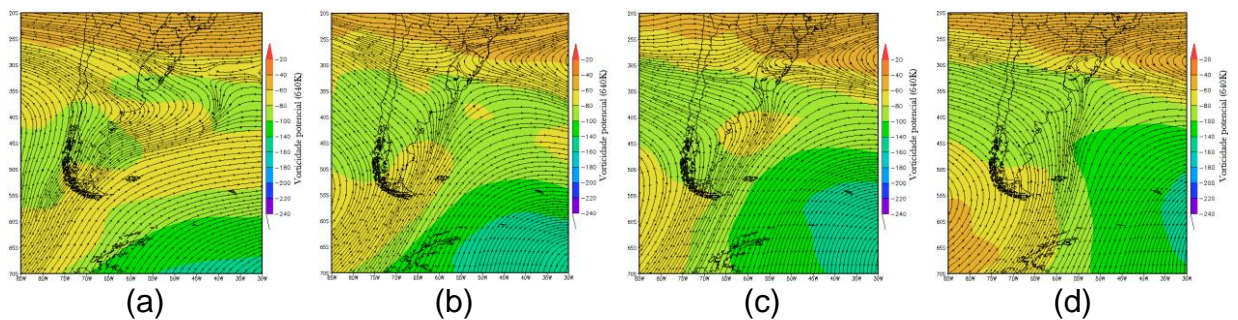
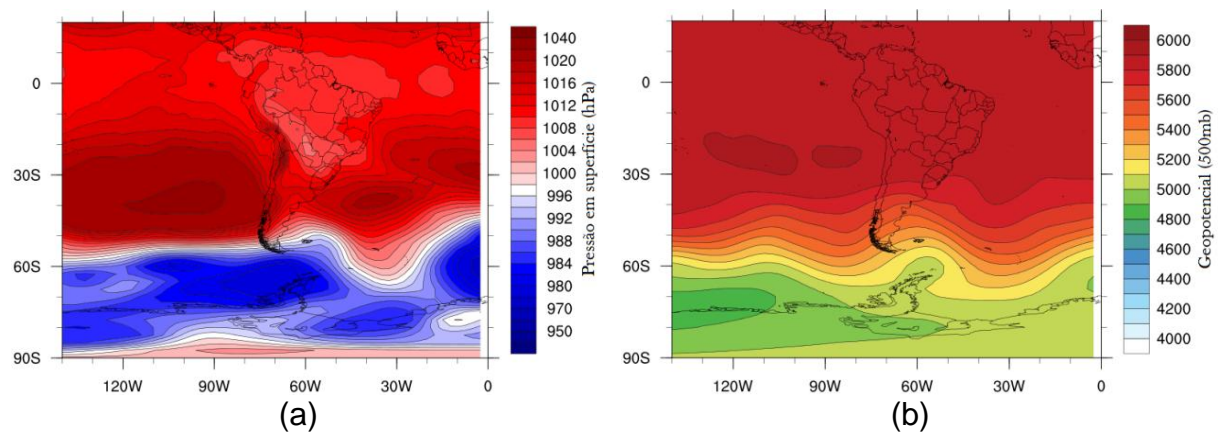


Figura 49 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 27, (b) 28, (c) 29, (d) 30 de novembro de 2006, a 640K.



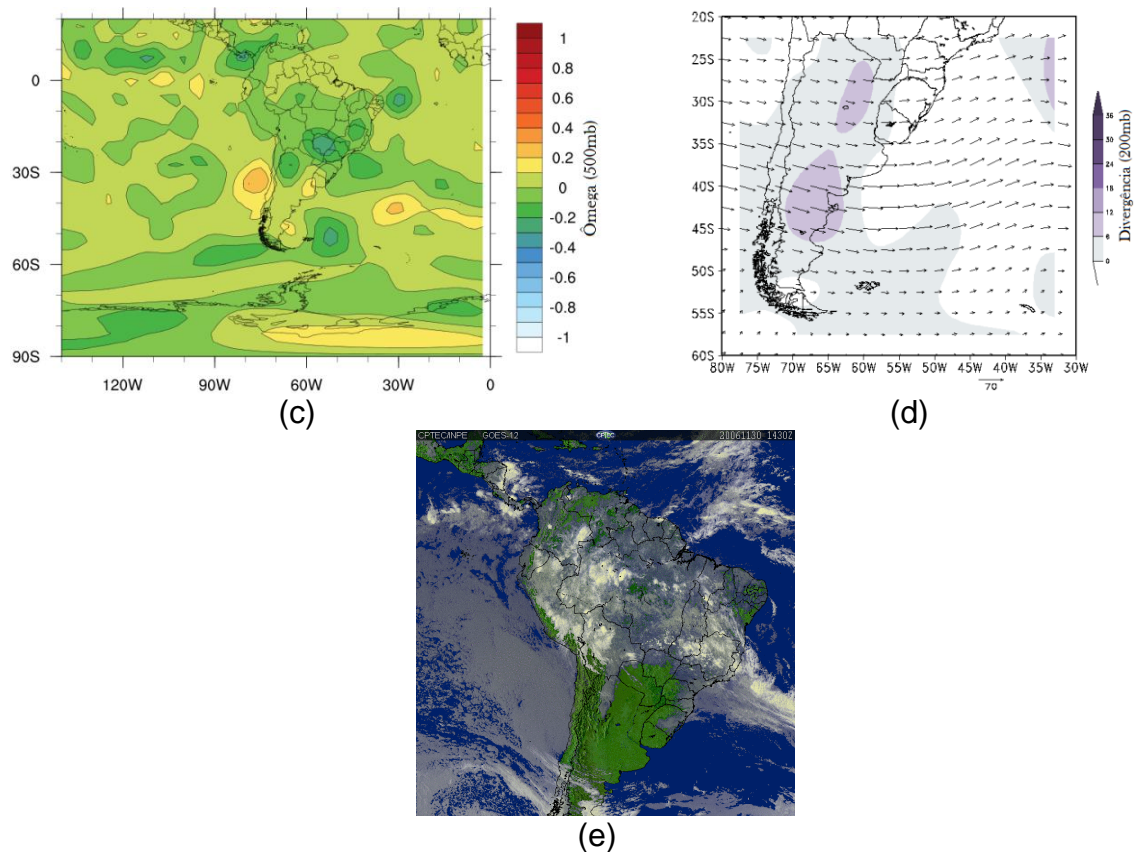


Figura 50 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa e (d) vetor de vento e divergência em 200hPa e (e) imagem de satélite colorida do GOES-10, para o dia 30 de novembro de 2006.

A Fig. 51 mostra a coluna total de O_3 para o dia 02 de dezembro de 2006, quando atingiu o valor de 243,1UD, enquanto sua média mensal calculada foi de 276,5UD, o que representa uma queda de 12% em relação à média mensal do pixel sobre a cidade de Durazno no Uruguai ($33,5^\circ S$ e $56,5^\circ W$). O dia selecionado no mês de dezembro é marcado por evento de efeito secundário do buraco de ozônio Antártico, como é possível observar na Fig. 52, onde o valor da vorticidade potencial absoluta no nível de 630K sobe de 80 para 100, entre os dias 29 e 30 de novembro.

Um sistema de baixa pressão em superfície atua no extremo sul do continente Sul Americano, se estendendo sobre o centro da Argentina ($40^\circ S$ e $70^\circ W$), juntamente a um cavado em 500hPa (Fig. 53a, b). A banda de nebulosidade cobre a região do rio da Prata (parte da Argentina e quase todo o Uruguai – Fig. 53e). O movimento vertical ascendente em 500hPa e a divergência em 200hPa encontram-se deslocados para nordeste do sistema (Fig. 53c, d). Sobre o pixel selecionado há descendência de ar e a sudoeste uma divergência em 200hPa.

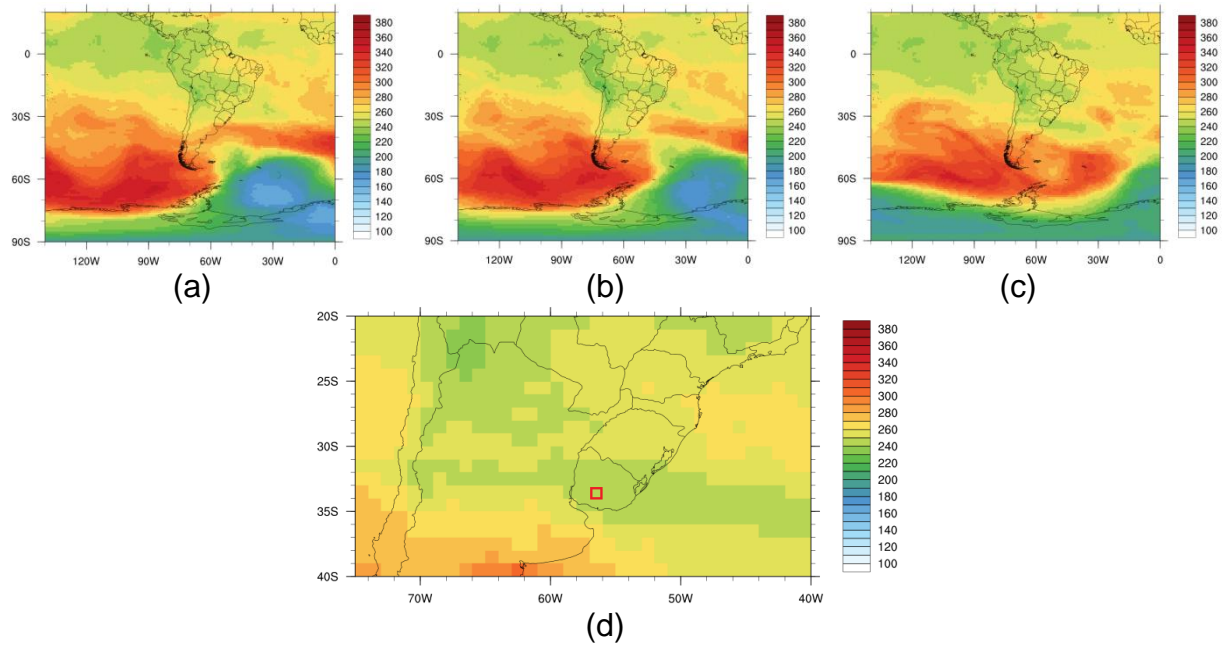


Figura 51 - Coluna total de ozônio para os dias 30 (a), 01 (b) e 02/12/2006 (c) e pixel selecionado no quadrado vermelho sobre a cidade de Durazno – Uruguai (d).

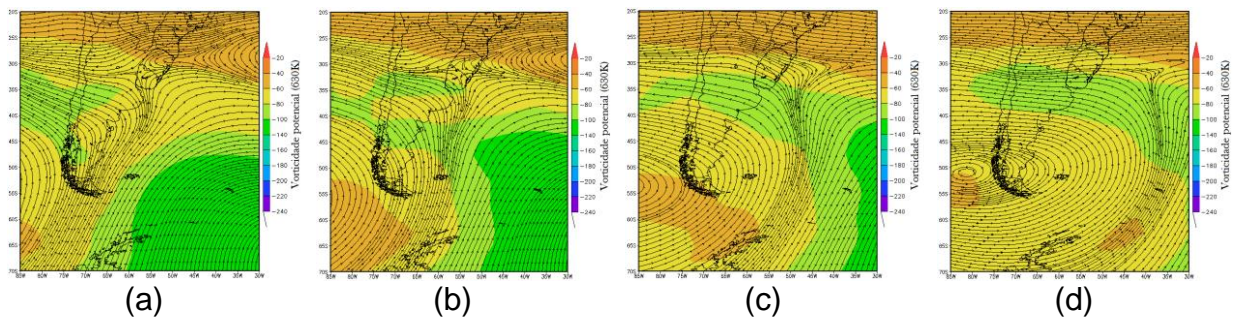
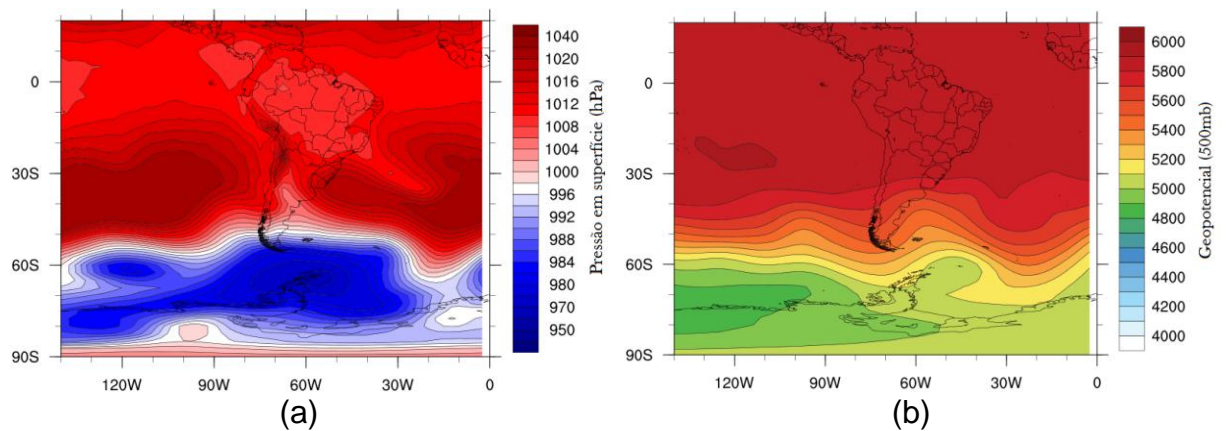


Figura 52 - Vorticidade potencial absoluta e linhas de corrente para os dias (a) 29, (b) 30 de novembro de 2006 e (c) 01, (d) 02 de dezembro de 2006, a 630K.



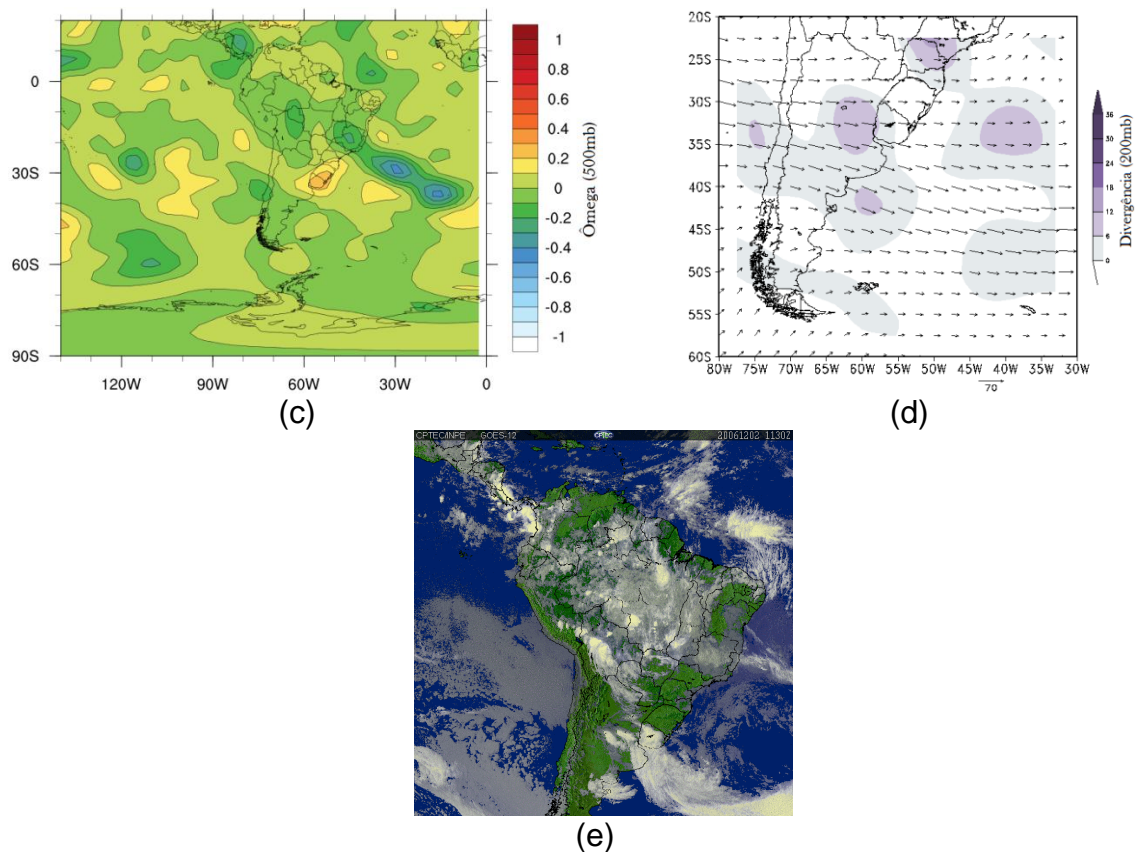


Figura 53 – Campo de (a) pressão em superfície, (b) geopotencial em 500hPa, (c) ômega em 500hPa e (d) divergência em 200hPa, para o dia 02 de dezembro de 2006.

4.4 Discussão dos resultados

A média mensal mostra que a maior variabilidade meridional da coluna total de ozônio sobre a América do Sul ocorreu nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro (150UD) e a menor nos meses de fevereiro, março, abril e maio (50UD), entre as latitudes polares (maiores que 80°S) e médias (entre 70°S e 50°S). Isso ocorre em resposta ao buraco de ozônio que se forma na estratosfera da Antártica durante o inverno. O vórtice estabelecido na região devido às baixas temperaturas e a ausência de radiação solar impede que ocorra transporte de ozônio para o interior do vórtice, acumulando-se nas latitudes médias. Contudo, no início da primavera esse vórtice enfraquece, e então o transporte meridional de ozônio, feito pela circulação Brewer-Dobson das latitudes tropicais para as latitudes médias e polares começa a fluir livremente até o início do inverno, quando o processo começa novamente.

Na quantificação dos dias com valores abaixo do limiar estabelecido (1,5DP – média mensal), foi observado que as médias próximas à região Antártica são

afetadas durante a primavera e verão, devido ao baixo conteúdo de ozônio, e mesmo assim, ainda são observados eventos de decaimento da coluna total de ozônio sobre essa região. Os meses entre setembro e fevereiro apresentam mais dias abaixo do limiar na região mais próxima ao pólo, possivelmente em consequência do enfraquecimento do vórtice polar que instabiliza a borda do buraco de ozônio alterando seu posicionamento. Nos meses de maio, junho e julho, nas latitudes em torno de 50°S e 60°S, identificou-se poucos dias com decaimento significativo de ozônio, pois a circulação Brewer-Dobson age livremente, em virtude do vórtice polar que foi extinto no verão.

Podem-se destacar os meses de maio, julho e dezembro, pois apresentam maior número de dias com decaimento da coluna total de ozônio entre as latitudes de 20°S e 40°S, sobre a área continental (em alguns pontos 20 e 25 dias). O mês de maio destaca-se como sendo o que apresenta maior área com dias abaixo do limiar estabelecido sobre área continental, principalmente sobre o centro-norte da Argentina.

Na análise da vorticidade potencial absoluta para a verificação da origem da massa de ar dos 12 casos selecionados, 06 casos foram reportados tendo origem tropical da massa de ar pobre em ozônio (fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro), e 06 com origem polar (janeiro, abril, maio, outubro, novembro e dezembro).

Nas análises dos casos selecionados, percebeu-se que o mês com maior porcentagem de queda da coluna total de ozônio, do dia em análise, em relação à média mensal foi julho, com 21%, seguido de maio (15%), junho (14%), abril e outubro (13%), dezembro (12%), março e novembro (11%), agosto (10%) e janeiro, fevereiro e setembro (7%).

Para os casos selecionados de janeiro e maio (diminuição da coluna total de ozônio sobre o ponto devido à influência de massas polares), ocorreu presença de nebulosidade na atmosfera, devido à passagem de um sistema frontal. Para o caso selecionado para o mês de dezembro (influência de massa polar) também foi observado nebulosidade na atmosfera, porém o sistema frontal encontrava-se sobre o ponto. Para os três casos acima destacados havia presença de gradiente de pressão em superfície e divergência em 200hPa, mas o caso de janeiro e maio apresentaram ascendência de massa (ômega negativo em 500hPa) e o caso de

dezembro subsidência de massa (ômega positivo em 500 hPa), sobre o ponto selecionado.

Os casos selecionados para os meses de outubro e novembro (influência de massas polares) apresentaram características semelhantes, sem nebulosidade sobre o ponto selecionado de cada caso, gradiente de pressão em superfície e gradiente de ômega em 500 hPa, bem como aproximação de um sistema frontal a sudoeste do ponto. A tab. 5, a seguir apresenta um resumo da situação atmosférica que ocorria durante o evento de queda da coluna total de ozônio sobre o ponto selecionado para cada mês em que a origem da massa de ar foi registrada como polar.

Tabela 5 – Situação atmosférica sobre o ponto selecionado para cada mês nos casos de origem de massa polar.

Sobre o ponto:	Meses					
	Jan	Abr	Mai	Out	Nov	Dez
Nebulosidade	X		X			X
Sistema frontal						X
Aproximação de sistema frontal				X	X	
Anticiclone		X		X	X	
Ascendência de massa em 500hPa	X		X			
Descendência de massa em 500hPa						X
Divergência em 200hPa	X	X				X

Os meses com decaimento da coluna total de ozônio ocorrido devido à influência de massas de origem tropical (fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro) não apresentaram nebulosidade sobre o ponto escolhido. Sistemas frontais se aproximam dos pontos selecionados para os casos de março, junho e julho (meses com maior porcentagem de queda em relação à média mensal). Os casos para os meses de fevereiro, agosto e setembro têm sobre o ponto selecionado a presença de sistemas de alta pressão, com baixos valores de velocidade vertical em 500 hPa (em torno de -0,1 e 0,1). Como uma forma resumida de apresentação dessa discussão de resultados é apresentada a tab. 6, que mostra a situação em que se encontrava a atmosfera sobre o ponto no dia em que ocorreu o decaimento da coluna total de ozônio.

Tabela 6 - Situação atmosférica sobre o ponto selecionado para cada mês nos casos de origem de massa tropical.

Sobre o ponto:	Meses					
	Fev	Mar	Jun	Jul	Ago	Set
Nebulosidade						
Sistema frontal						
Aproximação de sistema frontal		X	X	X		
Anticiclone	X	X	X	X	X	X
Ascendência de massa em 500hPa		X	X	X		
Descendência de massa em 500hPa						

Conforme apresentado na tab. 6, pode-se observar que nos casos com massa de ar de origem tropical não houve nebulosidade, já nos de origem polar apresentou casos com e sem a presença de nebulosidade. A maioria dos casos de queda ocorreu dentro ou na borda de um anticiclone com exceção dos meses de janeiro, maio e dezembro em que houve presença de sistema frontal, em ambos os casos, tanto polar quanto tropical. Quanto à ascendência e descendência de massa, nos casos de origem polar em que não havia nebulosidade nenhuma das duas foi observada, assim como para os casos de origem tropical em que os pontos selecionados encontravam-se no centro de anticiclones.

Conclusões

Os resultados desta pesquisa apresentaram a média mensal da coluna total de ozônio para a região sul da América do Sul para o período de outubro de 2004 a dezembro de 2011. A partir do limiar de 1,5 de desvio padrão encontraram-se casos de queda significativa da coluna total de ozônio e a quantificação de dias com decaimento da coluna total de ozônio para cada ponto da área de estudo.

Para a média mensal e limiares destaca-se os seguintes resultados:

- A maior variabilidade meridional da coluna total de ozônio sobre a América do Sul ocorreu nos meses próximos à primavera (150UD).
- A menor variabilidade ocorreu nos meses próximos ao outono (50UD).

Ambas entre as latitudes polares (maiores que 80°S) e médias (entre 70°S e 50°S), e ocorre devido ao vórtice polar Antártico, que afeta a circulação Brewer-Dobson durante a primavera, e depois desaparece durante o verão quando a circulação começa a fluir novamente sem barreiras.

A quantificação dos dias com valores abaixo do limiar apresentou um maior número de dias com decaimento da coluna total de ozônio sobre a região Antártica e adjacências nos meses entre setembro e fevereiro. Nos meses de maio, junho e julho houve poucos dias com decaimento significativo de ozônio entre as latitudes de 50°S e 60°S, e os meses de maio, julho e dezembro apresentaram maior número de dias, entre as faixas de latitude de 20°S e 40°S, sobre a área continental, sendo maio o mês com maior número em maior área sobre o continente.

A identificação da origem da massa de ar pela vorticidade potencial absoluta para os casos selecionados revelou 06 casos como sendo de origem tropical (fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro), e 06 de origem polar (janeiro, abril, maio, outubro, novembro e dezembro). A maior porcentagem de queda em relação à média mensal ocorreu em julho (21%) e maio (15% - o caso deste mês

teve o menor valor de coluna total de ozônio, que foi de 227,5UD) e a menor porcentagem de queda ocorreu nos meses de janeiro, fevereiro e setembro (7%).

Pelas análises sinóticas pode-se constatar que:

Os casos selecionados para os meses de janeiro, maio e dezembro (massas pobres de ozônio com origem polar) apresentaram nebulosidade sobre o ponto selecionado, devido à presença e/ou proximidade de um sistema frontal, e apresentou gradiente de pressão em superfície e divergência em 200hPa. Porém para o mês de janeiro e maio houve ascendência de massa em 500hPa, enquanto que em dezembro houve subsidência de massa em 500 hPa. Outubro e novembro (massas polares) não apresentaram nebulosidade sobre o ponto, e havia gradiente de pressão e ômega em 500 hPa, bem como aproximação de um sistema frontal.

Os meses com origem de massa tropical (fevereiro, março, junho, julho, agosto e setembro) não apresentaram nebulosidade, mas havia a aproximação de sistemas frontais dos pontos para os casos de março, junho e julho. Os pixels selecionados para os casos de fevereiro, agosto e setembro estavam sobre a influência de sistemas de alta pressão.

Na comparação entre as massas de origem tropical e polar foi possível observar que não havia nebulosidade quando a massa pobre em ozônio era de origem tropical, enquanto que nas de origem polar esta característica não apresentava um padrão, podendo ocorrer nebulosidade ou não. Na maioria dos casos a queda da coluna total de ozônio ocorria quando havia a presença de um anticiclone sobre o pixel selecionado, ou seja, quando não havia nebulosidade sobre o pixel selecionado.

Trabalhos Futuros

Realizar uma análise mais aprofundada dos casos de queda de coluna total de ozônio para cada mês.

Estudar mais de um caso por mês de queda de coluna total de ozônio, com a finalidade de encontrar um padrão troposférico/estratosférico para as queda de coluna total de ozônio.

Realizar uma análise mensal da variabilidade anual da coluna total de ozônio sobre grandes cidades, e analisar/relacionar com emissões de ozônio troposférico.

Realizar uma análise decadal da coluna total de ozônio.

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.
- 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.
- BENCHERIF, H.; PORTAFAIX, T.; BARAY, J. L.; MOREL B.; BALDY S.; LEVEAU, J.; HAUCHECORNE, A.; KECKHUT, P.; MOORGAWA A.; MICHAELIS, M. M.; DIAB, R. LIDAR observations of lower stratospheric aerosols over South Africa linked to large scale transport across the southern subtropical barrier. **Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.65, p.707–715, 2003.
- 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.
- BETTS A.K.; GATTI L.V.; CORDOVA A.M.; DIAS M.A.F.S.;FUENTES J. Transport of ozone to the surface by convective downdrafts at night. **Journal of Geophysical Research**. v.107, p.6. 2000.
- BOJKOV, R.D.; BISHOP, L.; FIOLETOV, V. E. Total ozone trends from quality-controlled ground based data (1964-1994). **Journal of Geophysical Research**, v.100, n.12, p.25867-25876. 1995.

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.

BRACCI, A.; CRISTOFANELLI, P.; SPRENGER, M.; BONAFE, U.; CALZOLARI, F.; DUCHI, R.; LAJ, P.; MARINONI, A.; ROCCATO, F.; VUILLERMOZ, E.; BONASONI, P. Transport of Stratospheric Air Masses to the Nepal Climate Observatory-Pyramid (Himalaya; 5079 m MSL): A Synoptic-Scale Investigation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v.51, n.8, p.1489-1507, 2012.

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.

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.

CANZIANI, P. O.; COMPAGNUCCI, R. H.; BISCHOFF, A. S.; LEGNANI, W. E. A study of impacts of tropospheric synoptic processes on the genesis and evolution of extreme total ozone anomalies over southern South America. **Journal of Geophysical Research**. v.107, n.24, p.ACL 2-1–ACL 2-25, 2002.

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. **Mem. Natl. Inst. Polar Res. Jpn. Spec.**, v. 34, p. 13-20, 1984.

CHUBACHI, S.; MIYAGAWA, K.; MAKINO, Y. A case study of the low total ozone event over Europe on 14 February 2001. **Int. J. Remote Sens.**, v. 26, n. 16, p. 3423-3431, 2005.

DE BELLEVUE, J. L.; RECHOU, A.; BARAY, J. L.; ANCELLET, G.; DIAB, R. D. Signatures of stratosphere to troposphere transport near deep convective events in the southern subtropics. **Journal of Geophysics Research**. v.111, n.2410, 2006.

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.

DESSLER, A. The Chemistry and Physics of Stratospheric Ozone. **International Geophysics Series**, v. 74, Academic Press, 2000.

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

DOBSON, G. M. B., Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: A history. **Applied Optics**, v. 7, p. 387-405, 1968a.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J., D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x 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.

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

HANSEN, K. 2008 Ozone Hole Maximim Announced. Disponível em: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/ozonemax_2008.html>. Acesso em: 09 de nov. 2012. 2010.

HOFMANN, D. J.; OLTMANS, S. J.; HARRIS, J. M.; JOHNSON, B. J.; LATHROP, J. A. Ten years of ozone sonde measurements at the South Pole: Implications for recovery of springtime Antarctic ozone. **Journal Geophysical Research Atmospheric**, v.102, p. 8931-8943, 1997.

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.

HOSKINS, B. J., MCLNTYRE, 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 de efeitos 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.

KALL, E.; PERES, L.V.; PINHEIRO, D.K.; SCHUCH, N.J.; LEME, N.P. Análise de efeitos 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/mtc-m19/2011/01.12.18.56/doc/Poster%20JAI%202010%20-%20Elenice%20Kall%20An%E1lise%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.

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.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; CASICCIA, C. A. R.; ZAMORANO B, S. F. The ozone hole over Punta Arenas, Chile. **Journal of Geophysical Research**. v.102, n.D7, p.8945-9853. 1997.

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

LIU 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.

MARCHAND, M.; BEKKI, S.; PAZMINO, A.; LEFÈVRE, F.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAUCHECORNE, A. Model simulations of the impact of the 2002 Antarctic ozone hole on midlatitudes. **Journal Atmospheric Science**, v.62, p.871–884, 2005.

MIDYA, S. K.; DEY, S. S.; CHAKRABORTY, B. Variation of the total ozone column during tropical cyclones over the Bay of Bengal and the Arabian Sea. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v.117, p.63-71, 2012.

MOLINA, M. J.; ROWLAND, F. S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone. **Nature**. v.249, p.810-812, 1974.

NASA. (National Aeronautics and Space Administration). *Studying Earth's Environment From Space*. June 2000.
<http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/ozone/class/Chap_1/1_Js/1-06.jpg>.
Acesso em: 7 de abr. 2013.

NASA. (National Aeronautics and Space Administration). *Studying Earth's Environment From Space*. June 2000a.
<http://www.ccpo.odu.edu/~lizsmith/SEES/ozone/class/Chap_1/1_Js/1-05.jpg>.
Acesso em: 7 de abr. 2013.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). Nasa Earth Data. May 2002.
<<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/TOMS>>. Acesso em: 28 de mar. 2013.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). Ozone Hole Watch. March 2011. <<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html>>. Acesso em: 26 de mar. 2013.

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

OHRING, G.; BOJKOV, R. D.; BOLLE, H. J, HUDSON, R. D. and VOLKERT, H. Radiation and Ozone: Catalysts for Advancing International Atmosferic Science Programmes for over half a century. **Space Research Today**, v.177, p.16-31, Abr. 2010.

OMI Team-NASA. Ozone Monitoring Instrument (OMI). Data User's guide. 2010.

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. Análise da ocorrência dos eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil. 2010. 56f. Relatório final de projeto de iniciação científica PIBIT/INPE-CNPq/MCT. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

PERES, L. V.; CRESPO, N., M.; DA SILVA, O.; K., HUPFER, N.; ANABOR, V.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, N. J.; LEME, N., P. Sinoptic weather system associate with influence of the Antartic Ozone Hole over South of Brazil at October, 13th, 2010. **Annual Active Report 2011 - National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research.**, 2012.

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.

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

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.

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.

REIS, N.C.S; MENDOZA, F.R.T.; PERES, L.V.; AVENA, M.; CRESPO, N.M.; SILVA, O.K.; HUPFER, N.; PINHEIRO, D.K.; SCHUCH, N.J.; LEME, N.M.P. Anticorrelação entre coluna total de ozônio e a radiação ultravioleta do tipo eritema nos solstício de verão e inverno de 2005 a 2008. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 27. 2012, Gramado-RS. **Anais...**Gramado-RS, 2012.

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.

SCHOEBERL, M. R.; LAIT, L. R.; NEWMAN, P. A.; ROSENFELD, J. E. The structure of the polar vortex. **Journal of Geophysics 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. Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history. **Reviews of Geophysics**, v.37, n.3, p.275-316, 1999.

TANG, Q.; PRATHER, M. J. Correlating tropospheric column ozone with tropopause folds: the Aura-OMI satellite data. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.10, p.14875-14896, 2010.

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

TOMASONI, M. A.; TOMASONI, K. R. Atmosfera em transformação: o ozônio e os CFCs, certezas e incertezas. <<http://www.geoambiente.ufba.br>>. Acesso em: 31 de mar. 2013.

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 jet stream. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v.11, p.9343–9366, 2011.

WAKAMATSU, S., UNO, I., VEDA, H., UEHARA, K., and TATEISHH, 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, Genebra, 1992.

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

WMO/ UNEP - Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Genebra, 2010.