



## Efeitos das ondas de gravidade ionosféricas em baixa latitude no período de março a maio do ano 2000 durante eventos de subtempestades magnéticas.

Fellipe Prado Figueira de Oliveira e Gilvan Luiz Borba (DGEF / UFRN)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12<sup>th</sup> 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 12<sup>th</sup> 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

During the period of maximum solar activity in 2000, there was the occurrence of strong magnetic storms with  $K_p > 6$ . Events of this magnitude are capable of generating intense ionospheric disturbances due to variations in plasma density in this region as well as due to injection of particles in the auroral region which will respond by producing disturbed winds and TID's (Travelling Ionospheric Disturbances) that propagate toward the equator. Using data from ionosonde installed in Natal (RN, Brazil) (Latitude:  $-7.962^\circ$  and Longitude:  $-32.369^\circ$  - magnetic coordinates in 2000) and Fortaleza (CE, Brazil) (Latitude:  $-5.108^\circ$  and Longitude:  $-35.729^\circ$  - magnetic coordinates in 2000) for the months of autumn, there was the presence of signatures of gravity waves in the ionosphere on these stations, indicating the propagation of auroral ionospheric disturbances to equatorial regions. The gravity waves that propagate in the ionosphere (known as TID) discussed here are waves of periods of the order of 2.0 to 3.0 hours, the wavelength of hundreds of kilometers, ie, large scale, and which has a source the magnetic storms.

### Introdução

A importância fundamental de se verificar as teorias relativas à propagação e dissipação das ondas de gravidade que se propagam na alta atmosfera é que a observação de TID's em regiões equatoriais e de baixa latitude sobre o continente sul-americano é bastante rara.

Em relação a regiões de baixas latitudes, observações realizadas em Cachoeira Paulista (SP, Brasil) (Abdu e Raí, 1975, Kausshika e Mendonça, 1974, Abdu *et al.*, 1982), indicam que essas ondas podem ser classificadas, em sua maioria, como TID's de média escala, e não apresentam correlações com  $K_p$ . Essas TID's são detectáveis por técnicas óticas como, por exemplo, fotômetros de varredura, provocam variações na densidade do plasma ionosférico, como se percebe em suas assinaturas em registros de medidas de rotações de Faraday e produzem traços "satélites" em ionogramas. Por outro lado, estudos mais detalhados relativos ao comportamento sazonal e instantes iniciais mostram que essas ondas são mais frequentes nos meses de maio,

junho, julho e agosto, ocorrendo com mais frequência nos horários após o pôr-do-sol, sugerindo, em muitos casos, o terminadouro como fonte. Mas, para os que ocorrem fora desse horário, ainda persistem dúvidas sobre suas fontes. Mais raros e impressionantes, os TID's de larga escala têm sido pouco observados no Brasil. Destacam-se os eventos ocorridos durante intensas tempestades magnéticas como os relatados por Abdu (Abdu *et al.*, 1974) e o de março de 1989 (Borba, 1993); No entanto mesmo esses eventos não deixaram assinaturas em observações próximas ao equador.

A fonte dos TID's de larga escala já está bem estabelecida na literatura como, por exemplo, nos trabalhos de Francis (Francis, 1975). A correlação entre TID's de larga escala e tempestades magnéticas foi sugerida inicialmente, e de modo independente, por Valverde em 1958 e Wright em 1961 e, assim, atualmente é comumente aceito (Georges, 1968; Frances, 1975; Fessen *et al.*, 1989; Bowman, 1977) o principal mecanismo físico capaz de explicar a geração desse tipo de perturbação é o aquecimento joule termosférico, na região auroral, devido à deposição de energia transportada pelo vento solar intensificado durante tempestades solares. Esse fenômeno produz modificações em escala global no sistema ionosfera-termosfera, gerando ondas de gravidade que atingem a alta atmosfera e que se propagam na ionosfera em direção ao equador. Tais ondas têm velocidades entre 400 e 1000 m/s e comprimento de onda de até 1500 km.

No presente trabalho, discute-se a ocorrência de TID's de larga escala na região equatorial durante os meses de inverno e em período de máximo de atividade solar e sua maior importância se deve ao fato de que só recentemente, com a instalação de sondadores ionosféricos digitais e imageadores (All Sky e fotômetros zenitais) na região equatorial brasileira, as ondas de gravidade que se propagam na alta atmosfera começaram a ser detectadas e estudadas.

### Métodos de Investigação

Ionossondas são instrumentos que emitem, a intervalos regulares, pulsos de sinais de radiofrequência na faixa de 1.0 até 20 Mhz em direção a ionosfera e recebe de volta esses pulsos construindo assim curvas de "Altura x Frequência". No nosso caso, operamos com sondadores ionosféricos digitais tipo CADI (*Canadian Advanced Digital Ionosonde*) que opera em dois modos distintos: o modo de frequência fixa, no qual pulsos discretos de 3.0, 4.0, 5.0, 6.3, 7.0 e 8.0 Mhz são enviados a cada 3.0 minutos; e o modo de pacote de onda, no qual é enviado, a cada 10 minutos, um pulso completo. Nos dois casos,

os dados são gravados em arquivos específicos e os dados disponíveis são, para cada instante sondado, a frequência e a altura de reflexão do sinal, ou seja, a altura virtual da camada sondada.

Com os dados obtidos ao longo do dia no modo frequência fixa, é possível obter curvas de “Altura x Tempo” para cada frequência sondada a qual, por ser proporcional a densidade eletrônica na região de reflexão do sinal, irá representar curvas de densidade constante, chamadas aqui de curvas de isodensidade eletrônica.

Sob a ação de ondas de gravidade, a ionosfera é perturbada e a assinatura de tal perturbação nas curvas de isodensidade eletrônica se caracteriza pela variação quase senoidal e por uma perceptível propagação de fase quando se compara as curvas referentes a cada frequência específica. Usando as equações de Hook (Hook, 1968) para ondas de gravidade que se propagam na ionosfera, a qual relaciona a densidade ambiente  $N_0$  e sua perturbação  $N$  provocada durante a passagem da onda, temos

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{\omega^2 \lambda_x^2}{\omega_g^2 - \omega^2}}$$

$$N = \frac{1}{\omega} U \hat{i}_b \left[ k \hat{i}_b - i \hat{i}_b \hat{i}_z \left( \frac{\partial}{\partial z} \right) \right] N_0$$

$\lambda_z$  = comprimento de onda na direção z

$\lambda_x$  = comprimento de onda na direção x

k = número de onda

$\omega$  = frequência angular da onda de gravidade

$\omega_g$  = frequência de Brunt-Vaisala

$\hat{i}_b$  = vetor unitário paralelo ao campo geomagnético

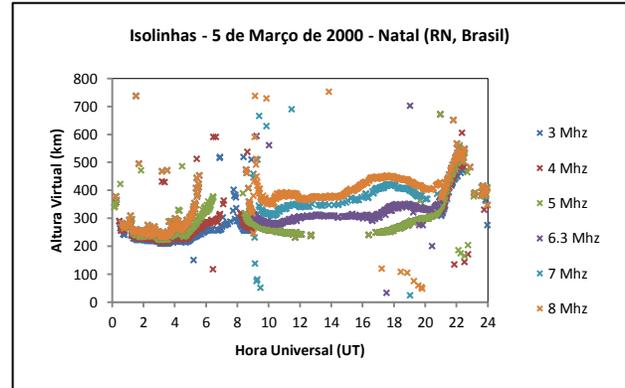
$\hat{i}_z$  = vetor unitário paralelo à direção z

U = ventos neutros

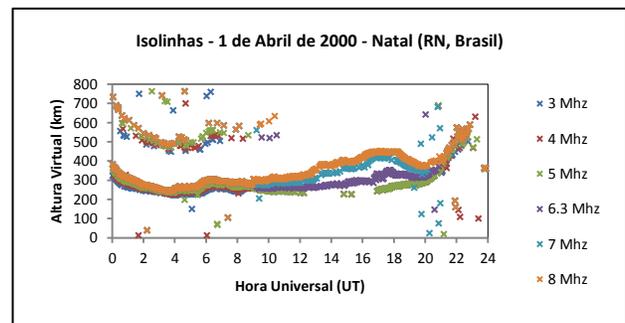
**Exemplos**

A Figura 1.a mostra o comportamento típico da ionosfera em período calmo. As variações altura que se observa de manhã – por volta de 08:00 UT – e à noite – por volta de 21:00UT – estão relacionadas, respectivamente, ao aumento de ionização ionosférica devido ao início de incidência dos raios solares na termosfera e devido ao mecanismo bem conhecido chamado de pico de pré-reversão. Esses comportamentos apresentam características específicas de acordo com a estação do ano, por isso foi escolhido um período específico para análise dos dados. A escolha do outono se deu devido ao fato de que em abril foi observado o maior dos eventos de TID do ano. Tal evento mostrado na Figura 2 representa um TID de larga escala, em Natal (RN, Brasil), com período médio da ordem de 3.0 horas e sucede o início da grande tempestade magnética de abril de 2000, como se percebe no comportamento do Dst mostrado na

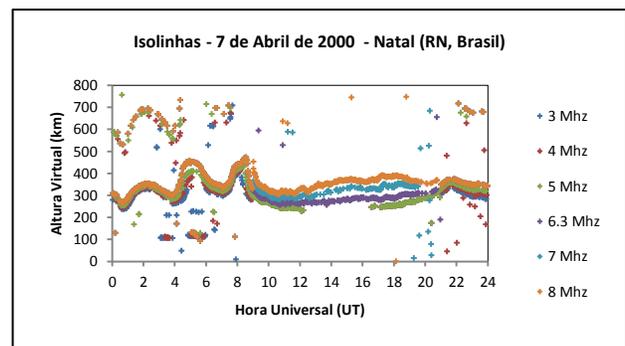
Figura 04. A Figura 1.b mostra um dia calmo dentre os dias englobados pelo estudo. Já na Figura 03, podemos observar uma TID de média escala, em Fortaleza (CE, Brasil), com período de 2.0 horas.



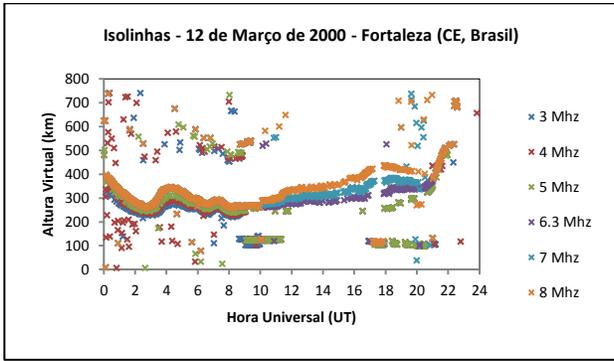
**Figura 1.a:** Curvas de isodensidade eletrônica para o dia 5 de Março de 2000, em Natal (RN, Brasil). Aqui pode ser visto o comportamento típico da dinâmica da ionosfera em períodos calmos (subida às 08:00 UT e às 21:00)



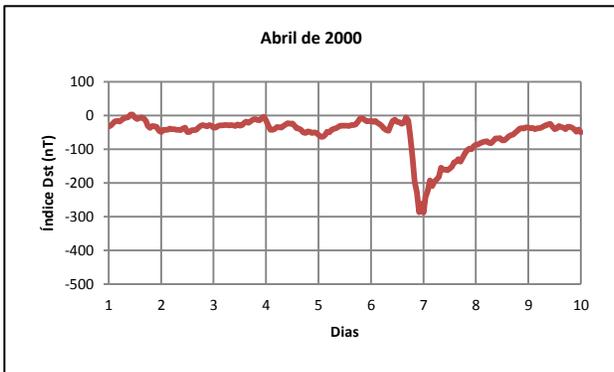
**Figura 1.b:** Curvas de isodensidade eletrônica para o dia 1 de Abril de 2000, em Natal (RN, Brasil). Essas curvas mostram o comportamento de um dia calmo dentre os dias estudados.



**Figura 2:** Curvas de isodensidade eletrônica para o dia 7 de Abril de 2000, em Natal (RN, Brasil). É possível ver claramente o comportamento de um TID entre 00:00 UT e 10:00 UT.



**Figura 3:** Curvas de isodensidade eletrônica para o dia 12 de Março de 2000, em Fortaleza (CE, Brasil). Este é um TID de média escala, claramente visto entre 00:00 UT e 06:00 UT.



**Figura 4:** Gráfico mostrando o “sudden commencement” da tempestade magnética após o dia 5 de Abril de 2000, baseado no índice de Dst (*Disturbance Storm-Time*).

A seleção dos eventos encontra-se destacada na Tabela 1 a seguir, apontando o maior índice de  $K_p$  verificado no dia em questão, assim como a indicação se foram ou não verificados TID's nas cidades de Natal e Fortaleza. Um outro dado importante que se apresenta neste tabela é o *sudden commencement*, que é baseado no índice de Dst global.

Na Tabela 2, pode ser vista uma breve descrição em relação à morfologia das ondas de gravidade verificadas na cidade de Natal, que é onde estamos mais interessados.

DATA	$K_p \geq 5$	NATAL	FORTALEZA	SC
12 de Março	5	-	TID	08:33 UT
7 de Abril	8	TID	NV	10:34 UT
24 de Abril	5	A	B	13:00 UT
16 de Maio	5	-	TID	06:12 UT
24 de Maio	7	-	NV	05:32 UT

**Tabela 1:** Morfologia de TID's durante tempestades magnéticas. SC: Sudden Commencement (Dst); A: onda com period indefinido; B: perturbação sem onda definida; NV: onda de gravidade não verificada; TID: onda de gravidade observada. Aqui nós podemos ver os principais eventos observados no período de estudo.

	INÍCIO	FIM	PERÍODO
7 de Abril	00:00 UT	09:00 UT	3 horas
24 de Abril	03:00 UT	05:00 UT	2 horas

**Tabela 2:** Morfologia de TID's em Natal. Esta tabela mostra quando o TID iniciou, terminou e seu período no seu respectivo dia onde foi observada alguma característica de ondas de gravidade.

**Resultados**

Temos verificado que, mesmo raros, TID's originados durante fortes tempestades magnéticas são observáveis sobre Natal e Fortaleza. Estudos iniciais, por outro lado, sugerem que tais eventos não atingem as regiões muito próximas do equador, como São Luis (MA, Brasil), onde não observamos nenhum efeito significativo nas curvas de isodensidade durante essas tempestades. Também é notável que, ao contrário do que sugerem os estudos utilizando rotação de Faraday, não observamos mudanças na densidade eletrônica da ionosfera que possam ser atribuídas as rarefações e condensações do plasma ionosférico durante a passagem das ondas.

**Considerações Finais**

Apresentamos aqui comportamentos quase periódicos do plasma ionosférico que sugerem a propagação de ondas de gravidade na ionosfera sobre Natal (RN, Brasil) e sobre Fortaleza (CE, Brasil) durante tempestades magnéticas em período de alta atividade solar. Tais ondas apresentam amplitudes maiores em Natal que em Fortaleza, no entanto, apresentam períodos da mesma ordem de grandeza. Possíveis correlações entre os eventos detectados nas duas estações indicam velocidade de propagação de ordem de centenas de quilômetros por hora e a diminuição na amplitude sugere que tais ondas são fortemente afetadas pela variação na declinação magnética, ou seja, ao se propagarem ao

longo das linhas do campo magnético terrestre teriam sua amplitude diminuída à medida que se aproximam do equador e tal fenômeno seria principalmente associado à curvatura do campo magnético. Por outro lado, modelagens ainda precisam ser feitas para melhor discutir os efeitos de dissipação sobre as características dessas ondas. Finalmente, não podemos deixar de citar que das mais de 15.000 horas de observação só foram detectados cerca de 5 eventos com duração da ordem de 4 horas e amplitudes da ordem de 100 km em Natal e da ordem de 60 km em Fortaleza.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a todos que colaboraram e continuam colaborando com essa pesquisa, com fornecimento de dados de estações sondagem ionosférica através de sondadores digitais, assim como dados de outras formas de investigações ionosféricas, como, por exemplo, dados de fotômetros.

### **Referências**

Abdu, M.A. and Rai, Planet. Space Science, 23, 487, 1975.

Kausshika and Mendonça, Planet Space Science, 22, 5405, 1989.

Abdu et al., I.S. Batista; I. J. Kantor; J.H.A. Sobral, Journal of Atm. Terrest. Phy. 44,1982.

Fejer, B. F.; Farley, D. T.; Woodman, R. F.; Calderon, C. Dependence of equatorial F region vertical drifts on season and solar cycle. Journal of Geophysical Research, vol. 84, Oct. 1, 1979, p. 5792-5796.1979