

OBSERVAÇÕES DAS ONDAS DE GRAVIDADE NA REGIÃO F DURANTE O PERÍODO DIURNO

*Virgínia Klausner de Oliveira*¹, *Paulo Roberto Fagundes*²

¹Bolsista, CAPES, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: viklausner2001@yahoo.com.br

²Orientador, Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: fagundes@univap.br

Resumo - Neste estudo utilizou-se sondagem ionosférica realizada por ionossonda tipo CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) localizada em São José dos Campos (23.9°S, 45.2°O, latitude dip 17.6°S) na região do máximo da anomalia equatorial, entre Setembro de 2000 à Agosto de 2001 (atividade solar máxima) e períodos geomagneticamente calmos. Notou-se que o perfil vertical de densidade eletrônica observado apresenta uma forte perturbação ondulatória, e tais perturbações foram atribuídas à propagação de ondas de gravidade na região F. Este artigo apresenta e discute as principais características das ondas de gravidade observadas durante o dia (período, comprimento de onda e velocidade de fase). As ondas de gravidade observadas apresentaram períodos entre 30 a 90 minutos, comprimentos de onda vertical entre 200 a 500 Km e velocidade de fase entre 60 a 140 m/s. Às vezes a propagação das ondas de gravidade na região F causa uma intensa perturbação no perfil vertical na densidade eletrônica e favorece a ocorrência de formação de uma camada adicional, denominada camada F3, durante o período diurno.

Palavras-chave: Ionosfera Tropical, camada F e F3, Ionossonda Digital.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra

Introdução

As ondas de gravidade são ondas que surgem principalmente na baixa atmosfera a partir da interação entre a força de gravidade e o gradiente de pressão e propagam-se até a alta atmosfera. Aparte dos fortes efeitos ocasionais na baixa atmosférica, a principal influência das ondas de gravidade acontece na média atmosfera, entre aproximadamente 50 e 110 km altitudes. Devido à diminuição (exponencial) da densidade atmosférica neutra, as ondas de gravidade e de suas amplitudes crescerem com altitude, a amplitude da onda de gravidade continua a crescer até alcançarem um nível crítico onde elas se quebram, depositando assim energia e momentum.

Há mais de meia década, estudos relacionados à estratificação da camada F2 em baixas e médias latitudes vem sendo realizados (e.g Heisler, 1962 e Skinner et al., 1954). Durante as investigações foram identificadas como possíveis fontes de estratificação da região F2, a presença de TIDs (Traveling Ionospheric Disturbances) e efeitos dinâmicos envolvendo deriva iônica vertical. Entretanto, recentes pesquisas indicaram a formação de uma camada adicional na região F (chamada F3) entre 500 Km e 700 Km de altitude. A camada F3 está relacionada com os efeitos da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ e do vento meridional neutro que resulta o movimento vertical "para cima" do pico da camada F2 (Balan e Bailey 1995, Balan et al., 2000; Batista et al.,

2002, 2003; Depuev e Pulinets, 2001; Jenkins et al., 1997; Lynn et al., 2000; Pulinets et al., 2002). Durante a última década, inúmeras investigações apresentam resultados, tanto teóricos como observacionais, relacionados com a formação da camada adicional F3, gerando, assim, considerável progresso nas pesquisas (Balan e Bailey 1995; Balan et al., 2000; Batista et al., 2002, 2003; Depuev e Pulinets, 2001; Jenkins et al., 1997; Pulinets et al., 2002).

Segundo o trabalho de Batista (2003), a camada F3 ocorre principalmente na região equatorial perto do equador magnético, entretanto esta não ocorre na região do equador magnético durante o período de mínimo solar. Através de sondagem ionosférica por satélite (Depuev e Pulinets, 2001; Pulinets et al., 2002) verificou-se que camada F3 ocorre durante o dia e durante a noite, na região equatorial. Lynn et. al. (2000) investigou a relação entre a estratificação F2 e a latitude, no Sudeste Asiático, este trabalho verificou uma região de máxima estratificação localizada entre a região do equador magnético e o pico da anomalia equatorial.

Abdu et. al., (1982), notou que a bifurcação da camada F2 em alguns casos está relacionada com a propagação de TIDs, principalmente antes do nascer do Sol. No entanto, eles notaram que a ocorrência de traços satélites nos ionogramas é uma característica comum perto da região do máximo da ionização da anomalia equatorial, especialmente durante o pôr do Sol. Mas, traços satélites também são observados durante a noite

em ionogramas após a fase principal de tempestades geomagnéticas.

Contudo, a região F não é somente afetada por efeitos da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ e do vento neutro, mas também por processos dinâmicos como ondas planetárias, TIDs e ondas de gravidade. Os efeitos ondulatórios na ionosfera com períodos de minutos a horas são reconhecidos como propagação de TIDs, gerados em altas latitudes durante tempestades geomagnéticas por efeito Joule e pela força de Lorentz (Abdu et al., 1982; Becker-Guedes et al., 2004; Lima et al. 2004), ou como ondas de gravidade geradas na baixa atmosfera por mecanismos de respostas às forças devido à topografia, convecção, vento, frente fria e etc (Djuth et al., 2004; Nicolls e Kelly, 2005; Rottger, 1977, 1981; Sauli e Boska, 2001; Sterling et al., 1971; Walker et al., 1988).

Este artigo apresenta e discute observações da formação de F3 na região do máximo da anomalia equatorial do hemisfério Sul, onde o modelo teórico SUPIM (Balan e Bailey, 1995; Balan et al., 1998, 2000; Jenkins et al., 1997) não prevêem a ocorrência de F3.

A presença de F3 foi observada em São José dos Campos, e possivelmente esteja intimamente relacionada às perturbações no perfil de densidade eletrônica da região de F provocada por ondas de gravidade.

Essas observações revelam que a formação de F3 pode estar associada a diferentes mecanismos como os sugerido em trabalhos anteriores (Balan e Bailey, 1995; Balan et al., 1998, 2000; Jenkins et al., 1997) ou pela combinação dos dois mecanismos (movimento vertical do pico da camada F2 e ondas de gravidade).

Materiais e Métodos

Utilizou-se sondagem ionosférica através de uma ionossonda tipo CADI localizada em São José dos Campos (23.9°S, 45.2°O, latitude dip 17.6°S). A CADI opera em São José dos Campos desde Agosto de 2000, operando simultaneamente em dois diferentes modos:

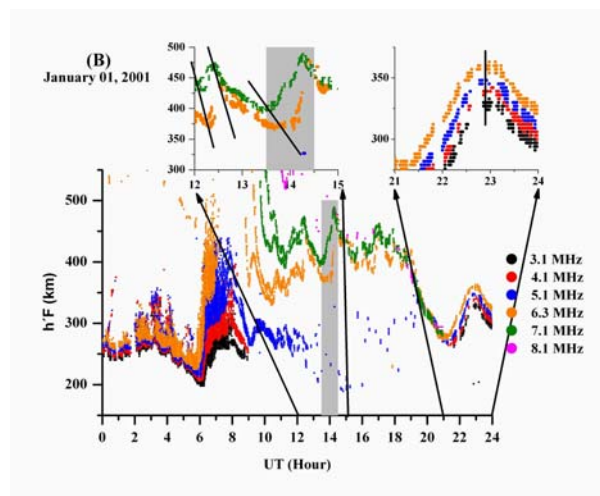
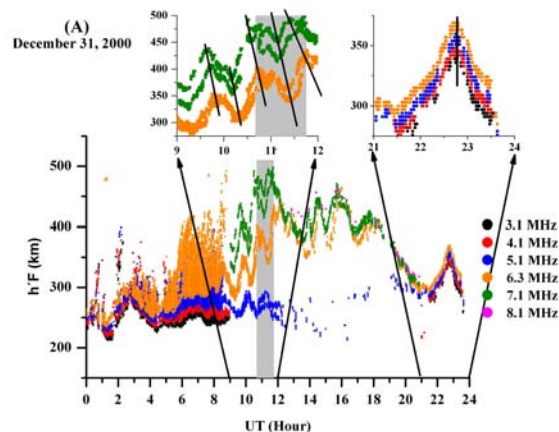
- 1) Varre 180 frequências entre 1 a 20 MHz com tempo de resolução de 300 segundos através de ionogramas.
- 2) Opera em seis frequências selecionadas (3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1 e 8.1 MHz) com tempo de resolução de 100 segundos através de gráficos de isofrequência.

Utilizando a altura virtual extraída diretamente do segundo modo de operação é possível investigar a variação diária da altura virtual para cada uma das diferentes seis frequências (Figura 1). Becker-Guedes et. al. (2004) e Lima et. al. (2004) utilizaram gráficos de isofrequência

similares para estudar a resposta da região F durante períodos geomagneticamente perturbados e durante a propagação de TIDs em baixas latitudes.

Discussão

As figuras 1A, 1B e 1C mostram a variação diária da altura virtual da camada F nas frequências de 3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1 e 8.1 MHz (gráficos de isofrequência) referentes a Dezembro 31 (2000), Janeiro 1 (2001) e Fevereiro 11 (2001), respectivamente. Nesses dias é possível identificar a presença de duas características comuns à ionosfera de baixas latitudes. Primeiramente, durante o período noturno (01:00 às 08:00 UT - 22:00 às 05:00 LT) observa-se múltiplas reflexões em altura nas frequências de 3.1, 4.1, 5.1, 6.3 MHz, tipicamente conhecido como “spread F”, freqüentemente visto durante os meses de verão no setor brasileiro. A segunda característica começa em torno das 21:00 UT (18:00 LT) conhecida como pico de pré-reverso, que ocorre devido à ação de campo elétrico durante a noite na direção leste-oeste induz na região F uma força no sentido para cima ($\mathbf{E} \times \mathbf{B}$) que “empurra” a camada para cima.



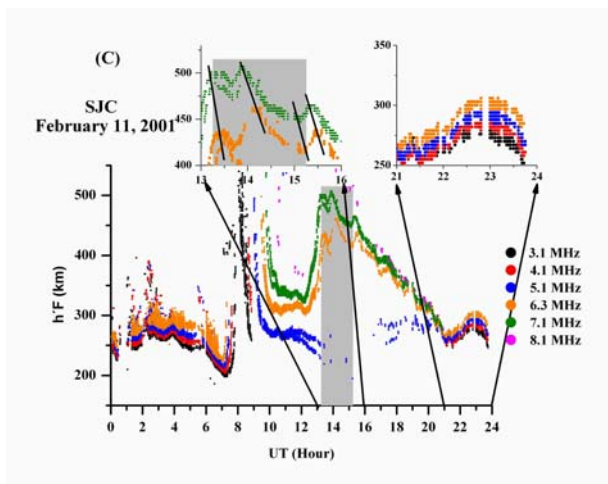


Figura 1 – Variação da altura virtual nas frequências de 3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1 e 8.1 MHz referentes a Dezembro 31, 2000 (Figura 1A), Janeiro 1, 2001 (Figura 1B) e Fevereiro 11, 2001 (Figura 1C). As regiões ampliadas mostram a duração da camada F3 (coluna vertical cinza) e a presença do pico pré-reverso.

Nota-se que nas figuras 1A, 1B e 1C nas regiões ampliadas que em torno das 21:00 UT (18:00 LT), a ação da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ começa a gerar o movimento aparente da camada para cima, alcançando o máximo aproximadamente às 22:30 UT (19:30 LT). O movimento de subida e de posteriormente descida da camada é simultâneo em todas as frequências, determinado pela ação do campo elétrico que atua em toda a região F. Os índices geomagnéticos (Dst e Kp) durante os três dias apresentados estão representados na tabela 1.

Data	Valor do Dst	Σ Kp
Dez. 31, 2000	-17	4-
Jan. 01, 2001	-7	4+
Fev. 11, 2001	-11	13+

Tabela 1 – Índices geomagnéticos Dst e Kp referentes a Dezembro 31, 2000, Janeiro 1, 2001 e Fevereiro 11, 2001.

Os dias investigados correspondem a dias relativamente calmos, a região F em baixas latitudes geralmente não é suscetível a perturbações que tem origem em altas latitudes (região auroral).

Nota-se, também, nas figuras 1A, 1B e 1C entre às 09:00 – 20:00 UT (06:00 – 17:00 LT) variações em altura correspondentes a oscilações nas frequências de 6.3 e 7.1 MHz. É importante mencionar que a altura virtual nas frequências de 6.3 e 7.1 MHz mostrada nas figuras 1A, 1B e 1C apresentam algumas vezes dois traços para cada dessas frequências. Esses dois ecos para a mesma frequência correspondem aos traços ordinário e extraordinário. As figuras 1A, 1B e 1C mostram as variações máxima e mínima da altura virtual que ocorre primeiramente na frequência de 7.1 MHz e depois de alguns minutos na frequência

de 6.3 MHz, apresentando velocidade de fase de propagação no sentido para baixo entre 60 a 140 m/s, períodos entre 40 a 60 minutos e comprimento de onda vertical de 150 a 500 Km. Essas características são tipicamente referentes à propagação de ondas de gravidade na região F da ionosfera (Hines, 1960; Nicolls e Kelly, 2005). Utilizando os gráficos de isofrequência é possível distinguir a ação de campos elétricos (simultâneo em todas as frequências) do efeito das ondas de gravidade (fase de propagação) na camada F.

A presente investigação demonstra que é possível estudar a propagação de ondas de gravidade durante o período diurno e os seus efeitos em baixas latitudes utilizando sondagem ionosférica de alta resolução (100 segundos). Walter et. al. (1988) utilizou sondagem ionosférica com resolução entre 5 a 10 minutos e observou estruturas moduladas que dificilmente poderiam ser vistas durante o período diurno devido a presença do forte gradiente de ionização latitudinal associado à anomalia equatorial e a variabilidade da localização do seu máximo. Felizmente, a alta resolução possibilita o monitoramento das ondas de gravidade ionosféricas durante o dia.

Em todos os casos observados apresentam oscilações na camada F durante horas (Figura 1). Entretanto, a estratificação aparece somente durante o período diurno por aproximadamente 1 ou 2 horas, quando a camada F apresenta uma peculiar extensão vertical. A combinação das ondas de gravidade com a extensão vertical da camada F gera condições favoráveis a estratificação e formação de F3.

Conclusão

Esta investigação foi baseada em dados obtido na região do máximo da anomalia equatorial através de uma ionosonda digital localizada em São José dos Campos. Mostra a ocorrência da estratificação adicional da camada F (F3) e a possível associação com ondas de gravidade durante períodos geomagneticamente calmos.

Três maiores contribuições desta investigação são:

- 1) Sondagem ionosférica de alta resolução (100 segundos) permitem análise em maiores detalhes das perturbações na região F causados por ondas de gravidade, especialmente durante o período diurno.
- 2) As observações mostraram a presença de F3 durante o período diurno na região do máximo da anomalia equatorial.
- 3) Aparentemente, as ondas de gravidade são um fator importante para a

estratificação da camada F na região do máximo da anomalia equatorial.

- 4) A extensão vertical da região F deve ser maior que o comprimento de onda das ondas de gravidade para propiciar as condições necessárias para a estratificação e formação da camada F3.

Referências

- Abdu M.A., Batista I.S., Kantor I.J. and Sobral J.H.A. Gravity wave induced ionization layer in the night F-region over Cachoeira Paulista (22°S, 45°W). *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 44(9), 759-767, 1982.
- Balan N. and Bailey G.J. Equatorial plasma fountain and its effects: Possibly of an additional layer. *J. Geophys. Res.* 101(A11), 21421-21432, 1995.
- Balan N. Batista I.S., Abdu M.A. MacDougall J. and Bailey G.J. Physical mechanism and statistics of occurrence of an additional layer in the equatorial ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 103, A12, 29169-29181, 1998.
- Balan N., Batista I.S., Abdu M.A., Bailey G.J. Watanabe S., MacDougall J. and Sobral J.H.A. Variability of an additional layer in the equatorial ionosphere over Fortaleza. *Journal of Geophysical Research*, 105(A5), 10603-10613, 2000.
- Batista I.S., Abdu M.A., MacDougall J., Souza J.R. Long term trends in the frequency of occurrence of the F3 layer over Fortaleza, Brazil. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 64, 1409-1412, 2002.
- Batista I.S., Abdu M.A., da Silva A.M., and Souza J.R. Ionospheric F3 layer: Implications for the IRI model. *Advances in Space Research*, 31(3), 607-611, 2003.
- Becker-Guedes F., Sahai Y., Fagundes P.R., Lima W.L.C. Pillat V.G. Abalde J.R. and Bittencourt J.A. Geomagnetic storm and equatorial spread-F. *ANNALES GEOPHYSICAE*, 22: 3231-3239, 2004.
- Depuev V.H. and Pulinets S.A. Intercosmos-19 observations of an additional topside ionization layer: The F3 layer. *Advances in Space Research*, 27(6-7), 1289-1292, 2001.
- Djuth F.T., Sulzer M.P., Gonzáles S.A., Mathews J.D., Elder J.H., and Walterscheid R.L. A continuum of gravity waves in the Arecibo Thermosphere? *Geophys. Res. Lett.* 31, 6801, doi:10.1029/2003GL019376, 2004.
- Heisler L.H. The anomalous ionospheric stratification F1.5. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 24, 483-489, 1962.
- Hines, C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, 38, 1441-1481, 1960.
- Jenkins B., Bailey G.J., Abdu M.A., Batista I.S., Balan N. Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil. *ANNALES GEOPHYSICAE*, 15, 753-759, 1997.
- Lima W.L.C., Becker-Guedes F., Sahai Y., Fagundes P.R., Abalde J.R., Crowley G., and Bittencourt J.A. Response of the Equatorial and low-latitude ionosphere during the space weather events of April 2002. *ANNALES GEOPHYSICAE*, 22, 3211-3219, 2004.
- Lynn K.J.W., Harris T.J. and Sjarifudin M. Stratification of the F₂ layer observed in Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 105, A12, 27147-27156, 2000.
- Pulinets, S.A., Depuev, V.H., Karpachev, A.T., Radicella, S.M. and Damiikin N.P. Recent advances in topside profile modeling, *Advances in Space Research*, 29(6), 815-823, 2002.
- Nicolls M.J. and M.C Kelly, Strong evidence for gravity wave seeding of an ionospheric plasma instability. *Geophys. Res. Lett.* 32, 5108, doi: 10.1029/2004GL020737, 2005.
- Rottger J. Travelling disturbances in the equatorial ionosphere and their association with penetrative cumulus convection. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 39, 987-998, 1977.
- Rottger J. Equatorial spread-F by electric fields and atmospheric gravity waves generated by thunderstorms. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43, 453-462, 1981.
- Sauli, P. and Boska, J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 945-950, 2001.
- Skinner N.J., Brown R.A., and Wright R.W. Multiple stratification of the F-layer at Ibadan. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 5, 92-100, 1954.

Sterling D.L., Hooke W.H. and Cohen R. Traveling ionospheric disturbances observed at the magnetic equator. *Journal Geophysics Research*, 76, 3777-3782, 1971.

Walker, G.O., Y.W. Wong, J.H.K. Ma, T. Kikuchi, K. Nozaki, Y.N. Huang and V. Badillo Propagating ionospheric waves observed throughout East Asia during the WAGS October campaign. *Radio Sci.* 23(6), 867-878, 1998.