



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DOS EVENTOS DE EFEITOS
SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE
O SUL DO BRASIL**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/INPE - CNPq/MCT**

PROCESSO Nº 102549/2011-7

**Natália Machado Crespo - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Troposfera – Estratosfera, Radiação Ultravioleta e
Ozônio Atmosférico**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CRS/CCR/INPE - MCT

E-mail: nataliagates@gmail.com

**Dr^a. Neusa Paes Leme – Orientadora
Centro Regional Nordeste – CRN/CCR/INPE – MCT
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INPE - MCT**

E-mail: nleme@crn.inpe.br

Santa Maria, Julho 2011

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT

PROJETO

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DOS EVENTOS DE EFEITOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE O SUL DO BRASIL

PROCESSO Nº 102549/2011-7

Relatório elaborado por Natália Machado Crespo relatando as atividades executadas por:

Natália Machado Crespo – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
E-mail: nataliagates@gmail.com

Dr^a. Neusa Paes Leme - Orientadora
Centro Regional Nordeste – CRN/CCR/INPE – MCT
E-mail: nleme@crn.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch – Co-Orientador
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE – MCT
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Prof^a. Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro – Co-Orientadora
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM
E-mail: damaris@ufsm.br

DADOS DE IDENTIFICAÇÃO

Título:

ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DOS EVENTOS DE EFEITOS SECUNDÁRIOS DO BURACO DE OZÔNIO ANTÁRTICO SOBRE O SUL DO BRASIL

Processo CNPq N°: 102549/2011-7

Bolsista:

Natália Machado Crespo

Curso de Meteorologia

Centro de Ciências Naturais e Exatas - CCNE/UFSM

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE - MCT

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Orientador:

Dr^a. Neusa Paes Leme

Centro Regional Nordeste – CRN/CCR/INPE – MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT

Co-Orientadores:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE - MCT

Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT - UFSM

Local de Trabalho/Execução do projeto:

Laboratório de Troposfera - Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico - CRS/CCR/INPE - MCT

Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE - MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito do Convênio INPE - UFSM, através do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE - MCT e do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT/UFSM.



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Grupo de Pesquisa
**Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação
- Energias Renováveis**

IdentificaçãoRecursos HumanosLinhas de PesquisaIndicadores do Grupo**Identificação****Dados básicos**

Nome do grupo: Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis

Status do grupo: **certificado pela instituição**

Ano de formação: 1992

Data do último envio: 14/07/2011 15:27

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - 
Damaris Kirsch Pinheiro


Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE **Unidade:** Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

CEP: 97110970

Cidade: Santa Maria

UF: RS

Telefone: 33012026

Fax: 33012030

Home page: http://

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo de Pesquisa - Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE - MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, Latitude: 29°26'24"S, Longitude: 53°48'38"W, Altitude 488m, em São Martinho da Serra, RS, colabora com pesquisadores do INPE(CEA e CPTEC), da USP(DM/ICB e IAG), do DBG/CB-UFRN, do LACESM-UFSM e internacionais: Japão (Universidades de Takushoku e Rikkyo) e EUA(NASA). Linhas de Pesquisas: CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS: OZÔNIO x RADIAÇÃO, ENERGIAS RENOVÁVEIS. Pesquisa: a composição, a estrutura, os processos físicos-químicos, dinâmicos, eletricidade atmosférica e(TLEs), o potencial energético renovável e o transporte de energia, com medidas in situ e fenômenos: Atmosféricos, Biosféricos e Genéticos. O Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico - PMOA, criado por Nelson Jorge Schuch em maio de 1992, executado em Convênio: CRS/INPE-MCT - LACESM/CT-UFSM, objetiva: a análise de sua concentração; o comportamento de sua "camada", a +/- 25 Km no RS, suas correlações com: Radiação Ultravioleta (UV-A, UV-B); gases traçadores (NO₂ / SO₂ / CO₂); aerossóis - queimadas; dados físicos e meteorológicos de sondagens troposféricas e estratosféricas; precipitação de partículas na Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS. Pesquisa e monitoramento da Radiação Ultravioleta - UV: UV-A (400-320 nm), UV-B (320 e 280 nm). Pesquisa da sensibilidade à Radiação UV: de seu Espectro de

Ação; obtenção de Dose; do Índice Ultravioleta, I-UV; efeitos biológicos da Radiação UV-B em: nível celular, humanos, animais, vegetais, ecossistemas aquáticos. Pesquisa de Energias Renováveis com ênfase nas fontes solar e eólica. Vice-Líderes: Damaris K. Pinheiro, Marcelo B. da Rosa, Enio B. Pereira.

Recursos humanos	
Pesquisadores	Total: 21
André Passaglia Schuch	Fernando Ramos Martins
Augusta Maria Passaglia Schuch	Lucymara Fassarella Agnez
Barclay Robert Clemesha	Marcelo Barcellos da Rosa
Caitano Luiz da Silva	Marcelo Pizzuti Pes
Carlos Frederico Martins Menck	Nelson Jesuz Ferreira
Damaris Kirsch Pinheiro - (líder)	Nelson Jorge Schuch - (líder)
Daniel Vinicius Fiorin	Neusa Maria Paes Leme
Enio Bueno Pereira	Nivaor Rodolfo Rigozo
Ezequiel Echer	Plínio Carlos Alvalá
Fernanda de São Sabbas Tavares	Ricardo André Guarnieri
Fernando Luís Guarnieri	
Estudantes	Total: 12
Cristiano Sarzi Machado	Naiara Tatiane Hupfer
Eduardo Weide Luiz	Natália Machado Crespo
Elenice Kall	Rodrigo Brackmann
Lucas Lopes Costa	Rodrigo da Rosa Azambuja
Lucas Vaz Peres	Tardelli Ronan Coelho Stekel
Marcio Ceconi	William do Nascimento Guareschi
Técnicos	Total: 2
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação	
Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função	
Linhas de pesquisa	Total: 2
<ul style="list-style-type: none">• Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação• Energias Renováveis	
Empresas associadas ao grupo	Total: 0
Indicadores de recursos humanos do grupo	
Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)	21
Estudante(s)	12
Técnico(s)	2

Linha de Pesquisa Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação

Linha de pesquisa

Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação

Nome do grupo: [Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis](#)

Palavras-chave: Efeitos Biológicos da Radiação Solar - UV; Espessuras Óticas de Aerossóis; Monitoramento Ambiental; Ozônio Estratosférico; Ozônio Troposférico; Radiação Solar e Ultravioleta - UV;

Pesquisadores:

[André Passaglia Schuch](#)
[Augusta Maria Passaglia Schuch](#)
[Barclay Rober Clemesha](#)
[Caitano Luiz da Silva](#)
[Carlos Frederico Martins Menck](#)
[Damaris Kirsch Pinheiro](#)
[Daniel Vinicius Fiorin](#)
[Ezequiel Echer](#)
[Fernanda São Sabbas](#)
[Fernando Luis Guarnieri](#)
[Lucymara Fassarella Agnez Lima](#)
[Marcelo Barcellos da Rosa](#)
[Nelson Jesus Ferreira](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Neusa Maria Paes Leme](#)
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)
[Plínio Carlos Alvalá](#)
[Ricardo André Guarnieri](#)

Estudantes:

[Cristiano Sarzi Machado](#)
[Elenice Kall](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Lucas Vaz Peres](#)
[Marcio Ceconi](#)
[Naiara Tatiane Hupfer](#)
[Natália Machado Crespo](#)
[Rodrigo da Rosa Azambuja](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Ozônio; Ozônio;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Fenômenos Físico - Químicos da Atmosfera;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Influência na Radiação UV;

Setores de aplicação:

Produtos e Serviços Voltados Para A Defesa e Proteção do Meio Ambiente, Incluindo O Desenvolvimento Sustentado

Objetivo:

Monitoramentos: Ozônio, Radiação Solar, Ultravioleta: UV-A (400-320 nm), UV-B (320-280nm), efeitos biológicos-genéticos. Aeronomia dos fenômenos físico-químico, dinâmica, eletricidade atmosférica e (TLEs). Análise da concentração do Ozônio; comportamento de sua "camada", a +/- 25 Km no RS, suas correlações com: Radiação Ultravioleta (UV-A, UV-B); gases traçadores; aerossóis; dados de sondagens troposféricas e estratosféricas; precipitação de partículas na AMAS. Vice-Líder: Damaris K. Pinheiro

AGRADECIMENTOS

A aluna agradece especialmente:

A Orientadora Dr^a. Neusa Paes Leme Pesquisadora do Centro Regional Nordeste – CRN/CCR/INPE pela orientação;

Ao Co-Orientador Dr. Nelson Jorge Schuch pelos ensinamentos e correções;

A Co-Orientadora Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro, pela ajuda no desenvolvimento do projeto, pelo seu incentivo e encorajamento à bolsista, apoiando seu crescimento e por acreditar na sua capacidade;

Aos colegas integrantes do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico, pela paciência, companheirismo e auxílio nas atividades;

Aos funcionários, servidores do CRS/CCR/INPE – MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada;

Ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional;

A Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio e alertas.

RESUMO

O Projeto de Pesquisa tem por objetivo analisar a ocorrência dos eventos de efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil durante o período de 1992 a 2010. Os dados da coluna total de ozônio analisados são do Espectrofotômetro Brewer em operação no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE-MCT, (29,42°S, 53,87°O), em São Martinho da Serra, RS, Brasil, em uma cooperação entre o Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT e o Laboratório de Ozônio da Divisão de Geofísica Espacial – LO/DGE/CEA/INPE-MCT, com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT-UFSM. Dados de reanálise do NCEP e os dados da coluna total de ozônio dos instrumentos TOMS e OMI, o qual, a partir de 2006, substituiu os dados do TOMS, são analisados. A metodologia é baseada na análise de Vorticidade Potencial (VP) em superfícies isentrópicas para os dias com quedas na coluna total de ozônio do Brewer e TOMS ou OMI. Para complementar a análise, são geradas trajetórias de massas de ar pelo modelo HYSPLIT. Continuando a análise que estava sendo realizada em anos anteriores, para o período de 1992 a 2009, foi adicionado ao banco de dados as observações do ano de 2010. A partir dos novos dados percebe-se que, no período em que o “Buraco de Ozônio Antártico” está aberto, há eventos de queda na coluna total de ozônio na Região Sul do Brasil, em relação às médias mensais, que podem ser considerados como efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico. No período, efetuaram-se mudanças na rotina de cálculo da Vorticidade Potencial, ocorrendo notada melhora na precisão dos valores postos no modelo para gerar as superfícies isentrópicas. Foram traçadas trajetórias das massas de ar provenientes da Antártida, e variáveis da NCEP foram usadas para gerar superfícies isentrópicas e campos de ventos sobre o Observatório Espacial do Sul, comprovando, de fato, a existência de influência de massas de ar pobres em ozônio sobre o Sul do Brasil, totalizando a ocorrência de dois eventos para o ano de 2010.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	8
SUMÁRIO	9
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS	11
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	12
3.1 Camadas da Atmosfera	12
3.1.1 Troposfera	13
3.1.2 Estratosfera	13
3.1.3 Mesosfera	14
3.1.4 Termosfera	14
3.1.5 Exosfera	14
3.2 Ozônio	14
3.2.1 Distribuição e conteúdo do ozônio na atmosfera	16
3.2.2 O Buraco de Ozônio	17
3.2.3 Efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o sul do Brasil	19
3.3 Dinâmicas da Estratosfera	19
3.3.1 Temperatura Potencial	20
3.3.2 Vorticidade e Vorticidade Potencial	21
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA	24
4.1 Equipamentos utilizados	24
4.1.1 Espectrofotômetro Brewer	24
4.1.2 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)	28
4.1.3 Ozone Monitoring Instrument (OMI)	29
4.2 GrADS, Variáveis NCEP/NCAR e Análise Isentrópica	30
4.3 Trajetórias de massas de ar	30
CAPÍTULO 5 - ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELA BOLSISTA	31
5.1 Visitas Técnicas ao Observatório Espacial do Sul	31
5.1.1 Manutenção Preventiva dos Equipamentos	31
5.1.2 Coleta de Dados	32
5.1.3 Redução de Dados	32
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E ANÁLISES	33
6.1 Reanálise dos Dados da Coluna Total de Ozônio do Brewer	33
6.2 Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico no Sul do Brasil	33
6.2.1 Dez anos de eventos 1999 a 2009	35
6.2.2 Eventos no ano de 2010	41
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS	44
CAPÍTULO 8 - TRABALHOS PUBLICADOS E APRESENTADOS	45
CAPÍTULO 9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Apesar de ser um gás com pequena abundância, o ozônio é essencial para a vida e o balanço energético do planeta (Salby, 1995), tendo sua máxima concentração na Estratosfera (Slusser et al. 1999) onde age como forte absorvedor da radiação ultravioleta do tipo B tendo seu máximo de absorção nos comprimentos de onda na faixa Hartley, de 200 a 310 nm, (Dobson, 1968).

O continente Antártico apresenta uma significativa diminuição do conteúdo total de ozônio durante as primaveras no Hemisfério Sul, devido ao vórtice que se forma na região, resultado do rigoroso inverno, desenvolvendo um núcleo muito frio que prende o ar na região não deixando massas de ar contendo ozônio, provenientes do equador, entrar na região (Farman et al. 1985). Com a presença das Nuvens Estratosféricas Polares e uma elevada taxa de fotolisação de halocarbonetos, devido à entrada de radiação no continente Antártico, no início de agosto, ocorre uma alta destruição de ozônio atmosférico diminuindo a sua coluna atmosférica a menos de 220 UD, fenômeno conhecido como Buraco de Ozônio Antártico (Solomon, 1999).

Massas de ar pobres em ozônio podem se desprender do vórtice polar para baixas latitudes, causando uma diminuição temporária no conteúdo total de ozônio (Kirchoff et al. 1996), fenômeno conhecido como Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico. Neste projeto desenvolvido no Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio Atmosférico do CRS/CCR/INPE - MCT dentro do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico, em Parceria com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria da UFSM, o Centro Regional do Nordeste do INPE e o Laboratório de Ozônio do INPE, trabalha-se com a identificação desses eventos que atingem a região sul do Brasil, para tanto são utilizados dados da coluna total de ozônio dos Espectrofotômetros Brewer MKIV # 081 (1992 - 2000), MKII # 056 (2000 - 2002) e MKIII # 167 (a partir de 2002). A partir destes dados detectam-se os eventos de baixa na coluna total de ozônio e são realizados estudos, através de análise de vorticidade potencial em superfícies isentrópicas, trajetórias de massa de ar e dados de satélite para ver quais eventos são realmente efeitos secundários do “buraco de ozônio antártico”.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo identificar e analisar a ocorrência dos eventos de efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico sobre o sul do Brasil durante o período de 1992 a 2010 analisando dados gerados pelo espectrofotômetro Brewer e dados de satélites como TOMS e OMI.

Tem por objetivos específicos:

- Redução e análise da série temporal dos dados da coluna total de ozônio obtida com o instrumento Espectrofotômetro Brewer pelo Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico desde 1992;
- Redução e análise da série temporal dos dados da coluna total de ozônio obtida com os instrumentos TOMS desde 1992 a 2006 e OMI desde 2006 até o momento;
- Realizar o estudo de vortacidade potencial em superfície isentrópica a fim de verificar o movimento de massas de ar em eventos de baixa coluna total de ozônio.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

3.1 Camadas da Atmosfera

Uma das classificações mais conhecidas da divisão das camadas da atmosfera terrestre é quanto ao perfil de temperatura. A atmosfera está estruturada em três camadas relativamente quentes, separadas por duas camadas relativamente frias. Os contatos entre essas camadas são áreas de descontinuidade e recebem o sufixo "pausa", após o nome da camada subjacente, é importante notar que as camadas interagem entre si, trocando propriedades uma vez que não existem limites físicos que as separam (Vianello et al., 2000). Um esquema ilustrativo das camadas da atmosfera pode ser visto na Figura 3.1.

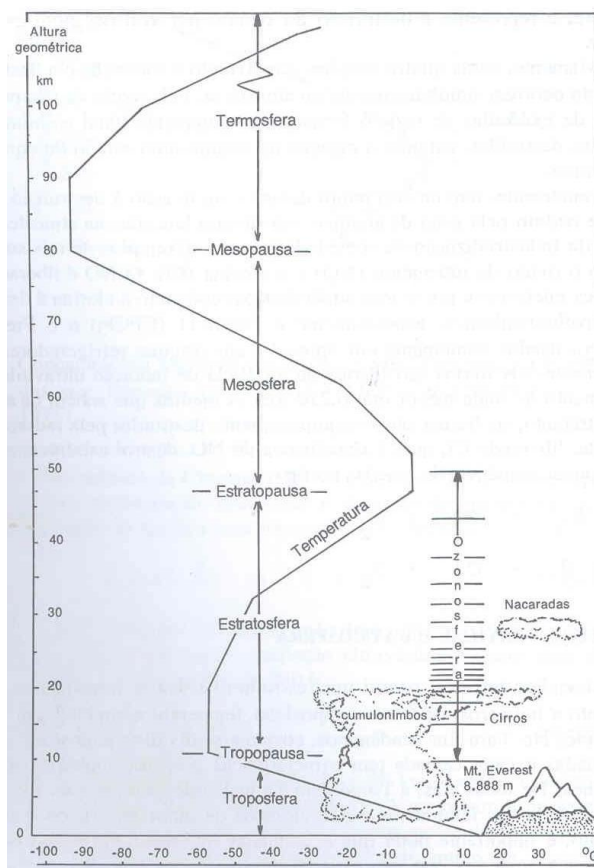


Fig. 3.1 - Estrutura vertical da atmosfera terrestre até 110 km de altura. Fonte: adaptada de U.S. Navy Weather Research Facility.

3.1.1 Troposfera

Estende-se da superfície da Terra até a base da estratosfera; 15-18 km do solo no equador e de 6-8 km nos pólos, sendo sua espessura variável com as estações do ano. Os movimentos atmosféricos, tanto verticais (convecção e subsidência) quanto horizontais, são intensos nessa camada. É nela que ocorrem os mais importantes fenômenos meteorológicos, tais como: chuva, trovoadas, relâmpagos, arco-íris, nuvens, ventos, etc. Esta camada responde por oitenta por cento do peso atmosférico, sendo que em sua composição tem, entre outros gases, oxigênio, dióxido de carbono e vapor de água, permitindo assim a vida na superfície terrestre. Na troposfera, a temperatura diminui com a altitude em média 6,5°C por quilômetro. Diversos gases-traço, tais como ozônio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio e os aerossóis também estão presentes nesta camada da atmosfera. O ozônio troposférico é extremamente oxidante e, por este motivo, é considerado um forte poluente. É um gás quimicamente instável, por isso é comum o ozônio desta camada reagir com o radical hidroxila (OH) muito abundante na Troposfera e principal agente “limpador” desta região atmosférica. A troposfera termina quando ocorre uma inflexão do perfil da temperatura com a altitude, passando esta a aumentar com a altitude. Essa região onde ocorre a inflexão é conhecida como tropopausa, a qual marca o início da estratosfera.

3.1.2 Estratosfera

Situa-se entre 10 ou 20 km até cerca de 50 km de altitude aproximadamente, sendo a segunda camada da atmosfera compreendida entre a troposfera e a mesosfera. A temperatura nesta camada parte dos -70°C (aproximadamente) e aumenta gradativamente devido a absorção da radiação ultravioleta pela molécula de ozônio. É nesta camada que se encontra a maior concentração do gás ozônio e, portanto, é a região onde se encontra a chamada Camada de Ozônio. Na estratosfera, encontram-se, além do gás ozônio, diversos outros gases, entre eles, dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂) e aerossóis.

A estratosfera tem como limite superior a estratopausa, onde está outro ponto de inflexão da temperatura, quando a temperatura começa novamente a decair com a altitude.

3.1.3 Mesosfera

A Mesosfera está situada entre 50 e 90 km de altitude com a estratopausa em sua parte inferior e mesopausa em sua parte superior. É muito fria, com temperaturas abaixo de 100°C negativos. A parte inferior é mais quente porque absorve calor da estratosfera. Nesta camada a temperatura diminui com a altitude. Na mesosfera ocorrem os fenômenos de aeroluminescência, com as emissões de gases como oxigênio, sódio, hidroxila, etc. A mesopausa fica entre a mesosfera e a termosfera e é a região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante de outra onde predomina a difusão molecular.

3.1.4 Termosfera

O topo da termosfera fica a cerca de 450 km acima da Terra. É a camada mais quente, uma vez que as raras moléculas de ar absorvem a radiação do Sol. As temperaturas no topo chegam a 2000°C.

3.1.5 Exosfera

A camada superior da atmosfera fica a mais ou menos 900 km acima da Terra. O ar é muito rarefeito e as moléculas de gás "escapam" constantemente para o espaço. Por isso é chamada de exosfera (parte externa da atmosfera).

3.2 Ozônio

O ozônio é o mais importante gás traço constituinte da estratosfera. Apesar da pequena abundância, assim como o vapor d'água o ozônio é essencial para a vida e o balanço energético do planeta (Salby, 1995). Descoberto no século 19, sua importância como gás atmosférico se tornou aparente no início do século 20 quando as primeiras medidas quantitativas da coluna de ozônio foram realizadas na Europa. Os cientistas franceses

Fabry e Buisson usaram medidas de ultravioleta (UV) para estimar que, se trazido para a superfície da Terra em condições padrões de temperatura e pressão, a coluna de ozônio produziria uma camada com cerca de 3 mm de espessura.

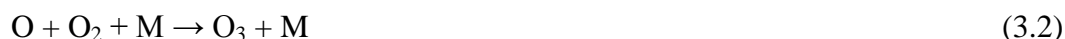
Na década de 20, o cientista britânico Dobson desenvolveu um espectrofotômetro para medidas da coluna de ozônio e este instrumento é ainda muito utilizado no mundo. Em reconhecimento a sua contribuição, a medida padrão da coluna de ozônio foi chamada de Unidade Dobson (UD).

O ozônio é uma molécula constituída por três átomos de oxigênio, tem a capacidade de absorver radiação ultravioleta, liberando energia na forma de calor por isso a temperatura começa a aumentar com a altitude na estratosfera, onde sua concentração é maior (Slusser et al., 1999) .

O ozônio é produzido na estratosfera cerca de 30 km de altitude, onde a radiação ultravioleta solar de comprimentos menores que 242 nm lentamente dissocia a molécula de oxigênio (O₂). Representado pela seguinte expressão:



O átomo de oxigênio (O) reage rapidamente com O₂ na presença de um terceiro corpo M (normalmente N₂ e O₂) para formar ozônio, M é utilizado para estabilizar o produto excitado O₃ devido a colisão dos reagentes.



Esta é a única reação de produção de ozônio em praticamente toda a atmosfera, tanto na estratosfera quanto na troposfera.

Este mecanismo de produção de ozônio é contrabalançado por vários mecanismos de perda, sendo os principais a recombinação do ozônio com o oxigênio e ciclos catalíticos envolvendo H, NO_x e Cl (Whitten e Prasad, 1985; Brasseur e Solomon, 1986), além da absorção de radiação solar pelo ozônio nas suas bandas de absorção apresentada na expressão 3.3:



Esta reação ocorre nas bandas de absorção molecular do ozônio de Hartley (200 a 310 nm) e Hugging (310 a 350 nm).

A combinação desses mecanismos de perda e de produção resulta na formação da camada de ozônio que atinge níveis máximos numa faixa de 24 km de altura.

3.2.1 Distribuição e conteúdo do ozônio na atmosfera

A distribuição vertical de ozônio é praticamente constante na troposfera e é uma concentração relativamente baixa. Na estratosfera, que fica entre 15 e 50 km de altura, a concentração do ozônio passa por um máximo a aproximadamente 30 km isso pode ser observado na figura 3.2 que apresenta o perfil vertical de ozônio versus a temperatura. Entre 25 e 35 km define-se, arbitrariamente, a região da "camada de ozônio". A concentração depende da latitude e estação do ano por influência da distribuição latitudinal de radiação solar que influi tanto na criação quanto na dissociação do ozônio (Whitten e Prasad, 1985; Brasseur e Solomon, 1986)

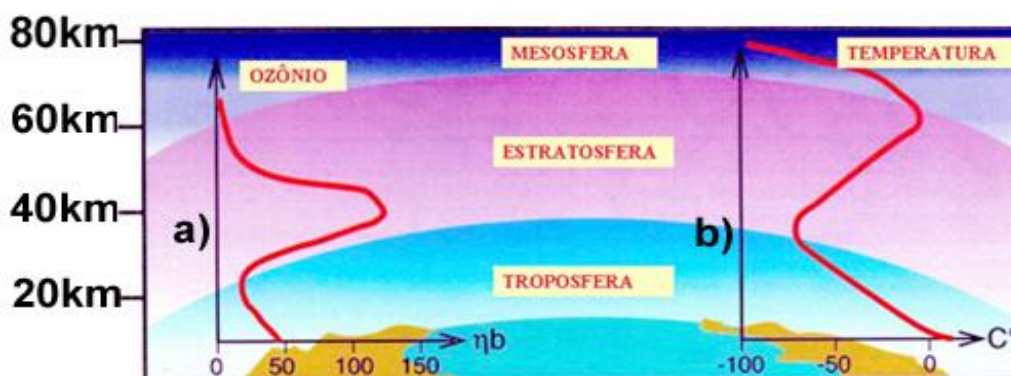


Fig. 3.2 - Perfil da Camada de Ozônio (a) e da temperatura (b) com a altura. Fonte: <http://www.dge.inpe.br/ozonio/ozonio1.php>

Quanto às distribuições sazonais, as variações podem ser negligenciadas nas regiões tropicais, onde a intensidade de radiação solar pode ser considerada constante durante todo o ano. À medida que a latitude aumenta, para altas latitudes, se tem maior variação sazonal na concentração do ozônio estratosférico (Wakamatzu, 1989), o máximo de concentração é estabelecido na primavera e o mínimo se verifica durante o outono. Durante a primavera a quantidade de ozônio encontrada em altas latitudes é maior, e em baixas latitudes menor, do que aquela que poderia ser prevista utilizando a teoria

fotoquímica. Neste caso, a distribuição da intensidade de radiação solar sugeriria a formação de um máximo durante o verão sobre a região equatorial. Portanto, as causas desse fenômeno podem ser relacionadas aos padrões de circulação atmosférica. O conteúdo de ozônio na região Antártica é fortemente relacionado com ventos equatoriais (Garcia e Solomon, 1987). No início da primavera, a estratosfera próxima às regiões polares é caracterizada por fortes correntes de ar descendentes. Deste modo, o ozônio gerado em camadas acima de 20 km de altitude é transportado por estas correntes de ar em direção às camadas mais baixas, e uma circulação é formada com o ar fluindo em direção aos pólos na alta estratosfera e, em direção ao equador na baixa estratosfera. O ozônio acumulado nesta região é transferido para a troposfera durante o verão (Seinfeld e Pandis, 1998)

3.2.2 O Buraco de Ozônio

Em 1985, a equipe liderada por Farman chocou a comunidade científica com o relato da massiva destruição anual do ozônio estratosférico sobre a Antártica ocorrido na primavera polar, fenômeno este que a imprensa chamou de “Buraco de Ozônio”(figura 3.3). Sua área geográfica foi definida como sendo a região interior a valores de ozônio menores que 220 UD, sendo mais acentuado entre 12 e 24 km de altitude.

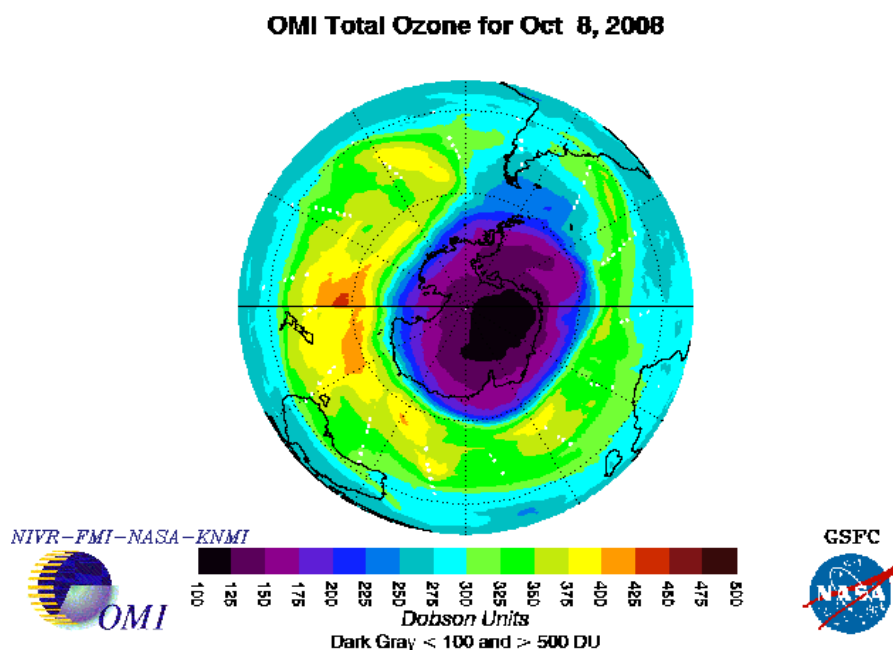


Fig. 3.3 – Imagem ilustrando o buraco de ozônio Antártico durante a primavera austral.

Fonte: http://jwocky.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone_v8.html

A Antártica tem uma das mais altas concentrações de ozônio da Terra durante a maior parte do ano, pois muito de seu ozônio é produzido nos trópicos e transportado, junto com reservatórios de cloro, para os pólos, pelo movimento do ar em grande escala na estratosfera. Na Antártica, a estratosfera é deficiente em oxigênio atômico devido à ausência de radiação UV intensa para fotolisar o O_2 .

Durante o inverno Antártico, o ar frio desce e desenvolve uma circulação para leste, formando o Vórtice Polar, que desenvolve um núcleo de ar muito frio. No inverno e no início da primavera o vórtice é extremamente estável, efetivamente apreendendo o ar em seu interior. O vórtice mantém altos níveis de ozônio importado preso sobre a Antártica por diversos meses a cada ano. Quando o Sol retorna em setembro, no fim da noite polar, a temperatura aumenta e o vórtice enfraquece, eventualmente quebrando em novembro.

Algumas hipóteses relacionando a existência do buraco de ozônio ao ciclo solar ou a pura dinâmica estratosférica não foram consistentes com o observado, assim como somente os ciclos catalíticos dos CFCs (clorofluorcarbonos) não poderiam levar a tamanha queda na coluna de ozônio, até que Susan Solomon e colaboradores (Solomon, 1999) sugeriram que o cloro poderia ser ativado na superfície de Nuvens Estratosféricas Polares (NEPs), observadas sobre a Antártica devido às baixas temperaturas (183 K), podendo destruir o ozônio na baixa estratosfera polar em poucas semanas, chegando aos níveis observados no buraco.

As NEPs catalisam a liberação do cloro reativo das espécies reservatório $ClONO_2$ e N_2O_5 que reagem heterogeneamente com as nuvens nas quais o HCl foi absorvido, produzindo os gases Cl_2 , HOCl e $ClNO_2$. A luz solar é então necessária para fotolisar o Cl_2 , HOCl e $ClNO_2$ liberando o cloro reativo que ataca o ozônio.

A formação do “buraco de ozônio” é um fenômeno sazonal cujas condições somente são possíveis em algumas semanas do ano, no hemisfério sul, entre agosto e outubro (início da primavera). Em dezembro, com a chegada do verão, as temperaturas sobem, impedem a formação de NEPs, e enfraquecem o vórtice polar devido aos baixos gradientes de temperatura. Com o aumento da temperatura na região, o processo de destruição acelerada do ozônio é bloqueado e os níveis retornam às condições normais.

No Hemisfério Norte ocorre fenômeno parecido, mas não chega a ser tão intenso devido à região polar não ser tão fria como no hemisfério sul (CHUBACHI, 2005).

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

Apesar de o vórtice polar ser extremamente estável, com a chegada da primavera e o aumento das temperaturas ele enfraquece, podendo liberar massas de ar que podem atingir médias latitudes, causando uma diminuição temporária na coluna total de ozônio da região. 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. As passagens de massas de ar, originárias do buraco, sobre médias latitudes foram primeiramente observadas por Kirchoff et al. (1996) que denominaram estes eventos de Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico. A partir de dados de dois espectrofotômetros Brewer, instalados em Santa Maria em outubro de 1993, e de sondas lançadas através de balões, eles mostraram que a redução local de ozônio estava associada à entrada de uma massa de ar de origem polar.

3.3 Dinâmicas da Estratosfera

Estudos mostram que uma massa de ar pode se mover em superfícies isentrópicas que são superfícies materiais onde não há troca de massa se os processos forem adiabáticos, então, a temperatura potencial é conservada, e somente o vento pode romper a superfície. Coordenadas isentrópicas, que utilizam a temperatura potencial como coordenada vertical, possuem uma maior densidade de informações onde as superfícies isentrópicas estiverem mais agrupadas, dessa maneira, haverá maior resolução onde os gradientes de temperatura forem maiores.

Superfícies isentrópicas são inclinadas sendo mais baixas no equador e mais altas nos pólos, conforme apresenta a Figura 3.4.

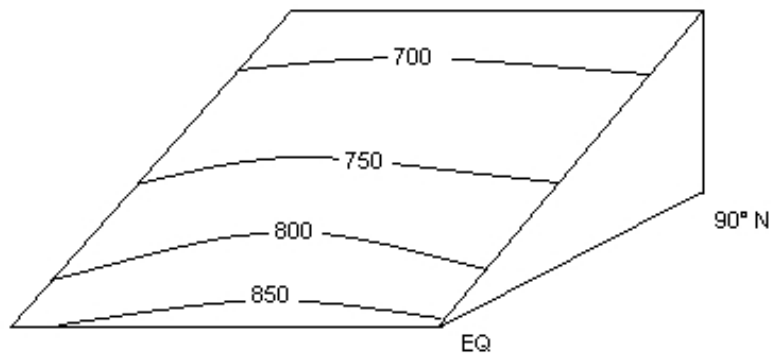


Fig. 3.4 – Esquema de uma superfície isentrópica de 310 K. Linhas sólidas no interior da superfície são isóbaras (mb). Fonte: adaptado apostila de curso de Moore, J. T. (1993).

3.3.1 Temperatura Potencial

A temperatura potencial de uma parcela de ar é definida como a temperatura que a parcela teria se fosse expandida ou comprimida adiabaticamente de seu estado real de pressão e temperatura para uma pressão padrão (geralmente 1000 mb). Pode-se obter uma expressão a partir da Primeira Lei da Termodinâmica e da Lei dos Gases Ideais:

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (3.4)$$

A temperatura potencial pode ser interpretada como uma marca da posição vertical de uma parcela de ar. Esta variável aumenta com a altura lentamente na troposfera e rapidamente na estratosfera. Uma parcela de ar se movendo adiabaticamente mantém-se em uma superfície de temperatura potencial constante e pode ser marcada pelo valor da temperatura potencial. O movimento de uma parcela de ar pode ser visto de forma bidimensional em coordenadas isentrópicas. O ar estratosférico tende a se manter em superfícies isentrópicas por muitos dias, pois a temperatura potencial é grande em altas altitudes dificultando o movimento do ar para cima ou para baixo

A temperatura potencial dividida por 25 é uma boa aproximação para a altitude da superfície em quilômetros (por exemplo, 400 K = 400/25 ≈ 16 km).

3.3.2 Vorticidade e Vorticidade Potencial

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,

$$V = \nabla \times U, \quad (3.5)$$

Onde $U = (u, v, w)$ é o campo de velocidades e V a vorticidade. O mesmo vale para a vorticidade absoluta VA ,

$$VA = \nabla \times U_a, \quad (3.6)$$

Onde 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 velocidade. As componentes verticais da vorticidade relativa (ζ) e da vorticidade absoluta (η) são definidas, respectivamente como,

$$\zeta = \hat{k} \cdot (\nabla \times \vec{U}) \quad \text{e} \quad \eta = \hat{k} \cdot (\nabla \times \vec{U}_a) \quad (3.7)$$

$$\text{Onde } \zeta = |\vec{\zeta}| \quad \text{e} \quad \eta = |\vec{\eta}|$$

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

$$f = \hat{k} \cdot (\nabla \times \vec{U}_e), \quad (3.8)$$

De modo que:

$$\eta = \zeta + f \quad (3.9)$$

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

$$f = 2\Omega \sin \phi, \quad (3.10)$$

Onde Ω é a velocidade angular de rotação da Terra e ϕ é o ângulo referente à latitude. A **vorticidade potencial (PV)** é uma extensão do conceito de vorticidade para superfícies e 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,

$$PV = \frac{1}{\rho} \vec{\eta} \bullet \vec{\nabla} \theta \quad (3.11)$$

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 estimada através de,

$$\hat{k} \bullet \vec{\nabla} \theta = \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \frac{\partial \theta}{\partial p}, \quad (3.12)$$

Onde g é a aceleração da gravidade. A vorticidade absoluta é dada por,

$$\vec{\eta} = \zeta_{\theta} + f \hat{k}, \quad (3.13)$$

Equivalentemente a equação 3.9. O índice em ζ indica que a vorticidade relativa deve ser avaliada para a superfície isentrópica com temperatura potencial θ .

Juntando as expressões 3.11 e 3.12 em 3.13 obtém-se:

$$PV = \zeta_{\theta} + f \left(-g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right), \quad (3.14)$$

O termo no primeiro parênteses é 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 Vorticidade Potencial de Ertel-Rossby em homenagem ao meteorologista alemão Hans Ertel. Normalmente, a vorticidade potencial é expressa.

A partir da equação (3.14) 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). Dessa forma, a evolução de PV em uma superfície isentrópica pode ser usada como uma substituta para o estudo do transporte de constituintes traços, em superfícies isentrópicas (Holton et al., 2004). A distribuição de PV em superfícies isentrópicas pode ser invertida para produzir campos de vento e temperatura, ou seja, mudanças na distribuição de VP são ditas indutoras de mudanças nos campos de vento e temperatura.

A variação da vorticidade potencial em superfície isentrópica pode ser aplicada ao transporte de ozônio na estratosfera, como foi aplicada em trabalhos anteriores parecidos e mostram que a origem tropical ou polar das massas de ar pobre em ozônio

pode ser identificada, respectivamente, por baixos e altos valores de vorticidade potencial absoluta (VPA) (Semane et al., 2006).

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

$$PVA = |PV| \quad (3.15)$$

A vorticidade potencial é definida de tal modo que ela possui valores positivos no Hemisfério Norte e valores negativos no Hemisfério Sul, o uso de PVA é aplicado por usar o módulo desses valores.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4.1 Equipamentos utilizados

Os dados sobre a coluna total de ozônio atmosférico utilizados nesta análise foram obtidos através dos Espectrofotômetros Brewer modelos MKIV, MKII e MKIII, instalados no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT (29,4 °S; 53,8°O; 488,7m), pelo *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) que esteve a bordo dos satélites Nimbus-7, Meteor-3 e Earth Probe da *National Aeronautics and Space Agency* (NASA), e pelo *Ozone Monitoring Instrument* (OMI), o qual substituiu os dados do TOMS desde 2006, quando este saiu de operação. O equipamento está a bordo do satélite ERS-2, sendo uma contribuição do Programa Aeroespacial da *Netherlands's Agency* (NIVR) em colaboração com o *Finnish Meteorological Institute* (FMI) para a Missão Aura EOS.

4.1.1 Espectrofotômetro Brewer

Os Espectrofotômetros Brewer são uma família de instrumentos científicos que realizam medidas da radiação ultravioleta no espectro solar, examinando a absorção diferencial de comprimentos de onda selecionados no espectro da radiação ultravioleta do tipo B (UV-B), além de inferir as colunas totais dos gases O₃ e SO₂. Este equipamento foi instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, a partir de um convênio entre a UFSM e o INPE/MCT e durante o período de 1992 – 2000 ficou instalado o equipamento MKIV #081, de 2000 – 2002 o equipamento MKII #056 e de 2002 até o momento opera o equipamento MKIII # 167.

Os dois primeiros Espectrofotômetros Brewer são compostos por um monocromador e um detector para observar e medir um espectro de radiação. O monocromador é essencialmente constituído de um elemento de dispersão e dispositivos para controle da largura da faixa de comprimentos de onda desejados. A fonte de energia a ser analisada deve fornecer um espectro contínuo, no caso do Espectrofotômetro Brewer esta é o Sol. Os elementos de dispersão podem ser prismas de vidro ou quartzo e redes de difração, sendo para o Espectrofotômetro Brewer o meio atenuador a coluna atmosférica acima do instrumento.

Uma porção da energia radiante emitida pela fonte passa por uma fenda de entrada e vai incidir sobre o elemento de dispersão. A radiação é dispersa, dando um espectro contínuo dentro dos limites correspondentes à fonte utilizada. Por meio de uma fenda de saída, pode-se isolar uma faixa mais ou menos estreita da radiação. O comprimento de onda médio da faixa que atravessa a fenda de saída é controlado mediante a variação da posição do prisma ou da rede de difração.

O Espectrofotômetro Brewer é um instrumento óptico projetado para medir a intensidade da atenuação da radiação solar ultravioleta incidente em cinco comprimentos de onda, de 306 a 320 nm, no espectro de absorção do ozônio e dióxido de enxofre atmosféricos. O Brewer mede também a intensidade da radiação UVB global incidente na superfície (de 290 a 325 nm, modelos MKII e MKIV) através de varreduras do espectro.

O Brewer é formado por um espectrofotômetro e por um sistema de rastreamento do Sol, acoplados a um microcomputador o qual, através de software próprio, realiza a aquisição, redução e armazenamento de dados e o controle do instrumento (testes de desempenho geral, medidas). O equipamento pode ser programado para trabalhar sozinho através do uso de esquemas de medidas previamente elaborados pelo usuário.

A luz solar pode entrar no aparelho pelo domo de UV ou através de uma janela de quartzo inclinada, sendo direcionada ao prisma diretor o qual seleciona a luz de céu zênite (ZS), direto ao Sol (DS), do domo de UV ou das lâmpadas de calibração; a forma de entrada da luz dependerá do tipo de medida que se quer realizar.

Uma lâmpada de mercúrio fornece uma fonte padrão para calibração do comprimento de onda do Espectrofotômetro e uma lâmpada alógena fornece uma fonte de luz bem regulada para monitorar a resposta espectral relativa do espectrômetro.

Uma grade espectrométrica dispersa a luz ultravioleta para um plano focal; 6 fendas de saída estão posicionadas ao longo do plano focal nos comprimentos de onda de operação, sendo que uma delas é utilizada somente para a calibração do micrômetro através da lâmpada de mercúrio (teste HG).

As medidas DS objetivam a obtenção da coluna total de ozônio e dióxido de enxofre, sendo utilizados para isso cinco comprimentos de onda 306,3; 310,1; 313,5; 316,8; 320,1 nm, com resolução aproximada de 0,5 nm para ozônio.

Quando as medidas de radiação ultravioleta são realizadas, a radiação UV-B proveniente do Sol e do céu, respectivamente radiação direta e difusa, atingem o domo de onde a radiação é direcionada para o prisma, o qual está voltado para o interior do equipamento. A radiação solar medida pelo instrumento passa por um conjunto de lentes, filtros atenuadores e selecionadores de radiação, colimadores, fendas seletoras, espelhos e rede de difração para incidir no cátodo de um tubo fotomultiplicador que transforma o feixe de luz de comprimento de onda λ num sinal elétrico interpretado como pulso pela cadeia eletrônica Brewer. As diferentes posições do prisma e os percursos que a luz executa até atingi-lo, para depois entrar na íris, estão ilustrados na Figura 4.1.

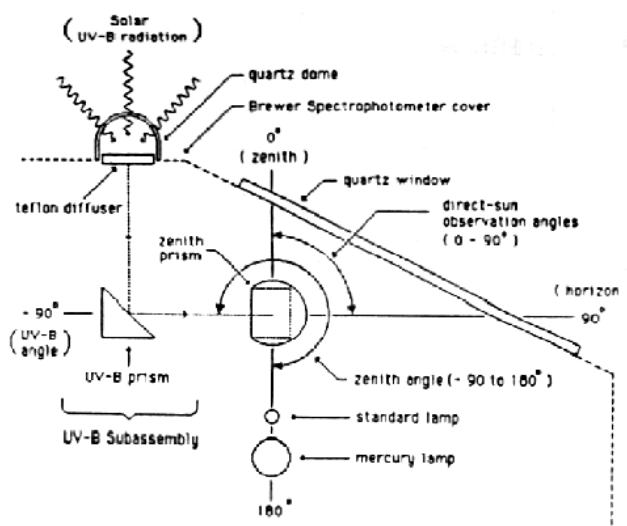


Fig. 4.1 - Possíveis posicionamentos do prisma e caminhos percorridos pela luz até chegar ao prisma nos Brewers MKII e MKIV. Fonte: Manual de Operação do Espectrofotômetro Brewer MK II.

O modelo MKIII #167 difere dos dois espectrofotômetros citados anteriormente por possuir a faixa de medida da radiação espectral mais ampla, compreendendo de 286,5 nm a 363,0 nm, também com resolução de 0,5 nm, e por apresentar um duplo sistema óptico, o qual oferece uma maior confiabilidade no isolamento dos comprimentos de onda selecionados.

A luz, após incidir na máscara, SL1, é direcionada para baixo e refletida sob outro espelho esférico, SM2, que faz o feixe de luz incidir sobre uma segunda grade de difração, GR2, consequentemente o feixe de luz vai para a fotomultiplicadora, PM1, conforme ilustrado na Figura 4.2.

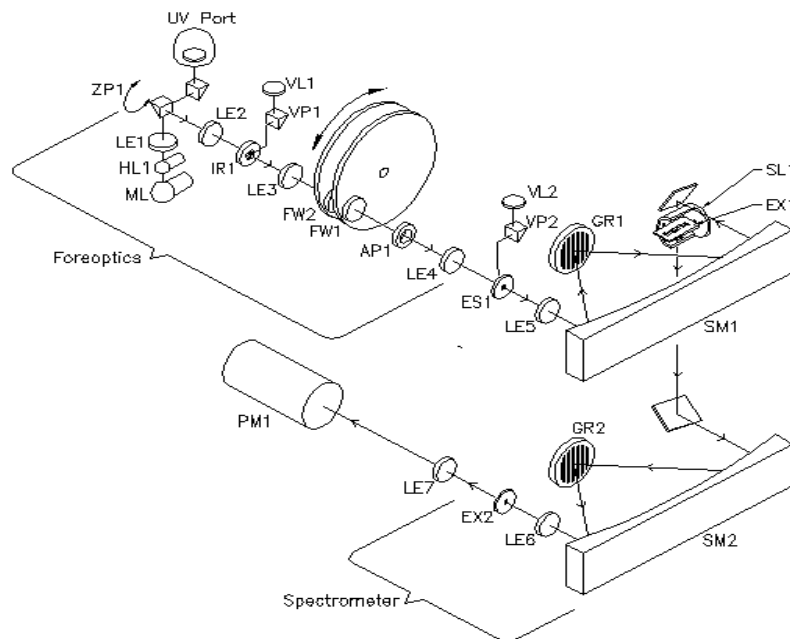


Fig. 4.2 – Elementos ópticos do Espectrofotômetro Brewer MK III. Fonte: Manual do Espectrofotômetro Brewer MK III.

O Espectrofotômetro Brewer instalado no Observatório Espacial do Sul é mostrado na Figura 4.3, onde se observa em detalhe o tripé, o sistema de rastreamento do Sol (tracker), a janela de entrada do feixe de luz solar, para medida dos gases atmosféricos, e o domo, acima da janela, para medida da radiação ultravioleta.

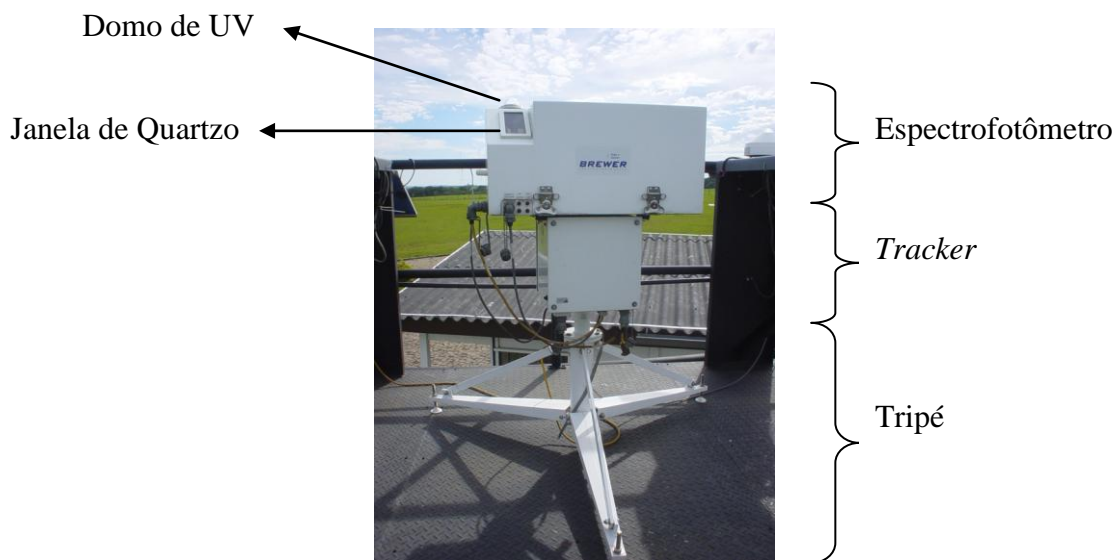


Fig. 4.3 - Espectrofotômetro Brewer MK III # 167 atualmente instalado no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS.

Devido a problemas técnicos, o Brewer está fora de uso de julho de 2009 até o momento. Por este motivo, estão sendo usados apenas dados de satélite para completar o banco de dados referente a este período.

4.1.2 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)

Outra fonte de aquisição de dados para esta análise foi através do *Total Ozone Mapping Spectrometer* (TOMS) que é um instrumento desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Agency* (NASA) e mede ozônio diariamente fornecendo mapas globais de alta resolução de ozônio total contido na atmosfera. Esse instrumento existe desde 1978, iniciando suas medidas com o lançamento do satélite Nimbus-7, continuando de 1991 a 1994 a bordo do satélite Meteor-3 e desde 1996 a bordo do Earth Probe, parando de operar no final de 2005 devido a problemas de calibração.

O TOMS utilizava a técnica *Backscatter Ultraviolet* (BUV), um método de medida que determina ozônio indiretamente pelo mapeamento da luz ultravioleta emitida pelo Sol e retroespalhada pela atmosfera terrestre na direção do satélite. O TOMS faz amostragem da radiação UV retroespalhada em 6 comprimentos de onda, que sofrem absorção diferencial pelo ozônio. Comparando essas medidas entre si com as medidas provenientes do Sol, o algoritmo do TOMS calcula a coluna total de ozônio.

Os dados de ozônio do TOMS utilizados neste trabalho são do algoritmo processado versão 8, disponíveis no site da NASA e frequentemente correlacionados com as medidas do Espectrofotômetro Brewer a fim de verificar a acuracidade dos dados.

4.1.3 Ozone Monitoring Instrument (OMI)

No final do ano de 2005, o equipamento TOMS parou de realizar suas medidas, passando a ser disponibilizados no site da NASA dados do *Ozone Monitoring Instrument* (OMI). O equipamento opera desde agosto de 2004 a bordo do satélite ERS-2, sendo uma contribuição do Programa Aeroespacial da *Netherlands's Agency* (NIVR) em colaboração com o *Finnish Meteorological Institute* (FMI) para a Missão Aura EOS. O equipamento mede outros componentes atmosféricos que o TOMS, como o conteúdo total de O₃, NO₂, SO₂ e aerossóis.

Assim como o TOMS, o OMI realiza medidas pela técnica *Backscatter Ultraviolet* (BUV), com duas imagens alimentando a grade do espectrômetro. Tem duas faixas de ultravioleta: UV-1, 270 a 314 nm e UV-2 306 a 380 nm com resolução espectral de 1 – 0,45 nm. A Figura 4.4 apresenta a configuração esquemática do OMI.

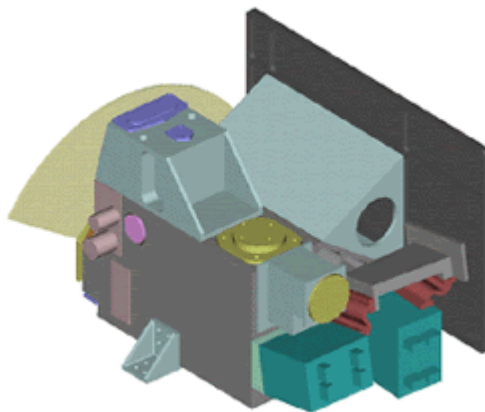


Fig. 4.4 – Esquema de montagem do Ozone Monitoring Instrument (OMI). Fonte: http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi/omi_gallery.html

Os dados da coluna total de ozônio do OMI estão sendo usados a partir de 2006 para completar os dados do Brewer em dias sem medidas válidas, como no caso de dias chuvosos, tendo, assim como o TOMS, suas medidas correlacionadas com as medidas do Espectrofotômetro Brewer para verificar a acuracidade dos dados dos equipamentos.

4.2 GrADS, Variáveis NCEP/NCAR e Análise Isentrópica.

Superfícies isentrópicas são geradas no software de domínio público GrADS (*Grid Analysis and Display System*) que é um programa para visualização e análise de dados de Ciências da Terra e trabalha com dados de modelos de 4 dimensões, onde as dimensões são usualmente latitude, longitude, nível e tempo.

Parâmetros diários das componentes meridional (v-wind) e zonal (u-wind) dos ventos e de temperatura para os níveis de pressão 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 mbar, fornecidos pelo *National Centers for Environmental Prediction/ Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), disponível em <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>, foram utilizados para realizar análises da vorticidade potencial sobre superfícies isentrópicas.

Além desses parâmetros sobre ventos e temperatura, dados como: nível da tropopausa, altura geopotencial, velocidade vertical do vento, umidade relativa, umidade específica, entre outros, estão disponíveis para reanálises. Os dados podem ser obtidos de observações de 6 em 6 horas, média diária ou ainda média mensal, desde 1948, com cobertura total do globo.

4.3 Trajetórias de massas de ar

Trajetórias atmosféricas são produzidas usando o modelo HYSPLIT (*HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) desenvolvido pelo conjunto entre NOAA e *Australia's Bureau of Meteorology*, disponível em http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php, onde pode ser rodado interativamente na web. O programa serve como uma confirmação para a análise isentrópica, complementando a visualização da origem das massas de ar. As trajetórias são produzidas utilizando dados de reanálise, datando, geralmente, seis dias.

CAPÍTULO 5

ATIVIDADES DESENVOLVIDAS PELA BOLSISTA

5.1 Visitas Técnicas ao Observatório Espacial do Sul

Visitas foram realizadas quinzenalmente ao Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, em São Martinho da Serra - RS, pela equipe do Laboratório com a finalidade de verificar o funcionamento dos equipamentos, calibração e manutenção preventiva, coleta de dados e limpeza de equipamentos.

5.1.1 Manutenção Preventiva dos Equipamentos

5.1.1.1 Troca da Sílica Gel

A maioria dos equipamentos pertencentes ao Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA) possui um compartimento interno próprio para sílica gel. A sílica é trocada frequentemente a fim de se ter um controle da umidade no interior dos equipamentos e conseqüentemente medidas mais confiáveis.

5.1.1.2 Limpeza e Polimento

A limpeza dos equipamentos se faz necessária para diminuir a interferência de sujeira como poeira, por exemplo, na absorção de radiação solar. Todos os detectores são de cor branca, o que aumenta o albedo dos corpos. Sendo assim, a energia incidente nos equipamentos é mínima exceto nos domos de quartzo, onde a radiação é transmitida para o interior do equipamento. A refletividade da radiação evita o superaquecimento, o que implicaria em alterações nas medidas. No caso do Brewer, por estar fora de funcionamento, há apenas a troca da sílica, justamente por não estar exposto à radiação, e estar abrigado da chuva.

5.1.2 Coleta de Dados

A coleta de dados pode ser efetuada nas ocasiões de visitas ao OES/CRS /CCR/INPE – MCT ou os dados podem ser transferidos diretamente do OES para o Laboratório de Ozônio no CRS/CCR/INPE – MCT. Os dados são coletados frequentemente para análise e redução.

5.1.3 Redução de Dados

Para se trabalhar com os dados dos equipamentos é necessário que sejam previamente reduzidos. A redução é feita a partir de programas como UVBrewer versão 2.1, BCalc, Origin e Excel. Uma vez reduzidos, os dados estão prontos para serem analisados. São efetuadas diversas análises, tais como correlações e comparações dependentes do tipo de variável em questão.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E ANÁLISES

Foi dada continuidade à análise dos dados da coluna total de ozônio que vem sendo realizada no Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, com dados para o período de 1992 a 2010. No último ano de bolsa, foi incluído no banco de dados o ano de 2010 e realizada a análise dos efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico no Sul do Brasil para o respectivo ano. São apresentados alguns dos eventos do período de 1999 a 2009 e os eventos ocorridos no ano de 2010.

6.1 Reanálise dos Dados da Coluna Total de Ozônio do Brewer

Os dados da coluna total de ozônio do Brewer, utilizados na análise, provêm das medidas DS (Direto ao Sol), por serem mais precisas. O teste diário de calibração SL (Standard Lamp) do Brewer foi verificado para cada dia da análise, incluindo parte do ano de 2009. O teste de calibração é feito com a finalidade de garantir o bom desempenho do Brewer em suas medidas de ozônio ao longo da banda operacional espectral utilizada, realizado diariamente. Ao final de um dia, a partir dos resultados médios das calibrações diárias, é gerada uma constante que é comparada com a constante de referência do Brewer. Dias com valores muito distantes da referência não são usados, visto que podem indicar problemas com o equipamento ou fontes de energia elétrica, o que não pode ser corrigido apenas com calibração. Para completar dias considerados de medidas DS ruins, que pode ter ocorrido devido à nebulosidade ou a período de mau funcionamento do Brewer ou ainda de manutenção dos equipamentos, são utilizados dados de ozônio do sensor TOMS, de 1992 a 2006, e do sensor OMI de 2006 até o momento. Isso pode ser feito, pois, como foi mostrado no relatório de atividades de 2008, os dados do Brewer, TOMS e OMI possuem uma boa correlação.

6.2 Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico no Sul do Brasil

A fim de comprovar os efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico sobre a região do Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE – MCT, realizou-se o estudo de transporte isentrópico, bem como foram geradas trajetórias de massas de ar

provenientes da Antártida, evidenciando o que indicam os dados dos satélites TOMS e OMI que mostram a injeção de massas de ar pobre em ozônio na região do OES.

Os valores médios de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul nos meses de setembro e outubro, os quais são meses de primavera no Hemisfério Sul, período de máxima coluna de ozônio, é o período em que a região é mais atingida pelos efeitos secundários, são apresentados nas Figuras 6.1 e 6.2. As médias da coluna total de ozônio foram calculadas para os dados do Espectrofotômetro Brewer de todos os setembros e outubro, respectivamente, de 1992 a 2008. As médias foram calculadas considerando-se todos os dias destes meses, inclusive os que apresentaram queda na coluna total de ozônio devido aos efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico, estando, portanto, minimizadas em relação aos valores que deveriam ser encontrados para os meses caso a região não fosse afetada pelo buraco de ozônio Antártico.

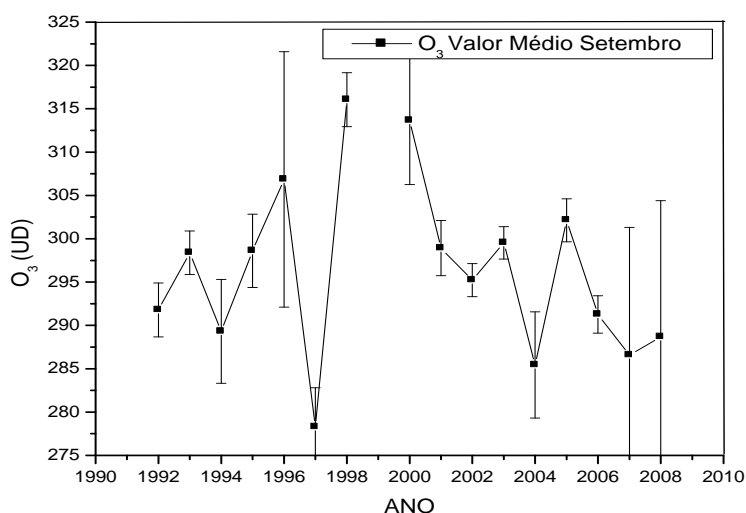


Fig. 6.1 – Dados da coluna total de ozônio do Espectrofotômetro Brewer para o Observatório Espacial do Sul, valores médios dos setembros de 1992 a 2008.

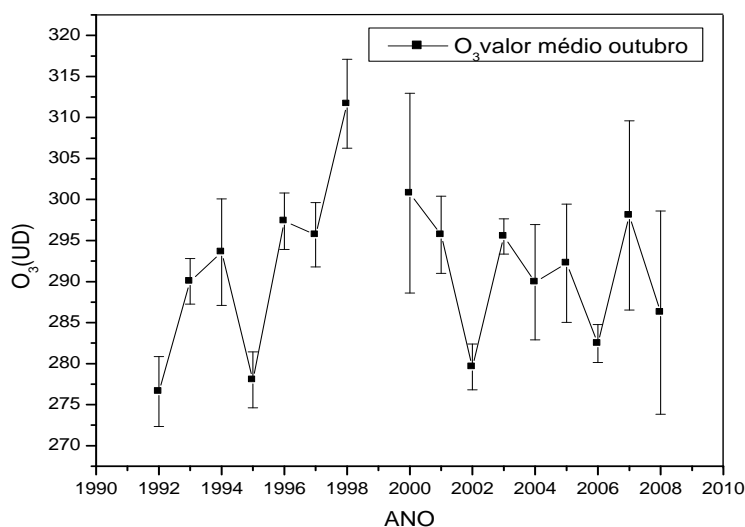


Fig. 6.2 – Dados da coluna total de ozônio do Espectrofotômetro Brewer para o Observatório Espacial do Sul, valores médios dos outubros de 1992 a 2008.

Analisando todos os anos, o valor médio de ozônio para a região do Observatório Espacial do Sul é $295,6 \pm 10,2$ UD no mês de setembro e de $291,5 \pm 8,9$ UD no mês de outubro. Anos como 1999, 2009 e 2010 estão sem valores devido ao Espectrofotômetro Brewer estar fora de funcionamento, causado pela troca do equipamento ou aguardando peças de reposição respectivamente.

6.2.1 Dez anos de eventos 1999 a 2009

Dados da coluna total de ozônio do Espectrofotômetro Brewer foram analisados para o período de 1999 a 2009. As descontinuidades devido aos dias nublados ou com chuva, onde o espectrofotômetro não fez medidas válidas pelo método de DS (Direto ao Sol), ou ainda, em período de mau funcionamento e/ou de manutenção, são completadas com a utilização de dados de ozônio obtidos pelo TOMS e OMI, na mesma latitude do Observatório Espacial do Sul. A partir da análise dos dados, verificou-se que nos meses de agosto a novembro, período em que o “buraco de ozônio Antártico” está aberto, ocorrem eventuais quedas da coluna total de ozônio, medidas tanto pelo Brewer como para o TOMS e OMI. Os meses contemplam o período em que as médias climatológicas de ozônio para o OES são as mais altas. Para o período de 1999 a 2009, obtiveram-se como resultados para as médias de concentração da coluna total do ozônio para setembro: $294,3 \pm 6,6$ UD sendo que para outubro foi obtido o valor de $289,8 \pm 6,5$ UD,

período que corresponde também à maior instabilidade no vórtice polar, facilitando a liberação de massas de ar pobres em ozônio que podem atingir a região sul do Brasil, ocasionando o conhecido fenômeno: “efeitos secundários do buraco de ozônio Antártico”.

Eventos de baixa concentração na coluna total de ozônio, isto é, quando a medida atinge um valor menor ou igual à média menos 1,5 do desvio padrão ($\mu - 1,5\sigma$), considera-se que está ocorrendo um evento de baixa, podendo ou não ser considerado como efeito secundário do “buraco de ozônio Antártico”, como estabelecido em outros trabalhos científicos (da Silva, 2008). No período de 1999 a 2009, entre os meses de setembro e outubro, identificou-se 32 eventos de queda na coluna total de ozônio no OES, dos quais 21 podem ser classificados como “efeitos secundários do Buraco de Ozônio Antártico”, através das análises das imagens de satélite, das trajetórias de massas de ar e da vorticidade potencial em superfícies isentrópicas.

Como exemplo, é apresentada a análise para quatro eventos do período de 1999 a 2009.

As análises para o evento do dia 16 de outubro de 2003 estão apresentadas nas Figuras 6.3 e 6.4. Neste dia, o Brewer apresentou uma medida de ozônio de 258,5 UD o que representa 34,3 UD abaixo da média de outubro para o período de análise. No evento, fica evidenciada a influência do Buraco de Ozônio Antártico através da análise isentrópica, na qual a vorticidade potencial absoluta começa a aumentar no dia 14 de outubro, como mostra a Figura 6.3a, mantendo-se alta para os dois dias seguintes principalmente no dia 16 (Figura 6.3b), dia que apresenta a queda na medida de ozônio efetuada pelo Brewer. A trajetória de massa de ar (Figura 6.4a) e a imagem de satélite (Figura 6.4b) complementam a análise evidenciando a origem polar das massas de ar que atingiram o sul do Brasil no evento.

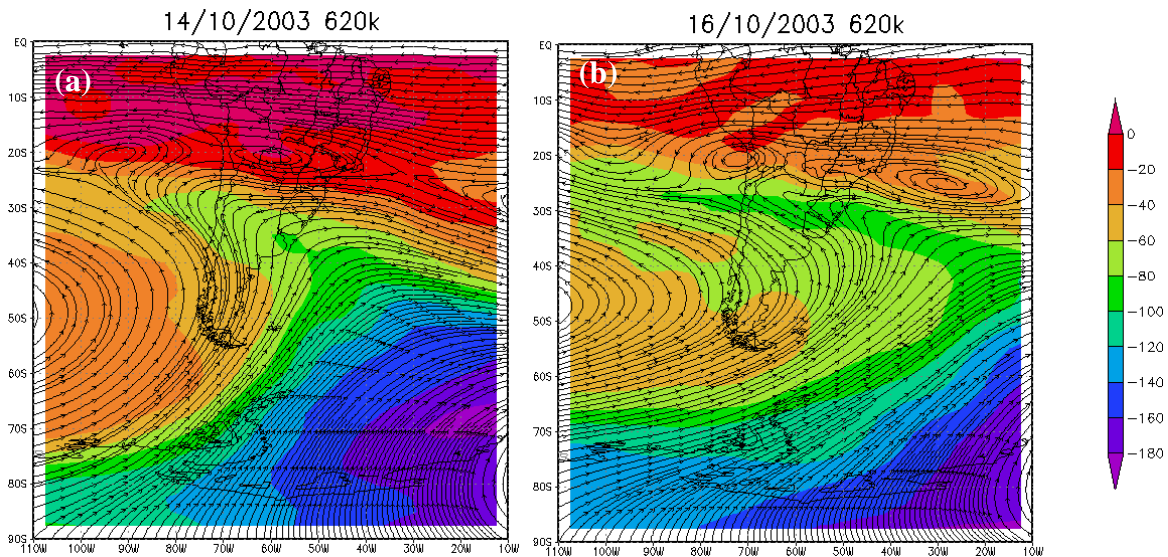


Fig. 6.3 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 14 de outubro de 2003 e em (b) no dia 16 de outubro de 2003 a 620K.

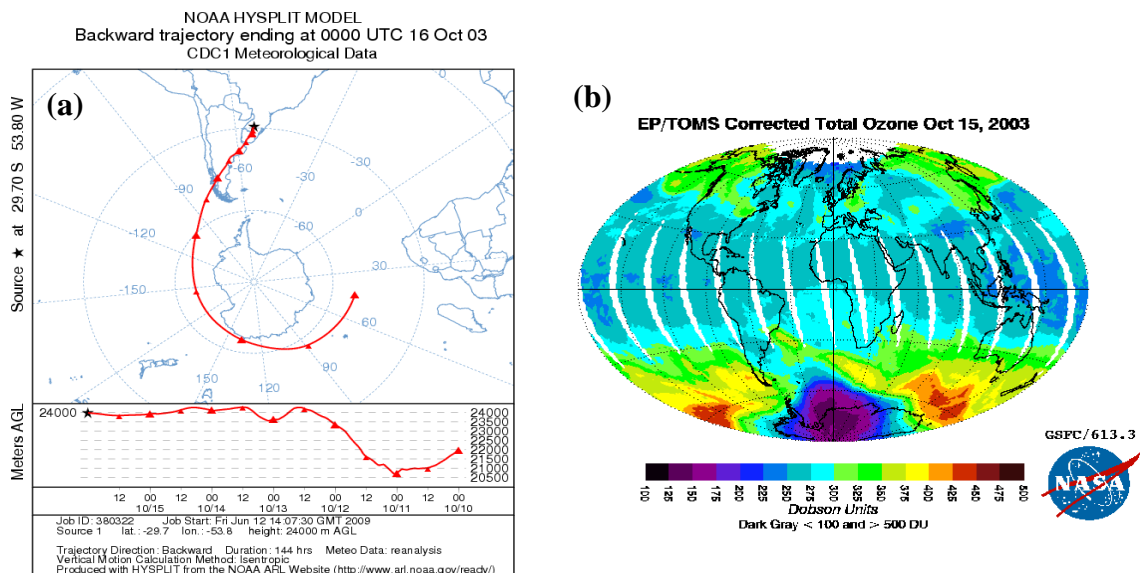


Fig. 6.4 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 16 e para os 6 dias anteriores de 16 de outubro de 2003 e em (b) imagem de satélite mostrando o deslocamento, no dia 15 de outubro de 2003, de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil.

Análise relativa ao evento do dia 17 de outubro de 2004 está apresentada nas Figuras 6.5 e 6.6. Neste dia, o espectrofotômetro Brewer apresentou uma medida da coluna total de ozônio de 253,6 UD. Observa-se nas Figuras 6.5a e 6.5b, que o aumento de vorticidade na região sul do Brasil proveniente da região polar comprova a influência do

Buraco de Ozônio Antártico. A Figura 6.6a, com a trajetória de massa de ar e a Figura 6.6b, com a imagem do satélite TOMS complementam a referida análise.

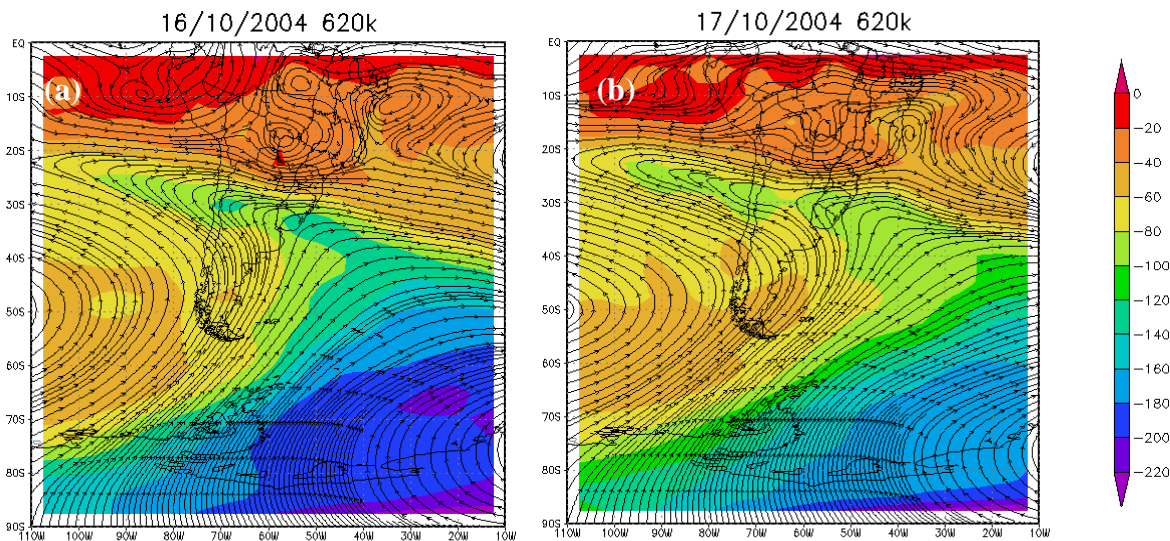


Fig. 6.5 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 16 de outubro de 2004 e em (b) no dia 17 de outubro de 2004 a 620K.

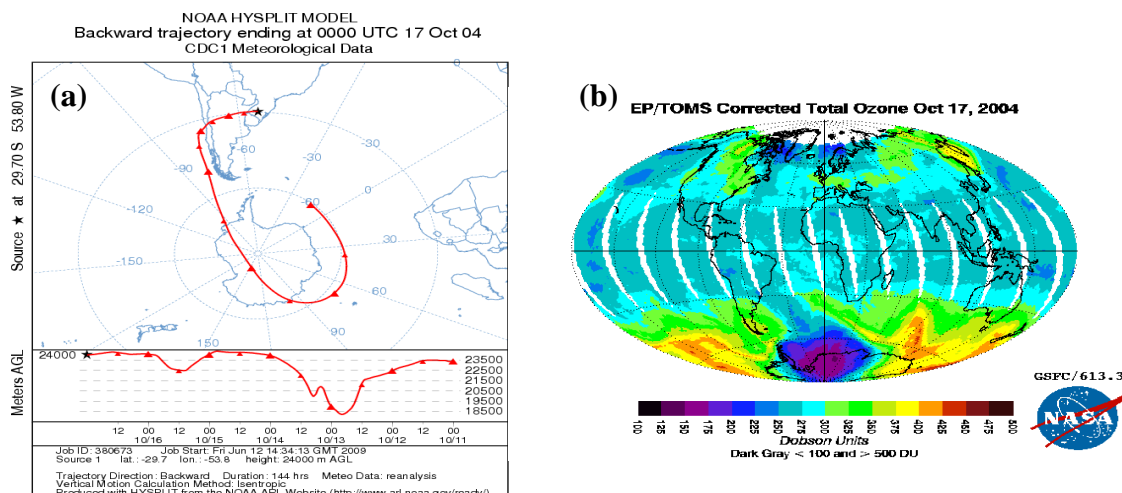


Fig. 6.6 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 17 e para os 6 dias anteriores de 17 de outubro de 2004 e em (b) imagem de satélite mostrando o deslocamento, no dia 17 de outubro de 2004, de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil.

O dia 14 de outubro de 2008 apresentou uma medida da coluna total de ozônio de 269,6 UD. Para esse evento começa a haver aumento da vorticidade potencial absoluta na região sul do Brasil no dia 10 de outubro de 2008 (Figura 6.7a), indicando a chegada de uma massa de ar polar, deixando mais baixas as medidas de ozônio na região. A

vorticidade continua alta até o dia 14 de outubro (Figura 6.7b) que apresenta a menor medida de ozônio neste evento. Na Figura 6.8, a trajetória de massa de ar em (a) e imagem de satélite em (b) ajudam a comprovar o Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico.

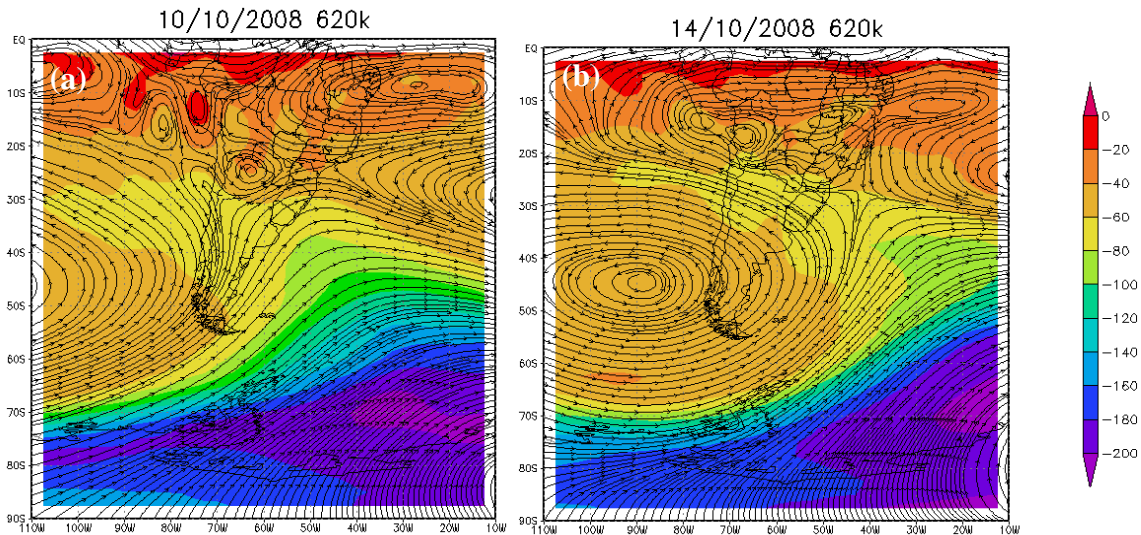


Fig. 6.7 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 10 de outubro de 2008 e em (b) no dia 14 de outubro de 2008 a 620K.

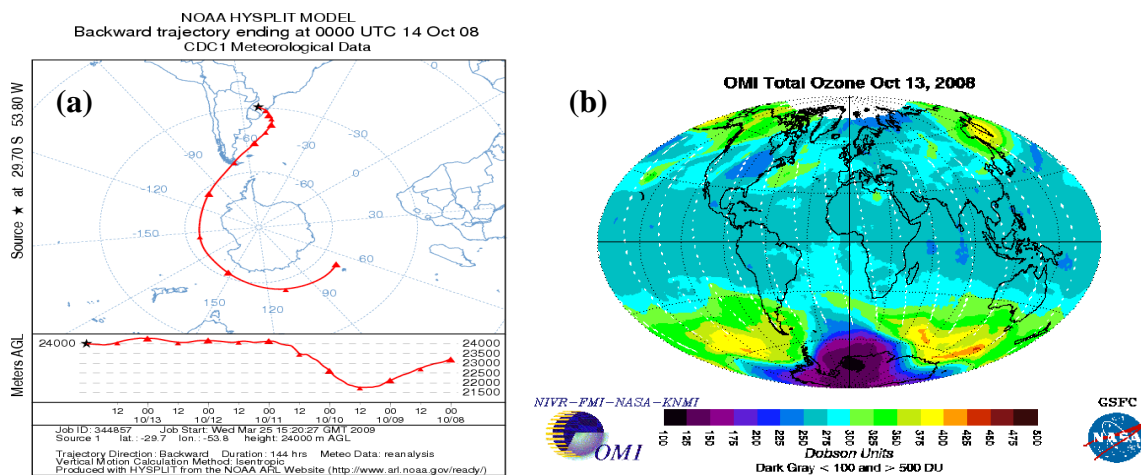


Fig. 6.8 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 14 e para os 6 dias anteriores a 14 de outubro de 2008 e em (b) imagem de satélite mostrando o deslocamento de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil, no dia que antecede a queda de ozônio, dia 13 de outubro 2008.

O dia 05 de setembro de 2009 apresentou uma medida da coluna total de ozônio de 261,2 UD e para esse evento começa a haver aumento da vorticidade potencial absoluta na região sul do Brasil já no dia 03 de setembro (Figura 6.9a), indicando a chegada de uma

massa de ar polar, deixando mais baixas as medidas de ozônio na região. A vorticidade continua alta até o dia 05 de setembro (Figura 6.9b), porém a medida de ozônio mais baixa é verificada no dia 06 de setembro, no valor de 249,9 UD, após a passagem da massa de ar neste evento. Na Figura 6.10, a trajetória de massa de ar em (a) e imagem de satélite em (b) ajudam a comprovar o Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico.

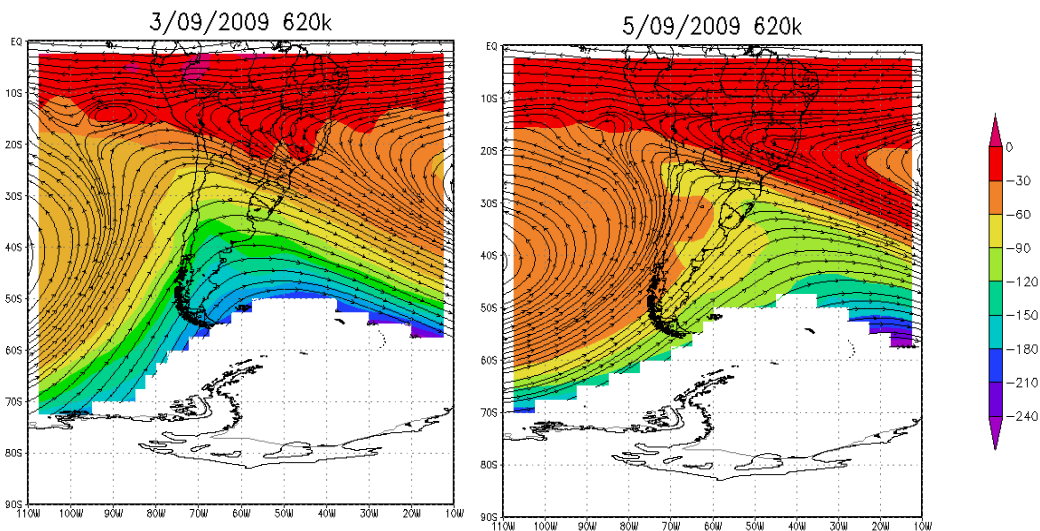


Fig. 6.9 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 03 de setembro de 2009 e em (b) no dia 05 de setembro de 2009 a 620K.

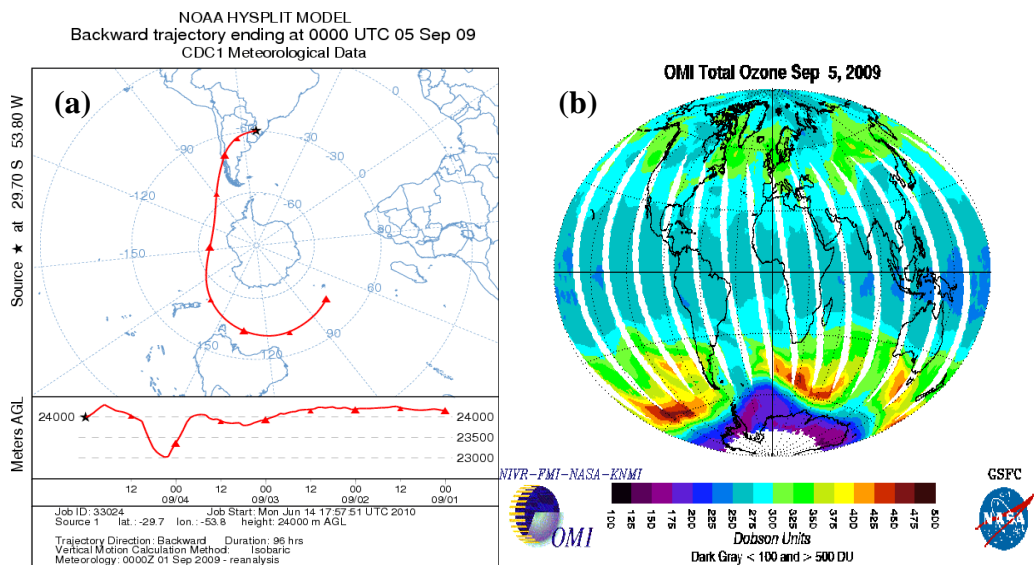


Fig. 6.10 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 05 e para os 4 dias anteriores de 05 de setembro de 2009 e em (b) imagem de satélite mostrando o deslocamento de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil, no dia que antecede a queda de ozônio, dia 05 de setembro 2009.

6.2.2 Eventos no ano de 2010

O ano de 2010 apresentou dois eventos considerados Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico, 13 e 22 de outubro. As médias e desvios padrão para os meses de setembro e outubro, respectivamente, foram de $295,3 \pm 8,3$ UD e $289,5 \pm 7,7$ UD.

O dia 13 de outubro apresentou uma medida da coluna total de ozônio de 277,7 UD. Para esse evento começa a haver um aumento na vorticidade potencial absoluta na região sul do Brasil no dia 12 de outubro (Figura 6.11a) indicando a chegada de uma massa de ar polar. Porém, foi no dia 13 de outubro (Figura 6.11b) que ficou mais visível que o valor absoluto da vorticidade potencial aumentou sobre a região central do Rio Grande do Sul. A coluna total de ozônio mais baixa é verificada no dia 12 de outubro, no valor de 274,6 UD. Na Figura 6.12, a trajetória de massa de ar em (a) e imagem de satélite em (b) ajudam a comprovar o Efeito Secundário do Buraco de Ozônio Antártico.

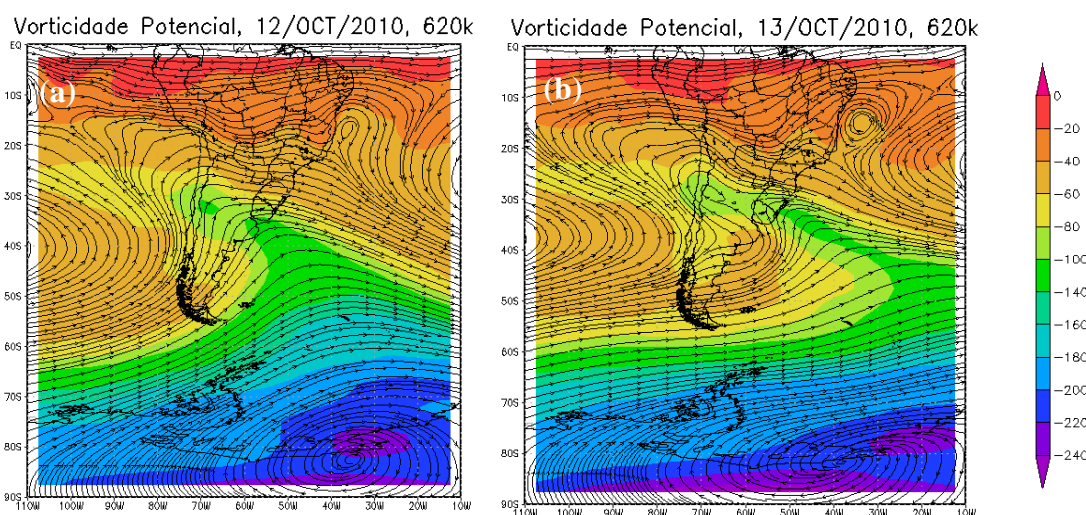


Fig. 6.11 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 12 de outubro de 2010 e em (b) no dia 13 de outubro de 2010 a 620K.

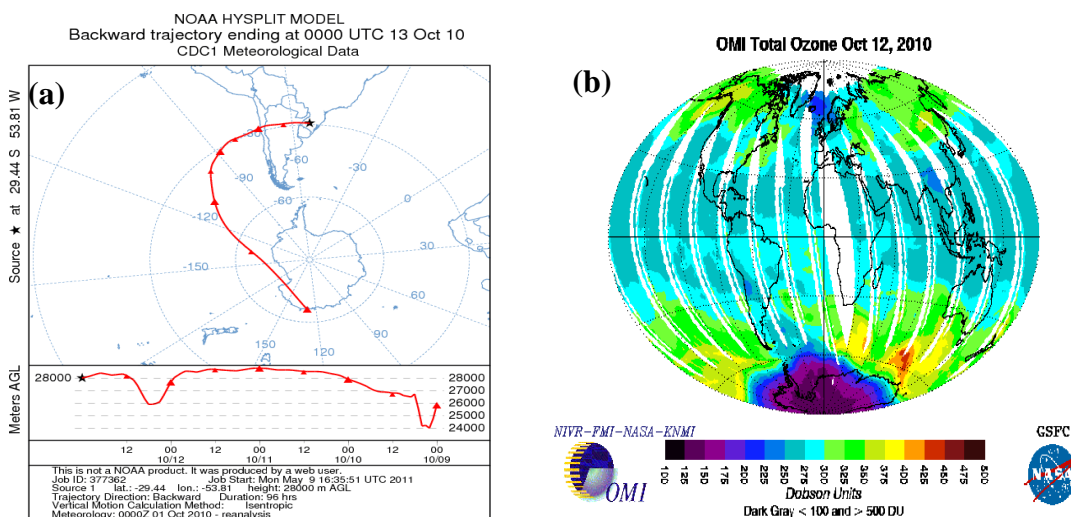


Fig. 6.12 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 13 e para os 4 dias anteriores a 13 de outubro de 2010 e em (b) imagem de satélite mostrando o deslocamento de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico para o Sul do Brasil no dia 12 de outubro de 2010.

O dia 22 de outubro apresentou uma medida de 260,0 UD. O aumento da vorticidade potencial absoluta começou no dia 21 de outubro, apresentado na Figura 6.13a, e se manteve até o dia 22 de outubro, Figura 6.13b, dia da maior queda nas medidas de ozônio. Na Figura 6.14, a trajetória de massa de ar (a) comprova a origem polar da massa de ar pobre em ozônio que atinge a região sul do Brasil bem como a imagem de satélite (b).

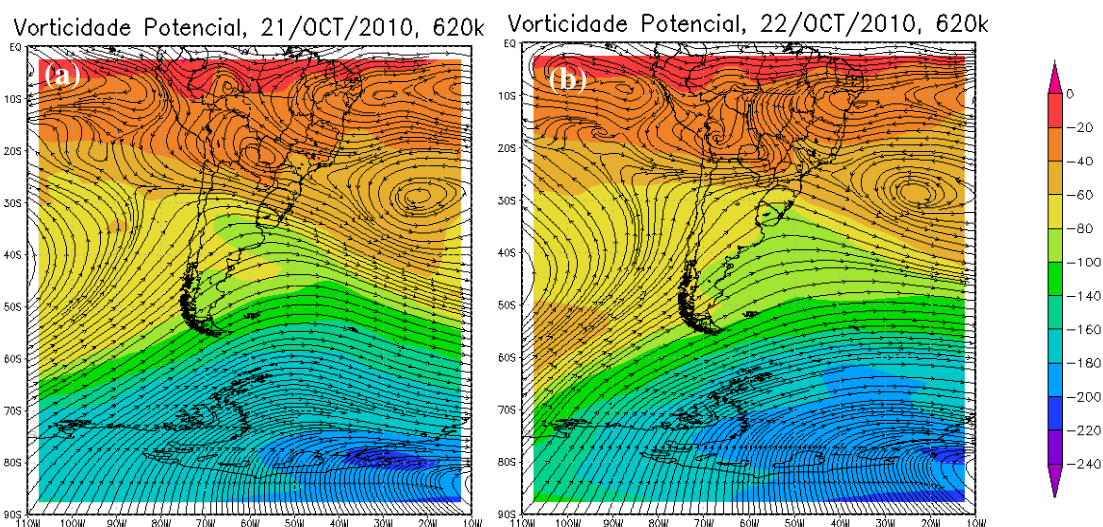


Fig. 6.13 - Vorticidade potencial com campos de vento sobrepostos em superfícies isentrópicas indicando o possível movimento das massas de ar em (a) no dia 21 de outubro de 2010 e em (b) no dia 22 de outubro de 2010 a 620K.

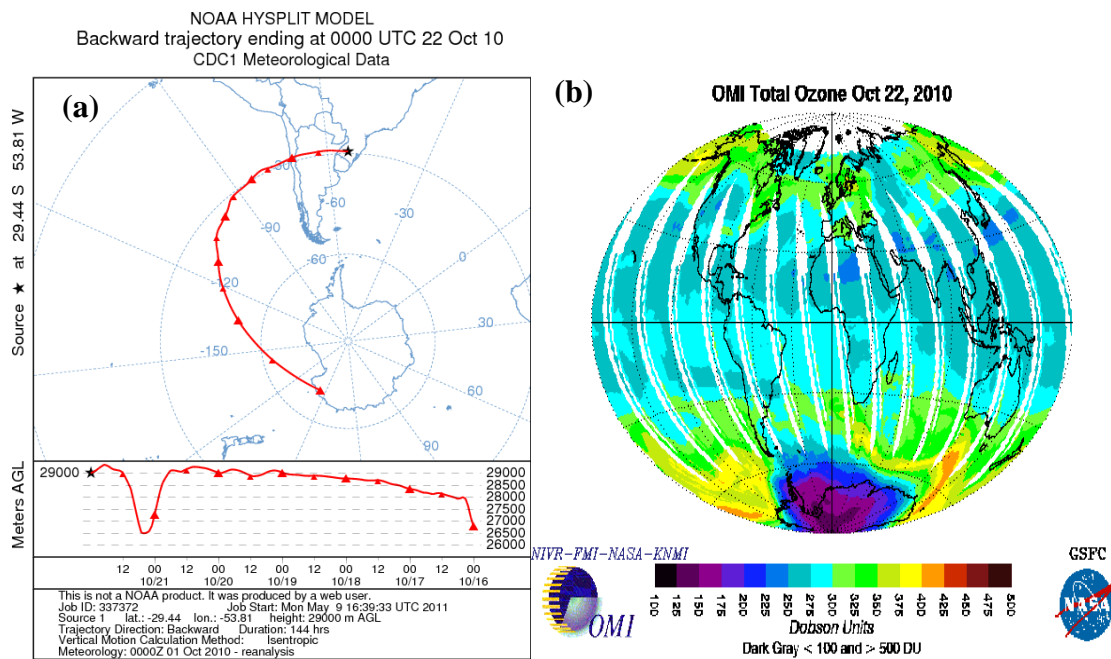


Fig. 6.14 - (a) Origem da trajetória das massas de ar para o dia 22 e para os 6 dias anteriores de 22 de outubro de 2010 e em (b) imagem de satélite mostrando a passagem, no dia 22 de outubro de 2010, de massa de ar do Buraco de Ozônio Antártico sobre o Sul do Brasil.

Para os eventos estudados, tanto a análise de vorticidade potencial em superfícies isentrópicas quanto as trajetórias de massa de ar comprovam a origem polar das massas de ar pobre em ozônio que atingem a Região Sul do Brasil.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E ATIVIDADES FUTURAS

No Projeto de Pesquisa trabalha-se com dados de ozônio do espectrofotômetro Brewer e dos sensores TOMS e OMI. A partir da análise dos dados e a separação dos dias de queda nas medidas de ozônio, aplica-se a análise isentrópica e são traçadas trajetórias de massas de ar. Através da análise isentrópica, os dias em que se observa aumento de Vorticidade Potencial Absoluta (Vorticidade Potencial em módulo) na Região Sul do Brasil têm fortes indícios de que a origem das massas de ar pobres em ozônio é proveniente da região Antártica, o que fica ainda mais evidente com o auxílio das trajetórias retroativas de massas de ar.

Das análises de 2010, houve vários dias com quedas na coluna total de ozônio, em relação às médias mensais, nos meses de setembro e outubro, porém em apenas dois dias do mês de outubro pôde ser comprovado que essas quedas deram-se por causa da influência das massas de ar pobres em ozônio do continente antártico. Através da análise isentrópica, observa-se que os eventos contam com, no mínimo, dois dias de atuação, e que o dia em que a coluna total de ozônio encontra-se mínima pode não ser o dia exato em que há aumento na VPA (vorticidade potencial absoluta) sobre a região. No período, efetuaram-se mudanças na rotina de cálculo da VP, ocorrendo notada melhora na precisão dos valores postos no modelo para gerar as superfícies isentrópicas. Mais precisamente, a barra de valores da VP foi fixada, mantendo um intervalo de 20 unidades entre cada valor.

Como continuação do trabalho, pretende-se analisar um período maior de dados, com dados a partir de 1979 do TOMS, a fim de caracterizar os Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico quanto aos valores médios de queda de ozônio sobre a região do Observatório Espacial do Sul, número de dias para que a massa de ar Antártica chegue ao sul do Brasil e nível de altitude no qual a massa chega preferencialmente. Manter o banco de dados de ozônio sempre atualizado e observar a provável ocorrência de novos eventos de Efeitos Secundários do Buraco de Ozônio Antártico.

CAPÍTULO 8

TRABALHOS PUBLICADOS E APRESENTADOS

Ao longo do período da bolsa, os seguintes trabalhos estão aceitos para serem apresentados pela bolsista:

- Análise da ocorrência dos eventos de efeitos secundários do buraco de ozônio antártico sobre o Sul do Brasil.

CRESPO, Natália M.; LEME, Neusa Paes; SCHUCH, Nelson J.; PINHEIRO, Damaris K. *SICCRS* – Simpósio de Iniciação Científica do CRS/CCR/INPE – MCT, 2011, Santa Maria.

CAPÍTULO 9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASSEUR, G., and S. SOLOMOM, **Aeronomy of the middle atmosphere**, D. Reidel, Dordrecht, 1984.

Brewer Ozone Spectrophotometer Operator's Manual, MKIV #081, 1999.

Brewer Ozone Spectrophotometer Operator's Manual, MKIII #167, 1999.

CHUBACHI, S.; MIYAGAWA, K.; MAKINO. **A case study of the low total ozone event over Europe on 14 February 2001**. INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING. V:26; I:16; P: 3423-3431; August 2005.

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

EARTH OBSERVING SYSTEM (EOS) AURA. Disponível em: <<http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi.html>>.

EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/reanalysis.shtml>>.

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G. and SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. **Nature**, v. 315, p. 207-210, 1985.

GARCIA, R.R. and SOLOMON, S. A Possible Relationship Between Interannual Variability in Antarctic Ozone and the Quasi-Biennial Oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 14, p. 848-851, 1987

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

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

HOLTON, J. R., **An introduction to Dynamic Meteorology**, Elsevier Academic Press, 4^a Edition, 535 p., San Diego, USA, 2004.

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.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. BARNES, R.A. and TORRES, A.L., Ozone climatology at Natal, from in situ ozonesonde data, **J. Geophys. Res.**, v. 96, p. 899-909, 1991

MOORE, J. T. **Isentropic analysis and interpretation – Operational Applications to synoptic and mesoscale forecast problems**. National Weather Service Training Center, Kansas City, Missouri, 99p., 1993.

OHRING, G.; BOJKOV, R. D.; BOLLE, H. J, HUDSON, R. D. and VOLKERT, H. Radiation and Ozone: Catalysts for Advancing International Atmospheric Science Programmes for over half a century. *Space research Today*, n177, April 2010.

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

READY HYSPLIT TRAJECTORIES. Disponível em:
< http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php >.

SAHAI, Y., KIRCHHOFF, V. W. J. H., PAES LEME, N. M. and CASICCIA, C. Total ozone trends in the tropics, **J. Geophys. Res.**, 105, 19,823-19,828, 2000.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics. International geophysics series**, v. 61, Academic Press, 1995.

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.

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

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

TOTAL OZONE MAPPING SPECTROMETER. Disponível em:
< http://jwocky.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone_v8.html >

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**, Editora UFV, Viçosa, 449 p., 2000.

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

WHITTEN, R. C. and PRASAD, S. S., **Ozone in Free Atmosphere**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 288 p., 1985.