

## Características Espectrais de Ondas de Gravidade na Alta Atmosfera em 23°S

Marden H. S. Souza  
P. Batista  
B. R. Clemesha  
D. M. Simonich.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais C.P. 515, CEP 12201-970 São José dos Campos, SP.  
Telefone: (012) 325-6955 Fax: (012) 325-6952.

E-mail: INPEDAA@EU.ANSP.BR Internet: <http://www.inpe.br/laser/home>  
Palavras-Chave: Dinâmica atmosférica, climatologia, ondas de gravidade, laser

### Abstract

The nightly and seasonal variations in gravity wave activity in the mesopause region are studied by analyzing 71 nights of atmospheric sodium (80 - 105 km) densities observations obtained by a laser radar during a 8-year period at São José dos Campos (23°S, 46°W). The data are used to calculate the atmospheric density perturbations and its spectra in temporal frequency [ $F_a(\omega) \times \omega$ ] and in vertical wavenumber [ $F_a(m) \times m$ ]. The atmospheric density variances,  $\omega$  spectra magnitudes, and  $m$  spectra magnitudes all exhibit considerable nightly variability and a weak annual and semiannual variations. The rms atmospheric density perturbations has an annual mean value of 6.85%. The  $\omega$  and  $m$  spectra exhibit power law shapes with slopes varying, respectively, between -1.02 and -2.04, and between -1.39 and -3.93. The annual mean slopes are -1.34 [ $F_a(\omega)$ ] and -2.42 [ $F_a(m)$ ].

### 1. Introdução

Ondas de gravidade têm um papel central no estabelecimento da circulação de larga escala e da estrutura da média atmosfera. Ondas geradas na baixa atmosfera por processos como convecção, cisalhamento de ventos e efeitos do relevo, propagam-se verticalmente para cima e, na ausência de dissipação, suas amplitudes crescem exponencialmente até uma certa altura onde os gradientes de temperatura ou de vento induzidos pelas ondas tornam-se instáveis. A partir desta altura, o crescimento vertical da amplitude passa a ser limitado pela dissipação da energia ondulatória, gerando turbulência. Isto resulta na mistura de calor e constituintes, enquanto a convergência do fluxo vertical de momentum horizontal, associado com a onda, acelera (ou desacelera) o fluxo médio. Uma parametrização destes efeitos (Lindzen, 1981) aplicada a modelos numéricos demonstra que a dissipação de ondas de gravidade pode ser responsável pelo grande desvio do equilíbrio radiativo observado na mesosfera (Holton, 1983).

Devido à sua estabilidade química, a camada de sódio atmosférico, situada entre aproximadamente 80 a 105 km de altitude, tem sido usada como traçadora de movimentos ondulatórios na alta atmosfera. As perturbações na densidade de sódio são causadas principalmente pelo deslocamento vertical da camada imposto pela componente vertical dos ventos associados a ondas de gravidade e, devido ao efeito de amplificação, são tipicamente muito maiores que as correspondentes perturbações na densidade atmosférica. A interação de ondas com a camada de sódio permite que se relacione diretamente as perturbações na densidade de sódio com as perturbações associadas à densidade atmosférica (Gardner e Shelton, 1985; Gardner et al., 1989). Neste trabalho apresentamos uma análise das variâncias e espectros da densidade atmosférica obtidos a partir de observações da camada de sódio mesosférico com o radar de laser do INPE em São José dos Campos (23°S, 46°O). Os dados incluem 71 noites de observações distribuídas ao longo do ano, permitindo investigar o comportamento sazonal da atividade de ondas e suas características espectrais. As características do campo de ondas investigadas incluem a variação sazonal das perturbações médias quadráticas na densidade atmosférica, seus respectivos espectros em frequência temporal [ $F_a(\omega) \times \omega$ ] e em número de onda vertical [ $F_a(m) \times m$ ].

### 2 Metodologia e Resultados

Assumindo o perfil não perturbado de densidade de sódio modelado por uma distribuição Gaussiana, as flutuações relativas na densidade de sódio  $\rho_s'/\bar{\rho}_s$  podem ser expressas em termos das flutuações relativas na densidade atmosférica (Gardner et al., 1989):

$$r_s(z, t) = -\frac{1}{\gamma - 1} \left[ 1 - \frac{\gamma H(z - z_0)}{\sigma_0^2} \right] r_a(z, t), \quad (1)$$

onde

$$r_s(z, t) = \rho_s' / \bar{\rho}_s, \quad (2)$$

$$r_a(z, t) = \rho_a' / \bar{\rho}_a \equiv \frac{N}{g} \int_{-\infty}^t w' [x - (t - \tau) \bar{u}(z), z, \tau] d\tau, \quad (3)$$

sendo  $\gamma$  a razão de calores específicos (-1,4),  $H$  a altura de escala atmosférica (~6 km),  $z_0$  a altura do centro de massa da camada de sódio não perturbada (-93 km),  $\sigma_0$  a largura rms da camada de sódio não-perturbada (-5 km),  $w'$  as perturbações no vento vertical e  $\bar{u}(z)$  o perfil de vento horizontal médio. Os apóstrofes em  $\rho_s'$  e  $\rho_a'$  indicam a quantidade perturbada, enquanto a barra horizontal superior denota a quantidade média associada. A equação (1) pode ser usada para relacionar várias quantidades estatísticas, tais como os espectros e os valores rms de  $r_s(z, t)$ , às correspondentes quantidades para  $r_a(z, t)$ .

Utilizando o conjunto das 71 noites de dados obtidos com o radar de laser do INPE, em São José dos Campos, as perturbações médias quadráticas na densidade atmosférica são estimadas tomando-se a média de  $r_s^2(z, t)$  em altura ou tempo, ou uma combinação de ambos, e então aplicando-se a equação (1) para determinar os fatores de escala apropriados. Os perfis de densidade de sódio são primeiramente filtrados em tempo e em altura para remover efeitos de ondas com períodos menores que 30 minutos e comprimentos de onda verticais menores que 4 km. As variações temporais de  $\langle r_a^2 \rangle$  são calculadas tomando-se a média de  $r_s^2$  através da camada de sódio e sobre um período de  $T=2$  horas. Na Figura 1 é mostrada a variação sazonal das perturbações rms. Estes dados incluem os efeitos de ondas com períodos entre 30 minutos e ~4 horas, e comprimentos de onda verticais entre 4 e ~40 km. Os símbolos representam a média para a noite, enquanto as barras verticais demarcam o intervalo de variação para a noite. A média anual é 6,85%. A linha sólida representa um ajuste por mínimos quadrados à variância, utilizando componentes média, anual e semianual.

As características de crescimento da amplitude do campo de ondas podem ser investigadas calculando-se os valores médios quadráticos de  $r_s(z, t)$  em cada altitude na camada de sódio e tomando-se a média sobre o período completo de observação. A Figura 2 mostra as perturbações rms na densidade atmosférica em função da altura, calculada através da média dos perfis noturnos individuais. As flutuações na densidade variam de 3% (~14 m/s) em 85 km a 10% (~45m/s) em 105 km de altura. O comprimento para crescimento referente aos dados da Figura 2 é de 27 km. As características de crescimento para noites individuais são altamente variáveis (8 a 528 km). Para ondas não saturadas o comprimento para crescimento teórico é  $2H=12$  km. O comprimento para crescimento para os perfis de densidade médios no inverno, outono, primavera e verão são respectivamente 55km, 33 km, 24 km e 17 km.

O espectro em frequência temporal é obtido pela aplicação do fator de escala adequado ao espectro de  $r_s(z, t)$ . Os espectros temporais são calculados em cada altitude na camada de sódio e promediados aritmeticamente:

$$F_a(\omega) \equiv \frac{\mu^2}{L} \int_{z_0-L/2}^{z_0+L/2} \frac{\langle |R_s(z, \omega)|^2 \rangle}{T} dz, \quad (4)$$

onde

$$R_s(z, \omega) = \int_0^T r_s(z, t) e^{i\omega t} dt. \quad (5)$$

Os espectros temporais são calculados para cada noite usando a resolução temporal total dos dados de densidade de sódio, os quais foram previamente filtrados em altura para eliminar comprimentos de onda menores que 4 km. As variações sazonais das amplitudes espectrais em  $\omega_{240}=2\pi/(02:40 \text{ horas})$ ,  $\omega_1=2\pi/(01:00 \text{ hora})$  e  $\omega_{30}=2\pi/(00:30 \text{ min.})$  são mostradas na Figura 3. As amplitudes apresentam grande variabilidade, com tendência de aumento no verão. O espectro médio anual para o conjunto das 71 noites apresenta uma inclinação espectral, calculada no intervalo de períodos de 30 a 120 minutos, é de -1,42. As inclinações espectrais são, respectivamente, -1,39, -1,41, -1,33 e -1,00 para o outono, inverno, primavera e verão.

Os espectros em número de onda vertical são calculados para cada noite usando a resolução vertical total dos dados de densidade de sódio após estes terem sido filtrados em tempo para eliminar períodos menores que 30 minutos. O espectro é calculado para cada perfil de toda a noite de dados e então promediados aritmeticamente. As variações sazonais das amplitudes espectrais em  $m_8=2\pi/(8 \text{ km})$  e  $m_4=2\pi/(4 \text{ km})$  são mostradas na Figura 4. As amplitudes também apresentam grande variabilidade, com tendência de aumento no verão. O espectro médio anual para o conjunto das 71 noites apresenta uma inclinação espectral, calculada no intervalo de comprimentos de onda de 2 a 10 km, de -2,47. As inclinações espectrais são, respectivamente, -2,52, -2,44, -2,25 e -3,57 para o outono, inverno, primavera e verão.

### 3 Discussão e Conclusão

Os resultados apresentados na Figura 1 sugerem uma atividade de ondas de gravidade em 23°S praticamente constante ao longo do ano. No entanto, deve ser considerado que nossos dados concentram-se nos meses de inverno, com apenas 10 noites referentes aos períodos de outono e verão. A magnitude dos espectros  $F_a(\omega)$  em períodos menores que 02:40 hs e dos espectros  $F_a(m)$  em comprimentos de onda verticais iguais a 8 km e 4km mostram, porém, variações anuais e semianuais, com tendência a uma maior potência espectral no verão.

Variações anuais e semianuais na atividade de ondas de gravidade foram observadas nos dados de densidade de sódio obtidos com um radar de laser em Urbana (40°N, 88°W) (Senft e Gardner, 1991), com o máximo para a componente semianual ocorrendo nos solstícios, principalmente no verão. Variações semianuais foram também observadas com radares de microondas em Saskatoon (52°N, 107°W) (Meek et al., 1985), Adelaide (35°S, 138°E) (Vincent e Fritts, 1987), e Shigaraki (35°N, 136°E) (Tsuda et al., 1990), com o máximo semianual ocorrendo próximo ou logo após os solstícios. Hirota (1984), analisando dados de flutuações de vento e temperatura medidos por sondagem via foguetes na estratosfera, reporta variações sazonais na atividade de ondas em diversas localizações geográficas. Em altas latitudes foi observada uma componente anual dominante com máximo no verão, enquanto em baixas latitudes foram observadas ambas as componentes anual e semianual, porém com os máximos semianuais situados próximos aos equinócios. Observações da intensidade dos ecos do radar MST na mesosfera em Poker Flat, Alaska (65°N) mostram uma variação semianual com mínimos nos equinócios e uma grande variabilidade anual (Balsley et al., 1983).

### 4 Bibliografia

Balsley, B. B.; Carter, D. A. The spectrum of atmospheric velocity fluctuations at 8 km and 86 km. *Geophys. Res. Lett.*, **9** (4):465-468, 1982.

Gardner, C. S.; Senft, D. C.; Beatty, T. J.; Bills, R. E.; Hostetler, C. A. Rayleigh and sodium lidar techniques for measuring middle atmosphere density, temperature and wind perturbations and their spectra. In: Liu, C. H., and Edwards, B. ed. *World Ionosphere/Thermosphere Study Handbook*. Urbana, ICSU, 1989. p. 148-186.

Gardner, C. S.; Shelton, J. D. Density response of neutral atmospheric layers to gravity wave perturbations. *J. Geophys. Res.*, **90** (A2):1745-1754, 1985.

Hirota, I. Climatology of gravity waves in the middle atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **46** (9):767-773, 1984.

Holton, J. R. The influence of gravity wave breaking on the general circulation of the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **40** 2497-2507, 1983.

Lindzen, R. S. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *J. Geophys. Res.*, **86** (C10):9707-9714, 1981.

Meek, C. E.; Reid, I. M. e Manson, A. H. Observations of mesospheric wind velocities, 2, Cross sections of power spectral densities for 48-8 hours, 8-1 hours, and 1 hour to 10 min over 60-110 km for 1981. *Radio Sci.*, **20** 1383-1402, 1985.

Senft, D. C.; Gardner, C. S. Seasonal variability of gravity wave activity and spectra in the mesopause region at Urbana. *J. Geophys. Res.*, **96** (D9):17,229-17,264, 1991.

Tsuda, T.; Murayama, Y.; Yamamoto, M.; Kato, S.; Fukao, S. Seasonal variation of momentum flux in the mesosphere observed with the MU radar. *Geophys. Res. Lett.*, **17** (6):725-728, 1990.

Vincent, R. A.; Fritts, D. C. A climatology of gravity wave motions in the mesopause region at Adelaide, Australia. *J. Atmos. Sci.*, **44** (4):748-760, 1987.

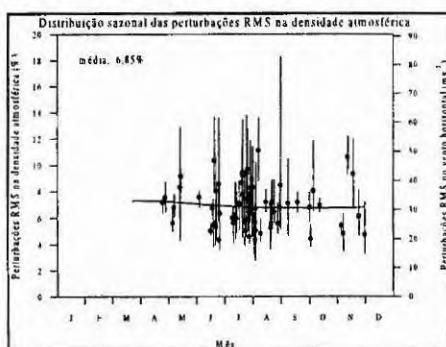


Figura 1 - Variações sazonais das perturbações rms na densidade atmosférica em 23o S.

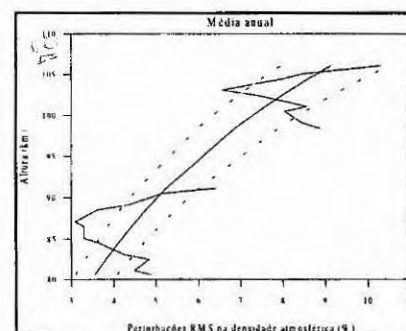


Figura 2 - Perfil médio anual das perturbações rms na densidade atmosférica em 23o S.

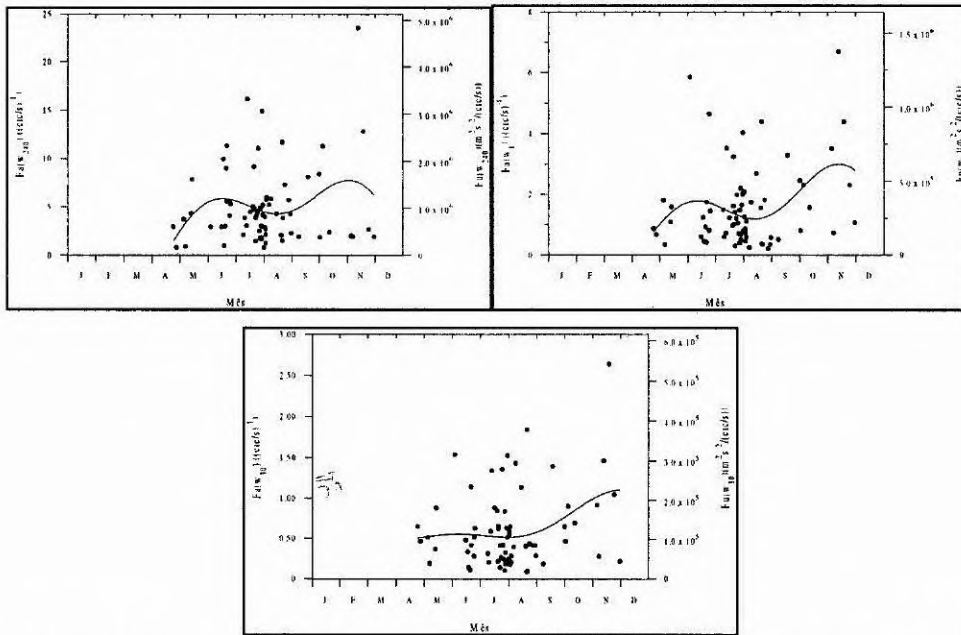


Figura 3 - Distribuições sazonais das amplitudes espectrais nas freqüências temporais  $\omega_{240}=2\pi/(02:40 \text{ horas})$ ,  $\omega_1=2\pi/(01:00 \text{ hora})$  e  $\omega_{30}=2\pi/(00:30 \text{ min.})$ , em  $23^\circ \text{ S}$ . As curvas representam o ajuste por mínimos quadrados com as componentes média, anual e semianual.

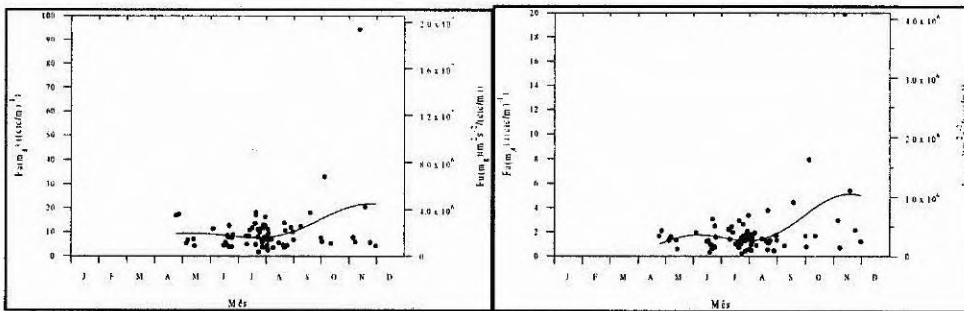


Figura 4 - Distribuições sazonais das amplitudes espectrais nos comprimentos de onda verticais  $m_8=2\pi/(8 \text{ km})$  e  $m_4=2\pi/(4 \text{ km})$ , em  $23^\circ \text{ S}$ . As curvas representam o ajuste por mínimos quadrados com as componentes média, anual e semianual.

## Variação nas Características de Umidade nos Anos de El Nino e La Nina de 1987 e 1988

*Iracema F. A. Cavalcanti (1)  
Vadlamudi B. Rao (2)*

*(1) Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos-CPTEC*

*(2) Divisão de Ciências Meteorológicas-DCM  
Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE*

### Abstract

Characteristics of meteorological fields for El Nino (1987) and La Nina (1988) years are examined. These fields show some of the well known characteristics associated with ENSO and are consistent with the observed precipitation. In this paper the vertically integrated water vapour transport and its divergence are calculated for these two years. The data set used is the reanalysis of National Centers for Environmental Prediction (NCEP). The differences in the transport of water vapour are directly connected to differences in precipitation. In a large part of South America the precipitation is higher in 88/89 than in 86/87. In the Asian monsoon region also precipitation is higher in June, July, August and September (JJAS) of 1988 than in JJAS of 1987. The difference in divergence of water vapour transport is high in the equatorial