

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**ENVELOPAMENTO DA TROPOPAUSA NO SUL DA
AMÉRICA DO SUL: RELAÇÕES ENTRE A
CORRENTE DE JATO EM ALTOS NÍVEIS E A
COLUNA TOTAL DE OZÔNIO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

José Lourêdo Fontinele

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**ENVELOPAMENTO DA TROPOPAUSA NO SUL DA
AMÉRICA DO SUL: RELAÇÕES ENTRE A CORRENTE DE
JATO EM ALTOS NÍVEIS E A COLUNA TOTAL DE OZÔNIO**

José Lourêdo Fontinele

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Ciências Naturais e Exatas, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Meteorologia.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Damaris Kirsch Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fontinele, José Lourêdo

Envelopamento da tropopausa no sul da América do Sul: relações entre a corrente de jato em altos níveis e a coluna total de ozônio / José Lourêdo Fontinele.-2012.
82 p.; 30cm

Orientadora: Damaris Kirsch Pinheiro

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, RS, 2012

1. Frente fria 2. Corrente de jato 3. Ozônio atmosférico I. Pinheiro, Damaris Kirsch II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova, a Dissertação de Mestrado

**ENVELOPAMENTO DA TROPOPAUSA NO SUL DA AMÉRICA DO
SUL: RELAÇÕES ENTRE A CORRENTE DE JATO EM ALTOS NÍVEIS
E A COLUNA TOTAL DE OZÔNIO**

elaborada por
José Lourêdo Fontinele

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Meteorologia

Comissão Examinadora:

Damaris Kirsch Pinheiro, Dra. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Vagner Anabor, Dr. (UFSM)

Glauber Lopes Mariano, Dr. (UFPEL)

Santa Maria, 19 de novembro de 2012.

DEDICATÓRIA

A minha esposa, por ter permanecido ao meu lado, me incentivando a percorrer este caminho, por compartilhar angústias e dúvidas estendendo sua mão amiga em momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a DEUS por ter me dado força e sabedoria para trilhar o caminho dessa pesquisa.

Depois à Universidade Federal de Santa Maria, particularmente ao Centro de Ciências Naturais e Exatas, por ter me dado a oportunidade de aumentar os meus conhecimentos.

À minha orientadora, Prof^a Dr^a Damaris Kirsch Pinheiro, pela paciência, competência e dedicação na maneira de ensinar, de conduzir as orientações para realização da pesquisa. Exemplo de profissional.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) por oportunizar este trabalho de pesquisa.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação e Graduação em Meteorologia pela troca de conhecimentos e amizade.

Ao Prof Dr Vagner Anabor pelo incentivo e esclarecimentos de assuntos pertinentes à pesquisa.

Ao Prof Dr Plínio Carlos Alvalá, que além do incentivo, contribuiu muito com os seus ensinamentos e experiência.

Ao TCEl Esp Met Eduardo Iorio Pereira, Chefe da Divisão de Ciências Atmosféricas, pela compreensão e apoio nos momentos que precisei me ausentar do trabalho (IAE/ACA).

Ao meu colega e amigo Lucas Vaz Peres pelo apoio, incentivo e contribuição na coleta de dados, bem como na discussão de assuntos relacionados à pesquisa.

Em especial, agradeço muito à minha família: minha mãe Zenaide, minha esposa Carmem e meu filho Julierme, pelo carinho, paciência e pela ajuda incondicional em todas as etapas desta caminhada.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)

ENVELOPAMENTO DA TROPOPAUSA NO SUL DA AMÉRICA DO SUL: RELAÇÕES ENTRE A CORRENTE DE JATO EM ALTOS NÍVEIS E A COLUNA TOTAL DE OZÔNIO

AUTOR: JOSÉ LOURÊDO FONTINELE

ORIENTADORA: DAMARIS KIRSCH PINHEIRO

Data e Local de Apresentação: Santa Maria, 19 de novembro de 2012.

O presente estudo trata da influência do envelopamento da tropopausa na coluna total de ozônio, durante a passagem dos sistemas frontais. Esta pesquisa tem como objetivo analisar, a partir das relações entre a corrente de jato em altos níveis e a coluna total de ozônio, o envelopamento da tropopausa no sul da América do Sul. Pretende-se também quantificar as frentes frias que agiram ao longo de 2008, bem como identificá-las em eventos de envelopamento da tropopausa e ação da corrente de jato. Por fim, verifica-se como ocorre a intrusão de ar estratosférico para a troposfera em eventos escolhidos. A presente pesquisa se caracteriza por ser predominantemente de caráter qualitativo em relação ao levantamento e análise dos dados, obtidos através de Espectrofotômetro Brewer, instalado no Observatório Espacial do Sul, e pelo Ozone Monitoring Instrument (OMI). Ressalta-se que foram inicialmente selecionados todos os eventos de frentes frias ocorridos em 2008. Porém, apenas os eventos de maior magnitude foram analisados e destes foram escolhidos os que evidenciavam um forte envelopamento da tropopausa. Dos resultados analisados, pode-se concluir que a coluna total de ozônio sofre influência com a passagem das frentes, podendo aumentar quando ocorre a intrusão do ar estratosférico na troposfera, através do envelopamento da tropopausa, causado pela ação da corrente de jato que acompanha a frente.

Palavras-chave: Frente fria. Corrente de jato. Ozônio atmosférico.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)

TROPOPAUSE FOLDING IN SOUTHERN SOUTH AMERICA: RELATIONS BETWEEN THE UPPER LEVEL JET AND THE OZONE TOTAL COLUMN

AUTOR: JOSÉ LOURÊDO FONTINELE

ORIENTADORA: DAMARIS KIRSCH PINHEIRO

Data e Local de Apresentação: Santa Maria, 19 de novembro de 2012.

This study discusses the influence of tropopause folding in ozone total column during the passage of frontal systems. This research aims to analyze, from the relations between the upper level jet and the ozone total column, tropopause folding in southern South America. The aim is also to quantify the cold fronts that have acted throughout 2008, as well as identify them in tropopause folding events and action of the jet stream. Finally, it verifies the occurrence of stratospheric air into the troposphere at selected events. This research is characterized by being predominantly qualitative in relation to the collection and analysis of data obtained from Brewer Spectrophotometers, installed at the Southern Space Observatory, and the Ozone Monitoring Instrument (OMI). It is noteworthy that were initially selected all events of cold fronts that occurred in 2008. However, only events of greater magnitude were analyzed and the chosen were the ones that evidenced a strong tropopause folding. Of the results analyzed, we can conclude that the ozone total column is influenced by the passage of fronts and may increase when there is intrusion of stratospheric air in the troposphere through the tropopause folding, caused by the action of the jet stream that comes with the front.

Keywords: Cold front. Jet stream. Atmospheric ozone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo da Corrente de Jato Polar e Frente Polar na Seção Vertical com Isotacas (Fina, m. s^{-1}) e Isotermas (Tracejada, $^{\circ}\text{C}$). A Quebra na Tropopausa está Associada com a Camada Frontal Vertical.....	17
Figura 2 – Esquema das Correntes de Jato e Tropopausa.....	18
Figura 3 – Aspectos Dinâmicos das Trocas entre Estratosfera e Troposfera. A Tropopausa é Mostrada pela Linha Espessa. As Linhas Finas são as Isentrópicas ou Superfícies de Temperatura Potencial Constante em Kelvins. A Região Fortemente Sombreada é a Baixa Estratosfera, área entre a Estratosfera Superior e Tropopausa. A Região acima da Superfície de 380K fica na Estratosfera Superior, onde as Isentropas Ficam Inteiramente na Estratosfera.	19
Figura 4 – Camadas da atmosfera e comportamento da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e pressão (mb) em relação a altura (km).	22
Figura 5 – Concentrações de ozônio (em 10^{12} moléculas/ cm^3) em função da altitude e latitude.	25
Figura 6 – Coluna total de ozônio em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson.	26
Figura 7 – Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio em função da latitude e altitude entre os anos de 1980-1989.....	27
Figura 8 – Esquema do transporte das massas de ar na estratosfera.	28
Figura 9 – Corte vertical do evento de envelopamento de tropopausa do dia 13 de março de 1978.	30
Figura 10 – Células de circulação geral, ventos globais predominantes e centros de alta (A) e baixa (B) pressão atmosférica.	34
Figura 11 – Elementos ópticos do Espectrofotômetro Brewer MK III.	40
Figura 12 – Espectrofotômetro Brewer MK III # 167 atualmente instalado no Observatório Espacial do Sul, CRSPE/INPE – MCT.....	42
Figura 13 – Esquema de montagem do Ozone Monitoring Instrument (OMI).	43
Figura 14 – Imagem Satélite GOES-10 do canal visível do dia 02/04/08 às 13:00 UTC.....	48
Figura 15 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 02/04/08.	49

Figura 16 – Corte vertical da Corrente de Jato sobre a região central do Rio Grande do Sul para o dia 02/04/2008.	50
Figura 17 – Imagem de Satélite OMI do dia 02/04/08.....	51
Figura 18 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 02/04/08. ...	52
Figura 19 – Imagem de Satélite GOES-10 para o infravermelho e realçada, dia 09/06/08 às 18:00 UTC.	53
Figura 20 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 09/06/08.....	54
Figura 21 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb.....	55
Figura 22 – Imagem de Satélite OMI do dia 09/06/08.....	56
Figura 23 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 09/06/08. ...	57
Figura 24 – Imagem de Satélite GOES-10 para o Infravermelho e realçada, dia 30/07/08 às 12:00 UTC.	58
Figura 25 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 30/07/08.....	59
Figura 26 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb.....	60
Figura 27 – Imagem de Satélite OMI do dia 30/07/08.....	61
Figura 28 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 30/07/08. ...	62
Figura 29 – Imagem de Satélite GOES-10 para o infravermelho e realçada, dia 22/10/08 às 18:00UTC.	63
Figura 30 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 22/10/08.....	64
Figura 31 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb.....	65
Figura 32 – Imagem de Satélite OMI do dia 22/10/08.....	66
Figura 33 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 22/10/08. ...	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistemas Frontais Analisados em 2008	46
Tabela 2 – Síntese dos eventos analisados de 2008	69

LISTA DE SIGLAS

CETESB	– Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
CLIMANÁLISE	– Boletim de Monitoramento e Análise Climática
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DHN	– Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil
DS	– Direto ao Sol
GOES	– Satélite Meteorológico Geoestacionário da NOAA
GRADS	– Sistema de Visualização e Análise de Dados em Pontos de Grade
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JP	– Jato Polar
JST	– Jato Subtropical
MCT	– Ministério da Ciência e Tecnologia
METAR	– Observação Meteorológica de Superfície
METEOSAT	– Satélite Meteorológico Geoestacionário da Agência Espacial Européia
NCAR	– Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica
NCEP	– Centro Nacional de Previsão Ambiental
NOAA	– Administração Nacional dos Oceanos e da Atmosfera dos EUA
OES	– Observatório Espacial do Sul
OMI	– Instrumento de monitoramento de ozônio
OMM	– Organização Meteorológica Mundial
PNM	– Pressão ao Nível do Mar
REDEMET	– Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica
RS	– Rio Grande do Sul
UD	– Unidade Dobson
UFSM	– Universidade Federal de Santa Maria
UTC	– Tempo Universal Coordenado
ZS	– Céu Zênite

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A – Código Metar.....	77
--------------------------------	----

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
1.1 Corrente de jato	19
1.1.1 Definição	20
1.1.2 Jato subtropical e jato polar: diferenças e variabilidade sazonal.....	20
1.2 Camadas da atmosfera.....	21
1.3 Ozônio.....	23
1.3.1 Distribuição do conteúdo de ozônio na atmosfera	24
1.3.2 Transporte de ozônio na atmosfera.....	28
1.4 Dinâmica da estratosfera	31
1.5 Influência da dinâmica no ozônio.....	32
1.6 Passagens de frentes frias no Sul do Brasil	37
2 METODOLOGIA	38
2.1 Equipamentos utilizados.....	38
2.1.1 Espectrofotômetro Brewer.....	38
2.1.2 Ozone Monitoring Instrument (OMI)	42
2.1.3 Dados meteorológicos, variáveis NCEP e GrADS	44
2.2 Critérios utilizados na determinação objetiva de frentes frias	44
3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
3.1 Análise dos eventos de passagem de frentes em 2008	47
3.1.1 Mês de Abril de 2008	47
3.1.2 Mês de Junho de 2008.....	53
3.1.3 Mês de Julho de 2008	58
3.1.4 Mês de Outubro de 2008:.....	62
3.2 Discussão dos resultados	67
CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICES	76

INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul situa-se em uma região latitudinal favorável à atuação de diversos fenômenos, que afetam as condições meteorológicas no estado, como por exemplo, as frentes frias. Considerando os fenômenos de escala sinótica, têm-se as frentes frias, que passam regularmente pelo estado, favorecendo a boa distribuição espacial e temporal das chuvas, conforme mostrado em Cera e Ferraz (2007).

Os sistemas frontais são os fenômenos meteorológicos que mais influenciam o tempo em nosso continente. Um sistema frontal clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície, denominado ciclone (OLIVEIRA et al. 2001).

As frentes frias também sofrem os efeitos de perturbações de maior escala. Fedorova e Carvalho (2000) mostraram que nos meses em que os fenômenos de La Niña e El Niño estão na sua fase mais ativa, a quantidade de dias com frentes frias na faixa latitudinal entre 20°S e 40°S foi maior no ano de El Niño (90,3%) do que de La Niña (56,7%).

A formação e o desenvolvimento de ciclones na atmosfera, denominados de ciclogênese, são estudados desde o século XIX, em razão da grande importância que tais sistemas assumem no transporte de calor, na umidade e na quantidade de movimento, além de mudanças no tempo nas regiões em que atuam. Somente após o final da primeira Guerra Mundial, o primeiro modelo conceitual mais realístico de ciclones extratropicais foi descrito por Bjerknes (1919) e Solberg (1922), e continua aceito até hoje. Em médias latitudes, as frentes normalmente ocorrem como parte de grandes sistemas de tempestades, conhecidos como ciclones de latitudes médias ou ciclones extratropicais. O ciclone de latitude média é um sistema de tempo que inclui uma bem definida área de baixa pressão sobre a superfície, associado a uma frente quente, fria e oclusa.

Como ressaltado por Emanuel (2008), no modelo norueguês existia uma relação íntima entre frentes, massas de ar e ciclones extratropicais: "O ciclone consiste de duas massas de ar essencialmente diferentes, uma de origem fria e

outra de origem quente. Elas são separadas por uma superfície distinta que se estende pelo centro do ciclone” (BJERKNES e SOLBERG, 1922).

Embora seja 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 ozônio é uma molécula que existe em toda a atmosfera. Na parte mais baixa, a troposfera, região entre o solo e 15 km de altura, a concentração é relativamente baixa. Na estratosfera, que fica entre 15 e 50 km, a concentração do ozônio passa por um máximo, em média, a 30 km. Entre 25 e 35 km define-se, arbitrariamente, a região da “Camada de Ozônio”. Apenas o ozônio, na atmosfera, tem a propriedade importante de absorver a radiação UV-B. A variação do ozônio tem dois efeitos sobre a temperatura da Terra: ao absorver a radiação ultravioleta, emite calor aquecendo a estratosfera. Na troposfera (baixa atmosfera) atua como poluente.

A proposta deste estudo é identificar a variação na quantidade de ozônio, após a passagem dos sistemas frontais, sobre a região central do Rio Grande do Sul durante o ano de 2008.

Muitos esforços foram empregados na tentativa de avaliar o ritmo da concentração do ozônio associado à dinâmica atmosférica, no início dessa pesquisa, mais especificamente em 2008. Só através da leitura de artigos e de publicações, foi possível fazer um estudo entre sistemas frontais, corrente de jato, envelopamento da tropopausa e variação de ozônio na região central do Rio Grande do Sul. Já que não há trabalhos publicados, até então, no Brasil, sobre o tema.

Do que foi exposto até aqui, surge um problema com duas perguntas:

- 1) Após a passagem das frentes frias, sobre a região central do Rio Grande do Sul, ocorre variação na coluna de ozônio?
- 2) A suposta variação na coluna de ozônio, na região central do Rio Grande do Sul, está relacionada a que outros fenômenos meteorológicos?

Com base nestas questões, esta pesquisa tem como objetivo geral analisar e interpretar, através de gráficos e imagens satélites, o comportamento da coluna de ozônio sobre a região central do Rio Grande do Sul, quando da passagem de

sistemas frontais no ano de 2008. Os objetivos específicos do presente estudo consistem em:

- Quantificar as frentes frias, ao longo de 2008, ao deslocarem sobre o Rio Grande do Sul;
- Identificar que fenômenos meteorológicos, atuam juntamente com as frentes frias, e que possam influenciar na variação do ozônio na região central do Rio Grande do Sul;
- Verificar como ocorre a intrusão de ar estratosférico para a troposfera em eventos escolhidos.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

O modelo que relaciona o sistema frente - jato com isotermas é resumido na Figura 1. Também mostra a corrente de jato polar e a frente polar no corte vertical com as respectivas isotermas. A quebra na tropopausa está associada com a camada frontal vertical. O cisalhamento do vento substitui o contraste térmico na camada frontal vertical perto de 300 mb. A zona frontal é a vasta região que contém a corrente de jato e a parte mais baroclínica da troposfera. A camada frontal é uma pequena escala, proeminente, camada inclinada estável, que normalmente acompanha a corrente de jato.

O envelopamento da tropopausa ocorre em áreas de grande cisalhamento vertical e fortes gradientes térmicos meridionais (Holton 2004, p. 144), conforme Figura 2. Assim, eventos de envelopamento da tropopausa normalmente ocorrem junto com ciclogêneses.

Shapiro 1980 estimou observacionalmente, que cinquenta por cento da massa, dentro de uma dobra, é trocado com o ar troposférico durante a penetração para baixo. Estes eventos ocorrem ao longo do ano, e, sua localização, segue o deslocamento sazonal da corrente de jato polar.

A baixa tropopausa origina-se nas latitudes médias e pólos, onde as correntes de jato e tempestades ocorrem; enquanto a alta tropopausa surge no Equador, acompanhando as grandes quantidades de convecção, conforme Figura 3.

Também, na Figura 3, as parcelas de fluidos tendem a seguir as linhas de temperatura potencial constante. O transporte ocorre através das isentropas e é causada pelo aquecimento diabático e pela mistura turbulenta. Em geral, a atmosfera tende a fluir ao longo das isentropas. Nos trópicos, vemos o aquecimento adiabático úmido alimentado pelo vapor de água, produzindo rápido transporte vertical, através das isentropas em células convectivas. Às vezes, esse transporte até atinge a estratosfera, passado a troposfera. Esta é a principal entrada e mecanismo de transporte para a estratosfera da troposfera.

Nas latitudes médias e regiões polares, o transporte descendente de ar estratosférico na troposfera ocorre ao longo das linhas inclinadas de temperatura

potencial constante. O resultado é a transferência irreversível de ar estratosférico polar para latitudes mais baixas e a baixas altitudes.

A estratosfera superior é a área que fica acima da maior isentropa sobre os trópicos. A baixa estratosfera é a área entre a estratosfera superior e a tropopausa. A mistura ocorre entre a troposfera e estratosfera, nessa área inferior da estratosfera.

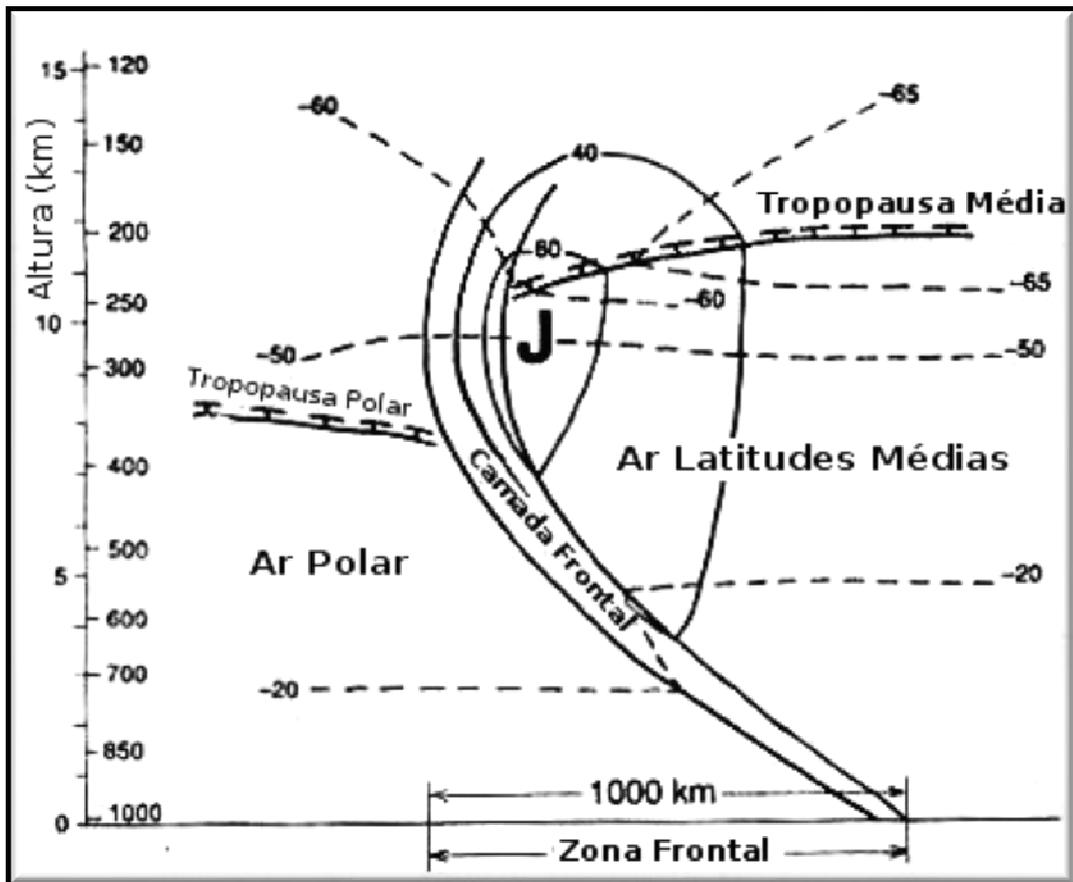


Figura 1 – Modelo da Corrente de Jato Polar e Frente Polar na Seção Vertical com Isotacas (Fina, $m \cdot s^{-1}$) e Isothermas (Tracejada, $^{\circ}C$). A Quebra na Tropopausa está Associada com a Camada Frontal Vertical.

Fonte: Djuric (1994, p.131)

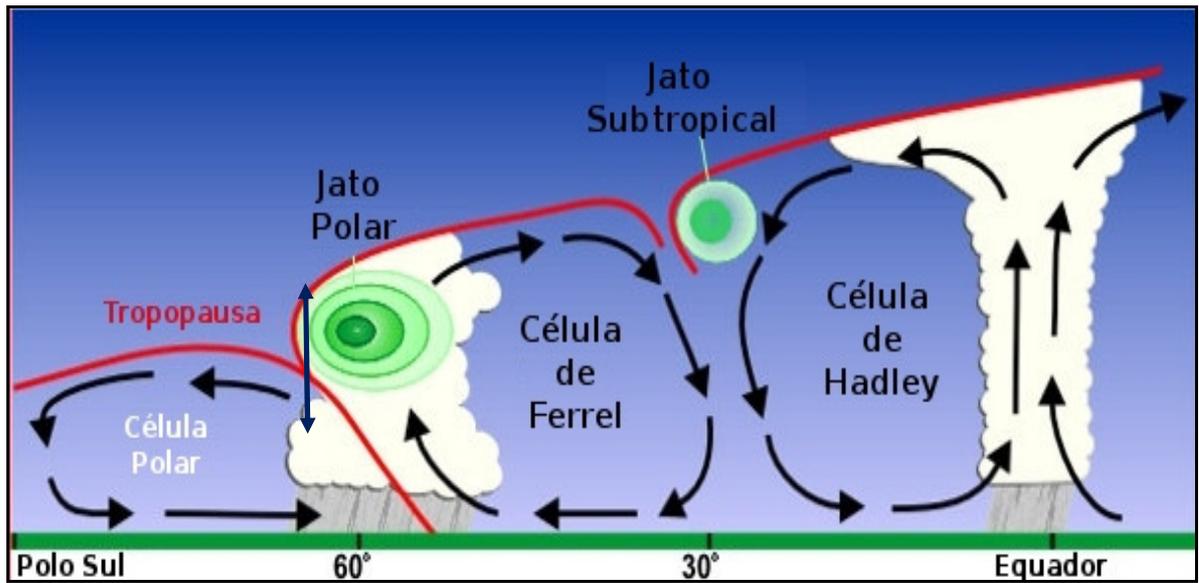


Figura 2 – Esquema das Correntes de Jato e Tropopausa

Fonte: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/jet.htm>

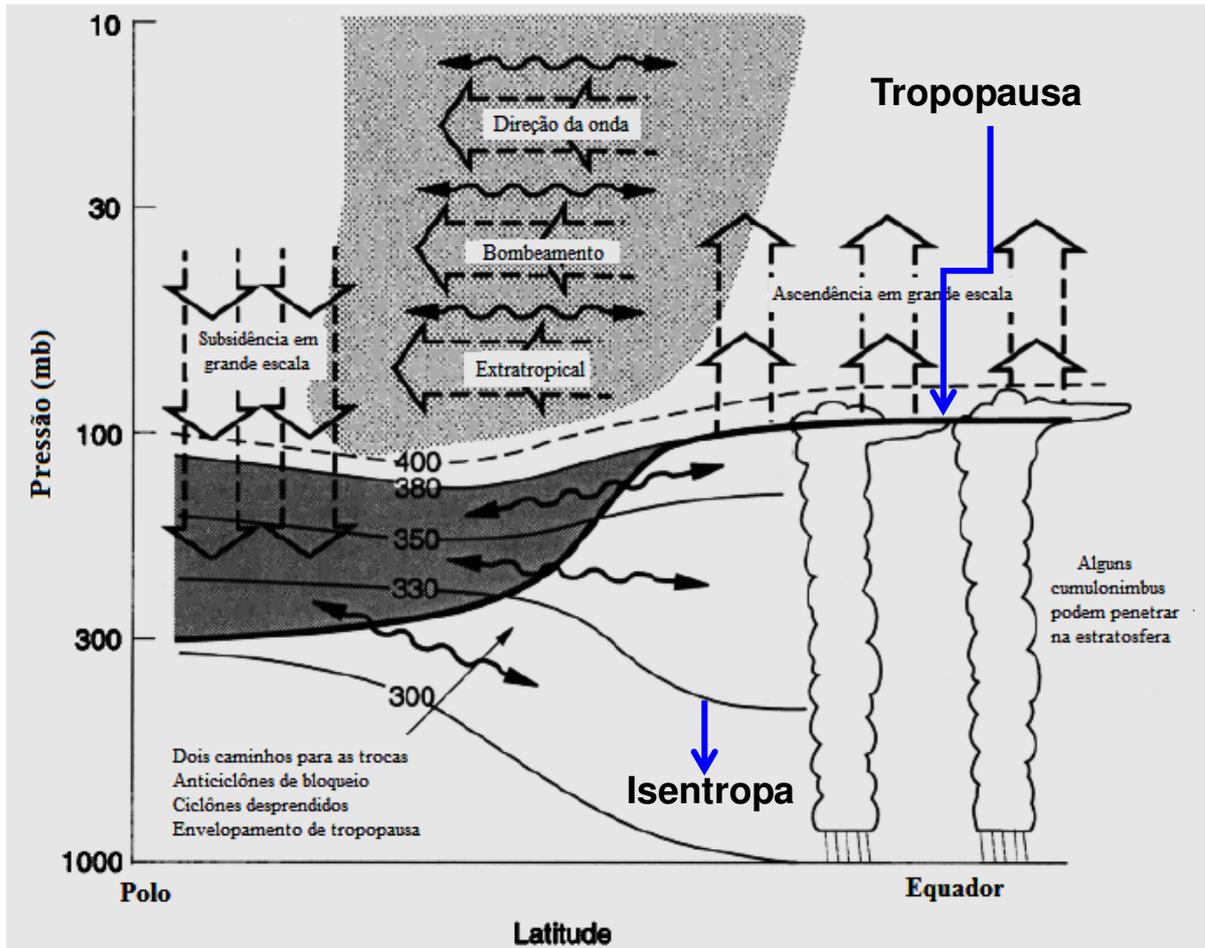


Figura 3 – Aspectos Dinâmicos das Trocas entre Estratosfera e Troposfera. A Tropopausa é Mostrada pela Linha Espessa. As Linhas Finas são as Isentrópicas ou Superfícies de Temperatura Potencial Constante em Kelvins. A Região Fortemente Sombreada é a Baixa Estratosfera, área entre a Estratosfera Superior e Tropopausa. A Região acima da Superfície de 380K fica na Estratosfera Superior, onde as Isentropas Ficam Inteiramente na Estratosfera.

Fonte: Holton et al., 1995

1.1 Corrente de jato

No início do século 20, observações relacionadas ao comportamento dos topos superiores das nuvens cirros já indicavam a existência de ventos fortes na alta troposfera, especificamente acima dos 9.000 m. Apesar do registro precário de observações, não se obteve um conhecimento mais preciso do comportamento do vento em altos níveis até aproximadamente 1933, quando Bjerknes et al. (1933)

conseguiram calcular o comportamento do vento por meio de sondagens de temperaturas derivadas de uma ampla rede de estações.

A partir de 1940, disponibilizou-se maior quantidade de observações em altos níveis, visto que a rede de estações meteorológicas começou a ser mais densa e ampla. Dessa maneira, verificou-se que quase sempre as intensas correntes de ventos estavam concentradas na alta troposfera.

Em 1945, os pilotos norte-americanos sofreram com ventos intensos em altos níveis quando voavam de leste para oeste, querendo atingir alvos japoneses. Detectou-se, assim, a presença de ventos fortes de oeste que faziam os aviões norte-americanos perder potência. Eles acabavam de entrar em contato com o jet stream ou corrente de jato.

1.1.1 Definição

Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1992), a corrente de jato define-se como uma corrente de ar em forma de um estreito cano ou conduto, quase horizontal, geralmente próximo da tropopausa, cujo eixo localiza-se ao longo de uma linha de velocidade máxima e de fortes cisalhamentos horizontais e verticais.

O núcleo da corrente de jato é a linha ao longo da qual as velocidades do vento são máximas tanto na vertical quanto na horizontal. A corrente de jato localiza-se entre 9.000 e 13.000 m de altitude. Ela geralmente tem vários milhares de quilômetros de comprimento, centenas de quilômetros de largura e vários quilômetros de espessura. A velocidade do vento ao longo do eixo principal da corrente de jato é, no mínimo, de 140 km/h, podendo superar os 300 km/h.

1.1.2 Jato subtropical e jato polar: diferenças e variabilidade sazonal

Existem dois tipos de correntes de jato: o Jato Subtropical (JST) e o Jato Polar (JP). O JST é relativamente constante em sua posição em determinada

estação do ano, e predomina nos campos médios sazonais do vento. Enquanto que, o JP é altamente variável em sua posição dia a dia sobre uma ampla faixa de latitudes médias e subtropicais.

No hemisfério sul, o JST aparece geralmente acima dos 13.000 m, na faixa de latitude que vai de 20° a 40°S, e o JP encontra-se entre 8.000 e 10.000 m de latitude, oscilando entre 30° e 70°S. O JST localiza-se aproximadamente sobre o paralelo 30°S e concentrado próximo aos 200 hPa. Por sua vez, o JP está ao sul do paralelo 50°S e concentrado em 250 hPa. A carta sinótica adequada para avaliar a presença dos jatos é a de 250 hPa ou 300 hPa, apesar de o máximo de vento variar entre 100 e 500 hPa.

A altura do jato dependerá da intensidade da massa de ar; quanto mais fria, mais baixo será o jato. Durante o inverno, o JP migra para o norte e aumenta sua elevação, enquanto no verão ele se desloca para o sul, acompanhando o caminho das frentes frias. Observa-se uma menor variabilidade do JST em relação ao JP. O JST tem sua posição média oscilando aproximadamente entre 30° e 35°S, ao passo que o JP apresenta uma posição média que oscila entre 55° e 35°S. Nota-se também que o JP mostra uma forte variabilidade, pois depende da posição dos sistemas frontais.

Durante o inverno, as frentes frias atingem latitudes mais baixas, como, por exemplo, o leste da região Nordeste. Durante o verão, o JP fica restrito a latitude mais altas, tendo sua posição mais ao norte, próximo dos 35°S. O JST também pode atingir latitudes baixas; nesses casos, porém, sempre aparecerá acoplado ao JP, que está associado aos sistemas transientes (HAN et al. 2008).

1.2 Camadas da atmosfera

A atmosfera é caracterizada pela variação da temperatura e pressão com a altura. O perfil médio de variação da temperatura com a altitude é usado para separar as camadas atmosféricas como descrito abaixo. As camadas interagem entre si, trocando propriedades, uma vez que não existem limites físicos que as separam (VIANELLO et al. 2000).

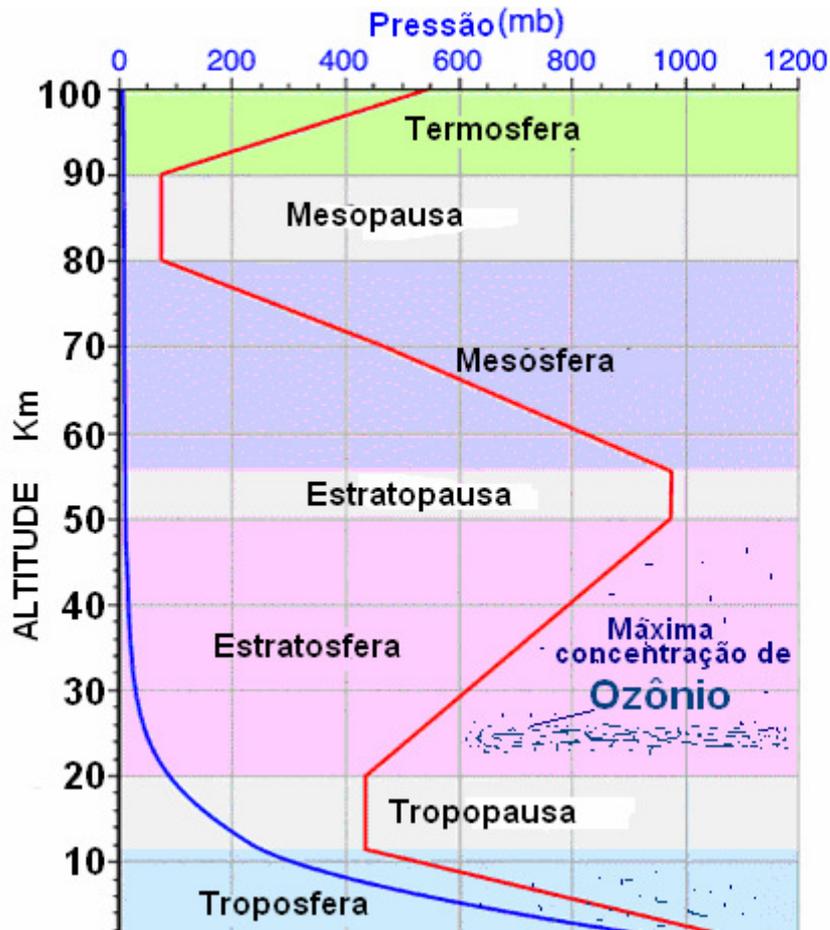


Figura 4 – Camadas da atmosfera e comportamento da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e pressão (mb) em relação a altura (km).

Fonte: Adaptado de NASA's Earth Science Enterprise.

A troposfera, camada mais baixa da atmosfera, estende-se da superfície até a tropopausa, que fica de 8 a 18 km de altitude, dependendo da latitude e época do ano; caracterizada pela diminuição da temperatura com a altitude. É nela que ocorrem os mais importantes fenômenos meteorológicos, tais como: chuva, trovoadas, relâmpagos, ventos, etc. O ozônio troposférico é extremamente oxidante e por este motivo é considerado um forte poluente.

A estratosfera se estende da tropopausa até a estratopausa (localizada entre 45 e 55 km de altitude, dependendo da latitude e época do ano); a temperatura aumenta com a altitude devido à absorção da radiação UVB pelo ozônio e consequente liberação de calor.

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 termosfera, região acima da mesopausa, caracteriza-se por altas temperaturas, devido à absorção da radiação solar de comprimentos de onda mais baixos (extremo UV) por N₂ e O₂.

1.3 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, a molécula de ozônio é uma molécula alotrópica de oxigênio, constituída por três átomos, de fórmula O₃ ou O O O (Schönbein 1840,1854). É detectada em ar natural e medida quantitativamente e continuamente até o início do século 20, através de uma mistura de iodo e arsênio, no Observatório Municipal do Parque Mountsouris em Paris.

Nas primeiras décadas do século 20, surgiram as primeiras medidas da coluna integrada total de ozônio, baseadas na absorção da radiação ultravioleta (UV). Alguns anos mais tarde, o cientista britânico G.M.B Dobson desenvolveu um espectrofotômetro para medidas da coluna de ozônio, o qual foi instalado em diferentes locais do mundo, sendo ainda muito utilizado nos dias atuais, tendo sua medida padrão chamada de Unidade Dobson (UD), em reconhecimento a sua contribuição (Dobson 1930, 1968).

A molécula de ozônio possui três bandas principais de absorção (LIOU, 2002), a banda de Hartley (200-300 nm), a banda de Huggins (300-360 nm) e a banda de Chappuis (440-850 nm). Devido a forte absorção da radiação ultravioleta, a molécula do ozônio libera energia na forma de calor, que faz a temperatura aumentar com a altitude na estratosfera (SLUSSER et al., 1999), além disso, uma redução de 1% no ozônio estratosférico pode levar a um aumento de até 2% no UV-B e aumentar a incidência de câncer de pele em indivíduos suscetíveis (SEINFELD e PANDIS, 2006), o que justifica o estudo deste importante constituinte atmosférico.

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 (O_2). Representado pela seguinte expressão:



O átomo de oxigênio (O) reage rapidamente com O_2 na presença de um terceiro corpo M (normalmente N_2 e O_2) para formar ozônio, M é utilizado para estabilizar o produto excitado O_3 devido à 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 2.3:



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 (KIRCHHOFF, 1991).

1.3.1 Distribuição do conteúdo de ozônio na atmosfera

Aproximadamente 90% do conteúdo de ozônio concentra-se na estratosfera a uma altura entre 15 e 35 Km (LONDON, 1985; WMO, 1995), numa região conhecida como camada de ozônio devido a grande abundância deste elemento

nestes limites (KIRCHOFF, 1991), restando a troposfera uma significativa quantidade entre 10 e 15 % da abundância natural do ozônio (FISHMAN, 1990).

Entretanto, a região de maior produção não condiz com a região de maior concentração no conteúdo de ozônio. Nota-se que as taxas de produção de ozônio são mais altas no equador e a cerca de 40 km de altitude, enquanto que o pico de concentração localiza-se em latitudes mais ao norte, conforme Figura 7.

As máximas concentrações de ozônio, mesmo no equador, localizam-se à cerca de 25 km ao invés de 40 km, onde a taxa de produção é mais alta. Nos pólos, a concentração máxima de ozônio está em altitudes abaixo de 25 km (em torno de 18 km), enquanto que a produção de ozônio máxima ocorre em altitudes maiores que 40 km.

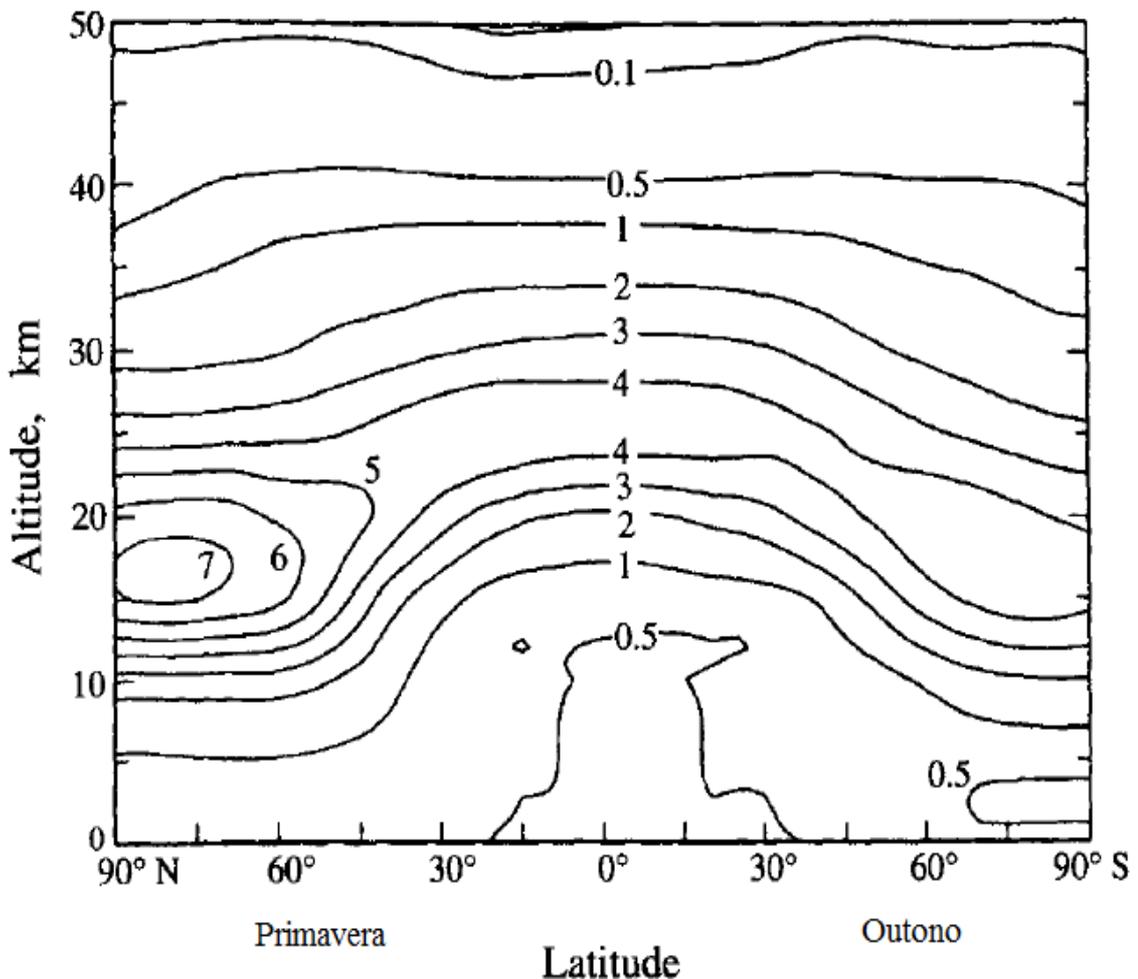


Figura 5 – Concentrações de ozônio (em 10^{12} moléculas/cm³) em função da altitude e latitude.

Ainda há uma assimetria norte-sul na concentração de ozônio, como mostra a Figura 6, a qual representa a coluna total de ozônio histórica em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson, antes da diminuição antropogênica do ozônio.

Pode-se verificar pela Figura 6, que os mais altos valores da coluna de ozônio são encontrados a altas latitudes na primavera local e os mais baixos valores nos trópicos.

A explicação para esta falta de alinhamento está no papel do transporte horizontal e vertical que redistribui as massas da atmosfera.

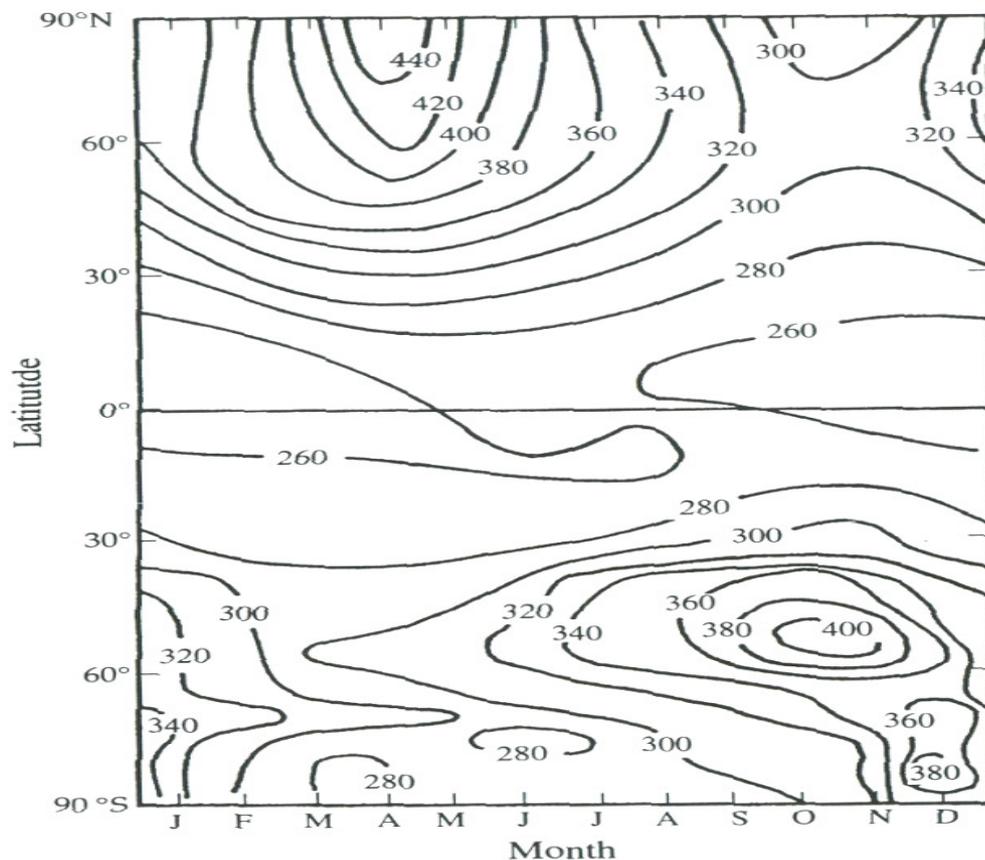


Figura 6 – Coluna total de ozônio em função da latitude e época do ano, medida em Unidades Dobson.

Fonte: Seinfeld e Pandis, 2006, p. 149.

Este esquema tem sua origem nos estudos de Dobson, 1930, e Brewer, 1949. Eles inferiram a existência de uma célula de circulação estratosférica, Figura 8, caracterizada por movimento ascendente nos trópicos e descendentes para médias

e altas latitudes, que através de medidas de componentes traços da atmosfera como ozônio, vapor d'água e posteriormente com Holton, 1995, através do cloro, num ciclo de aproximadamente 5 anos (SOLOMON, 1999).

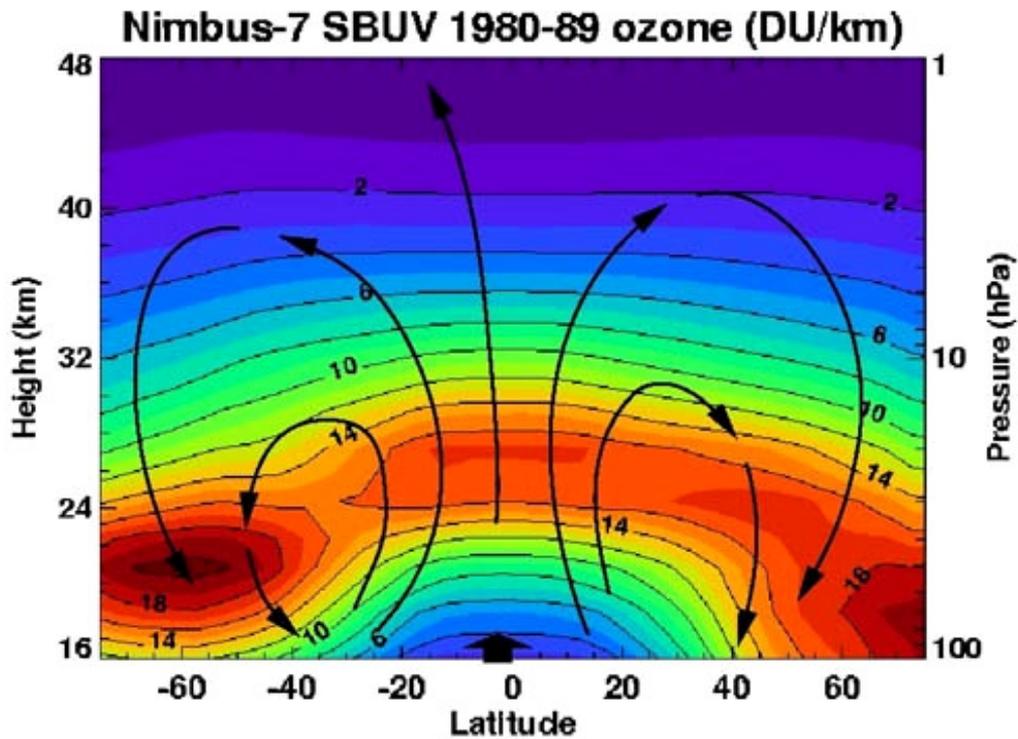


Figura 7 – Circulação estratosférica Brewer-Dobson e concentração de ozônio em função da latitude e altitude entre os anos de 1980-1989.

Fonte: Cordero et al., 2000

As concentrações de ozônio estratosférico são máximas em áreas bem longe daquelas onde ele é produzido, sugerindo que o tempo de vida do ozônio na estratosfera é muito mais longo que o tempo necessário para que o transporte ocorra. A escala de tempo do transporte estratosférico do equador para os pólos é da ordem de 3 a 4 meses.

Nas regiões tropicais, as variações sazonais podem ser negligenciadas, uma vez que a radiação solar pode ser considerada constante durante o ano todo (WARKAMATZU, 1989). Com o aumento da latitude, se tem maior variação sazonal na concentração do ozônio estratosférico, tendo a máxima concentração na primavera, período onde as regiões próximas aos pólos é caracterizada por fortes

correntes de ar descendentes, que transporta o ozônio produzido em camadas acima de 20 Km de altitude é transportado por estas correntes de ar em direção aos pólos na alta estratosfera e em direção ao equador na baixa estratosfera e mínima no outono (SEINFELD e PANDIS, 2006).

1.3.2 Transporte de ozônio na atmosfera

Além da circulação global estratosférica conhecida como circulação Brewer Dobson, transporte de massas de ar com seu respectivo conteúdo de ozônio em escala menor podem ocorrer, tanto transporte horizontal como vertical, conforme esquema mostrado na Figura 9 (STOHL *et al.*, 2003).

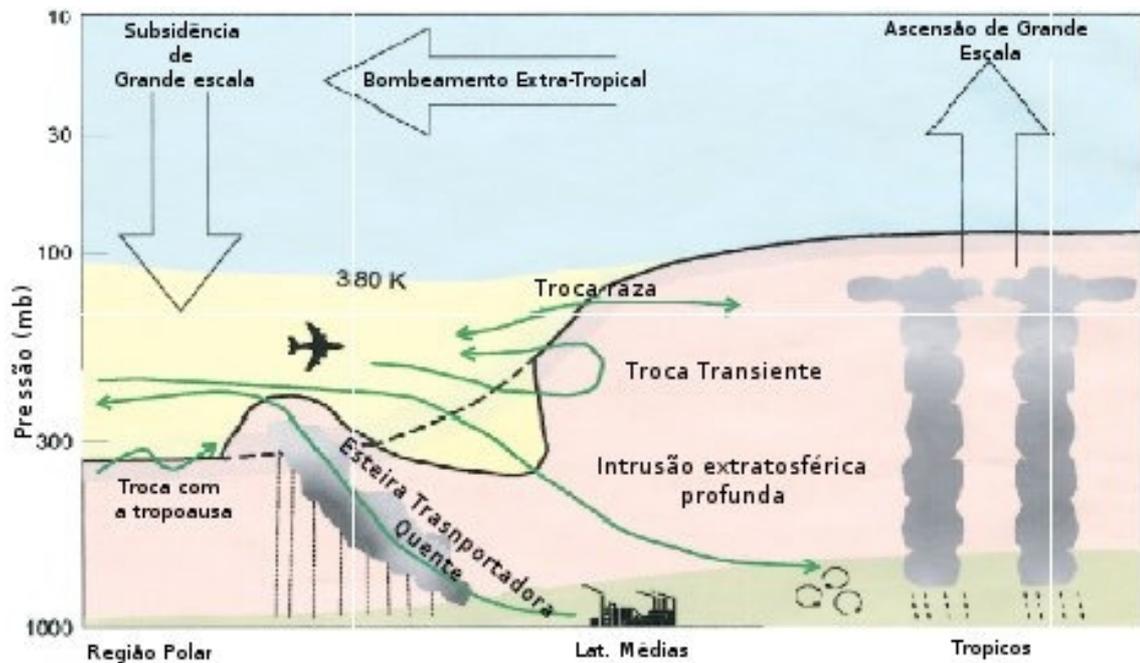


Figura 8 – Esquema do transporte das massas de ar na estratosfera.

Fonte: Stohl *et al.*, 2003.

Transporte vertical do conteúdo de ozônio ocorre durante eventos de trocas entre a estratosfera e a troposfera, modificando o conteúdo de ozônio através da

intrusão de ar da estratosfera para dentro da troposfera, ocorridas nestas regiões (BITHELL et al.2000; GERASOPOULOS et al.2006; DE BELLEVUE et al. 2006; SPRENGER et al. 2007; NAKAMURA 2007, EL AMRAOUI et al. 2010, LIU et al. 2011), sendo verificado pela evolução da variável Vorticidade Potencial em superfície isentrópica, que pode ser usada como substituta para o estudo do transporte de constituintes traços (HOSKINS et al. 1985, LARY et al. 1995; HOLTON 1995; RAO et al. 2003; LINIGER and DAVIES 2004; JING et al. 2005), em estudos originalmente realizados por Danielsen (1961).

Holton et al.(1995), estudaram as Trocas entre a Troposfera e a Estratosfera (TTE) de constituintes traços através de PV em superfícies isentrópicas e relacionando estes eventos a padrões troposféricos, como ciclones desprendidos, frontogênese e quebra da tropopausa (Holton et al. 1995, Tang et al 2010, Chen et al. 2011), em região onde há intrusão de ar estratosférico para dentro da troposfera, mostrado na Figura 10. Novas perspectivas sobre este assunto foram discutidas posteriormente por Stohl et al. (2003) e Jing et al. (2005), que estimou o fluxo de ozônio que cruza a tropopausa isentropicamente e ocorrem também sobre o subtropical do Hemisfério Sul.

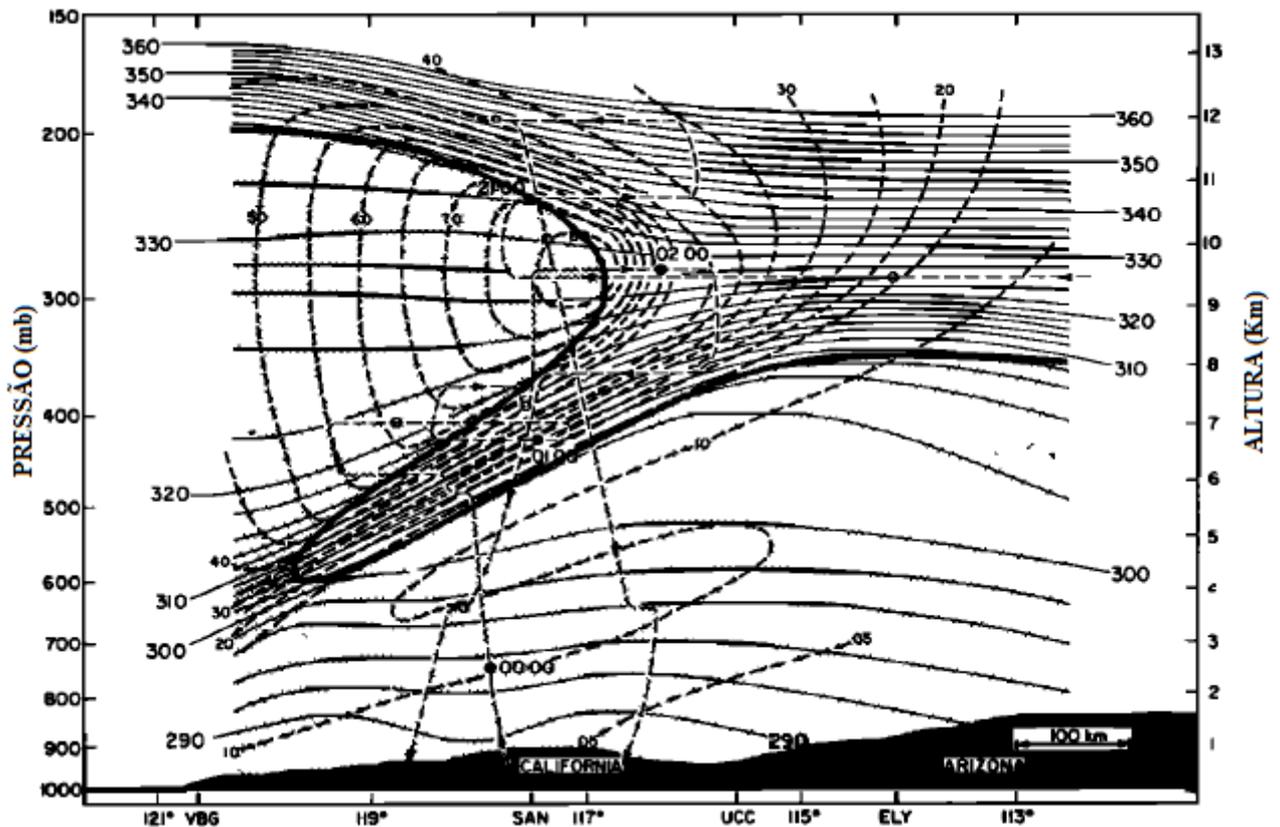


Figura 9 – Corte vertical do evento de envelopamento de tropopausa do dia 13 de março de 1978.

Fonte: Holton et al., 1995.

Durante muitos anos, a interação estratosfera-troposfera, tais como a dobra da tropopausa, foi intensamente estudada com o objetivo de descrever o transporte de ar estratosférico para dentro da troposfera, e também para determinar a relação com frentes e jatos de altos níveis (DANIELSEN, 1964). Danielsen (1968) propôs um modelo de formação da dobra da tropopausa, na qual duas células de circulação, associadas aos jatos de altos níveis, produzem uma zona de confluência, onde a intrusão do ar estratosférico ocorre. A pequena transferência estratosfera-troposfera é uma importante fonte de ozônio da estratosfera para a troposfera.

A condição de circulação troposférica pode de alguma maneira influenciar o conteúdo de ozônio sobre determinada região (FELDSTEIN 2011; KANG et al. 2011; BRACEGIRDLE 2011; MIDYA et al. 2012), principalmente analisando a influencia da corrente de jato na Alta Troposfera (TANG and PRATHER 2010; BUKIN et al. 2011),

que pode auxiliar no transporte horizontal das massas de ar e seu respectivo conteúdo de ozônio.

Danielsen et al. (1968) propôs o modelo clássico de envelopamento da tropopausa sob a ação conjunta da corrente de jato polar, causando a intrusão de ar estratosférico para a troposfera. O resultado é a transferência irreversível de ar estratosférico polar para latitudes mais baixas e a baixas altitudes.

Segundo Bukin et al. (2011), a corrente de jato e a distribuição vertical de ozônio estratosférico estão inter-relacionados, e que a máxima distribuição de ozônio está acima da tropopausa numa região de estabilidade máxima.

Sprenger et al. (2003) avaliou a distribuição da dobra da tropopausa para o período de um ano e verificou que no Hemisfério Sul, a máxima frequência de dobras profundas, durante o inverno, coincide com a climatologia de ciclones realizada por Sinclair (1995).

1.4 Dinâmica da estratosfera

Quando se compara a troposfera com a estratosfera, verifica-se que os processos na estratosfera ocorrem muito lentamente. A estratosfera tem uma estrutura muito estável e existe pouca transferência de ar com a troposfera. Contudo esta diminuta transferência é extremamente importante para o nosso clima. Enquanto que as transferências de ar na troposfera ocorrem em períodos de horas a dias, são necessários meses ou mesmo anos para que haja mistura na estratosfera. Este é o motivo pelo qual a estratosfera demora entre um a dois anos para retomar o seu estado estável, após uma grande erupção vulcânica (como a do Monte Pinatubo, em 1991).

É amplamente aceito que a troposfera tem uma dinâmica com forte efeito sobre a estratosfera, principalmente através da propagação de ondas para cima, ondas de Rossby (“ondas planetárias”), e da inércia de frequência de ondas de gravidade. Estes estudos se baseiam em teorias de propagação de ondas. As ondas planetárias são movimentos atmosfera em larga escala (6000 km) com direção de leste para oeste, mas existem efeitos secundários e também propagação de ondas

verticais. A pequena transferência estratosfera-troposfera é uma importante fonte de ozônio da estratosfera para a troposfera.

Os mecanismos de produção e destruição do ozônio foram vistos anteriormente, a seguir serão apresentados algumas noções básicas para um melhor entendimento do transporte estratosférico, que são conceitos chaves e indispensáveis para o entendimento de variáveis envolvidas no processo.

1.5 Influência da dinâmica no ozônio

A atmosfera terrestre é dinâmica, isto é, porções de ar podem se deslocar vertical ou horizontalmente segundo princípios e mecanismos físicos. O aquecimento diferenciado do Planeta pelo Sol produz movimentos verticais na atmosfera, como a expansão e ascensão do ar em regiões quentes e a contração e subsidência em latitudes frias. A subsidência do ar sobre a superfície é responsável pelo surgimento de áreas de alta pressão, enquanto que a ascensão resulta em regiões de baixa pressão. Essas diferenças barométricas configuram movimentos compensatórios na atmosfera, sempre da alta para a baixa pressão (TUBELIS; NASCIMENTO, 1992).

A maior agitação na dinâmica do ar é produzida na troposfera, que é influenciada pelo homem de forma direta e progressiva. Este processo pode repercutir nas camadas mais altas da atmosfera, como na redução da camada de ozônio na estratosfera (MONTEIRO, 2000).

Uma das primeiras tentativas em criar um modelo de circulação geral da atmosfera foi realizada por George Hadley em 1735 (AYOADE, 1983). Ao observar o aquecimento desigual entre a região equatorial e as polares, Hadley sugeriu uma circulação em que ventos globais se deslocariam dos pólos em direção ao equador como forma de compensar as diferenças térmicas entre as duas zonas.

Com a difusão dos estudos e princípios de Coriolis no início do século XIX, a proposta de Hadley foi desenvolvida e aprimorada. Em 1856, William Ferrel criou um modelo baseado na existência de três células meridionais por hemisfério. Novas versões e aperfeiçoamentos ao modelo de Ferrel foram divulgados, dentre os quais

destacam-se: Bergeron (1928), Bjerknes (1937) e Rossby em 1941 (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Com o avanço de observações e pesquisas sobre a atmosfera, permitiu a Gilbert Walker (1932) propor a existência de células de circulação zonal. Essas células, definidas na região equatorial, se organizariam entre os continentes e oceanos e estariam associadas ao comportamento distinto que tais superfícies apresentam frente ao aquecimento (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

A circulação meridional tem origem no aquecimento desigual do Planeta e no efeito do movimento de rotação na atmosfera. O desequilíbrio de radiação entre a região equatorial, onde há saldo positivo de energia, e as polares, deficitárias, promove deslocamentos de ar entre essas latitudes como meio de diminuir as disparidades energéticas (AYOADE, 1983). A rotação, por sua vez, responsável pela Força de Coriolis, imprime componentes na direção dos ventos e cria centros de pressão dinâmicos.

As chamadas células de circulação geral encontradas em ambos hemisférios (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007) (FIG. 10). São elas:

- Célula de Hadley (entre 0° e 30° de latitude): em superfície formada pelos ventos alísios (de sudeste ou nordeste) que ascendem até a tropopausa próxima ao equador e descem aos 30° de latitude (OLIVEIRA *et al.*, 2001).
- Célula de Ferrel (entre 30° e 60°): em superfície formada pelos ventos de oeste que se originam nas altas subtropicais e ascende próximo a latitude 60°.
- Célula Polar (entre 60° e 90°): em superfície formada pelos ventos polares (de leste) que se originam nas altas latitudes (pólos) e ascende próximo a latitude 60°.

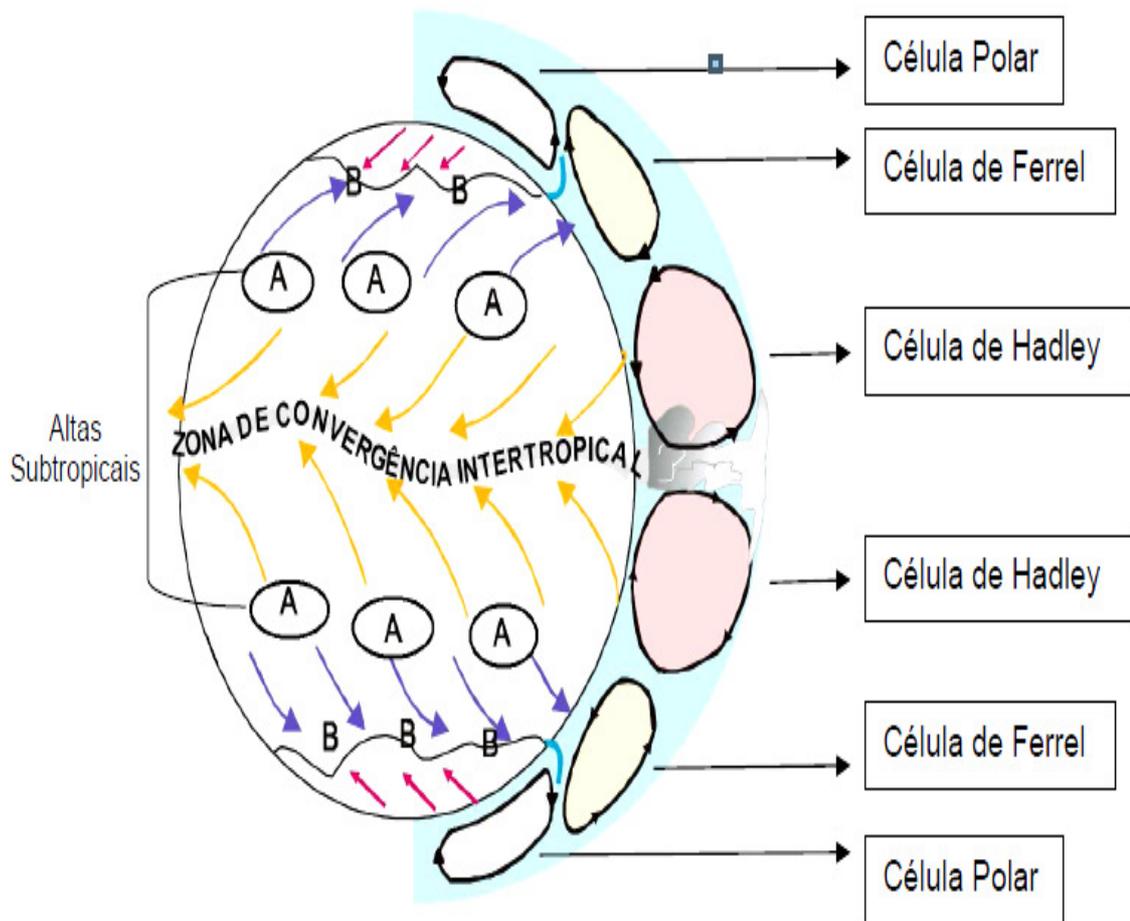


Figura 10 – Células de circulação geral, ventos globais predominantes e centros de alta (A) e baixa (B) pressão atmosférica.

Fonte: adaptada de Varejão-Silva, M.A (2006).

Kirchhoff et al. (1996) observaram uma redução do ozônio na estratosfera sobre a região de Santa Maria (29°S, 53°W), no período de 18 a 26 de outubro de 1993. Esta redução era uma interferência indireta da redução da camada de ozônio na Antártida. É necessário ressaltar que este foi o primeiro evento analisado nas médias latitudes da América do Sul.

Os dias sem nuvens são caracterizados por um sistema sinótico de alta pressão (associados a movimentos descendentes - subsidência). São estáveis, possuem um ciclo diurno definido e propiciam períodos desfavoráveis à dispersão da poluição. Estes sistemas contribuem para que os poluentes emitidos nos níveis inferiores da troposfera fiquem retidos próximos da superfície.

A estabilidade estática é alta na tropopausa e baixa estratosfera, de modo que, o ar estratosférico movendo-se para níveis da troposfera adquire vorticidade ciclônica para compensar a menor estabilidade estática da troposfera, através da conservação da vorticidade potencial isentrópica. Esta interação dinâmica entre a estratosfera e troposfera tem importante influência para os processos de desenvolvimento dos sistemas meteorológicos de superfície (HOSKINS et al., 1985; APPENZELLER e DAVIES, 1992; HOLTON et al., 1995; DAVIES e ROSSA, 1998; DELDEN e NEGGERS, 2003; STOHL et al., 2003). Um dos primeiros processos dinâmicos de interação estratosfera-troposfera a ser estudado, foi o estudo do fenômeno da dobra da tropopausa (REED, 1955; REED e SANDERS, 1953; REED e DANIELSEN, 1959).

REED (1955) sugeriu, em suas conclusões, a intensificação simultânea de ciclones de superfície quando ocorre perturbação na tropopausa dinâmica. Assim, a dobra da tropopausa foi definida como a intrusão de ar estratosférico descendo, verticalmente inclinado, para os níveis médios e baixos da troposfera em uma zona baroclínica.

Segundo UCCELLINI et al. (1985), a intrusão de ar estratosférico é identificado através de elevados valores de vorticidade potencial, descendo da baixa estratosfera em direção a troposfera, que por sua vez, coincide com valores elevados de ozônio.

Outra definição da tropopausa dinâmica é baseada na quantidade de ozônio numa coluna atmosférica (STOHL et al., 2003). Assim, anomalias de vorticidade potencial devem coincidir com regiões de maior quantidade de ozônio e espera-se que o movimento descendente transporte o ozônio estratosférico para os níveis da troposfera.

Nas latitudes médias, o transporte de ozônio ocorre principalmente por eventos de dobra da tropopausa, associados com frontogênese em altos níveis e ciclogênese em superfície (REED, 1955). Aqui, ao longo da frente, o ar da alta estratosfera encontra-se seco e rico em ozônio, penetra na média e baixa troposfera. O mecanismo de entrada de ozônio estratosférico é investigado com ajuda de estudos observacionais, por exemplo, de Danielsen (1968, 1980), Danielsen et al. (1970, 1987), Johnson e Viezee (1981), Shapiro (1974), Vaughan et al. (1994), uma revisão é apresentada, por exemplo, por Davies e Schuepbach (1994) e Holton et al. (1995).

A maioria dos estudos é restrito a observação e análise das dobras da tropopausa, no entanto relativamente pouca atenção foi empregada ao estudo do transporte de ozônio estratosférico para a superfície. Johnson e Viezee (1981) descreveram o mecanismo mais provável responsável pelo transporte de ozônio estratosférico nas baixas camadas atmosféricas e para o solo: (1) dissipação da intrusão por mistura e difusão na atmosfera livre; (2) persistência da intrusão na baixa camada limite; (3) acoplamento da intrusão a uma zona frontal associada à frente fria, com transporte direto do ar rico em ozônio pelas correntes frontais. É difícil decidir qual destes mecanismos é apropriado, porque não há nenhuma evidência direta de ozônio estratosférico ao nível do solo.

Um aumento da concentração de ozônio perto do solo, depois da passagem de uma frente fria em superfície, pode ser esperada; em contraste a isso, alguns estudos (VOLZ et al., 1988; CHUNG, 1977) mostram que depois da passagem de frentes frias - em condições nubladas - o ozônio decresce sem distinção, onde isso é atribuído a vários processos (destruição química do ozônio por NO_x, mudanças de temperatura devido a advecção de ar quente, pancadas locais e atividade de tempestades).

Concentrações elevadas de ozônio também são registradas no período noturno. Este aumento das concentrações de ozônio durante a noite foi associado ao transporte vertical, que ocorre quando há passagens de frentes e jatos noturnos (REITEBUCH et al., 2000; OETTL et al., 2002). Informações de SODAR e do perfil da temperatura potencial equivalente tem sido utilizados no estudo destes processos convectivos e de transporte vertical de ozônio (REITEBUCH et al., 2000; OETTL et al., 2002; BETTS et al., 2002).

Segundo Bukin et al. (2011), a corrente de jato e a distribuição vertical de ozônio estratosférico estão inter-relacionados, e que a máxima distribuição de ozônio está acima da tropopausa numa região de estabilidade máxima.

As moléculas de ozônio na estratosfera inferior têm vidas mais longas e, como tal, podem ser usadas, como traçadoras, para o estudo de transporte aéreo de massas de ar de origem estratosférica (estratosfera-troposfera). Este processo depende fortemente de fatores dinâmicos e variações sazonais. Vale lembrar que a distribuição vertical de ozônio depende essencialmente da corrente de jato subtropical: posição, intensidade e processos de interação com sistemas sinóticos.

1.6 Passagens de frentes frias no Sul do Brasil

A Climatologia de passagens de frentes frias sobre a América do Sul foi apresentada em Andrade e Cavalcanti (2004), com dados de reanálise NCEP/NCAR. Nos resultados de Andrade e Cavalcanti (2004) e Cavalcanti e Kousky (2003) foi observada uma diminuição da frequência dos sistemas das latitudes mais altas para as mais baixas.

Justi da Silva e Silva Dias (2002), também, fizeram uma climatologia dos sistemas frontais, a partir de dados da reanálise do NCEP. Na região sul, o vento em baixos níveis tem direção de nordeste, devido à influência da alta subtropical do Atlântico Sul, e então, numa situação pré-frontal, o vento é tipicamente de noroeste, depois gira de sudoeste e de sudeste, à medida que a frente se desloca. Neste estudo, foi encontrada uma alta frequência de frentes em torno da latitude de 30°S, e valores mais altos no litoral, comparado com o interior do continente.

O autor desta dissertação trabalhou alguns anos confeccionando e difundindo boletins meteorológicos (Metar) em Santa Maria-RS, onde observou que, antes da passagem de frentes frias (dias de pré-frontais), o vento norte chega a predominar até por alguns dias com grande intensidade.

Segundo Sartori (2000), a cidade de Santa Maria tem condições de refletir o comportamento da Circulação Atmosférica Regional, uma vez que fica continuamente submetida aos efeitos tanto dos Sistemas Extratropicais, de maior participação, quanto dos Sistemas Intertropicais que se alternam na circulação secundária.

No ano de 2008, sessenta e quatro frentes frias atuaram entre as latitudes 25°S a 35°S (CLIMANÁLISE, 2008), com uma média mensal de cinco frentes.

Existe uma sazonalidade na ocorrência de passagens de frentes frias, que são mais frequentes de maio a outubro e menos frequentes durante o verão do Hemisfério Sul (dezembro a fevereiro).

2 METODOLOGIA

2.1 Equipamentos utilizados

Os dados sobre a coluna total de ozônio atmosférico utilizados nesta análise foram obtidos através do Espectrofotômetro Brewer modelo MKIII, instalado no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT (29,4°S; 53,8°O; 488,7m) e pelo Ozone Monitoring Instrument (OMI), o qual substituiu os dados do TOMS desde 2006, quando este saiu de operação. O período de dados utilizados neste trabalho corresponde ao ano de 2008.

2.1.1 Espectrofotômetro Brewer

O Espectrofotômetro Brewer é um instrumento de superfície, que efetua medidas da radiação solar, permitindo inferir a coluna total dos seguintes gases atmosféricos: ozônio (O₃), dióxido de enxofre (SO₂) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Pode-se medir, também, a radiação solar global na banda de ultravioleta do tipo B (UV-B). 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. Neste trabalho foram utilizados dados da coluna total de ozônio obtidos pelo espectrofotômetro Brewer MKIII 167. Foram calculadas as médias diárias da coluna total de ozônio e, a partir delas, foram analisadas as variações de ozônio atmosférico no ano de 2008.

O sistema 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 é totalmente

automatizado, com isso ele pode ser programado para trabalhar sozinho, através do uso de esquemas de medidas previamente elaborados pelo usuário. Os cinco comprimentos de operação do Brewer estão localizados na faixa ultravioleta do espectro de absorção de O_3 e SO_2 , os quais têm uma absorção forte e variável nesta região: 306,3; 310,0; 313,5; 316,8; 320 nm (PINHEIRO, 2003).

A medição da coluna total de um gás atmosférico efetuada por um instrumento instalado na superfície terrestre baseia-se no princípio da absorção da radiação incidente sobre uma quantidade de matéria. Métodos baseados na superfície utilizam-se de medidas de radiância de uma fonte de luz externa, como o Sol ou a Lua, após a radiação ter sofrido extinção, como resultado da absorção atmosférica, espalhamento molecular e espalhamento por partículas (aerossóis), todos dependentes do comprimento de onda.

O espectrofotômetro é formado por um monocromador e um detector para observar e medir um espectro de radiação. Trabalha em uma ampla faixa espectral, que é selecionada com o auxílio de um monocromador. Este 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, a fonte de energia é o Sol e o meio atenuador é a coluna atmosférica acima do instrumento

O espectrofotômetro Brewer é 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 O_3 e SO_2 atmosféricos. O Brewer mede também a intensidade da radiação UVB global incidente na superfície (de 290 a 325 nm).

A luz entra através de uma janela inclinada de quartzo. O feixe incidente é direcionado através da parte óptica por um prisma diretor, que pode ser girado para selecionar luz tanto de céu zênite (Zenith Sky – ZS), direta ao Sol (Direct Sun – DS) ou das lâmpadas de calibração. Uma lâmpada de mercúrio fornece uma fonte padrão para calibração em termos do comprimento de onda do espectrofotômetro; uma lâmpada halógena 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; seis (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).

O comprimento de onda de saída é ajustado pela rotação da grade com um motor de passo que direciona um micrômetro.

A fenda de saída plana é envolvida por uma máscara cilíndrica que expõe só um comprimento de onda por vez. A máscara é posicionada por motor de passo.

A luz que passa através da fenda de saída é coletada no cátodo de um fotomultiplicador; o pulso de fótons é amplificado, discriminado e dividido antes de ser transmitido para um contador. A contagem de fótons resultante é registrada em um dos cinco canais de comprimento de onda.

A Figura 11 apresenta o esquema óptico do caminho da 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, e só então que o feixe de luz vai para a fotomultiplicadora, PM1.

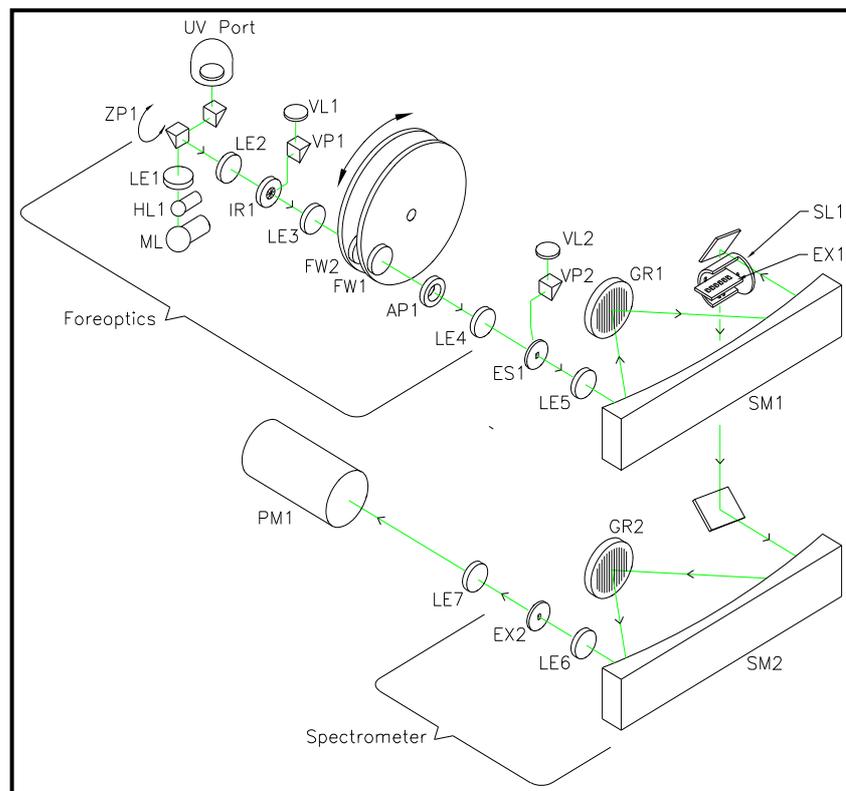


Figura 11 – Elementos ópticos do Espectrofotômetro Brewer MK III.

Fonte: Manual do Espectrofotômetro Brewer MK III.

As técnicas utilizadas pelo espectrofotômetro Brewer para a medida da coluna total de ozônio (O_3) são as seguintes (Sci-Tec, 1999, apud PINHEIRO, 2003):

- a) DS (Direto ao Sol): o direcionamento do prisma é feito captando-se o feixe solar direto como fonte de radiação, ou seja, apontando diretamente para o Sol. Cinco conjuntos de 20 ciclos da máscara (cada 20 ciclos formam uma observação) são medidos. A cada observação o instrumento é reposicionado, através da atualização de suas posições de zênite e azimute. Após cada observação, o O_3 é calculado. Depois das cinco observações, a média dele é calculado, sendo válida se o desvio padrão da média de O_3 for menor ou igual a 2,5 UD. Este desvio padrão é usado como método para descarte de medida de baixa qualidade. Uma medida completa de DS dura cerca de três minutos. As medidas são efetuadas dentro de um intervalo de massa de ar (relacionada com a secante do ângulo solar de zênite) de 1,0 a 3,0. Medidas feitas neste intervalo de operação de massa de ar não são afetadas por uma possível dependência instrumental, quando o ângulo de elevação solar é baixo (altos ângulos de zênite solar) o que pode causar erros (KERR e McELROY, 1995, apud PINHEIRO, 2003). Somente medidas DS foram utilizadas neste trabalho.

- b) ZS (Céu Zênite): o direcionamento do prisma é feito para o ângulo de zênite de 0° (noventa graus com o solo), captando principalmente a radiação difusa. Sete conjuntos de 20 ciclos da máscara são observados. Após cada observação, a coluna total de O_3 é calculada. Depois das sete observações serem feitas, a média delas é calculada. Para que uma medida ZS seja válida, os valores dos desvios padrões são os mesmos que para DS. Uma medida completa de ZS dura cerca de cinco minutos.

O Espectrofotômetro Brewer instalado no Observatório Espacial do Sul é mostrado na Figura 12. Nele observa-se 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.

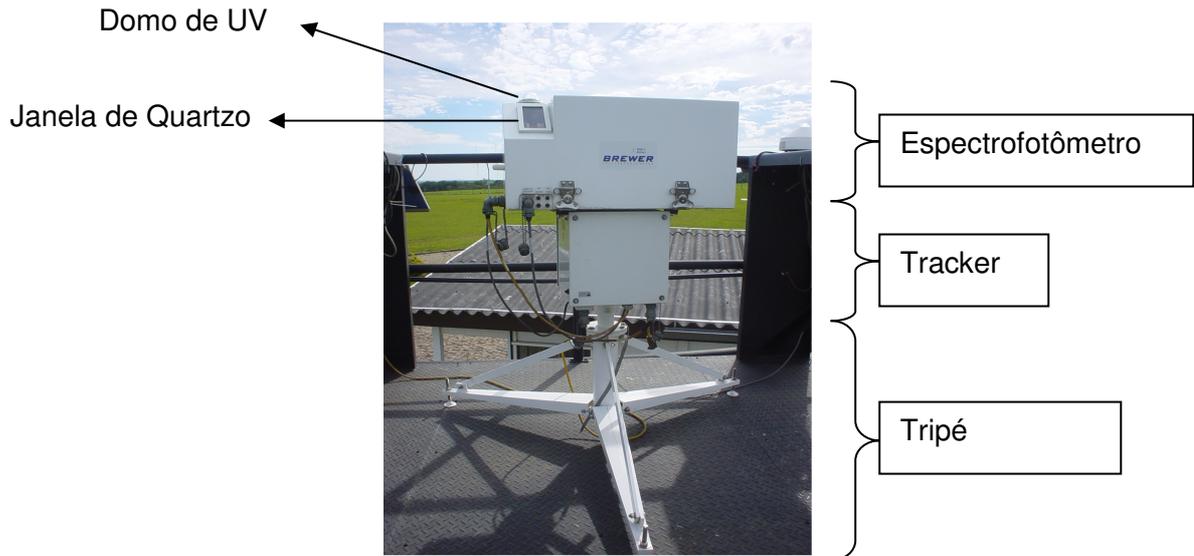


Figura 12 – Espectrofotômetro Brewer MK III # 167 atualmente instalado no Observatório Espacial do Sul, CRSPE/INPE – MCT.

Coluna total – Unidades Dobson

A quantidade total de O_3 atmosférico em qualquer local é expressa em termos de Unidades Dobson (UD); esta unidade é equivalente à espessura de 0,01mm (0,001cm) de O_3 puro, com a densidade que ele possuiria se estivesse submetido à pressão do nível do mar (1 atm) e a $0^\circ C$ de temperatura. Alguns autores utilizam miliatmosferas centímetro (matm cm), em lugar do equivalente em unidades Dobson, para expressar a unidade de quantidades de O_3 estratosférico; $1 \text{ matm cm} = 1 \text{ UD}$ (BAIRD, 2002). Uma unidade Dobson contém $2,69 \cdot 10^{16}$ moléculas de O_3 , numa coluna de base unitária de área 1 cm^2 .

2.1.2 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). Este 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 mais componentes atmosféricas que o TOMS, como o conteúdo total de O_3 , NO_2 , SO_2 e aerossóis.

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 deste, como no caso de dias chuvosos. Assim como o TOMS, suas medidas correlacionadas com as medidas do Espectrofotômetro Brewer para verificar a acuracidade dos dados dos equipamentos.

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 14 apresenta a configuração esquemática do OMI.

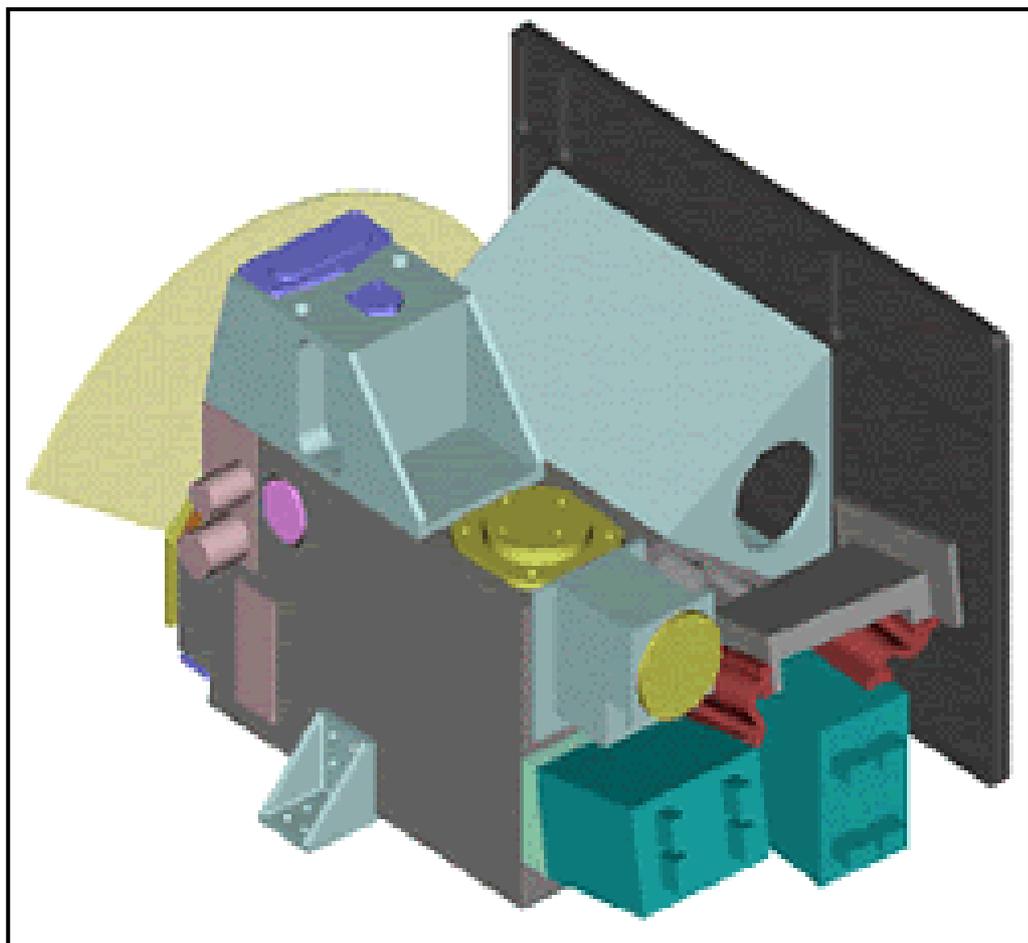


Figura 13 – Esquema de montagem do Ozone Monitoring Instrument (OMI).

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 deste, como no caso de dias chuvosos. Assim como o TOMS, suas medidas correlacionadas com as medidas do Espectrofotômetro Brewer para verificar a acuracidade dos dados dos equipamentos.

2.1.3 Dados meteorológicos, variáveis NCEP e GrADS

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. Outras informações meteorológicas, como imagens satélites, foram obtidas no site do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), que fica em Cachoeira Paulista-SP (www.cptec.inpe.br). As imagens de satélite utilizadas nesta pesquisa foram do GOES-10, geoestacionário, que se encontra, aproximadamente, a 36.000 km da superfície sobre o Equador.

As observações meteorológicas rotineiras, coletadas de hora em hora, que trazem informações recentes de um aeródromo, que é o METAR, foram obtidas pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

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, que trabalha com dados de modelos de 4 dimensões, onde as dimensões são usualmente latitude, longitude, nível e tempo.

2.2 Critérios utilizados na determinação objetiva de frentes frias

O método objetivo, muito utilizado em centros mundiais de previsão do tempo, para se determinar a passagem de um sistema frontal frio é: variação de Pressão ao

Nível do Mar (PNM), variação de temperatura em 925 hPa e magnitude e direção do vento em 925 hPa. Os critérios aplicados são: 1) uma diminuição da temperatura em 925 hPa de, pelo menos, 2°C; 2) um aumento da PNM de, pelo menos, 2 hPa e 3) existência de ventos de sul de, pelo menos, 2 m/s.

Na seleção das frentes frias, levou-se em consideração primeiramente a análise diária das cartas sinóticas de superfície, de alguns centros de previsão do tempo. Depois, foi usado como critério de identificação, apenas a mudança no sinal da componente meridional do vento. Na região sul, o vento em baixos níveis tem direção de nordeste, devido à influência da alta subtropical Atlântico Sul, portanto numa situação de pré-frontal, o vento é tipicamente de noroeste, segundo Justi da Silva e Silva Dias (2002).

Foram selecionados em 2008, sessenta e quatro casos de passagens de sistemas frontais sobre o Rio Grande do Sul, dos quais houve uma seleção levando em consideração dois parâmetros: a presença da corrente de jato polar e envelopamento da tropopausa. Com isso, houve uma diminuição no total de frentes de interesse para a pesquisa. Assim, no final das análises, restaram nove frentes frias, onde cinco apresentaram uma forte magnitude da corrente de jato polar, provocando envelopamento da tropopausa e quatro não apresentaram o envelopamento da tropopausa. As de interesse para o estudo, através do envelopamento da tropopausa e ação conjunta da corrente de jato, evidenciaram um aumento na coluna total de ozônio, em 75% dos casos, e apenas um caso (25%) houve diminuição na coluna total de ozônio sobre a região central do Rio Grande do Sul.

O aumento de ozônio ocorre porque tem mais na estratosfera e em mais altas latitudes, e este ar é trazido para cá pelo processo de intrusão atmosférica. Porém, no último evento houve efeito secundário, ocasionando diminuição de ozônio.

O contraste térmico entre as massas de ar, superior a 3°C, e o contraste bórico, superior a 4 hPa, foram observados em dois eventos. Neste caso, a variação na coluna total de ozônio foi significativa e o envelopamento da tropopausa bem caracterizado, graças à magnitude forte da corrente de jato polar.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo, são apresentados os resultados do estudo, alinhados com os objetivos propostos na seção introdutória. Assim, a apresentação e discussão dos resultados foram organizadas contemplando os seguintes aspectos:

Medidas de ozônio são realizadas através de Espectrofotômetro Brewer pelo Laboratório de Troposfera, Estratosfera, Radiação Ultravioleta e Ozônio, no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/INPE – MCT em conjunto com a UFSM desde 1992, na região central do Rio Grande do Sul. Estas medidas são utilizadas neste trabalho para o ano de 2008.

Ressalta-se que foram inicialmente selecionados todos os eventos de frentes frias ocorridas em 2008. Porém, apenas os eventos de maior magnitude foram analisados e destes foram escolhidos os que evidenciavam um forte envelopamento da tropopausa.

Tabela 1 – Sistemas Frontais Analisados em 2008

Frente Fria (casos)	Atividade Forte	Com Envelopamento	Sem Envelopamento
64	9	5	4

Os resultados apresentados a seguir foram selecionados por representarem situações características diferentes, as quais são analisadas sempre considerando a passagem de frentes frias e ação da corrente de jato sobre o ozônio atmosférico na região central do Rio Grande do Sul.

3.1 Análise dos eventos de passagem de frentes em 2008

3.1.1 Mês de Abril de 2008

Análise Sinótica: No dia 01/04/08 a frente fria trouxe instabilidade, à tarde, para a região central do Rio Grande do Sul. Mas, sem trovoadas e ventos fortes. À noite, deslocou-se para o norte do RS. No dia 02/04/8, a massa de ar polar migratória ingressa no RS, amenizando, um pouco, a temperatura do ar. Nos dias 02 e 03/04/08, após a passagem da frente fria, caracterizou-se na região central do Rio Grande do Sul uma atmosfera estável com pouca nebulosidade.

Na imagem do canal visível do satélite GOES -10, do dia 02 de abril às 13:00 UTC (Figura 14), observa-se a frente fria no Oceano projetando sua nebulosidade sobre Santa Catarina e ocluído a sudeste do Uruguai.

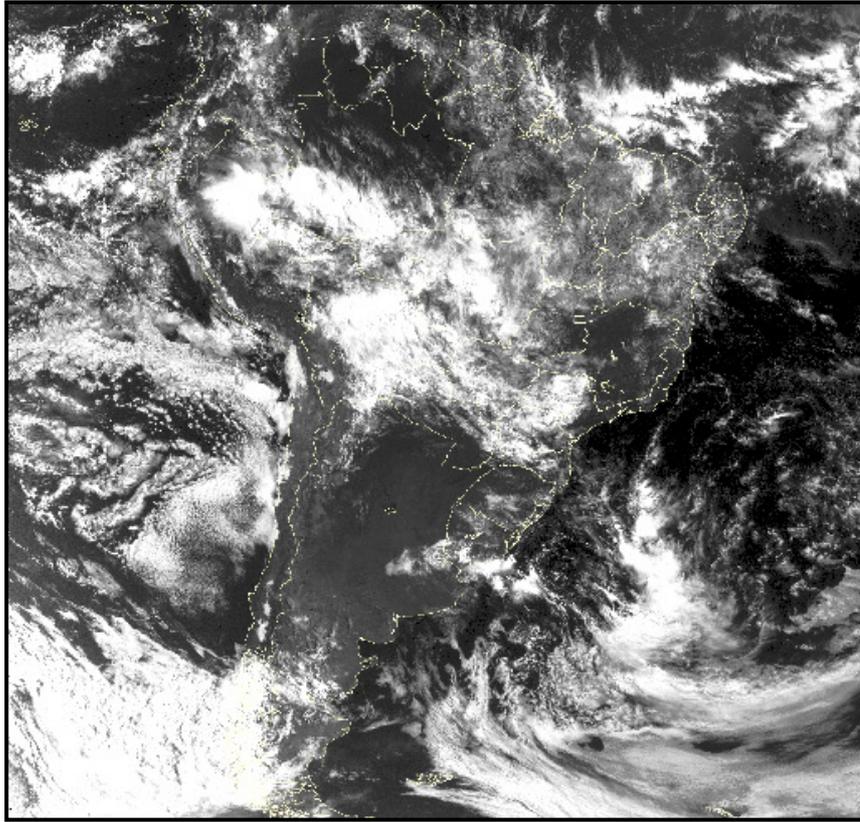


Figura 14 – Imagem Satélite GOES-10 do canal visível do dia 02/04/08 às 13:00 UTC

Fonte: CPTEC

Conforme Figura 14, esta frente fria associada ao ciclone (occlusão) não trouxe instabilidade forte e nem vento forte para o centro do RS, apenas massa de polar que invadiu o Estado do RS, logo após a passagem do sistema frontal. Neste evento, de passagem de frente, a variável meteorológica mais afetada foi à temperatura do ar.

A análise da carta sinótica de superfície das 12:00 UTC do dia 02 de abril (Figura 15), mostra a frente fria (linha em azul) e a frente quente (linha em vermelho) formando a oclusão no Oceano (área de baixa pressão, representada pela letra B em vermelho). A letra A em azul refere-se à alta pressão indicando a intensidade do anticiclone (em hPa) naquele ponto. As linhas pretas são as isóbaras, linhas que ligam o mesmo valor de pressão, que ajudam na localização de sistemas frontais.

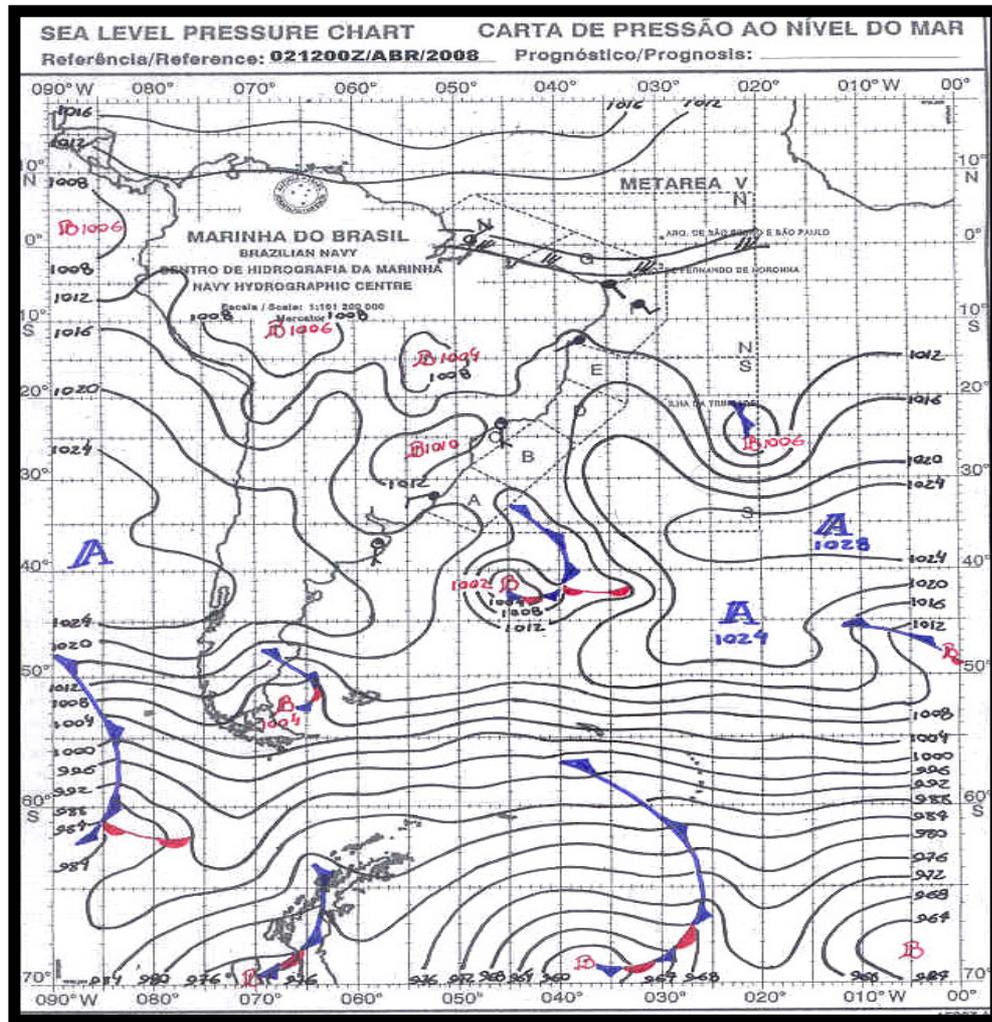


Figura 15 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 02/04/08.

Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (DHN).

Através da análise mostrada na Figura 15, pode-se observar que a maior atividade do sistema frontal ocorreu no Oceano Atlântico entre o Uruguai e o RS. Após a passagem da frente pelo litoral, ocorreu a rápida incursão da massa de ar polar na região central do RS.

O corte vertical da corrente de jato em 250 mb (Figura 16) mostra o envelopamento do ar da estratosfera para a troposfera (representado pelo retângulo em vermelho), culminando com o fluxo de massa de ar rica em ozônio (círculo em vermelho), até a região central do Rio Grande do Sul (Santa Maria mostrada em triângulo preto). Com isso, fica evidenciado o transporte de ozônio de altas latitudes para médias latitudes, logo após a passagem da frente fria, através da dobra da tropopausa, influenciada pela ação da corrente de jato.

Para melhorar a visualização dos gráficos, houve necessidade de aplicar um fator de multiplicação no vento vertical. Ressalta-se que a ordem de grandeza do vento vertical é menor que as componentes zonais e meridionais.

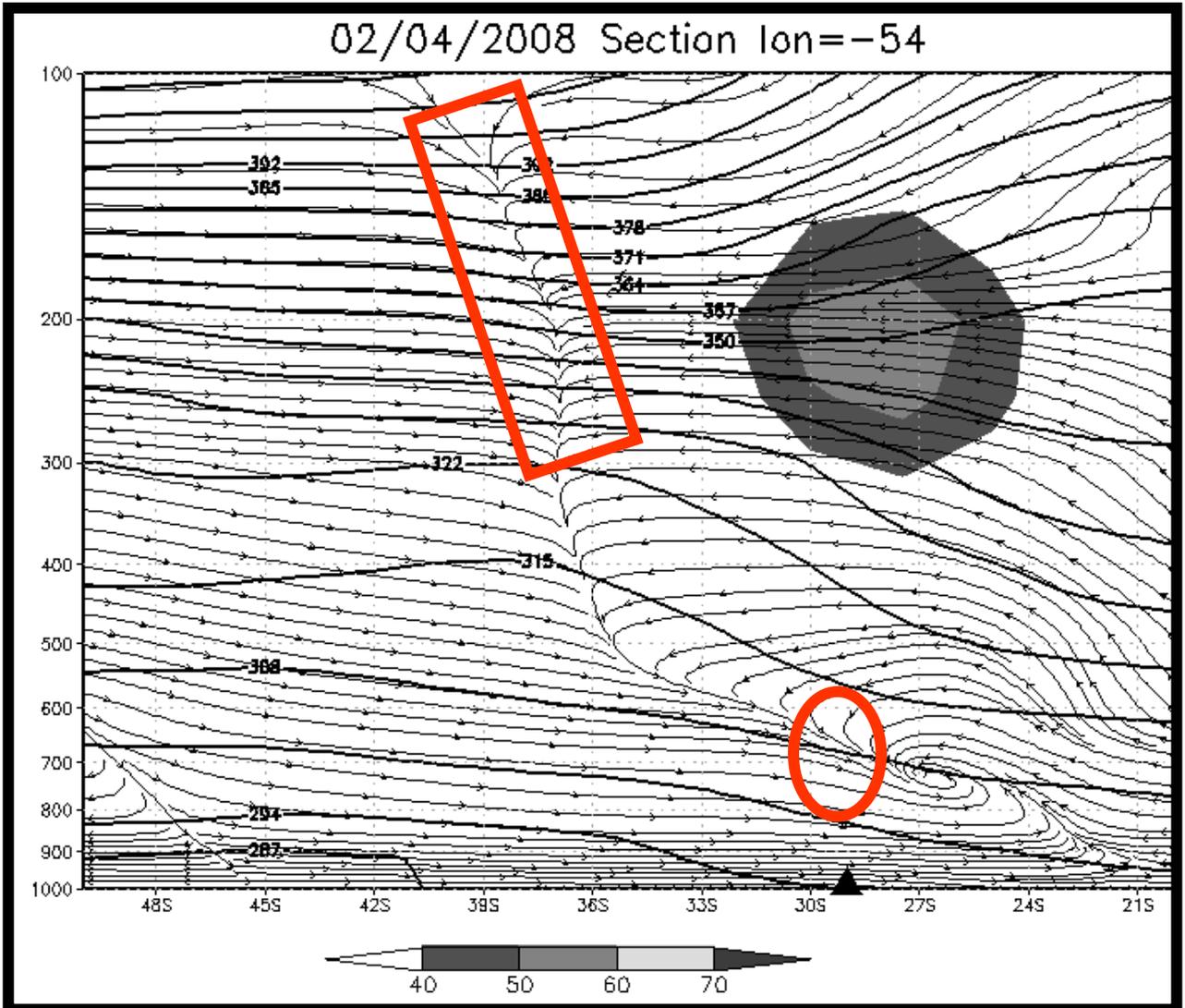


Figura 16 – Corte vertical da Corrente de Jato sobre a região central do Rio Grande do Sul para o dia 02/04/2008.

Pode-se observar na imagem do satélite OMI do dia 02 de abril (Figura 17), o aumento de ozônio na região central do Rio Grande do Sul (círculo em vermelho), resultado do efeito da ação da corrente de jato durante o envelopamento da tropopausa, logo após a passagem do sistema frontal.

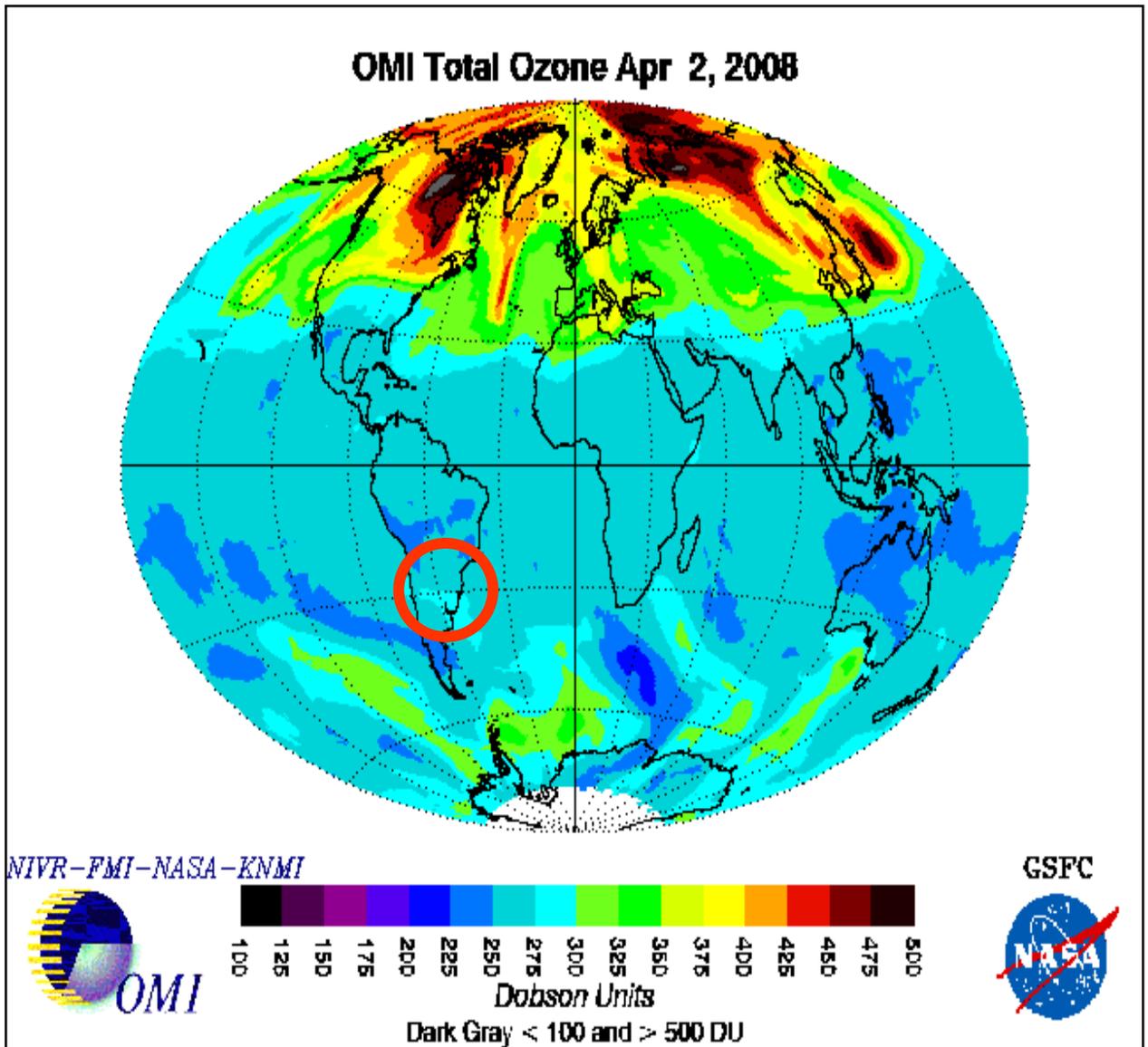


Figura 17 – Imagem de Satélite OMI do dia 02/04/08

O gráfico da altura da tropopausa obtida a partir de sondagens realizadas em Santa Maria (Estação Meteorológica de Altitude da Base Aérea) e a coluna total média de ozônio de 27/03/08 a 06/04/08 é mostrado na Figura 18. As lacunas na determinação da altura da tropopausa deveram-se a problemas técnicos. Os metares (ver apêndice), para esta data, relativos aos dias 1 e 2 de abril de 2008, comprovam a situação de passagem da frente fria sobre Santa Maria, e mostram uma situação pós-frontal para a região central do Rio Grande do Sul, com diminuição pequena na temperatura, sinalizando uma massa de ar com pouca atividade. Conseqüentemente, a corrente de jato apresentou uma intensidade mais

moderada, devido ao baixo gradiente de temperatura entre as massas de ar. Provavelmente, devido a este fato, o aumento da coluna total de ozônio foi relativamente pequeno.

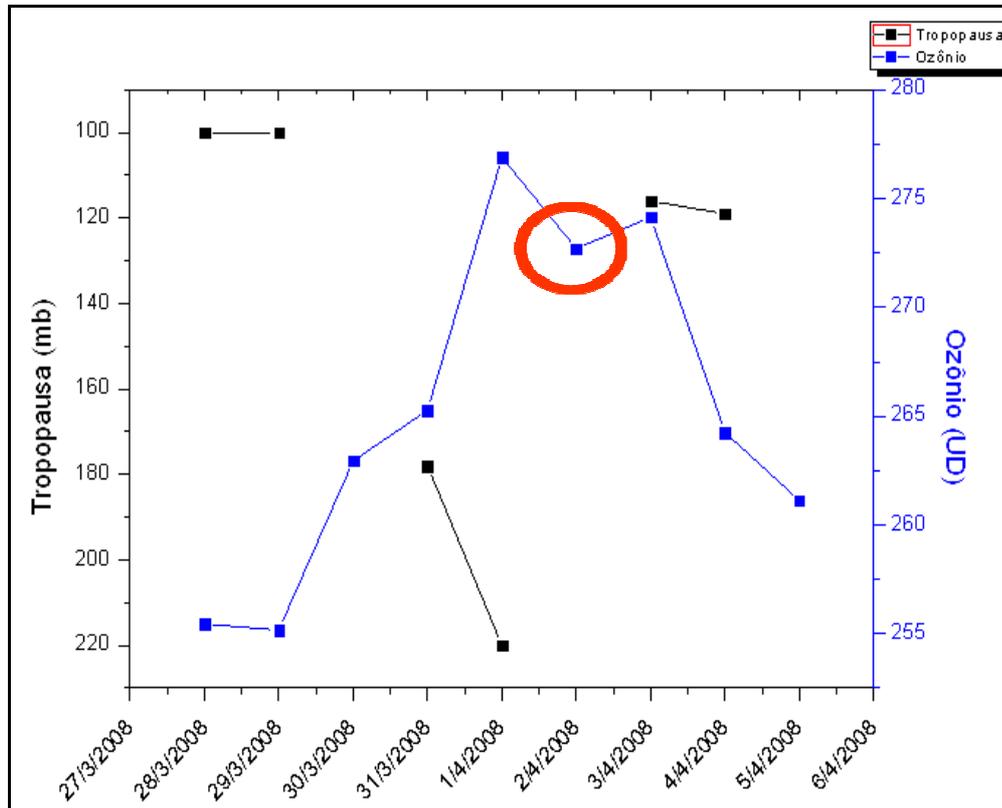


Figura 18 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 02/04/08.

Assim, evidencia-se o aumento na coluna total de ozônio para os dias em que ocorreu a passagem da frente fria, que em conjunto com o envelopamento da tropopausa e ação da corrente de jato, ocorre à intrusão de ar estratosférico descendo para os níveis médios e baixos da troposfera.

3.1.2 Mês de Junho de 2008

Análise Sinótica

A formação de um ciclone extratropical causou ventos fortes que atingiram 72 km/h em Porto Alegre-RS (Fonte: Metar). Também, houve ventos fortes na região central do Rio Grande do Sul, conforme sequência de Metares de Santa Maria (Apêndice). Na imagem de satélite GOES-10 infravermelho com realce das 18:00 UTC do dia 09/06/08 (Figura 19) mostra a frente fria e o ciclone atuando sobre o RS. Rapidamente neste dia, uma massa de ar polar ingressa no Estado no final da tarde. Houve pouca precipitação na região central do RS e foi um dia muito ventoso.

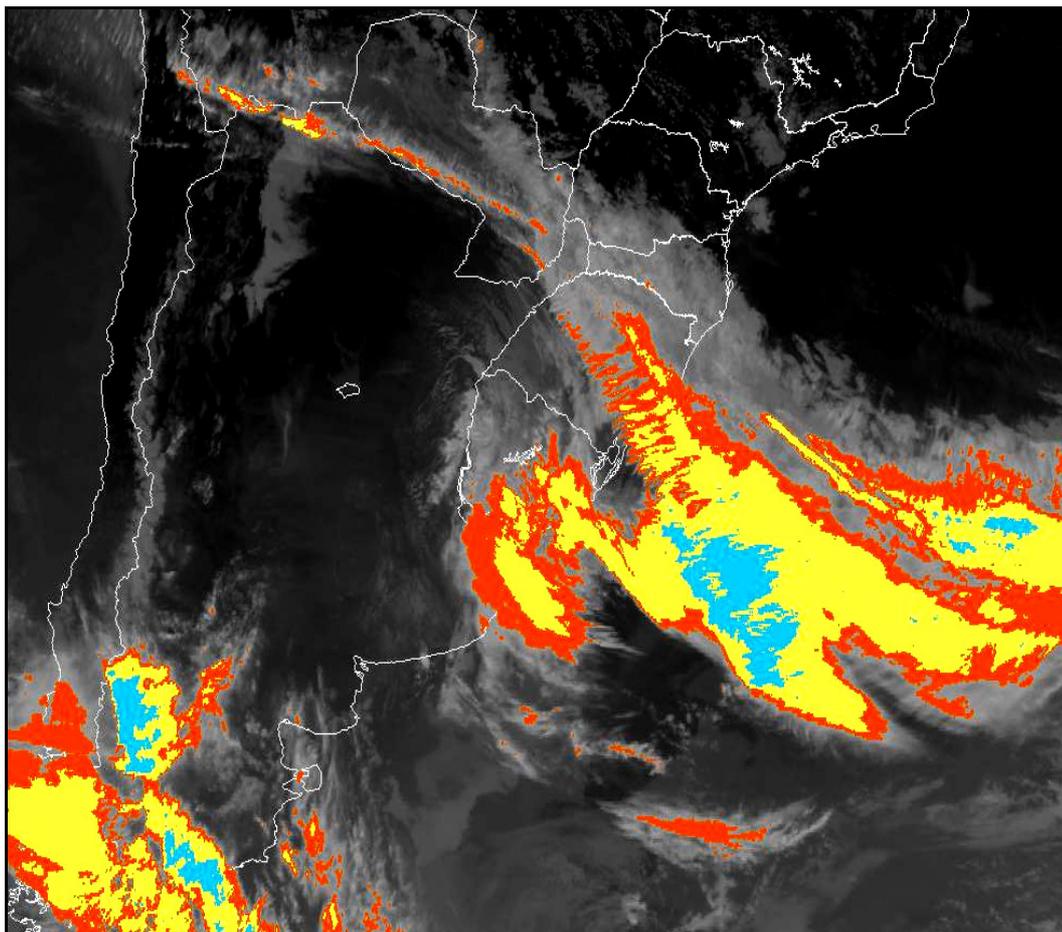


Figura 19 – Imagem de Satélite GOES-10 para o infravermelho e realçada, dia 09/06/08 às 18:00 UTC.

Fonte: CPTEC

Conforme Figura 19, rapidamente neste dia, uma massa de ar polar ingressa no Estado no final da tarde. Houve pouca precipitação na região central do RS e foi um dia muito ventoso. A advecção de ar frio na região central do Rio Grande do Sul foi pronunciada devido à presença do ciclone próximo ao continente.

A análise da carta sinótica de superfície das 12:00UTC do dia 09/06/08 (Figura 20) mostra a frente fria associada ao ciclone com forte massa de ar polar (alta pressão, letra A em azul) à sua retaguarda. O forte gradiente de pressão, entre as massas de ar, originou vento muito intenso com rajada no Rio Grande do Sul.

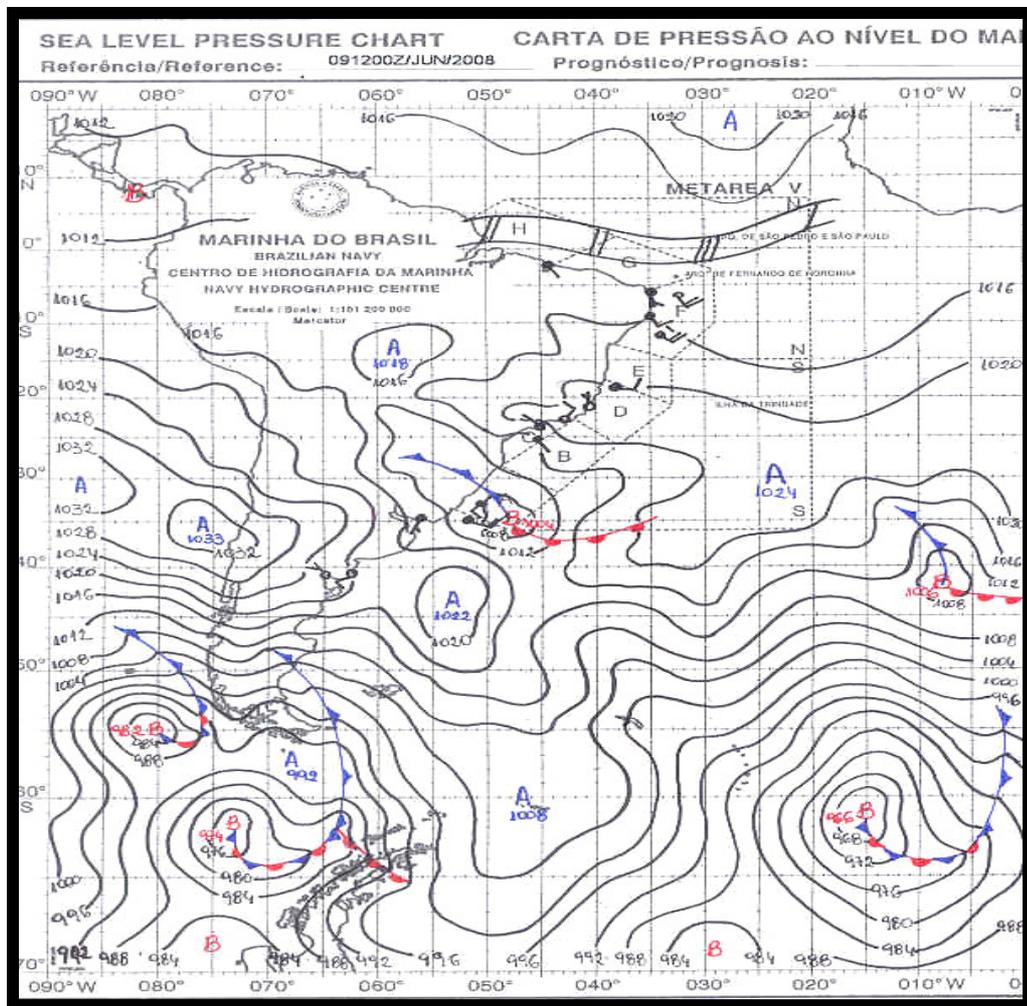


Figura 20 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 09/06/08.

Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (DHN).

O corte vertical da corrente de jato em 250 mb (Figura 21) mostra o envelopamento do ar estratosférico para a troposfera, trazendo massa de ar rica em ozônio (até 900 hPa, latitude ($\pm 42^\circ\text{S}$)), a partir daí, pela superfície, sendo conduzido pela massa de ar polar. Como o ciclone extratropical estava com forte intensidade no continente entre Uruguai e RS, os fortes ventos trouxeram o ar rico em ozônio pela superfície em direção a Santa Maria, aumentando a concentração de ozônio na região central do Rio Grande do Sul. Este caso mostra que o ar pós-frontal de latitude mais elevada, rica em ozônio, foi o responsável pelo aumento do ozônio na região central do RS.

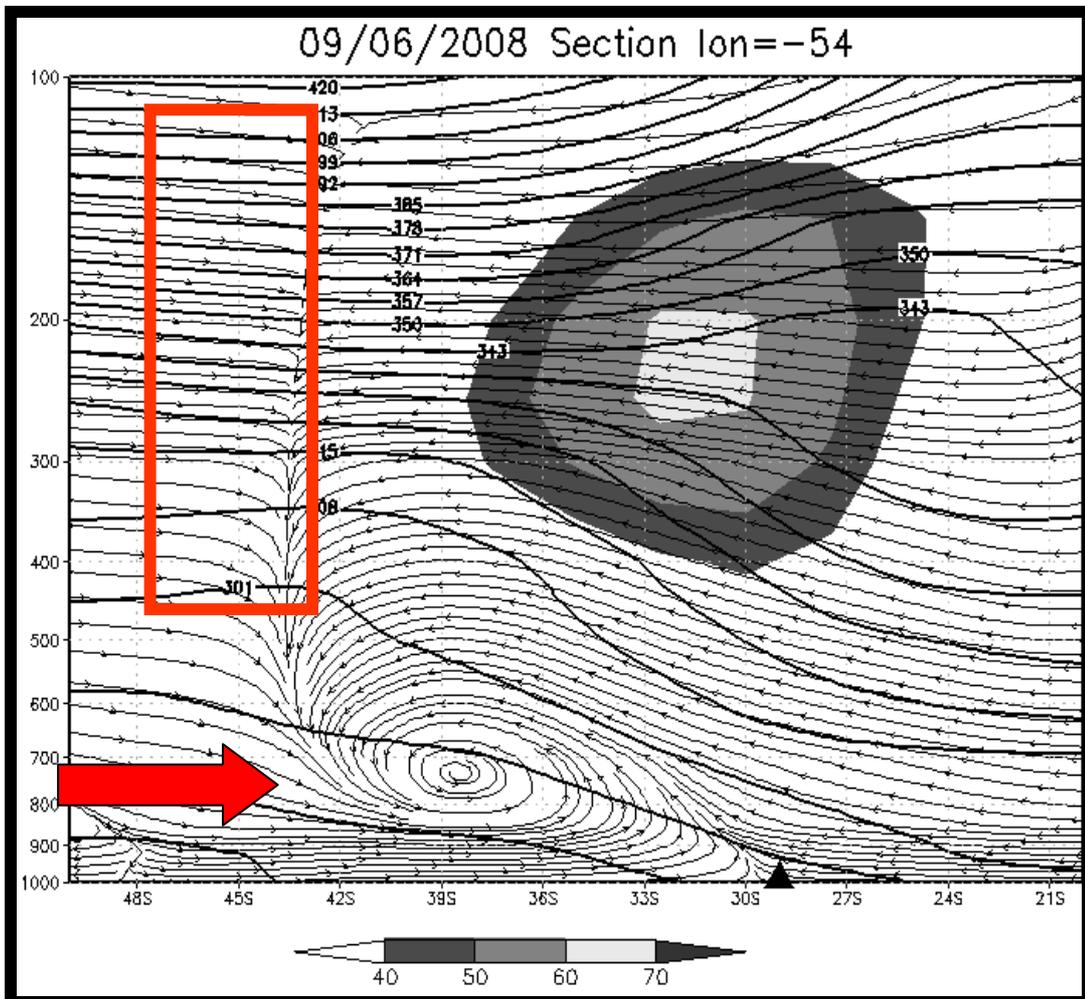


Figura 21 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb

A imagem de satélite OMI do dia 09 de junho (Figura 22) identifica o aumento de ozônio na região central do Rio Grande do Sul (círculo em vermelho). A ação conjunta da corrente de jato e tropopausa, gerando o envelopamento do ar estratosférico para a troposfera, ficou bem sinalizado pela presença do ciclone extratropical, que gerou ventos fortes e rajadas na região central do Rio Grande do Sul, conforme metares (ver apêndice).

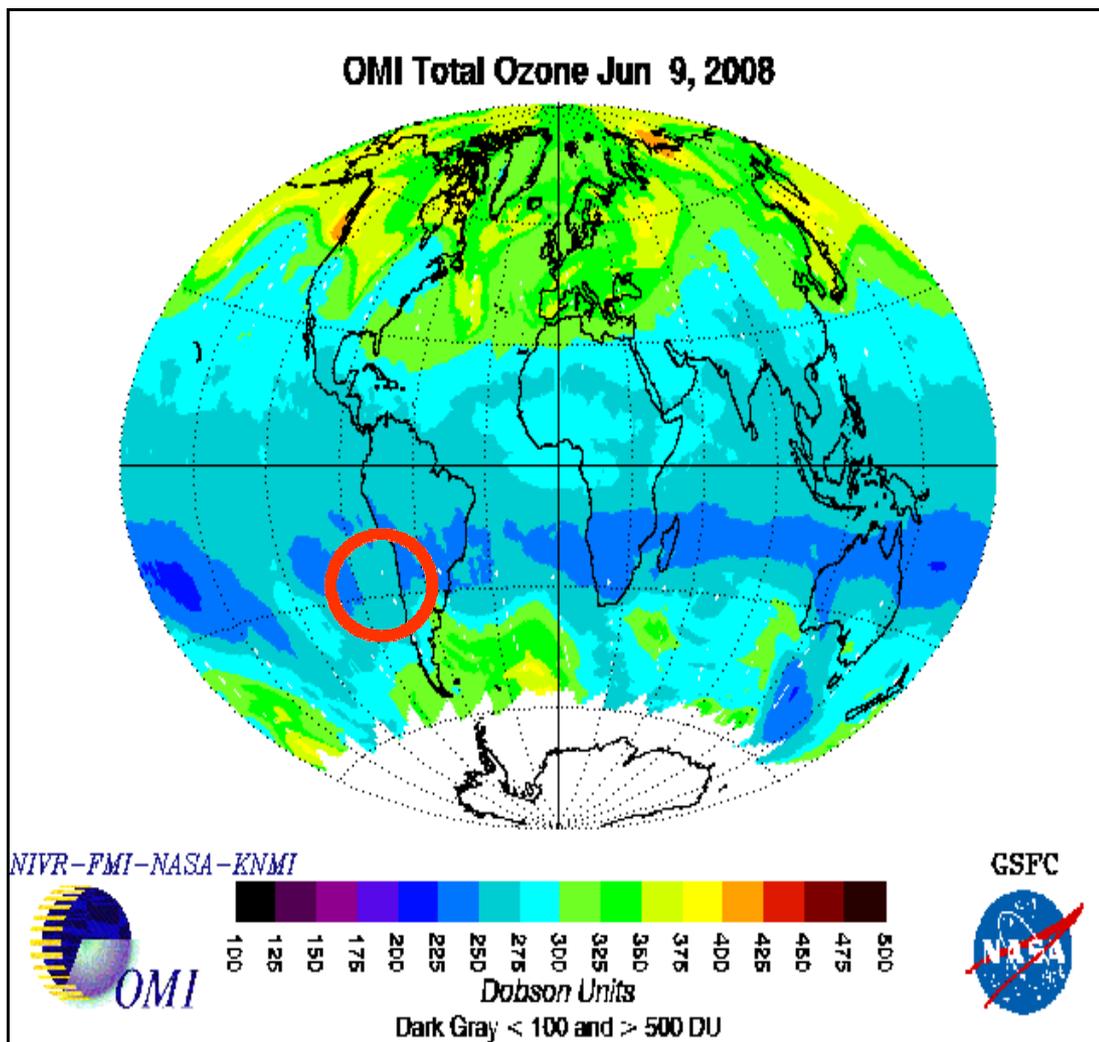


Figura 22 – Imagem de Satélite OMI do dia 09/06/08

O gráfico da altura da tropopausa obtida a partir de sondagens realizadas em Santa Maria (Estação Meteorológica de Altitude da Base Aérea) e a coluna total média de ozônio de 03/06/08 a 16/06/08 é mostrado na Figura 24. Neste evento, a

variável meteorológica que mais sofreu influência com a presença do ciclone extratropical foi o vento, com rajadas intermitentes (metares, ver apêndice). O forte gradiente de temperatura entre as massas de ar proporcionou a ação de intensos ventos de superfície, que veio a contribuir no transporte de ozônio em direção ao centro do Rio Grande do Sul, culminando no aumento da coluna total de ozônio observado na Figura 23.

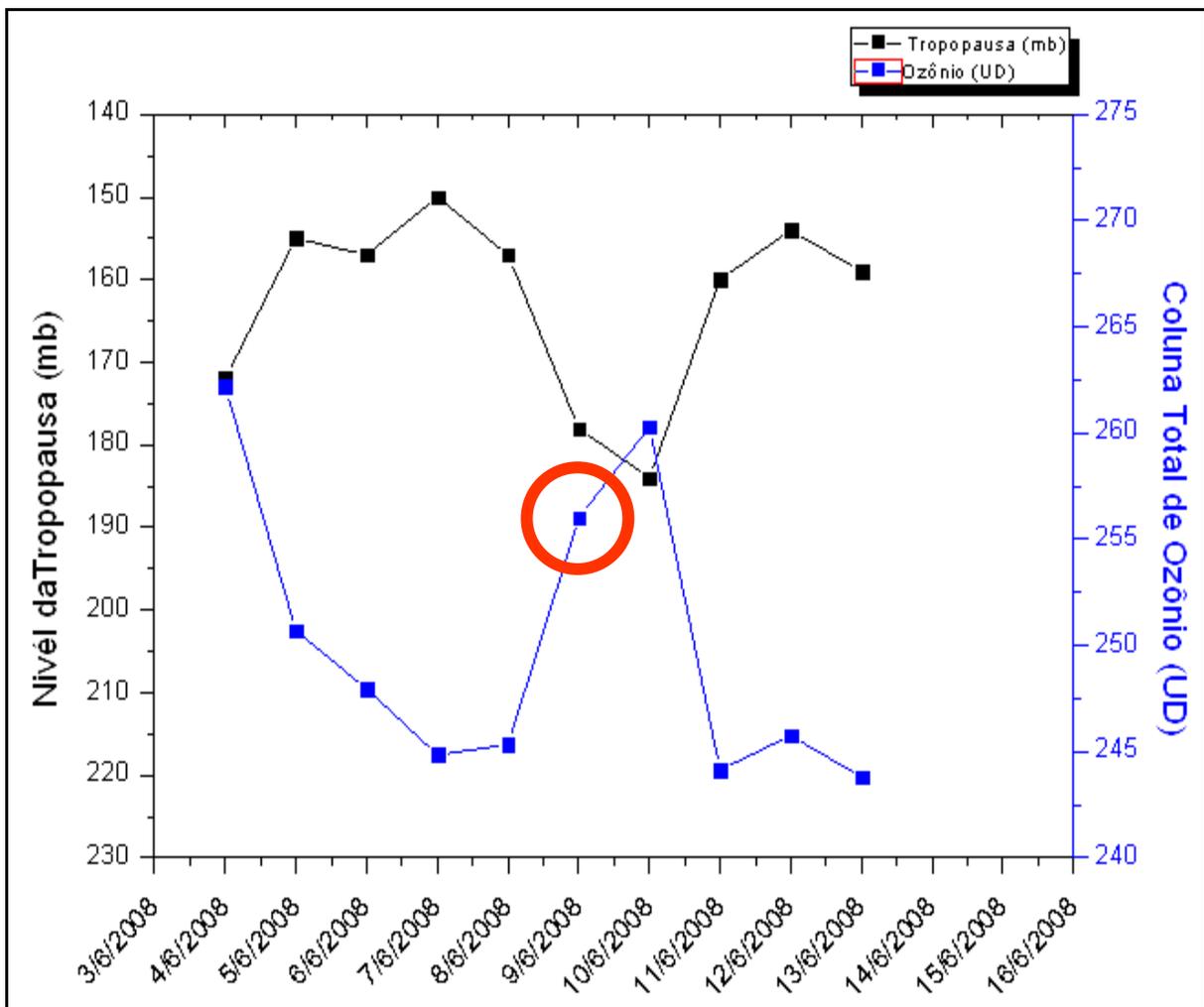


Figura 23 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 09/06/08.

3.1.3 Mês de Julho de 2008

Análise Sinótica

Uma frente estacionária, entre os dias 27 a 29 de julho, foi intensificada pela atuação do jato subtropical, onde causou muita precipitação na região central do RS. No dia 30/07, formou-se um centro de baixa pressão adjacente a sudeste do RS, o qual se alinhou ao sistema frontal estacionário, dando origem ao ciclone extratropical. Houve o ingresso da massa de ar polar ao longo do dia na região central do RS, e com o céu encoberto de nebulosidade baixa teve precipitação do tipo chuvisco, conforme imagem satélite das 12:00UTC do dia 30/07/08 (Figura 24).

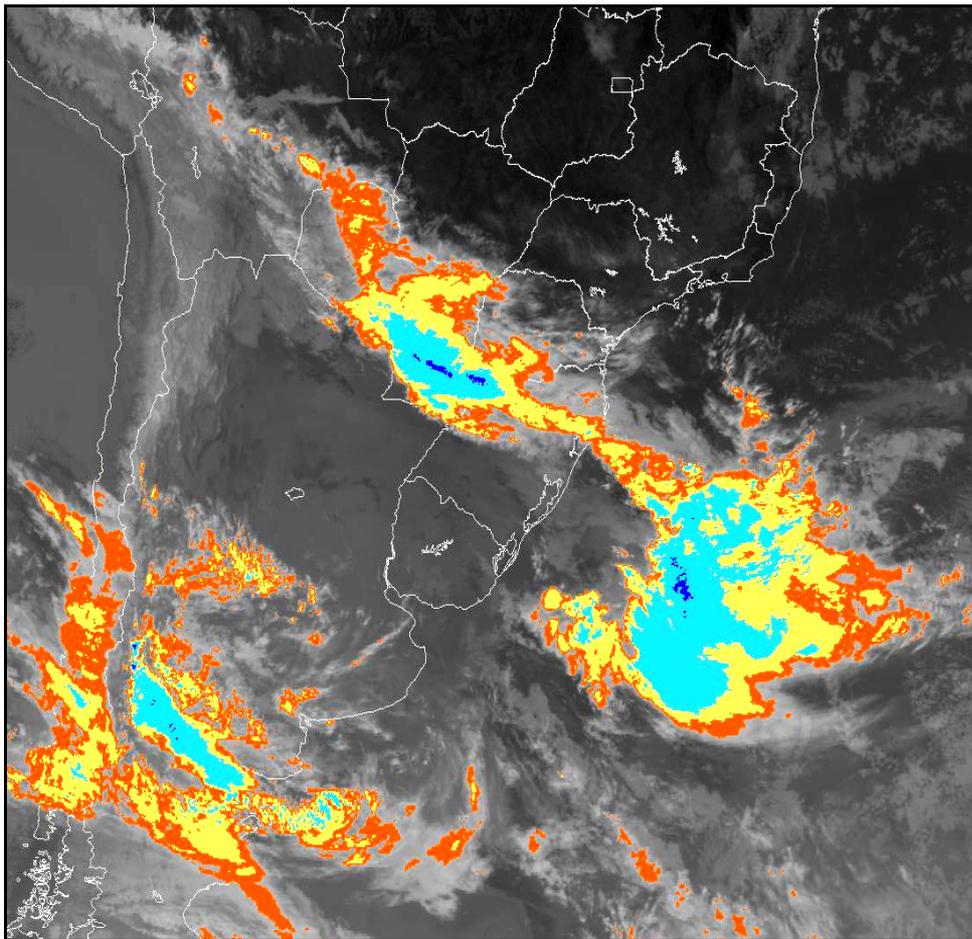


Figura 24 – Imagem de Satélite GOES-10 para o Infravermelho e realçada, dia 30/07/08 às 12:00 UTC.

Fonte: CPTEC

Conforme Figura 24, com a caracterização do ciclone extratropical no dia 30/07/08, a advecção da massa de ar polar na região central do Rio Grande do Sul foi rápida, acompanhada do declínio da temperatura do ar. A precipitação ao longo do dia foi leve e do tipo chuvisco.

A análise sinótica da carta de superfície das 12:00 UTC do dia 30/07/08 (Figura 25) mostra o ciclone extratropical atuando sobre o Rio Grande do Sul, com o centro da massa de ar polar à sua retaguarda (centro da Argentina), sendo representada pela letra A em azul. Não houve ventos fortes na região central do Rio Grande do Sul.

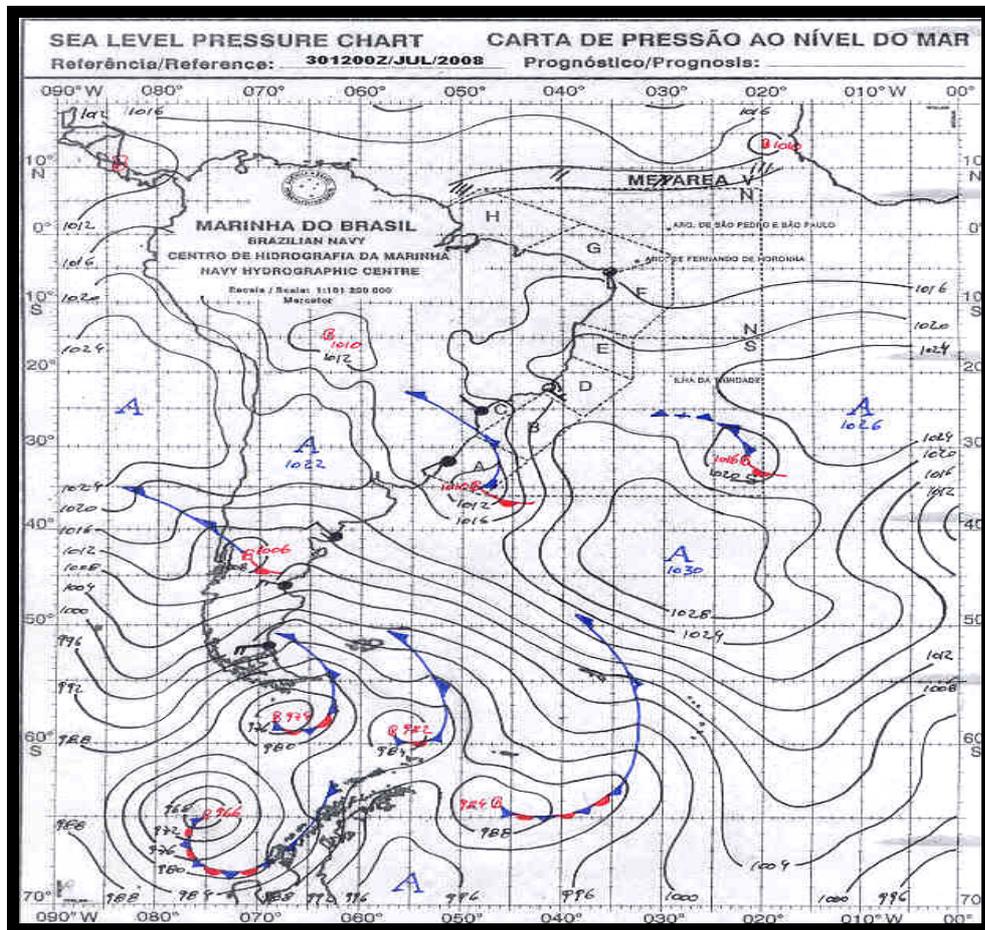


Figura 25 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 30/07/08.

Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (DHN).

A intrusão de ar estratosférico descendo para os níveis médios e baixos da troposfera, carregando ozônio, ficou definida a partir da formação do ciclone extratropical no dia 30/07, podendo ser observado no corte vertical da corrente de jato em 250 mb da Figura 26. A partir da formação do ciclone extratropical próximo ao continente, a ação da corrente de jato foi acelerada, criando um “corredor” posicionado sobre o centro do RS, que facilitou a intrusão do ar estratosférico com alta concentração de ozônio.

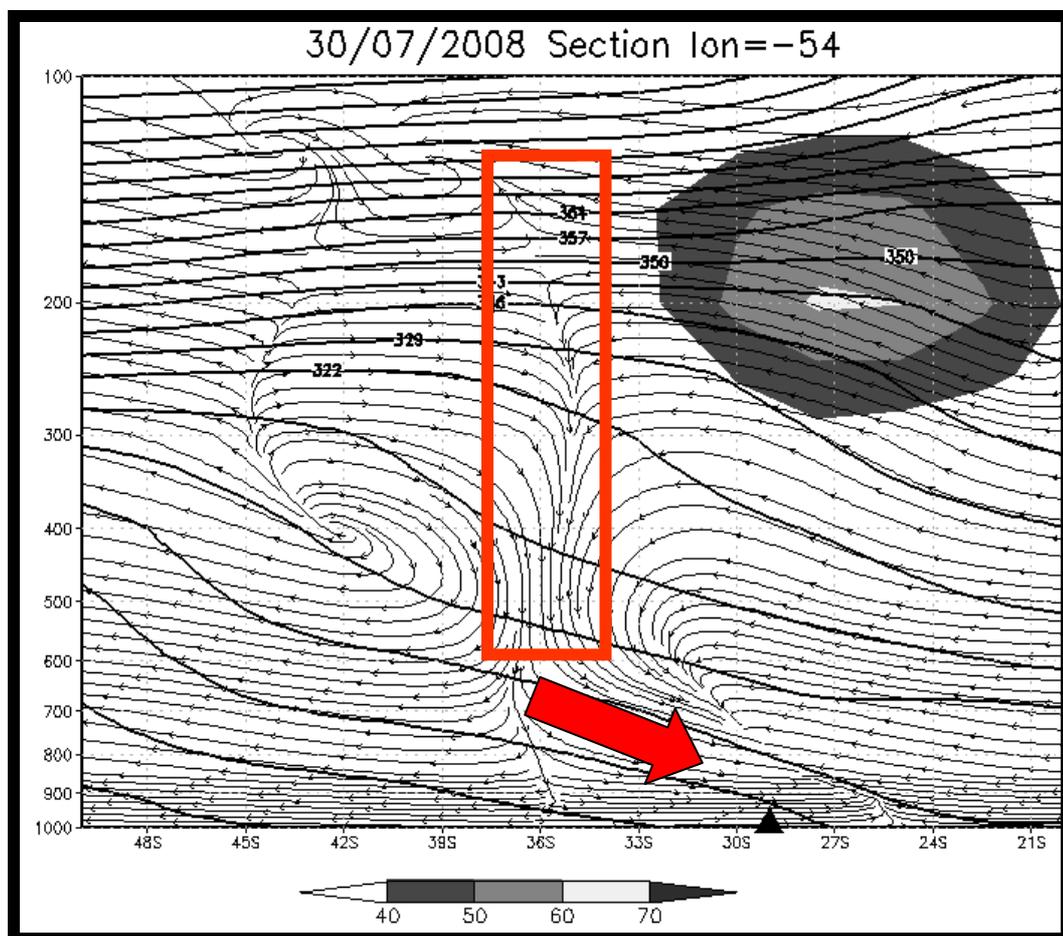


Figura 26 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb

A imagem de satélite OMI do dia 30/07 (Figura 27) mostra um alto valor médio da coluna total de ozônio no dia (círculo em vermelho), semelhante a regiões de maiores latitudes. Esta alta concentração de ozônio é indício da origem de massas de ar ser de regiões de maiores latitudes, confirmando que a passagem do ciclone

extratropical e ação da corrente de jato gerou o ingresso da massa de ar polar (alta pressão) sobre a região central do Rio Grande do Sul.

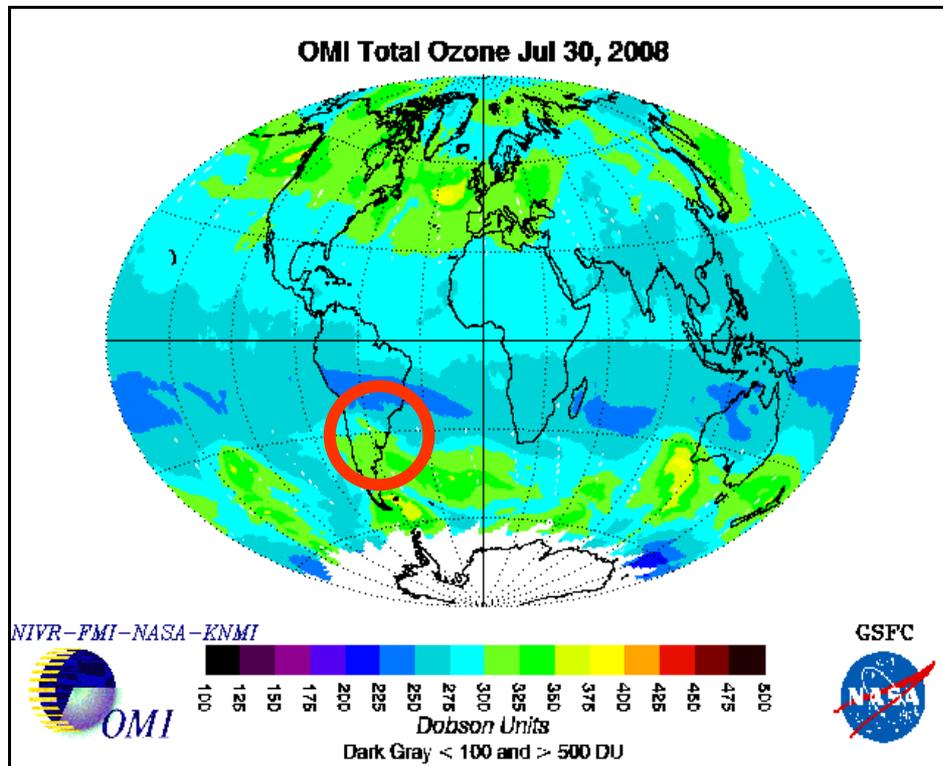


Figura 27 – Imagem de Satélite OMI do dia 30/07/08

O gráfico da altura da tropopausa obtida a partir de sondagens realizadas em Santa Maria (Estação Meteorológica de Altitude da Base Aérea) e a coluna total média de ozônio de 24/07/08 a 03/08/08 é mostrado na Figura 28. O aumento próximo a 10% (dez por cento) na coluna total de ozônio foi observado pelo espectrofotômetro Brewer em dois dias, caracterizando uma forte intrusão do ar estratosférico proveniente de altas latitudes. Neste evento, a massa de ar polar ingressou rapidamente no Rio Grande do Sul, permanecendo o céu encoberto com nuvens baixas ao longo do dia (ver metares no apêndice).

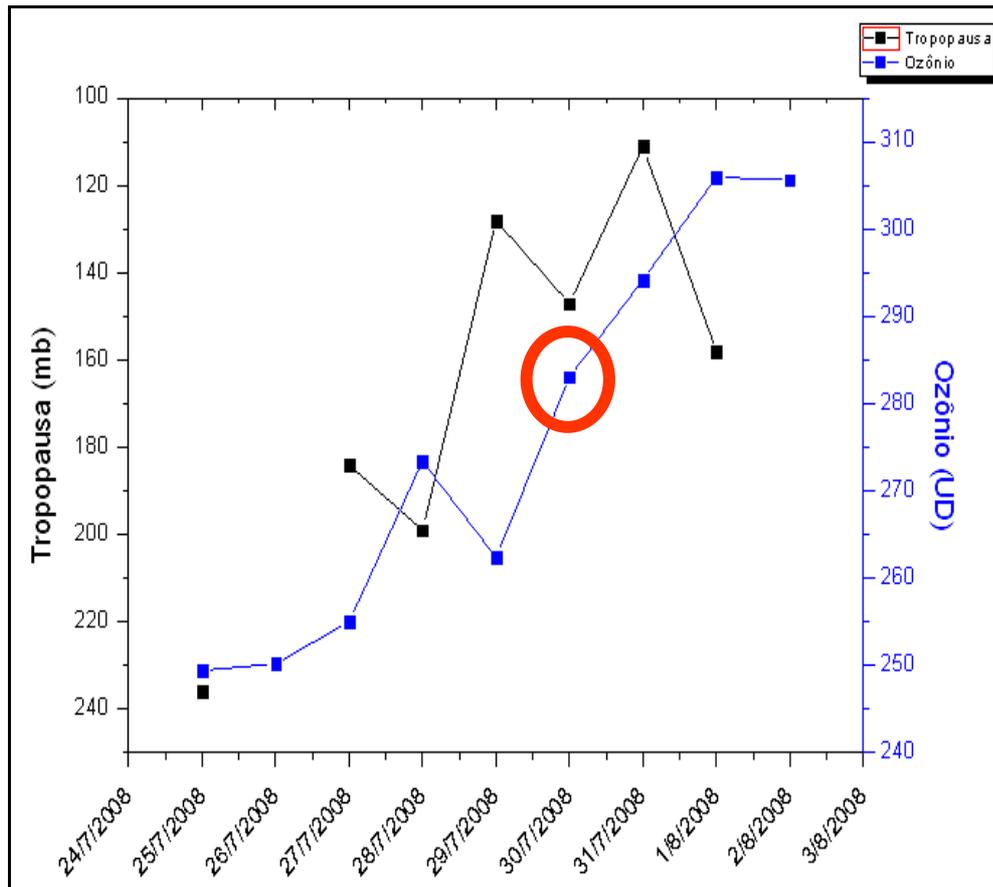


Figura 28 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 30/07/08.

3.1.4 Mês de Outubro de 2008:

Análise Sinótica:

Uma frente fria chega ao Rio Grande do Sul no dia 22/10, provocando chuvas, ventos fortes e descarga elétrica em todo o Estado, conforme imagem satélite das 18:00UTC do dia 22/10/08 (Figura 29). Este sistema manteve-se semi-estacionário no Rio Grande do Sul, sendo intensificado pela atuação do fluxo em baixos níveis.

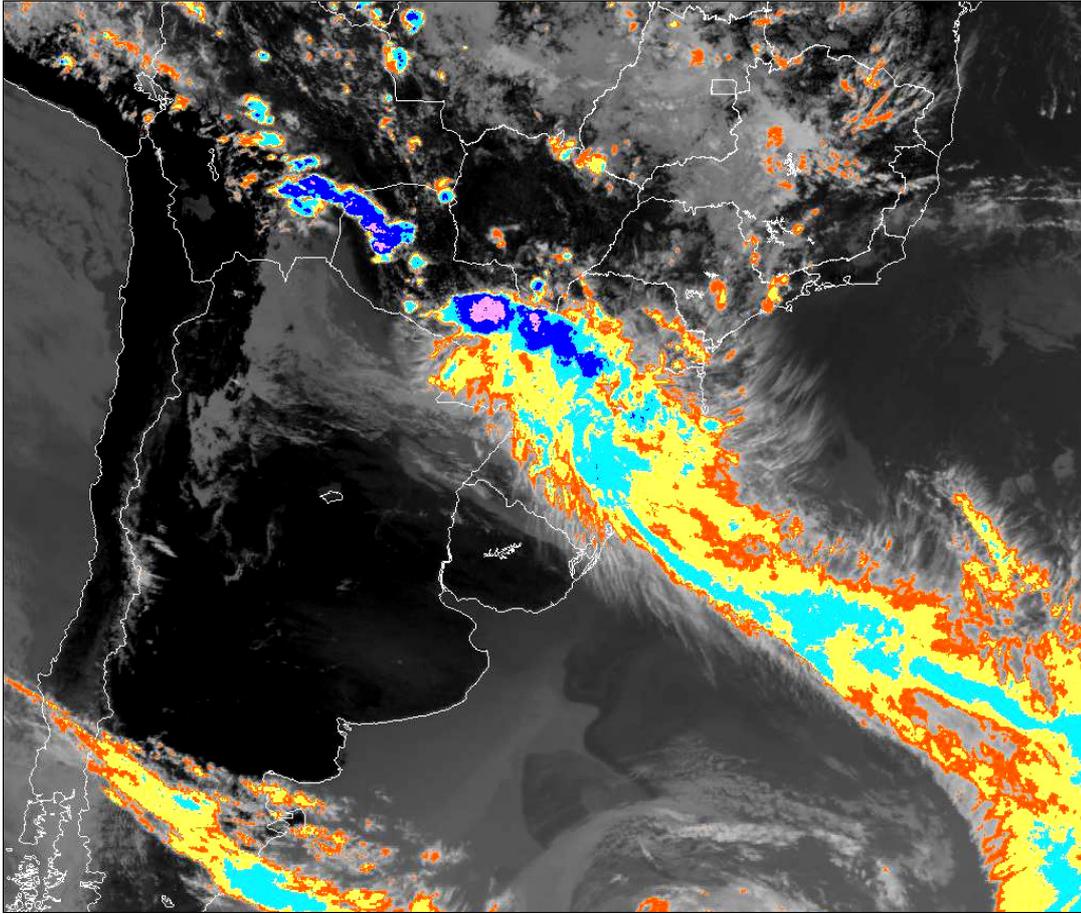


Figura 29 – Imagem de Satélite GOES-10 para o infravermelho e realçada, dia 22/10/08 às 18:00UTC.

Na análise da carta de superfície das 12:00 UTC do dia 22/10/08, a frente fria é posicionada próximo ao sul do RS com extensa área de nebulosidade (Figura 30). A alta pressão migratória (pós-frontal) mantém-se estacionária na Argentina, devido ao forte bloqueio atmosférico (anticiclone de grande amplitude) que interrompe a progressão normal da frente fria.

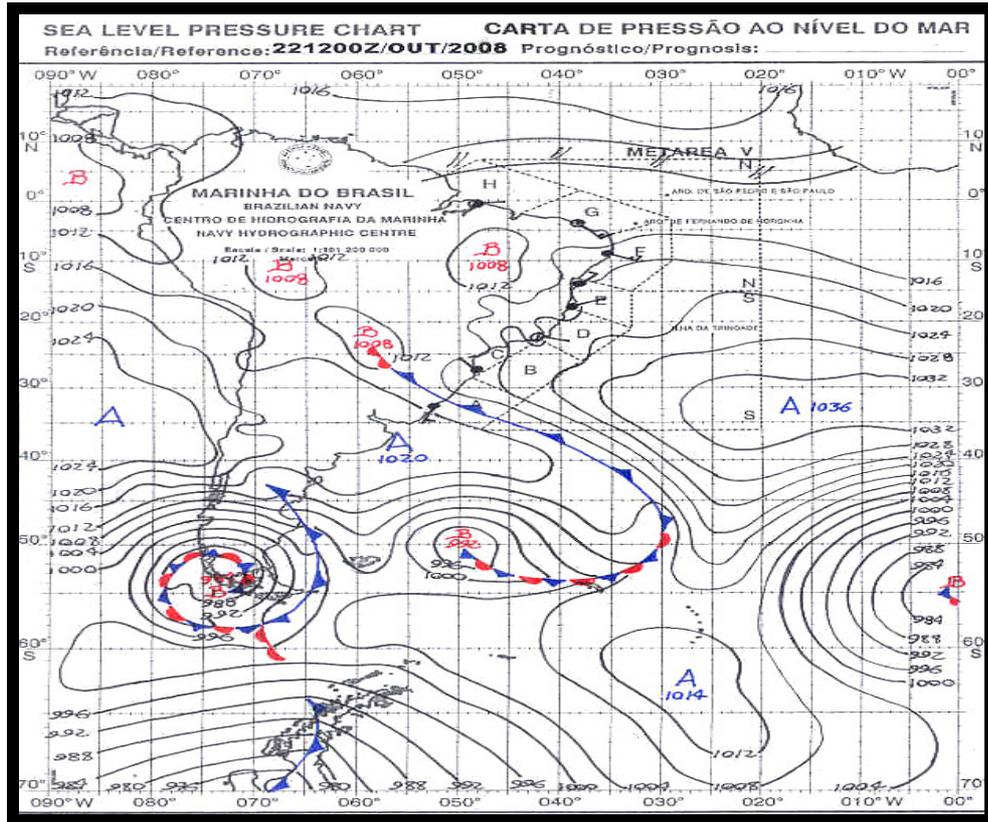


Figura 30 – Carta Sinótica de Superfície das 12:00UTC do dia 22/10/08.

Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (DHN).

Este evento apresenta uma característica singular por ter sido sucedido por um efeito secundário do buraco de ozônio Antártico. Como pode ser visto na imagem do OMI (Figura 32), no dia 22/10 o vórtice polar sinalizava um desprendimento de massa de ar em direção ao sul do Brasil. Tal efeito foi confirmado no dia 25/10, quando da chegada desta massa de ar pobre em ozônio, proveniente da Antártica, conforme constatado pelas medidas efetuadas pelo Espectrofotômetro Brewer (Figura 33), e publicado por Pinheiro et al. (2011). Porém, regiões de maiores latitudes, como a de 45°S, já estavam sofrendo influências de menores concentrações na coluna total de ozônio, conforme Figura 32.

No corte vertical, em 250mb, da corrente de jato (Figura 31), há o envelopamento do ar estratosférico em 47°S, nível 200mb, transportando verticalmente massa de ar com estas menores concentrações de ozônio, de latitudes maiores para latitudes menores, até a latitude de 34,5°S nível 800 mb. A partir desta latitude, com a ação do fluxo de ventos em baixos níveis, ocorre o

transporte de massa de ar para a região central do Rio Grande do Sul (indicações em vermelho) com a conseqüente leve redução da concentração de ozônio local.

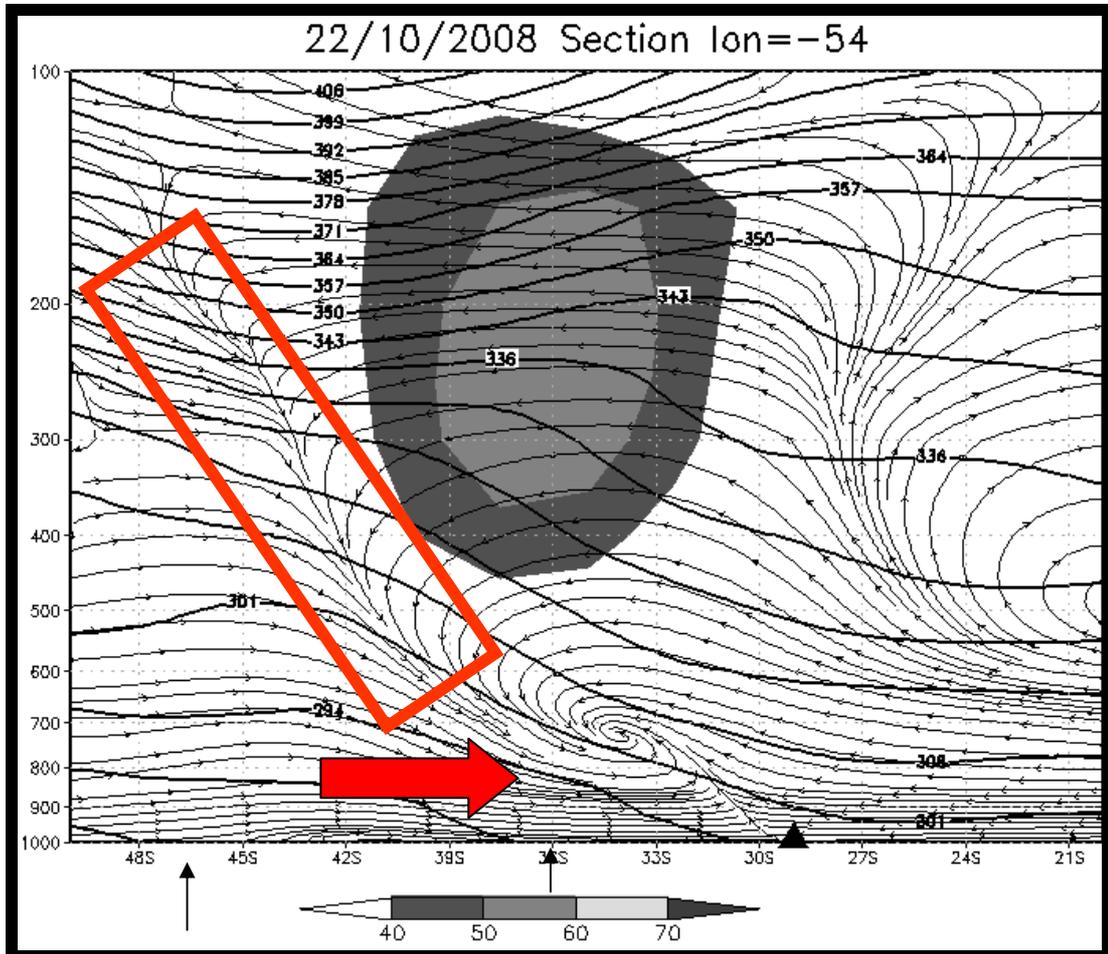


Figura 31 – Corte vertical da Corrente de Jato em 250mb.

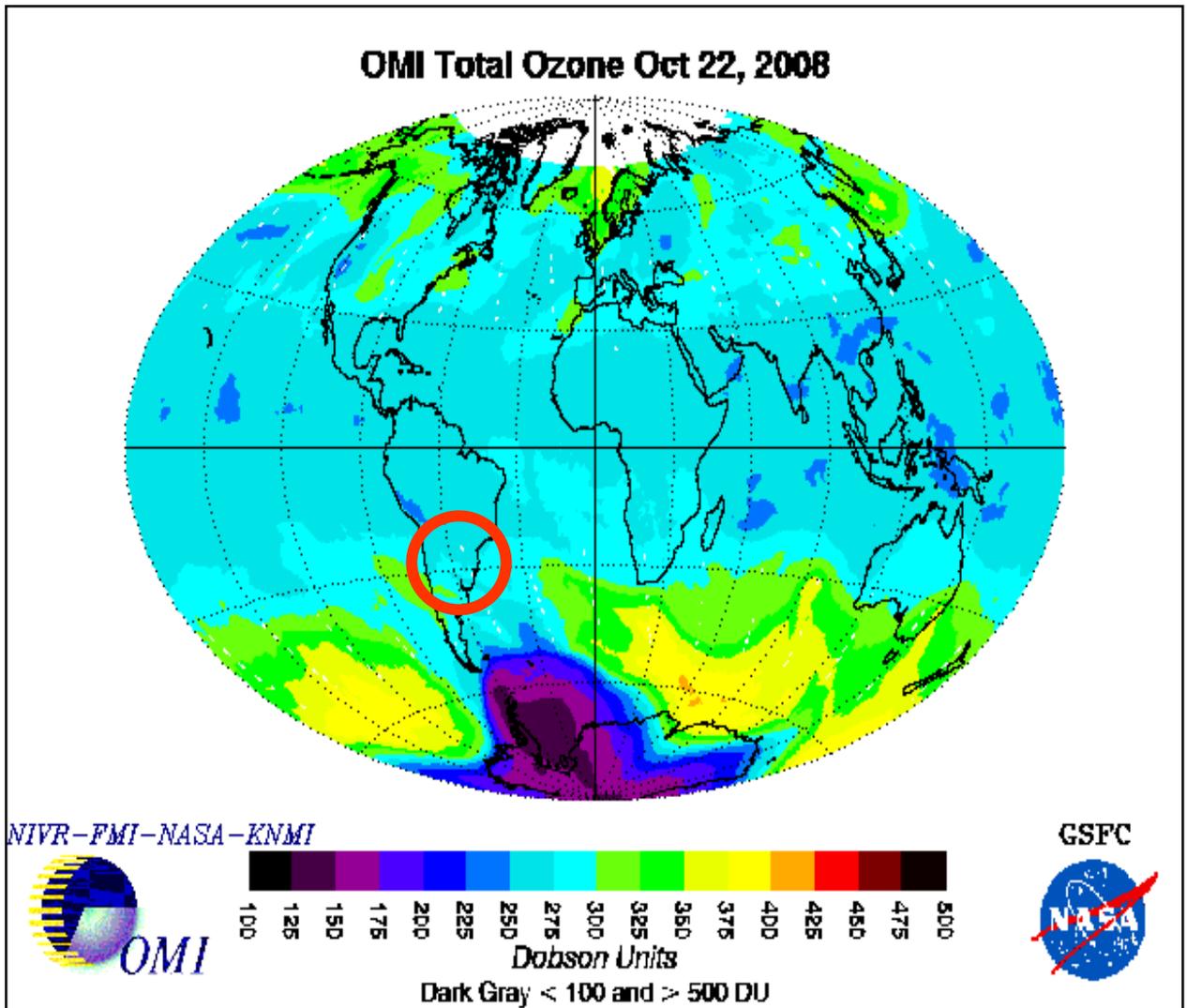


Figura 32 – Imagem de Satélite OMI do dia 22/10/08

O gráfico da altura da tropopausa obtida a partir de sondagens realizadas em Santa Maria (Estação Meteorológica de Altitude da Base Aérea) e a coluna total média de ozônio de 17/10/08 a 27/10/08 é representado na Figura 33. A leve redução de ozônio pode ser verificado nos dados do dia 22 para o dia 23/10 e ocorreu com a ação do fluxo de vento em baixos níveis da latitude de 34,5°S nível 800 mb, em direção a latitude de 30°S, transportando a massa de ar.

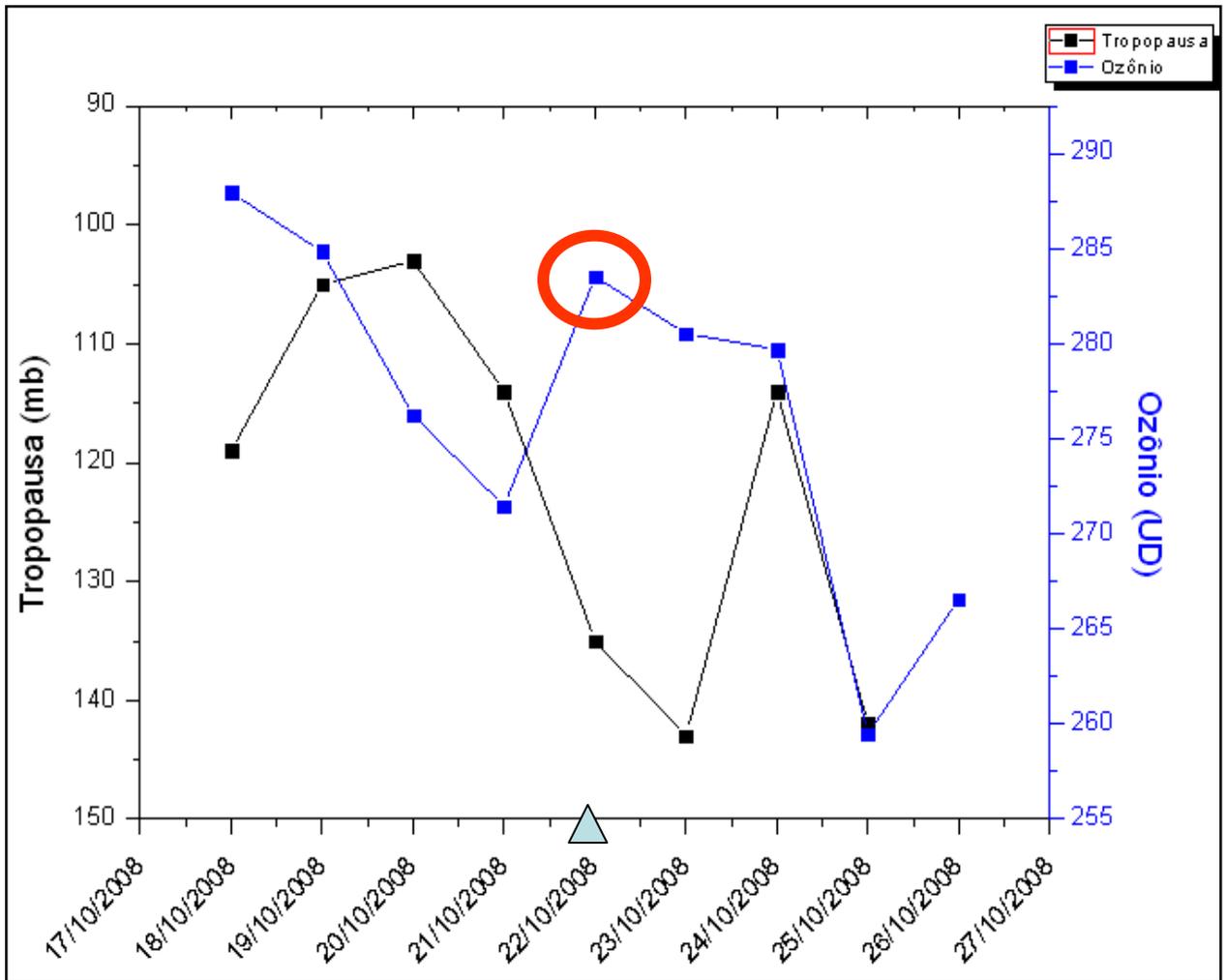


Figura 33 – Gráfico da altura da tropopausa e coluna de ozônio no dia 22/10/08.

3.2 Discussão dos resultados

Durante a análise dos eventos de frentes frias do ano de 2008, foram observadas 64 (sessenta e quatro) passagens de sistemas frontais. Dentre estas, foram analisadas 9 eventos que apresentaram significativa variação nos parâmetros meteorológicos, tais como: precipitação, temperatura e vento. Portanto, foram estudados, apenas, os eventos de frentes frias que apresentaram atividades fortes.

É importante ressaltar que dois casos foram definidos para a compreensão dos eventos em análise: sem envelopamento e com envelopamento da tropopausa.

No primeiro caso, a ação da corrente de jato em altos níveis não foi suficiente para provocar a quebra da tropopausa (sem envelopamento). Dos nove casos analisados, quatro não apresentaram envelopamento.

No segundo caso, o envelopamento da tropopausa significa forte ação da corrente de jato em altos níveis, com a consequente intrusão vertical de ar estratosférico rumo à troposfera. Dos cinco casos de envelopamento, apenas no mês de agosto, a intrusão não ocorreu com a massa de ar estratosférico indo em direção a Santa Maria. Os quatro casos, onde a massa de ar estratosférica veio em direção a Santa Maria, foram apresentados anteriormente. A seguir é apresentado um resumo dos mesmos.

- No evento do dia 02 de abril de 2008, a frente fria chegou ao RS no dia primeiro, mas a massa de ar polar estabeleceu-se apenas no dia 2 em todo o Estado. O ciclone extratropical estava no Oceano a leste do RS, sem atuar no continente. O gradiente de temperatura entre as massas de ar não era significativo. Com isso, a corrente de jato atuante no evento não foi muito intensa. Apesar da existência do envelopamento, o aumento na coluna total de ozônio foi pequeno.

- No evento do dia 09 de junho de 2008, a frente fria chegou com bastante atividade. O ciclone extratropical estava posicionado sobre o Uruguai acompanhado de fortes ventos. A corrente de jato neste dia estava com forte intensidade e cruzando o centro do RS, causando o envelopamento da tropopausa com a intrusão do ar estratosférico na latitude de 42°S. A presença do ciclone extratropical foi essencial para conduzir o ar desta latitude até a região de Santa Maria, causando um aumento na coluna total de ozônio do dia 09 para o dia 10 de junho de 2008.

- No evento do dia 30 de julho de 2008, a frente fria permaneceu estacionária de 27 a 29, sendo que, no dia 30, o envelopamento da tropopausa ocorreu devido à ação da forte corrente de jato influenciada com a formação do ciclone extratropical. Neste dia houve o ingresso da massa de ar polar sobre o Estado. Com o envelopamento, ocorreu a intrusão do ar estratosférico sobre a troposfera, causando um forte aumento na coluna total de ozônio sobre a região central do RS.

- O evento do dia 22 de outubro de 2008 caracteriza-se por ser um evento singular, tendo uma leve redução na coluna total de ozônio após a passagem da frente. Isto foi devido ao menor conteúdo de ozônio observado em maiores latitudes, causado pela ação do buraco de ozônio Antártico. A frente fria ingressou no RS no dia 22 de outubro no início da manhã com muita atividade, vindo a diminuir de

intensidade no período da tarde. Neste evento não houve influência do ciclone extratropical, por estar bem afastado da costa. A massa de ar polar chegou ao Estado com pouca intensidade. A ação da corrente de jato na tropopausa causou o envelopamento com a intrusão de ar estratosférico na latitude próxima a 47°S, carregando esta massa de ar até 34,5°S e, posteriormente, a 30°S por corrente de jato em baixos níveis.

Tabela 2 – Síntese dos eventos analisados de 2008

Data dos Eventos	Latitude do Envelopamento	Altitude do Envelopamento	Atuação do Ciclone	Ação dos Fluxos em Baixos Níveis	Varição de Ozônio
02/04/08	36°S - 39°S	100mb - 200mb	oceano	não	aumento
09/06/08	42°S – 45°S	100mb - 200mb	continente	sim	aumento
30/07/08	33°S – 36°S	200mb	oceano	não	aumento
22/10/08	45°S – 48°S	200mb	oceano	sim	diminuição

O objetivo do trabalho foi determinar se o ozônio atmosférico é influenciado com a passagem de frentes frias e ação da corrente de jato, na região central do Rio Grande do Sul. Foram analisados eventos de 2008. Sabe-se que a climatologia de sistemas frontais para latitudes entre 25°S e 35°S é de seis frentes por mês (CPTEC, climanálise). O transporte do ozônio estratosférico para a troposfera nas latitudes médias ocorre principalmente por eventos de quebra da tropopausa, associados à frontogênese em altos níveis e ciclogênese em superfície (Reed, 1955). Alguns estudos (Volz et al., 1988; Chung,1977) mostram que depois da passagem de frentes frias, em condições de céu nublado, o ozônio decresce sem distinção, onde isso é atribuído a vários processos, por exemplo, destruição química do ozônio por NOx e mudanças de temperatura devido a advecção de ar

quente. Mas, em alguns estudos de caso realizados na Europa (KUNZ and P. SPETH, 1996), após a passagem de frentes frias pode ocorrer aumento na concentração de ozônio, dependendo da estrutura vertical da frente e da sua velocidade de deslocamento. Num desses estudos, uma frente fria acompanhada de chuva forte, nuvens convectivas, tempestade de raios e ventos de 70km/h, ocasionou no momento de sua passagem, um aumento de ozônio muito rapidamente.

Parece ser provável que a ocorrência de aumentos rápidos de ozônio atrás de frentes frias está ligada a catafrentes. No geral esse aumento é pequeno, porém mais frequente do que o suposto (VIEZEE et al., 1983).

SPRENGER et al. (2003) avaliou a distribuição da dobra da tropopausa para o período de um ano e verificou que no Hemisfério Sul, a máxima frequência de dobras profundas, durante o inverno, coincide com a climatologia de ciclones realizada por SINCLAIR (1995).

Os eventos de passagens de frentes frias sobre a região central do Rio Grande do Sul em 2008 apresentaram como característica relevante a atividade do sistema e a rapidez com que se desloca, conectado com a ação da corrente de jato. Pois, nestes casos o aumento de ozônio ocorre logo após a passagem da frente fria.

CONCLUSÃO

Neste trabalho desenvolveu-se a análise da influência da passagem de sistemas frontais sobre o comportamento da coluna total de ozônio sobre a região central do Rio Grande do Sul, para o ano de 2008.

Durante o ano de 2008, dos dados analisados verificou-se que ingressaram sobre o centro do Rio Grande do Sul um total de sessenta e quatro frentes.

Foram analisadas nove eventos de sistemas frontais mais fortes ocorridos neste período. A variável meteorológica que mais influenciou no processo de envelopamento da tropopausa e intrusão do ar estratosférico para a troposfera foi a corrente de jato em altos níveis. Outra variável que se mostrou importante nos eventos analisados foi a direção e magnitude do vento na média e baixa troposfera, fazendo com que as massas de ar estratosférica sofressem deslocamento em direção a região central do Rio Grande do Sul. Por fim, a formação de ciclones no continente próximo a região de estudo teve uma forte influência sobre o processo de envelopamento da tropopausa, causando uma maior intrusão de ar estratosférico, com conseqüente aumento da coluna total de ozônio.

Dos resultados analisados, pode-se concluir que a coluna total de ozônio sofre influência com a passagem das frentes, podendo aumentar quando ocorre a intrusão do ar estratosférico na troposfera com o envelopamento da tropopausa, causado pela ação da corrente de jato que acompanha a frente. Normalmente as frentes frias rápidas e de forte atividade tem maior probabilidade de ser acompanhada por uma corrente de jato forte, a qual pode causar envelopamento na tropopausa. Com isso, maior probabilidade de aumento na coluna total de ozônio, em médias latitudes.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza-CE. **Anais...** Fortaleza: SBMet, 2004. 1 CD-ROM. (INPE-12090-PRE/7436). Disponível em: <http://urlib.net/cptec.inpe.br/walmeida/2004/09.21.13.45>

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

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

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. E. Climatologia of South American cold fronts. In: VII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 2003, Wellington, New Zealand. **Proceedings...** Wellington: Amer. Meteor. Soc., 2003.

CLIMANÁLISE: Boletim de Monitoramento e Análise Climática. Cachoeira Paulista-SP: INPE/CPTEC, 2007 a. v. 22. n. 4 40p.

CLIMANÁLISE, Disponível em: www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim, acesso em 09/2012.

CUSTÓDIO, M. A. M.; HERDIES, D. L. O jato de baixos níveis a leste da Cordilheira dos Andes - um estudo de caso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8., 1994, Belo Horizonte-MG. **Anais II...** Belo Horizonte: SBMet, 1994. p. 617-619.

DJURIC, D. (1994) **Weather Analysis**. New Jersey:Prentice-Hall. 304p.

DOBSON, G. M. B., Observations of the amount of ozone in the Earth's atmosphere and its relation to other geophysical conditions, **Proc. R. Soc. London**, Ser. A., 129, 411, 1930.

DOBSON, G. M. B., Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: **A history, Appl. Opt.**, 7, 387-405, 1968.

FABRY, C., and BUISSON, M. L'absorption de l'ultraviolet par l'ozone et la limite du spectre solaire, **J. Phys.**, 3, 196-206, 1913.

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas Frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 57-72, 2000.

FISHMAN, J., WATSON, C. E., LARSON, J. C, and LOGAN, J. A. (1990) Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data, **J. Geophys. Res.** 95, 3599-3617.

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

JONES, C.; HOREL, J. D.A. A circulação da Alta da Bolívia e a atividade convectiva sobre a América do Sul. **Rev. Bras. Meteor.**, v. 5, n. 1, p. 379-387, 1990.

JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A freqüência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11. Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. CD-ROM.

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.

LONDON, J. Observed distribution of atmospheric ozone and its variations. In: Whitten, R. C.; Prasad, S. S. ed. **Ozone in the free atmosphere**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1985. cap. 1, p. 11 – 80.

MARQUES, R.F.C.; RAO, V.B. Bloqueio atmosférico no Hemisfério Sul durante o período de 1980 a 1993. **Climanálise Especial**, Cap. 8, INPE, 1996.

OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção na Amazônia**. 1986. 115f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 1986.

PINHEIRO, D. K.; LEME, N. P.; PERES, L. V. & KALL, E. Influence of the Antarctic Ozone Hole over the South of Brazil in 2008 and 2009. National Institute of Science and Technology Antarctic Environmental Research – **Annual Activity Report 2010**. Rio de Janeiro: INCT-APA, p. 33-37. 2011.

PINHEIRO, D. K. **Estudo do comportamento do dióxido de nitrogênio atmosférico com base nos dados do Espectrofotômetro Brewer**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003 (Tese de Doutorado).

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

ROSCOE, H. K. The Brewer–Dobson circulation in the stratosphere and mesosphere – Is there a trend? **Advances in Space Research**. v. 38, p. 2446-2451, 2006.

SALBY, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. San Diego: Academic Press, 1996. 627p.

SARAIVA, J. M. B. **Previsão de tempo na Região Sul: efeitos locais e influência da liberação de calor latente**. 1996. Tese (Doutorado) - IAG/USP, São Paulo, 1996.

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.

STOLARSKI, R. S., and RUNDEL, R. D., Fluorine chemistry in the stratosphere **Geophys. Res. Lett.**, 2, 443-446, 1975.

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.

World Meteorological Organization (WMO). Scientific Assessment of Ozone
Depletion: 1994. Global Ozone Research and Monitoring Project - **Report No. 37**,
Geneva, 1995.

APÊNDICES

Apêndice A – Código Metar

O código Metar é uma informação de observação meteorológica de superfície e de rotina para fins aeronáuticos, realizada por uma EMS (Estação Meteorológica de Superfície), segundo os padrões internacionais da Organização Meteorológica Mundial.

O Metar é dividido em diversos grupos, cada um servindo para a codificação de um determinado parâmetro meteorológico. Veja cada grupo e a sua interpretação a partir do exemplo abaixo:

METAR SBGR 061500Z 20010G25KT 1000 R09/1300U TSRA SCT010 BKN015 FEW040CB OVC100 20/16 Q1015 WS RWY 27=

METAR: Nome Internacional do Código.

SBGR(Guarulhos): Indicador de Localidade (ICAO).

061500Z: dia e hora da observação seguida da letra Z (ZULU).

20010G25KT: vento à superfície.

Direção: 200º, de onde vem em relação ao norte verdadeiro, de 10 em 10 graus.

Velocidade: 10, codificada em nós (KT).

Rajada (G=25): 10KT ou mais acima da velocidade média.

Calmo: inferior a 1KT e codificado 00000KT.

Variável: codifica-se VRB.

1000: Visibilidade Horizontal predominante em 4 algarismos (em metros).

Visibilidade de 10KM ou mais, codifica-se 9999. Codifica-se, também, a visibilidade mínima se

esta for: a) inferior a 1.500 metros ou b) inferior a 50% da predominante e inferior a 5000 metros, com o respectivo setor. Exemplo: 6000 e 2800NE.

R09/1300U: Alcance Visual da Pista.

Este grupo é codificado da seguinte maneira: letra R, número da pista, barra(/), valor da visibilidade (em metros). Quando houver mais de uma pista, pode ser usadas as letras L, C e R, após o número da pista, que indicam, respectivamente, a pista da esquerda, central e direita. Quando houver variação na visibilidade, podem ser

usadas as letras U e D, após o valor da visibilidade, que indicam, respectivamente, aumentando e diminuindo. Quando não houver variação, pode ser usada a letra N. Assim, R09/1300U, significa que a visibilidade na pista de número 09 é de 1300 metros, com tendência a aumentar.

TSRA:Tempo Presente, conforme tabela abaixo.Ou seja, TSRA= trovoada com chuva.

TABELA 4678								
w'w' - TEMPO SIGNIFICATIVO PRESENTE E PREVISTO								
QUALIFICADOR				FENÔMENO DE TEMPO				
INTENSIDADE ou PROXIMIDADE (1)	DESCRITOR (2)	PRECIPITAÇÃO (3)	OBSCURECEDOR (4)	OUTROS (5)				
-	Leve	MI Baixo	DZ Chuvisco	BR Névoa úmida	PO Poeira/areia em redemoinhos			
	Moderada (sem sinal)	BC Banco	RA Chuva	FG Nevoeiro	SQ Tempestade			
+	Forte ("bem desenvolvido" para redemoinhos de poeira/areia e nuvens funil)	PR Parcial (cobrindo parte do aeródromo)	SN Neve	FU Fumaça	FC Nuvem(ns) funil (tornado ou tromba d'água)			
VC	Nas Vizinhanças	DR Flutuante	SG Grãos de neve	VA Cinzas vulcânicas	SS Tempestade de areia			
		BL Soprada	IC Cristais de gelo	DU Poeira extensa	DS Tempestade de poeira			
		SH Pancada(s)	PL Pelotas de gelo	SA Areia				
		TS Trovoada ou Raios e Relâmpagos	GR Granizo	HZ Névoa seca				
		FZ Congelante	GS Granizo pequeno e/ou grãos de neve					

Tabela 3.1 - Tempo significativo presente e previsto

SCT010 BKN015 FEW040CB OVC100

SCT010: 3 a 4/8 de nuvens baixas a 1000 pés (~300 metros).

BKN015: 5 a 7/8 de nuvens baixas a 1500 pés (~450 metros).

FEW040CB: 1 a 2/8 de nuvem de desenvolvimento vertical (cumulonimbo) a 4000 pés (~1200 metros).

OVC100: 8/8 de nuvem média a 10.000 pés (~3000 metros).

Quantidade:

FEW: poucas nuvens (1 a 2/8)

SCT: esparso ou parcialmente nublado (3 a 4/8)

BKN: nublado (5 a 7/8)

OVC: encoberto (8/8)

Altura: codificada em 3 algarismos, em unidades de 30 metros ou centenas de pés.

Tipo: somente CB (Cumulonimbo) e TCU (Grande Cúmulo).

VV: visibilidade vertical

NSC: nuvens não significativas

CAVOK: significa "Ceiling and Visibility OK". É utilizado no Metar em substituição à visibilidade, RVR, Tempo Presente e nebulosidade, desde que ocorram, simultaneamente, as seguintes condições: Visibilidade for de 10Km ou mais, nenhum CB e nenhuma nuvem abaixo de 1500 metros, sem trovoadas e sem precipitação.

SKC: Céu Claro (ausência de nuvens).

20/16: Temperatura do Ar e do Ponto de Orvalho.

Q1015: Pressão ao Nível do Mar para Ajuste do Altímetro (QNH). É informado na unidade HECTOPASCAL(hPa) em valores inteiros, com quatro algarismos e precedidos da letra Q.

WS RWY 27: Cortante do Vento na Pista 27.

Metares do dia 01 e 02 de Abril de 2008 de Santa Maria - RS (SBSM):

SBSM 010900Z 12002KT 9999 FEW010 BKN019 BKN200 20/19 Q1010

SBSM 011000Z 25002KT 9999 SCT025 BKN200 20/19 Q1011

SBSM 011100Z 35002KT 9999 SCT014 BKN025 BKN200 21/19 Q1012

SBSM 011200Z 02005KT 9999 FEW013 BKN026 BKN250 22/19 Q1012

SBSM 011300Z 32004KT 9999 FEW010 SCT030 24/20 Q1012

SBSM 011400Z 31007KT 9999 FEW013 BKN030 25/20 Q1011

SBSM 011500Z 34009KT 9999 FEW014 SCT032 FEW040TCU 27/20 Q1011

SBSM 011600Z 33009KT 9999 BKN035 BKN250 27/19 Q1010

SPECI SBSM 011650Z 23006KT 9999 4000W SHRA BKN035 FEW040TCU
BKN250 24/21 Q1010

SBSM 011700Z 29005KT 4000 R11/1700 R29/1200 -RA BKN035 FEW040TCU
BKN250 23/21 Q1010 RESHRA

SBSM 011800Z 03004KT 9999 6000NW -RA FEW015 SCT035 BKN250 23/21
Q1009

SBSM 011900Z 05004KT 9999 SCT035 BKN250 24/21 Q1009
SBSM 012000Z 05005KT 9999 SCT035 BKN250 24/19 Q1009
SBSM 012100Z 05005KT 9999 FEW040 BKN250 23/20 Q1009
SBSM 020900Z 28002KT CAVOK 16/16 Q1011
SBSM 021000Z 35002KT CAVOK 15/15 Q1012
SBSM 021100Z 00000KT CAVOK 18/17 Q1013
SBSM 021200Z 25004KT 9999 FEW020 20/17 Q1013
SBSM 021300Z 25004KT 9999 BKN015 21/18 Q1013
SBSM 021400Z 25004KT 9999 BKN015 21/18 Q1013
SBSM 021500Z 29006KT 9999 BKN017 22/18 Q1013
SBSM 021600Z 25006KT 9999 BKN020 22/17 Q1013
SBSM 021700Z 28006KT 9999 BKN025 23/17 Q1012
SBSM 021800Z 24005KT 9999 BKN025 24/16 Q1011
SBSM 021900Z 26007KT 9999 SCT025 25/15 Q1011
SBSM 022000Z 27004KT 9999 FEW025 FEW030TCU 25/14 Q1011
SBSM 022100Z 25003KT 9999 FEW025 FEW030TCU 24/14 Q1011

Metares do dia 09 de Junho de 2008 de Santa Maria - RS (SBSM):

SBSM 090900Z 03002KT 4500 RA SCT003 BKN025 OVC080 16/16 Q1010
SBSM 091000Z 00000KT 4500 -RA BR FEW001 BKN018 OVC080 16/16 Q1010
SBSM 091100Z 36003KT 9999 -RA FEW014 SCT050 OVC090 16/16 Q1011
SBSM 091200Z 02006KT 9999 -RA FEW014 SCT050 OVC090 16/16 Q1011
SBSM 091300Z 04008KT 9000 -RA FEW009 OVC090 17/16 Q1010
SBSM 091400Z 04006KT 9999 FEW030 OVC100 18/14 Q1010
SBSM 091500Z 23003KT 9999 FEW020 SCT035 OVC100 17/15 Q1010
SBSM 091600Z 29007KT 8000 -RA SCT005 BKN009 OVC080 17/16 Q1011
SBSM 091700Z 29010KT 9999 -RA SCT004 OVC007 16/15 Q1010
SBSM 091800Z 28012KT 9999 -RA SCT006 OVC012 16/15 Q1010
SBSM 091900Z 31008KT 9999 SCT010 BKN013 OVC080 16/15 Q1010
SBSM 092000Z 28018G28KT 9999 -RA FEW010 BKN012 OVC080 15/14 Q1010
SBSM 092040Z 28018G30KT 3500 -RA FEW005 BKN009 OVC070 14/13 Q1011
SBSM 092100Z 28015G25KT 5000 -RA FEW005 OVC010 14/13 Q1011

Metares do dia 30 de Julho de 2008 de Santa Maria - RS (SBSM):

SBSM 300900Z 30002KT 4000 -DZ BR OVC005 16/16 Q1013
 SBSM 301000Z 30004KT 4000 -DZ BR OVC005 16/16 Q1013
 SBSM 301100Z 00000KT 5000 -DZ BR OVC004 16/16 Q1013
 SBSM 301200Z 27003KT 7000 -DZ FEW003 BKN007 15/15 Q1014
 SBSM 301300Z 26005KT 9999 OVC005 16/15 Q1014
 SBSM 301400Z 28006KT 9999 OVC005 15/14 Q1014
 SBSM 301500Z 25004KT 9999 OVC010 16/14 Q1014
 SBSM 301600Z 28002KT 9999 -DZ BKN007 OVC010 16/14 Q1014
 SBSM 301700Z 29002KT 9999 BKN009 BKN013 16/14 Q1013
 SBSM 301800Z 28003KT 9999 BKN011 OVC013 16/14 Q1013
 SBSM 301900Z 29004KT 9999 BKN011 OVC017 16/14 Q1013
 SBSM 302000Z 28003KT 9999 SCT012 BKN022 16/14 Q1013
 SBSM 302100Z 32003KT 9999 FEW013 BKN022 15/14 Q1013

Metares do dia 22 de Outubro de 2008 de Santa Maria - RS (SBSM):

SBSM 220800Z 11002KT 2500 -TSRA SCT009 BKN017 FEW040CB OVC080 18/18
 Q1013
 SBSM 220900Z 05002KT 2500 TSRA SCT012 BKN025 FEW040CB OVC080 18/18
 Q1015

 SBSM 221000Z 11002KT 4000 -TSRA FEW002 BKN030 FEW040CB OVC080
 18/18 Q1015
 SBSM 221100Z 08001KT 8000 -RA BKN025 FEW040TCU BKN080 OVC200
 18/18 Q1015 RETS
 SBSM 221200Z 03003KT 9999 -RA FEW002 SCT025 FEW035TCU BKN070 19/18
 Q1016
 SBSM 221300Z 01003KT 8000 -RA FEW030 FEW035TCU BKN070 OVC200 19/19
 Q1017

SBSM 221400Z 10002KT 9999 -RA SCT003 BKN080 0VC200 19/19 Q1016
SBSM 221500Z 07005KT 7000 -RA SCT004 SCT010 0VC090 19/19 Q1015
SBSM 221600Z 16004KT 9999 -RA SCT010 SCT070 0VC120 20/19 Q1014
SBSM 221700Z 07005KT 9999 SCT010 BKN080 0VC150 21/18 Q1013
SBSM 221800Z 07004KT 9999 FEW010 BKN080 0VC150 22/17 Q1013
SBSM 221900Z 04002KT 9999 FEW015 BKN080 BKN200 22/18 Q1013
SBSM 222000Z 06004KT 9999 FEW020 BKN090 BKN200 22/17 Q1013
SBSM 222100Z 00000KT 9999 FEW017 SCT040 BKN080 21/19 Q1013
SBSM 222200Z 14002KT 9999 SCT019 BKN030 BKN080 21/19 Q1014
SBSM 222300Z 15008KT 9999 FEW007 BKN020 BKN070 20/19 Q1014