



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 6, n° 1 (2020)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n1ID18323>



ESTUDO DA DINÂMICA DA TROPOPAUSA SOBRE NATAL-RN UTILIZANDO-SE DE DADOS DE RADIOSSONDAGENS DE BALÕES METEOROLÓGICOS

José Pedro da Silva Júnior¹; Régia Pereira da Silva²; Elio Pessoa Cazuzza³; Ricardo Bruno de Araújo Tenório⁴; Gilvan Luiz Borba⁵; David Mendes⁶; Anderson Luiz Pinheiro de Oliveira⁷; José Humberto de Araújo⁸; Maurício Lima de Alcântara⁹

Email: david.mendes22@gmail.com

⁷ Doutor em Ciências Climáticas, Coordenação de Pesquisa e Inovação, Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), São Paulo do Potengi/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8225-2030>

Email: anderson.pinheiro@ifrn.edu.br

¹Mestre em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9906-1932>

Email: pedrojunior@ufrn.edu.br

⁸Doutor em Física, Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3390-8600>

Email: humberto@fisica.ufrn.br

²Doutora em Geofísica Espacial, Divisão de Aeronomia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos/SP, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6900-0928>

Email: regia.pereira@inpe.br

⁹Mestre em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6931-0678>

Email: maualc@hotmail.com

³Doutor em Ciências Climáticas, Instituto de Ensino Superior do Rio Grande do Norte (IESRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1722-9744>

Email: cazuzaelio@gmail.com

⁴Mestre em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7471-3113>

Email: ricardotenorio@ufrn.edu.br

⁵Doutor em Geofísica Espacial, Departamento de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4525-4843>

Email: gilvan@geofisica.ufrn.br

⁶Doutor em Física da Atmosfera, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1418-5109>

Resumo

A tropopausa equatorial terrestre é, em geral, analisada como uma região de modestas variações de temperatura e definida apenas como uma interface entre a troposfera e a estratosfera. No entanto, trabalhos recentes têm sugerido que a tropopausa pode ser fonte de perturbações capazes de afetar localmente o clima troposférico. Neste contexto, o presente trabalho descreve uma investigação detalhada das características da tropopausa equatorial sobre a região de Natal-RN, utilizando dados de radiossondagens de balões meteorológicos lançados pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), entre os anos de 2010 a 2014. Além disso, comparações com modelos computacionais semi-empíricos como o MSIS-90, mostram divergências com os dados estudados. Foram analisados um total de 1849 casos, sendo 949 sondagens diurnas e 900 noturnas. Foram comparadas as temperaturas mínimas da tropopausa com relação às estações do ano, e se constatou que o mínimo de temperatura ocorre no outono e o máximo durante o inverno, cujos valores médios são, respectivamente, 189,6 K e 194,5 K. A explicação proposta para estes resultados, relaciona a precipitação durante estas estações com a liberação de energia para alta troposfera.

Palavras-chave: Tropopausa Equatorial, MSIS-90, Sondagem Atmosférica.

STUDY OF TROPOPAUSE DYNAMICS OVER NATAL-RN FROM RADIOSONDE DATA OF METEOROLOGICAL BALLOONS

Abstract

The terrestrial equatorial tropopause is generally analyzed as a region of modest temperature variations and defined only as an interface between the troposphere and the stratosphere. However, recent works has suggested that the tropopause may be a source of disturbances capable of locally affecting the tropospheric climate. In this context, the present work describes a detailed investigation of the characteristics of the equatorial tropopause over Natal-RN, from data of radiosondes of meteorological balloons launched by Barreira do Inferno Center of Launch (CLBI) during the years from 2010 to 2014. In addition, comparisons with semi-empirical computational models such as the MSIS-90 show differences with the studied data. A total of 1849 cases were analyzed, 949 of which were daytime and 900 were nocturnal. The minimum temperatures of the tropopause were compared with the seasons, and it was found that the minimum temperature occurs in autumn and the maximum during winter, whose average values are, respectively, 189.6 K and 194.5 K. The proposed explanation for these results relates the precipitation during these seasons with the release of energy to the upper troposphere.

Keywords: Equatorial Tropopause, MSIS-90, Atmospheric Soundings.

ESTUDIO DE LA DINÁMICA DE LA TROPOPAUSA SOBRE NATAL-RN UTILIZANDO DATOS DE RADIOONDAS DE GLOBO METEOROLÓGICO

Resumen

La tropopausa ecuatorial terrestre, en general, se analiza como una región de variaciones moderadas de temperatura y se define solo como una interfaz entre la troposfera y la estratosfera. Sin embargo, trabajos recientes han sugerido que la tropopausa puede ser una fuente de disturbios capaces de afectar localmente el clima troposférico. En este contexto, el presente trabajo describe una investigación detallada de las características de la tropopausa ecuatorial en la región de Natal-RN, utilizando datos de radiosondas desde globos meteorológicos lanzados por el Centro de Lanzamiento Barreira do Inferno (CLBI), entre los años 2010 a 2014. Además, las comparaciones con modelos computacionales semi-empíricos como MSIS-90, muestran divergencias con los datos estudiados. Se analizaron un total de 1,849 casos, con 949 encuestas diurnas y 900 nocturnas. Las temperaturas mínimas de la tropopausa se compararon con respecto a las estaciones, y se encontró que la temperatura mínima ocurre en otoño y la máxima durante el invierno, cuyos valores promedio son, respectivamente, 189.6 K y 194.5 K. A La explicación propuesta para estos resultados, relaciona la precipitación durante estas estaciones con la liberación de energía a la alta troposfera.

Palabras-clave: Tropopausa ecuatorial, MSIS-90, Sondeos Atmosféricos.

1. INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é formada por um conjunto de gases que circunda o planeta e é mantida através da interação gravitacional. É um ambiente propício para estudos de fenômenos físicos, químicos e climatológicos. Os princípios da termodinâmica são fundamentais para a descrição da maioria dos fenômenos atmosféricos, podendo de forma aproximada, ser tratada como um gás ideal (GOODY e WALKER, 1972). Sua principal forçante atmosférica é o Sol, seguido pelas interações com a terra sólida e com os oceanos. A atmosfera pode ser estruturada em: baixa atmosfera, região compreendida desde a superfície até uma altura de aproximadamente 15 km, dominada pelos fenômenos meteorológicos; média atmosfera, região entre 15 – 60 km, onde encontra-se a maior concentração de ozônio que absorve a radiação ultravioleta proveniente do Sol, sendo um importante mecanismo para o balanço radiativo (MOHANAKUMAR, 2008); e alta atmosfera, encontrada acima de 60 km, onde a ionosfera está contida, sendo caracterizada pela presença de íons e elétrons, gerados a partir da interação entre atmosfera e a radiação ionizante proveniente do Sol (RISHBETH e GARRIOTT, 1969).

A atmosfera da Terra também pode ser descrita como uma série de camadas onde cada camada possui características próprias no qual a temperatura varia com relação à altitude. Essas regiões possuem características distintas e são chamadas: troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. As fronteiras de transição entre elas são denominadas: tropopausa, estratopausa e mesopausa (GOODY e WALKER, 1972).

A troposfera é a parte mais baixa da atmosfera e se estende entre 16-18 km nos trópicos, 10-12 km na média latitude e 6-8 km na região polar (MOHANAKUMAR, 2008). É dominada pelos processos meteorológicos, além de apresentar forte convecção. A temperatura decresce quase que linearmente com a altitude a uma taxa de 6-7 K/km, pois a principal fonte de calor desta camada está na superfície. Para regiões de baixas latitudes, a temperatura de superfície é em média 300 K (27°C) e a temperatura final da troposfera é de aproximadamente 198 K (-75°C) (SELKIRK, 1993).

A tropopausa tem sido identificada como sendo de fundamental importância para o clima. O balanço radiativo desta camada, incluindo nuvens, é importante para o balanço energético global (HAYNES et al., 2001). A altitude da base tropopausa possui uma variação temporal, ou seja, esta região apresenta um movimento vertical com relação ao tempo. A Organização Meteorológica Mundial (OMM) define que na tropopausa a taxa de variação da temperatura deve ser inferior a 2 K/km, enquanto que os modelos climáticos e atmosféricos consideram que nesta região a temperatura é praticamente constante (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Um destes modelos é o MSIS-90 e tem como um de seus propósitos simular o comportamento da temperatura da atmosfera neutra. O MSIS-90 é um modelo semi-empírico onde o banco de dados possui como base para coleta, sondagens por foguetes e balões e informações de satélites (HEDIN, 1991), incluindo dados de aproximadamente 200 perfis de temperatura até a altura de 50 km, obtidas em Natal-RN por meio de foguetes de sondagens

lançados pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) entre 1966-1980 (LABITZKE *et al.*, 1985).

O estudo desenvolvido neste trabalho analisa a temperatura mínima e a máxima da tropopausa tropical para quatro anos de dados, utilizando tanto dados experimentais quanto resultados do MSIS-90. Analisa-se também o comportamento sazonal da tropopausa sobre a região de Natal-RN, e a existência de fatores meteorológicos capazes de influenciar nas temperaturas registradas em cada estação.

1.1. Troposfera e Tropopausa

A troposfera é a primeira camada da atmosfera terrestre cuja espessura diminui do equador para o polo, e é maior no verão do que no inverno. Sobre os trópicos a espessura da troposfera é maior, devido à maior incidência de radiação solar na superfície intertropical. Os gases troposféricos são transparentes à radiação solar visível, o que permite o aquecimento da superfície da Terra, já que esta absorve as ondas eletromagnéticas na faixa do visível e emite no infravermelho. A superfície terrestre emite radiação de ondas longas que é absorvida e irradiada novamente pelos gases troposféricos, gerando o chamado efeito estufa. O ar é aquecido por fluxos de calor sensível e calor latentes. O ar aquecido sobe para altitudes mais elevadas devido à menor densidade, aumentando a espessura da troposfera sobre os trópicos. Quase toda a massa da atmosfera terrestre está contida na troposfera, aproximadamente 80%, sendo que em torno de 99% é de vapor d'água. O vapor d'água realiza um movimento ascendente, condensa, e logo em seguida precipita, liberando calor latente que irá conduzir fenômenos atmosféricos (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Como os movimentos que ocorrem na troposfera envolvem grandes massas de ar, os sistemas são consideravelmente grandes de modo que é possível ignorar as trocas de calor entre a parcela de ar em movimento e sua vizinhança. Sendo assim, pode-se tratar o deslocamento vertical de ar na troposfera como adiabático. A equação (1) mostra o gradiente de temperatura troposférico, calculado a partir da primeira Lei da Termodinâmica.

$$\Gamma_T = \frac{-g}{C_p} \quad (1)$$

Para o ar seco, $C_p = 1005 \text{ J/kg.K}$ e $\Gamma_T \approx -10 \text{ K/km}$ (NAPPO, 2002). A medida da taxa de decaimento adiabático da temperatura (Γ_T) deve levar em conta a umidade relativa da atmosfera. Sendo assim, para uma atmosfera úmida, a medida teórica utilizada para este coeficiente é $\Gamma_T = -6,5 \text{ K/km}$ (VAREJÃO-SILVA, 2006). A temperatura decresce quase que linearmente com a altitude, devido ao afastamento em relação à superfície e ao processo de convecção.

A interface entre a troposfera superior e a base da estratosfera é conhecida como tropopausa. Nesta camada podem ocorrer mudanças muito acentuadas com a altitude. A tropopausa atua como uma tampa, que resiste à troca de ar entre a troposfera e a estratosfera, e movimentada-se para baixo à medida que se afasta do equador, atingindo uma altitude de em torno de 8 km, nas latitudes polares (MOHANAKUMAR, 2008).

Na região tropical a tropopausa é conhecida como a tropopausa tropical, embora não haja um consenso sobre sua definição (HAYNES *et al.*, 2001). A tropopausa tropical,

determina as condições químicas das fronteiras para a estratosfera, onde o balanço radiativo desta camada, incluindo nuvens, é importante para o balanço energético global.

1.2. Tropopausa Tropical

A altitude da tropopausa também varia de acordo com os máximos e mínimos de temperatura, com baixa altitude quando mais frias e alta quando mais quente (MOHANAKUMAR, 2008). Existem várias definições para a tropopausa tropical que possuem algumas vantagens e desvantagens. São exemplos destas definições a taxa de Lapso LRT (do inglês, Lapse Rate Tropopause) e a temperatura mínima ou ponto frio, que são baseadas nas propriedades térmicas da atmosfera tropical. A LRT é definida pela OMM como o mais baixo nível no qual a temperatura varia 2 K/km ou menos, desde que a taxa média de lapso entre este nível e todos os níveis mais elevados dentro de 2 km não exceda 2 K/km. No entanto, esse nível é arbitrariamente definido para uso operacional e tem uma significância física limitada (REID e GAGE, 1985). Já o ponto frio da tropopausa é considerado importante para a troca estratosfera-troposfera (SELKIRK, 1993). Este ponto pode coincidir com a taxa de lapso, mas geralmente está acima dela. Observa-se também que a taxa de lapso e a temperatura mínima, muitas vezes se encontram dentro de uma camada de transição estável e de profundidade variável, superpondo a camada mais profunda e perifericamente estável na troposfera superior. A temperatura mínima é apenas uma definição confiável, quando a estratosfera inferior não é próxima de uma isotérmica.

A região equatorial da tropopausa está contida dentro da tropopausa tropical, contudo, pouco se conhece sobre a dinâmica da tropopausa equatorial. O estudo desenvolvido neste trabalho analisa a tropopausa sobre a cidade do Natal (5.8° S, 35.2° O) e sua região metropolitana, logo, em uma região equatorial, com o intuito de entender e destacar comportamentos da tropopausa equatorial.

2. METODOLOGIA

Os dados utilizados neste trabalho, foram obtidos por sondagens executadas por meio de balões meteorológicos lançados pelo Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), com base nas medidas de temperatura coletadas entre os anos de 2010 a 2014.

O CLBI está localizado na cidade de Parnamirim-RN, região metropolitana de Natal-RN, em uma área militar, de preservação ambiental, às margens do Oceano Atlântico. O CLBI executa lançamento e rastreamento de foguetes, além disso, possui uma estação meteorológica ativa desde 1967. Rotineiramente ocorrem lançamentos de balões meteorológicos com sondas comerciais, tendo como finalidade obter dados de orientação dos ventos, temperatura, pressão e umidade relativa, desde a superfície até uma altura de aproximadamente 25 km.

Os balões são lançados transportando sondas do tipo Vaissala, apresentada na Figura 1a. A sonda transmite os dados das medidas realizadas *in situ* para uma estação de recepção no solo. A Figura 1b apresenta o balão atmosférico na base de lançamento.

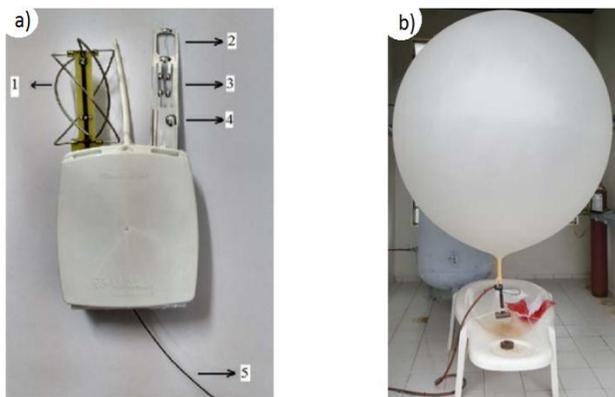


Figura 1 - a) Radiossonda do tipo Vaissala, os números de 1 a 5 entre parênteses correspondem respectivamente: localizador GPS (1), sensor de temperatura (2), sensor de umidade relativa (3), sensor de pressão atmosférica e velocidade do vento (4) e uma antena de transmissão UHF (5); b) Balão Meteorológico. Fonte: OLIVEIRA *et al.* (2016)

Os dados das sondagens possuem informações sobre a data, o horário e coordenadas do lançamento; além de tempo de voo, pressão, altura, temperatura, umidade relativa e direção do vento. A Figura 2a apresenta a construção de vários perfis verticais de temperatura a partir dos dados de sondagem de alguns dias do início do mês de março do ano de 2014 e a curva ajustada. A Figura 2b apresenta a Figura 2a comparada com os perfis gerados a partir do MSIS-90.

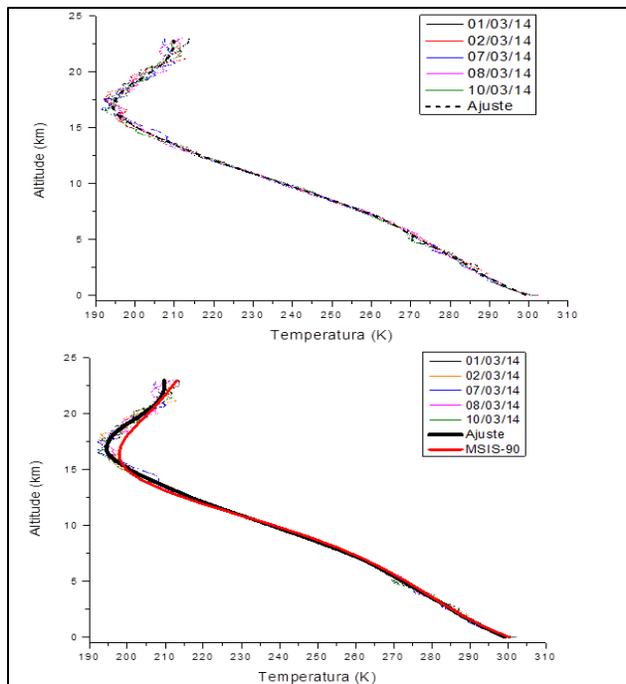


Figura 2 - a) Perfis de temperatura construídos com os dados dos balões lançados pelo CLBI, para alguns dias do mês de março de

2014, em comparação o perfil ajustado; b) Comparação entre os perfis reais com o simulado pelo MSIS-90.

O MSIS (Mass Spectrometer Incoherent Scatter) descreve a temperatura (em unidade Kelvin) e as densidades neutras na atmosfera terrestre, desde o solo até alturas termosféricas. Possui várias versões, a versão utilizada neste trabalho é a MSIS-90, a qual pode ser acessada através do endereço eletrônico: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/msis_vitmo.php

Foram utilizadas as coordenadas geográficas de Natal-RN com latitude 5,8° Sul e longitude 35,2° Oeste, porém, o modelo solicita as coordenadas da seguinte forma: latitude desde -90° até 90° e longitude de 0° à 360°. Portanto, Natal possui como coordenadas, -5,8° de latitude e 324,8° de longitude.

O MSIS-90 foi vastamente utilizado em comparações da baixa e da alta atmosfera sobre Natal, como o estudo de ondas de gravidade na estratosfera (OLIVEIRA *et al.*, 2016; CAZUZA, 2018), observações de bolhas de plasma (ABDU *et al.*, 1991), estudo da termosfera (BIONDI e SIPLER, 1985), densidade eletrônica (TAKAHASHI *et al.*, 1990), entre outros.

Para verificar se a variação da temperatura mínima da tropopausa está relacionada com algum fenômeno meteorológico, foram obtidos dados de precipitação do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para o mesmo período do banco de dados, para estação de Natal-RN. Foram feitas três classificações para precipitação:

- 1) entre 0 mm e 2 mm, dia Seco;
- 2) Maior que 2 mm e menor 20 mm, chuva moderada;
- 3) Maior que 20 mm chuva forte;

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta sessão abordaremos os resultados que foram obtidos com os dados de sondagem. Foram analisados 1849 casos, entre o período de 13/10/2010 a 30/10/2014, onde 949 sondagens foram diurnas, enquanto que 900 sondagens foram noturnas. A Tabela 1 mostra o número mensal de sondagens utilizadas neste estudo.

Tabela 1 - Número de sondagens realizadas pelo CLBI em meses entre 2010 e 2014.

DIURNO		NOTURNO	
Meses	Sondagens	Meses	Sondagens
Janeiro	103	Janeiro	106
Fevereiro	74	Fevereiro	75
Março	72	Março	74
Abril	95	Abril	83
Maio	117	Maio	98
Junho	61	Junho	55

Julho	28	Julho	29
Agosto	34	Agosto	31
Setembro	44	Setembro	41
Outubro	103	Outubro	95
Novembro	105	Novembro	105
Dezembro	113	Dezembro	108
Total	949	Total	900

A seguir serão discutidos os resultados obtidos com relação às temperaturas mínimas da tropopausa e as variações sofridas por esta região devido à sazonalidade.

3.1. Temperatura mínima da tropopausa

Inicialmente foram comparadas as temperaturas mínimas medidas (ponto frio da tropopausa) na sondagem com os resultados fornecidos pelo MSIS-90. As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, as análises diurna e noturna entre os dados experimentais e os resultados do modelo. Nas Figuras 3 e 4 os dados do balão são representados pela curva preta, enquanto que a curva azul refere-se ao resultado do modelo. Devido a grande variabilidade dos dados experimentais, foi utilizada uma suavização com o método de Savitzky-Golay para melhor representar o comportamento no decorrer dos dias (curva vermelha). Este método foi criado em 1964 e realiza concomitantemente a filtragem e a regressão de dados que a princípio contenham ruídos, gerando assim uma curva de ajuste que melhor descreverá o comportamento do gráfico (SAVITZKY e GOLAY, 1964).

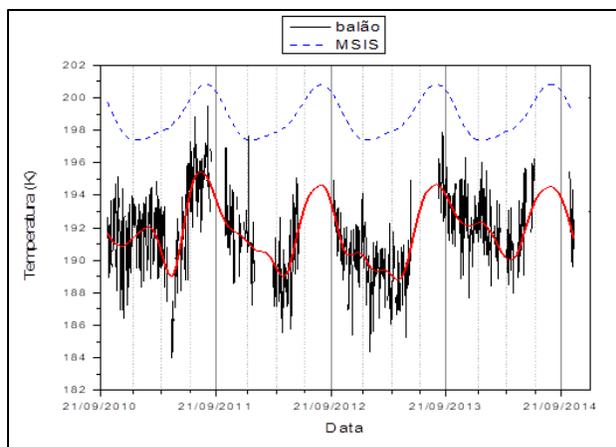


Figura 3 - Comparação da temperatura mínima da tropopausa entre os dados experimentais e o resultado do modelo durante o período diurno.

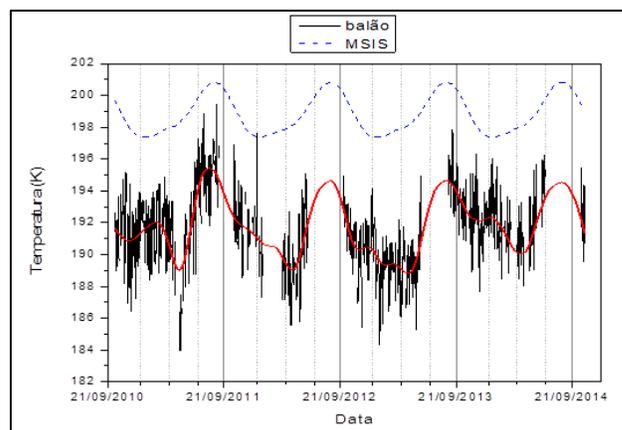


Figura 4 - Comparação da temperatura mínima da tropopausa entre os dados experimentais e o resultado do modelo durante o período noturno.

Analisando as Figuras 3 e 4 é possível observar que a temperatura mínima medida, é menor que a temperatura mínima prevista pelo MSIS-90 e que existe uma variação temporal no valor da temperatura para ambos os dados. Analisando os 1849 casos, foi verificado que a temperatura mínima média para o modelo é de aproximadamente 198,5 K (-74,7 °C), enquanto que a medida pelas sondagens fica em torno de 191,4 K (-81,8 °C), estes valores variam de acordo com as estações do ano. É interessante notar que, apesar da diferença de amplitude entre os perfis fornecidos pelo modelo e pela suavização (curvas azul e vermelha), há uma padronização quase senoidal do comportamento da temperatura em ambos os perfis, tanto diurno, quanto noturno. Porém, nos dados o crescimento dos valores de temperatura desde o mínimo para o máximo é muito mais acentuado que no modelo. Com o declínio da temperatura também ocorre um comportamento não previsto. É possível perceber uma oscilação nos valores da curva referente aos dados, provavelmente associado à sazonalidade.

A Figura 5 mostra as temperaturas mínimas médias em relação à sazonalidade. Observa-se que a tropopausa na região onde foram feitas as medidas, é mais fria que o previsto pelo MSIS-90, também é possível observar que a temperatura mínima durante o inverno é maior que durante as outras estações do ano, inclusive a do verão. Percebe-se que as temperaturas médias fornecidas pelo modelo apresentam sempre maiores valores, porém não ultrapassando a amplitude de 10 K de diferença. Uma análise mais detalhada nos mostra que as maiores diferenças estão concentradas nas estações equinociais. Contudo, apesar dos movimentos relativos entre o Sol e a Terra ser o principal regulador da temperatura da atmosfera, ele não é o único. Isto pode ser facilmente verificado na Figura 5, onde tanto o modelo quanto os dados experimentais mostram um maior valor médio de temperatura mínima para a estação do inverno.

A fim de verificar este comportamento, a Figura 6 foi elaborada. Nesta figura mostram-se as curvas de suavização da temperatura mínima da tropopausa durante o dia (curva vermelha) e durante a noite (curva preta), além de expor de uma forma mais detalhada seu comportamento com relação as estações do ano, representadas nas cores: branca para o outono, cinza para o

inverno, azul para a primavera e amarelo para o verão. Neste gráfico é possível verificar que os máximos valores médios de temperatura ocorrem durante o inverno de 2011, atingindo o valor máximo de 195,5 K durante o dia e 195 K durante a noite, enquanto que os mínimos acontecem durante o outono no qual foi verificado que o valor mínimo foi de 188,4 K durante a noite e 188,8 K durante o dia. Apesar de o outono apresentar os menores valores de temperatura, esta estação também é caracterizada pelo crescimento acentuado da temperatura, cujo pico encontra-se no inverno.

Em relação as curvas diurna e noturna, observa-se também, que as temperaturas possuem o mesmo comportamento e pouca variabilidade entra elas, porém, uma análise que requereria um maior banco de dados refere-se a fato notável do comportamento alternado entre a coincidência dos picos de valores máximos para ambos os períodos, diurno e noturno. Para os dias que não houve sondagem, o valor equivalente a este dia foi estimado através dos dados experimentais, ou seja, a partir de uma média diária da temperatura mínima.

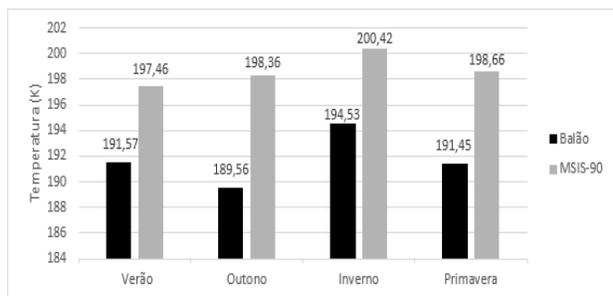


Figura 5 - Temperatura mínima da tropopausa (K) para cada estação.

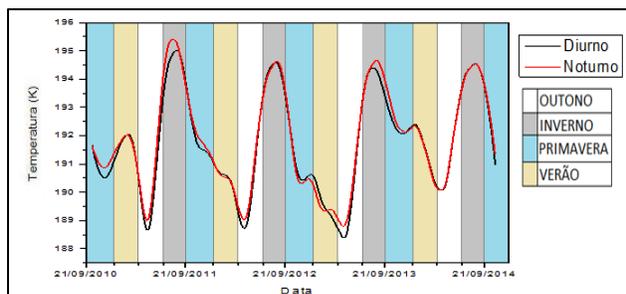


Figura 6 - Gráfico da temperatura mínima estimada da tropopausa entre 13/10/2010 e 30/10/2014.

A Figura 7 apresenta quatro gráficos que relacionam a porcentagem de precipitação diária para cada estação do ano referente ao mesmo período dos dados da radiossondagem.

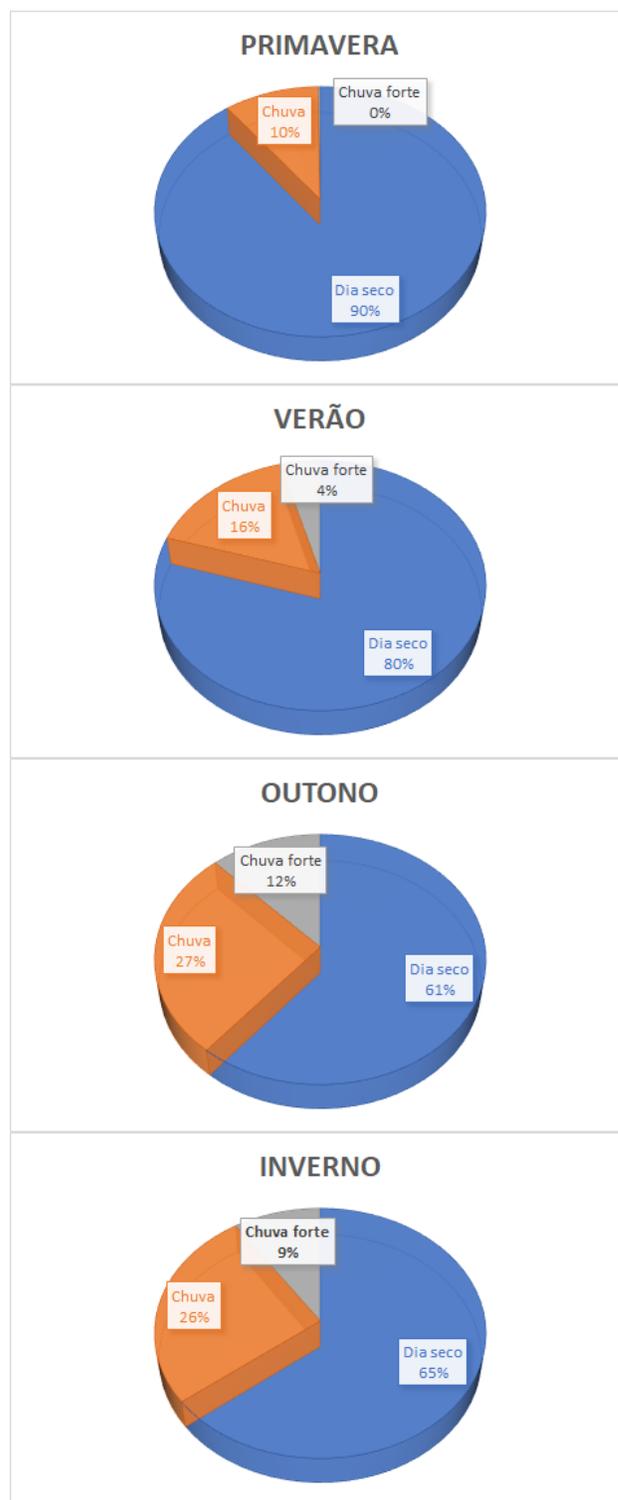


Figura 7 - Gráficos de porcentagem da precipitação diária para cada estação do ano.

A estação que apresenta maior precipitação em Natal é o outono, no qual em 39% dos dias chove, o inverno vem em seguida com uma porcentagem de 36% para dias que houve precipitação acima de 2 mm. Uma hipótese para o pico mínimo de temperatura no outono é que com o aumento das chuvas ocorre consequentemente o aumento da nebulosidade, assim, a quantidade de radiação refletida para o espaço aumenta, com isso menos energia chegará a superfície terrestre, alterando o albedo e tendendo a um resfriamento na baixa atmosfera. Portanto, este processo provoca inicialmente uma diminuição na temperatura da região da tropopausa. Porém, durante o processo de condensação do vapor d'água, ocorre liberação de energia em forma de calor latente. Esta energia é recebida pela média troposfera como calor sensível, e por meio da convecção térmica a parcela mais alta da troposfera é aquecida, elevando sua temperatura. No entanto, essa energia depositada na média troposfera não será recebida pela tropopausa de uma forma imediata, o que pode ser verificado durante o inverno com o aumento da temperatura da região da tropopausa. Entretanto, o inverno é a segunda estação mais chuvosa, porém, não é verificado um aumento de temperatura durante essa estação, uma das possibilidades para isso, é que na primavera ocorre a maior concentração de ozônio entre a tropopausa e a estratosfera (LOPO *et al.*, 2013), sendo assim, esse fato é o que influencia a termodinâmica da tropopausa durante esse período.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram analisadas as temperaturas mínimas da tropopausa sobre a região de Natal - RN. Para este propósito um banco de dados de 4 anos, contendo 1849 casos de radiossondagens de balões atmosféricos foram comparados aos resultados do modelo MSIS-90. Os principais resultados mostram que o modelo representa bem o comportamento médio das temperaturas, identificando o comportamento médio ondulatório dos dados experimentais, porém superestima os valores reais em uma ordem de até 10 K de diferença. Nos dados experimentais o crescimento dos valores de temperatura desde o mínimo valor registrado para o máximo é muito mais acentuado que no modelo. O declínio da temperatura apresenta um comportamento oscilatório o qual não é contemplado na simulação do MSIS-90.

Quanto à sazonalidade, a tropopausa sobre Natal-RN possui uma variação temporal, no qual possui um máximo de temperatura durante o inverno e o mínimo durante o outono. Dados de precipitação pluviométrica foram utilizados neste estudo com a finalidade de investigação de possíveis interferências de fatores meteorológicos no perfil de temperatura da tropopausa tropical. A estação do outono, a qual apresentou o pico mínimo de temperatura, também apresentou a maior porcentagem de ocorrência de chuvas. A hipótese aceita pelos autores deste trabalho é que a energia liberada durante o processo de condensação do vapor d'água é transferida para a tropopausa conduzindo o aumento de temperatura visto na estação seguinte. Além disso, a partir dos resultados encontrados neste trabalho novas análises deverão ser desenvolvidas para entender o motivo ao qual, mesmo o inverno sendo a segunda estação com maior índice de chuvas, a temperatura durante a primavera não sofre influência da liberação de calor, é necessário um estudo mais detalhado entre a região da média e alta troposfera durante estas

estações do ano, para verificar como é feito o transporte da energia liberada durante as chuvas no período vigente das estações.

Por fim, espera-se que o atual estudo estimule futuras investigações desta região da atmosfera, que é pouco explorada, principalmente na região equatorial.

5. REFERÊNCIAS

- ABDU, M. A. *et al.* Rocket observation of equatorial plasma bubbles over Natal, Brazil, using a high-frequency capacitance probe. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 96, n. A5, p. 7689-7695, 1991.
- BIONDI, Manfred A.; SIPLER, Dwight P. Horizontal and vertical winds and temperatures in the equatorial thermosphere: Measurements from Natal, Brazil during August–September 1982. *Planetary and space science*, v. 33, n. 7, p. 817-823, 1985.
- CAZUZA, E. P. *Um estudo das ondas de gravidade estratosféricas na região equatorial brasileira*. 2018. 90f. Tese (Doutorado em Ciências Climáticas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018. 90 p.
- GOODY, R. M.; WALKER, J. C. G. *Atmosferas planetárias*. 1ª ed. Editora Blucher, 1972. 139p.
- HAYNES, Peter; SCINOCCHA, John; GREENSLADE, Michael. Formation and maintenance of the extratropical tropopause by baroclinic eddies. *Geophysical research letters*, v. 28, n. 22, p. 4179-4182, 2001.
- HEDIN, Alan E. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 96, n. A2, p. 1159-1172, 1991.
- LABITZKE, K.; BARNETT, J. J.; EDWARDS, B. (NASA) (1985). Middle Atmosphere Program. *Handbook for MAP* (Vol. 16). Estados Unidos: Illinois.
- LOPO, Alexandre Boleira *et al.* Radiação ultravioleta, ozônio total e aerossóis na cidade de Natal-RN. *HOLOS*, v. 6, p. 3-21, 2013.
- MOHANAKUMAR, K. *Structure and composition of the lower and middle atmosphere. Stratosphere Troposphere Interactions: An Introduction*. 1ª ed. Editora Springer Science & Business Media, 2008. 416 p.
- NAPPO, C. J. *An introduction to atmospheric gravity waves*. 1ª ed. Editora Academic press, 2002. 400 p.
- OLIVEIRA, A. L. P. *et al.* Ondas de gravidade na estratosfera equatorial brasileira: estudo de caso. *HOLOS*, v. 8, p. 24-35, 2016.
- REID, George C.; GAGE, Kenneth S. Interannual variations in the height of the tropical tropopause. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 90, n. D3, p. 5629-5635, 1985.

RISHBETH, H.; GARRIOTT, O. K. *Introduction to Ionospheric Physics*. 1^oed, Editora: Academic Press, 1969. 331p.

SAVITZKY, Abraham; GOLAY, Marcel JE. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.

SELKIRK, Henry B. The tropopause cold trap in the Australian monsoon during STEP/AMEX 1987. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 98, n. D5, p. 8591-8610, 1993.

VAREJÃO-SILVA, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. 2^oed. Recife: Versão digital, 2006. 463 p.

TAKAHASHI, H. et al. Equatorial F-region OI 6300 Å and OI 5577 Å emission profiles observed by rocket-borne airglow photometers. *Planetary and space science*, v. 38, n. 4, p. 547-554, 1990.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001. R. P. Silva agradece ao CNPq (n^o 300329/2019-9), G. L. Borba e J.H. Araujo agradecem a AEB (n^o PIB10467-2013). Todos os autores são gratos ao CLBI por disponibilizar os dados de sondagens atmosféricas. Os resultados da simulação foram fornecidos pelo CCMC (Community Coordinated Modeling Center) no GSFC (Goddard Space Flight Center) através do seu sistema público (<http://ccmc.gsfc.nasa.gov>). O Modelo MSIS-90 foi desenvolvido por A. E. Hedin na NASA GSFC.

Recebido em: 24/07/2019

Aceito para publicação em: 18/12/2019