

# UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

# ANÁLISE DA TEMPERATURA DA REGIÃO PRÓXIMA À MESOPAUSA EQUATORIAL DURANTE EVENTO DE AQUECIMENTO ABRUPTO DA ESTRATOSFERA POLAR

MÁRCIA FIGUEIREDO LEITE

CAMPINA GRANDE MAIO - 2012

# MÁRCIA FIGUEIREDO LEITE

# ANÁLISE DA TEMPERATURA DA REGIÃO PRÓXIMA À MESOPAUSA EQUATORIAL DURANTE EVENTO DE AQUECIMENTO ABRUPTO DA ESTRATOSFERA POLAR

Dissertação apresentada ao Mestrado de Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

ORIENTADOR: Dr. Lourivaldo Mota Lima

CAMPINA GRANDE MAIO - 2012 É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na sua forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação

#### FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL-UEPB

L533a	Leite, Márcia Figueiredo. Análise da temperatura da região próxima à mesopausa equatorial durante evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar [manuscrito] / Márcia Figueiredo Leite. – 2012. 66 f. : il.	
	Digitado Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, 2012.	
	"Orientação: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Física"	
	1. Mesopausa. 2. Planeta Terra. 3. Atmosfera. 4. Temperatura da estratosfera. I. Título.	
	21. ed. CDD 551.1	

# MÁRCIA FIGUEIREDO LEITE

# ANÁLISE DA TEMPERATURA DA REGIÃO PRÓXIMA À MESOPAUSA EQUATORIAL DURANTE EVENTO DE AQUECIMENTO ABRUPTO DA ESTRATOSFERA POLAR

# Aprovado em 25/05/2012

**BANCA EXAMINADORA** 

Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima (Orientador - Universidade Estadual da Paraíba -UEPB )

017

Prof. Dr. José Fideles Filho (Examinador Interno – Universidade Estadual da Paraíba – UEPB)

Hum Nens ch Fieles

Prof. Dr. Heron Neves de Freitas (Examinador Externo – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG)

CAMPINA GRANDE-PB 2012

Há um ditado chinês que diz:

"Se dois homens vêm caminhando por uma estrada, cada um carregando um pão, e, ao se encontrarem, eles trocam os pães, cada um vai continuar seu caminho com um pão... Porém, se dois homens vêm caminhando por uma estrada, cada um carregando uma idéia, e, ao se encontrarem, eles trocam as idéias, cada homem vai seguir seu caminho com duas."

A Deus, pelo dom da vida. A Paulo e Luíza, com quem amo compartilhar a vida. Ao orientador prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, por acreditar que eu seria capaz, dedico.

# AGRADECIMENTOS

Orientar é guiar, conduzir, nortear... Acertar as vergas de forma que o vento impulsione bem as velas... Ao orientador, professor e mestre Lourivaldo, pela idéia original deste trabalho, pelos ensinamentos, pelas aulas ministradas, pela contribuição e correção da dissertação, minha profunda gratidão e admiração.

Aos que compõem o grupo de pesquisa Física da Atmosfera, pela convivência saudável e incentivadora, obrigada. Em especial à Leide e Mará, pelos "dedos de prosas" e pelas "conversas ao pé do ouvido", agradeço.

Ao coordenador do MCTA Wilton Silva Lopes, por sua disposição e empenho de sempre querer o melhor para o MCTA, obrigada.

À Isabel Cristina, secretária do MCTA, prestativa e atenciosa, sempre disposta a resolver problemas e escutar desabafos, obrigada.

Um carinho especial à Eliana Maia, pela característica peculiar de sempre impulsionar rumo à vitória àqueles que delas se aproximam, obrigada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES, pelo apoio financeiro através do programa Demanda Social, agradeço.

Agradecimento e reconhecimento aos professores José Fideles e Morgana Lígia por participação na banca de Qualificação do Mestrado.

À Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, aos seus professores e funcionários pelos serviços prestados, obrigada.

Aos professores Beatriz Ceballos, Célia Regina, Fernando Fernandes, José Fideles Filho e Lourivaldo Mota, pelas aulas ministradas e pelas palavras de incentivos, meus sinceros agradecimentos, em especial a Gustavo Henrique Esteves, primeiro professor no mestrado, por me fazer acreditar que tenho potencial, obrigada.

Agradeço aos meus colegas e amigos das turmas de mestrado do MCTA e Ecologia 2010.1, pelo significado dos nossos encontros, debates, estudos, anseios e descobertas e por fazerem dessa época um tempo feliz, recebam meu carinho e consideração.

Finalizando, agradeço a **Deus**, que me aproximou de todas estas maravilhosas pessoas, que tornaram possível o fim dessa jornada. Obrigada SENHOR!

### **RESUMO**

Durante o inverno do hemisfério norte a temperatura da estratosfera polar aumenta de forma brusca. Em algumas ocasiões, a estratosfera polar experimenta aquecimentos mais intensos, os quais são acompanhados de uma inversão na circulação zonal média. Estes eventos são classificados como aquecimentos abruptos estratosféricos (Sudden Stratospheric Warming). Alguns estudos evidenciaram conexão entre os eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera polar do hemisfério norte e o esfriamento da região mesosférica, assim como entre os eventos e perturbações presentes na mesosfera e na ionosfera em médias e baixas latitudes, incluindo a região equatorial. O objetivo deste trabalho foi investigar possíveis efeitos de evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar no comportamento da temperatura da região próxima à mesopausa equatorial. Neste sentido, dados de temperaturas estimados a partir de medidas obtidas com radar meteórico em São João do Cariri-PB (7,4°S, 36,5°O) foram analisados juntamente com dados da estratosfera polar, fornecidos pelo National Centre for Environmental Prediction (NCEP). Analisados os resultados, verificou-se que durante evento intenso de aquecimento abrupto da estratosfera polar, as temperaturas da mesopausa sobre São João do Cariri são mais baixas do que durante os eventos de aquecimento estratosféricos considerados fracos. Também foram verificadas anticorrelações entre a temperatura próxima a região da mesopausa equatorial e a média zonal da temperatura da estratosfera polar durante eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera.

**PALAVRAS-CHAVE:** Temperatura da estratosfera polar, aquecimento abrupto estratosférico, mesosfera equatorial, radar meteórico.

# ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE MESOPAUSE TEMPERATURE IN THE EQUATORIAL REGION DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING EVENTS

During the northern hemisphere winter the stratospheric polar temperature increases abruptly. On some occasions, the stratospheric polar region experience more intense heating, which are accompanied by a reversal in the zonal mean circulation. These events are classified as sudden stratospheric warming. Some studies showed intense connection between the events of abrupt warming of the Northern Hemisphere polar stratosphere and mesospheric cooling of the region, as well as between these events and disturbances in the mesosphere and the ionosphere at middle and low latitudes, including the equatorial region. The objective of this study was to investigate possible effects of sudden warming event in stratospheric polar temperature behavior of the equatorial region near the menopause. In this sense, temperature data estimated from meteor radar measurements obtained at São João do Cariri-PB (7.4°S, 36.5°W) were analyzed together with data from the polar stratosphere, provided by National Centre for Environmental Prediction (NCEP). Analyzing the results it was found that during the sudden stratospheric warming major the mesopause temperatures on the São João do Cariri are lower than during the stratospheric warming events considered minor. Also was verified an anti-correlation between the equatorial mean mesopause temperature and the temperature in the polar cap (poleward of 60°N) at 10 hPa, during Sudden Stratospheric Warming Major events.

**KEYWORDS:** Temperature of the stratosphere polar, sudden stratospheric warming, equatorial mesosphere, meteor radar.

# **SUMÁRIO**

### LISTA DE FIGURAS LISTS DE TABELAS LISTA DE SÍMBOLOS 1 INTRODUÇÃO 16 1.1 Objetivo..... 18 1.2 Justificativa. 19 1.2 Contextualização..... 20 1.3 Visão Geral da Dissertação..... 21 2 CONHECIMENTOS BÁSICOS 22 2.1 A Atmosfera Terrestre..... 22 25 2.2 Estratosfera Polar..... 2.3 Efeitos na Mesosfera Equatorial..... 28 **3 DADOS E METODOLOGIA** 31 3.1 Descrição do Radar Meteórico..... 32 3.1.1 Características dos Meteoros..... 36 3.2 Determinação da Temperatura a partir de medidas por radar meteórico. 37 **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO** 41 4.1 Análise das Temperaturas da Região Próxima á Mesopausa Equatorial. 41 4.2 Estratosfera Polar X Mesosfera Equatorial..... 43 4.3 Discussão..... 58 **5 CONCLUSÕES** 61 62

# **REFEREÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

# LISTA DE SIGLAS

INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MLT	-	Mesosphere and Lower Thermosphere
NCEP	-	National Centre for Environmental Prediction
SSW	-	Sudden Stratospheric Warming

# LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2.1 - Perfil vertical da temperatura e da densidade atmosférica para a região equatorial. Os valores foram tomados do modelo MSIS-E-90 (Mass Spectromer-Incoherent Scatter).	24
FIGURA 3.1 - Configuração das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET	33
<b>FIGURA 3.2</b> - Fluxo típico de meteoros produzidos pelo radar de Cachoeira Paulista. Figura a - distribuição vertical de ocorrências de meteoros não ambíguos, registrados em 14 de janeiro de 2002. Figura b – taxa de ecos meteóricos amostrados como uma função da hora do dia, referentes aos dias 13 e 14 de janeiro de 2002	35
<b>FIGURA 4.1</b> - Temperaturas da altitude de 90 km obtidas a partir de Medidas por radar meteórico em São João do Cariri entre 01 de dezembro e 31 de março de 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009	43
<b>FIGURA 4.2</b> - Gráfico a – Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB; Gráfico b – média zonal da temperatura polar – NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa); Gráfico c – média zonal do vento zonal em 60 °N em 10 hPa – NCEP); Gráfico d – amplitude da sonda S=1 da altura geopotencial em	

60°N em 10 hPa - NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de

2004 e 15 de março de 2005.....

45

**FIGURA 4.3** - Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2005.....

**FIGURA 4.4** - Gráfico a – Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri –PB; Gráfico b – média zonal da temperatura polar – NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa); Gráfico c – média zonal do vento zonal em 60 ° N em 10hPa (NCEP); Gráfico d – amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N em 10 hPa (NCEP). Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2005 e 15 de março de 2006.....

48

49

**Figura 4.5** - Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2006.....

**FIGURA 4.6** - Gráfico a – Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB; Gráfico b – média zonal da temperatura polar (NCEP) – na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa); Gráfico c – média zonal do vento zonal em 60°N em 10 hPa (NCEP). Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2006 e 15 de março de 2007.....

51

52

**FIGURA 4.7** - Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico, realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2007..... 46

**FIGURA 4.8** - Gráfico a - temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB; Gráfico b - média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa); Gráfico c - média zonal do vento zonal em 60°N em 10 hPa - NCEP; Gráfico d - amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N em 10 hPa - NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro e 15 de março de 2008....

**FIGURA 4.9** - Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro (esquerda) e entre 16 e 18 de fevereiro (direita) de 2008.....

**FIGURA 4.10** - Gráfico a - temperaturas estimadas a partir das medidas de redar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB; Gráfico b - média zonal da temperatura polar - NCEP ( na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa); Gráfico c - média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa NCEP; Gráfico d - amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60° N e 10 hPa. Os dados obtidos entre 15 de dezembro de 2008 e 15 de março de 2009....

**FIGURA 4.11** - Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 23 de janeiro a 20 de fevereiro de 2009.....

57

58

55

54

# LISTA DE TABELAS

# Página

3.1 Especificações do radar meteórico do INPE	34
---	----

# LISTA DE SÍMBOLOS

- A Amplitude do sinal
- $\Delta P_R$  Potência percebida pelo receptor proveniente do espalhamento de cada elétron
- P<sub>T</sub> Potência transmitida
- G<sub>T</sub> Ganho da antena transmissora
- G<sub>R</sub> Ganho da antena receptora
- $\lambda$  Comprimento de onda
- $\sigma_e$  Seção transversal de espalhamento de um elétron livre
- R Alcance do eco
- $\mu_0$  Permeabilidade do ar
- e Carga do elétron
- *m* Massa do elétron
- P<sub>R</sub> Potência do eco quase-instantânea recebida de todos os elétrons
- P Pressão do ambiente
- C<sup>2</sup> Integral de Fresnel
- S<sup>2</sup> Integral de Fresnel
- R<sub>0</sub> Alcance mínimo
- D Coeficiente de difusão ambipolar
- t Tempo
- $\tau$  Constante de decaimento
- ρ Densidade
- T Temperatura do ambiente atmosférico

#### **CAPITULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Em meados da década de 1980, o mundo começava a demonstrar preocupação com as chamadas "questões ambientais". Era o despertar para o que hoje muitos chamam de crise ambiental. A busca por soluções encontra sua direção no conceito de desenvolvimento sustentável, enfatizando a consciência ambiental em uma sociedade dita globalizada.

Assim descreve Camargo (2003):

Se um dos mais importantes avanços do século XX foi o despertar de uma consciência ambiental e da necessidade de encontrar um equilíbrio entre as ações humanas e a preservação do meio ambiente onde vivemos, os desafios para o século XXI relacionados à busca de soluções para nossos graves e globais problemas socioambientais serão, contudo, muito mais complexos e profundos, uma vez que já há sinais evidentes de uma crise de insustentabilidade ecológica e social que se arma em todo o planeta. (p. 14).

A poluição do ar, mares e rios, o efeito estufa, a diminuição da camada de ozônio, o comprometimento dos recursos hídricos, a irregularidade das precipitações e a hostilidade do clima são alguns dos problemas ambientais decorrentes do aumento da população mundial e hoje fazem parte das discussões em todo o mundo. Nos dias atuais, o desenvolvimento econômico e social não pode ser considerado sem que a preocupação ambiental esteja presente em todo o processo, o que requer planejamento para um melhor aproveitamento dos recursos naturais, assim como indicação de medidas preventivas de degradação ambiental.

No contexto acima descrito, questões que envolvem o clima tem sido alvo de diversas pesquisas científicas, devido sua importância no desenvolvimento e manutenção da vida na Terra. O homem e o clima se afetam mutuamente, pois assim como o clima influencia o ser humano de diversas maneiras, este pode influenciar aquele por meio de suas mais diversas atividades. A variabilidade do clima e suas mudanças a longo prazo têm influência na disponibilidade de

recursos naturais e nas sociedades humanas, e que, se bem compreendido e adequadamente gerido, poderá contribuir para o desenvolvimento sustentável. Nessa perspectiva, o clima tornase parte fundamental na compreensão do espaço físico que nos rodeia, pois ele é um elemento dos mais relevantes na produção da qualidade ambiental urbana. Desse modo, seu estudo, além de contribuir para o desenvolvimento do campo da climatologia, pode ter desdobramentos práticos, ajudando na busca de soluções para os problemas ambientais em toda a Terra.

A Terra tem seu clima regulado por diversos elementos e processos que envolvem variação do fluxo solar, a atmosfera e a superfície terrestre. O clima evolui ao longo do tempo sob a influência de fatores como sua própria dinâmica interna, as forçantes naturais como erupções vulcânicas e variações solares, bem como as forçantes antrópicas, devido às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento. No sistema climático, todos esses elementos influenciam uns aos outros. Ao provocar desequilíbrio em um deles, os demais serão alterados.

Trocas de energia representam um papel significativo no controle do clima em todo o mundo. Compreender como funcionam as interações Terra-Sol-Atmosfera ajuda-nos a entender como funciona o planeta Terra, permitindo-nos acompanhar as alterações sofridas pelo mesmo, buscando entender como esse ecossistema rico, porém frágil, é responsável e influencia as demais condições que tornam possível a vida na Terra.

Ocasionalmente, durante algumas estações de inverno do hemisfério norte, a configuração da circulação da estratosfera é rompida e é acompanhada por um aquecimento abrupto da estratosfera (SSW - Sudden Stratospheric Warming), em que a temperatura polar aumenta rapidamente num período curto de dias, sendo acompanhada de uma desaceleração do vento médio zonal, o qual passa a escoar para a direção oeste (Andrews et al., 1987). Resultados de estudos recentes (Shepherd et al., 2007; Vineeth et al., 2009; Sathishkumar et al., 2009; Chau et al., 2010; Pedatella e Forbes, 2010) demonstram o acoplamento entre os eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera em altas latitudes do hemisfério norte e perturbações presentes na mesosfera e na ionosfera em médias e baixas latitudes, incluindo a região equatorial.

#### 1.1 Objetivo

Objetiva este trabalho o estudo da dinâmica da alta mesosfera e baixa termosfera terrestre, analisando o comportamento da temperatura da região próxima à mesopausa equatorial durante evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar. O estudo tem como base os dados de temperatura da mesopausa estimados a partir de medidas obtidas através de radar meteórico instalado em São João do Cariri – PB (7,4°S, 36,5°O), juntamente com parâmetros da estratosfera polar fornecidos pelo National Centre for Environmental Prediction (NCEP). Como resultado deste trabalho, espera-se contribuir para o avanço dos estudos do tema abordado, bem como o aprofundamento e melhoria dos modelos atmosféricos já existentes.

#### 1.2 Justificativa

A presente dissertação tem como meta despertar, ampliar e focar para uma reflexão sobre a importância das variações climáticas ocorridas em nosso planeta. Discussões envolvendo as questões climáticas têm sido alvo de diversas pesquisas científicas, dada à importância do tema no desenvolvimento e manutenção da vida, na adaptação das espécies às mudanças pelas quais o planeta Terra vem passando ao longo das últimas décadas. Essas variações climáticas têm consequências vitais para a agricultura, bem como para estoques de água em represas, lagos e rios. Dentre essas mudanças podemos destacar o aumento da temperatura à superfície, a variação na quantidade dos principais constituintes da atmosfera terrestre, o aumento das catástrofes naturais, a diminuição da quantidade de alimentos, bem como a extinção de algumas espécies.

Quer seja natural ou antropogênica, as causas das mudanças climáticas necessitam de investigação. Neste sentido, o estudo da atmosfera terrestre torna-se vital, visto que a mesma é composta por camadas, e as mesmas interagem entre si. Necessário se faz conhecer o clima na atmosfera superior, pobre, no que diz respeito a pesquisas científicas essa região da atmosfera, quando comparada com a região baixa atmosfera, que é bastante conhecida devido a uma fonte de dados considerável, usadas em pesquisas pelos meteorologistas.

Para acompanhamento das mudanças do ambiente atmosférico e pela compreensão de como acontece a interação entre as camadas atmosféricas, o estudo do tema aqui abordado mostra-se importante pelo fato de servir para diagnosticar a forma como a atmosfera reage à ação de elementos dinâmicos e como isto pode interferir na estrutura da alta mesosfera e baixa termosfera - (região da MLT - do inglês Mesosphere and Lower Thermosphere, compreendida entre 80 e 100 km de altura), justificado pelos processos dinâmicos decorrentes dos movimentos ondulatórios e de transferência de momentum, responsáveis pelo acoplamento entre as camadas atmosféricas nas altitudes estudadas.

### 1.2.1 Contextualização



Qualidade de Sistemas Ambientais: Essa linha de pesquisa objetiva a análise dos processos aquáticos e atmosféricos do semi-árido brasileiro, propondo a geração de conhecimento para o entendimento do efeito da ação humana na dinâmica da região, proporcionando a formação e qualificação de educadores, pesquisadores e profissionais que atuem no diagnóstico, na prevenção e na solução de problemas ambientais, buscando a melhoria da qualidade sócio-ambiental, principalmente na região Nordeste do Brasil.

# 1.3 – VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação visa contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica da região próxima à mesopausa equatorial em baixas latitudes do hemisfério sul durante eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar, a partir de dados de temperatura estimados por medidas obtidas com radar meteórico instalado no município de São João do Cariri durante os períodos de verão austral para os anos de 2004 a 2009.

Além da introdução, essa dissertação possui mais quatro capítulos, estruturados como indicado abaixo:

- O capítulo 2 intitulado Conhecimentos Básicos, aborda as características da atmosfera terrestre, o comportamento vertical do gradiente de temperatura convencionalmente dividida em camadas, a saber: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. Além disso, são abordados aspectos teóricos e observacionais sobre a estratosfera polar e a mesosfera equatorial.
- O capítulo 3 aborda o tema Dados e Metodologia, partindo de uma detalhada descrição do radar meteórico, seu funcionamento, características e especificações. As características dos meteoros são apresentadas, bem como uma descrição de como determinar a temperatura a partir do radar meteórico.
- O capítulo 4 descreve e analisa as temperaturas da região próxima à mesopausa equatorial e da estratosfera polar, e a discussão dos resultados.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais dessa dissertação.

## **CAPÍTULO 2**

## **CONHECIMENTOS BÁSICOS**

#### 2.1 A Atmosfera Terrestre

Atmosfera é a camada composta por radiação, gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra e se estende por centenas de quilômetros em direção ao espaço. Limita-se inferiormente com as superfícies da crosta terrestre e com os oceanos. É impossível reconhecer seu limite superior, ou seja, estabelecer a altura em que termina o invólucro de ar que envolve a Terra. Gases que já tem mínima concentração a somente algumas dezenas de quilômetros, tornam-se cada vez mais rarefeitos até se dispersarem no espaço. Traços da atmosfera podem ser detectados a mais de 500 km de altitude. É como se vivêssemos no fundo de um oceano de ar, sendo pressionados por ele à razão de 1 kg por cada centímetro quadrado de nossa pele, equivalente a 1700 kg sobre nossa cabeça. É a pressão atmosférica (Brown et al., 2005).

De acordo com o comportamento vertical do gradiente de temperatura, a estrutura da atmosfera terrestre é convencionalmente dividida em camadas, as quais são separadas por regiões de transição referidas como pausas, identificadas na Figura 2.1 obtida do modelo MSIS-E-90 (Mass Spectrometer - Incoherent Scatter). São elas:

Troposfera - é a camada mais próxima da superfície terrestre, estendendo-se até aproximadamente 15 km, onde a temperatura diminui com a altitude a partir da temperatura superficial de 290 K, numa taxa de -7 K/km, atingindo o valor de 220 K (-56 °C). Nesta região a radiação e a convecção são processos importantes para a transferência de energia, isto é, na dissipação do calor. A absorção direta da radiação solar no visível e no infravermelho contribui para o balanço radiativo e influenciam também na determinação da temperatura.

Tropopausa – região compreendida entre a troposfera e a estratosfera, onde ocorre o mínimo de temperatura entre estas regiões. Situa-se a uma altitude de 15 km nos

trópicos, com uma temperatura de 195 K, e de 8 a 10 km nos pólos com uma temperatura de 220 K.

Estratosfera - é a camada que se encontra acima da troposfera, situada entre 15 e 50 km de altitude, onde a temperatura aumenta com a altitude atingindo cerca de 270 K. Nesta região a convecção deixa de ser um mecanismo importante na dissipação de calor, dando lugar ao processo de radiação. A absorção da radiação solar pela molécula do ozônio e pelo vapor d' água, na região do ultravioleta, dão origem ao máximo de temperatura de 50 km de altitude.

Estratopausa - região entre a alta estratosfera e a baixa mesosfera. Situa-se em torno de 50 km de altitude com uma temperatura em torno de 270 K.

Mesosfera - esta camada situa-se acima da estratosfera, estendendo-se de 50 a 90 km de altitude. A temperatura diminui com a altitude atingindo 190 K, sendo esta a região mais fria de toda a atmosfera. A radiação é ainda um importante mecanismo na remoção de calor nestas altitudes.

Mesopausa - é o limite entre a mesosfera e termosfera e situa-se em torno de 85 km de altitude, apresentando uma temperatura em torno de 190 K, considerada a mais baixa temperatura atmosférica.

Termosfera - esta camada inicia em torno de 90 km de altitude e estende-se até aproximadamente 300 km. A temperatura aumenta com a altitude até atingir um valor máximo de aproximadamente 3000 K, chamado de temperatura exosférica. O principal mecanismo para a dissipação de energia é a condução, sendo mínima a convecção.



FIGURA 2.1 - Perfil vertical da temperatura e da densidade atmosférica para a região equatorial. Os valores foram tomados do modelo MSIS-E-90 (Mass Spectrometer - Incoherent Scatter)

Através da ação da gravidade, a atmosfera é mantida em torno da Terra, proporcionando a existência de vida em nosso planeta ao desempenhar uma função protetora e constituir-se num meio com o qual são estabelecidas várias interações. Embora a superfície terrestre esteja em contato direto com a camada troposférica, a busca de um entendimento dos mecanismos associados às mudanças globais, devido ao impacto de atividades humanas e suas conseqüências, proporcionou o interesse crescente pela compreensão dos processos dinâmicos e químicos da média atmosfera, em particular a região próxima à mesopausa, bem como pelos fatores envolvidos na variabilidade de seus parâmetros, uma vez que esta região é bastante sensível às mudanças e desempenha um importante papel no balanço de energia da atmosfera.

#### 2.2 Estratosfera Polar

Uma característica marcante da circulação estratosférica é a formação e o enfraquecimento sazonal de um intenso vórtice ciclônico sobre o pólo de inverno. Os fortes ventos que circundam o pólo e sopram na direção oeste-leste, nas bordas desse vórtice polar, estão em forte contraste com os fracos ventos leste-oeste observados no hemisfério de verão, os quais apresentam pouca variabilidade. Em ambos os hemisférios, durante o outono, devido ao início de esfriamento da região polar, a circulação reverte da direção leste-oeste para a direção oeste-leste, iniciando assim a formação do vórtice polar, o qual alcança intensidade máxima no meio do inverno quando é formada a zona fria de baixa pressão sobre o pólo. O vento zonal na estratosfera é caracterizado por sua alta intensidade e o seu padrão é conhecido como vórtice polar noturno, cuja circulação apresenta grande variabilidade. Na virada do inverno para a primavera, a intensidade do vórtice decresce. A estrutura e dinâmica desses vórtices dominam a circulação da estratosfera polar durante as estações de inverno e da primavera, e determinam a distribuição dos gases traços, em particular o ozônio, e o acoplamento entre a estratosfera e as camadas vizinhas (troposfera e mesosfera).

A grande variabilidade observada na estratosfera polar durante a estação de inverno é principalmente devida ao rompimento da configuração da circulação estratosférica, a qual é acompanhada por um aquecimento abrupto da estratosfera em altas latitudes (abaixo do nível de 10 hPa), em que a temperatura polar aumenta rapidamente num período curto de dias, sendo acompanhada de uma desaceleração do vento médio zonal, o qual escoa na direção oeste-leste, ou até mesmo de uma reversão da circulação do vento médio zonal, que passa a escoar na direção leste-oeste (Andrews et al., 1987). Nos casos mais intensos, as temperaturas podem subir cerca de 50 K, e o escoamento estratosférico circumpolar pode reverter em apenas alguns dias (Limpasuvan et al., 2004).

Dados de temperatura para o nível de 10 mbar (equivalente a 30 km de altitude) obtidos em Berlim através de radiossondagem em 1952 mostraram um súbito aumento da

temperatura. Contudo, de acordo com Schoeberl (1978), estudos sobre o fenômeno, conhecido como aquecimento abrupto da estratosfera, foram iniciados apenas no final dos anos 50 quando um conjunto mais completo de mapas sinóticos foi disponibilizado. Devido ao rápido crescimento das assimetrias nos eventos de aquecimento na estratosfera, alguns autores tentaram mostrar que os eventos de aquecimento poderiam ser resultado de instabilidade baroclínica com amplificação de ondas planetárias (Charney e Stern, 1962; Murray, 1960). Entretanto, estes estudos não foram suficientes para explicar as características observadas. As bruscas mudanças experimentadas na temperatura são tão grandes que também não podem ser explicadas por processos de aquecimento radiativo, nem tampouco são decorrentes de advecção horizontal. O mecanismo básico para explicar a ocorrência do fenômeno foi proposto por Matsuno (1971), o qual usou um modelo simples de interação de ondas com o escoamento médio devido à dissipação de ondas planetárias. De acordo com seu modelo, inspirado nos resultados obtidos por Charney e Drazin (1961), a interação entre as ondas e o escoamento zonal médio causa uma desaceleração e/ou a reversão da circulação zonal que escoa na direção oeste-leste e também induz uma circulação descendente na estratosfera, causando aquecimento adiabático (Pancheva et al., 2008).

Portanto, a dinâmica do fenômeno de aquecimento abrupto estratosférico é discutida em termos da interação de propagação de ondas planetárias na vertical com o vento zonal. Se distúrbios de escala global são gerados na troposfera, eles se propagam para cima na estratosfera, onde as ondas agem para desacelerar o jato polar noturno através da indução de uma circulação meridional. Assim, a distorção e a reversão do vórtice polar ocorrem. Se a perturbação é intensa e persiste, o jato de oeste-leste pode vir a desaparecer e um vento de leste-oeste pode substituí-lo.

Quando o aumento da temperatura média não produz a reversão de vento zonal médio, o SSW é classificado como um aquecimento "minor" (fraco), enquanto que se ocorre um aumento da temperatura média a partir de 60° latitude em direção ao pólo acompanhado por uma reversão de vento, o SSW é classificado como um aquecimento "major" (forte) (Schoeberl, 1978; Andrews et al., 1987).

Devido ao acoplamento vertical entre as camadas atmosféricas, os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera mais intensos (major) afetam a dinâmica da mesosfera, da termosfera (Liu e Roble, 2002), e da ionosfera (Goncharenko e Zang, 2008). O trabalho de Matsuno (1971) já apontava que os eventos de SSW são acompanhados de um esfriamento na mesosfera. De acordo com ele, o esfriamento da mesosfera era explicado como sendo o resultado da interação entre as ondas planetárias e o escoamento médio tendo como base o balanço de massa.

#### 2.3 Efeitos na Mesosfera Equatorial

Os impactos causados na mesosfera e na ionosfera em latitudes médias, baixas e na região equatorial foram observados recentemente através de estudos do acoplamento entre os eventos fortes (major) de aquecimento abrupto da estratosfera em altas latitudes do Hemisfério Norte e perturbações detectadas em parâmetros estimados nas outras regiões e latitudes. Segundo Kodera (2006), a influência do aquecimento no Hemisfério Norte é vista claramente na temperatura estratosférica equatorial. Este efeito também é visto no vento zonal extratropical no verão do Hemisfério Sul. Shepherd et al., (2007) observaram que esfriamento da mesosfera e aquecimento da estratosfera nos trópicos estão correlacionados com eventos de aquecimento da estratosfera em médias e altas latitudes. O acoplamento dinâmico na estratosfera e na mesosfera em altas e baixas latitudes durante eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera do pólo norte

no inverno de 2003-2004 foi estudado por Pancheva et al., (2008). Investigação conduzida por Sridharan et al., (2009) demonstrou a relação entre eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera e a reversão do eletrojato equatorial para o período crepuscular.

Resultados da investigação dos ventos na região MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere) sobre Tirunelveli (8,7°N, 77,8°E), observados durante diferentes eventos de SSW, mostraram que existe uma relação entre a resposta para as variações na dinâmica da região MLT e os eventos de SSW mais intensos (major), sendo esta conexão atribuída à variabilidade de ondas de gravidade (Sathishkumar et al., 2009). Em outro estudo, as variações da temperatura da mesopausa durante eventos de SSW sobre Trivandrum (8,5°N; 76,5°E) indicaram um acoplamento entre as duas regiões, a qual ocorre através da intensificação da atividade de ondas planetárias (Vineeth et al., 2009).

Utilizando um modelo numérico, Holton (1983) estudou os efeitos dos eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar na circulação da região da mesosfera e interpretou que um esfriamento da mesosfera durante os eventos de aquecimento da

estratosfera polar pode ser causado como resultado da absorção de ondas de gravidade interna devido à reversão do vento médio zonal. Estudos baseados em observações também demonstram que os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar durante a estação de inverno são acompanhados por um esfriamento da baixa mesosfera polar (Labitzke, 1972; Siskind e Coy, 2005).

Segundo Kodera (2006), a influência do aquecimento no Hemisfério Norte é vista claramente na temperatura estratosférica equatorial. Este efeito também é visto no vento zonal extratropical no verão do Hemisfério Sul. Os resultados sobre os impactos do aquecimento da estratosfera sobre a atividade convectiva confirmam os resultados de um estudo prévio desse aquecimento no Hemisfério Sul em setembro de 2002, segundo o qual, há um aumento da atividade convectiva da onda de número 1 na estratosfera equatorial, bem como a diminuição da temperatura na baixa estratosfera e alta troposfera. Esta mudança estratosférica induz movimento ascendente na troposfera equatorial, aumentando a atividade convectiva na região equatorial mas diminuindo na região tropical.

Shepherd et al., (2007) usaram dados de temperatura entre 20 e 90 km de altura na faixa de latitude de 5° a 15° N durante 3 estações de inverno em conjunto com dados de ventos obtidos com radares MF (Medium Frequency), como diz o próprio nome, operam em freqüências médias e dados do UK Meteorological Office (UKMO– Escritório Meteorológico do Reino Unido) e observaram que esfriamento da mesosfera e aquecimento da estratosfera nos trópicos estão correlacionados com eventos de aquecimento da estratosfera em médias e altas latitudes. O acoplamento dinâmico na estratosfera e na mesosfera em altas e baixas latitudes durante eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera do pólo norte no inverno de 2003-2004 foi estudado por Pancheva et al., (2008). A investigação mostrou que a relação inversa entre a variação do escoamento zonal médio em altas e baixas latitudes na estratosfera relacionada com os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera obrupto da estratosfera em altas e baixas latitudes na estratosfera relacionada com os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera obrupto da estratosfera em altas e baixas latitudes na estratosfera relacionada com os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera em altas e baixas latitudes na estratosfera relacionada com os eventos de aquecimento abrupto da estratosfera em fecio estratosfera é produzida por ondas de escala global zonalmente simétricas.

O acoplamento em latitudes foi observado para a mesosfera também, com evidência indireta para a presença de ondas zonalmente simétricas na região. Investigação

conduzida por Sridharan et al., (2009) demonstrou a relação entre eventos intensos de aquecimento abrupto da estratosfera e a reversão do eletrojato equatorial durante o início da noite. Como o sistema de corrente do eletrojato é controlado pelos ventos de marés, a investigação mostrou ainda um aumento nas amplitudes das marés semi-diurna e diurna durante os dias de aquecimento intenso da estratosfera, seguido de decrescimento das amplitudes após o evento.

Recentemente Lima et al., (2012) realizou uma investigação da dinâmica da mesosfera equatorial durante as estações de verão austral de 2004-2005, 2005-2006 e 2006-2007, usando medidas de radar meteórico em São João do Cariri-PB (7,4°S, 36,5°O), juntamente com parâmetros da estratosfera polar do hemisfério norte. No estudo foram analisados os comportamentos das marés atmosféricas, ondas de quase dois dias e o escoamento zonal médio da região entre 80 e 100 km de altitude. Os autores encontraram que a dinâmica da mesosfera superior em 7°S foi afetada quando um aquecimento abrupto extraordinário da estratosfera ocorreu, em janeiro de 2006. As intensificações das amplitudes das marés e das ondas de 2 dias observadas durante a ocorrência do forte aquecimento abrupto da estratosfera polar mostraram ser sugestivas de uma associação entre elas e a alta atividade de ondas planetárias na estratosfera polar do hemisfério norte.

## **CAPÍTULO 3**

#### **DADOS E METODOLOGIA**

Milhões de partículas de poeira, provenientes do meio planetário, atingem diariamente a Terra. Chamadas de meteoróides, estas partículas, ao entrarem na atmosfera terrestre sofrem processo de ablação, produzindo luz e ionozação, fenômeno chamado de meteoro. Ao penetrarem na atmosfera terrestre entre 80 e 100 km de altura em alta velocidade e, sob a ação do atrito com o meio atmosférico, trilhas ionizadas são produzidas e transladadas pelos ventos neutros, podendo ser detectadas pelos ecos do radar. Dentre as técnicas utilizadas para o estudo dos meteoros, podemos citar as observações a olho nu, as câmaras fotográficas, o telescópio e os radares. Entre estas técnicas, a técnica do radar, especialmente a do radar meteórico tem sido estabelecida para o estudo da região da alta mesosfera e baixa termosfera de forma contínua e por longos períodos, permitindo a avaliação e monitorização da mencionada região.

A pesquisa desenvolvida neste trabalho tem como base observações de temperaturas da região próxima à mesopausa equatorial, as quais foram obtidas a partir de medidas por radar meteórico que opera no município paraibano de São João do Cariri (7,4°S, 36,5°O), durante os períodos de verão do Hemisfério Sul dos anos 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, e 2008-2009. Analisados juntamente com parâmetros da estratosfera polar fornecidos pelo National Centre for Environmental Prediction (NCEP), a pesquisa objetiva investigar o comportamento da temperatura da região próxima à mesopausa equatorial durante evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar, utilizando os dados de tempo de decaimento dos sinais meteóricos fornecidos pelo radar meteórico.

#### 3.1 Descrição do Radar Meteórico

A palavra radar é acrônimo de Radio Detection and Ranging (alcance da detecção de sinal de rádio). É um instrumento eletrônico usado para detectar objetos à distância através da maneira de como esses objetos propagam ou refletem ondas eletromagnéticas. Usado como ferramenta de estudo da atmosfera, o radar meteórico constitui-se de instrumento científico cuja função é a observação de meteoros que diariamente adentram a atmosfera terrestre. Medidas de diversos parâmetros atmosféricos e astronômicos, tais como as marés atmosféricas, ventos na alta atmosfera e temperatura são exemplos de sua utilidade.

O instrumento utilizado para a presente pesquisa denomina-se Radar Meteor All-Sky Interferometric (SKiYMET), radar meteórico do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instalado no município paraibano de São João do Cariri desde julho de 2004. O sistema possui visada de todo céu (all sky) e foi projetado para operar em alta taxa de repetição de pulso. O radar usa uma única antena transmissora Yagi de três elementos, com cinco antenas receptoras dispostas no solo formando uma cruz assimétrica. A distância entre os dois pares de antenas das extremidades à antena central mede, 2,0  $\lambda$  e 2,5  $\lambda$ , respectivamente, ilustrado na Figura 3.1. Também são usados cinco receptores para aquisição dos dados, um para cada antena, em que os comprimentos dos cabos e atrasos foram precisamente determinados. Esta configuração interferométrica permite a determinação da trilha meteórica no céu, reduzindo a ambiguidade no ângulo de chegada (Hocking et al., 2001).

O radar meteórico do sistema SKiYMET tem sido utilizado em estudos da dinâmica da alta atmosfera, dentre os quais podemos citar o comportamento dos ventos meteóricos, atividades de ondas de escala global e a determinação da temperatura mesosférica. A partir do solo (através da antena transmissora), o radar emite pulsos eletromagnéticos que incidem sobre a trilha meteórica e parte retorna ao solo, onde são captadas por um sistema de antenas receptoras, sendo devidamente armazenadas. O sistema é controlado por um computador, responsável pela aquisição e análise dos dados coletados.



FIGURA 3.1 – Configuração das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET. Fonte: Adaptada de Lima (2004)

O sistema opera numa frequência de 35,24 MHz, transmitindo radiação com pulso de 13 µs, proporcionando uma resolução de 2 km, numa taxa de de 2144 pps (pulsos por segundo). O pico de potência transmitida é de 12 kW. A taxa de pulso (2144 Hz) produz réplicas (*aliasing*) de 70 km na amostragem dos alcances, ou seja, seria impossível decidir se um meteoro tem um alcance de 65, 135, ou 205 km. Porém, tal limitação é resolvida através da combinação das medidas da posição angular, aliada ao fato de que a maioria dos meteoros ocorrem entre 70 e 110 km de altura. Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas especificações referentes ao radar de Cachoeira Paulista (que possue a mesma configuração do radar de São João do Cariri - PB), e detalhes adicionais sobre o sistema, modo de operação e método de detecção de meteoros para o radar SKiYMET são descritos por Hocking et al., (2001).

Freqüência de transmissão:	35,24 MHz			
Pico de potência transmitida:	12 kW			
Taxa de pulso:	2144 pps			
Canais receptores:	5			
Resolução:	2 km			

TABELA 3.1 - Especificações do Radar Meteórico do INPE.

FONTE: Adaptada de Clemesha et al., (2001, p. 1680).

O sistema opera automaticamente 24 horas por dia e a detecção do sinal meteórico é realizada através de processos sucessivos. A qualidade do sinal é determinada através de análise de coerência de fase. Estes sinais são então detalhadamente examinados e confirmados como sinais meteóricos ou não. O sistema permite a detecção de mais do que 5000 ecos úteis por dia. A distribuição em altura das ocorrências de meteoros segue uma gaussiana com máximo em torno de 90 km, ilustrado na Figura 3.2 a, onde são representados os números de eventos meteóricos a cada 2 km de altura detectados sem ambiguidade pelo radar de São João do Cariri – PB em 02 de janeiro de 2006.

O número de meteoros detectados também apresenta variação diária e anual. A taxa de ecos meteóricos amostrados como uma função da hora do dia, obtidos com o radar de São João do Cariri nos dias 14 e 15 de abril de 2009, são representados na Figura 3.2b, onde os máximos de detecção são observados em torno das 6 horas do local (9 h UT) e os mínimos em torno das 18 h (21 h UT).



FIGURA 3.2 – Fluxo típico de meteoros produzidos pelo radar de São João do Cariri.
(a) Distribuição vertical de ocorrências de meteoros não ambíguos, registrados em 02 de janeiro de 2006. (b) Taxa de ecos meteóricos amostrados como uma função da hora do dia, referentes aos dias 14 e 15 de abril de 2009.

A variação diária é explicada em termos de efeitos de geometria. Devido ao seu movimento orbital, da ordem de 30 km/s, a face da Terra na vanguarda da órbita está invadindo a nuvem de meteoróides esporádicos, o que ocorre em torno das 6 horastempo local, proporcionando a observação máxima de eventos meteóricos neste horário, e a observação mínima 12 horas após. Normalmente a razão da variação é de 5 para 3, e espera-se que a mesma seja maior na região equatorial e menor nos pólos (McKinley, 1961; Ceplecha et al., 1998). Dada à inclinação da Terra em relação à eclíptica, e considerando uma distribuição isotrópica dos meteoróides esporádicos, era de se esperar uma quantidade maior de eventos meteóricos durante o equinócio de outono e menor atividade durante a primavera. Porém este modelo não explica o comportamento observado no hemisfério sul, sendo necessário considerar outros fatores tais como uma variação na densidade e distribuição de radiantes durante o ano (McKinley, 1961).

#### 3.1.1 Características dos Meteoros

Segundo McKinley (1961), meteoro é o fenômeno luminoso e visível produzido quando do ingresso de meteoróides na atmosfera terrestre. Os meteoros são formados quando partículas sólidas provenientes do meio interplanetário (meteoróides ou detritos espaciais) ingressam na atmosfera terrestre e sofrem o processo de ablação. A maior parte da radiação emitida por um meteoro provém da região próxima à cabeça do meteoro, que corresponde a um ponto brilhante em movimento. Dependendo da energia cinética da partícula, pode-se formar atrás da cabeça do meteoro um rastro, comumente denominado trilha meteórica, que pode durar frações de segundo ou até dias.

Após a sua formação, a trilha meteórica se expande radialmente principalmente devido ao processo chamado de difusão ambipolar. A difusão ambipolar é uma difusão de partículas positivas e negativas em plasma na mesma razão devido a sua interação através do campo elétrico. Os elétrons livres da trilha meteórica espalham radiação incidente. Assumindo uma distribuição inicial de elétrons Gaussiana, o decaimento da amplitude do sinal pode ser expresso como:

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{16\pi^2 D_a}{\lambda^2}t\right)$$
(2.1)

 $D_a$  é o coeficiente de difusão ambipolar,  $\lambda$  é o comprimento de onda do radar e *t* é o tempo.

Considerando o tempo ( $\tau_{1/2}$ ) para que a amplitude decaia pela metade tem-se que:

$$A(\tau_{1/2}) = A_0 \exp(-16\pi^2 D_a \tau_{1/2} / \lambda^2)$$
(2.2)

Porém,  $A(\tau_{1/2}) = A_0/2$ , de modo que o tempo de decaimento do sinal pela metade é dado por:

$$\tau_{1/2} = \frac{\lambda^2 \ln 2}{16\pi^2 D_a}$$
(2.3)

De acordo com estudos teóricos, o coeficiente de difusão ambipolar é proporcional ao quadrado da temperatura e inversamente proporcional a pressão do ambiente em que ocorre a trilha meteórica (Jones e Jones, 1990; Jones, 1995), ou seja:

$$D_a \propto T^2/P$$

Entretanto, de acordo com Chilson et al., (1996) o coeficiente de difusão ambipolar ainda pode ser expresso da seguinte forma:

$$D_{a} = \frac{2kT}{q_{e}} \left(\frac{T}{273, 16}\right) \left(\frac{1,013 \times 10^{5}}{P}\right) K_{0}$$
(2.4)

em que *k* é a constante de Boltzmann,  $q_e$  é a carga elementar (=1,6×10<sup>-19</sup>C), *T* e *P* são a temperatura e a pressão do gás neutro, respectivamente. A quantidade  $K_0$  é uma constante que está relacionada com a natureza do plasma na trilha. Considerando os principais constituintes iônicos como sendo íons metálicos ( $M^+$ ) e que ( $N_2$ ) seja a principal espécie neutra, o valor de 2,5×10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>V<sup>-1</sup> tem sido usado (Hocking et al., 1997).

#### 3.2 – Determinação da temperatura a partir de medidas por radar meteórico

Em toda a atmosfera terrestre ocorrem importantes fenômenos físicos e químicos, até mesmo nas regões mais rarefeitas. Dessa forma, o estudo da atmosfera tem sua importância estabelecida, pois permite monitorar as mudanças que nela ocorrem.

A região de interesse para o presente trabalho é referida na literatura como MLT. Compreendida entre 80 e 100 km de altitude e também chamada de região meteórica, tem sua relevância nos estudos da atmosfera por ser uma região de dinâmica complexa, porém, de grande importância para compreensão de muitos fenômenos atmosféricos ali existentes. Estudos da região da alta mesosfera e baixa termosfera são restringidos pelas dificuldades de acesso para medidas "in situ". Dentre as técnicas de medidas da temperatura para a referida região, destacam-se as técnicas de sensoriamento remoto, as quais têm sido usadas na obtenção de parâmetros atmosféricos e tem seu uso estabelecido, destacando-se a técnica do radar meteórico.

Hocking et al., (1997) e Hocking (1999) propuseram dois métodos para determinar a temperatura usando dados de radar meteórico. No primeiro, Hocking et al., (1997) utiliza a relação de Einstein para o coeficiente de difusão ambipolar, discutida por Chilson et al., (1996),

$$\frac{T}{P^{\frac{1}{2}}} = \sqrt{\frac{q_e}{2k}} \left(\frac{273,16}{1,013 \times 10^5 K_0}\right) \left(\frac{\lambda^2 \ln(2)}{16\pi^2 \tau_{1/2}}\right)$$
(2.5)

A estimativa da temperatura através obtida através da Eq. 2.5 requer valores da pressão. Hocking et al., (1997) usou dados de pressão do modelo COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA-86) (Fleming et al., 1988). Contudo, o modelo fornece perfis verticais mensais fixos da pressão atmosférica, para distintas latitudes em ambos os hemisférios. Deste modo, ao considerar os valores de pressão fornecidos pelo modelo CIRA-86 na Eq. 2.5, os resultados apresentarão sérias limitações para representarem as variações de curto período das temperaturas diárias.

O segundo método proposto por Hocking (1999) usa o fato do  $\log_{10}(1/\tau)$  ser dependente do  $\log_{10}(P)$  e, que *P* varia com a altitude de acordo com a escala de altura, a qual depende da temperatura, para demonstrar que a inclinação (*S<sub>m</sub>*) do gráfico da altitude (*Z*) em função de  $\log_{10}(1/\tau)$  está relacionada com a temperatura média na altitude de maior ocorrência de meteoros. A estimativa da temperatura a partir do tempo de decaimento do sinal é feita através da seguinte expressão:

$$T = S_m \log_{10}(e) \left[ 2\frac{dT}{dZ} + \frac{Mg}{k} \right]$$
(2.6)

onde *M* é a massa molecular média do ar, (dT/dZ) é o gradiente da temperatura na mesopausa e *g* é a aceleração da gravidade da região de máxima detecção dos meteoros, ou seja, na altitude próxima de 90 km. O método requer um número expressivo de dados e cada temperatura diária é estimada a partir de um ajuste de *S*<sub>m</sub>.

Este modelo não necessita da informação da pressão para estimar a temperatura na altitude de maior ocorrência de meteoros (~90 km), porém, requer uma aproximação para o gradiente médio da temperatura na mesopausa (dT/dZ). Hocking et al., (2004) usam uma aproximação para o gradiente médio de temperatura na altitude de máxima ocorrência de meteoros, a qual é baseada em dados experimentais e de modelos. Para região equatorial o gradiente médio de temperatura pode assumir valores entre -2,0 e -1,0 K/km ao longo do ano. As variações sazonais da temperatura da mesopausa são mais pronunciadas em latitudes altas do que em médias e baixas latitudes. Para este trabalho foram usadas médias mensais do gradiente de temperatura estimados a partir do modelo Mass Spectrometer and Incoherent Scatter (MSIS) 90 model (Hedin, 1991), para a latitude de 7° S, cujos valores variam entre -1,35 e -1,15 K/km, os quais também foram usados por Santos (2009) e Lima et al. (2010). Vale salientar que, entre 72,5 e 120 km, o modelo MSIS 90 é essencialmente o modelo CIRA-86 revisado.

Com a temperatura estimada para a altitude próxima de 90 km, é possível obter a pressão para a mesma altitude através da Eq. 2.6, e usar esta informação para construir o perfil vertical da pressão no intervalo de altitude entre 86 e 94 km mediante a relação,

$$P(Z) = P(Z_0) \exp\left[-\frac{Z - Z_0}{H}\right]$$
(2.7)

em que P(Z) é a pressão na altitude Z,  $P(Z_0)$  é a pressão no nível de referência  $Z_0$  (~90 km) e H é a escala de altura na região de interesse. Como as temperaturas são medidas dia a dia, a escala de altura é estimada usando a relação RT/Mg, sendo R a constante dos gases ideais. Por sua vez, a estrutura vertical de pressão pode ser usada para construir o perfil vertical de temperatura através da Eq. 2.7. Neste trabalho, a temperatura obtida para a altitude de 90 km foi analisada.

## **CAPÍTULO 4**

#### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O comportamento da temperatura da região próxima à mesopausa equatorial, obtida através de medidas por radar meteórico, durante evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar do hemisfério norte foi analisado. Os dados referentes a este trabalho foram obtidos através do radar meteórico instalado no município paraibano de São João do Cariri (7,4°S, 36,5°O) durante o período de verão austral de 2004-05, 2005-06, 2006-07, 2007-2008 e 2008-2009 e foram analisados juntamente com os parâmetros estratosféricos da região polar do hemisfério norte fornecidos pelo NCEP (National Centre for Environmental Prediction).

#### 4.1 Análise das Temperaturas da Região Próxima à Mesopausa Equatorial

Na Figura 4.1 estão representadas as temperaturas diárias, para a altitude de 90 km, obtidas durante o período compreendido entre 01 de dezembro e 31 de março de 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008 e 2008-2009 com dados de temperaturas estimadas a partir das medidas obtidas pelo radar meteórico instalado em São João do Cariri - PB.

Analisando a Figura 4.1 para o período 2004-2005, percebe-se que a temperatura meteórica SOBRE São João do Cariri - PB mostra um crescimento acentuado em 17 de janeiro, atingindo cerca de 225 K, seguido de uma queda da temperatura para 190 K no dia 24. No espaço de poucos dias, a temperatura volta a atingir valores de 225 K no início do mês de fevereiro. Variações são observadas para o restante do período, mas não tão intensas quanto para o período anteriormente citado.

Para o período 2005-2006, a temperatura próxima à mesopausa equatorial teve valor máximo de 240 K em 10 de dezembro, seguido de um valor mínimo de 180 K em 22 de

dezembro, para logo em seguida atingir valores de 200 K e mantendo esse valor até 16 de janeiro, quando volta a atingir outro valor mínimo em torne de 180 K. Para o mês de fevereiro, a temperatura meteórica atingiu o valor máximo de 210 K, permanecendo até dia 18, quando atinge valor mínimo de 210 K, voltando a ter um acréscimo considerável em 02 de março, passando a atingir 210 K, permanecendo assim até 31 de março.

Conforme podemos observar na Figura 4.1 para o período 2006-2007 a temperatura média da mesopausa equatorial não apresenta alterações significativas desde o início do mês de dezembro até meados de janeiro, apresentando dois declínios em seus valores, atingindo um valor de temperatura de 180 K nos dias 15 de janeiro e 09 de favereiro, respectivamente. O valor da temperatura volta a crescer, atingindo seu valor máximo, 215 K em 05 de março, para logo em seguida cair para 190 K em 10 de março. Podemos considerar que para o período acima analisado, não houve variações bruscas de temperatura, quando considerado um espaço de poucos dias.

Para o período 2007-2008 a temperatura média da mesopausa equatorial apresenta valor máximo de 225 K em 25 de dezembro, seguido de um valoe mínimo de 180 K em 8 de janeiro, caracterizando uma queda de temperatura suave, quando comparado o espaço de dias entre ela. Em 25 de fevereiro observa-se uma queda de temperatura de 210 K para 180 K. Não sendo mais observadas, para o restante do período, mudanças bruscas de temperatura.

A temperatura média da mesopausa equatorial durante para o período 2008-2009, apresenta para o período de 10 a 13 de janeiro uma queda no valor da temperatura de 200 K para 170 K. Um valor máximo de temperatura de 215 K é atingido em 22 de janeiro, atingindo valor de 190 K, quando o gráfico não mais apresenta registro de dados até 15 de janeiro. A partir desta data, a temperatura mostra um perfil de valores ascententes, apesar de não ultrapassar o valor de 210 K.



FIGURA 4.1 – Temperaturas da altitude de 90 km obtidas a partir de medidas por radar meteórico em São João do Cariri-PB, entre 01 de dezembro e 31 de março de 2004-05, 2005-06, 2006-07, 2007-08, 2008-09.

#### 4.2 Estratosfera Polar X Mesosfera Equatorial

Geralmente, em janeiro-fevereiro são observados eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar do hemisfério norte. Para investigar se o comportamento da temperatura da região próxima a mesopausa equatorial apresenta alguma relação com evento de SSW intenso (major), os parâmetros estratosféricos representativos da região de altas latitudes do hemisfério norte foram analisados juntamente com os dados do radar meteórico de São João do Cariri-PB.

Nas Figuras 4.2 a 4.6 estão representados os gráficos das temperaturas obtidas a partir das medidas por radar meteórico sobre Cariri na altitude de 90 km (a), as temperaturas do NCEP (média zonal) para latitudes na calota polar (b), como também a média zonal do vento zonal (c) e as amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 (PW1) para a latitude de 60°N (d), no nível de pressão de 10 hPa, referentes aos períodos de dezembro-março de 2004-2005, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, respectivamente.

Analisando a Figura 4.2 é possível observar que a temperatura, na altitude de 90 km sobre São João do Cariri - PB, na segunda quinzena de dezembro de 2004 se mantem em torno de 190 K quando, no início de janeiro de 2005, experimenta um rápido crescimento e atinge cerca de 220 K dia 15. Em seguida a temperatura decresce, atigindo 190 K em 24 de janeiro, quando novamente cresce até atingir 220 K em 3 de fevereiro. No restante do período analisado, a temperatura apresenta seguidas variações com tendência de descrescimento. Para o mesmo período, os parâmetros estratosféricos da região da calota polar do hemisfério norte apresentaram comportamento compatível com um SSW fraco (minor), em que a temperatura zonal média no nível de pressão de 10 hPa, para latitudes entre 60°N e 90°N, manifestou eventos moderados de aquecimento abrupto da estratosfera, o que foi seguido por uma diminuição da velocidade do escoamento oeste-leste do vento zonal médio em 60°N. As amplitudes para a altura geopotencial referente ao número de onda zonal 1 da componente de Fourier em 10 hPa e 60°N indicam dois episódios de intensificação, em que o primeiro tem início no final de dezembro de 2004 e o segundo se inicia após 20 de janeiro, se estendendo até aproximadamente 5 de março.



FIGURA 4.2 – (a) Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, (b) média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa), (c) média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa - NCEP, (d) Amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N e 10 hPa – NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2004 e 15 de março de 2005.

Na ocasião, a temperatura próxima à mesopausa equatorial, obtida através das medidas de radar meteórico instalado em São João do Cariri-PB, teve valor médio de (198,46  $\pm$  11,32) K e variância de 128,19 K durante o mês de janeiro. Neste período, a temperatura atingiu mínimo de 186,16 K e máximo de 224,60 K. Já para o mês de fevereiro o valor médio foi de (208,56  $\pm$  11,36) K, com variância de 128,98 K, em que o valor mínimo foi de 187,18 K e máximo de 223,92 K. A variabilidade no tempo apresentada pela

temperatura da mesopausa equatorial não indica acoplamento com o comportamento da temperatura da estratosfera polar.

Na Figura 4.3 é apresentado o gráfico de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar e das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, durante o período entre 10 de janeiro e 20 de fevereiro de 2005.



FIGURA 4.3 – Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2005.

De acordo com o gráfico de dispersão, percebe-se uma tendência de correlação positiva, ou seja, as grandezas tendem a seguir a mesma variação, sendo possível afirmar que a correlação entre as temperaturas é moderada, indicado pelo coeficiente de correlação de Pearson = 0,488.

Para o verão austral de 2005-2006 e analisando a Figura 4.4a, observa-se que a temperatura na altitude de de 90 km sobre São João do Cariri - PB para 15 de dezembro atinge valor máximo de 210 K, decrescendo logo em seguida para o valor de 175 K em

22 de dezembro. Em seguida, a temperatura atinge valores de 190 K, permanecendo assim até 13 de janeiro, quando começa a decrescer, atingindo o valor mínimo de 170 K em 18 de janeiro. A partir dessa data, a temperatura volta a crescer gradativamente, atingindo o valor de 205K. Em seguida, a temperatura decresce e atinge o valor de 190K em 13 de fevereiro. Ocorre novamente um aumento de temperatura para logo em seguida ocorrer um novo decréscimo. A partir do final do mês de fevereiro, a temperatura apresenta tendência de crescimento. Durante o mesmo período, a estratosfera da calota polar do hemisfério norte apresentou comportamento compatível com aquecimento abrupto intenso, em que a temperatura zonal média no nível de pressão de 10 hPa (Figura 4.4b) alcançou valores próximos de 235 K em 23 de janeiro, justamente quando o escoamento zonal médio (Figura 4.4c) inverteu a direção oesteleste para leste-oeste, característico de SSW principal (major). As amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 em 10 hPa e 60°N (Figura 4.4d) foram intensas até 16 de janeiro. Após o evento de SSW, ocorreu um rápido decréscimo nos valores de amplitudes de PW1. Ao analisar a evolução da estratopausa durante o SSW principal (major) em 2006, Manney et al., (2008) verificaram que o vórtice polar estratosférico quebrou em 16 de janeiro.



FIGURA 4.4 – (a) Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, (b) média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa), (c) média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa - NCEP, (d) Amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N e 10 hPa – NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2005 e 15 de março de 2006.

A temperatura próxima à mesopausa equatorial, obtida das medidas de radar meteórico em São João do Cariri-PB, teve valor médio de (188,04  $\pm$  8,02) K e variância de 64,27 K durante o mês de janeiro. Neste período, a temperatura atingiu mínimo de 170,78 K e máximo de 199,07 K. Já para o mês de fevereiro o valor médio foi de (195,33  $\pm$  9,20) K, com variância de 84,60 K, em que o valor mínimo foi de 178,90 K e máximo de 208,79 K. Conforme pode ser observado do gráfico referente a janeiromarço de 2006, à medida que a temperatura da estratosfera polar cresce, até atingir o máximo em 29 de janeiro, a temperatura da mesopausa equatorial decresce para depois crescer com o tempo (quando a temperatura da estratosfera polar volta a cair no tempo). As variações observadas na temperatura da mesopausa equatorial claramente mostram correlação negativa com o comportamento da temperatura da estratosfera polar, sugerindo acoplamento entre elas.

De acordo com o gráfico de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar em função das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, durante o período entre 10 de janeiro e 20 de fevereiro de 2006, mostrado na Figura 4.5, é possível verificar que as temperaturas estão bem correlacionadas, cujo coeficiente de correlação de Pearson = -0,755, o que indica forte correlação negativa entre as temperaturas.



FIGURA 4.5 – Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2006.

Considerando o verão austral de 2006-2007 (observar Figura 4.6a), observam-se flutuações da temperatura meteórica no Cariri paraibano ao longo de todo o período, com a ocorrência de dois valores míninos de 180 K nos dias 20 de janeiro e 9 de fevereiro, respectivamente. Conforme pode ser visto, a temperatura não apresenta alterações significativas entre meados de dezembro até meados de janeiro, apresentando dois declínios em seus valores para logo em seguida voltar a crescer, atingindo o valor máximo de 215 K em 05 de março, para logo em seguida cair para 190 K em 10 de março.

A temperatura média da estratosfera polar (Figura 4.6b) apresentou valores elevados apenas em 14 fevereiro, na parte final do inverno boreal, quando a média zonal do vento zonal (Figura 4.6c) inverteu a direção de escoamento (oeste-leste para leste-oeste). As amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 (Figura 4.6d) foram intensas até 16 de janeiro. Após o evento de SSW, ocorreu um rápido decréscimo nos valores de amplitudes de PW1. Esta situação configura um curto evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar.

A temperatura média da mesopausa equatorial em janeiro foi de  $(192,35 \pm 10,81)$  K e variância de 93,40 K com mínima de 177,11K e máxima de 211,03 K e em fevereiro foi de  $(193,70 \pm 9,66)$  K e variância de 117,02 K com mínima de 174,81 K e máxima de 213,21 K. A variabilidade no tempo apresentada pela temperatura da mesopausa equatorial não indica acoplamento com o comportamento da temperatura da estratosfera polar.



FIGURA 4.6 – (a) Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, (b) média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa), (c) média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa - NCEP, (d) Amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N e 10 hPa – NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2006 e 15 de março de 2007.

De acordo com o gráfico de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar em função das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, durante o período entre 1 de janeiro e 20 de fevereiro de 2007, mostrado na Figura 4.7, é possível verificar uma tendência de correlação positiva, cujo coeficiente de correlação de Pearson = 0,406, indicando uma correlação moderada.



FIGURA 4.7 – Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro de 2007.

Para o verão austral de 2007-2008 (observar a Figura 4.8a), verifica-se que a temperatura da mesopausa equatorial apresenta valor máximo em 25 de dezembro, seguido de valores mínimos desde o início do mês de janeiro, atingindo temperaturas de 180 K e permanecendo assim até 25 de janeiro, quando atinge o valor de 205 K. Entre os dias 24 de janeiro e 12 de fevereiro, observa-se que não ocorreram aquecimentos nem resfriamentos intensos. Em 25 de fevereiro observa-se uma queda de temperatura de 210 K para 180 K. Não sendo mais observadas, para o restante do período, mudanças bruscas de temperatura, mas uma tendência de declínio.

A temperatura média da estratosfera polar (Figura 4.8b) apresentou valores elevados apenas a partir de 24 de janeiro de 235 K, seguido de um decréscimo para o valor de 210 K em 29 de janeiro. Observa-se que entre 18 e 25 de fevereiro a temperatura

estratosférica apresentou comportamento compatível com aquecimento abrupto intenso, em que a temperatura alcançou valores próximos de 240 K em 23 de fevereiro, justamente quando o escoamento zonal médio (Figura 4.8c) inverteu a direção oesteleste para leste-oeste, saindo de valores de +13 m/s para valores de -25 m/s. As amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 (Figura 4.8d) foram intensas até 16 de janeiro. Após o evento de SSW, ocorreu um rápido decréscimo nos valores de amplitudes de PW1. Esta situação configura evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar.

A temperatura média da mesopausa equatorial em janeiro foi de  $(191,40 \pm 9,58)$  K e variância de 91,82 K com mínima de 177,11K e máxima de 210,32 K e em fevereiro foi de  $(198,13 \pm 7,58)$  K e variância de 57,52 K com mínima de 183,41 K e máxima de 211,27 K. A variabilidade no tempo apresentada pela temperatura da mesopausa equatorial não indica acoplamento com o comportamento da temperatura da estratosfera polar.



FIGURA 4.8 – (a) Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, (b) média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa), (c) média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa - NCEP, (d) Amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N e 10 hPa – NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2007 e 15 de março de 2008.

Na Figura 4.9 estão representados os gráficos de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar em função das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, durante o período entre 1 de janeiro e 20 de fevereiro de 2007 (gráfico a) e entre 16 e 28 de fevereiro (gráfico b), quando ocorreu aquecimento abrupto da estratosfera polar. Conforme pode ser constatado, a dispersão indica uma forte correlação positiva (R<sub>Peasron</sub>=0,713) para as temperaturas observadas entre 01 e 20 de fevereiro, quando não foi ocorreu evento de aquecimento abrupto intenso (major) na estratosfera polar. No

entanto, durante o período de 16-28 de fevereiro, em que ocorreu um aquecimento estratosférico polar intenso, a dispersão entre as temperaturas em 90 km sobre São João do Carir - PB e da estratosfera polar indica uma forte correlação negativa, com coeficiente de Pearson = 0,762.



FIGURA 4.9 – Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 01 de janeiro a 20 de fevereiro (esquerda) e entre 16 e 28 de fevereiro (direita) de 2008.

Para o verão austral de 2008-2009 a temperatura média da mesopausa equatorial mostrada na Figura 4.10a, apresenta valor máximo em 25 de dezembro, seguido de um decréscimo para valores de 185 K. Para o período do início de janeiro até 19 do mesmo mês, não há registro das temperaturas meteóricas. A partir desta data, a temperatura mostra um perfil de valores crescentes, apesar de não ultrapassar o valor de 210 K.

A temperatura média da estratosfera polar (Figura 4.10b) apresenta um perfil praticamente constante, com valores de 205 K para o período de 15 de dezembro de 2008 a 19 de janeiro de 2009, até atingir um valor máximo maior que 240 K em 24 de janeiro. Após atingir o pico, a temperatura decresce paulatinamente com o tempo, até

atingir o valor de 210 K em 15 de março. A média zonal do vento zonal (Figura 4.10c) mostra reversão do vento, logo após intensificação da temperatura estratosférica, caracterizando evento de aquecimento abrupto. Na ocasião, os valores das amplitudes para a altura geopotencial para o número de onda zonal 1 (Figura 4.10d) foram intensas até 16 de janeiro. Após o evento de SSW, ocorreu um rápido decréscimo nos valores de amplitudes de PW1. Esta situação configura evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar.

A temperatura média da mesopausa equatorial durante o período de 21 a 31 de janeiro foi de (187,30  $\pm$  4,25) K e variância de 18,06 K com mínima de 180,36 K e máxima de 193,32 K e em fevereiro foi de (196,70  $\pm$  5,01) K e variância de 25,08 K<sup>2</sup> com mínima de 186,88 K e máxima de 204,76 K. A variabilidade no tempo apresentada pela temperatura da mesopausa equatorial não indica acoplamento com o comportamento da temperatura da estratosfera polar.



FIGURA 4.10 –(a) Temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, (b) média zonal da temperatura polar - NCEP (na direção polar a partir de 60°N em 10 hPa), (c) média zonal do vento zonal em 60°N e 10 hPa - NCEP, (d) Amplitude da onda S=1 da altura geopotencial em 60°N e 10 hPa – NCEP. Os dados foram obtidos entre 15 de dezembro de 2008 e 15 de março de 2009.

O gráfico de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar em função das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, durante o período entre 23 de janeiro e 20 de fevereiro de 2009, é mostrado na Figura 4.11. De acordo com a dispersão, é possível verificar que as temperaturas estão bem correlacionadas, com coeficiente de correlação de Pearson = -0,755, indicando forte correlação negativa entre as temperaturas.



FIGURA 4.11 –Média zonal da temperatura estratosférica polar (NCEP) em função das temperaturas estimadas a partir das medidas de radar meteórico realizadas sobre o município de São João do Cariri-PB, obtidas entre 23 de janeiro a 20 de fevereiro de 2009.

#### 4.3 Discussão

A partir de 4 de janeiro de 2006, as temperaturas em 90 km obtidas a partir das medidas por radar meteórico sobre o município paraibano de São João do Cariri diminuíram, ao passo que as condições da estratosfera polar do hemisfério norte indicam que a média zonal da temperatura aumenta e o vento zonal na direção oeste-leste enfraquece. Quando a temperatura da estratosfera no ártico alcança seu máximo e o escoamento polar no nível de pressão de 10 hPa reverte para a direção leste-oeste, a temperatura meteórica sobre São João do Cariri – PB alcança seu valor mínimo. É interessante notar que na mesma época a atividade da onda de 2 dias foi bastante intensa (Lima et al., 2012). Durante o período de janeiro-fevereiro de 2008, a temperatura da estatrosfera polar no ártico também apresentou episódios de aumentos. Contudo, a temperatura

quando a dinâmica da estratosfera polar assume características de aquecimento abrupo principal (major), em 20 de fevereiro de 2008. Durante janeiro-fevereiro de 2009, a dinâmica da estratosfera polar do ártico foi marcada por aquecimento abrupto principal (major). Entretanto, devido à ausência de medidas pelo radar sobre São João do Cariri - PB, foi possível apenas analisar a parte da dinâmica equatorial a partir do pico da temperatura na estratosfera polar do ártico. Neste caso, a temperatura meteórica sobre o município paraibano São João do Cariri começa a aumentar justamente quando a temperatura da estratosfera polar do ártico inicia a sua queda.

Vineeth et al., (2009) verificaram indícios de acoplamento entre a dinâmica da região da alta mesosfera e baixa termosfera (região MLT) e evento de aquecimento abrupto da estratosfera polar principal (major). Os autores observaram que, quando aquecimentos abruptos da estratosfera polar ocorrem, a mesosfera polar e a estratosfera em latitudes baixas também esfriam, enquanto a mesosfera equatorial apresenta aquecimento (em 8,5°N). De acordo com o estudo, o esfriamento súbito observado na estratosfera sobre Trivandrum antes do período de aquecimento abrupto da estratosfera polar está associado com a pré-condição devida à circulação e a dissipação de ondas atmosféricas sobre a região da alta mesosfera e baixa termosfera (região MLT).

A partir da análise dos gráficos de dispersão dos dados das temperaturas da estratosfera polar em função das temperaturas obtidas na mesopausa equatorial, observa-se que, quando ocorrem aquecimentos abruptos estratosféricos severos (major), as correlações entre a temperatura na altitude de 90 km sobre São João do Cariri - PB e a média zonal da temperatura da estratosfera polar do ártico são negativas, indicando um acoplamento entre evento de aquecimento estratosférico polar abrupto severo e a temperatura da mesopausa equatorial. Nos anos em que não foram observados eventos de aquecimentos estratosféricos severos no ártico, as correlações entre as temperaturas meteóricas em Cariri e a média zonal da temperatura da estratosfera polar foram fracas e positivas.

Os resultados obtidos na presente investigação concordam com os apresentados por Shepherd et al., (2007), os quais observaram que esfriamento da mesosfera e aquecimento da estratosfera nos trópicos estão correlacionados com eventos de aquecimento da estratosfera em médias e altas latitudes. Recentemente Lima et al., (2012) encontraram que a dinâmica da mesosfera superior em 7°S foi afetada quando um aquecimento abrupto severo da estratosfera polar no ártico ocorreu, em janeiro de 2006. As intensificações das amplitudes das marés e das ondas de 2 dias observadas durante a ocorrência do forte aquecimento abrupto da estratosfera polar mostraram ser sugestivas de uma associação entre elas e a alta atividade de ondas planetárias na estratosfera polar do hemisfério norte.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

Este trabalho foi desenvolvido visando estimar a temperatura da região próxima à mesopausa equatorial e analisar sua relação com eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar. Para este fim foram utilizados dados obtidos através de medidas de radar meteórico instalado no município paraibano de São João do Cariri (7,4°S; 36,5°O). Medidas de temperaturas estimadas a partir de dados do radar foram analizadas juntamente com parâmetros da estratosfera polar fornecidos pelo National Centre for Environmental Prediction (NCEP).

Os resultados obtidos evidenciam que, durante evento de aquecimento abrupto severo (major) da estratosfera polar, as temperaturas da região próxima à mesopausa equatorial são mais baixas do que durante os eventos de aquecimentos considerados fracos, demonstrando o acoplamento entre os eventos.

Durante os anos em que ocorreram eventos de aquecimentos abruptos severos na estratosfera polar no ártico, foram verificadas fortes correlações negativas entre a temperatura próxima a região da mesopausa sobre São João do Cariri - PB, obtidas a partir de medidas por radar meteórico, e a média zonal da temperatura da estratosfera polar, enquanto que quando eventos de aquecimento abrupto severos não foram observados na estratosfera polar as correlações entre as temperaturas foram fracas e postivas.

# **REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS**

ANDREWS, D.G., HOLTON, J.R., LEOVY, C.B. **Middle Atmosphere Dynamics**. Academic Press, Orlando 490pp. 1987.

BROWN, T. L., LEMAY, H. E., BURSTEN, B.E. **Química, a ciência central.** Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

CAMARGO, A. L. B. Desenvolvimento sustentável: dimensões e desafios. Papirus, Campinas, 2003.

CEPLECHA, Z.; BOROVICKA, J.; ELFORD, W. G.; REVELLE, D. O.; HAWKES, R. L.; PORUBCAN, V.; SIMEK, M. Meteor phenomena and bodies. **Space Science Reviews**, v. 84, n. 3-4, p. 327-471, Apr. 1998.

CLEMESHA, B. R.; BATISTA, P. P.; SIMONICH, D. M. Simultaneous measurements of meteor winds and sporadic sodium layers in the 80-110 km region. Advances in SpaceResearch, v. 27, n. 10, p. 1679-1684, Oct. 2001.

CHARNEY, J. G., STERN, M. On the stability of internal baroclinic jets in a rotating atmosphere. **Journal of Atmospheric Sciences** 19, 159-172. 1962.

CHARNEY, J.G., DRAZIN, P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. **Journal of Geophysical Research** 66, 83-109. 1961.

CHAU, J.L., APONTE, N.A., CABASSA, E., SULZER, M.P., GONCHARENKO, L.P., GONZÁLEZ, S.A. Quiet time ionospheric variability over Arecibo during sudden stratospheric warming events. Journal of Geophysical Research 115, A00G06, doi:10.1029/2010JA015378. 2010.

CHILSON, P.B., P. CZECHOWSKY, AND G. SCHMIDT, A comparison of ambipolar diffusion coefficients in meteor trains using VHF radar and UV lidar, **Geophysical Research Letters**, **23** (20), 2745-2748, 1996.

FLEMING, E.; CHANDRA, S.; SCHOEBERL, M.; BARNETT, J. Monthly mean global climatology of temperature, wind, geopotential height and pressure from 0-120 km. NASA Technical Memorandum 100697, p. 85p, 1988.

GONCHARENKO L., ZHANG, S.R. Ionospheric signatures of sudden stratospheric warming: Ion temperature at middle latitude. **Geophysical Research Letters** 35, L21103, doi:10.1029/2008GL035684. 2008.

HEDIN, A. E., M.A.BIONDI, BURNSIDE, R.G., HERNADEZ, G., JOHNSON, R.M., KILLEN, T.L., MERIWETHER, J.W., Revised Global Model of Thermosphere Winds Using Satellite and Ground-Based Observations, **Journal of Geophysical Research**, v 96, p 7657-7688, 1991.

HOCKING, W. K. Temperatures using radar-meteor decay times. Geophysical Research Letters, v. 26, p. 3297–3300, 1999.

HOCKING, W. K.; THAYAPARAN, T.; JONES, J. Meteor decay times and their use in determining a diagnostic mesospheric temperature-pressure parameter: methodology and one year of data. **Geophysical Research Letters**, v. 24, p.2977–2980, 1997.

HOCKING, W. K.; FULLER, B.; VANDEREER, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 63, n. 2-3, p. 155-169, Jan.-Feb. 2001.

HOCKING, W. K. Radar meteor decay rate variability and atmospheric consequences. *Annales Geophysicae*, vol. 22, pages 3805-3805, November, 2004.

HOLTON, J.R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere. **Journal of Atmospheric Sciences** 40, 2497-2507. 1983.

JONES, W. The decay of radar echoes from meteors with particular reference to their use in the determination of temperature fluctuations near the mesopause. **Annales Geophysicae**, v. 13, p. 1104–1106, 1995.

JONES, W.; JONES, J. Ionic diffusion in meteor trails. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 52, p. 185–191, 1990.

KODERA, K. Influence of stratospheric sudden warming on the equatorial troposphere. **Geophysical Research Letters** 33, L06804, doi:10.1029/2005GL024510. 2006.

LABITZKE, K. Temperature changes in the mesosphere and stratosphere connected with circulation changes in winter. **Journal of Atmospheric Sciences** 29, 756-766. 1972.

LIMA, L. M. Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do Hemisfério Sul. 245 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.

LIMA, L. M.; SANTOS, K.; ALVES, E. O.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R. Estimativa da temperatura da mesopausa equatorial a partir de medidas por radar meteórico. **Revista Brasileira de Geofísica**, 28 (1), 99-107, doi.org/10.1590/S0102-261X2010000100008. 2010.

LIMA, L. M.; ALVES, E. O.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, B. R.; MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A. Sudden stratospheric warming effects on the mesospheric tides and 2-day wave dynamics at 7°S. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 78-79, 99-107, doi: 10.1016/j.jastp.2011.02.013. 2012.

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

LIU, H.-L., ROBLE, R.G. A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric-lower thermospheric impacts using the coupled TIMEGCM/CCM3. Journal of Geophysical Research 107 (D23), 4695, doi:10.1029/2001JD001533. 2002.

MANNEY, G. L.; KRUGER, K.; PAWSON, S.; MINSCHWANER, K.; SCHWARTZ, M. J. ; DAFFER, W. H.; LIVESEY, N. J.; MLYNCZAK, M. G.; REMSBERG, E. E.; RUSSELL; J.M.; WATERS, J.W., The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: Satellite data and assimilated meteorological analyses, **J. Geophys. Res., 113**, D11115, doi:10.1029/2007JD009097, 2008.

MATSUNO, T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. Journal of Atmospheric Sciences 28, 1479-1494. 1971.

MCKINLEY, D. W. R. Meteor science and engineering. New York: McGraw-Hill, 1961. 309p.

MURRAY, F. W. Dynamic Stability in the Stratosphere. Journal of Geophysical Research 65(10), 32733305, doi:10.1029/JZ065i010p03273.1960.

PANCHEVA, D., MUKHTAROV, P., MITCHELL, N.J., ANDONOV, B., MERZLYAKOV, E., SINGER, W., MURAYAMA, Y., KAWAMURA, S., XIONG, J., WAN, W., HOCKING, W., FRITTS, D., RIGGIN, D., MEEK, C., MANSON A. Latitudinal wave coupling of the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004. Ann. Geophys. 26, 467-483, doi:10.5194/angeo-26-467-2008. 2008.

PEDATELLA, N.M., FORBES, J.M. Evidence for stratosphere sudden warmingionosphere coupling due to vertically propagating tides. **Geophysical Research Letters** 37, L11104, doi:10.1029/2010GL043560. 2010.

SANTOS, K. Determinação da temperatura da alta atmosfera a partir do tempo de decaimento de sinais meteóricos observados por radar em São João do Cariri-PB.
Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – PRODEMA/UFPB/UEPB, Campina Grande-PB, 2009.

SATHISHKUMAR, S., SRIDHARAN, S., JACOBI, C. Dynamical response of lowlatitude middle atmosphere to major sudden stratospheric warming events. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.** 71, 857-865, doi: 10.1016/j.jastp.2009.04.002. 2009. SCHOEBERL, M. R. Stratospheric warmings: Observations and theory. **Rev. Geophys.** 16, 521-538. 1978.

SHEPHERD, M.G., WU, D.L., FEDULINA, I.N., GURUBARAN, S., RUSSELL, J.M., MLYNCZAK, M.G., SHEPHERD, G.G. Stratospheric warming effects on the tropical mesospheric temperature field. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69, 2309-2337, doi: 10.1016/j.jastp.2007.04.009. 2007.

SISKIND, D.E., COY, L. Observations of stratospheric warmings and mesospheric coolings by the TIMED SABER instrument. **Geophysical Research Letters** 32, L09804, doi:10.1029/2005GL022399.2005.

SRIDHARAN, S., SATHISNKUMAR, S., GUTUBARAN, S. Variabilities of mesospheric tides and equatorial electrojet strength during major stratospheric warming events. **Ann. Geophys.** 27, 4125-4130, doi:10.5194/angeo-27-4125-2009. 2009.

VINEETH, C., PANT, T.K., SRIDHARAN, R. Equatorial counter electrojets and polar stratospheric sudden warmings - a classical example of high latitude-low latitude coupling? **Ann. Geophys.** 27, 3147-3153, doi:10.5194/angeo-27-3147-2009. 2009.