

## VARIAÇÃO SAZONAL DA AEROLUMINESCÊNCIA DO SÓDIO MESOSFÉRICO EM 7,4°S, EM TORNO DA ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA: CICLO #23

Fábio Egito<sup>1</sup>, Ricardo Arlen Buriti<sup>2</sup>, Amauri Frago de Medeiros<sup>3</sup> e Hisao Takahashi<sup>4</sup>

Recebido em 24 novembro, 2005 / Aceito em 27 julho, 2006  
Received November 24, 2005 / Accepted July 27, 2006

**ABSTRACT.** The mesospheric sodium airglow emission occurs when the sodium atom decays from the excited level  $^2P$  to the level  $^2S$ , emitting at the line D in  $\lambda = 589.3$  nm. Measurements of the emission's nocturnal intensity has been carried by a multichannel photometer installed in São João do Cariri (7, 38°S; 36, 54°W) since 1998. This work analyzed a data set corresponding to a period from 1998 to 2003, in order to study the emission's seasonal compartment. The analyses showed a strong seasonal variation. The results are in accordance to other studies completed at equatorial regions. The relationship between solar activity and NaD emission showed a correspondence during ascension and descension of the solar activity, but discrepancies arise during peak of the solar activity. On the other hand, the NaD and OH (6-2) showed similar aspects in their respective seasonal variation.

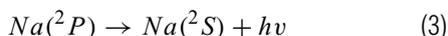
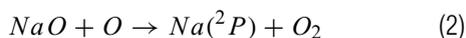
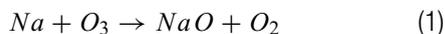
**Keywords:** mesospheric sodium, airglow, OH, solar activity.

**RESUMO.** A aeroluminescência do sódio mesosférico ocorre quando o átomo de sódio decai do estado excitado  $^2P$  para o estado  $^2S$  emitindo na linha D em  $\lambda = 589.3$  nm. Medidas da intensidade noturna da emissão têm sido realizadas por um fotômetro multicanal instalado em São João do Cariri (7, 38°S; 36, 54°W) desde 1998. Neste trabalho foi analisada uma série de dados obtidos no período de 1998 a 2003, com o objetivo de estudar o comportamento sazonal da emissão e suas possíveis relações com a emissão do OH (6,2) e com a atividade solar. As análises mostram que a emissão caracteriza-se por uma forte variação semi-anual com máximos nos equinócios e mínimos nos solstícios, estando estes resultados em concordância com outros estudos realizados em regiões equatoriais. A dependência da emissão do NaD com a atividade solar mostrou uma concordância durante a ascensão e o declínio do último ciclo solar, porém, durante o pico da atividade solar houve discrepâncias. Por outro lado, as emissões do NaD e do OH (6,2) mostraram ter aspectos semelhantes nas suas respectivas variações sazonais.

**Palavras-chave:** sódio mesosférico, aeroluminescência, OH, atividade solar.

## INTRODUÇÃO

O átomo de sódio surge na mesosfera a partir da pulverização de meteoróides que penetram na atmosfera terrestre, formando uma camada entre 80 km e 120 km de altura. A aeroluminescência do sódio é observada na linha D, centrada em  $\lambda = 589.3$  nm, quando o átomo de sódio decai do estado excitado  $^2P$  para o estado  $^2S$ . O mecanismo de reação responsável pela emissão mais aceito foi proposto por Chapman (1939):

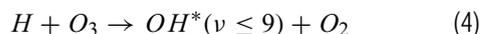


A emissão do sódio mesosférico, referida como NaD, depende da quantidade de sódio deixada no estado excitado ( $^2P$ ), e como as reações (1) e (2) ocorrem rapidamente, podemos considerar que estão em equilíbrio, assim, a taxa de emissão do NaD é proporcional às concentrações de sódio e ozônio na região de emissão. De acordo com medidas a bordo de um foguete lançado em Woomera (31, 1°S; 136, 5°E), Greer & Best (1967) observaram que o pico de emissão do NaD está situado próximo a 89 km de altura. Stegman & Witt (1977), também observaram um pico em torno de 89 km de altura. Somando-se a isso, Clemesha et al. (1993), com medidas do perfil vertical de emissão do NaD realizadas a bordo do foguete Sonda III lançado de Alcântara (2°S, 44°W), indicaram um pico de emissão próximo a 90 km de altura e um pico secundário em torno de 95 km.

A variação sazonal do NaD e sua dependência latitudinal já foram apresentadas e discutidas em alguns trabalhos anteriores. Wiens & Weill (1973) apontaram que de baixas para médias latitudes, há uma variação predominantemente semi-anual, com máximos em abril e outubro. Porém, para altas latitudes, a variação muda de semi-anual para anual com máximo no inverno e mínimo no verão. Kirchhoff & Takahashi (1985) observaram uma variação sazonal da intensidade do NaD a partir de medidas realizadas por um fotômetro instalado em Natal (7.8°S, 35.21°O), de outubro de 1983 a setembro de 1984. Os resultados mostraram que há máximos e mínimos nos equinócios e solstícios, respectivamente, indicando a presença de uma componente semi-anual na emissão. Takahashi et al. (1995), com uma série de cinco anos de dados, de 1987 a 1991, obtidos em Cachoeira Paulista (22.7°S, 45.0°O) e Fortaleza (3.9°S, 38.4°O), regiões de baixa latitude e equatorial, respectivamente, observaram uma forte variação semi-anual com máximos nos equinócios e mínimo nos solstícios, diferindo levemente na fase de máximo que no outono em Fortaleza é em março, enquanto que, em C.

Paulista, é no fim de abril, sendo que a amplitude em Fortaleza é cerca de 40% da amplitude em C. Paulista.

Semelhante à fotoquímica do sódio, a excitação do OH na mesosfera também envolve o ozônio. O OH no estado excitado é produzido principalmente pela reação exotérmica entre hidrogênio e ozônio (Bates & Nicolet, 1950), como segue:



Por outro lado, a emissão do OH tem seu pico situado em torno de 87 km de altura, portanto próximo ao pico de emissão do NaD. Esses dois fatos citados anteriormente nos levam a crer que há algum tipo de relação entre essas duas emissões. Assim, analisamos a variação sazonal do OH (6-2), medida também em Cariri, utilizando uma série de dados correspondente ao mesmo período do sódio.

Neste trabalho apresentaremos os dados das observações do NaD realizadas na região equatorial de São João do Cariri no período de 1998 a 2003, que dão uma razoável significância estatística, com o intuito de observar o comportamento sazonal da emissão, e ainda, investigar uma possível dependência desta emissão com a atividade solar, uma vez que período das observações corresponde à ascensão e declínio do ciclo solar #23.

## METODOLOGIA

As medidas do airglow do NaD são realizadas utilizando-se um fotômetro multicanal, denominado de Multi-3, com filtro de interferência inclinável. O equipamento conta com cinco filtros de interferência utilizados para medir, além do NaD, a intensidade do OI5577, OI6300, OH (6-2) e O<sub>2</sub>(0-1), e ainda a temperatura rotacional do OH (6-2) e O<sub>2</sub>(0-1); cada filtro tem 62,5 mm de diâmetro. O Multi-3, que foi desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tem uma abertura de 50 mm de diâmetro e um campo de visão de dois graus. O equipamento está instalado no Observatório da Luminescência atmosférica da Paraíba (OLAP) localizado em Cariri (7.38°S; 36, 54°O), onde opera desde 1998. São feitas observações noturnas durante um período de treze dias por mês em torno da Lua Nova. O processo de aquisição e armazenamento de dados e o controle do equipamento são automáticos, sendo controlados por um microcomputador. Mais informações sobre as características do fotômetro e os procedimentos de aquisição e análise dos dados podem ser obtidas em Takahashi et al. (1989).

O Multi-3 fornece a intensidade de emissão do sódio mesosférico, medida em Rayleigh, ( $1R = 10^6$  fótons/cm<sup>2</sup>.s.coluna). De cada noite de observação foi calculada a intensidade média da

emissão, e ainda a intensidade média mensal. A Figura 1 mostra um exemplo da medida da intensidade noturna da aeroluminescência do NaD (linha superior e pontos), eixo da direita, realizada pelo Multi-3 em função da hora local. O eixo da direita (linha inferior e pontos) mostra a variação do “background” (BG). O BG é um sinal contínuo, de banda larga, que passa pelo filtro do sódio e contamina a emissão. Assim, é importante monitorá-lo para garantir a confiabilidade dos dados. O BG é medido mudando-se a posição (inclinação) do filtro de interferência do sódio em relação ao seu eixo ótico. Com isso o comprimento de onda selecionado pelo filtro de interferência é levemente deslocado (para  $\lambda = 583.8$  nm) em relação ao qual é medida a emissão do sódio. A emissão do sódio ainda é contaminada pelos ramos P, Q e R da banda OH (8-2), que é medida em  $\lambda = 586.6$  nm. Podemos perceber da Figura 1 que quando o BG aumenta, a intensidade do NaD medida pelo Fotômetro diminui. Isto acontece porque deve ser subtraída da emissão do NaD a contaminação espectral do BG e da banda do OH (8-2), assim se o BG for alto pode superar a emissão do sódio, que é relativamente baixa, resultando numa medida negativa do NaD.

## RESULTADOS

Com o intuito de se observar o comportamento sazonal da emissão do NaD, plotamos o gráfico da sua intensidade média noturna em função do dia do ano, como mostra a Figura 2. Podemos perceber que a emissão mostrou uma forte oscilação semi-anual com máximos nos equinócios e mínimos nos solstícios.

A fim de determinar a amplitude e a fase dos componentes anuais e semi-anuais do NaD, utilizamos a análise harmônica, descrita pela seguinte equação:

$$I_{NaD} = A + B * \cos\left(\frac{2\pi * d}{360} - C\right) + D * \cos\left(\frac{2\pi * d}{182.5} - E\right) \quad (5)$$

onde  $d$  é o dia do ano,  $A$  é uma constante,  $B$  e  $D$  são as amplitudes das componentes semi-anuais e anuais, respectivamente,  $C$  e  $E$  são suas respectivas fases de máximo.

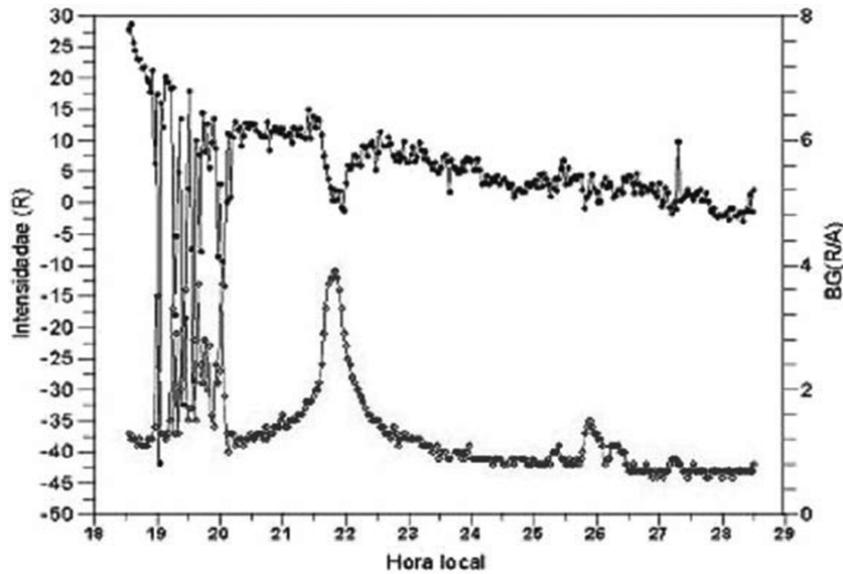
Na Tabela 1 são listados as componentes anuais e semi-anuais, obtidas a partir da equação 1, da emissão do NaD em Cariri, e para comparação, em Fortaleza e C. Paulista.

Estes primeiros resultados estão de acordo com os resultados obtidos em Fortaleza e C. Paulista por Takahashi et al. (1995), que também mostram uma oscilação predominantemente semi-anual. No entanto, há algumas diferenças quanto à amplitude de

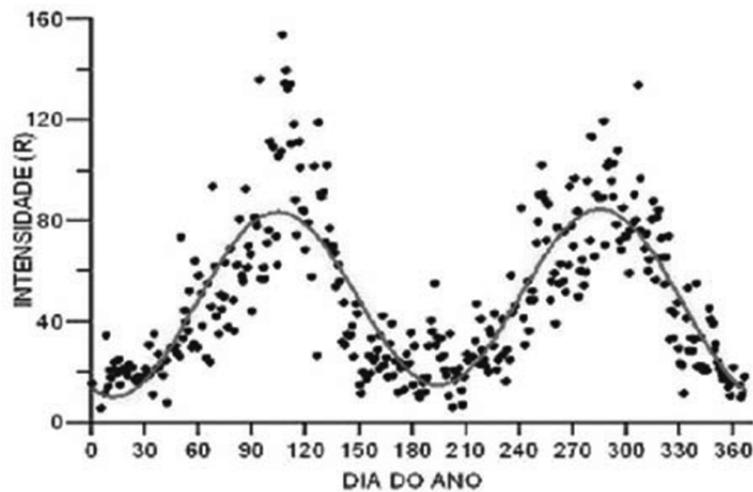
oscilação e fase de máximo. Uma comparação entre os resultados apresentados na Tabela 1, permite perceber que em Fortaleza a oscilação semi-anual é mais acentuada que em Cariri que por sua vez é maior que em C. Paulista. Isto indica que a componente semi-anual tende a diminuir à medida que a latitude aumenta, como afirmam Wiens & Weill (1973). Também percebemos que o máximo ocorre primeiro em Fortaleza, depois em Cariri e logo em seguida em C. Paulista.

Medidas da concentração de sódio realizadas em São José dos Campos (23, 2°S; 45, 9°O), Takahashi et al. (1992), mostraram uma moderada variação anual com máximo no inverno e mínimo no verão. Kirchhoff et al. (1981), derivaram a variação sazonal da abundância de ozônio a partir de medidas da concentração de sódio, por radar de laser, e da emissão do NaD. Os resultados indicaram que a abundância de ozônio tem uma oscilação semi-anual com máximos bem definidos nos equinócios. Como mencionado anteriormente, a taxa de emissão do NaD é proporcional à concentração de Na e  $O_3$ . Então, a variação semi-anual do NaD deve ser devida à variação semi-anual da concentração de ozônio (Takahashi et al., 1992). O ozônio produzido via  $O + O_2 \rightarrow O_3 + M$ , onde  $M$  é a molécula média da atmosfera, depende da concentração de oxigênio atômico. Takahashi et al. (1992), sugerem que a forte variação sazonal da concentração de oxigênio atômico e ozônio na mesopausa implica uma variação sazonal nos processos de transporte vertical. Na região de 90km o tempo de vida do oxigênio atômico aumenta muito rapidamente com altura, isso faz com que sua concentração abaixo de 90 km seja muito sensível à taxa de transporte turbulento. Isto sugere que nos solstícios há um aumento no transporte de oxigênio atômico por difusão turbulenta, resultando numa diminuição da concentração de ozônio e, conseqüentemente a intensidade do NaD deve ser baixa. Já nos equinócios, diminuído o transporte por difusão turbulenta, a concentração ozônio aumenta e a intensidade do NaD é alta.

Da Figura 2 podemos ver que o máximo de intensidade de emissão do NaD é mais elevado no primeiro equinócio que no segundo. A fim de compararmos com a emissão do NaD, plotamos a intensidade média do OH (6-2) em função do dia do ano também no período de 1998 a 2003. Podemos perceber da Figura 3 que o OH (6-2) também apresenta o mesmo comportamento do NaD descrito acima, com máximo no primeiro equinócio mais elevado que no segundo. Isto indica que de fato há uma relação entre essas duas emissões. Essa ligação entre NaD e OH (6-2) pode ser justificada pela proximidade das camadas emissoras e pela presença do ozônio na fotoquímica dessas emissões. No entanto, uma análise mais profunda deve ser feita comparando-se



**Figura 1** – Exemplo de medida da intensidade do sódio (superior) pelo fotômetro no dia 27/07/03 versus a hora local em Cariri. O eixo da direita mostra a variação do BG (inferior). O pico em torno de 21h45min refere-se à luminosidade da Via Láctea medida pelo fotômetro.



**Figura 2** – Variação sazonal da intensidade média noturna do airglow do NaD em função do dia do ano e curva de ajuste senoidal (linha contínua) a fim de salientar a variação sazonal do NaD.

a variação noturna dessas emissões, o que não está no âmbito deste trabalho.

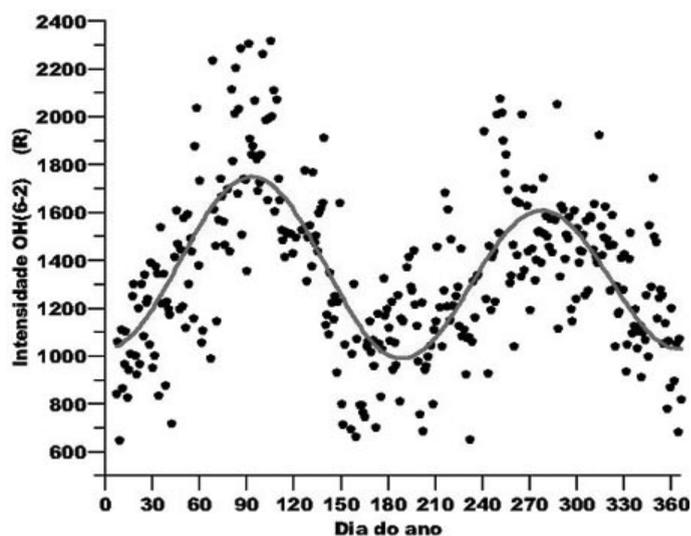
Como dito anteriormente, a taxa de emissão do NaD depende da concentração de Na e  $O_3$ . A concentração Na depende principalmente da quantidade de meteoros que penetram na atmosfera terrestre que, por sua vez, não depende da atividade solar. No entanto, a concentração de  $O_3$  é bastante influenciada pela atividade solar. A fim de observarmos a relação entre a emissão do NaD

e a atividade solar, plotamos o número médio mensal de manchas solares (linha com círculos vazios), que é um indicador da atividade solar, com uma curva de ajuste para o período do ciclo solar (linha pontilhada), de janeiro de 1998 a dezembro de 2003, e também a intensidade média do NaD (linha com círculos cheios) com uma curva de ajuste para o período do ciclo solar (linha contínua) de 1998 a 2003, como mostra a Figura 4.

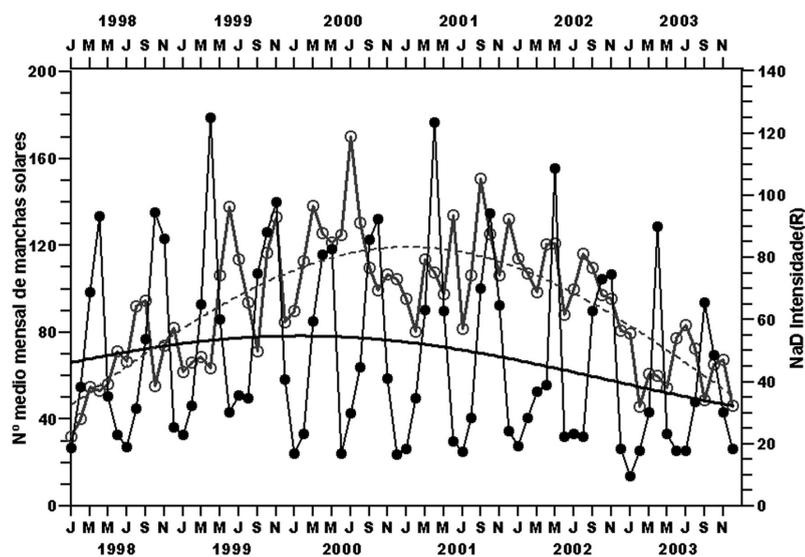
Podemos perceber que há uma tendência da emissão do NaD

**Tabela 1** – Componentes anuais e semi-anuais do NaD observados em Cariri, Fortaleza e C. Paulista. Os valores entre parênteses são as amplitudes expressas como uma porcentagem da média anual.

	$A_0$	Anual		Semi-anual	
		B	C(n dia)	D	E (n dia)
FZ	11R	2,6R (24%)	254	9,8R (89%)	96
Cariri	48,7R	2,4R (5%)	208	35,8R (74%)	103
CP	33R	9,2R (28%)	192	16,3R (49%)	109



**Figura 3** – Análoga à Figura 2, mas para o OH (6-2).



**Figura 4** – Número médio mensal de manchas solares (esquerda) e intensidade média do NaD (direita), de janeiro de 1998 a dezembro de 2003.

acompanhar a variação da atividade solar durante este período, entretanto, há uma defasagem entre a variação da atividade solar e a variação da intensidade do NaD quando estes alcançam seus respectivos máximos. Clemesha et al. (2005), analisando a influência da atividade solar sobre o comportamento da emissão do OH (6-2), com uma série de dados obtidos em C. Paulista de 1987 a 2000, observaram que a emissão do OH (6-2) oscila em fase com o ciclo solar. Como mostramos que NaD e OH (6-2) têm, ambos, variações semelhantes, deve-se esperar que a atividade solar também influencie de forma semelhante às duas emissões. Clemesha et al. (2005), também afirmam que para quantificar os efeitos da atividade solar na alta atmosfera é essencial que se tenha uma série de dados com duração de pelo menos um ciclo solar. Assim, nossa conclusão é mais sugestiva, uma vez que só utilizamos dados correspondentes a meio ciclo solar.

## CONCLUSÕES

Medidas da intensidade de emissão do NaD foram realizadas por um fotômetro multicanal instalado em São João do Cariri (7.38°S; 36, 54°O) durante seis anos, de 1998 a 2003. As análises mostram que há uma acentuada oscilação semi-anual com máximos nos equinócios e mínimos nos solstícios. Estes resultados estão de acordo com outros estudos realizados em regiões equatoriais. A relação da emissão do NaD com a atividade solar mostrou uma concordância durante a ascensão e declínio da atividade solar, entretanto, no pico da atividade solar foram observadas discrepâncias, havendo a necessidade termos dados de pelo menos um ciclo solar para termos conclusões mais precisas. Por outro lado, as variações sazonais das emissões do NaD e OH (6-2), mostraram-se bastante semelhantes.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro através do programa PIBIC/CNPq/UFCG.

## REFERÊNCIAS

BATES CA & NICOLET M. 1950. The photochemistry of atmospheric water vapor. *J. Geophys. Res.*, 55: 301 pp.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Fábio Egito.** Graduado em Física pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (2006). Desde 2003 está envolvido com a pesquisa em Geofísica Espacial como bolsista de iniciação científica. Seu principal interesse é a emissão da aeroluminescência do sódio mesosférico e do radical hidroxila, com o intuito de investigar a dinâmica e composição da região da mesosfera, e possíveis mudanças de longo prazo induzidas pela atividade solar. Além de alguns estudos com ondas de gravidade utilizando um imageador de todo o céu. Atualmente, é aluno do curso de Mestrado em Física da UFCG.

CHAPMAN S. 1939. Notes on atmospheric sodium. *Astrophys. J.*, 90: 309–316.

CLEMESHA BR, SIMONICH DM, TAKAHASHI H & MELO SLM. 1993. A simultaneous measurement of the vertical profiles of sodium nightglow and atomic sodium density in the upper atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 20(13): 1347–1350.

CLEMESHA BR, TAKAHASHI H, SIMONICH DM, GOBBI D & BATISTA PP. 2005. Experimental evidence for solar cycle and long-term change in the low-latitude MLT region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 67: 191–196.

KIRCHHOFF VWJH, CLEMESHA RB & SIMONICH DM. 1981. Seasonal variation of ozone in the mesosphere. *Journal of Geophysical Research*. 86(A3): 1463–1466.

KIRCHHOFF VWJH & TAKAHASHI H. 1985. First sodium nightglow results for Natal. *Planet Space Science*. 33: 757–760.

GREER RG & BEST GT. 1967. A rocket-borne photometric investigation of the oxygen lines at 5577Å and 6300Å, the NaD lines and continuum at 5300Å in the night airglow. *Planet Space Science*. 15: 1857–1881.

STEGMAN J & WITT G. 1977. Rocket-born sodium nightglow measurement during post-auroral conditions. *Space Res*. 17: 287–290.

TAKAHASHI H, SAHAI Y, CLEMESHA RB, SIMONICH D, TEIXEIRA NR, LOBO RM & ERAS A. 1989. Equatorial mesospheric and F-region airglow emissions observed from latitude 4° south. *Planet Space Science*, 37: 649–655.

TAKAHASHI H, CLEMESHA RB, SAHAI Y, BATISTA PP & SIMONICH D. 1992. Seasonal variations of mesospheric hydrogen and ozone concentrations derived from ground-based airglow and lidar observations. *Journal of Geophysical Research*. 97(D5): 5987–5993.

TAKAHASHI H, CLEMESHA RB & BATISTA PP. 1995. Predominant semi-annual oscillation of the upper mesospheric airglow intensities and temperatures in the equatorial region. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57(4): 407–414.

WIENS RH & WEILL G. 1973. Diurnal, annual and solar cycle variations of hydroxyl and sodium nightglow intensities in the Europe-Africa sector. *Planet Space Sci*. 21: 1011–1027.

**Ricardo Arlen Buriti.** Graduado em Física pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB (1984). Fez mestrado em Físico-Química na Universidade de São Paulo – USP (1987). Obteve seu doutorado em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (1997). Recentemente, fez Pós-Doutorado na University of Western Ontario – Canadá (2006). Suas áreas de interesse em pesquisa são a dinâmica e a temperatura na região da mesosfera. É professor do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

**Amauri Fragoso de Medeiros.** Licenciado em Física pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB (1984), fez mestrado em Ensino de Ciências na Universidade de São Paulo – USP (1995). Em 1998 ingressou na área de pesquisa espacial, concluindo seu doutorado em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2001). Seu interesse em pesquisa é pelo estudo da dinâmica da região da mesosfera (ondas de gravidade) e da ionosfera (bolhas de plasma) utilizando um imageador de todo o céu. É professor do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

**Hisao Takahashi.** Graduado e mestre em Física pela Universidade de Niigata – Japão, em 1968 e 1970, respectivamente. Fez doutorado em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (1980), onde atua como pesquisador e é líder do grupo LUME que faz pesquisas na área de luminescência atmosférica. Fez pós-doutorado nas Universidades de Kyoto – Japão e Estocolmo – Suécia, em 1982 e 2001, respectivamente. Ainda realiza pesquisas nas áreas de: química e dinâmica da alta atmosfera, sondagem da alta atmosfera com foguetes, bolhas ionosféricas, dinâmica da termosfera e acoplamento termosfera-ionosfera em baixas latitudes, acoplamento ionosfera-meio interplanetário, além de colaborar com outros grupos de pesquisa.