



## Observações de ondas de gravidade de média escala na região equatorial do Brasil

I. Paulino<sup>a</sup>, H. Takahashi<sup>a</sup>, A. F. Medeiros<sup>b</sup>, R. A. Buriti<sup>b</sup>, C. M. Wrasse<sup>c</sup> e D. Gobbi<sup>a</sup>

<sup>a</sup>INPE, São José dos Campos, Brasil

<sup>b</sup>UFCG, Campina Grande, Brasil

<sup>c</sup>Vale Soluções em Energia, São José dos Campos, Brasil

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the Twelfth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

**Using images of the OHNIR airglow emission over São João do Cariri (7.4°S; 36.5°W) during the second Spread-F Experiment (SpreadFEx), from September to November 2009, 26 medium-scale gravity waves (MSGW) were observed, and their observed parameters were estimated. Simultaneous measurements of the mesospheric winds and temperature [obtained by a meteor radar and an OH(6,2) photometer, respectively] were used to calculate the intrinsic parameters of these waves. The characteristics of these waves, in general, are similar to it was observed during the first campaign. Most waves presented wavelengths between 50 and 150 km, periods from 20 to 100 min, and phase between 20 m/s and 80 m/s, propagating eastward. The intrinsic parameters reveal that the wind may reduce the phase speeds. Most waves had vertical wavelength smaller than 20 km. Furthermore, two MSGWs presented an unusual intrinsic phase speed, i.e, they were faster than 85 m/s. These two waves have a potential to reach altitudes higher than 150 km, and, consequently, they may be more powerful in seeding equatorial spread F.**

### Introdução

Ondas de gravidade são o principal mecanismo de transporte de energia e momentum na atmosfera terrestre, por isso, elas destacam-se como atual tópico de pesquisas porque podem influenciar nos processos turbulência e mistura dos gases, na circulação geral e na estrutura térmica da média e alta atmosfera. Muito esforços são feitos para conhecer melhor as fontes, as condições de propagação que incluem reflexão, refração e dissipação e, conseqüentemente, os efeitos das ondas de gravidade na atmosfera de fundo (um revisão completa sobre ondas de gravidade pode ser encontrada em Fritts e Alexander, 2003). Outro aspecto que está sendo bastante estudado é a possibilidade de interação da atmosfera neutra com a atmosfera ionizada, mais especificamente, a possibilidade de ondas de gravidade poderem ser agentes potencialmente capazes de iniciar bolhas de plasma ionosféricas (e.g., Kelley et al., 1981; Anderson et al.,

1982; Rottger, 1982; Hysell et al., 1990; Huang and Kelley, 1996; Nicolls and Kelley, 2005; Tsunoda, 2007; Fritts et al., 2008; Keskinen and Vadas, 2009). Para tentar ampliar o conhecimento dessa possível interação de ondas de gravidade com bolhas de plasma ionosféricas, uma campanha denominada Spread F Experiment (SpreadFEx) foi montada na região equatorial brasileira. As motivações científicas e logísticas dessa campanha são detalhadas no trabalho de Fritts et al. (2009).

A maioria das ondas de gravidades observadas com imagens de airglow possui comprimentos de ondas entre 10 e 100 km, períodos de algumas dezenas de minutos e velocidades de fase entre 20 e 80 m/s (e.g. Taylor et al., 1997; Medeiros et al., 2004). Essas ondas são comumente chamadas de ondas de gravidade de pequena escala e a estimação dos seus parâmetros é feita através da análise bidimensional de Fourier. Esse tipo de onda de gravidade é muito importante no processo de deposição de momentum e energia na mesosfera e baixa termosfera, contudo, não conseguem atingir altitudes elevadas na termosfera devido aos processos dissipativos. Por outro lado, uma outra classe de ondas de gravidade, com comprimentos de onda horizontais maiores que 100 km conseguem atingir altitudes mais elevadas dentro da termosfera (Vadas, 2007; Vadas and Fritts, 2009). Essas ondas, por sua vez, recebem o nome de ondas de gravidade de média escala e ainda podem ser observadas nas imagens de airglow mesosférico, porém, uma outra técnica conhecida como Keograma é necessária para caracterizar-las (e.g. Taylor et al., 2009).

Nesse trabalho serão apresentados os parâmetros intrínsecos e observados de 26 ondas de gravidade de média escala que foram detectadas em São João do Cariri de setembro a novembro de 2009 durante a segunda fase da campanha SpreadFEx. Para calcular os parâmetros intrínsecos dessas ondas foram usados medidas simultâneas de vento e temperatura obtidos por um radar meteorológico e um fotômetro de airglow, respectivamente.

### Instrumentação e observações

As imagens de airglow foram coletadas por um imageador "all sky" instalado em São João do Cariri. O imageador é um instrumento óptico que mede várias linhas e bandas do espectro do airglow noturno. Foram adquiridas imagens da emissão do OHNIR mesosférico com um tempo de integração de 15s e amostras a cada 2min em média para construir os Keogramas e, conseqüentemente, estudar essas ondas. Mais detalhes do imageador de Cariri pode ser encontrado em Medeiros et al. (2004).

Os ventos na altitude da emissão OH mesosférico foram obtidos por um radar meteorológico também instalado naquela localidade (ver o trabalho de Buriti et al., 2008 para maiores detalhes do radar). A temperatura foi medida por um fotômetro de luminescência que mede a emissão do OH(6,2) e fornece a temperatura rotacional dessa banda (ver Takahashi et al., 1989).

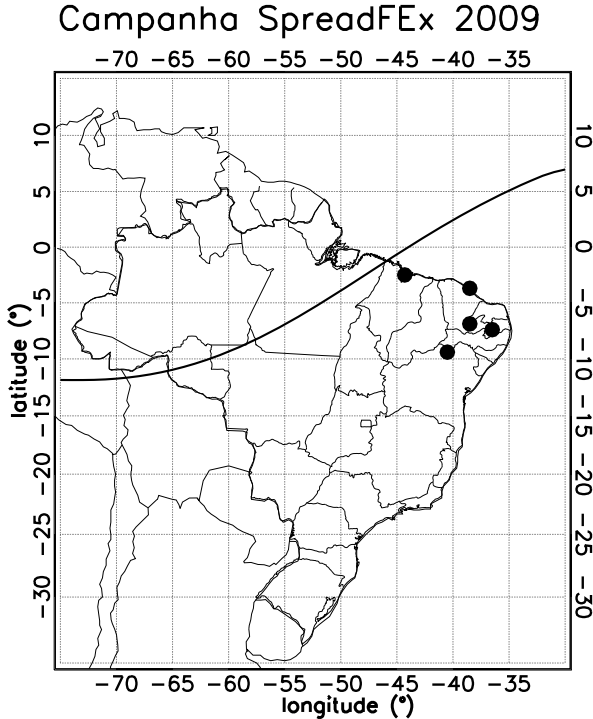


Figure 1: Locais de observações durante a segunda campanha SpreadFEx (círculos pretos). A linha sólida contínua indica o equador magnético.

As observações foram feitas de setembro a novembro de 2009 durante a segunda fase da campanha SpreadFEx. Nessa campanha vários instrumentos operaram simultaneamente com o objetivo de reunir um amplo banco de dados que permita estudar com mais detalhes a dinâmica e acoplamento da mesosfera-termosfera-ionosfera. O principal objetivo científico dessa campanha é entender o papel das ondas observadas na mesosfera quando essas se propagam na termosfera. Na Figura 1 pode ser visto um mapa do Brasil com círculos pretos indicando os locais nos quais tiveram observações durante a segunda fase da campanha.

**Metodologia**

A Figura 2 sumariza o método de keogramas usado para para estimação dos parâmetros de ondas de gravidade de média escala. Na parte superior dessa figura, tem-se as áreas ampliadas dos keogramas norte-sul (esquerda) e leste-oeste (direita) para o intervalo de tempo 00:00-02:00 horas universais. Em ambos os keogramas é observado uma estrutura periódica de ~ 60 min que apresenta uma propagação de fase conforme indica as setas dos painéis inferiores dessa figura, cada curva desses painéis inferiores corresponde a uma linha horizontal branca dos painéis superiores. Usando essas propagações de fases é possível estabelecer a velocidade de propagação da

fase em ambas as direções, consequentemente, usando o período que foi determinado pela análise de Fourier, se pode estimar o comprimento de onda horizontal e a direção de propagação da fase. Nesse caso, o comprimento de onda horizontal foi de ~ 360 km, a velocidade de propagação da fase foi de ~ 100 m/s e a direção de propagação foi de 26° a partir do norte.

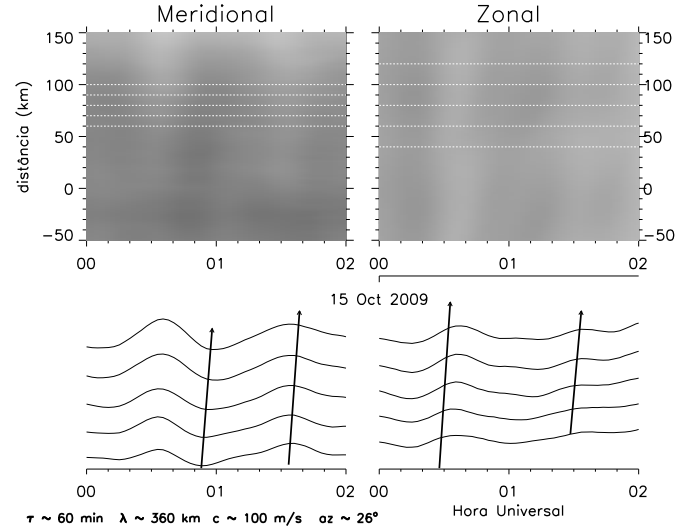


Figure 2: Exemplo da estimação dos parâmetros das ondas de gravidade de média escala. No lado esquerdo, tem-se o keograma na direção sul-norte no topo. Na parte inferior as curvas representam as estruturas das linhas brancas tracejadas sobre plotadas nos keogramas. O Lado direito é semelhante ao esquerdo, porém para o keograma oeste-leste. As setas pretas na parte inferior apontam para propagação de fase das estruturas.

Os parâmetros intrínsecos das ondas de gravidade também foram calculados, nesse caso, a frequência intrínseca é dada por

$$\omega_l = \omega_{obs} - kU - lV, \tag{1}$$

em que  $\omega_{obs}$  é a frequência observada pelas imagens de airglow  $k$  é o número de onda zonal ( $k = 2\pi/\lambda_x$ ),  $l$  é o número de onda vertical ( $l = 2\pi/\lambda_y$ ),  $U$  é o vento zonal e  $V$  é o vento meridional. Ambas as componentes do vento foram medidas pelo radar meteorológico de São João do Cariri para uma altitude média de 87 km.

Medidas simultâneas de temperatura nessa mesma altitude permitiram também estimar o comprimento de onda vertical dessas ondas a partir da relação de dispersão de Gossard and Hooke (1975), i.e.,

$$m^2 \simeq \frac{(k^2 + l^2)N^2}{\omega_l^2} - (k^2 + l^2) - \frac{1}{4H^2}, \tag{2}$$

a altura de escala  $H$  é definida como  $d\bar{p}/dz \equiv -\bar{p}/H$ , a frequência de flutuabilidade é  $N^2 \equiv (g/\bar{\theta}) d\bar{\theta}/dz$  ( $g$  é a gravidade local,  $\bar{\theta}$  é a temperatura potencial), e o comprimento de onda vertical é  $\lambda_z = 2\pi/m$ .

## Resultados e Discussões

A Figura 3(a) apresenta um histograma para os períodos observados, a maior parte das ondas encontram-se num intervalo de 20 – 100 *min*, uma delas tem período menor que 20 *min* e outra superior a 100 *min*. O histograma dos comprimentos de ondas horizontais pode ser visto na Figura 3(b) e mostra que a maior parte das ondas são menores de 150 *km*. Com relação a velocidade de fase horizontal [Figure 3(c)], a maioria das ondas são mais lentas que 80 *m/s* (os círculos tracejados representam isolinhas de velocidades de fase espaçado de 25 *m/s*). Contudo, três ondas apresentam velocidades de fase expressivas, i.e., maiores de 80 *m/s*, ondas dessas natureza não foram vista na primeira campanha (Taylor et al., 2009) e merecem um olhar mais cuidadoso porque, ondas mais rápidas podem sofrer menos interferência do vento de fundo e, conseqüentemente, podem atingir altitudes mais elevadas.

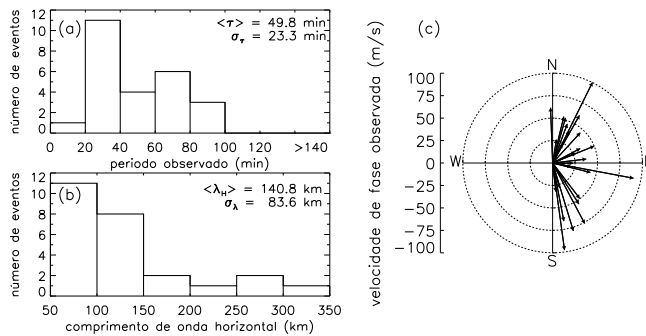


Figure 3: Histogramas mostrando (a) os períodos, (b) os comprimentos de ondas horizontais e (c) as velocidades horizontais de fase para ondas de gravidade de média escala observadas em São João do Cariri.  $\langle \rangle$  representa o valor médio e  $\sigma$  o desvio padrão.

Os resultados apresentados na Figura 3 não diferem muito do que foi observado por Taylor et al. (2009) na primeira fase da campanha. Isso indica que o espectro de ondas de gravidade de média escala não está mudando nessa época do ano na região de São João do Cariri. Esse fato leva a concluir que as fontes geradoras desse tipo de ondas não estão mudando significativamente ano a ano. O que mais chamou a atenção foi as três ondas rápidas que foram observadas. Para entender um pouco mais a natureza dessas ondas os parâmetros intrínsecos foram calculado e são mostrados na Figura 4. É possível ver que a maioria das ondas diminuíram suas velocidades horizontais de fase [Figura 4 (c)], além disso, os períodos intrínsecos apresentaram uma tendência de crescimento quando comparados com os períodos observados. Mesmo assim, duas das três ondas discutidas acima permaneceram com velocidades de fases maiores que 85 *m/s* fortalecendo as evidências que essas ondas podem ser mais propícias para se propagarem através da termosfera-ionosfera (Tl).

Os comprimentos de ondas verticais também foram calculados e são mostrados na Figura 4(c). O histograma mostra que a maior parte das ondas têm comprimentos de ondas inferiores a 20 *km*. De acordo com o modelo de propagação de ondas de gravidade de

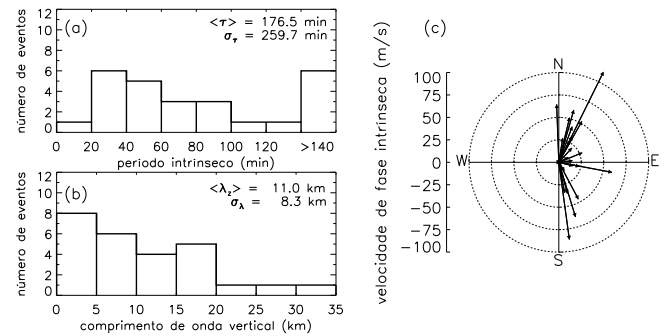


Figure 4: Semelhante a Figura 3, só que para os parâmetros intrínsecos e (b) é o histograma para os comprimentos de ondas verticais.

Vadas (2007), ondas com esses perfis, penetram na termosfera até altitudes inferiores a 150 *km* antes de iniciarem suas dissipações. Por outro lado, duas ondas rápidas apresentaram comprimentos de ondas maiores que 25 *km*, nesse caso, a altitude de dissipação dessas ondas deve ser superior a 150 *km* de acordo com o modelo. Sendo assim, essas ondas rápidas aparecem com candidatas fortes para um estudo mais detalhado sobre suas condições de propagação na atmosfera, portanto, a aplicação da técnica de ray tracing para essas ondas usando condições termodinâmicas realísticas, que podem ser obtidas pelo banco de dados adquirido durante a campanha, trará uma visão melhorada para as pesquisas sobre o acoplamento entre mesosfera e ionosfera.

## Conclusões

Em resumo, observações de 26 ondas de gravidade de média escala durante a segunda fase da campanha científica SpreadFEx mostraram que:

- O espectro e a anisotropia na direção de propagação das ondas de gravidade não mudaram significativamente desde a primeira fase da campanha que foi realizada em 2005;
- Os velocidades intrínsecas das ondas de gravidade de média escala revelaram que essas podem se tornar mais lentas quando são comparadas com os parâmetros observados;
- Duas ondas de gravidade apresentaram velocidades de fase intrínsecas superiores a 85 *m/s*, comprimentos de ondas verticais maiores de 25 *km* e altitudes de penetração na atmosfera superiores a 150 *km* antes de iniciarem suas dissipações.

## Agradecimentos

Este trabalho é financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2008/01769-8). O imageador de São João do Cariri foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do processo # 76.97.1079.00.

## Referências

- Anderson, D. N., Richmond, A. D., Balsley, B. B., Roble, R. G., Biondi, M. A., and Sipler, D. P.: In-situ generated gravity waves as a possible seeding mechanism for equatorial spread-F, *Geophysical Research Letters*, 9, 789792, doi: 10.1029/GL009i007p00789, 1982.
- Buriti, R. A., Hocking, W. K., Batista, P. P., Medeiros, A. F., and Clemesha, B. R.: Observations of equatorial mesospheric winds over Cariri ( $7.4^{\circ}S$ ) by a meteor radar and comparison with existing models, *Annales Geophysicae*, 26, 485497, 2008.
- Fritts, D. C. and Alexander, M. J.: Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, *Reviews of Geophysics*, 41, 1003, doi:10.1029/2001RG000106, 2003.
- Fritts, D. C., Vadas, S. L., Riggin, D. M., Abdu, M. A., Batista, I. S., Takahashi, H., Medeiros, A., Kamalabadi, F., Liu, H. L., Fejer, B. G., and Taylor, M. J.: Gravity wave and tidal influences on equatorial spread F based on observations during the Spread F Experiment (SpreadFEx), *Ann. Geophys.*, 26, 32353252, aNGEO 0992-7689, 2008.
- Fritts, D. C., Abdu, M. A., Batista, B. R., Batista, I. S., Batista, P. P., Buriti, R., Clemesha, B. R., Dautermann, T., de Paula, E. R., Fechine, 321 B. J., Fejer, B. G., Gobbi, D., Haase, J., Kamalabadi, F., Kherani, E. A., Laughman, B., Lima, P. P., Liu, H. L., Medeiros, A., Pautet, P. D., Riggin, D. M., Rodrigues, F. S., São Sabbas, F., Sobral, J. H. A., Stamus, P., Takahashi, H., Taylor, M. J., Vadas, S. L., Vargas, F., and Wrasse, C. M.: Overview and summary of the Spread F Experiment (SpreadFEx), *Ann. Geophys.*, 27, 21412155, aNGEO 0992-7689, 2009.
- Gossard, E. E. and Hooke, W. H.: *Waves in the Atmosphere*, Elsevier, New York, 1975.
- Huang, C.-S. and Kelley, M. C.: Nonlinear evolution of equatorial spread F 2. Gravity waves seeding of Rayleigh-Taylor instability, *Journal of Geophysical Research*, 101, 293302, 1996.
- Hysell, D. L., Kelley, M. C., Swartz, W. E., and Woodman, R. F.: Seeding and layering of equatorial spread F by gravity waves, *Journal of Geophysical Research*, 95, 17 25317 260, doi: 10.1029/JA095iA10p17253, 1990.
- Kelley, M. C., Larsen, M. F., and LaHoz, C.: Gravity Wave Initiation of Equatorial Spread F: A Case Study, *Journal of Geophysical Research*, 86, 90879100, 1981.
- Keskinen, M. J. and Vadas, S. L.: Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric bubbles with gravity wave seeding and tidal wind effects, *Geophysical Research Letters*, 36, 12 102, doi:10.1029/2009GL037892, 2009.
- Medeiros, A. F., Buriti, R. A., Machado, E. A., Takahashi, H., Batista, P. P., Gobbi, D., and Taylor, M. J.: Comparison of gravity wave activity observed by airglow imaging at two different latitudes in Brazil, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66, 647654, doi:10.1016/j.jastp.2004.01.016, 2004.
- Nicolls, M. J. and Kelley, M. C.: Strong evidence for gravity wave seeding of an ionospheric plasma instability, *Geophysical Research Letters*, 32, 05 108, doi: 10.1029/2004GL020737, 2005.
- Rottger, J.: Gravity Waves Seeding Ionospheric Irregularities, *Nature*, 296, 111, aAA ID. AAA031.083.004 DOI: 10.1038/296111a0, 1982.
- Takahashi, H., Sahai, Y., Clemesha, B. R., Simonich, D. M., Teixeira, N. R., Lobo, R. M., and Eras, A.: Equatorial mesospheric and F-region airglow emissions observed from latitude  $4^{\circ}$  south, *Planetary and Space Science*, 37, 649655, 0032-0633 doi: DOI: 10.1016/0032-0633(89)90035-4, 1989.
- Taylor, M. J., Pendleton, W. R., J., Clark, S., Takahashi, H., Gobbi, D., and Goldberg, R. A.: Image measurements of short-period gravity waves at equatorial latitudes, *J. Geophys. Res.*, 102, 26,28326,299, 1997b.
- Taylor, M. J., Pautet, P. D., Medeiros, A. F., Buriti, R., Fechine, J., Fritts, D. C., Vadas, S. L., Takahashi, H., and São Sabbas, F. T.: Characteristics of mesospheric gravity waves near the magnetic equator, Brazil, during the SpreadFEx campaign, *Annales Geophysicae*, 27, 461472, 2009.
- Tsunoda, R. T.: Seeding of equatorial plasma bubbles with electric fields from an Es-layer instability, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 112, 06 304, doi: 10.1029/2006JA012103, 2007.
- Vadas, S. L.: Horizontal and vertical propagation and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 112, 06 305, doi: 10.1029/2006JA011845, 2007.
- Vadas, S. L. and Fritts, D. C.: Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 110, 15 103, doi: 10.1029/2004JD005574, 2005.
- Vadas, S. L. and Fritts, D. C.: Reconstruction of the gravity wave field from convective plumes via ray tracing, *Ann. Geophys.*, 27, 147177, ANGE0 420 0992-7689, 2009.