



Monografia

EFEITOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE A REGIÃO SUL DO BRASIL

Trabalho de Graduação em Física

Caitano Luiz da Silva

Santa Maria, dezembro de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO

**EFEITOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO
ANTÁRTICO SOBRE A REGIÃO SUL DO BRASIL**

Trabalho desenvolvido por Caitano Luiz da Silva no Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, sob a orientação da Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro, professora do Departamento de Engenharia Química e Diretora do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM. Apresentado à Disciplina Trabalho de Graduação em Física II – FSC 1048, do Curso de Física Bacharelado, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Física**.

Caitano Luiz da Silva

(Curso de Física Bacharelado – UFSM)

Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro

(Orientadora – Departamento de Eng. Química – UFSM)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
CURSO DE FÍSICA BACHARELADO

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**EFEITOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO
ANTÁRTICO SOBRE A REGIÃO SUL DO BRASIL**

elaborada por
Caitano Luiz da Silva

como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro
(Presidente/Orientadora – UFSM)

Dr. Celso Arami Marques da Silva
(UFSM)

Dr. Nelson Jorge Schuch
(INPE)

Dr. Gervásio Annes Degrazia
(Suplente – UFSM)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e namorada pelo apoio, compreensão e paciência. Em especial por acreditarem sempre em mim, até quando eu não acreditei.

A Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro pela orientação, compreensão e atenção dedicada.

Ao Dr. Nelson Schuch pelas oportunidades oferecidas e pelas orientações de caráter geral.

Ao Dr. Celso Arami Marques da Silva pelos conselhos.

A Dr^a. Fernanda de São Sabbas Tavares pelas oportunidades oferecidas e pelo apoio e compreensão.

A grande parte dos meus professores do Curso de Física, pelo conhecimento transmitido.

Aos colegas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT, pelo apoio nos momentos de necessidade.

Aos meus colegas do Curso de Física, simplesmente pelo companheirismo.

Aos colegas de apartamento, pela tolerância, amizade e gargalhadas.

RESUMO

O buraco de ozônio antártico é definido como a região onde os valores da coluna total de ozônio não excedem 220 DU. Devido a existência do vórtice polar, essa massa de ar pobre em ozônio fica restrita a altas latitudes. Porém, algumas massas de ar podem se desprender, sendo transportadas a regiões de baixas latitudes. Dados do instrumento TOMS, e posteriormente do OMI, mostram esta migração. Trabalhos anteriores comprovam que a região sul do Brasil está sujeita a reduções de ozônio nos meses de agosto a novembro, onde a coluna total de ozônio deveria encontrar-se em seu máximo sazonal. A estas reduções chamou-se de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico. O trabalho apresenta uma análise de vinte anos dos dados dos espectrofotômetros TOMS e OMI, para os meses de setembro e outubro de 1987 a 2007. Foram selecionados os 36 eventos com menor concentração de ozônio na atmosfera neste período do ano sujeito a efeitos secundários. Para cada um desses eventos foi aplicada uma metodologia constituída de três etapas: (1) análise da coluna total de ozônio obtida por imagens de satélite, (2) geração de trajetórias retroativas de massas de ar através do modelo HYSPLIT da NOAA e (3) análise de mapas de vorticidade potencial. Dos 36 eventos analisados, foram encontrados 16 eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico, 3 nos meses de setembro e 13 nos meses de outubro.

ABSTRACT

The antarctic ozone hole is defined as the area where the ozone total column is less than 220 DU. Due to the polar vortex, the ozone poor air masses are restricted to high latitudes. However, some air masses can reach lower latitudes. Data from TOMS and OMI spectrophotometers show this fact. There are some works that indicate these ozone reductions from August to November, where it is expected a seasonal maximum. This reductions received the name: secondary effects of the antarctic ozone hole. This work shows a 20-years analysis of the TOMS and OMI spectrophotometers data, to September and October of each year, from 1987 to 2007. It was chosen the 36 events with less ozone total column in this period of the year, which could presented secondary effects. For each event, it was applied a three-part methodology: (1) ozone total column analysis with satellite data, (2) backward air masses trajectories generation with HYSPLIT model from NOAA and (3) potential vorticity maps analysis. From the 36 days with ozone minima, there were found 16 events of secondary effects, 3 in Septembers and 13 in Octobers.

Sumário

1	Introdução	10
2	Objetivos	12
3	Conceitos pertinentes	14
3.1	Ozônio atmosférico	14
3.1.1	A atmosfera terrestre	14
3.1.2	Ozônio estratosférico	16
3.1.3	O buraco de ozônio antártico	18
3.1.4	Efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil	24
3.2	Dinâmica da estratosfera	25
3.2.1	Temperatura Potencial	25
3.2.2	Vorticidade	26
3.2.3	Vorticidade Potencial	27
4	Metodologia	29
5	Resultados	32
6	Conclusões	37
7	Bibliografia	39
A	Rotina para gerar mapas de PV	42
B	Imagens dos eventos de mínimo	46

Lista de Figuras

3.1	Classificação da atmosfera segundo o perfil de temperatura.	15
3.2	Perfil vertical de ozônio e absorção de radiação ultravioleta.	16
3.3	Comparação entre o perfil vertical de ozônio calculado via o mecanismo de Chapman e o observado.	17
3.4	Variação anual de ozônio em todo o planeta.	19
3.5	Imagem ilustrando a evolução do buraco de ozônio antártico.	20
3.6	Medidas da coluna total de ozônio, na estação de <i>Halley Bay</i> , para anos anteriores e posteriores a detecção do buraco.	21
3.7	Diagrama representando a circulação Brewer-Dobson.	21
3.8	(a) Variação anual da área do buraco de ozônio antártico. (b) Variação anual do mínimo de concentração de ozônio sobre a Antártida.	23
3.9	Imagem ilustrando a entrada de massas de ar antárticas na região sul do Brasil.	24
3.10	Seção transversal das superfícies de temperatura potencial e temperatura constantes.	26
4.1	Distribuição normal salientando a aplicação do filtro $\mu - 1,5\sigma$	30
B.1	Evento do dia 06 de setembro de 1990.	47
B.2	Evento dos dias 16-17 de setembro de 1990.	48
B.3	Evento do dia 21 de setembro de 1990.	49
B.4	Evento dos dias 20-24 de setembro de 1992.	50
B.5	Evento dos dias 19-20 de setembro de 1996.	51
B.6	Evento dos dias 12-14 de setembro de 1997.	52
B.7	Evento dos dias 28-30 de setembro de 1997.	53
B.8	Evento do dia 02 de setembro de 1999.	54

B.9	Evento do dia 03 de setembro de 2001.	55
B.10	Evento dos dias 09-10 de setembro de 2002.	56
B.11	Evento do dia 06 de setembro de 2004.	57
B.12	Evento do dia 29 de setembro de 2005.	58
B.13	Evento dos dias 10-12 de setembro de 2006.	59
B.14	Evento do dia 19 de setembro de 2006.	60
B.15	Evento dos dias 07-11 de outubro de 1990.	61
B.16	Evento do dia 31 de outubro de 1990.	62
B.17	Evento dos dias 24-26 de outubro de 1992.	63
B.18	Evento do dia 30 de outubro de 1992.	64
B.19	Evento dos dias 30-31 de outubro de 1993.	65
B.20	Evento do dia 30-31 de outubro de 1997.	66
B.21	Evento dos dias 13-16 de outubro de 1997.	67
B.22	Evento do dia 29 de outubro de 1997.	68
B.23	Evento do dia 24 de outubro de 1998.	69
B.24	Evento do dia 15 de outubro de 1999.	70
B.25	Evento do dia 26 de outubro de 2000.	71
B.26	Evento do dia 28 de outubro de 2001.	72
B.27	Evento do dia 20 de outubro de 2002.	73
B.28	Evento do dia 16 de outubro de 2003.	74
B.29	Evento do dia 25 de outubro de 2003.	75
B.30	Evento dos dias 16-17 de outubro de 2004.	76
B.31	Evento do dia 30 de outubro de 2004.	77
B.32	Evento do dia 12 de outubro de 2005.	78
B.33	Evento do dia 07 de outubro de 2006.	79
B.34	Evento dos dias 14-15 de outubro de 2006.	80
B.35	Evento dos dias 27-29 de outubro de 2006.	81
B.36	Evento do dia 07 de outubro de 2007.	82

Lista de Tabelas

5.1	Valor médio para a coluna total de ozônio nos meses de setembro de 1987 a 2007.	33
5.2	Valor médio para a coluna total de ozônio nos meses de outubro de 1987 a 2007.	33
5.3	Eventos de mínimos para a coluna total de ozônio, nos meses de setembro de 1987 a 2007	34
5.4	Eventos de mínimos para a coluna total de ozônio, nos meses de outubro de 1987 a 2007.	35

Capítulo 1

Introdução

A incidência de radiação ultravioleta (UV) é alta no Brasil, que é um país tropical. O ozônio (O_3) é um dos principais responsáveis pela atenuação da radiação UV emitida pelo Sol, por isso valores baixos de sua concentração são alarmantes para a sociedade. Aproximadamente 90 % de todo o ozônio atmosférico situa-se em uma faixa entre 15 e 35 km de altitude, esta região recebe o nome de **camada de ozônio**.

O aumento de incidência de radiação UV, em regiões polares, vem ocorrendo em épocas onde se espera que a camada de ozônio esteja em seu máximo sazonal, nos meses de agosto, setembro, outubro e início de novembro. Nesta época ocorre no Pólo Sul um fenômeno conhecido como **buraco de ozônio antártico**.

O buraco de ozônio antártico tem sua área geográfica caracterizada por valores da coluna total de ozônio menores que 220 DU (*Solomon, 1999*). Devido a existência de um vórtice na Antártida, essa massa de ar pobre em ozônio fica restrita a altas latitudes. Devido a forte dinâmica atmosférica na região polar na primavera, massas de ar podem se desprender do buraco de ozônio antártico, fazendo com que um “braço” do buraco possa atingir regiões tropicais. Dados do instrumento TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) e do OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) a bordo de satélites da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) fundamentam tais hipóteses.

Trabalhos anteriores, como *Kirchhoff et al. (1996)*, mostram a correlação entre o buraco de ozônio antártico e os fenômenos de queda de ozônio em médias latitudes. A estas reduções chamou-se de **efeitos secundários do buraco de ozônio antártico**.

O conteúdo integrado de ozônio atmosférico apresenta intensa variabilidade temporal, com variações associadas a fenômenos como a QBO (*Quasi-Biennial Oscillation*) e a ENSO (*El Niño/Southern Oscillation*) (*Dhomse et al., 2006*). Porém a excessiva emissão antropogênica de gases destruidores de ozônio nas últimas décadas, como os clorofluorcarbonetos (CFCs) e alguns gases do efeito estufa, está levando a uma constante redução da concentração de ozônio, por isso é de extrema importância científica caracterizar os eventos associados ao buraco de ozônio antártico, pois tais eventos possuem impacto direto

na sociedade.

O presente trabalho, que visa identificar e caracterizar os efeitos secundários do buraco de ozônio antártico, foi desenvolvido no Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT. O laboratório é parte integrante do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico – PMOA, que é fruto do convênio INPE – UFSM, através do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais e do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.

Capítulo 2

Objetivos

O presente trabalho visa a identificação e caracterização de alguns efeitos secundários do buraco de ozônio antártico para a região sul do Brasil. A identificação dos eventos é obtida de uma análise apurada de dados dos espectrofotômetros TOMS e do OMI, abordo de satélites da NASA. A caracterização é realizada através de duas ferramentas: **mapas de vortacidade potencial** e **mapas de trajetórias retroativas de massas de ar**, além da análise das imagens geradas com os dados de satélite.

São escolhidos dias com valores da coluna total de ozônio inferiores a um certo valor de filtro pré-definido e são gerados mapas de vortacidade potencial. Isto é realizado por intermédio do programa GrADS (*Grid Analysis and Display System*) com dados da NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*), disponíveis em meio eletrônico.

Para tais dias são geradas as trajetórias retroativas das massas de ar, isto é, com o auxílio do modelo HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), que é implementado pelo programa READY (*Real-time Environmental Applications and Display sYstem*), desenvolvido pelo *Air Resources Laboratory – ARL* do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), é identificada a origem das massas de ar com altitude correspondente à altitude da camada de ozônio na região de estudo.

O foco do trabalho de graduação é implementar e consolidar uma metodologia de identificação e caracterização dos efeitos secundários do buraco de ozônio antártico. O ponto principal em questão é que a metodologia proposta pode ser aplicada de qualquer lugar do mundo por qualquer pesquisador com acesso à internet. A metodologia baseia-se em uma análise apurada dos dados obtidos por satélites da NASA que estão disponíveis em meio eletrônico, portanto é independente de dados obtidos em solo, não sendo necessário possuir equipamentos de coleta de dados.

É importante frisar que dados obtidos por equipamentos em solo, como o espectrofotômetro Brewer, por exemplo, são consideravelmente mais precisos que os dados de satélite. Porém, como os dados de ozônio serão utilizados apenas para a identificação dos

prováveis eventos, não há perda de informação alguma na escolha deste tipo de dado. Por outro lado, para análises mais apuradas, como o estudo da variabilidade do conteúdo de ozônio, por exemplo, dados de equipamentos em solo são indispensáveis. Outro aspecto importante é que a calibração dos instrumentos de medida nos satélites é feita a partir de dados das estações de coleta em solo.

Capítulo 3

Conceitos pertinentes

3.1 Ozônio atmosférico

O ozônio é um gás traço com razão de mistura da ordem 30 ppb¹ que na troposfera aparece como um importante poluente. Porém na estratosfera ele desempenha papel fundamental.

3.1.1 A atmosfera terrestre

A análise da complicada estrutura vertical da atmosfera pode ser facilitada através da divisão da mesma em camadas. Na literatura têm-se diversas divisões propostas. Tais divisões tem por base os aspectos físicos e químicos que caracterizam a atmosfera, isto é, divisão segundo o perfil de temperatura, composição, escape gasoso e perfil de densidade eletrônica.

A divisão mais utilizada é a que diz respeito ao gradiente de temperatura². Nesta divisão uma determinada camada se estende enquanto não há uma inversão no gradiente de temperatura e as interfaces entre camadas são, portanto, os extremos do perfil, como pode ser visto na Figura 3.1. Na Figura 3.1 observa-se as quatro camadas **troposfera**, **estratosfera**, **mesosfera** e **termosfera**. Cada camada recebe o sufixo “sfera”, pois em um modelo bem prático considera-se as camadas atmosféricas como esferas concêntricas, já as interfaces são nomeadas com o nome da camada adjacente seguida do sufixo “pausa” e são caracterizadas por valores nulos para o gradiente de temperatura.

A **troposfera** é a camada inferior, nela a temperatura decresce com a altitude a uma taxa de aproximadamente 7 K/km, partindo de uma temperatura superficial de cerca de 290 K e reduzindo até cerca de 220 K na base da estratosfera (*Wrasse*, 2000). A troposfera estende-se até a tropopausa, a uma altitude de cerca de 15 a 18 km no equador e 6 a 8 km

¹Partes por bilhão (em volume), ppb (ou ppbv).

²Aqui será apresentado apenas a divisão segundo o perfil de temperatura.

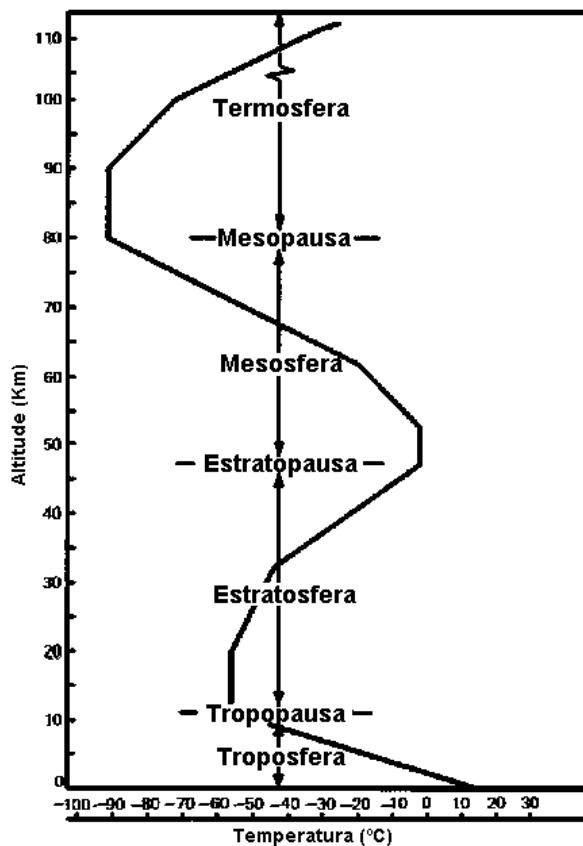


Figura 3.1: Classificação da atmosfera segundo o perfil de temperatura.

Fonte: adaptado de <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>>.

nos pólos, sendo que este valor varia ainda sazonalmente (*Seinfeld e Pandis, 1998*).

A troposfera é de extrema relevância do ponto de vista meteorológico, pois é nela que ocorrem fenômenos como a precipitação, grande parte das nuvens e relâmpagos. Nesta camada existe tanto transporte radiativo quanto convectivo de energia, sendo que esta representa 80 % da massa total da atmosfera.

A **estratosfera** inicia na tropopausa e estende-se até cerca de 50 km, nesta região a temperatura aumenta com a altitude devido, principalmente, a absorção de radiação ultravioleta pela molécula de ozônio e pelo vapor d'água. É na estratosfera que encontra-se o pico de concentração de ozônio atmosférico, e portanto, é onde localiza-se a camada de ozônio (*Seinfeld e Pandis, 1998*). No topo da estratosfera tem-se a estratopausa, onde situa-se um máximo local no perfil de temperatura, com valores da ordem de 270 K.

Na região seguinte, a **mesosfera**, a temperatura volta a decrescer com a altitude. Esta camada está situada entre 50 e 90 km, aproximadamente, e é limitada superiormente pela mesopausa, onde ocorre outra inflexão no perfil de temperatura. A mesopausa é caracterizada pelo mínimo global de temperatura, da ordem de 190 K (*Wrasse, 2000*).

No topo da atmosfera, tem-se a **termosfera**. Nesta camada a temperatura cresce indefinidamente com a altitude até um valor assintótico, chamado temperatura exosférica

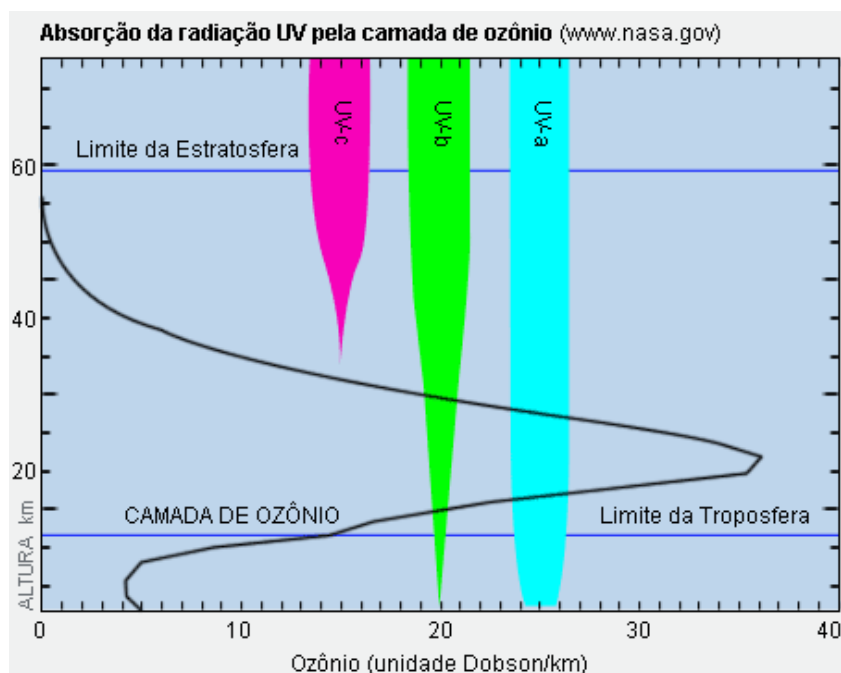


Figura 3.2: Perfil vertical de ozônio e absorção de radiação ultravioleta.

Fonte: <<http://static.hsw.com.br/gif/ozonio-2.gif>>.

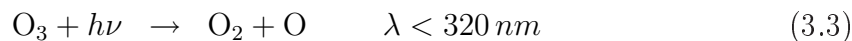
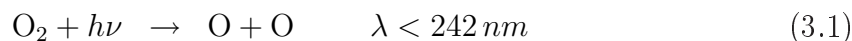
(Kirchhoff, 1991). O perfil de temperatura tem esta forma nesta região devido a absorção de fótons altamente energéticos por átomos de nitrogênio e oxigênio. É interessante frisar que a definição termodinâmica de temperatura não se aplica a essa região, pois apesar das partículas terem altas velocidades, o meio é pouco denso e as colisões entre as partículas são raras, ocorrendo portanto, pouca transferência de energia³ (Grimm, 1999).

3.1.2 Ozônio estratosférico

Na estratosfera, tem-se que a temperatura cresce com a altitude, devido a absorção de radiação solar pela molécula de ozônio (O_3), o mais importante gás traço da estratosfera. Na Figura 3.2 pode-se ver o perfil vertical de ozônio, a região entre aproximadamente 15 e 35 km é denominada camada de ozônio e retém cerca de 90 % do ozônio atmosférico (Seinfeld e Pandis, 1998). A Figura 3.2 reflete a importância da camada como atenuadora da radiação ultravioleta emitida pelo Sol. Note que a radiação UV-A e a UV-B são parcialmente atenuadas, enquanto a radiação UV-C, nociva, é completamente absorvida na estratosfera.

A criação e destruição de ozônio na estratosfera são descritas, em primeira aproximação, pelo **mecanismo de Chapman** (Seinfeld e Pandis, 1998):

³Como o gás não está em equilíbrio termodinâmico, a temperatura pode ser definida, via mecânica estatística, em termos das velocidades médias das partículas constituintes de um gás.



A formação de ozônio ocorre acima de cerca de 30 km de altitude, onde a radiação ultravioleta solar fotolisa o oxigênio molecular (O_2), reação (3.1). Em milésimos de segundo (em média) o oxigênio atômico (O) reage com o oxigênio molecular, na presença de um terceiro corpo (M), para formar ozônio, a reação (3.2) é a única reação de formação de ozônio em praticamente toda a atmosfera. Posteriormente, o ozônio é destruído, ou por fotodissociação (reação (3.3)), ou por reação com o oxigênio atômico (reação (3.4)).

O mecanismo de Chapman superestima os valores de ozônio, o que indica que outros mecanismos de destruição devem ser adicionados ao modelo. A Figura 3.3 mostra uma comparação entre o perfil de ozônio calculado via o mecanismo de Chapman e o observado. Para corrigir tal discrepância deve-se adicionar ao mecanismo ciclos catalíticos de destruição do ozônio:

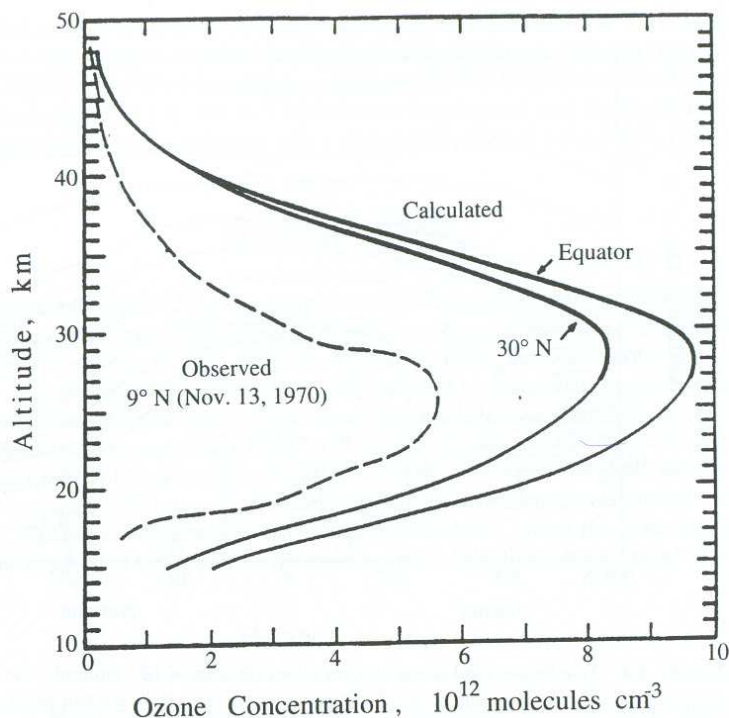
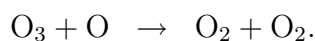
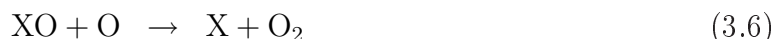


Figura 3.3: Comparação entre o perfil vertical de ozônio calculado via o mecanismo de Chapman e o observado. Fonte: *Seinfeld e Pandis*, 1998, p. 171.



O ciclo catalítico composto pelas reações (3.5) e (3.6) causam o mesmo efeito que a reação (3.4), no sentido em que destroem duas moléculas de oxigênio ímpar para formar duas de oxigênio par. No ciclo anterior, o radical livre catalítico X pode ser: hidrogênio (H), bromo (Br) ou cloro (Cl) atômicos, ou ainda, as moléculas hidroxila (OH) ou óxido de nitrogênio (NO) (*Whitten e Prasad, 1985*).

O conteúdo integrado de ozônio apresenta variabilidade sazonal em todo o planeta. A Figura 3.4 apresenta a distribuição, ao longo dos meses do ano, da coluna total de ozônio em todo o globo. Pode-se observar algumas simetrias entre os hemisférios, como por exemplo, o fato do mínimo ser atingido perto do equinócio de outono e o máximo ocorrer cerca de 6 a 7 meses depois, para ambos hemisférios (*Salgado, 2000*).

Os mecanismos básicos que podem produzir variações na coluna de ozônio são os movimentos verticais e o transporte de ozônio do Equador aos Pólos, além de processos físico-químicos (*Dobson, 1968*). A maior parte do ozônio atmosférico é produzido na região equatorial, devido a maior quantidade de radiação solar (*Salby, 1996*).

Além da variabilidade ao longo do ano, o conteúdo de ozônio apresenta padrões de variação decadal, devido a mudanças: no fluxo solar, na concentração atmosférica de substâncias destruidoras de ozônio e ao transporte (*Dhomse et al., 2006*). *Shiotani* (1996), utilizando dados do TOMS, encontrou periodicidades da forma anual e quase bianual para a região equatorial. Esses padrões na variabilidade do ozônio são reflexos de diversos fenômenos físicos e químicos, como: a QBO (*Quasi-Biennial Oscillation*), a ENSO (*El Niño/ Southern Oscillation*), as ondas planetárias, a química heterogênea, a variabilidade solar, etc. (*Dhomse et al., 2006*).

3.1.3 O buraco de ozônio antártico

Em 1985, Farman e colaboradores (*Farman et al., 1985*) chocaram a comunidade científica com o relato da massiva destruição natural do ozônio estratosférico sobre a Antártica ocorrido na primavera polar (ver Figura 3.5). Tal observação era inexplicável através da química em fase gasosa associada aos ciclos dos compostos de cloro (ClO_x) e de nitrogênio (NO_x). Esse fenômeno foi denominado pela imprensa de “buraco de ozônio antártico”. A partir disso, sua área geográfica foi definida como a região na qual a concentração de ozônio não ultrapassa 220 DU. A Figura 3.6 mostra medidas da coluna total de ozônio na

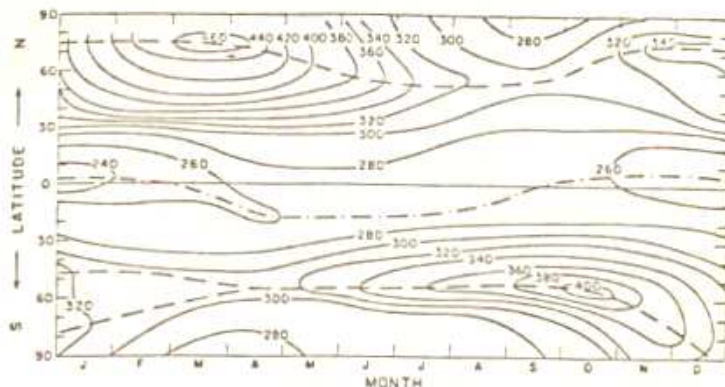


Figura 3.4: Variação anual de ozônio em todo o planeta. Médias de todos os anos de 1958 a 1980. Linhas na forma de traço mostram os valores de máximo e linhas na forma de ponto-traço mostram valores de mínimo, na concentração de ozônio. Fonte: *Whitten e Prasad*, 1985, p. 39.

estação de *Halley Bay*, na Antártida, onde se pode ver o valor da coluna total de ozônio para dois anos antes (1976/1977 e 1977/1978) da detecção do buraco de ozônio, e para dois anos após (1987/1988 e 1996/1997) a detecção do fenômeno.

A espessura da coluna de ozônio é medida, tipicamente, em DU (*Dobson Unit*). Uma Unidade Dobson⁴ indica que se todo o ozônio atmosférico fosse comprimido, em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), a camada resultante teria 10 μm de espessura, com $2,69 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$. Um valor comum para a coluna total de ozônio é 300 DU, isto significa que se pudesse comprimir até a superfície todo o ozônio atmosférico a 0° C e pressão de uma atmosfera, a camada resultante teria 3 mm de espessura.

A Figura 3.5 apresenta nos painéis (a) a (f) a evolução anual do buraco de ozônio antártico. As imagens foram obtidas no site do TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), para 7 de outubro dos anos de 2000 a 2005.

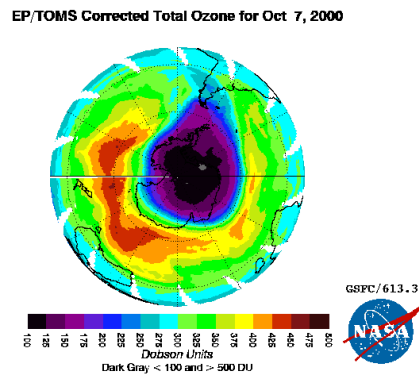
A Antártida possui uma das mais altas concentrações de ozônio no planeta, pois boa parte do ozônio produzido nos trópicos é transportado para os pólos pela circulação Brewer-Dobson (ver Figura 3.7). Por outro lado, a Antártida é deficiente em oxigênio atômico, pois não há radiação ultravioleta o suficiente para ocorrer a fotólise (*Seinfeld e Pandis*, 1998).

A depleção de ozônio no Pólo Sul ocorre por intermédio de dois fatores: a formação das **nuvens estratosféricas polares** e a volta da incidência de **radiação solar** na primavera.

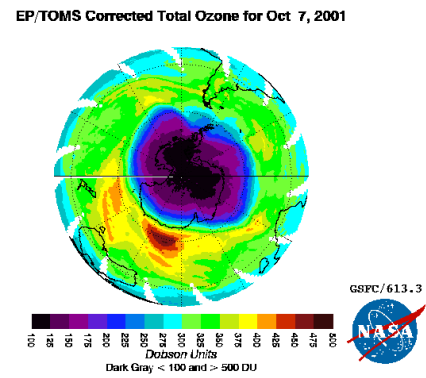
Susan Solomon e colaboradores propuseram um modelo para explicar a depleção do ozônio na Antártida baseada na química heterogênea do cloro (*Solomon*, 1999). O cloro,

⁴Geralmente em textos em língua portuguesa utiliza-se UD, porém aqui será seguido o padrão internacional DU, do inglês.

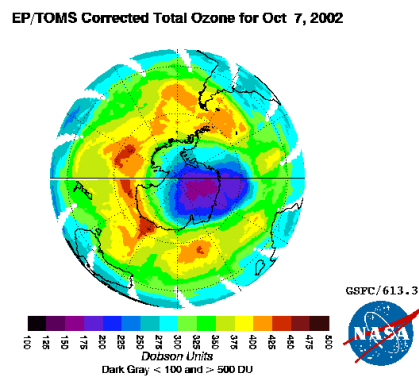
(a) 2000



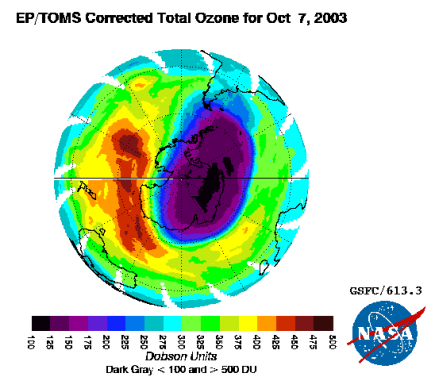
(b) 2001



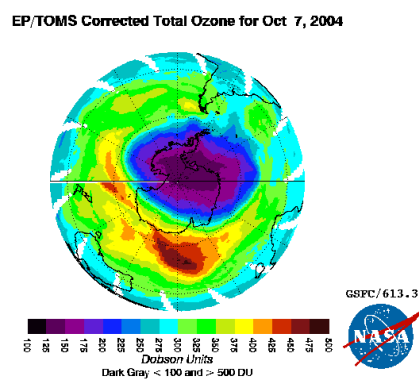
(c) 2002



(d) 2003



(e) 2004



(f) 2005

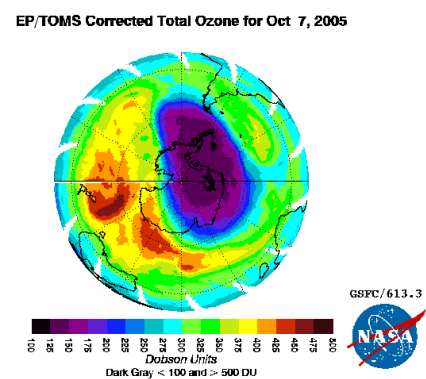


Figura 3.5: Imagem ilustrando a evolução do buraco de ozônio antártico. Imagem obtida no site do TOMS/NASA para o dia 7 de outubro de diversos anos, durante a primavera austral.

Fonte: <<http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/ep.html>>.

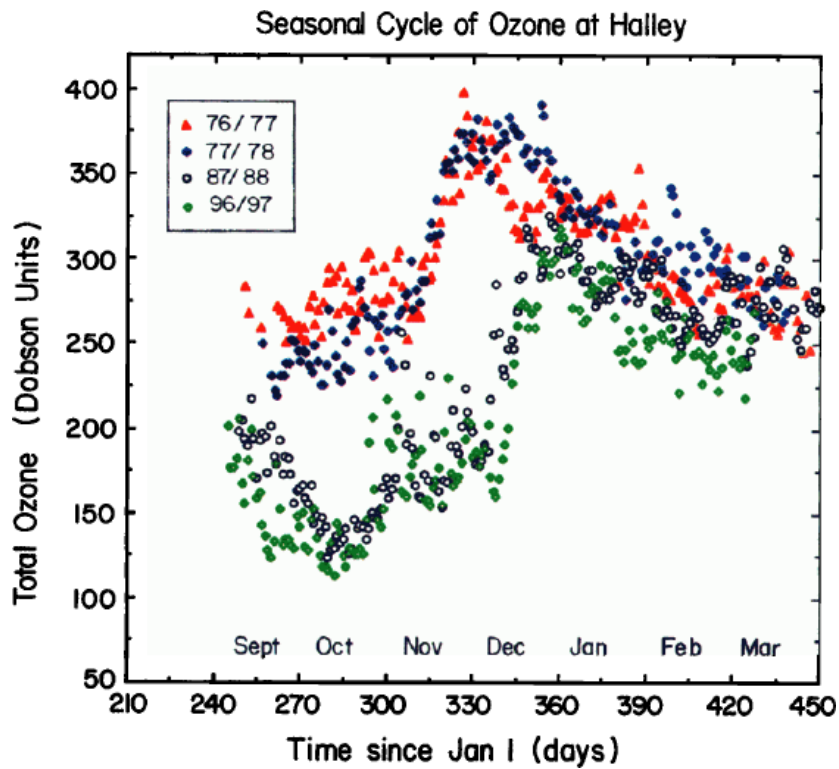


Figura 3.6: Medidas da coluna total de ozônio, na estação de *Halley Bay*, para anos anteriores e posteriores a detecção do buraco de ozônio antártico. Fonte: *Solomon*, 1999.

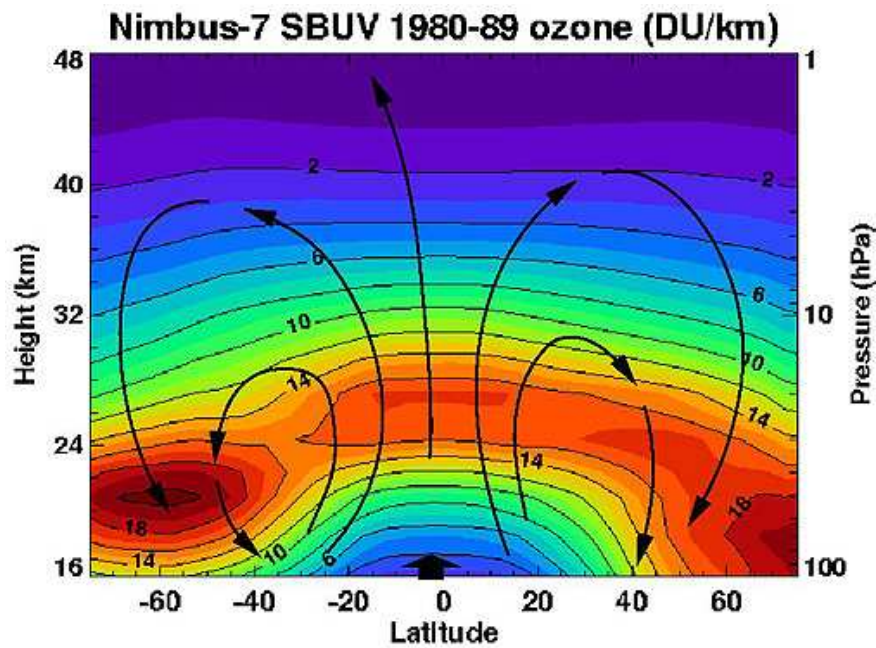
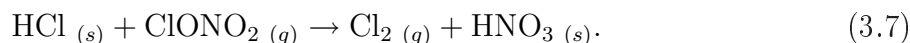


Figura 3.7: Diagrama representando a circulação Brewer-Dobson.
Fonte: <http://www.cpo.odu.edu/SEES/ozone/class/Chap_6/6_Js/6-03.jpg>.

oriundo de emissões antropogênicas de CFCs, é armazenado na superfície das nuvens estratosféricas polares⁵ – NEPs. Geralmente não se formam nuvens na estratosfera, porém devido as **baixas temperaturas** (cerca de 183 K) do Pólo Sul, a pouca água existente entre 15 e 20 km é condensada para formar as NEPs.

A principal reação de ativação de cloro na estratosfera polar inicia-se com a absorção de HCl gasoso pelas NEPs, que em seguida reagem com o composto reservatório ClONO₂ na fase gasosa, pela reação heterogênea a seguir:



A reação libera o Cl₂ que com a volta da incidência de radiação solar na primavera austral libera os átomos de Cl por fotólise, destruindo o ozônio, através das reações catalíticas (3.5) e (3.6).

Durante o inverno antártico, o ar frio desce e desenvolve uma circulação para leste, formando assim o vórtice polar. Este vórtice “aprisiona” o ar polar restringindo os efeitos do buraco de ozônio a altas latitudes. Durante o inverno e o início da primavera o vórtice é extremamente estável⁶, durante a primavera o vórtice enfraquece, eventualmente quebrando em novembro.

Um fenômeno semelhante ao buraco de ozônio antártico ocorre no Pólo Norte, porém em escala substancialmente menor devido à maior temperatura no Ártico. Mais detalhes sobre a química polar da Antártida e do Ártico podem ser encontrados em *Solomon* (1999).

Medidas realizadas na Antártida revelam o crescente aumento da área de abrangência do fenômeno, como mostrado na Figura 3.8, no item (a). Ano após ano a concentração de ozônio atinge mínimos cada vez mais extremos, como mostrado no item (b) da Figura 3.8.

Os principais compostos destruidores de ozônio são os halocarbonos, sendo que destes os clorofluorcarbonos (CFCs) são os mais nocivos. A principal fonte de emissão destes compostos é antropogênica. Um dos mais nocivos é o CFC-11, que já foi utilizado indefinidamente na indústria. Os CFCs eram utilizados, por exemplo, como gases propelentes para *sprays*, presentes em todos os domicílios.

Pensando no crescente acréscimo da utilização destes compostos pela indústria e na recente descoberta do buraco de ozônio antártico, no ano de 1987 foi criado o Protocolo de Montreal. O Protocolo assinado no Canadá objetiva a redução total da emissão de halocarbonos até 2040, sendo a emissão de CFCs reduzida a zero até 2012.

⁵Polar stratospheric clouds – PSCs.

⁶Bem mais estável que o vórtice polar ártico, devido a simetria da distribuição dos oceanos em volta da Antártida.

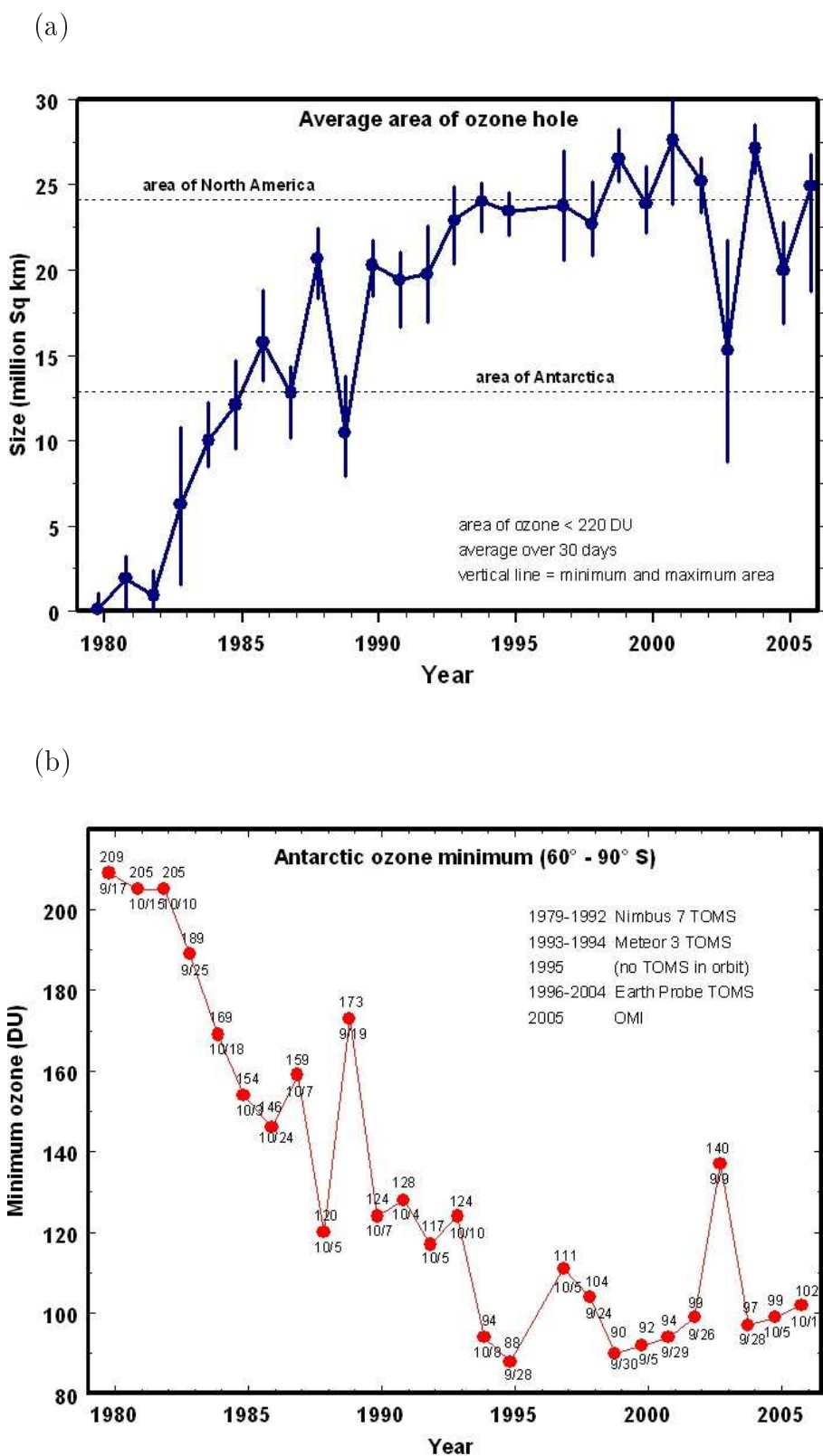
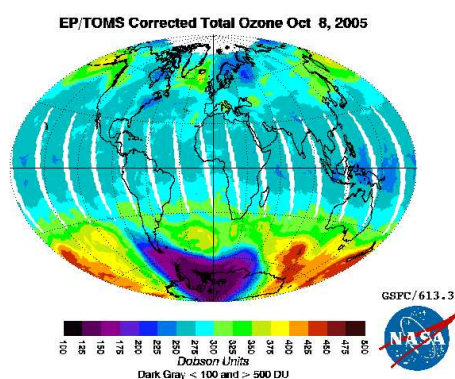


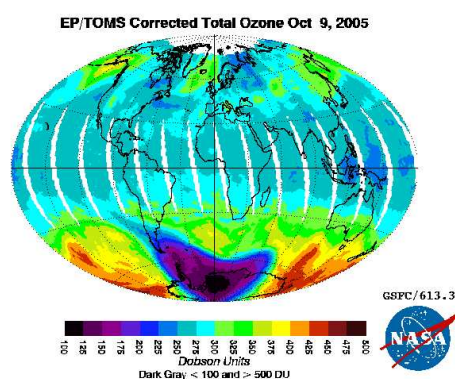
Figura 3.8: (a) Variação anual da área do buraco de ozônio antártico. (b) Variação anual do mínimo de concentração de ozônio sobre a Antártida.

Fonte: NASA, 2006.

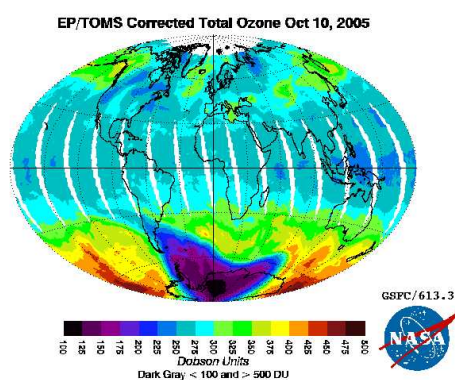
(a) 8



(b) 9



(c) 10



(d) 11

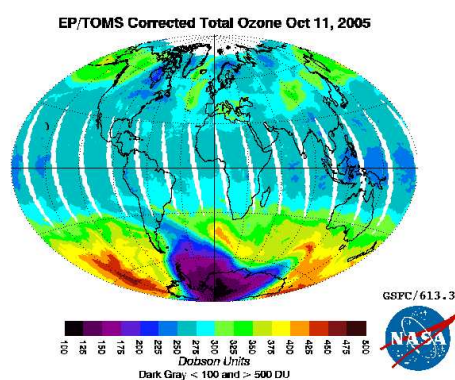


Figura 3.9: Imagem ilustrando a entrada de massas de ar antárticas na região sul do Brasil. Imagem obtida no site do TOMS/NASA para os dias 8, 9, 10 e 11 de outubro 2005.

Fonte: <<http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/ep.html>>.

3.1.4 Efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil

Apesar do vórtice polar ser extremamente estável, com a chegada da primavera e o aumento das temperaturas ele enfraquece, liberando massas de ar. Esporadicamente um de seus “braços” pode atingir médias latitudes, povoando a estratosfera local com ar pobre em ozônio. Cálculos de *Prather e Jaffe* (1990) indicam que massas de ar Antártico podem permanecer isoladas por um período de 7 a 20 dias depois da separação do vórtice, período que pode ser suficiente para propagação para baixas e médias latitudes.

A Figura 3.9 mostra nos painéis de (a) a (d) uma sequência de imagens obtidas através de medidas do satélite TOMS, para os dias 8, 9, 10 e 11 de outubro de 2005. Na Figura pode-se ver no dia 8 a massa de ar aproximando-se da região do Rio Grande do Sul, através do Uruguai, lembrando que o vórtice move-se no sentido horário. Nos dias 9 e 10 pode-se ver a massa de ar sobre a região, a escala de cor da Figura indica um valor de aproximadamente 250 DU. Finalmente, no dia 11 a camada se recupera sobre a região.

As passagens de massas de ar, originárias do buraco, sobre médias latitudes foram primeiramente observadas em um trabalho pioneiro desenvolvido em uma colaboração entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e a Universidade Federal de Santa Maria. O grupo constituído por: Dr. Nelson Jorge Shuch, Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro, Dr. Volker W. J. H. Kirchhoff e colaboradores, a partir de dados de dois espectrofotômetros Brewer, instalados em Santa Maria em outubro de 1993, e de sondas lançadas através de balões, mostrou que a redução local de ozônio estava associada a entrada de uma massa de ar de origem polar. Tais eventos foram denominados efeitos secundários do buraco de ozônio antártico. Para maiores informações ver referência: *Kirchhoff et al.* (1996).

3.2 Dinâmica da estratosfera

O transporte de gases traço na estratosfera, em especial do ozônio, ocorre através de superfícies isentrópicas (ou adiabáticas), isto é, as massas de ar realizam movimento sem troca de energia na forma de calor com as camadas adjacentes (ver *Lary et al.*, 1995; *Semane et al.*, 2006). Esta seção apresenta conceitos fundamentais para a descrição do movimento dessas parcelas de ar.

3.2.1 Temperatura Potencial

Para uma parcela de gás sob a ação de um processo adiabático, têm-se que,

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial u} \right)_v du + \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_u dv \equiv 0, \quad (3.8)$$

onde s , u e v são a entropia, a energia interna e o volume molares, respectivamente. Supondo que o gás comporte-se como um gás ideal⁷, satisfazendo as equações de estado $pv = RT$ e $u = c_v T$, obtém-se,

$$\frac{dT}{T} - \left(\frac{R}{c_p} \right) \frac{dp}{p} = 0, \quad (3.9)$$

onde R é a constante universal dos gases, c_p e c_v são a capacidade calorífica molar a pressão e volume constantes do gás, respectivamente. Observe que $c_p - c_v = R$. Na equação, T é a temperatura e p a pressão. Integrando a equação diferencial acima com a temperatura variando de um valor T arbitrário até um valor θ e a pressão variando de um valor arbitrário p (associado a T) até um valor p_s (*standard pressure*), obtém-se:

⁷Boa aproximação para a atmosfera, a qual situa-se no limite de baixas pressões.

$$\theta = T \left(\frac{p_s}{p} \right)^{R/c_p}. \quad (3.10)$$

A grandeza θ é chamada **temperatura potencial** e conserva-se para movimentos adiabáticos. A temperatura potencial é uma variável muito prática, pois permite “rotular” verticalmente as parcelas de ar, ou seja, quando o movimento de uma parcela de ar é analisado através de coordenadas isentrópicas, este pode ser descrito por apenas duas coordenadas (*Holton, 2004*). A Figura 3.10 apresenta uma seção latitude-altura mostrando valores médios para diversas superfícies de temperatura potencial constante.

3.2.2 Vorticidade

De um modo geral, a vorticidade é uma grandeza que indica o grau de rotação de um fluido. Matematicamente, a vorticidade é um campo vetorial definido como o rotacional da velocidade, isto é,

$$\vec{V} \equiv \vec{\nabla} \times \vec{U}, \quad (3.11)$$

onde $\vec{U} = (u, v, w)$ é o campo de velocidades e \vec{V} a vorticidade. O mesmo vale para a vorticidade absoluta $\vec{V}\vec{A}$,

$$\vec{V}\vec{A} \equiv \vec{\nabla} \times \vec{U}_a, \quad (3.12)$$

onde \vec{U}_a é a velocidade absoluta.

O módulo da componente vertical da vorticidade é um importante traçador dinâmico, pois carrega informações sobre o comportamento das coordenadas horizontais da veloci-

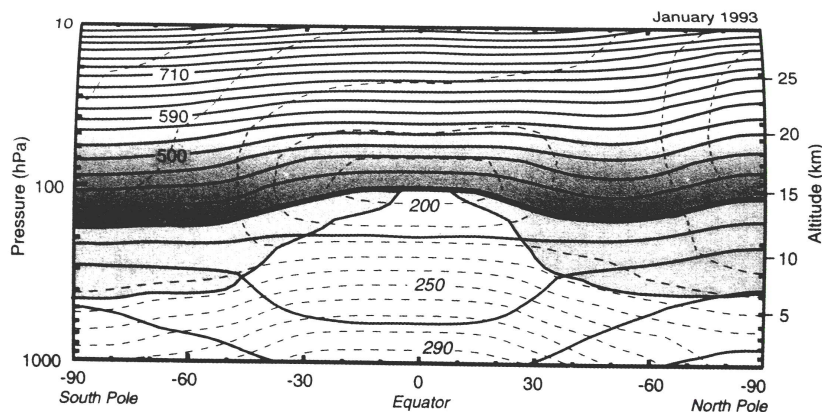


Figura 3.10: Seção transversal das superfícies de temperatura potencial (linhas sólidas) e temperatura (linhas pontilhadas) constantes. A linha mais grossa ($\theta = 380$ K) coincide com a tropopausa. Fonte: *Holton, 2004*, p. 441.

dade. A componente vertical da vorticidade relativa (ζ) e da vorticidade absoluta (η) são definidas, respectivamente como,

$$\zeta \equiv \hat{\mathbf{k}} \bullet (\vec{\nabla} \times \vec{U}) \quad (3.13)$$

e

$$\eta \equiv \hat{\mathbf{k}} \bullet (\vec{\nabla} \times \vec{U}_a), \quad (3.14)$$

onde $\zeta = |\vec{\zeta}|$ e $\eta = |\vec{\eta}|$.

A diferença entre η e ζ está associada a componente vertical da vorticidade planetária (f),

$$f \equiv \hat{\mathbf{k}} \bullet (\vec{\nabla} \times \vec{U}_e), \quad (3.15)$$

de modo que,

$$\eta = \zeta + f. \quad (3.16)$$

A grandeza f é chamada parâmetro de coriolis e é definida como,

$$f = 2\Omega \sin\phi, \quad (3.17)$$

onde Ω é a velocidade angular de rotação da Terra e ϕ é o ângulo referente a latitude.

Frequentemente utiliza-se o termo vorticidade para ζ e vorticidade absoluta para η (Holton, 2004).

3.2.3 Vorticidade Potencial

A vorticidade potencial (PV) é uma extensão do conceito de vorticidade para superfícies de temperatura potencial constante. Esta grandeza é definida de modo que nas superfícies isentrópicas essa quantidade conserva-se, ou seja, mantém seu valor constante. Matematicamente, tem-se que a vorticidade potencial é definida como o produto entre duas grandezas, uma identificando o grau de rotação do fluido e outra a estratificação das camadas, isto é,

$$\text{PV} \equiv \frac{1}{\rho} \vec{\eta} \bullet \vec{\nabla}\theta, \quad (3.18)$$

onde ρ é a densidade do fluido, $\vec{\nabla}\theta$ é o gradiente de temperatura potencial e $\vec{\eta}$ é a vorticidade absoluta.

A componente vertical do gradiente da temperatura potencial pode ser estimado através de,

$$\hat{\mathbf{k}} \bullet \vec{\nabla}\theta = \frac{\partial\theta}{\partial z} = \frac{\partial\theta}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \frac{\partial\theta}{\partial p}, \quad (3.19)$$

onde g é a aceleração da gravidade. Já a vorticidade absoluta é dada por,

$$\vec{\eta} \equiv (\zeta_\theta + f) \hat{\mathbf{k}}, \quad (3.20)$$

equivalentemente a equação (3.16). O índice em ζ indica que a vorticidade relativa deve ser avaliada para a superfície isentrópica com temperatura potencial θ .

Juntando as expressões (3.19) e (3.20) em (3.18), obtém-se,

$$\text{PV} = (\zeta_\theta + f) \left(-g \frac{\partial\theta}{\partial p} \right). \quad (3.21)$$

O termo no primeiro parênteses é, obviamente, a vorticidade absoluta, enquanto o termo no segundo parênteses é chamado de estabilidade estática. Essa grandeza aparece com frequência na literatura, sob o nome de *Ertel's Potential Vorticity* em homenagem ao meteorologista alemão Hans Ertel. Normalmente a vorticidade potencial é expressada em PVU (*potential vorticity unit*), sendo que $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Holton, 2004).

A partir da equação (3.21) pode-se ver que a grandeza PV pode ser estimada apenas através do conhecimento das componentes horizontais da velocidade (u e v) e de como varia a temperatura potencial. Este fator, somado a propriedade de conservação, torna a PV um importante traçador dinâmico para análise isentrópica (Semane et al., 2006). Existem diversos trabalhos na literatura que utilizam a PV para o estudo da dinâmica de massas de ar, como exemplo, Jing et al. (2005) utilizou a PV para estimar a influência do transporte isentrópico na variação sazonal do ozônio na baixa estratosfera e na troposfera superior subtropical.

Muitas vezes a análise isentrópica é dada em termos da vorticidade potencial absoluta (PVA), onde

$$\text{PVA} \equiv |\text{PV}|. \quad (3.22)$$

A vorticidade potencial é definida de tal modo que ela possui valores positivos no hemisfério norte e valores negativos no hemisfério sul.

Capítulo 4

Metodologia

Para avaliar os efeitos secundários do buraco de ozônio antártico na Região Sul do Brasil, ao longo dos últimos vinte anos, foi escolhida uma amostra dos dados que contém os menores valores para a coluna total de ozônio nos meses de setembro e outubro, de 1987 a 2007. Inicialmente foi escolhido como critério de filtragem dos dados o valor $\mu - 2\sigma$ (a média menos duas vezes o desvio padrão), porém esse filtro não é eficaz, muitos eventos já conhecidos ocorreram em dias cuja média é superior a esse critério (*Bertagnolli, 2008*). Portanto, um novo filtro foi definido. Supondo que o conjunto de dados é distribuído normalmente em torno da média e supondo que ocorram cerca de dois dias de eventos por mês, isto, é $2/30 \sim 6,67\%$, tem-se que o filtro $\mu - 1,5\sigma$ é o mais eficaz para separar uma amostra com os 6,67% menores (Figura 4.1). A média e o desvio padrão foram calculados através das expressões:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1987}^{2007} \sum_{k=1}^{30} [\text{O}_3]_{ijk} \quad (4.1)$$

e

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1987}^{2007} \sum_{k=1}^{30} ([\text{O}_3]_{ijk} - \mu_i)^2}. \quad (4.2)$$

O índice i rotula o mês, isto é, setembro ou outubro, o índice j rotula o ano, variando de 1987 a 2007 e o índice k o dia do mês, variando de 1 a 30 para setembro e de 1 a 31 para outubro. A identificação dos eventos de mínimos de ozônio é realizada a partir da aplicação desse filtro nos dados dos espectrofotômetros TOMS e OMI.

O TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) utiliza a radiação solar retroespalhada (do inglês *solar backscatter radiation*) para estimar a quantidade de ozônio presente na atmosfera terrestre. A NASA disponibiliza os dados em meio eletrônico, sob o endereço http://toms.gsfc.nasa.gov/index_v8.html. O TOMS coletou dados no período de 1978

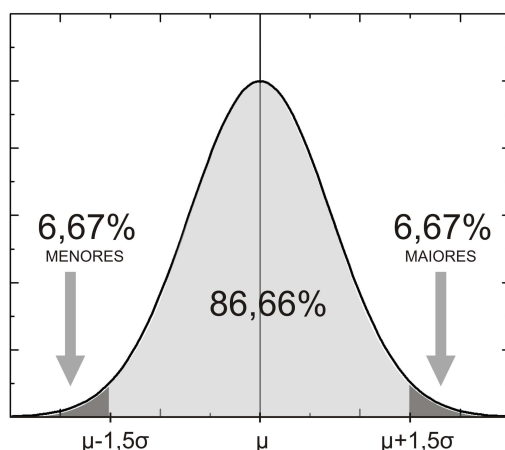


Figura 4.1: Distribuição normal salientando a aplicação do filtro $\mu - 1,5\sigma$.

a 2005, a bordo de três satélites da NASA: *Nimbus 7* (outubro de 1978 a maio de 1993), *Meteor 3* (agosto de 1991 a dezembro de 1994) e *Earth Probe* (julho de 1996 a dezembro de 2005).

Em outubro de 2004, o OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) substituiu o TOMS. Ele opera a bordo do satélite ERS-2. O OMI é uma contribuição da *Netherlands's Agency for Aerospace Programs* (NIVR) em colaboração com o *Finnish Meteorological Institute* (FMI) para a Missão Aura EOS da NASA. O OMI substituiu o TOMS porque este vinha apresentando uma série de problemas nos dados. É interessante ressaltar que os dados do TOMS disponibilizados pela NASA apresentam correções empíricas baseadas nos dados de ozônio do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). É essa versão corrigida (v8) dos dados que foi usada no trabalho.

Para as datas escolhidas, é investigado se o mínimo tem associação com a chegada de massas de ar externas e se a origem dessas massas de ar, pobres em ozônio, é polar. Pois, como mostrado por *Prather e Jaffe* (1990), massas de ar Antártico podem permanecer isoladas por um período de 7 a 20 dias depois que separam-se do vórtice. Para a identificação, são utilizados dois tipos de mapas como ferramentas: **mapas de vorticidade potencial** e **mapas de trajetórias retroativas de massas de ar**, além da análise da coluna total de ozônio via imagens de satélite. Esse tipo de metodologia visa estimar a contribuição do transporte isentrópico para a variabilidade do conteúdo de ozônio. Na literatura há diversos trabalhos sobre transporte isentrópico de ozônio, como: *Semane et al.* (2006), *Jing et al.* (2005), *Lary et al.* (1995), entre outros.

Para gerar os mapas de vorticidade potencial (PV) é utilizado o programa GrADS (*Grid Analysis and Display System*), os parâmetros utilizados são as coordenadas u e v do vento e a temperatura, para diferentes níveis de pressão. Esses parâmetros são obtidos da base de dados da NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*), disponível sob o endereço eletrônico: <<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>>.

O Projeto *Reanalysis* da NCEP/NCAR na Divisão de Ciências Físicas do NOAA/ESRL disponibiliza (entre outras informações) medidas diárias, de parâmetros como as coordenadas do vento, temperatura, umidade relativa, etc., para diferentes níveis de pressão. O Projeto *Reanalysis* é um esforço conjunto da NCEP e da NCAR para fornecer uma plataforma de 40 anos de dados homogêneos, em um formato padrão. Esses dados são recolhidos por instrumentos em: solo, navio, sondas, aviões, satélites, etc., em todo o planeta. Para maiores informações ver *Kalnay et al.*, 1996.

A partir desses dados, são gerados mapas de PV para a superfície isentrópica de 620 K, correspondente a altura da camada de ozônio em médias latitudes, cerca de 24 km (*Semane et al.*, 2006). Os mapas são gerados para cada dia com evento de mínimo, propiciando uma análise qualitativa do aumento ou da redução de vorticidade potencial absoluta (PVA). A rotina que é utilizada para gerar os mapas de PV no GrADS foi implementada por intermédio da adaptação da rotina disponível na Biblioteca Digital de Rotinas do Grads¹, bem como realizado por *Bertagnolli* (2008). A rotina desenvolvida é apresentada no Apêndice A.

Com os mapas de PV pode-se identificar se uma massa de ar é de origem polar ou equatorial. Trabalhos como os de *Hoskins et al.* (1985), *Holton et al.* (1995), *Bencherif et al.* (2003) e *Semane et al.* (2006), usam mapas de PV como ferramenta de diagnóstico para o transporte isentrópico através de barreiras dinâmicas na estratosfera. Tais estudos mostraram que acréscimos na PVA, em escala de dias, indicam entradas de massas de ar de origem polar e que reduções de PVA indicam entrada de massas de ar de origem equatorial.

A simulação das trajetórias retroativas das massas de ar (do inglês, *backward trajectories*) é realizada através do modelo HYSPLIT² (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), desenvolvido pelo *Air Resources Laboratory* do NOAA, o qual fornece a trajetória das massas de ar com diversos dias de antecedência, a partir de informações simples, como a localidade geográfica, data de início, período de integração e níveis de altitude. O modelo possui três opções para descrever o movimento vertical da parcela de ar: modelo cinemático tridimensional, método isobárico e método isentrópico. Neste trabalho será utilizado o transporte isentrópico.

Como mostrado por *Hoskins* (1991) massas de ar podem mover-se ao longo de superfícies isentrópicas em trajetórias quase horizontais. Com uma curta escala de tempo, dias a semanas (*Chen*, 1995) e com ampla escala espacial, variam entre pequena escala, menores que 200 km, e grande escala, de 2000 a 3000 km (*Appenzeller et al.*, 1996).

¹Ver referência: GrADS Script Library.

²Disponível em: <<http://www.arl.noaa.gov/ready/open/traj.html>>.

Capítulo 5

Resultados

Foram analisados os dados dos espectrofotômetros TOMS e OMI, o primeiro de 1987 a 2005 e o segundo em 2006 e 2007, para a região Santa Maria, RS, Brasil (29°S, 53°W) procurando por eventos de mínimo na coluna total de ozônio nos meses de setembro e outubro de cada ano. Foram separados os 6,67% menores valores para a concentração de ozônio atmosférico com o filtro $\mu - 1,5\sigma$. Desse modo foram encontrados 14 eventos de mínimos nos meses de setembro e 22 nos meses de outubro. Foram separados os dados correspondentes aos meses de setembro e outubro do conjunto total de dados disponibilizados pela NASA. Após isto, foram calculados as médias, os desvios padrão e os filtros. O resultado é apresentado na Tabela 5.1 para os meses de setembro e na Tabela 5.2 para os meses de outubro.

Os 14 eventos de mínimos, para os meses de setembro, são listados na Tabela 5.3, enquanto os 22, para os meses de outubro, são listados na Tabela 5.4. Os eventos em destaque são aqueles que a metodologia aplicada indica que são efeitos secundários do buraco de ozônio antártico. A metodologia, como explicitado no capítulo anterior, consiste em três etapas: (1) geração de trajetórias retroativas para as massas de ar (2) análise das imagens geradas com dados dos espectrofotômetros e (3) construção de mapas de vorticidade potencial. O resultado para cada uma dessas etapas está apresentado nas três últimas colunas de cada Tabela.

No Apêndice B é apresentado, em detalhe, o resultado da aplicação de cada um dos 3 procedimentos enunciados em cada um dos 36 eventos de mínimo. Na penúltima coluna das Tabelas 5.3 e 5.4, com o título “Imagens”, vê-se o resultado da análise das imagens que estão no item (a) de cada Figura do Apêndice B.

Tabela 5.1: Valor médio para a coluna total de ozônio (em Unidades Dobson), para Santa Maria, nos meses de **setembro** de 1987 a 2007.

Ano	Média Mensal	Ano	Média Mensal
1987	299,6 ± 13,31	1998	308,93 ± 16,87
1988	306,43 ± 13,42	1999	292,37 ± 12,73
1989	321,19 ± 12,13	2000	304,51 ± 16,49
1990	291,1 ± 20,55	2001	300,3 ± 17,67
1991	313,32 ± 18,89	2002	300,05 ± 21,25
1992	292,96 ± 17,31	2003	302,55 ± 13,56
1993	296,9 ± 9,53	2004	285,11 ± 12,68
1994	—	2005	305,75 ± 16,82
1995	—	2006	290,34 ± 17,66
1996	306,69 ± 26,43	2007	294,78 ± 10,33
1997	280,35 ± 11,08		
Geral →	$\mu = 299,7$	$\sigma = 18,94$	$\mu - 1,5\sigma = 271,4$

Tabela 5.2: Valor médio para a coluna total de ozônio (em Unidades Dobson), para Santa Maria, nos meses de **outubro** de 1987 a 2007.

Ano	Média Mensal	Ano	Média Mensal
1987	292,03 ± 13,59	1998	297,1 ± 15,9
1988	303,45 ± 10,39	1999	298,92 ± 15,41
1989	315,63 ± 19,4	2000	292,25 ± 15,82
1990	286,2 ± 16,59	2001	295,21 ± 13,55
1991	308,24 ± 12,72	2002	284,44 ± 10,48
1992	287,1 ± 15,74	2003	292,57 ± 18,5
1993	248,6 ± 3,1*	2004	284,03 ± 13,84
1994	—	2005	293,1 ± 15,77
1995	—	2006	274,21 ± 9,47
1996	295,69 ± 12,58	2007	288,79 ± 10,77
1997	279,93 ± 10,69		
Geral →	$\mu = 292,62$	$\sigma = 17,42$	$\mu - 1,5\sigma = 266,5$

* A média desse mês é muito baixa porque há uma falha nos dados do TOMS, abordo do satélite *Meteor 3*. Apenas os dias 30 e 31 desse mês são fornecidos. Igualmente, ocorre uma descontinuidade nos anos de 1994 e 1995.

Tabela 5.3: Eventos de mínimos para a coluna total de ozônio, nos meses de setembro de 1987 a 2007.

Rótulo	Mês-Ano	Dia	Ozônio (DU)	Média Mensal (DU)	Redução (%)	HYSPLIT (1)	Imagens (2)	PVA (3)
1	Set-1990	6	246,9	291,1	17,6	Não	Não	Constante
2	Set-1990	16	269,9	291,1	9,9	Não	Não	Constante
	Set-1990	17	268,3	291,1	10,5	Não	Não	Constante
3	Set-1990	21	267,5	291,1	10,7	Sim	Não	Constante
	Set-1992	20	258,7	292,96	13,7	Não	Não	Decréscimo
	Set-1992	21	249,6	292,96	16,7	Não	Não	Constante
4	Set-1992	22	264,2	292,96	11,8	Não	Não	Aumento
	Set-1992	23	265	292,96	11,6	Não	Não	Decréscimo
	Set-1992	24	268,2	292,96	10,5	Não	Sim	Aumento
5	Set-1996	19	268,2	306,69	10,5	Não	Sim	Constante
	Set-1996	20	245,1	306,69	18,2	Não	Não	Constante
	Set-1997	12	268,8	280,35	10,3	Não	Não	Constante
6	Set-1997	13	270,3	280,35	9,8	Não	Não	Constante
	Set-1997	14	259,4	280,35	13,4	Não	Não	Constante
7	Set-1997	28	260,9	280,35	12,9	Sim	Não	Constante
	Set-1997	30	262,3	280,35	12,5	Sim	Não	Constante
8	Set-1999	2	263,2	292,37	12,2	Não	Não	Constante
9	Set-2001	3	262,6	300,3	12,4	Não	Não	Constante
10	Set-2002	9	268	300,05	10,6	Não	Não	Constante
	Set-2002	10	262,4	300,05	12,4	Não	Não	Constante
11	Set-2004	6	269,1	285,11	10,2	Não	Não	Constante
12	Set-2005	29	267	305,75	10,9	Não	Não	Constante
13	Set-2006	10	269,74	290,34	10	Sim	Não	Constante
	Set-2006	12	266,91	290,34	10,9	Sim	Não	Constante
14	Set-2006	19	264,51	290,34	11,7	Não	Não	Constante

Tabela 5.4: Eventos de mínimos para a coluna total de ozônio, nos meses de **outubro** de 1987 a 2007.

Rótulo	Mês-Ano	Dia	Ozônio (DU)	Média Mensal (DU)	Redução (%)	HYSPLIT (1)	Imagens (2)	PVA (3)
1	Out-1990	7	265,7	286,2	9,2	Não	Sim	Constante
	Out-1990	8	261	286,2	10,8	Sim	Não	Aumento
	Out-1990	10	262,2	286,2	10,4	Sim	Não	Constante
	Out-1990	11	257,4	286,2	12	Sim	Não	Decréscimo
2	Out-1990	31	265,8	286,2	9,2	Não	Não	Constante
	Out-1992	24	263,5	287,1	10	Sim	Não	Aumento
3	Out-1992	25	265,8	287,1	9,2	Sim	Não	Constante
	Out-1992	26	263	287,1	10,1	Sim	Não	Constante
4	Out-1992	30	263,1	287,1	10,1	Não	Não	Constante
	Out-1993	30	251,7	248,6	14	Sim	Sim	Aumento
5	Out-1993	31	245,5	248,6	16,1	Sim	Não	Constante
	Out-1997	4	265,7	279,93	9,2	Não	Não	Constante
6	Out-1997	13	262,3	279,93	10,4	Sim	Sim	Constante
	Out-1997	14	257,2	279,93	12,1	Sim	Sim	Constante
7	Out-1997	16	265,1	279,93	9,4	Sim	Não	Constante
	Out-1997	29	264,8	279,93	9,5	Não	Não	Constante
8	Out-1998	24	260	297,1	11,1	Não	Sim	Aumento
	Out-1999	15	261,3	298,92	10,7	Não	Não	Constante
9	Out-2000	26	262,5	292,25	10,3	Sim	Sim	Aumento
	Out-2001	28	264,2	295,21	9,7	Sim	Sim	Constante
10	Out-2002	20	260,3	284,44	11	Não	Não	Constante
	Out-2003	16	254,4	292,57	13,1	Sim	Sim	Constante
11	Out-2003	25	253,8	292,57	13,3	Não	Não	Constante
	Out-2004	16	253,8	284,03	13,3	Sim	Sim	Aumento
12	Out-2004	17	258,3	284,03	11,7	Sim	Sim	Constante
	Out-2004	30	261,3	284,03	10,7	Não	Não	Constante
13	Out-2005	12	266,3	293,1	9	Sim	Sim	Aumento
	Out-2006	7	252,68	274,21	13,6	Não	Não	Constante
14	Out-2006	14	263,92	274,21	9,8	Sim	Sim	Constante
	Out-2006	15	262,99	274,21	10,1	Sim	Sim	Constante
15	Out-2006	27	261,9	274,21	10,5	Sim	Sim	Constante
	Out-2006	28	259,13	274,21	11,4	Sim	Sim	Aumento
16	Out-2006	29	263,33	274,21	10	Sim	Sim	Constante
	Out-2007	7	257,67	288,79	11,9	Sim	Sim	Aumento

Na antepenúltima coluna das Tabelas 5.3 e 5.4, nomeada “HYSPLIT”, vê-se o resultado da análise do item (b) de cada Figura do Apêndice B. Foi optado por apresentar o resultado, dos itens (1) e (2), de forma binária nas Tabelas, isto é, “Não” indica que as imagens não levantam nenhum indício de que o evento é um efeito secundário do buraco de ozônio antártico, e “Sim”, indica que há algum indício. Como exemplo, pode-se verificar o evento do dia 26 de outubro de 2000, o 11º evento de mínimo dos meses de outubro, ele é apresentado na Figura B.25. Tanto o item (a), quanto o item (b) da Figura indicam a intrusão de massas de ar com origem polar, desse modo os itens (1) e (2) da Tabela estão assinalados positivamente.

Na última coluna das Tabelas 5.3 e 5.4, nomeada “PVA”, está apresentado o resultado da análise dos mapas de vorticidade potencial, sendo que nesse caso foram utilizadas três classificações: “Decréscimo”, “Constante” e “Aumento”, referindo-se ao que ocorre com o módulo da vorticidade potencial (PVA), com relação ao dia anterior. Por exemplo, no evento do dia 26 de outubro, verifica-se facilmente que ocorre um aumento de PVA do dia 25 para o dia 26, basta notar a variação nos mapas dos itens (c) e (d) da Figura B.25. É importante ressaltar que os mapas apresentam a vorticidade potencial relativa em unidades de 10^6 PVU, desse modo é necessário tomar o módulo dos valores na barra ao lado de cada mapa, no intuito de obter a PVA.

Após a aplicação da metodologia implementada foram encontrados 16 eventos de efeitos secundários, sendo que 3 (21%¹) desses são nos meses de setembro e 13 (59%) nos meses de outubro (linhas cinza nas Tabelas 5.3 e 5.4). Note que os eventos de setembro são determinados apenas por análise das trajetórias retroativas das massas de ar, enquanto os eventos de outubro são determinados por um, dois ou três itens da metodologia.

Todos os eventos de mínimo que apresentam as colunas (1) e (2) assinaladas negativamente e com a coluna (3) assinalada “Constante” ou “Decréscimo” não foram classificados como efeitos secundários. Os demais foram classificados como efeitos secundários, sendo indicados por um ou mais métodos. Para os 13 eventos de efeitos secundários de outubro, tem-se que 12 (92%) foram indicados pelo item (1), 12 (92%) foram indicados pelo item (2) e 9 (69%) foram indicados pelo item (3).

Uma importante ressalva deve ser feita sobre os resultados obtidos e sobre os propósitos da metodologia. A metodologia indica que os 16 eventos em destaque nas Tabelas 5.3 e 5.4 são efeitos secundários do buraco de ozônio antártico. Entretanto, a metodologia não indica que os outros 20 não sejam. Estudos mais detalhados, para diversas escalas verticais, podem vir a revelar que algum desses eventos de mínimo é correlacionado com o buraco de ozônio antártico.

¹Com relação ao número de eventos de mínimo selecionados para esse mês.

Capítulo 6

Conclusões

As médias calculadas para a coluna total de ozônio, para a região Santa Maria (29°S, 53°W), a partir dos dados de satélite, foram: $\mu_{set} = 299,7 \pm 18,94$ DU e $\mu_{out} = 292,62 \pm 17,42$ DU. De modo que os filtros encontrados foram: $(\mu - 1,5\sigma)_{set} = 271,4$ DU e $(\mu - 1,5\sigma)_{out} = 266,5$ DU. Foram selecionados 36 eventos de mínimo na concentração de ozônio para a região de Santa Maria, isto é, com valores de ozônio menores que os filtros (nos últimos vinte anos). Dos 36, 14 são nos meses de setembro e 22 nos meses de outubro.

Após a aplicação da metodologia, foram encontrados 16 eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico, 3 nos meses de setembro e 13 nos meses de outubro. É importante frisar que a análise é relativa ao período de 1987 a 2007, desse modo podem haver efeitos secundários, tanto antes, quanto depois desse período. Vale ressaltar que o estudo aborda os meses de setembro e outubro, portanto podem existir efeitos secundários em outros meses do ano, como mostrado por *Bertagnoli* (2008). Outro ponto são as descontinuidades nos dados de ozônio, como por exemplo a ausência de dados nos anos de 1994 e 1995. Eventos ocorridos em períodos sem dados de satélite, caso existam, não foram detectados no trabalho (e.g., *Kirchhoff et al.*, 1996).

Nos meses de setembro verifica-se que apenas o modelo HYSPLIT indica a existência de efeitos secundários. Já nos meses de outubro, verifica-se que os outros dois itens da metodologia colaboram para a identificação dos efeitos secundários. Desse modo observa-se uma maior eficácia do modelo HYSPLIT, com relação aos outros dois métodos, na detecção dos efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre a região sul do Brasil. Para os meses de outubro, onde há um maior número de eventos, as imagens do TOMS/OMI se mostraram igualmente eficazes.

Os itens (2) e (3) da metodologia não indicam positivamente em alguns casos. Provavelmente, isso ocorre porque as imagens de satélite são médias estáticas, não indicando movimento de massas de ar e porque as variações de PVA podem ser menores que as escalas dos mapas, nos mapas são perceptíveis variações da ordem de $10 \cdot 10^6$ PVU = $10 \text{ Kkg}^{-1}\text{m}^2\text{s}^{-1}$, ou ocorrer em diferentes níveis de altitude, isto é, $\theta \neq 620$ K.

O objetivo principal do trabalho é identificar e caracterizar os efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre a região sul do país, nos últimos vinte anos, e implementar uma metodologia que possa ser aplicada de qualquer lugar do mundo para realizar tal tarefa. Os objetivos foram alcançados, os dezesseis eventos estão apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4, sendo que na quinta coluna das Tabelas pode-se ver o quanto os efeitos secundários reduziram a quantidade de ozônio atmosférico (com relação a média dos vinte anos). As reduções são geralmente da ordem de 10%.

Com relação a consolidação de uma metodologia, tem-se que os procedimentos utilizados demonstram-se eficazes na detecção dos efeitos secundários. Alguns aprimoramentos podem ser feitos na parte de análise dos mapas de vorticidade potencial, como construir escalas mais sensíveis nos mapas e escolher valores diferentes para θ , por exemplo 610 K, 630 K, isto é, valores próximos a 620 K.

Inicialmente cogitou-se a hipótese de analisar mapas de PV para altitude de 18 km ($\theta \sim 450$ K), correspondente a altitude da camada de ozônio no Pólo Sul. Dos mapas de trajetórias retroativas de massas de ar, item (b) das Figuras do Apêndice B, pode-se visualizar a variação de altitude da massa de ar, ao longo do percurso (parte inferior das imagens). Uma análise detalhada revela que as massas de ar geralmente chegam na altitude de aproximadamente 25 km. Portanto, mapas de PV para altitudes muito inferiores a essa podem não contribuir para a análise. Nos diagramas gerados pelo programa READY evidencia-se que as massas de ar originam-se em altitudes de até 17 km.

Desconhece-se trabalhos, que porventura tenham sido publicados na literatura especializada, apresentando uma catalogação dos efeitos secundários, em uma extensa faixa de tempo, isto é, vinte anos. Trabalhos futuros para análises detalhadas de cada evento apresentado aqui serão bem-vindos.

Capítulo 7

Bibliografia

Appenzeller, C.; Davies, H. C.; Norton, W. A. Fragmentation of stratospheric intrusions. **J. Geophys. Res.**, 101, 1435 - 1456, 1996.

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 of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Volume 65, Issue 6, April 2003, Pages 707-715, ISSN 1364-6826.

Bertagnolli, C. **Variabilidade temporal do conteúdo integrado de ozônio no sul do Brasil**. Santa Maria, 133 p. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

Chen, P. Isentropic cross-tropopause mass exchange in the extratropics. **J. Geophys. Res.**, 100, 16661 - 16673, 1995.

Dhomse, S.; Weber, M.; Wohltmann, I.; Rex, M. and Burrows, J. P. On the possible causes of recent increases in northern hemispheric total ozone from a statistical analysis of satellite data from 1979 to 2003. *Atmospheric Chemistry and Physics*. v. 6, p. 1165 – 1180, 2006.

Dobson, G. M. B. **Ozone in the Atmosphere**, In: DOBSON, G.M.B. Exploring the Atmosphere. Oxford: University Press, p. 111-136, 1968.

Farman, J. C.; Gardiner, B. G. and Shanklin, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. **Nature**, v. 315, p. 207-210, 1985.

GrADS Script Library. Disponível em: <<http://www.iges.org/grads/gadoc/library.html>>. Acesso em: maio 2008.

GrADS Software. Disponível em: <<http://www.iges.org/grads/downloads.html>>. Acesso em: abril 2008.

Grimm, A. M. **Meteorologia Básica - Notas de Aula**. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Primeira versão: set 1999. Acesso em: abr. 2008.

HYSPLIT model – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory. Disponível em: <<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>>. Acesso em: abr. 2008.

Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., Pfister, L. Stratosphere troposphere exchange, **Rev. Geophys.**, 33, 403-439, 1995.

Holton, J. R., **An introduction to Dynamic Meteorology**. Elsevier Academic Press, Fourth Edition, 535 p., San Diego, USA, 2004.

Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., Robertson, A. W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps, **Q. J. Roy. Meteor. Soc.**, 111, 877-946, 1985.

Hoskins, B. J. Towards a PV- θ view of the general circulation. **Tellus**. Ser. A, 43AB, 27 - 35, 1991.

Jing, P.; Cunnold, D. M.; Yang, E.-S.; Wang, H.-J. Influence of isentropic transport on seasonal ozone variations in the lower stratosphere and subtropical upper troposphere. **J. Geophys. Res.**, v. 110, D10110, 2005.

Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu Y.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak J.; Mo, K. C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Jenne, R.; Joseph, D. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 1996. Disponível em: <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/cdrom/bams96/BAMSPAPR.ASC>>. Acessado em jun. 2008.

Kirchhoff, V. W. J. H. **Introdução à geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 141 p.

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. 33, n. 9, p. 1481-1488, 1996.

Lary, D. J.; Chipperfield, M. P.; Pyle, J. A.; Norton, W. A.; Risshøjgaard, L. P. Three-dimensional tracer initialization and general diagnostics using equivalent PV latitude – potential-temperature coordinates. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, 121, 187 - 210, 1995.

NASA – National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <<http://www.nasa.gov/>>. Acesso em: abr. 2008.

NCEP/NCAR Reanalysis Project – National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>>. Acesso em: abr. 2008.

Prather, M.; Jaffe, H. Global impact of the Antarctic ozone hole: chemical propagation. **J. Geophys. Res.**, v. 95, p. 3413-3492, 1990.

Salby, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. London. Academic Press, 1996, 627 p.

Salgado, C. A. R. C. **Comparação da distribuição vertical do ozônio em altas e baixas latitudes**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**, John Wiley and Sons, 1998.

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) in mid-May 2002. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 6, p. 1927-1936, 2006.

Shiotani, M. Annual, quasi biennial, and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) timescale variations in equatorial total ozone. **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 7625-7633, 1992.

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

TOMS – Total Ozone Mapping Spectrometer. Disponível em: <http://toms.gsfc.nasa.gov/index_v8.html>. Acesso em: abr. 2008.

Whitten, R. C.; Prasad, S. S. **Ozone in Free Atmosphere**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 288 p., 1985.

Wrasse, C. M. **Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre**. 125 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

Apêndice A

Rotina para gerar mapas de PV

A rotina a seguir deve ser executada no programa GrADS para a criação de mapas de vorticidade potencial.

```
*-----  
*----- Script para cálculo de vorticidade potencial -----  
*-----  
*----- Modificado 27/10/2008 - Caitano Luiz da Silva -----  
*-----  
*--- Adaptado de ftp://grads.iges.org/grads/scripts/isen.gs ---  
*-----  
*----- Obs.: os campos (1), (2), (5) e (6)-----  
*----- possuem parâmetros editáveis -----  
*-----  
  
*-----  
*----- (0) Informações -----  
*-----  
  
* Baixe os dados do site http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.pressure.html,  
* escolha os dados, com médias diárias, de temperatura e das componentes u e v do vento.  
* Baixe dados para todos os níveis de pressão, para todos os dias de um determinado mês  
* e para todas as latitudes e longitudes. A escolha do nível vertical, do dia e do tamanho  
* da grade é realizada dentro do script. Salve os dados de temperatura e do vento com os  
* seguintes nomes: temp.nc, uwind.nc e vwind.nc.  
  
*----- Início do script -----  
  
'reinit'  
'sdfopen uwind.nc'  
'sdfopen vwind.nc'  
'sdfopen temp.nc'  
'set lat -90 0'  
'set lon -110 -10'  
'set gxout fwrite'  
'set fwrite pv.bin'
```

```

*----- *
*--- (1) Escolha o dia do mês para a análise --- * * *
*----- *

'set t 08'

*----- *
*--- (2) Escolha o nível isentrópico (theta) --- * * *
*----- *

k=620

*-----
*--- (3) Cálculo da vorticidade potencial-----
*-----

'define p='isen(lev,air.3,lev,k)
'set lev 1000 10'
'define coriol=2*7.29e-5*sin(lat*3.1415/180)'
'define dudy=cdiff(uwnd,y)/(111177*cdiff(lat,y))'
'define dvdx=cdiff(vwnd.2,x)/(111177*cdiff(lon,x)*cos(lat*3.1415/180))'
'define dt=air.3(z-1)*pow(1000/lev(z-1),0.286)-air.3(z+1)*pow(1000/lev(z+1),0.286)'
'define dp=100*(lev(z-1)-lev(z+1))'
'define dtdp=dt/dp'
'define part1='isen(dvdx,air.3,lev,k)
'define part2='isen(dudy,air.3,lev,k)
'define part3='isen(dtdp,air.3,lev,k)
'define pv=-9.8*(coriol+part1-part2)*part3'
'set z 1'
'd pv*1000000'

*-----
*--- (4) Plotagem do mapa de vorticidade potencial ---
*-----

'disable fwrite'
'reinit'
'open pv.ct1'
'set mpdset mres'
'set mpdset brmap_hires'
'set gxout shaded'
'd pv'
'run cbarn.gs'

*----- *
*--- (5) Escolha o texto para a barra de título do gráfico --- * * *
*----- *

'draw title dd/mm/yyyy 620k'

*----- *
*--- (6) Escolha o título do arquivo de saída --- * * *
*----- *

'printim yyyy-mm-dd-pv.png white'

*----- Fim do script -----

```

```

*-----
*--- (7) Função isen -----
*-----

function isen(field,tgrid,pgrid,tlev)

*-----
*----- Início da Função -----
*-----
*----- Extraída de http://www.iges.org/grads/gadoc/library.html -----
*-----

* Get initial dimensions of dataset so that exit dimensions will be
* same

'q dims'
rec=sublin(result,4)
ztype=subwrd(rec,3)
if (ztype = 'fixed')
    zmin=subwrd(rec,9)
    zmax=zmin
else
    zmin=subwrd(rec,11)
    zmax=subwrd(rec,13)
endif

* Get full z-dimensions of dataset.

'q file'
rec=sublin(result,5)
zsize=subwrd(rec,9)

* Determine spatially varying bounding pressure levels for isen surface
* tabove = theta-value at level above ; tbelow = theta value at level
* below for each gridpoint

'set z 1 'zsize
'define theta='tgrid'*pow(1000/'pgrid',0.286)'
'set z 2 'zsize
'define thetam='tgrid'(z-1)*pow(1000/'pgrid'(z-1),0.286)'
'set z 1 'zsize-1
'define thetap='tgrid'(z+1)*pow(1000/'pgrid'(z+1),0.286)'

'define tabove=0.5*maskout(theta,theta-'tlev')+0.5*maskout(theta,'tlev'-thetam)'
'define tbelow=0.5*maskout(theta,thetap-'tlev')+0.5*maskout(theta,'tlev'-theta)'

* Isolate field values at bounding pressure levels
* fabove = requested field value above isen surface
* fbelow = requested field value below isen surface

'define fabove=tabove*0+'field
'define fbelow=tbelow*0+'field

'set z 1'

* Turn this 3-D grid of values (mostly undefined) into a 2-D isen layer

```

```
* If more than one layer is valid (rare), take the mean of all the
* valid levels. Not the best way to deal with the multi-layer issue,
* but works well, rarely if ever impacts output, and is quick.
* Ideally, only the upper most level would be used. However, this
* is not easily done using current GrADS intrinsic functions.

'define fabove=mean(fabove,z=1,z='zsize')'
'define fbelow=mean(fbelow,z=1,z='zsize')'
'define tabove=mean(tabove,z=1,z='zsize')'
'define tbelow=mean(tbelow,z=1,z='zsize')'

* Finally, interpolate linearly in theta and create isen surface.
* Linear interpolation in theta works b/c it scales as height,
* or log-P, from Poisson equation for pot temp.

'set z 'zmin ' ' zmax

'define slope=(fabove-fbelow)/(tabove-tbelow)'
'define b=fbelow-slope*tbelow'
'define interp=slope*'tlev'+b'

* variable interp now holds isentropic field and its named it returned
* for use by the user.

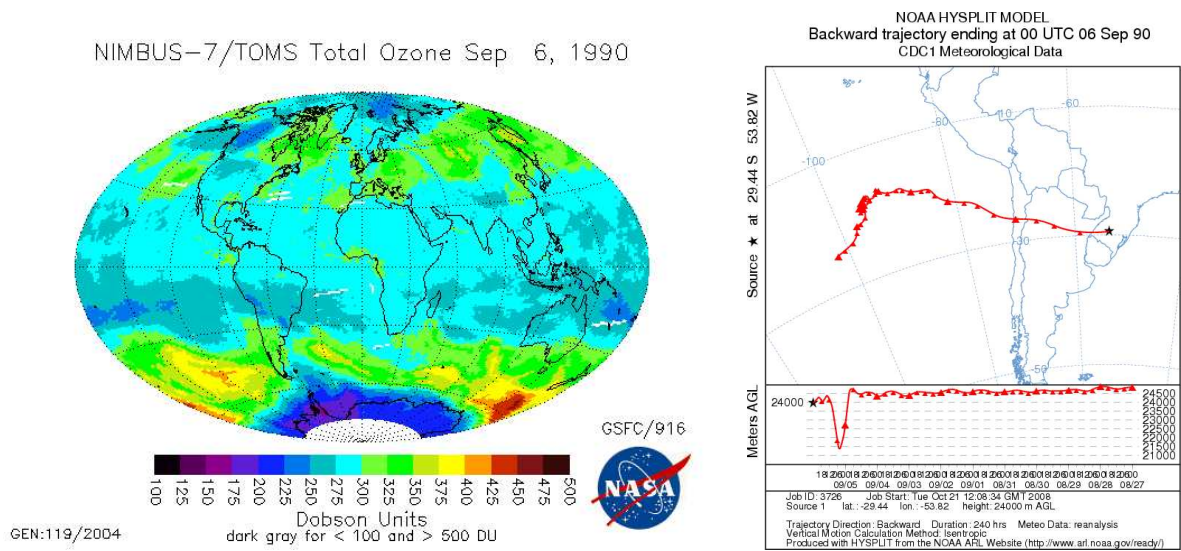
say 'Done. Newly defined variable interp has 'tlev'K 'field'-field.'

return(interp)
```

Apêndice B

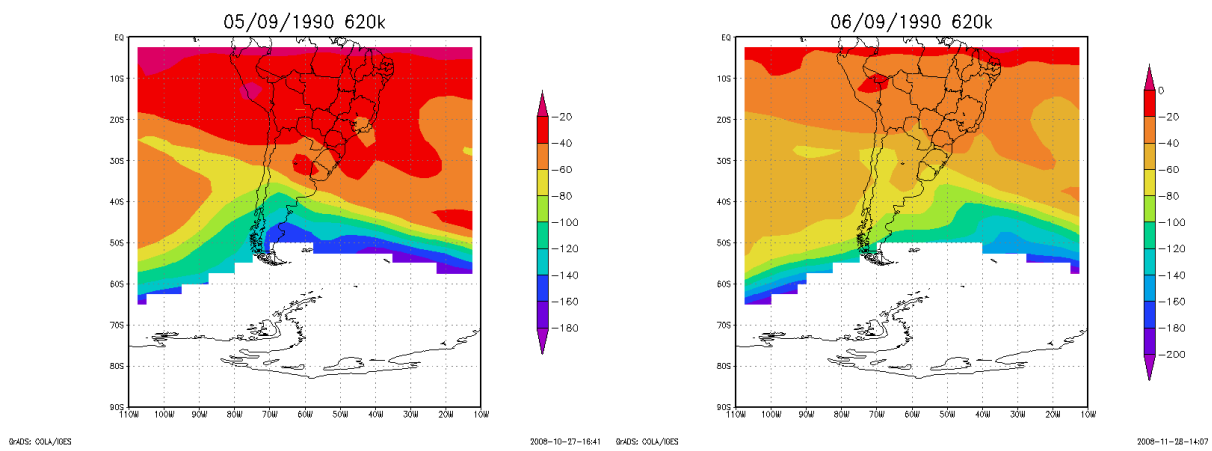
Imagens dos eventos de mínimo

Aqui são apresentadas as imagens utilizadas na análise de cada evento de mínimo. Da Figura B.1 até a B.14 têm-se os 14 eventos de mínimo na coluna total de ozônio para os meses de setembro de 1987 a 2007. Da Figura B.15 a B.36, têm-se os 22 eventos de mínimo para os meses de outubro.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura B.1: Evento do dia 06 de setembro de 1990. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 05 (c) e 06 (d). Ocorreu uma redução de 17,6%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 06. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário do buraco de ozônio antártico.

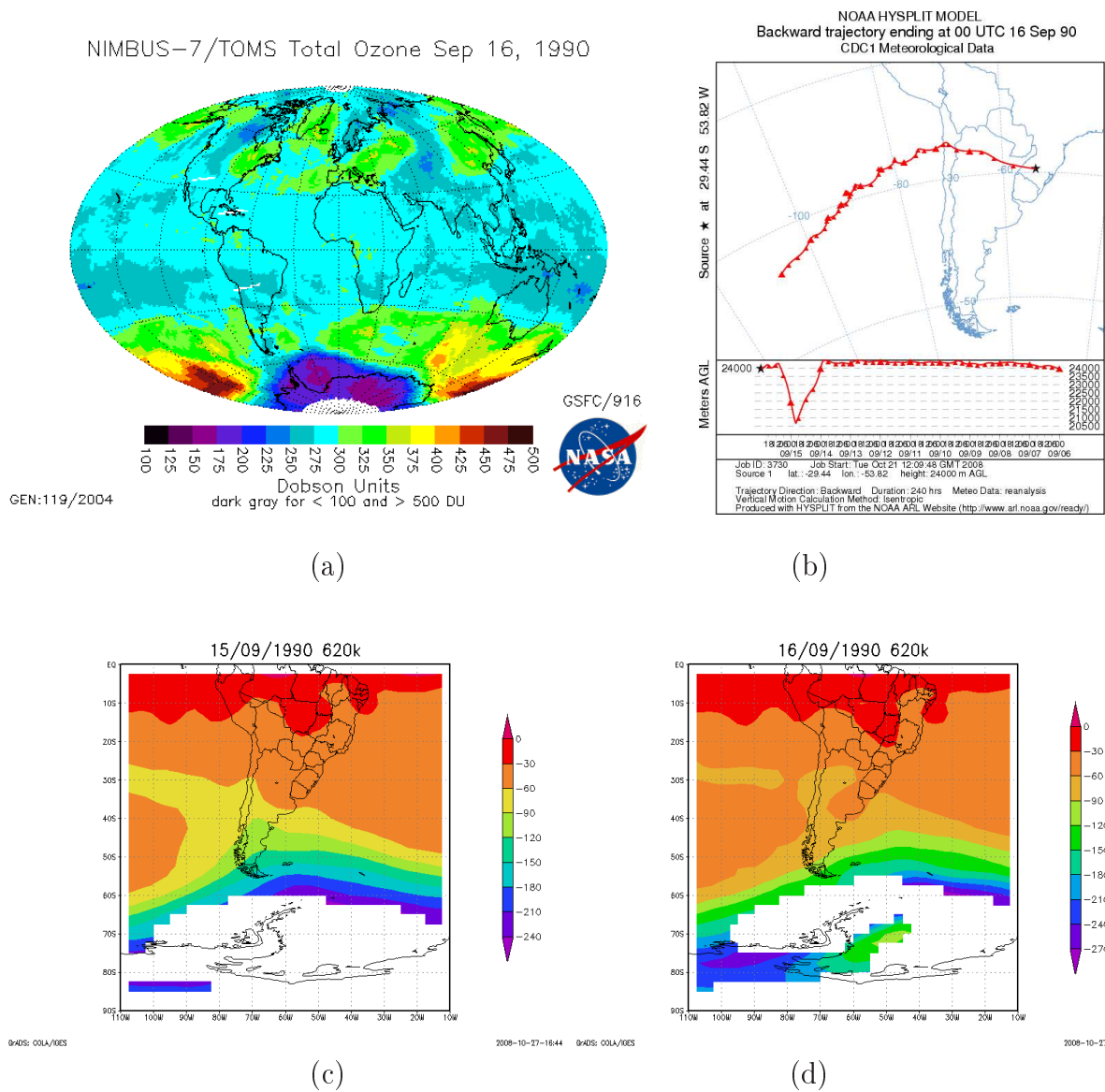


Figura B.2: Evento dos dias 16-17 de setembro de 1990. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 15 (c) e 16 (d). Ocorreu uma redução de 10,5%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 17. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

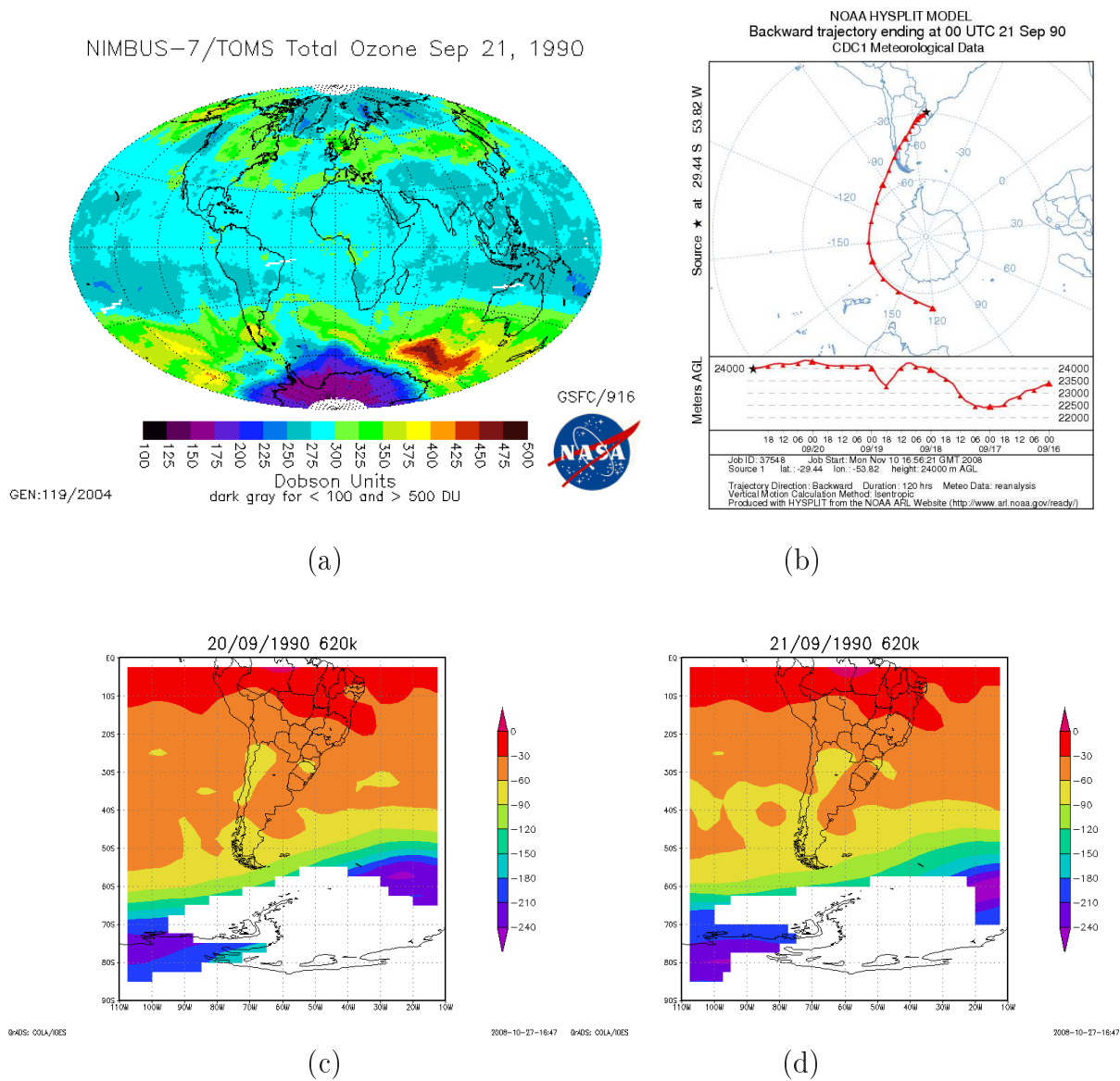


Figura B.3: Evento do dia 21 de setembro de 1990. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 20 (c) e 21 (d). Ocorreu uma redução de 10,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 21. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

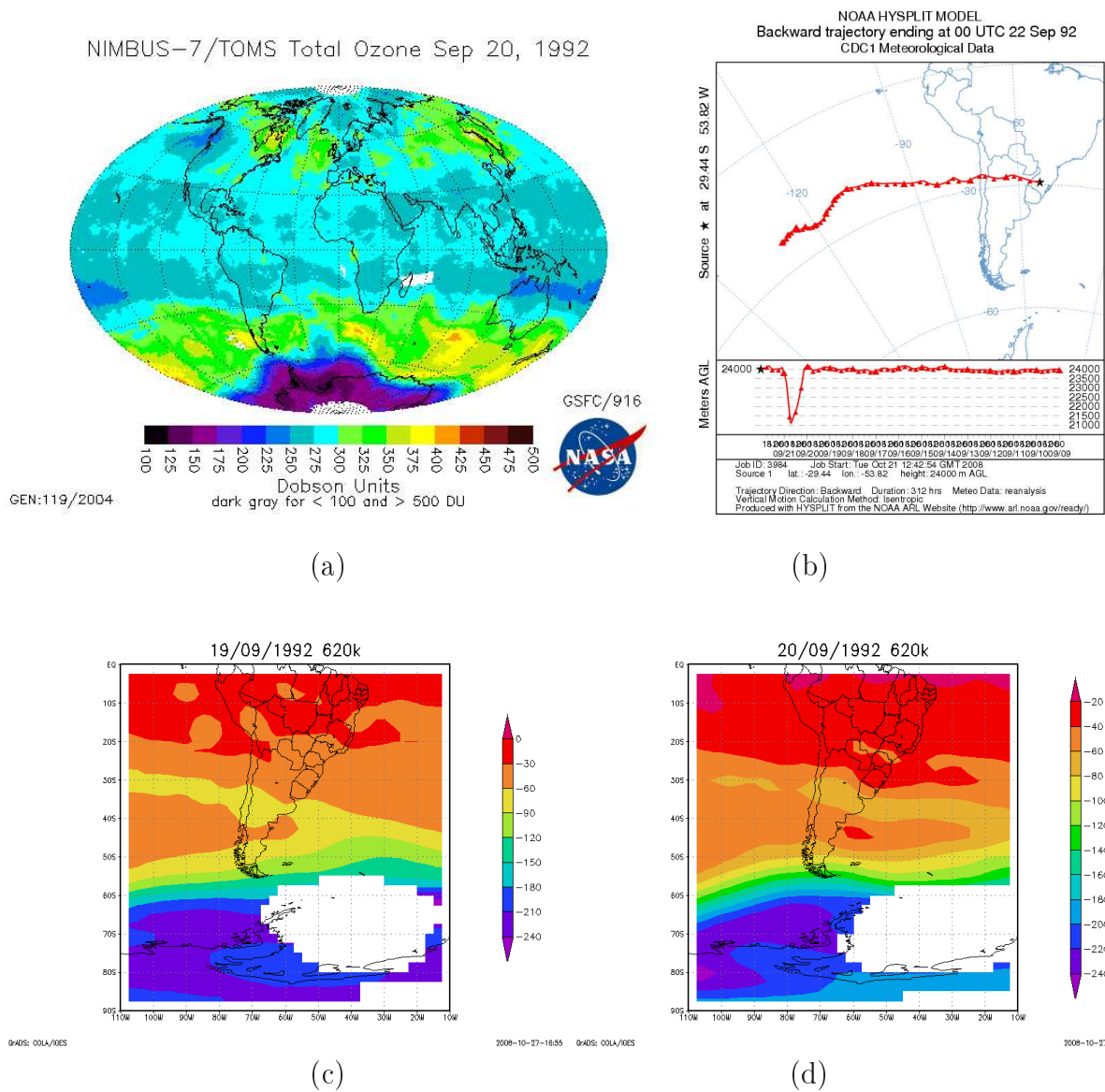
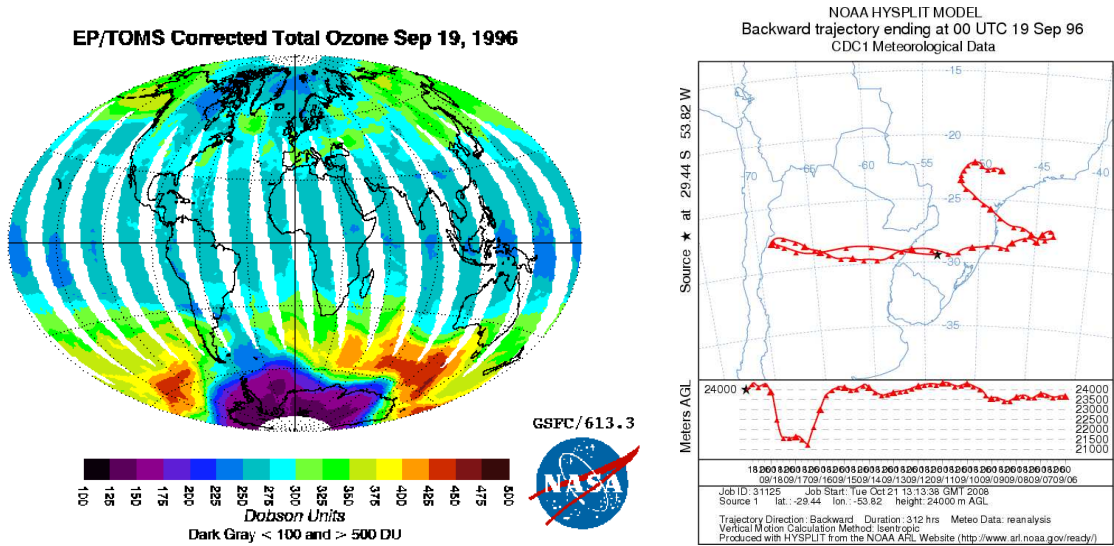
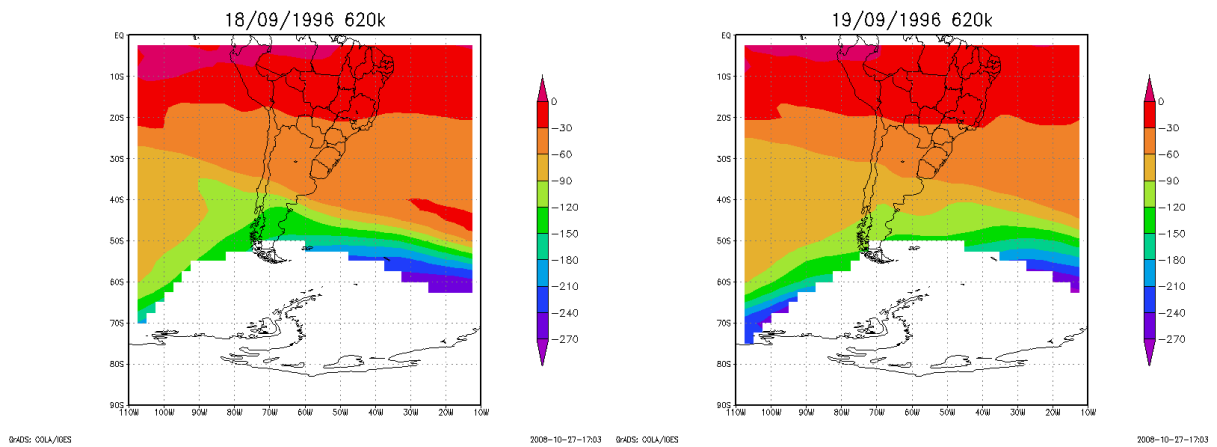


Figura B.4: Evento dos dias 20-24 de setembro de 1992. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 19 (c) e 20 (d). Ocorreu uma redução de 16,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 21. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura B.5: Evento dos dias 19-20 de setembro de 1996. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 18 (c) e 19 (d). Ocorreu uma redução de 18,2%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 20. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

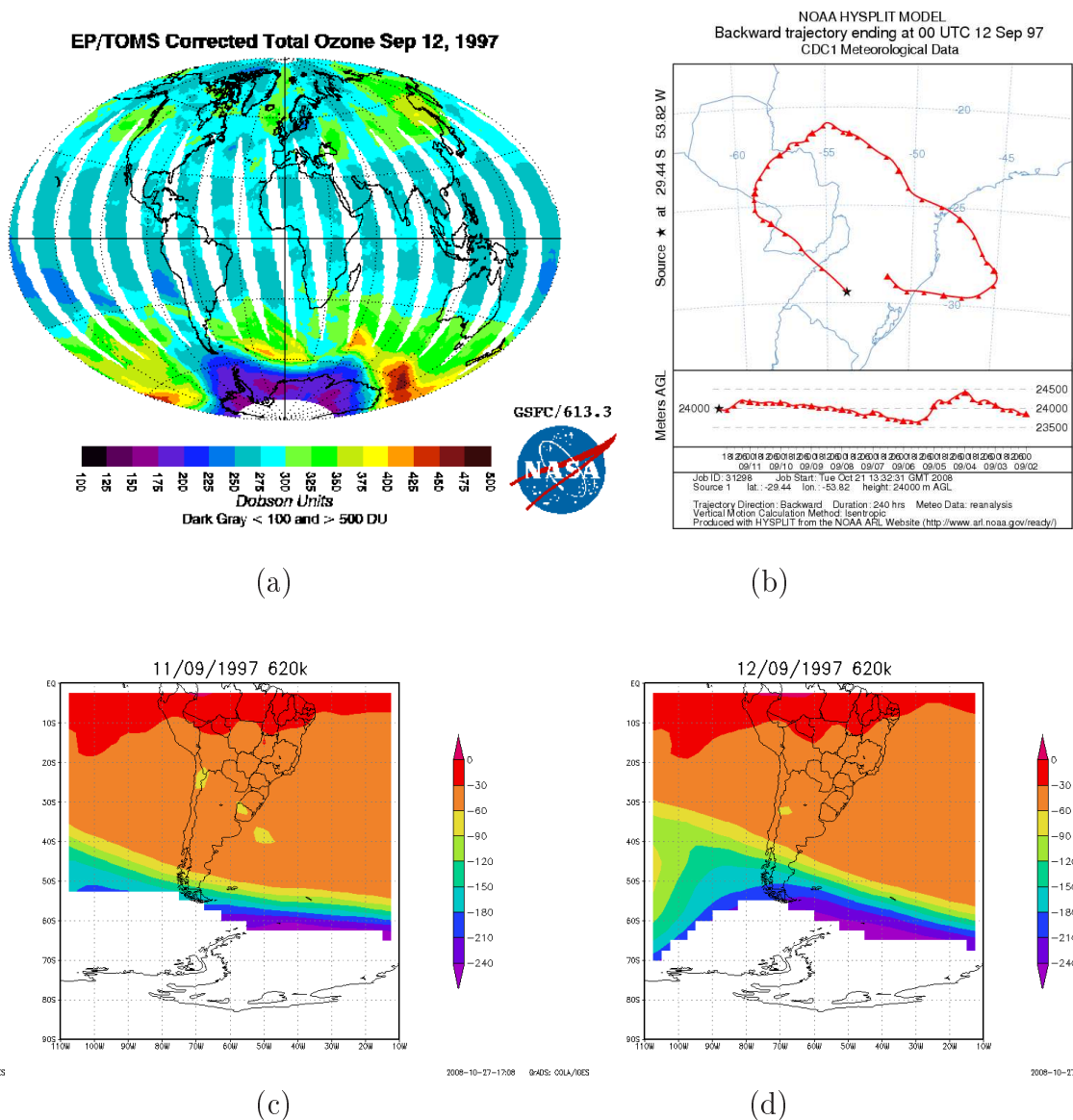
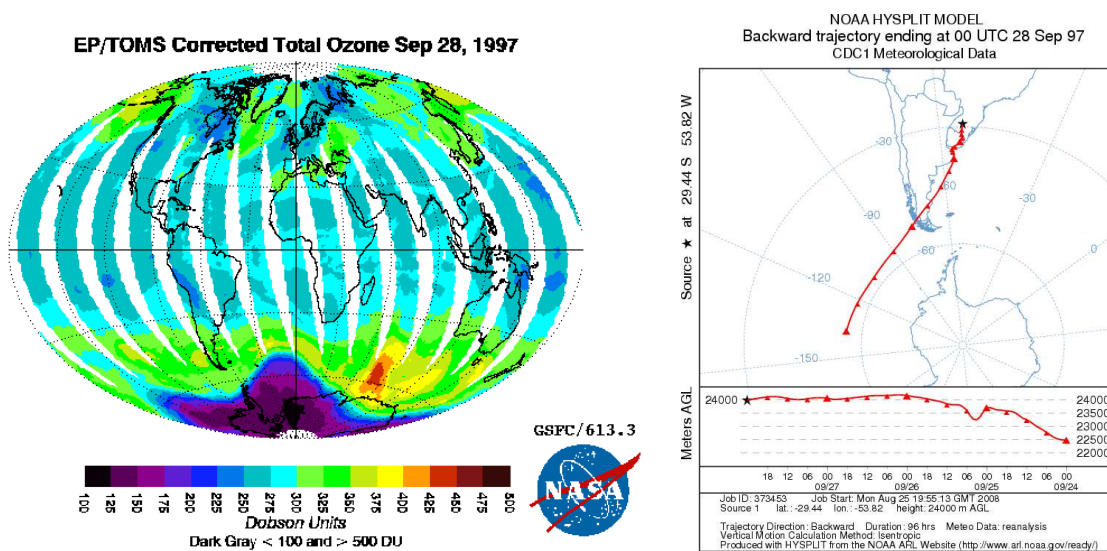
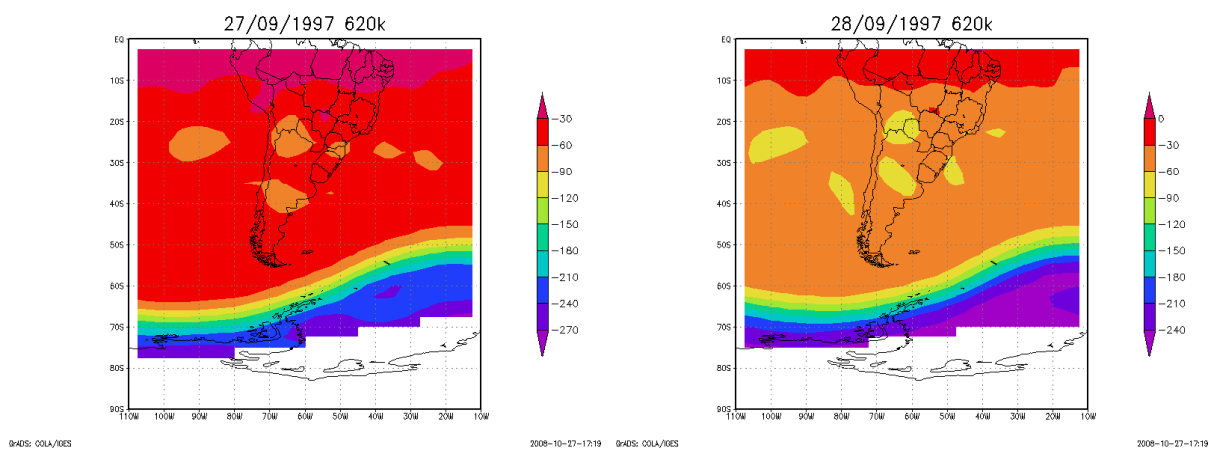


Figura B.6: Evento dos dias 12-14 de setembro de 1997. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 11 (c) e 12 (d). Ocorreu uma redução de 13,4%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 14. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



(a)

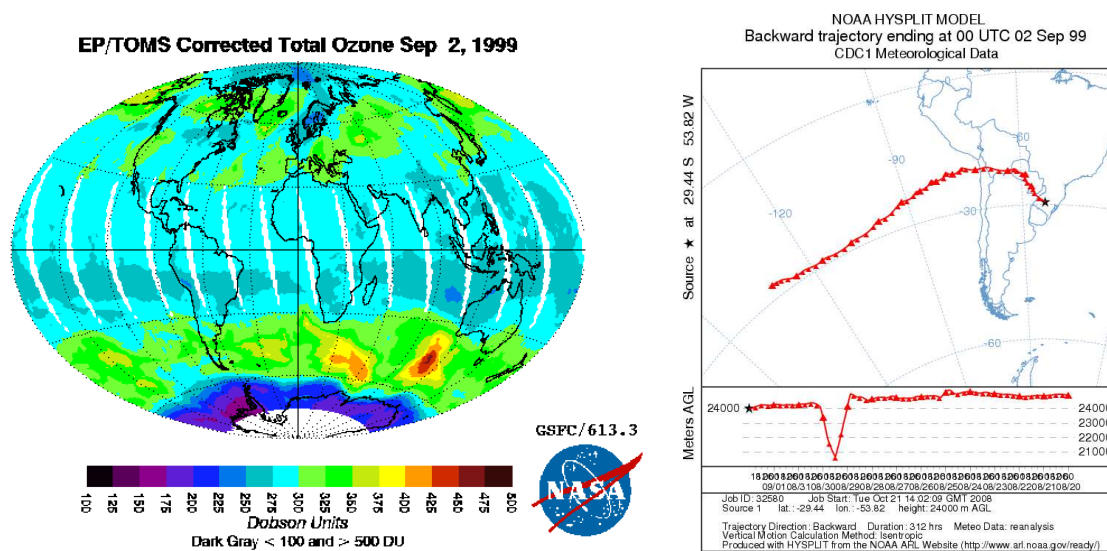
(b)



(c)

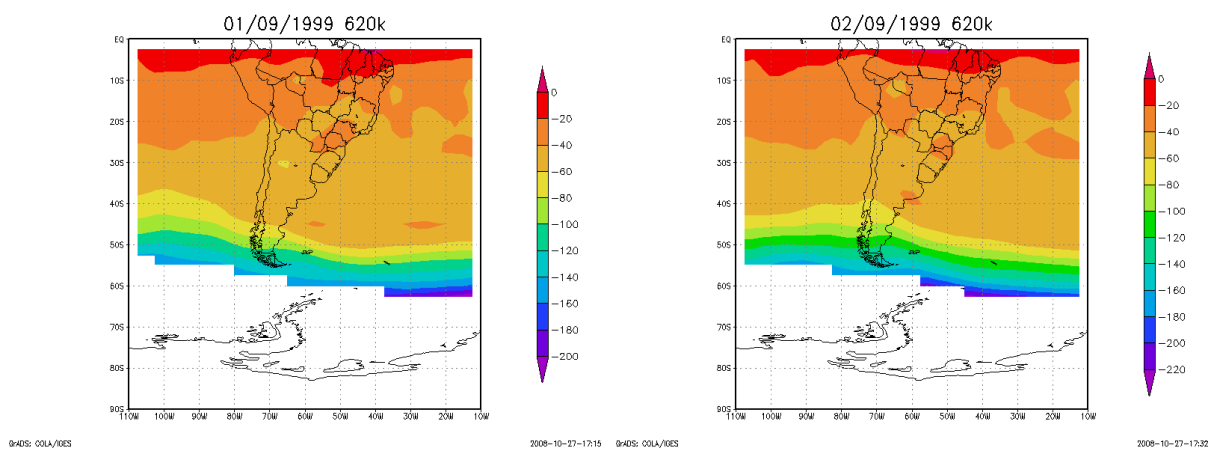
(d)

Figura B.7: Evento dos dias 28-30 de setembro de 1997. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 27 (c) e 28 (d). Ocorreu uma redução de 12,9%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 28. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.



(a)

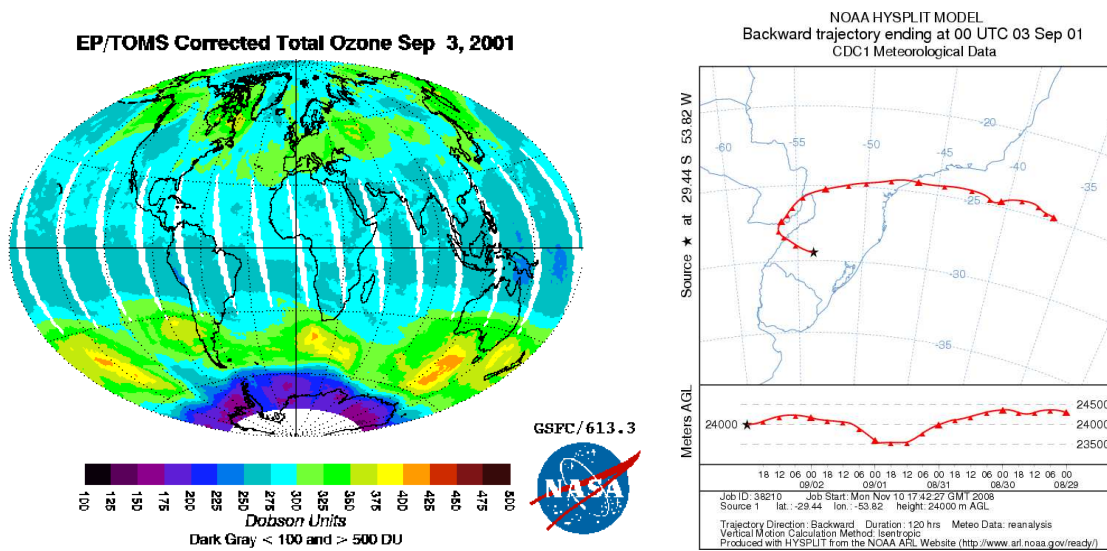
(b)



(c)

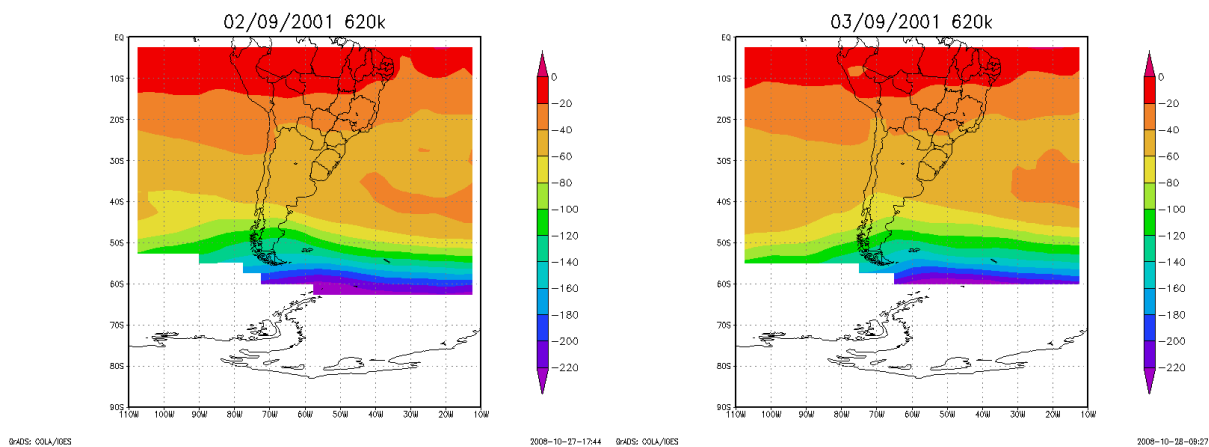
(d)

Figura B.8: Evento do dia 02 de setembro de 1999. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 01 (c) e 02 (d). Ocorreu uma redução de 12,2%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 02. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura B.9: Evento do dia 03 de setembro de 2001. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 02 (c) e 03 (d). Ocorreu uma redução de 12,4%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 03. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

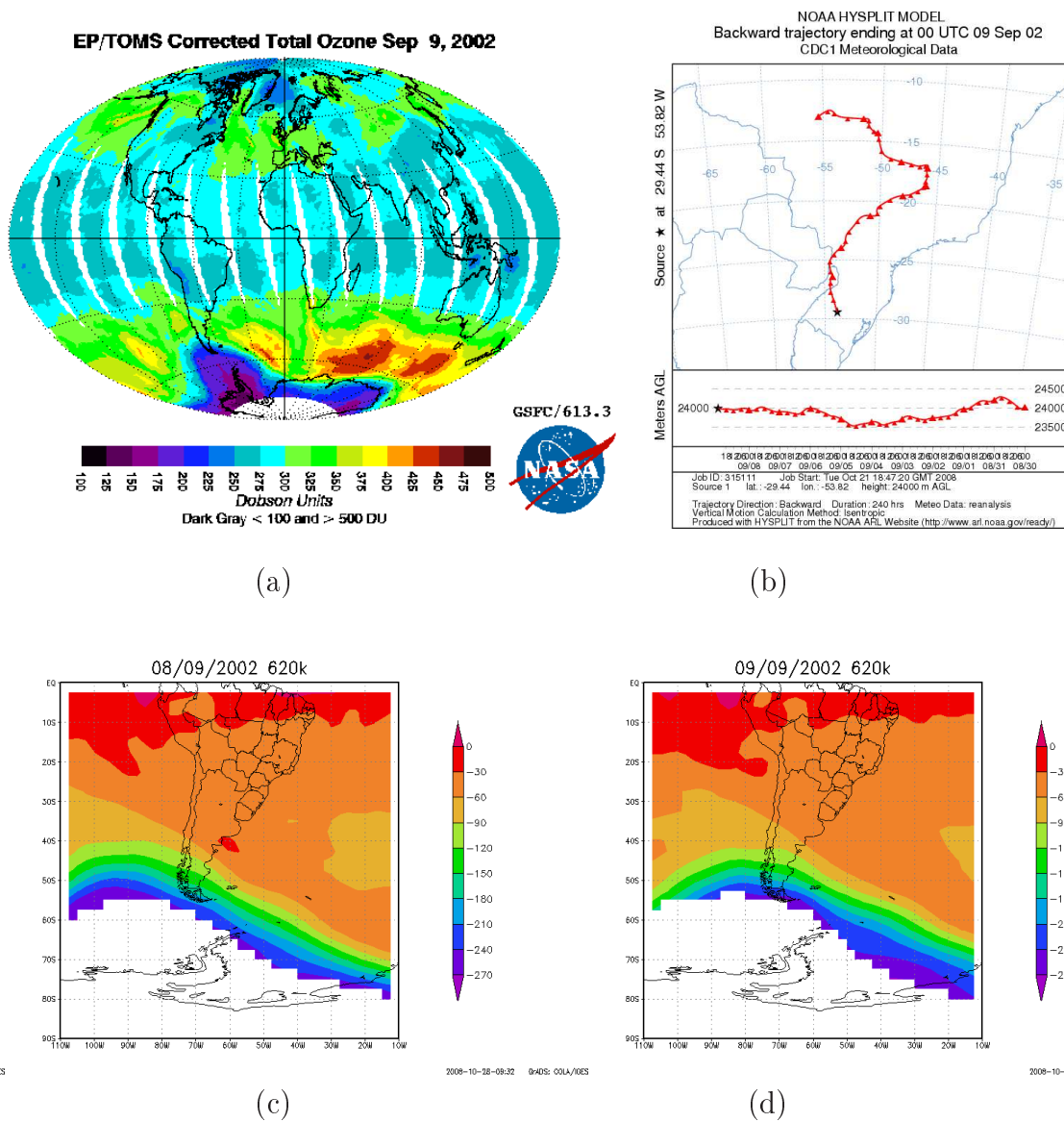


Figura B.10: Evento dos dias 09-10 de setembro de 2002. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 08 (c) e 09 (d). Ocorreu uma redução de 12,4%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 10. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

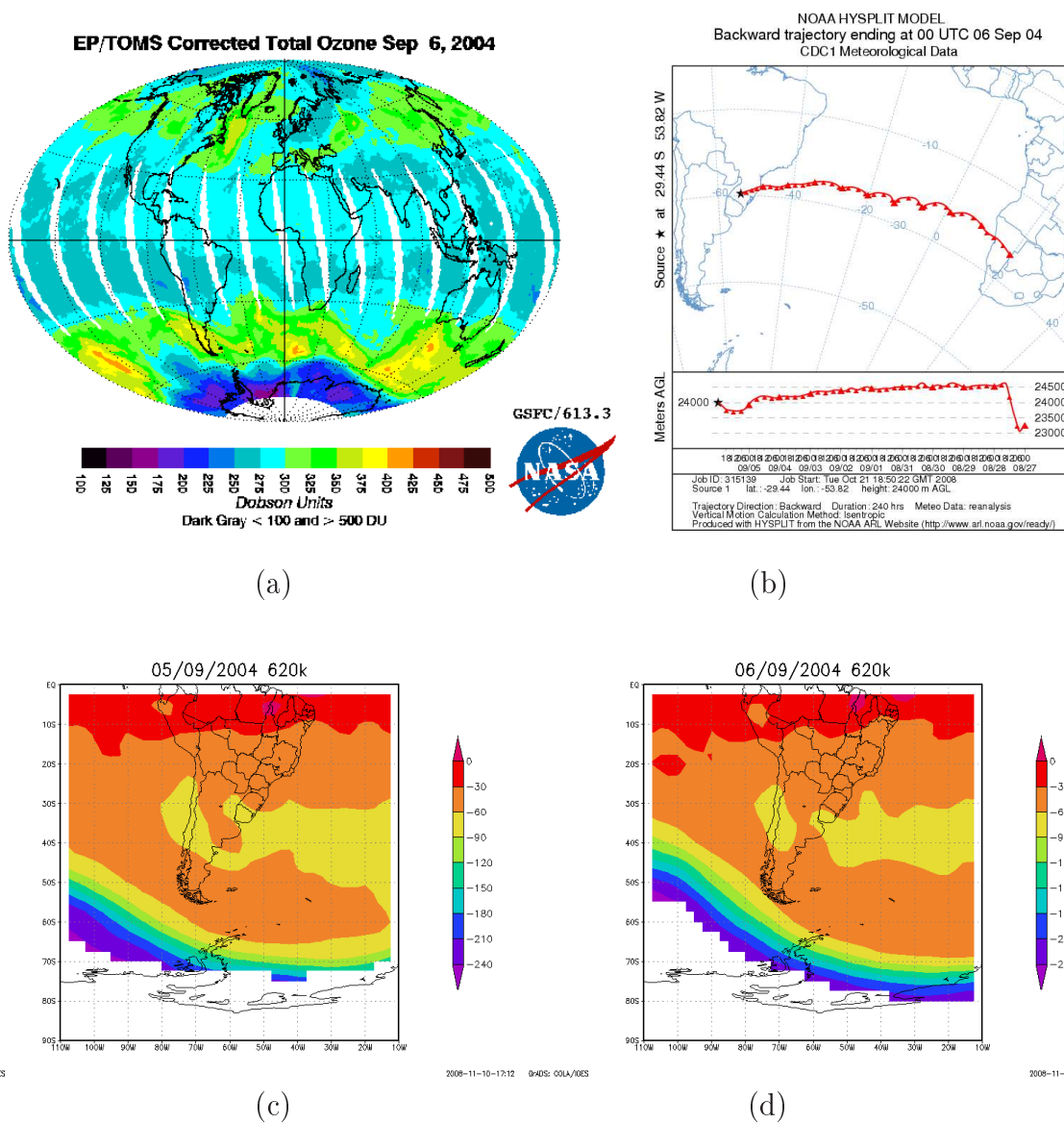


Figura B.11: Evento do dia 06 de setembro de 2004. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 05 (c) e 06 (d). Ocorreu uma redução de 10,2%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 06. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

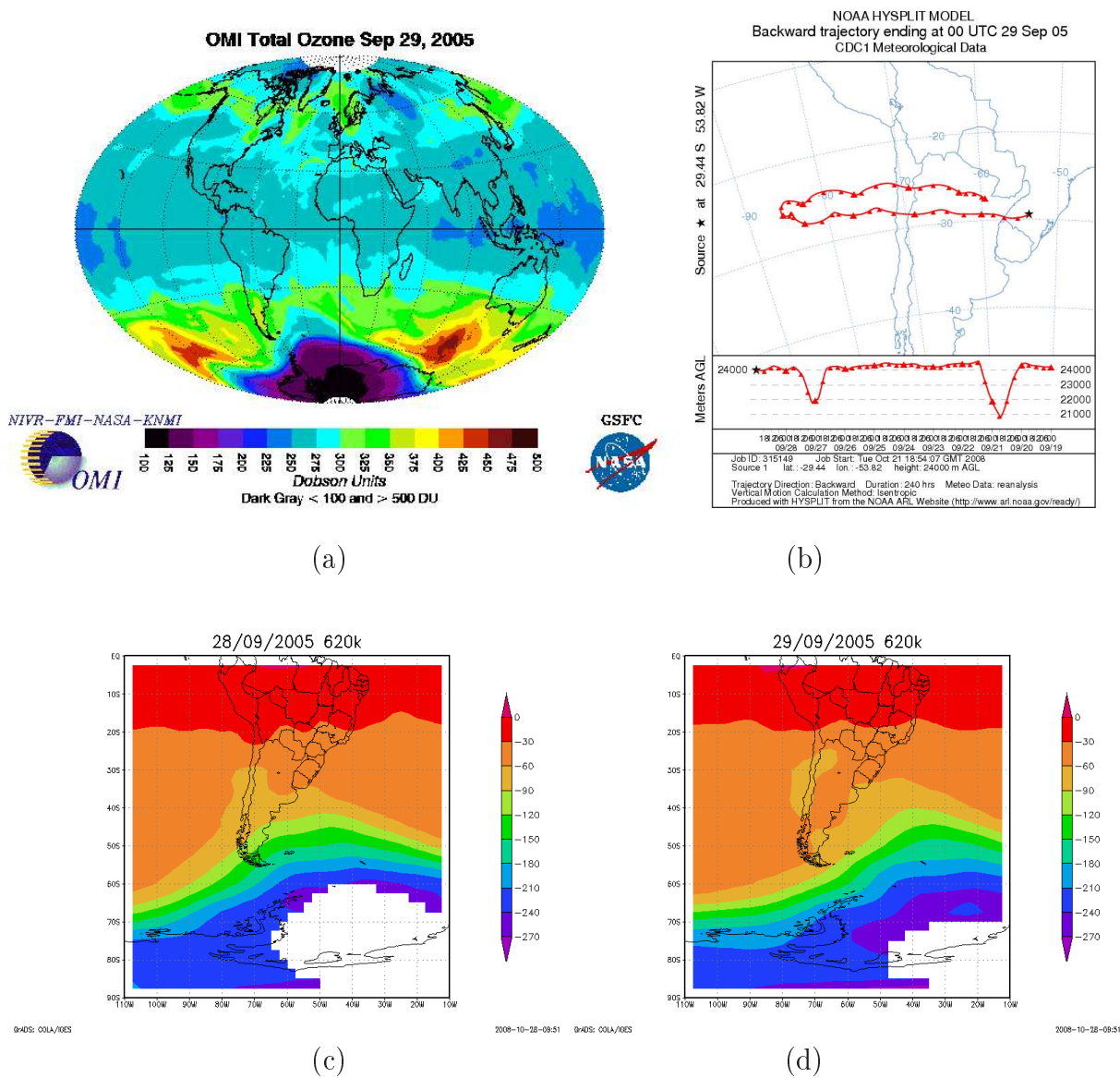


Figura B.12: Evento do dia 29 de setembro de 2005. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 28 (c) e 29 (d). Ocorreu uma redução de 10,9%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 29. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

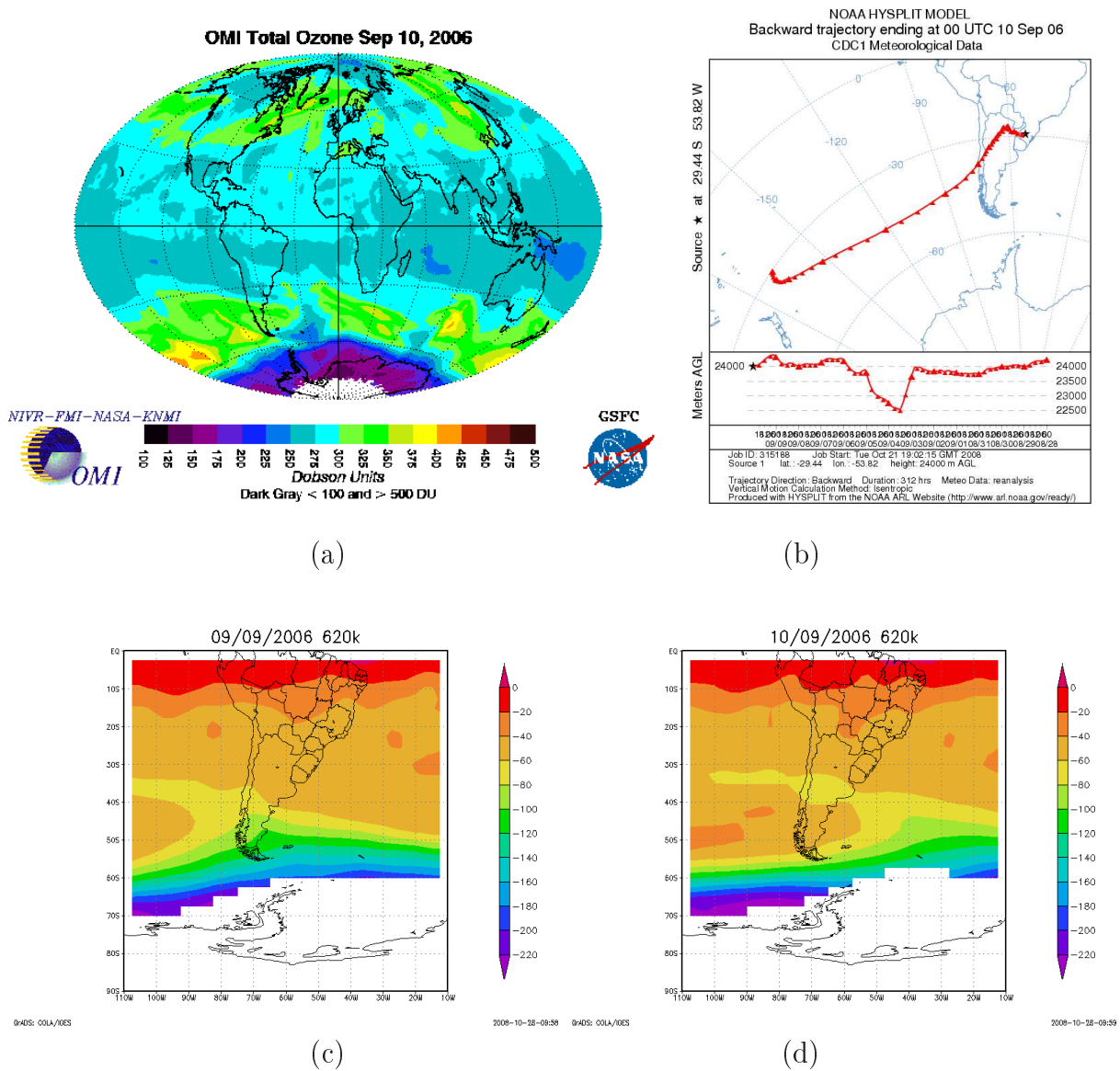


Figura B.13: Evento dos dias 10-12 de setembro de 2006. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 09 (c) e 10 (d). Ocorreu uma redução de 10,9%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 12. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

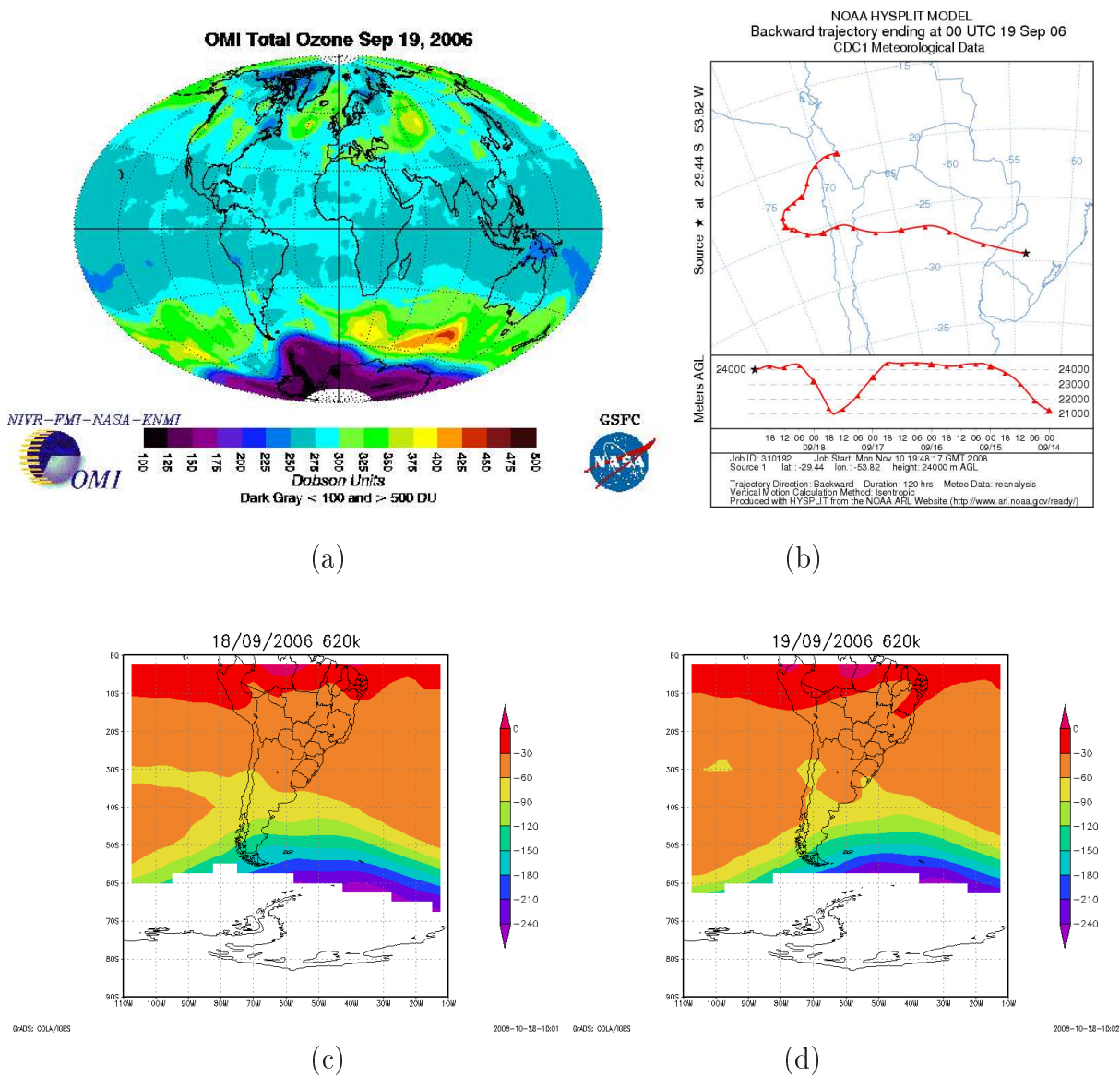


Figura B.14: Evento do dia 19 de setembro de 2006. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 18 (c) e 19 (d). Ocorreu uma redução de 11,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 19. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

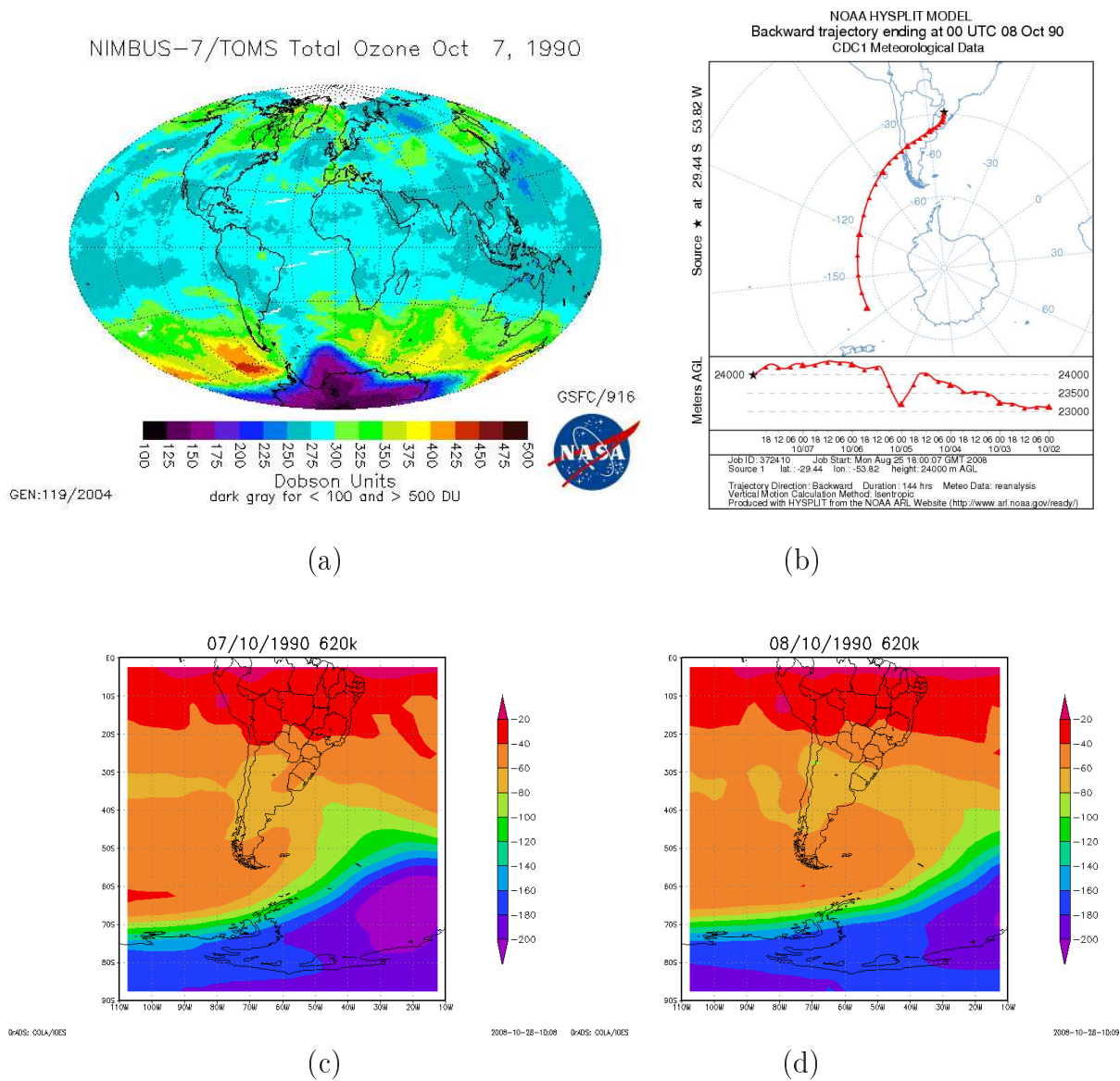


Figura B.15: Evento dos dias 07-11 de outubro de 1990. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 07 (c) e 08 (d). Ocorreu uma redução de 12%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 11. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

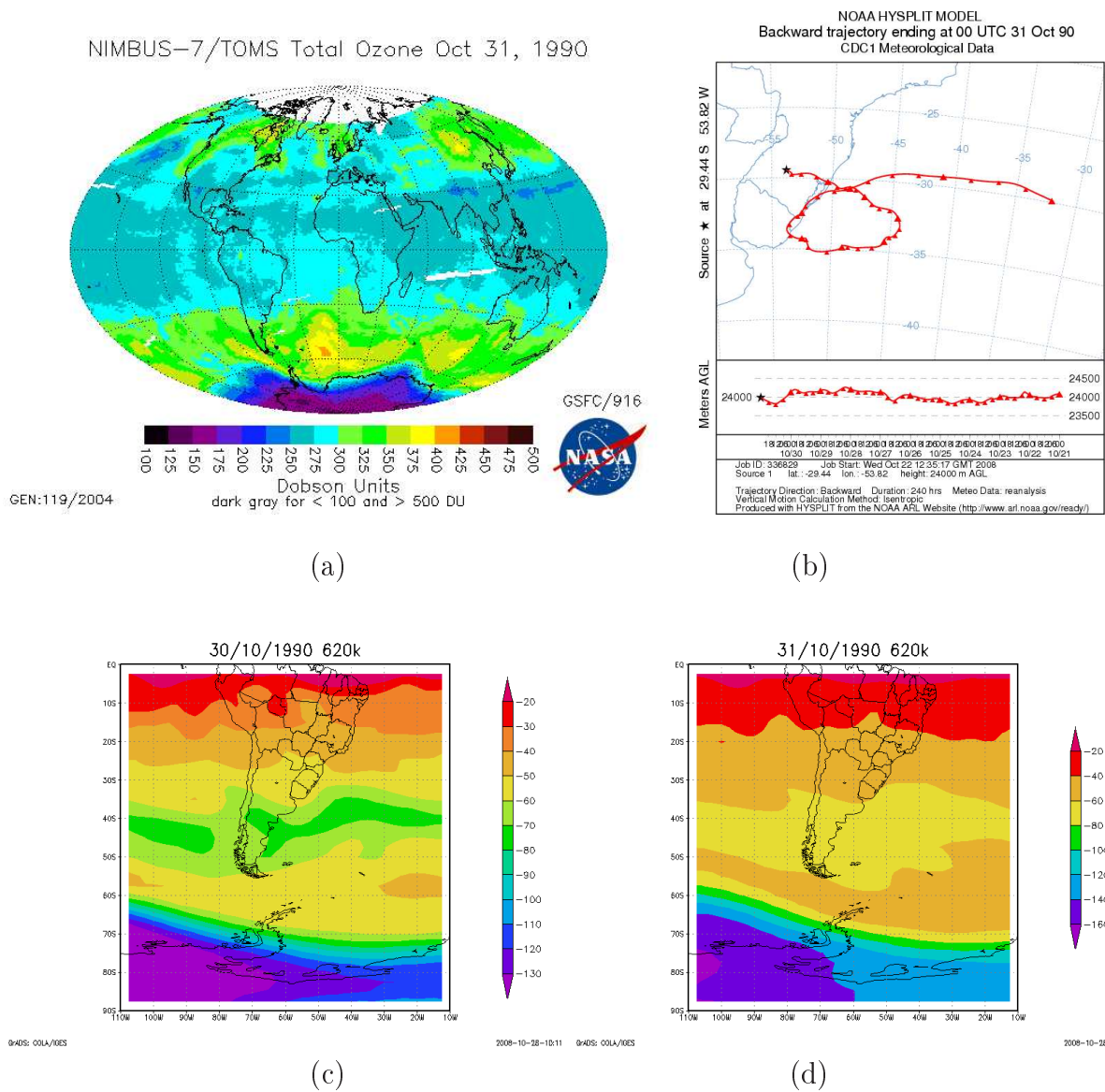


Figura B.16: Evento do dia 31 de outubro de 1990. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 30 (c) e 31 (d). Ocorreu uma redução de 9,2%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 31. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

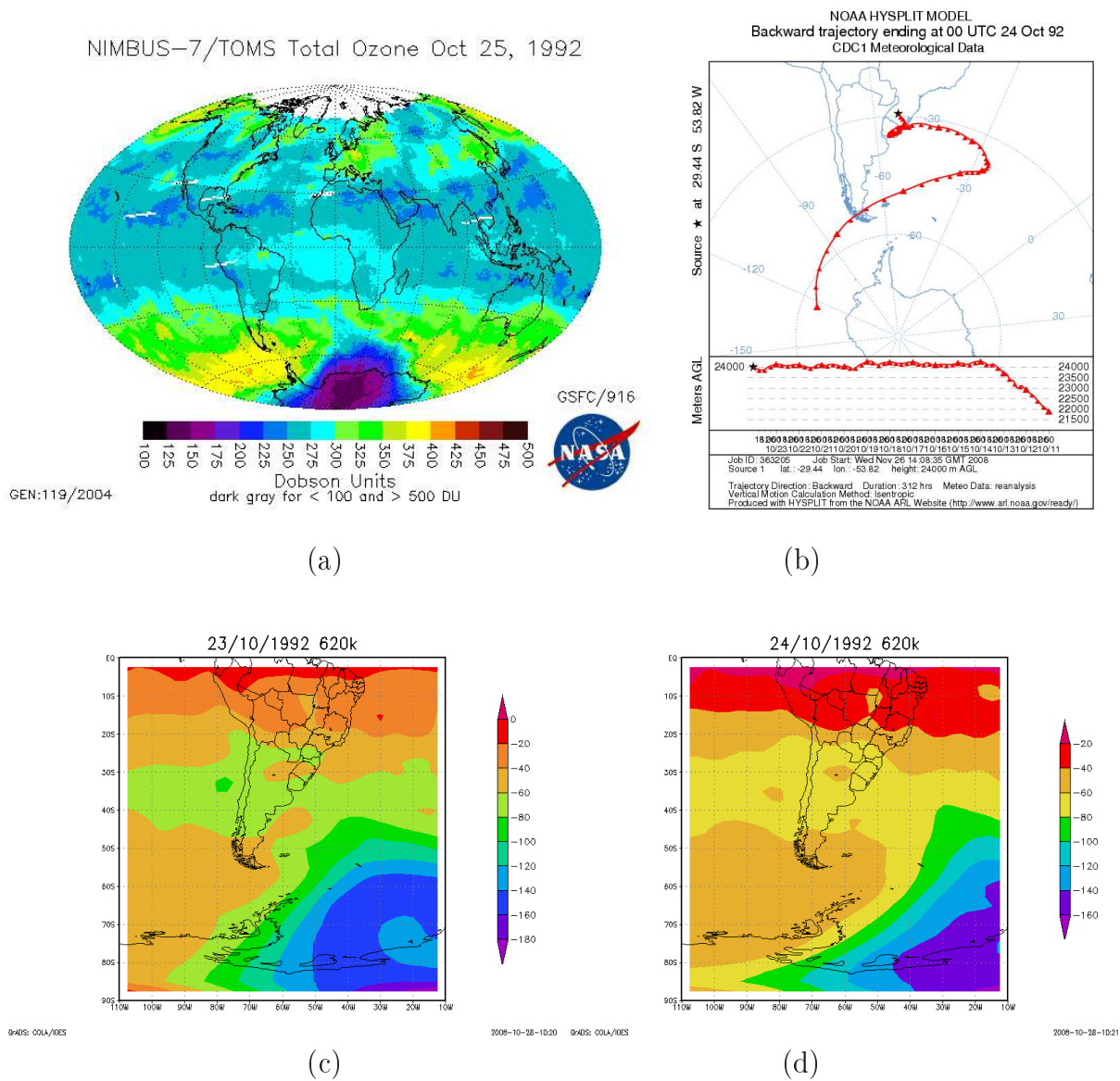


Figura B.17: Evento dos dias 24-26 de outubro de 1992. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 23 (c) e 24 (d). Ocorreu uma redução de 10,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 26. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

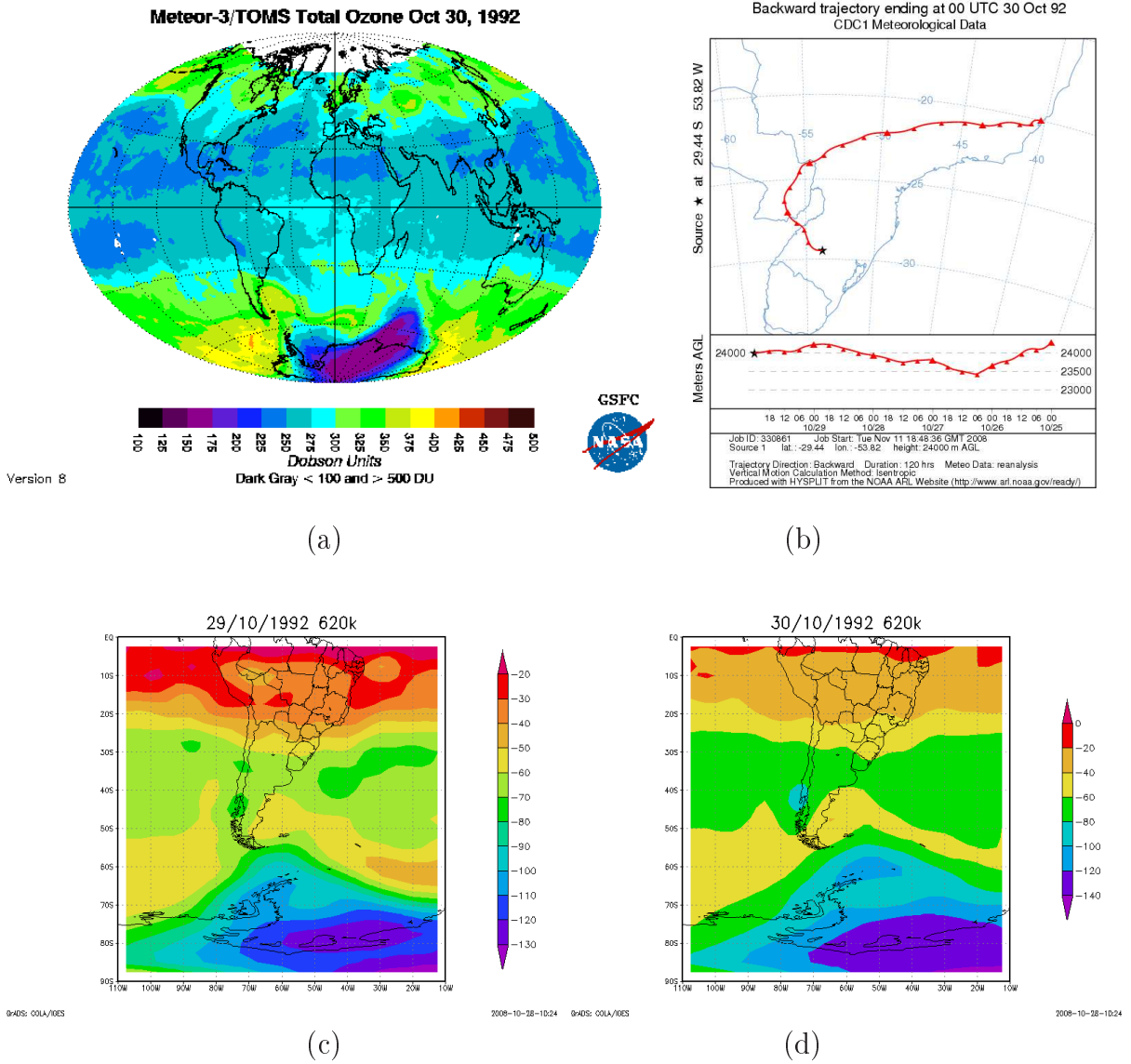


Figura B.18: Evento do dia 30 de outubro de 1992. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 23 (c) e 24 (d). Ocorreu uma redução de 10,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 30. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

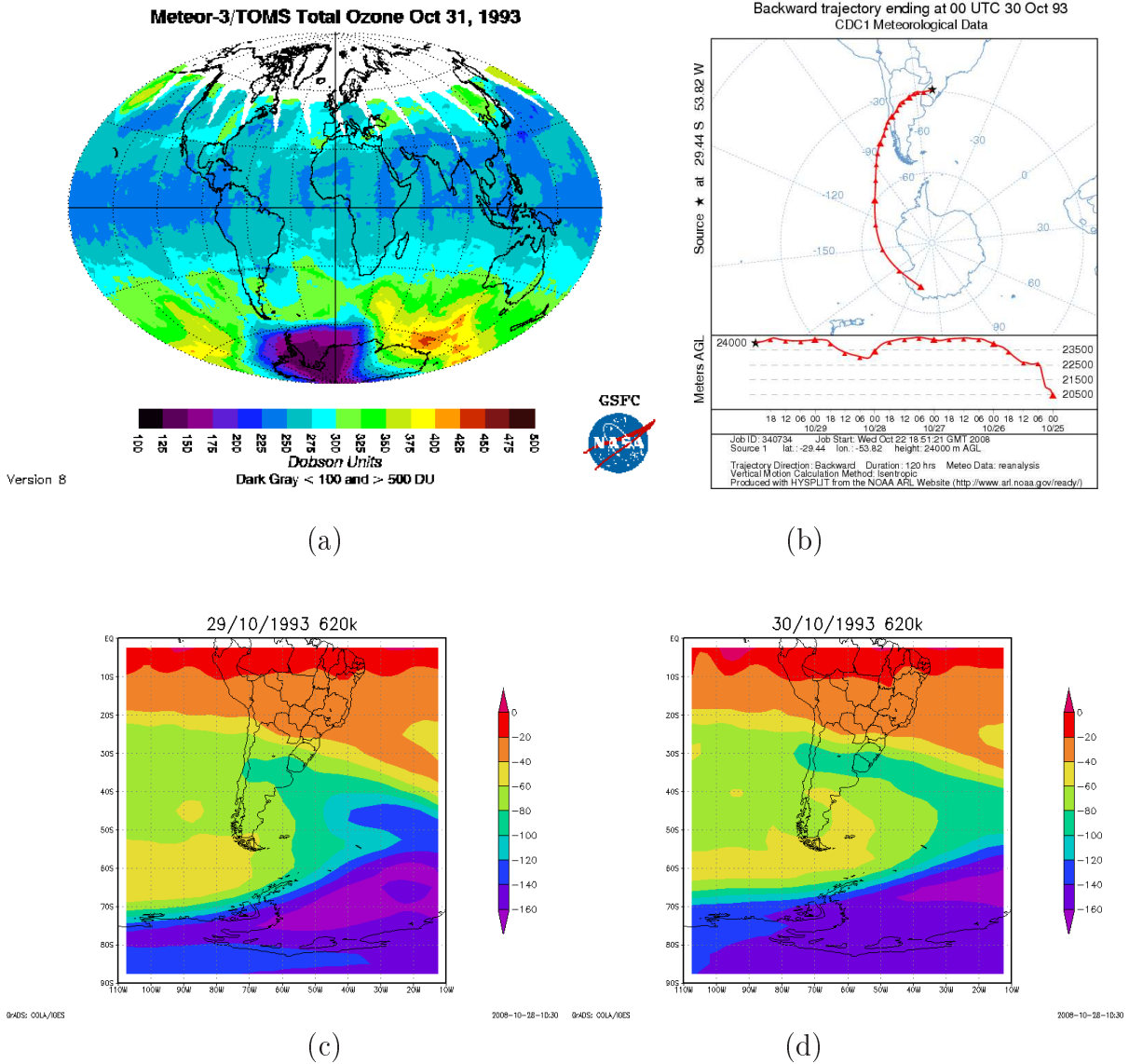
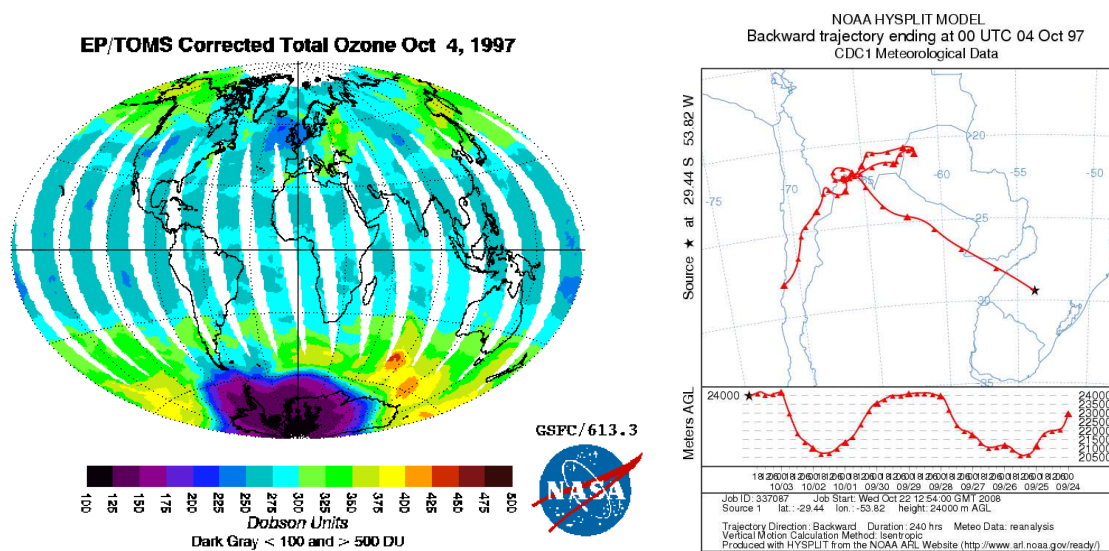
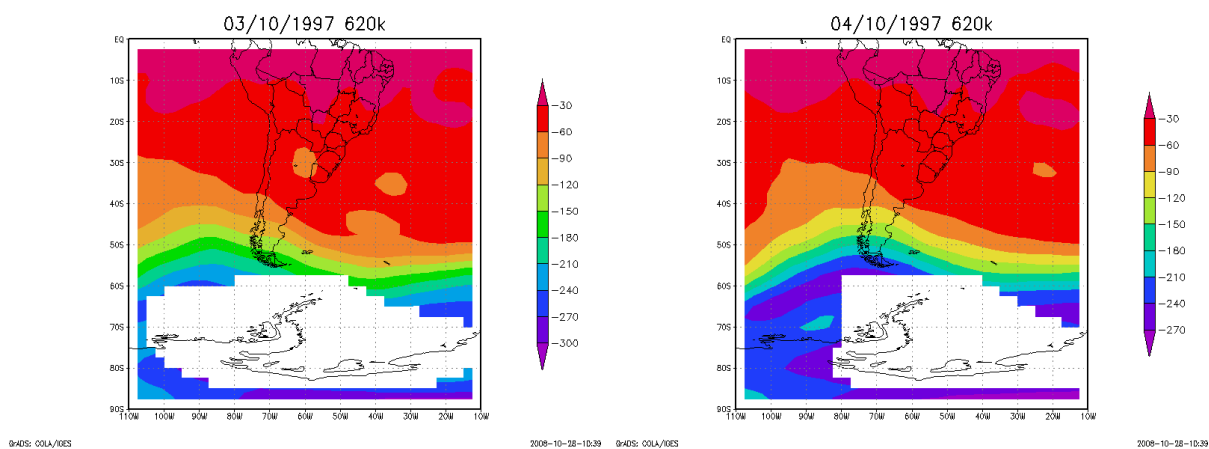


Figura B.19: Evento dos dias 30-31 de outubro de 1993. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 29 (c) e 30 (d). Ocorreu uma redução de 16,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 31. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.



(a)

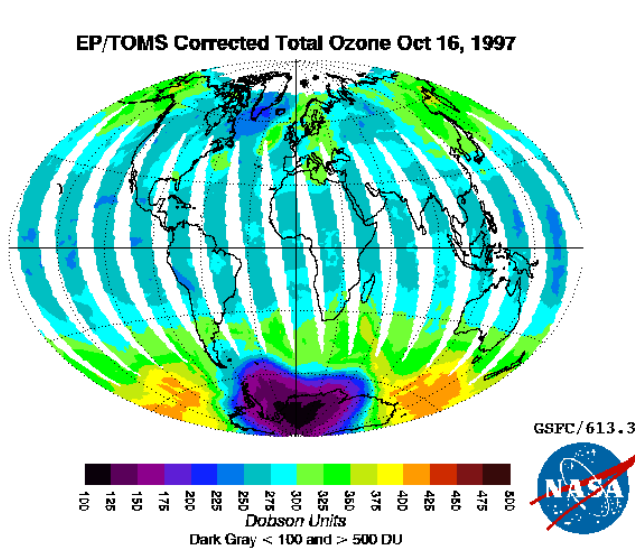
(b)



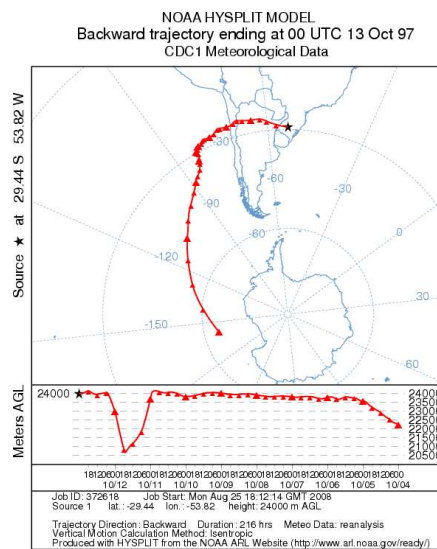
(c)

(d)

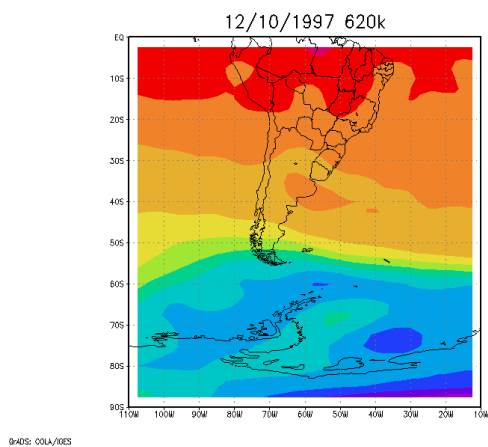
Figura B.20: Evento do dia 30-31 de outubro de 1997. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 03 (c) e 04 (d). Ocorreu uma redução de 9,2%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 04. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



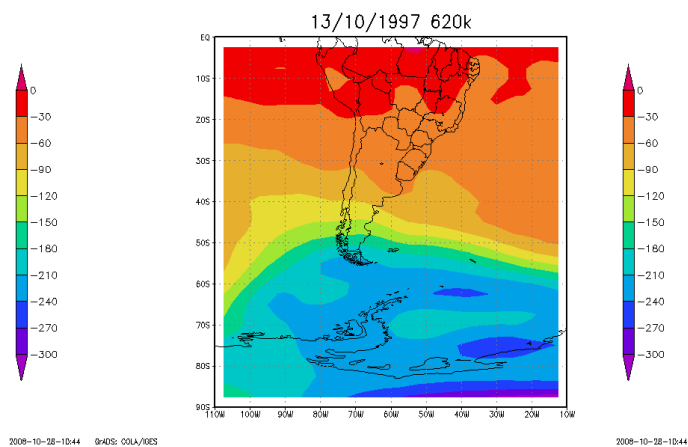
(a)



(b)

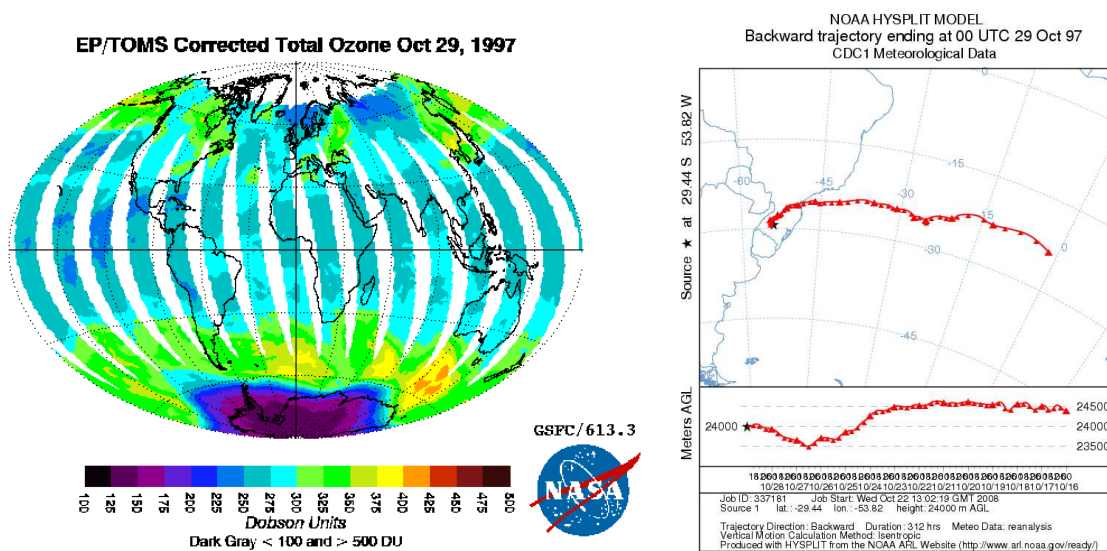


(c)



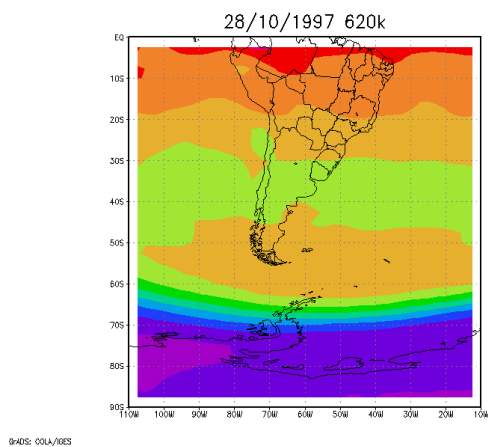
(d)

Figura B.21: Evento dos dias 13-16 de outubro de 1997. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 15 (c) e 16 (d). Ocorreu uma redução de 12,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 14. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

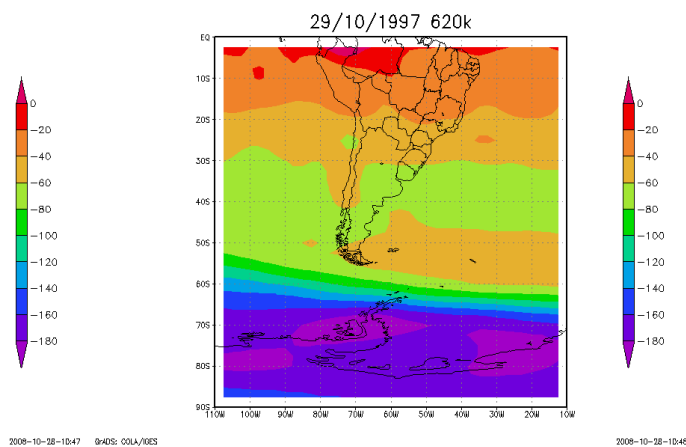


(a)

(b)



(c)



(d)

Figura B.22: Evento do dia 29 de outubro de 1997. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 28 (c) e 29 (d). Ocorreu uma redução de 9,5%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 29. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

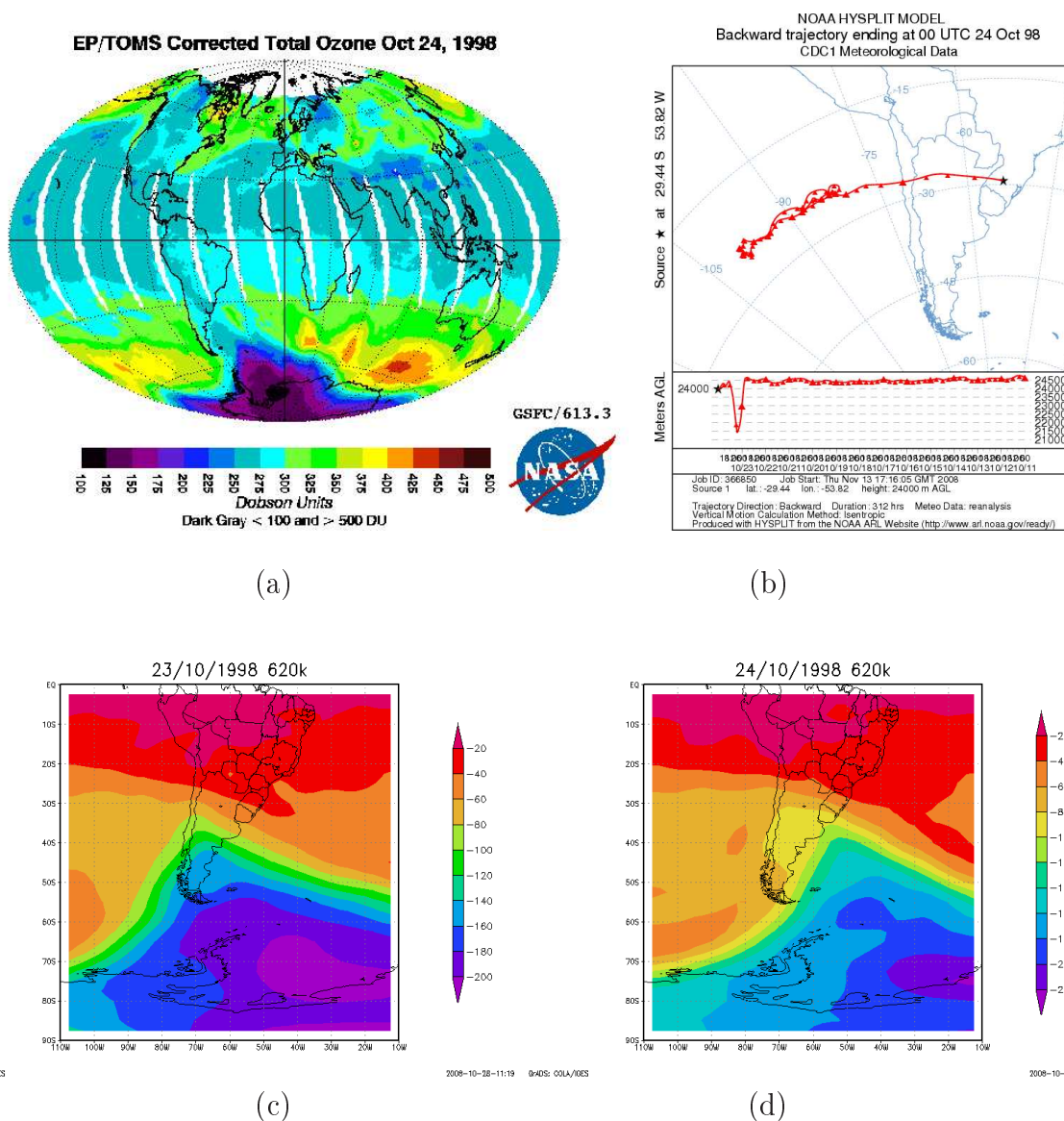


Figura B.23: Evento do dia 24 de outubro de 1998. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 23 (c) e 24 (d). Ocorreu uma redução de 11,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 24. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

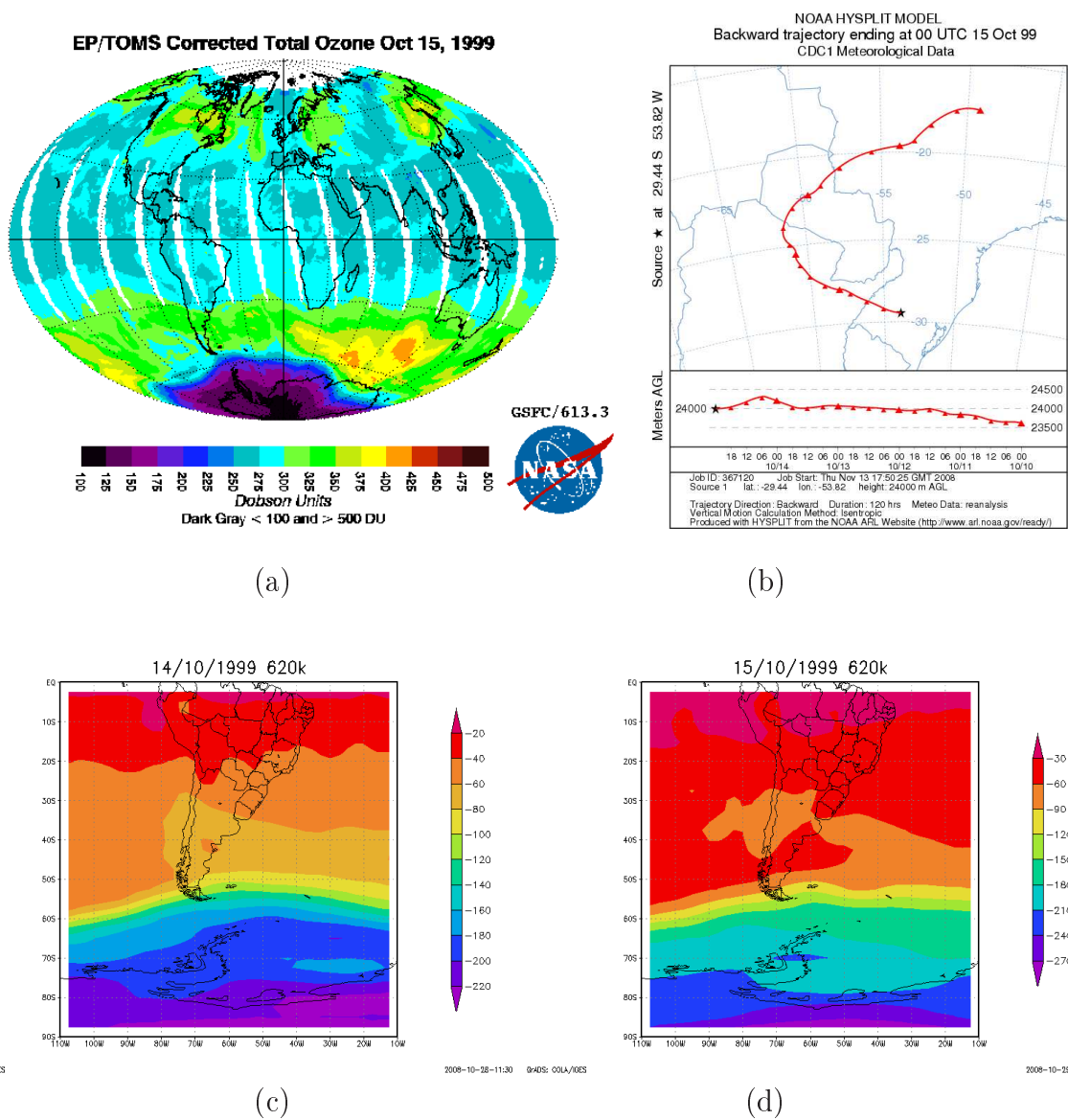


Figura B.24: Evento do dia 15 de outubro de 1999. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 14 (c) e 15 (d). Ocorreu uma redução de 10,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 15. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

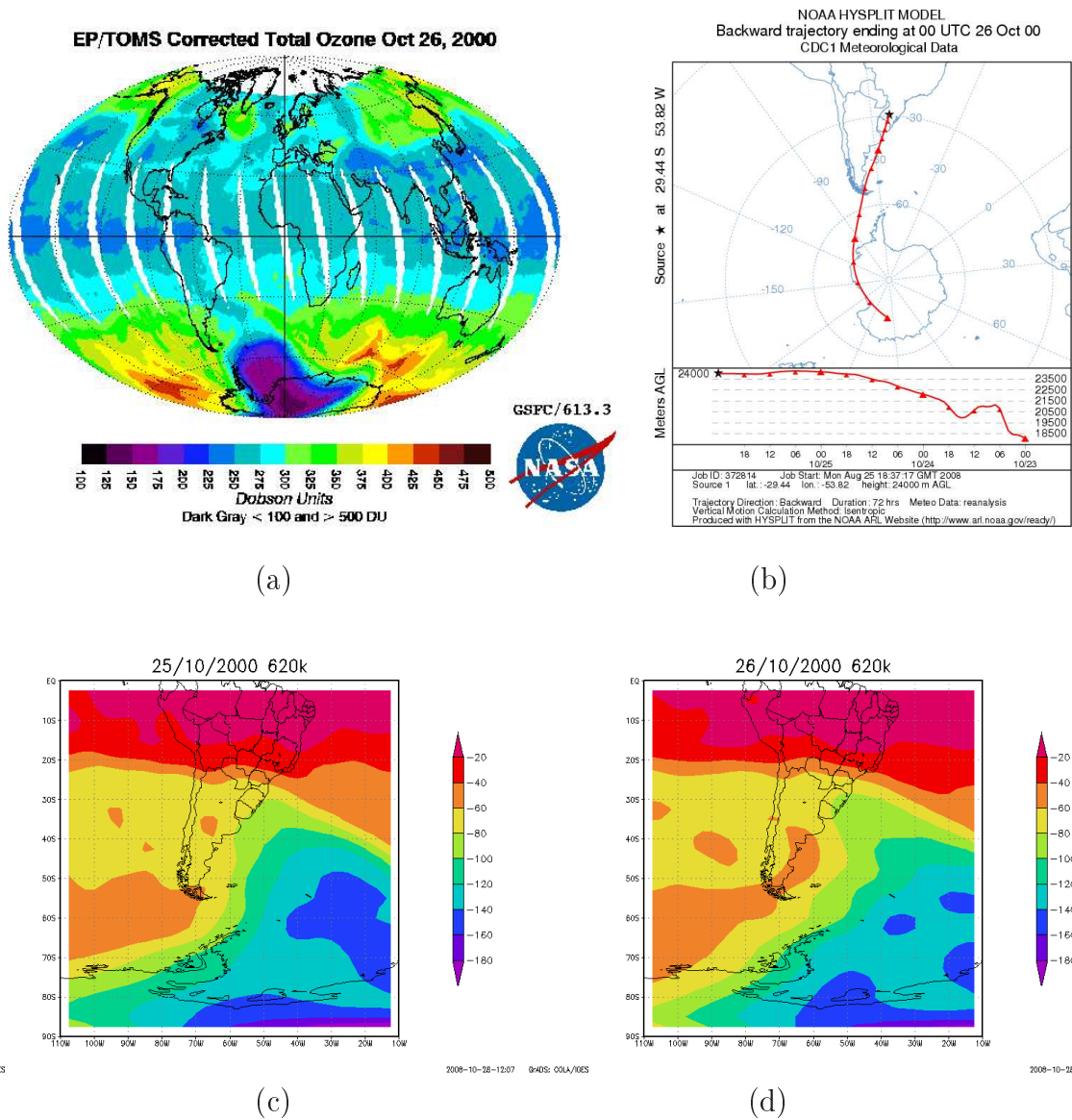


Figura B.25: Evento do dia 26 de outubro de 2000. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 25 (c) e 26 (d). Ocorreu uma redução de 10,3%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 26. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

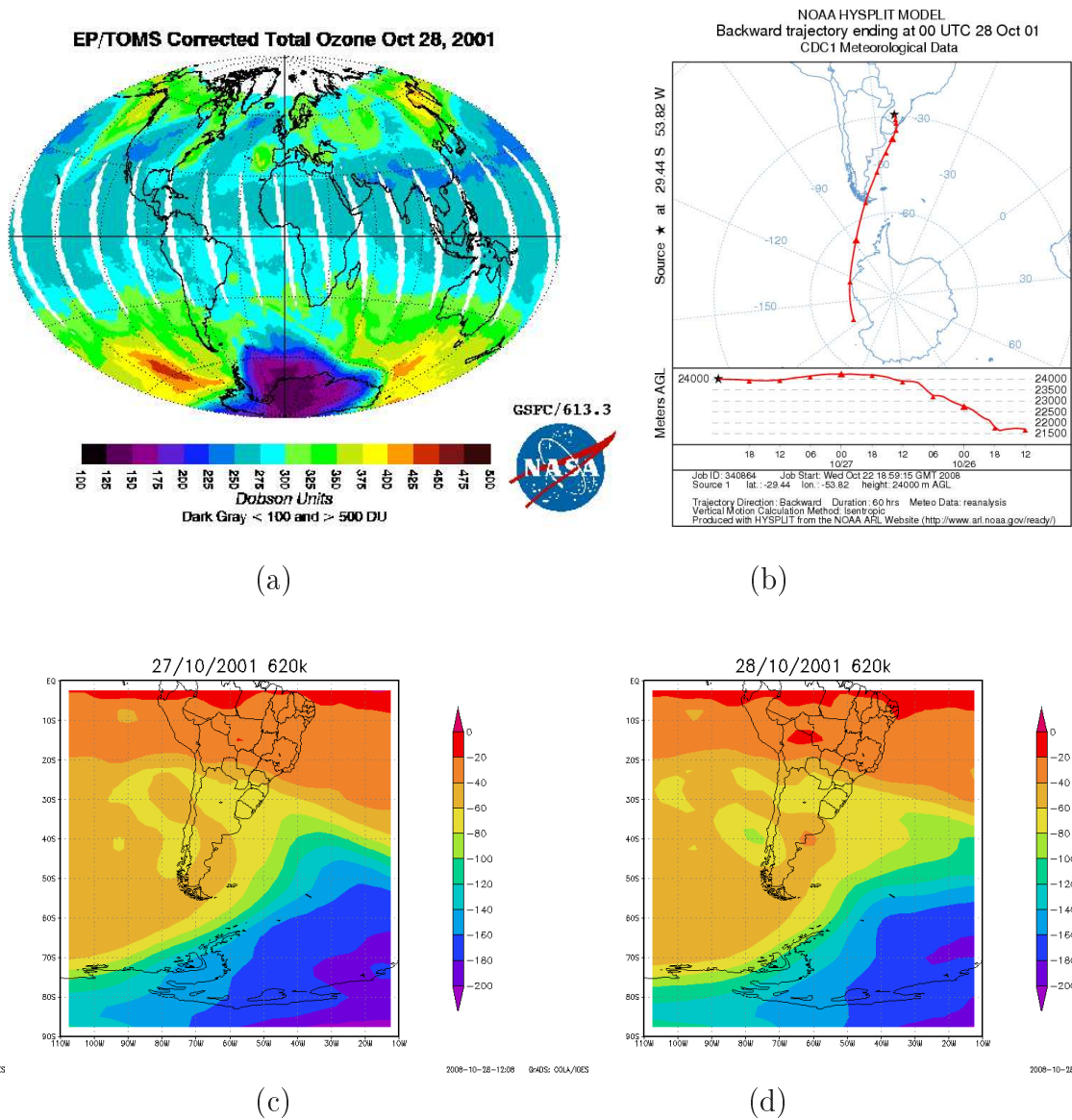
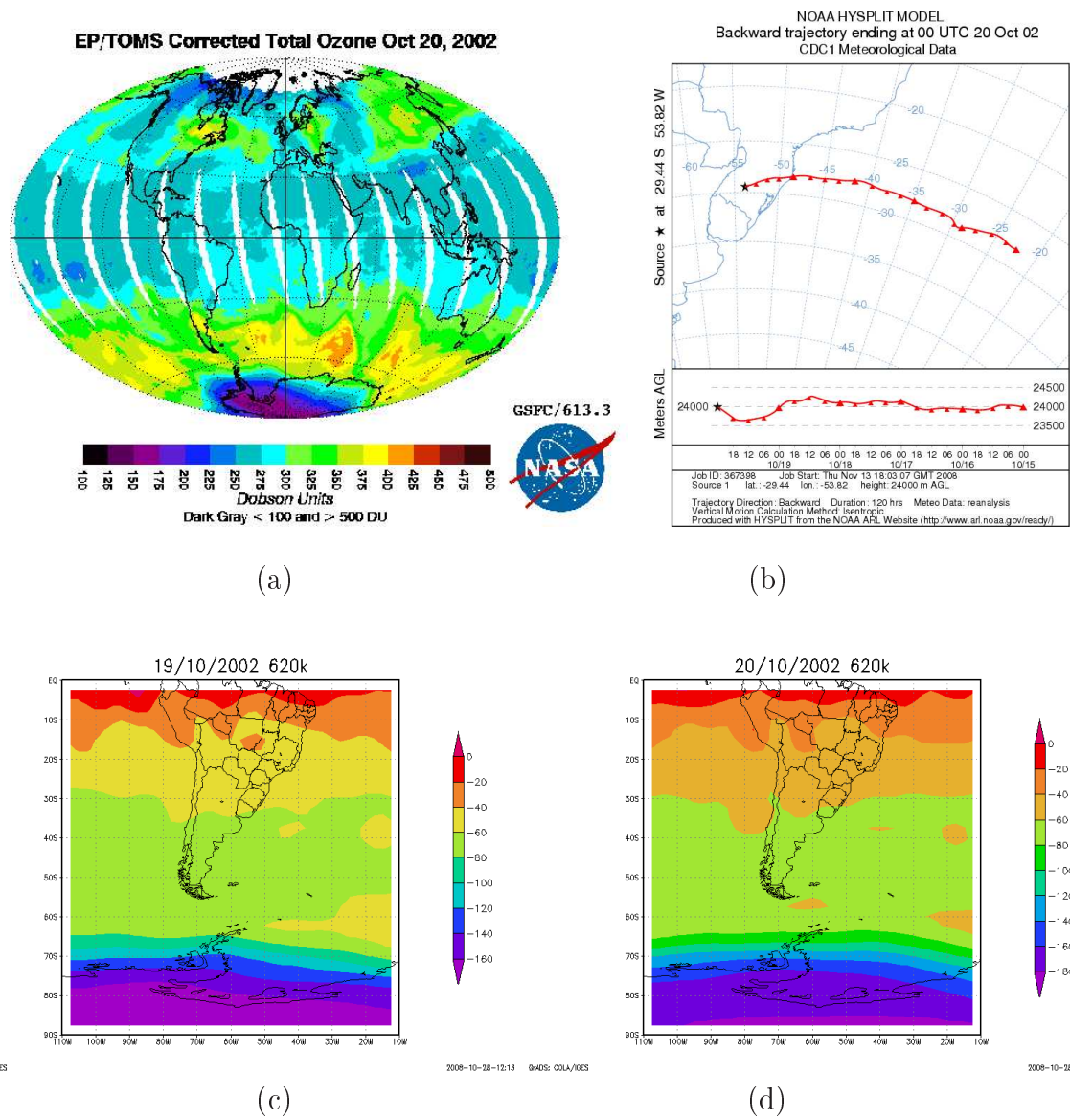


Figura B.26: Evento do dia 28 de outubro de 2001. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 27 (c) e 28 (d). Ocorreu uma redução de 9,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 28. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.



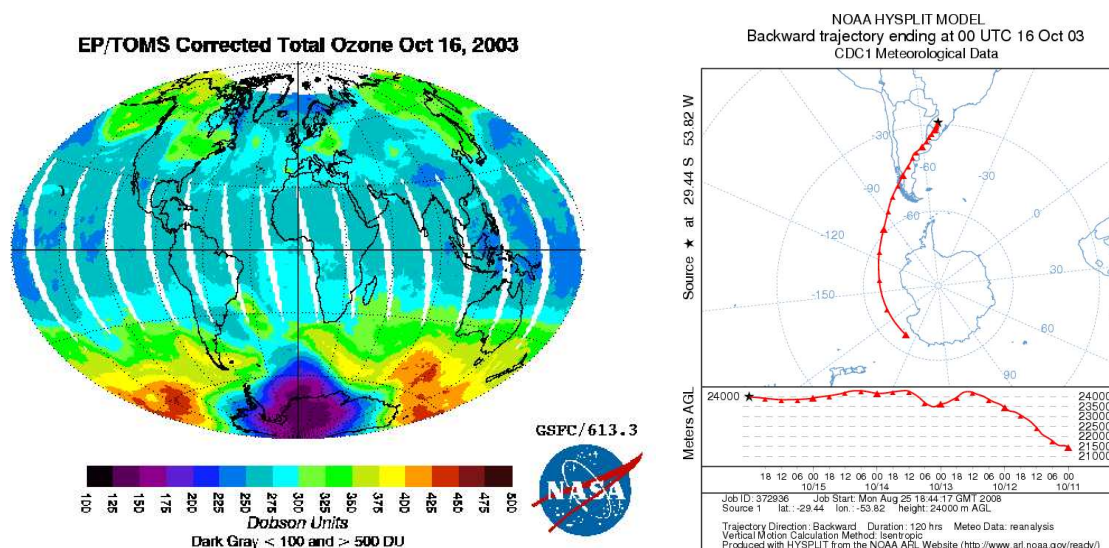
(a)

(b)

(c)

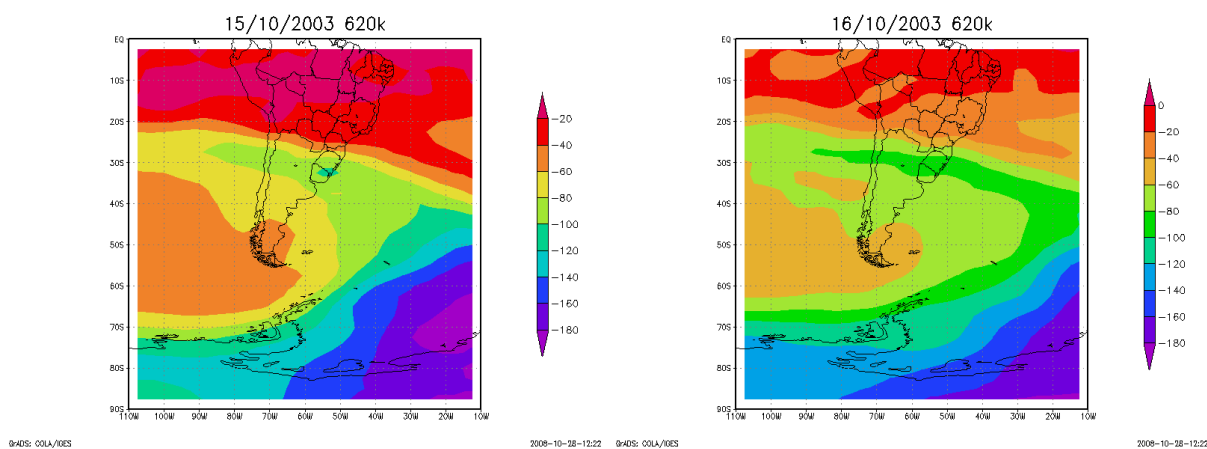
(d)

Figura B.27: Evento do dia 20 de outubro de 2002. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 19 (c) e 20 (d). Ocorreu uma redução de 11%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 20. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura B.28: Evento do dia 16 de outubro de 2003. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 15 (c) e 16 (d). Ocorreu uma redução de 13,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 16. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

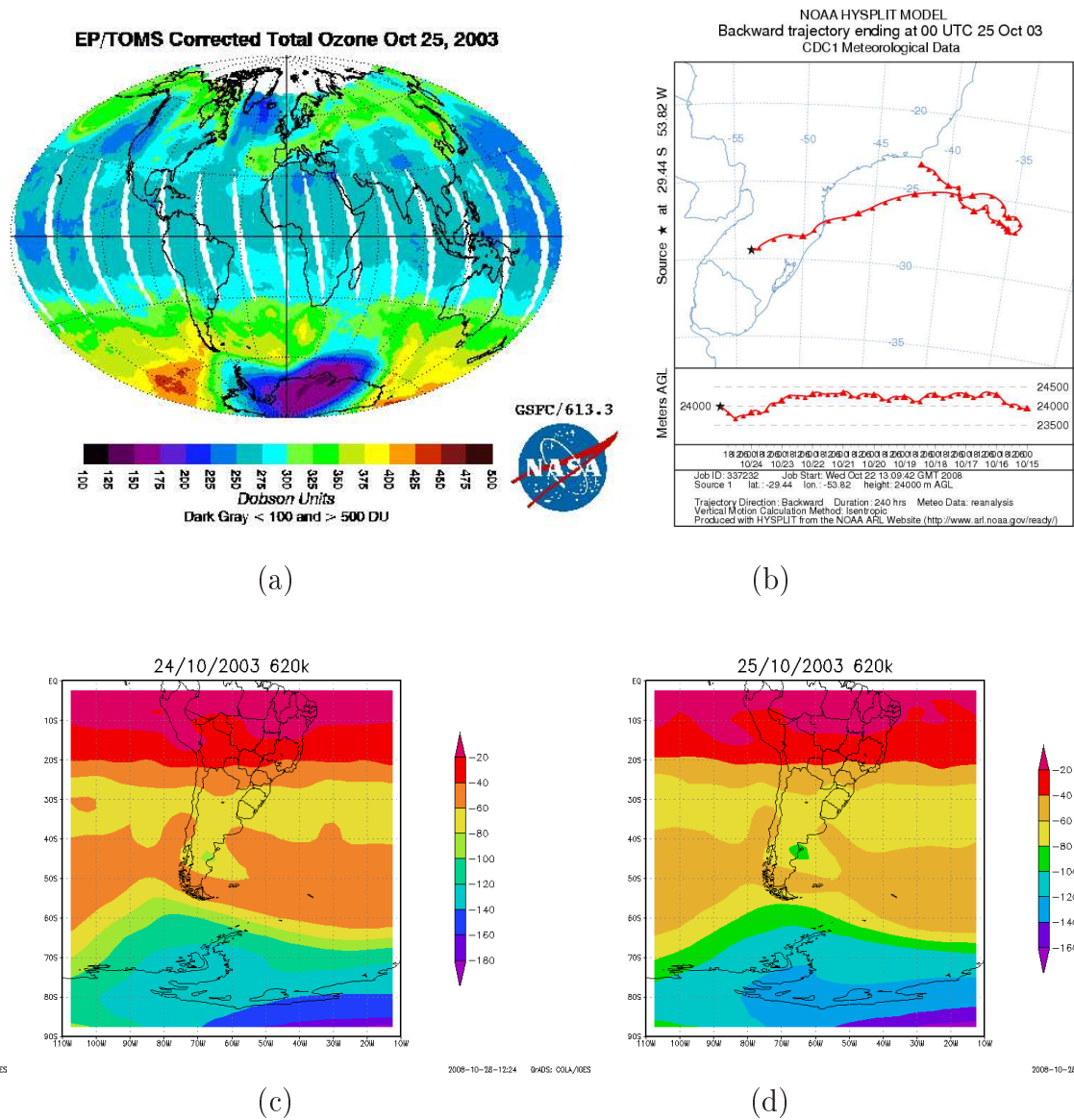


Figura B.29: Evento do dia 25 de outubro de 2003. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 24 (c) e 25 (d). Ocorreu uma redução de 13,3%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 25. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

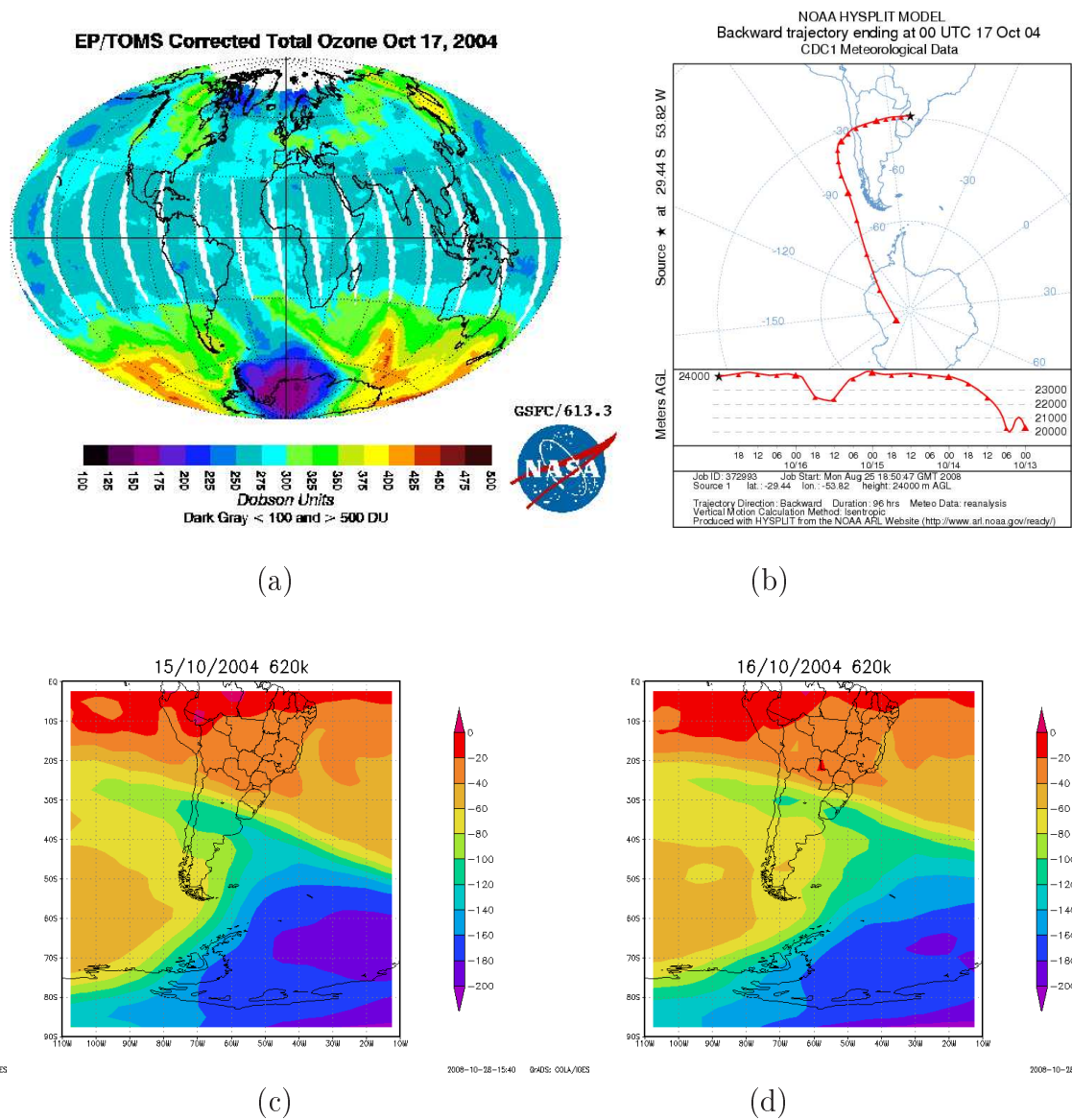
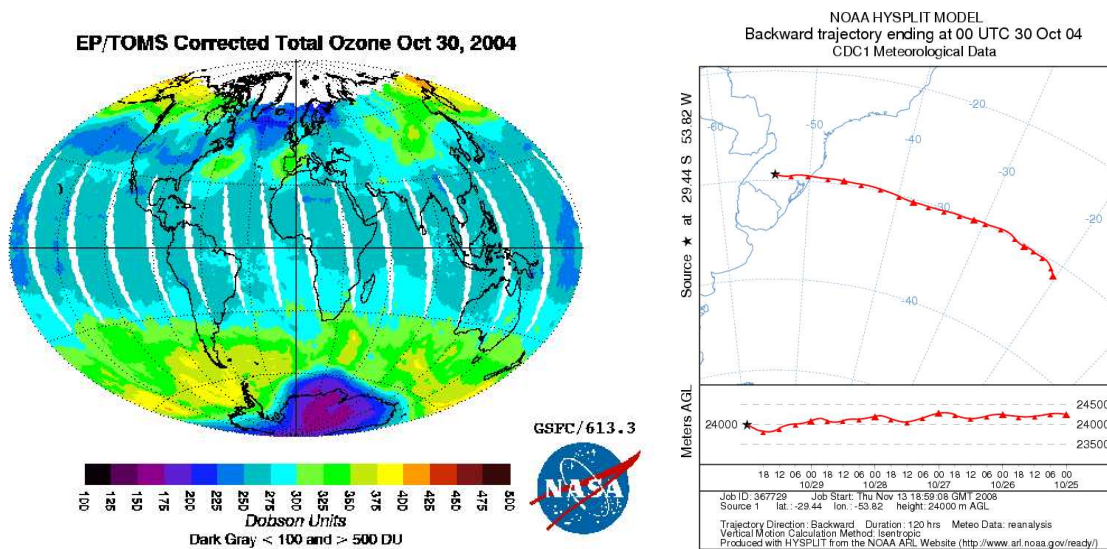
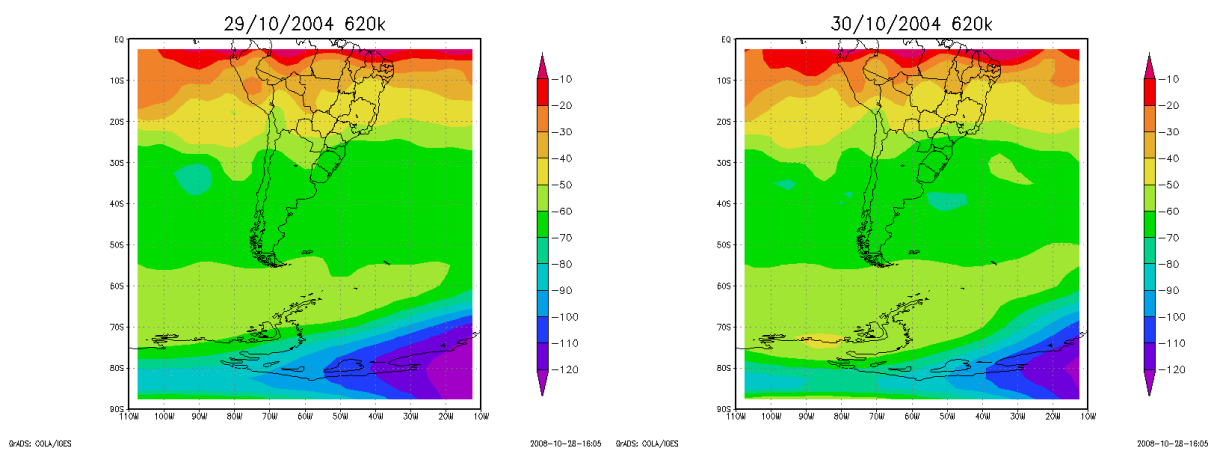


Figura B.30: Evento dos dias 16-17 de outubro de 2004. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 15 (c) e 16 (d). Ocorreu uma redução de 13,3%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 16. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.



(a)

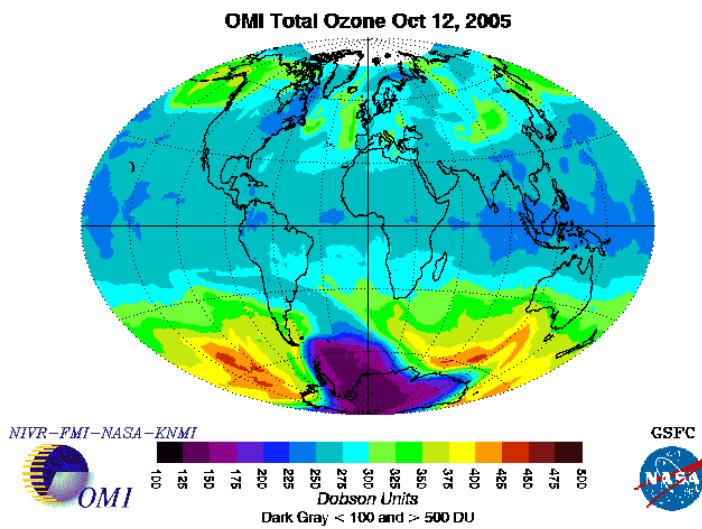
(b)



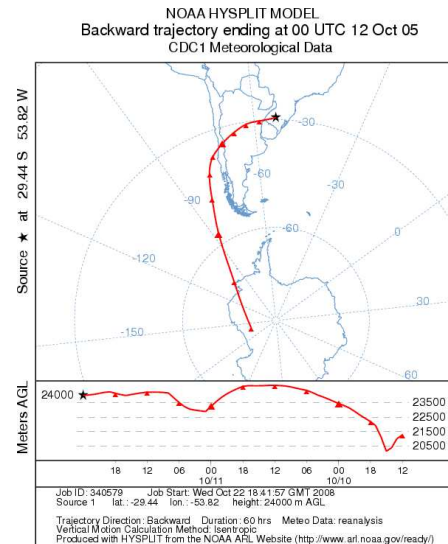
(c)

(d)

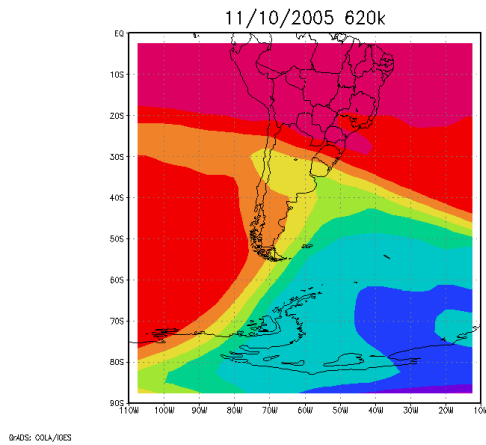
Figura B.31: Evento do dia 30 de outubro de 2004. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro TOMS (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 29 (c) e 30 (d). Ocorreu uma redução de 10,7%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 30. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.



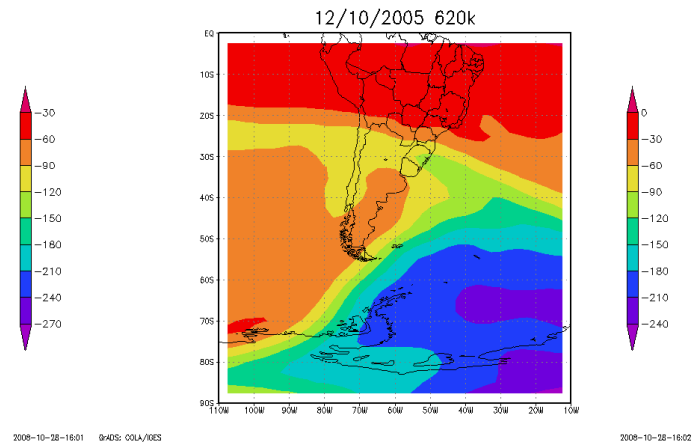
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura B.32: Evento do dia 12 de outubro de 2005. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 11 (c) e 12 (d). Ocorreu uma redução de 9%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 12. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

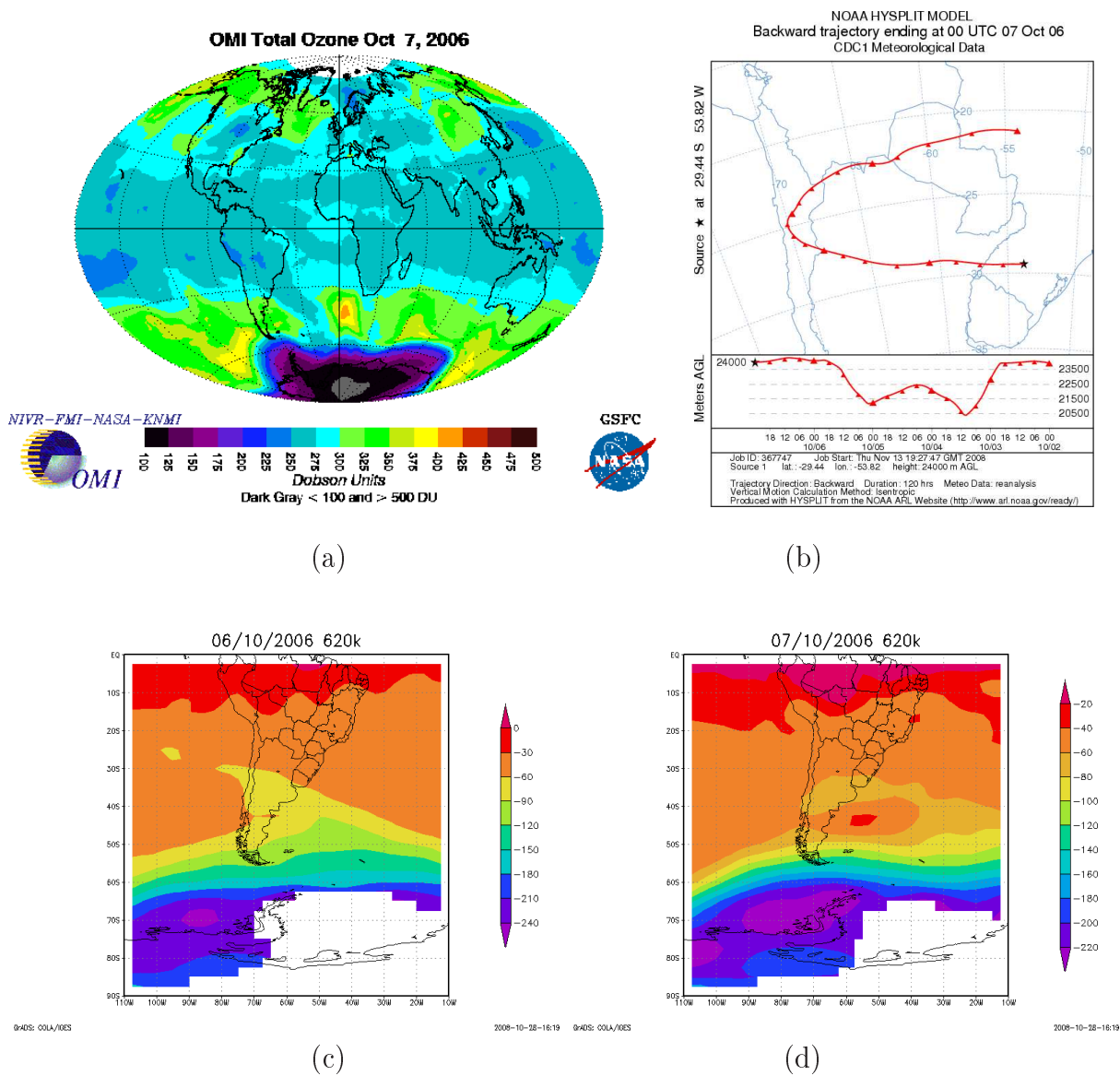


Figura B.33: Evento do dia 07 de outubro de 2006. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 06 (c) e 07 (d). Ocorreu uma redução de 13,6%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 07. Esse evento de mínimo **não** foi identificado como um efeito secundário.

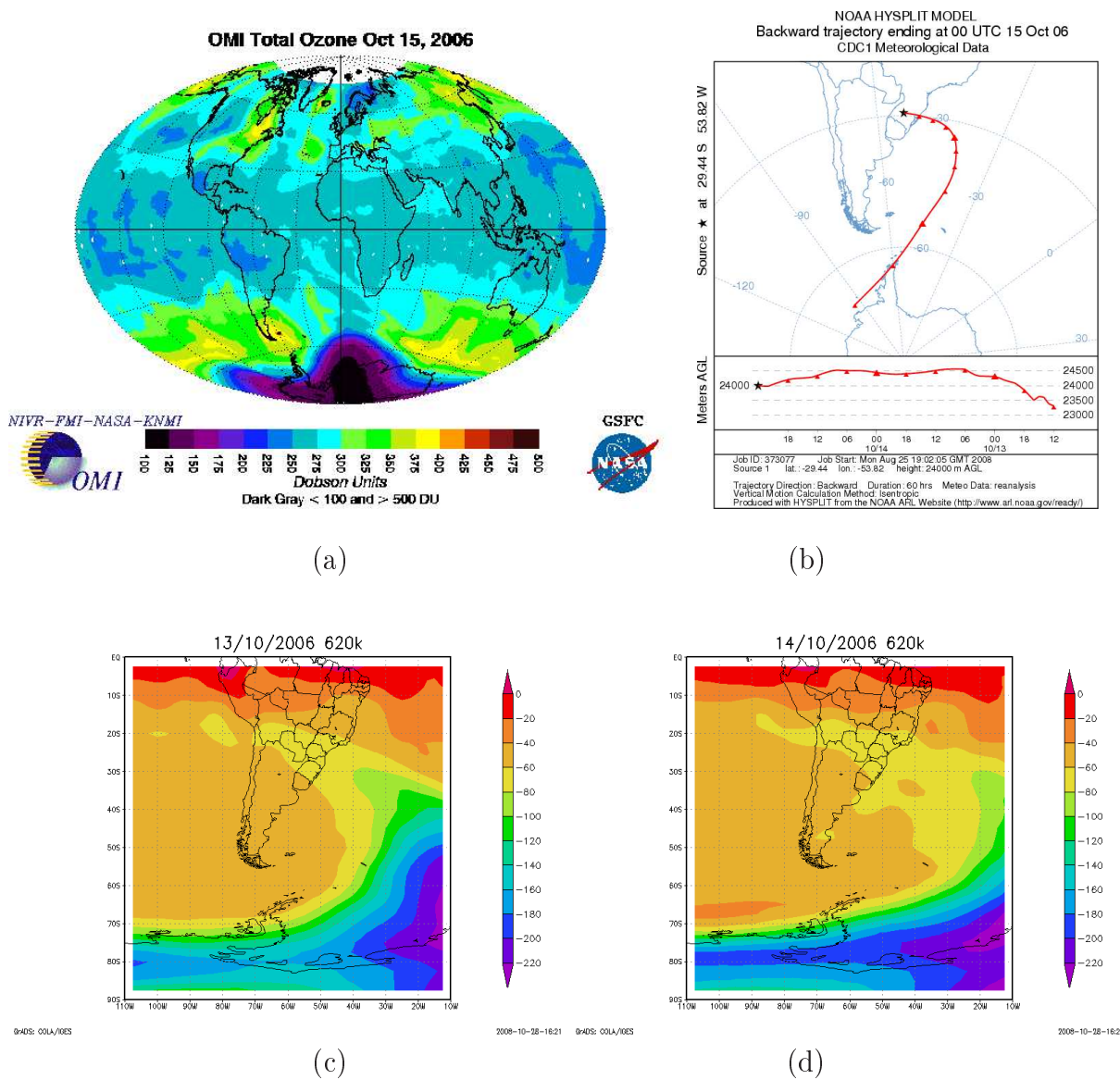


Figura B.34: Evento dos dias 14-15 de outubro de 2006. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 13 (c) e 14 (d). Ocorreu uma redução de 10,1%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 15. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

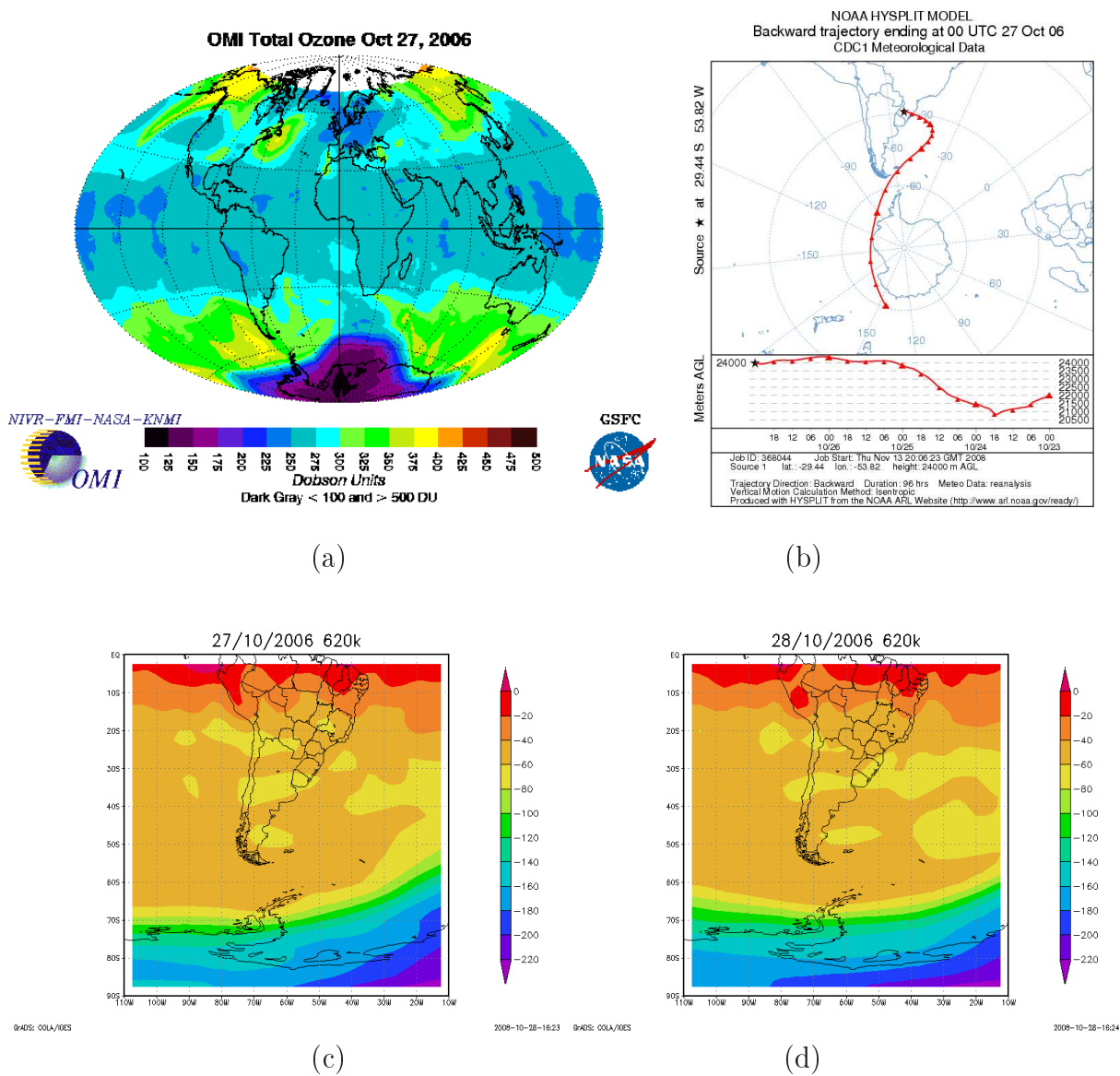


Figura B.35: Evento dos dias 27-29 de outubro de 2006. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 27 (c) e 28 (d). Ocorreu uma redução de 11,4%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 28. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.

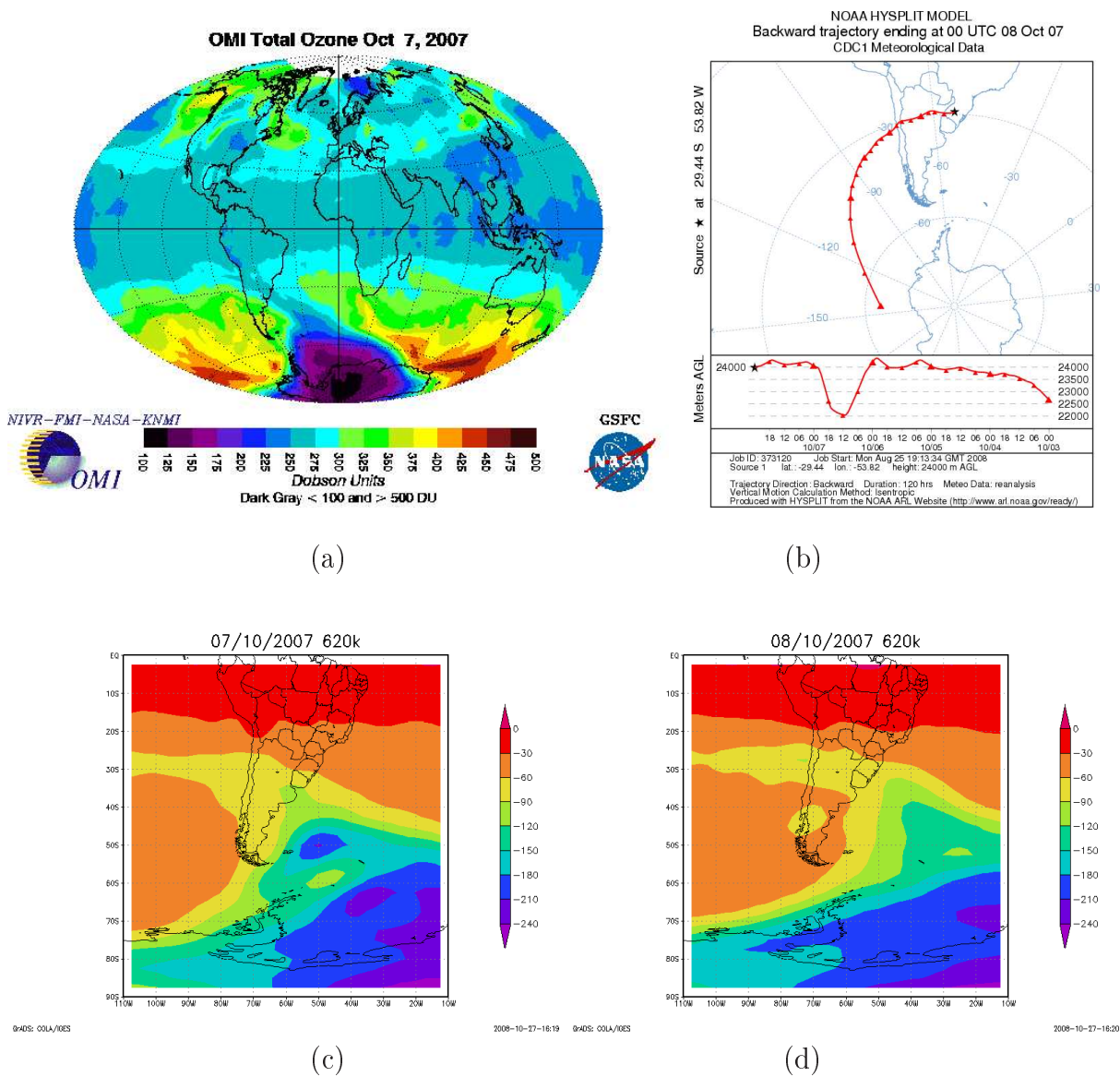


Figura B.36: Evento do dia 07 de outubro de 2007. Parte superior: imagem gerada a partir de dados do espectrofotômetro OMI (a), trajetória retroativa gerada com o programa READY que implementa o modelo HYSPLIT (b). Parte inferior: mapas de vorticidade potencial para os dias 07 (c) e 08 (d). Ocorreu uma redução de 11,9%, no conteúdo integrado de ozônio, no dia 07. A análise indica que esse evento de mínimo é um efeito secundário.