



Ondas de gravidade na atmosfera superior sobre a cidade de Manaus.

Lima, N. S.⁽¹⁾; Araujo, R. L. C.⁽²⁾; Fagundes, P.R.⁽³⁾; Barbosa, I.⁽⁴⁾; Carvalho, J.S.⁽²⁾; Santos, A. F.⁽¹⁾. (1) Centro Universitário Luterano de Manaus; (2) Universidade Federal do Amazonas; (3) Universidade do Vale do Paraíba; (4) Universidade do Estado do Amazonas.

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

The present study it investigates propagation of gravity waves (OGs) and the travelling ionospheric disturbances (TID's) in f region of ionosphere, using one ionosonde digital of type CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) located in Manaus (Lat. 2,9° S and Long. 60,0° W, region located between the equators magnetic and geographic). The studied period understands since August of 2002 until December of 2006, covering high, average activity solar and low. It is important to stand out that during this period of 4 years it had some magnetic storms and the effect of these storms in the equatorial ionosphere are study in details. The disturbances in the profile of electronic density are investigated using graphical that they show the daily variation of the height of layer F for some fixed frequencies (3, 4, 5, 6, 7 and 8 MHz). The OGs are classified in accordance with its amplitude and later wave parameters are calculated as: period, vertical wave length and phase velocity.

Key work: wave gravity, equatorial region, ionosphere, magnetic storms

Introdução

O interesse de cientistas na análise climatológica de ondas de gravidade para a sua melhor compreensão e estudo advém, principalmente, de duas fontes no sistema meteorológico, que são: tempestades magnéticas e eclipse solar. Sauli *et al.* (2007), Hines (1960), Hooke (1968), Hooke e Schlegel (1996), Fritts (1989) e Nappo (2002) são alguns autores que reportam as causas da propagação de ondas de gravidade em regiões atmosféricas, que contribuem, significativamente, para a circulação global da temperatura e estrutura da mesosfera, termosfera e ionosfera.

Nas geociências, os trabalhos de Harkrider (1964) e Row (1967) citam as primeiras experiências de observações sobre ondas de gravidade geradas por explosões e terremotos; até então, os estudos pertinentes eram totalmente empíricos (Sauli *et al.*, 2007). Porém, Lognonné *et al.* (2007), Tolstoy e Herron (1970), Jung *et al.* (2006), Molchanov *et al.* (2004) e Erickson *et al.* (2008) relatam sobre propagação de ondas de gravidade

na ionosfera, após acontecimentos de terremotos, explosões naturais ou artificiais e erupções vulcânicas, adquiridas através de ionossondas e GPS, além de gravímetros e sismógrafos.

Neste trabalho discute-se a formação de ondas de gravidade nas condições de períodos calmo e turbulento do clima espacial, em eventos de tempestades magnéticas (D_{st} em inglês), na latitude 2,9° S e longitude 60,0° W, sobre a cidade de Manaus, entre os equadores magnético e geográfico.

Procedimentos Metodológicos

Observações sobre ondas de gravidade foram realizadas na área supra mencionada usando-se uma ionossonda digital – CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) e um software (UDIDA) desenvolvido pelo IP&D - Univap. As aquisições dos ionogramas foram realizadas no período de agosto de 2002 a dezembro de 2006, em atividades de 24 h de observações ininterruptas, exceto nos períodos em que a ionossonda estava em reparo. Constituem os resultados de 703 dias observados em 14.328 horas de registros.

A ionossonda digital (CADI) iniciou sua operação na estação situada na cidade de Manaus em agosto de 2002, compondo uma rede de três equipamentos (Manaus, 2,9° S, 60,0° W; Palmas, 10,2° S, 48,2° W e São José dos Campos, 23,2° S, 45,9° W). Estes instrumentos estão dispostos em locais que permitem estudar os efeitos da ionosfera sobre a região tropical brasileira, principalmente a Amazônia (Fig. 1).

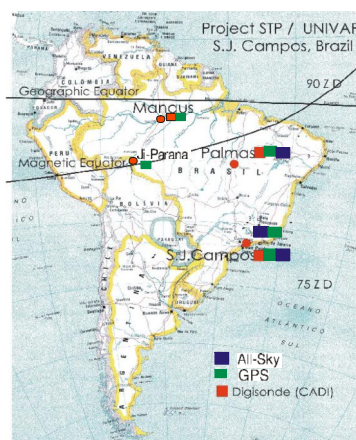


Figura - 1: Mapa das estações do Convênio UNIVAP-ULBRA de pesquisa ionosférica. (Fonte: Convênio UNIVAP – ULBRA)

A ionossonda **CADI** faz aquisição de dados através do espectro altura virtual versus frequência e altura virtual versus hora (UT), conforme mostrado na Fig. 2. O tratamento dos dados é executado com um software denominado de UDIDA (UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis), que possui janelas de interação e visualização em filme contínuo do fenômeno ionosférico de um dia, característica que permite melhor observação e compreensão na pesquisa de alta atmosfera (Pillat, 2006).

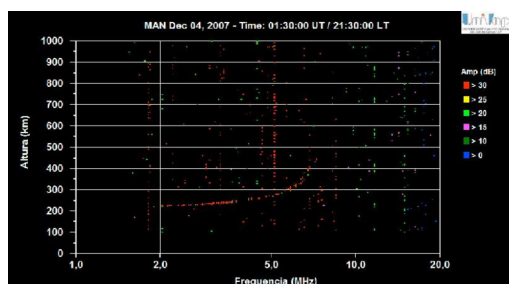


Figura – 2: Alta resolução espectral e baixa resolução temporal em 100s de observação de Altura (km) versus frequência (MHz). (Fonte: Convênio UNIVAP - ULBRA).

Modos de aquisição da CADI

A ionossonda adquire dados em 2 diferentes modos:

- (1) Alta resolução espectral e baixa resolução temporal. Varre 180 frequências (1 a 20 MHz) a cada 300 s (5 min). Estas medidas fornecem ionogramas usuais, para altura virtual versus frequência (Ver Fig. 2).
- (2) Baixa resolução espectral e alta resolução temporal. Varre 6 frequências (3, 4, 5, 6, 7, 8 MHz) a cada 100 s (Ver Fig. 3).

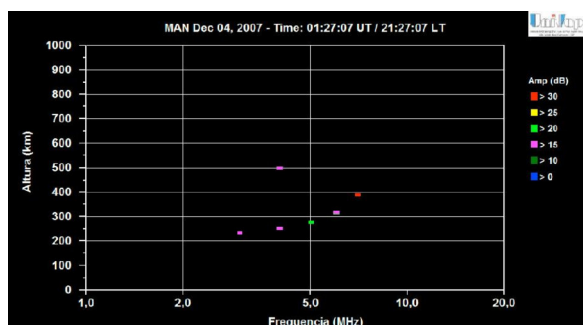


Figura – 3: Ionograma em baixa resolução espectral e alta resolução temporal (300 s) entre Altura (km) versus Frequência (MHz). (Fonte: Convênio UNIVAP - ULBRA).

Os ionogramas obtidos com baixa resolução espectral e alta resolução temporal permitem estudar a propagação

de ondas de gravidade (OG), com períodos maiores que 5 minutos. Nas condições de observações deste trabalho, entre 30 a 60 minutos, a taxa de amostragem de 100 s demonstra ser apropriada (Fagundes et al., 2007; Pillat, 2006).

Status da ionossonda em Manaus

A Fig. 4 mostra o número de dias de operação da ionossonda digital na estação de Manaus, entre os anos de 2002 a 2006. Observa-se que a maior cobertura de observação deu-se em 2006 e que no ano de 2003 a estação não fez aquisição de dados.

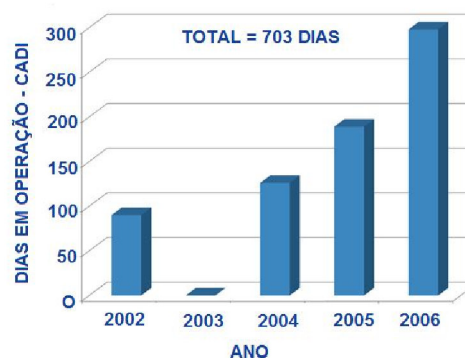


Figura - 4: Operacionalidades da Ionossonda no período de 2002 a 2006, na Estação de Manaus. (Fonte: Convênio UNIVAP – ULBRA).

Discussão

Conforme Fagundes *et al.* (2008), os efeitos das tempestades solares sobre a magnetosfera terrestre atingem o balanço da densidade iônica no plasma ionosférico sobre eletrodinâmica, difusão do plasma, fotoionização, densidade neutra e nos ventos zonal e meridional. São eventos de complexa seqüência sobre as camadas de baixa, média e alta latitude na magnetosfera. Sahai *et al.* (2007) descrevem que sobre tal evento no cenário sobre Manaus (latitude 2,9° S e longitude 60,0° W), há formação em larga escala de ondas de gravidade e de Spread-F nas irregularidades ionosféricas, entre os dois equadores, magnético e geográfico. Também Fagundes *et al.* (2008) citam que Bowman (1982) e Becker-Guedes *et al.* (2004) confirmam que na ejeção de partículas em alta latitude há aquecimento Joule em consequência de fenômenos de irregularidades ionosféricas. Para Kohl *et al.* (1996), as duas maiores consequências nas variações no campo magnético terrestre são devido as influências em larga escala da movimentação na variação da circulação do plasma ionosférico em ciclo periódico de horas no transporte horizontal dominante e, por conseguinte, a aceleração e energização dos elétrons do plasma na magnetosfera.

Os índices *Dst* e *Kp* são parâmetros identificadores de tempestades magnéticas, as quais são perceptíveis em

magnetômetros que registram variações da corrente de anel na diminuição proporcional da energia cinética das partículas aprisionadas nesta corrente, no sistema ionosfera-termosfera. A tabela 2 mostra a classificação das tempestades magnéticas, segundo Pimenta *et al.* (2001).

A estratificação ionosférica diurna decorrente de diferença de densidade, temperatura e velocidade dos ventos, na atmosfera neutra perturbada por OG, produz os distúrbios ionosféricos viajantes (TID's). O relacionamento em escala global entre OG's e TID's, é observado no comportamento do conteúdo eletrônico total (TEC), na altura virtual mínima da camada F, no perfil vertical da camada F e no traço ordinário e extraordinário dos ionogramas (Fig 4.1) (Ashkaliev *et al.*, 2003).

Conclusões

A análise dos resultados oriundos do presente trabalho possibilitou a obtenção das seguintes conclusões principais:

a- Os resultados analisados no período de observação (2002 – 2006) mostram influências da posição da estação de medida, que se encontra entre o equador magnético e o equador geográfico, do deslocamento da Terra em torno do Sol (Equinócios e Solstícios) e, principalmente, tempestades magnéticas (D_{st}). Tais influências são mostrados neste trabalho, como também, a formação de Es, *Spread-F* (instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor), diferença de fases, direção de propagação e ondas de gravidade.

b- O ciclo solar estudado de 2002 a 2006 encontrava-se em período calmo, porém, as principais tempestades magnéticas, oriundas de maior atividade solar neste intervalo de tempo foram identificadas e estudadas no cenário sobre a cidade de Manaus.

c- Os resultados mostram que a propagação de ondas de gravidade durante as D_{st} , em período de mínimo solar (ciclo de 11 anos), denotam variação sazonal de ondas de gravidade fortes, *Spread-F* e Es, em destaque nos meses de agosto, setembro e novembro.

d- Os resultados obtidos registraram ocorrência de aproximadamente 1,13 ondas de gravidade/hora, nos meses que correspondem ao verão na Amazônia (entre os meses de agosto e novembro). Em D_{st} forte elas alcançam amplitudes iguais ou maiores que 40 km.

e- Observou-se, também, que no período referente a este estudo as ondas de gravidade foram geradas nos meses acima citados de fortes amplitude, onde tais ondas são, possivelmente, produtos gerados pela influência na formação de F1,5 e F3, durante as D_{st} 's.

Agradecimentos

À Universidade Federal do Amazonas, Universidade do Vale do Paraíba e Universidade do Estado do Amazonas pelo apoio à pesquisa. À FAPESP e CNPq pelo financiamento do projeto (equipamentos, *software* UDIDA).

Referências

ASHKALIEV, Y. F., GORDIENKO, G. I. JACOBI, C., LITVINOV, Y. G., VODYANNIKOV, V. V., YAKOVETS, A. F., 2003. Comparison of travelling ionospheric disturbance measurements with thermosphere / ionosphere model results. *Annales Geophysicae*. 21, 1031-1037.

ERICKSON, B., BIRNIR, B., LAVALLÉE, D., 2008. A model for aperiodicity in earthquakes, *Nonlin. Processes in Geophys.*, 15, p.1-12.

FAGUNDES, P.R., KLAUSNER, V., SAHAI, Y., PILLAT, V. G., BECKER-GUEDES, F., BERTONI, F.C., BOLZAN, M. J. A., ABALDE, J. R., 2007. Observations of daytime F2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region. *Journal of Geophysical Research*, vol 112, doi:10.1029/2006JA011888.

FAGUNDES, P.R., MUELLE, M. T. A. H., BITTENCOURT, J. A., SAHAI, Y., LIMA, W. L. C., GUARNIERI, F. L., PILLAT, V. G., BECKER-GUEDES, FERREIRA, A. S., LIMA, N. S., 2008. Nighttime ionosphere-thermosphere coupling observed during an intense geomagnetic storm, *Advances in Space Research* 41, p.539-547.

FRITTS, D. C., 1989. A review of gravity wave saturation process, effects, and variability in the middle atmosphere. *Pure and Applied Geophysical*, v.130, p.343-371.

GRANT, I.F., MACDOUGALL, J.W., RUOHONIEMI, J.M., BRISTOW, W.A., SOFKO, G.J., KOEHLER, J.A., DANSKIN, D., ANDRE, D., 1995. Comparison of plasma flow velocities determined by the ionosonde Doppler drift technique, SuperDARN radars, and patch motion. *Radio Sci.* v.30, p.1537-1549.

HARKRIDER, D. G., 1964. Theoretical + Observed acoustic gravity waves from explosive sources in atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, v.69, p.5240-5295.

HINES, C. O., 1960. The upper atmosphere in motion, *Canadian Journal of Geophysical*, 24, 483-489.

HOCKE, K. SCHLEGEL, K., 1996. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances. 1982-1995. *Annales Geophysicae*, v.14, 917.

HOOKE, W. H., 1968. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *Journal of*

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v.30, p.795-823.

JUNG, T. K., LIU, J. Y. TSAI, H. F., HUANG, B. S., LIN, C. H., YU, S. B., YEH, Y. S., 2006. Ionospheric disturbances triggered by the Mw 7.6 earthquake off the Coast of El Salvador on 13 January 2001. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, v.17, p.345-351.

KOHL, H., RÜSTER, R., SCHLEGEL, K., 1996. *Modern Ionospheric Science*, Dawson Books, European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau, FRG, p.285.

MOLCHANOV, O., FEDOROV, E., SCHEKOTOV, A., GORDEEV, E., SURKOV, V., ROZHNOI, A., ANDREEVSKY, S., IUDIN, D., YUNGA, S., LUTIKOV, A., HAYAKAWA, M., BIAGI, P. F., 2004. Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. p.757-767.

NAPPO, C. J., 2002. *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, Academic Press, An imprint of Elsevier Science, (USA).

LOGNONNÉ, P., GARCIA, R., CRESPON, F., OCCHIPINTI, G., KHERANI, A., LAMBIN-ARTRU, J., 2007. Seismic waves in the atmosphere. *EuroPhysicsNews*, v.37 (4), p.11-14.

PILLAT, VALDIR GIL, 2006. *Comparação do Modelo Teórico Ionosférico com parâmetros Ionosférico Observados*. São José dos Campos – Univap (Dissertação de Mestrado), p.178.

ROW, R. V., 1967. Acoustic gravity waves in upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 72 (5); p.1599-1610.

SAHAI, Y., BECKER-GUEDES, F., FAGUNDES, P. R., DE JESUS, R., DE ABREU, A. J., OTSUKA, Y., SHIOKAWA, K., IGARASHI, K., HUANG, C. -S., LAN, H. T., SAITO, A., FERREIRA, A. S., LIMA, N. S., GAURNIER, F. L., VIEIRA, L. E. A., PILLAT, V. G., BITTENCOURT, J. A., 2007. Effects observed in the F-region in two well-separated longitudinal sectors during the intense geomagnetic disturbances in the early part of November 2004, **AOGS 2007 4th Annual General Meeting** [ST16-24-A0003](#).

SAULI, P., AND J. BOSKA, 2001. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 63, p.945– 950.

SAULI, P., ROUX, S. G., ABRY, P., BOSKA, J., 2007. Acoustic-gravity during solar eclipses: detection, characterization and modeling using wavelet transforms. *J. Geophys. Res. Elsevier Science*. v. (111), p.1-26.

TOLSTOY, I., HERRON, T. J., 1970. Atmospheric gravity waves from nuclear explosions. *Journal the Atmospheric Sciences*, v.27, p.55-61.