

## ONDAS DE GRAVIDADE NA ESTRATOSFERA TERRESTRE INFERIDA ATRAVÉS DA TÉCNICA DE RÁDIO OCULTAÇÃO DE GPS

Cristiano Max Wrasse<sup>1</sup>, Hisao Takahashi<sup>2</sup>, Joaquim Fechine<sup>3</sup>, Clezio Marcos Denardini<sup>4</sup> e Jens Wickert<sup>5</sup>

Recebido em 23 janeiro, 2006 / Aceito em 13 junho, 2006  
Received on January 23, 2006 / Accepted on June 13, 2006

**ABSTRACT.** Stratospheric gravity wave activities were deduced from GPS radio occultation temperature profiles obtained by CHAMP satellite between 2001 and 2005. Potential energy profiles are used to analyze the gravity wave activity over South America. The results showed an inter-annual variation of the potential energy integrated between 24 and 34 km of altitude. The gravity wave activity is more concentrated around the equatorial region. In order to evaluate the seasonal variation of the gravity wave activity, a mean potential energy was determined over (10°N-10°S) and (100°W-20°W). The results showed a lower gravity wave activity during winter time, while during spring time the mean potential energy showed an increase in the wave activity. The results of the mean potential energy also showed that the gravity wave activity in the lower stratosphere exhibits a higher wave activity during 2002 and 2004 and a lower wave activity during 2003 and 2005.

**Keywords:** stratosphere, gravity wave, potential energy, radio occultation, GPS.

**RESUMO.** Perfis de temperatura obtidos pelo satélite CHAMP nos anos de 2001 a 2005 foram utilizados para determinar a atividade de ondas de gravidade na região da baixa estratosfera sobre a América do Sul. Os resultados encontrados para a energia potencial integrada, entre 24 e 34 km de altitude, mostraram uma variação interanual na atividade de ondas de gravidade, com uma maior atividade de ondas em torno da região equatorial. Para melhor avaliar a variação da atividade de ondas de gravidade, foi determinada a energia potencial média integrada entre (10°N-10°S) e (100°O- 20°O). Os resultados da energia potencial média mostraram uma variação sazonal da atividade de ondas de gravidade. O inverno foi a estação do ano com a menor atividade de ondas, enquanto que a primavera apresentou um aumento na atividade de ondas. A atividade de ondas de gravidade na baixa estratosfera, inferida através da energia potencial média, apresenta claramente um aumento nos anos de 2002 e 2004 e uma diminuição nos anos de 2003 e 2005.

**Palavras-chave:** estratosfera, ondas de gravidade, energia potencial, rádio ocultação, GPS.

---

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D), Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova – 12244-000 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: (12) 3947-1113; Fax: (12) 3947-1149 – E-mail: cmw@univap.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Caixa Postal 515 – 12245-970 São José dos Campos, SP, Brasil. Tel.: (12) 3945-7167; Fax: (12) 3945-6740 – E-mail: <sup>2</sup>hisaotak@laser.inpe.br; <sup>3</sup>joaquim@laser.inpe.br; <sup>4</sup>denardin@dae.inpe.br

<sup>5</sup>GeoForschungsZentrum, Potsdam (GFZ), Department of Geodesy and Remote Sensing, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany. Phone: +49 (331) 288-1758; Fax: +49 (331) 288-1732 – E-mail: jens.wickert@gfz-potsdam.de

## INTRODUÇÃO

As ondas de gravidade exercem a maior influência em larga escala na circulação e na estrutura da atmosfera. Elas também são consideradas as responsáveis por muitas das variações espaciais (da ordem de alguns quilômetros a dezenas de quilômetros) e temporais (de ~5 min a várias horas) em diversas variáveis atmosféricas acima da tropopausa. As fontes de geração das ondas de gravidade incluem fenômenos meteorológicos como as frentes frias, os sistemas convectivos, vento soprando sobre montanhas entre outros. A maioria destas fontes de geração encontra-se na troposfera (Fritts & Nastrom, 1992). Nos trópicos, a geração das ondas de gravidade está associada à convecção, que gera grandes nuvens do tipo cumulus nimbus.

As ondas de gravidade transportam energia e momentum entre a baixa e a média atmosfera, sendo uma das oscilações responsável pelo acoplamento dinâmico entre as camadas da atmosfera. O depósito de energia das ondas, bem como sua variação sazonal, em altitude e latitude, têm sido estudadas por vários autores tanto na baixa atmosfera quanto na mesosfera (Allen & Vincent, 1995; Nakamura et al., 1993; Medeiros et al., 2005; Wrasse et al., 2006). Nas últimas décadas, radares operando em VHF (*Very High Frequency*), radares de laser, além de outros instrumentos, foram utilizados para caracterizar as ondas de gravidade. Apesar destes instrumentos apresentarem boa resolução temporal e espacial sua distribuição na superfície encontra-se bastante dispersa para se ter uma cobertura global. Desta forma, observações realizadas por satélites são capazes de produzir uma grande cobertura global (Wu & Waters, 1996), porém não apresentam uma boa resolução espacial. Entretanto, estas medidas podem fornecer uma distribuição quantitativa da atividade das ondas de gravidade.

Recentemente, o Sistema de Posicionamento Global (GPS) começou a ser explorado através da técnica de rádio ocultação de sinal de GPS, a fim de se obter perfis de temperatura, índice de refração, pressão e vapor d'água na atmosfera neutra, região abaixo de 35 km de altura (Hajj et al., 2002). Desde então, a técnica de rádio ocultação vem sendo empregada, entre outros estudos, no monitoramento climático (Foelsche et al., 2004), na previsão numérica do tempo (Healy & Thépaut, 2006), no estudo de ondas de gravidade (Ratnam et al., 2004) e de ondas planetárias (Randel & Wu, 2005).

Tsuda et al. (2000) foram os primeiros a utilizar os perfis de temperatura obtidos através da técnica de rádio ocultação do satélite GPS *Meteorology* (GPS-MET) para realizar uma análise global da atividade de ondas de gravidade na estratosfera. Os

autores calcularam a energia potencial através da variância da temperatura, e seus resultados indicam que os maiores valores de energia potencial foram concentrados próximos ao equador entre 20-30 km de altitude, sugerindo que as ondas de gravidade nestas regiões sejam oriundas das convecções troposféricas.

Wickert et al. (2001) publicaram os primeiros resultados do monitoramento da atmosfera neutra através da técnica de rádio ocultação de GPS utilizando o satélite alemão *CHALLENGING MINISATELLITE PAYLOAD* (CHAMP). Com estes dados, Ratnam et al. (2004) empregaram a mesma metodologia descrita por Tsuda et al. (2000) para estudar a variação sazonal da atividade de ondas de gravidade para o ano de 2002.

Neste contexto, o presente trabalho visa apresentar um estudo da atividade de ondas de gravidade na estratosfera inferida através da técnica de rádio ocultação de sinais de GPS sobre a América do Sul. Para isto, será apresentada a teoria sobre a densidade de energia das ondas de gravidade, a metodologia de cálculo da energia potencial associada às ondas de gravidade, bem como os resultados da atividade de ondas de gravidade obtidos a partir dos dados do satélite CHAMP sobre a América do Sul entre os anos de 2001 e 2005.

## DENSIDADE DE ENERGIA DAS ONDAS DE GRAVIDADE

Sabe-se que os parâmetros atmosféricos oscilam num amplo intervalo de escalas. Flutuações de mesoescala são observadas na temperatura e no vento como uma superposição de várias ondas de gravidade com diferentes escalas espacial e temporal. Assim, o comportamento das ondas de gravidade é melhor interpretado em termos do espectro como uma função da frequência da onda ( $\omega$ ) e dos números de onda vertical e horizontal ( $m$  e  $k$ ). VanZandt (1982) investigou o espectro das ondas de gravidade observadas na troposfera e na média atmosfera e encontrou uma universalidade do espectro em relação às estações do ano, altitude e condições geográficas. Neste estudo VanZandt (1982) também observou que a variação da frequência e do número de onda horizontal do espectro das ondas de gravidade pode ser representada por  $\omega^{-5/3}$  e  $k^{-5/3}$ , respectivamente.

Utilizando perfis de vento e de temperatura obtidos por radares e por radiossondas Fritts & VanZandt (1993) descreveram a energia do espectro das perturbações causadas pelas ondas de gravidade como um produto de funções separadas em  $\omega$ ,  $m$  e  $\phi$  dada pela seguinte expressão:

$$E(\mu, \omega, \phi) = E_0 A(\mu) B(\omega) \Phi(\phi) \quad (1)$$

Sendo que,

$$A(\mu) = \frac{A_0 \mu^3}{(1 + \mu^s + 1)} \quad (2)$$

$$B(\omega) = B_0 \omega^{-p} \quad (3)$$

Nestas equações,  $\mu = m/m_*$  e  $m = 2\pi/\lambda_z \cdot \lambda_z$  e  $m_*$  são respectivamente, o comprimento de onda vertical e o número de onda característico e  $\phi$  é o ângulo azimutal indicando a direção de propagação da onda. O parâmetro  $E_0$  representa a energia total das ondas de gravidade por unidade de massa, enquanto  $A_0$  e  $B_0$  são os parâmetros normalizados para o número de onda vertical e para o espectro de frequência,  $A(\mu)$  e  $B(\omega)$ . A função  $\Phi(\phi)$  representa a anisotropia na direção de propagação das ondas de gravidade.

A densidade de energia,  $E_0$ , que pode ser utilizada para medir a atividade de ondas de gravidade, é definida pela seguinte expressão (Allen & Vincent, 1995; Tsuda et al., 2000):

$$E_0 = E_k + E_p \\ = \frac{1}{2} \left[ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} + \left(\frac{g}{N}\right)^2 \left(\frac{\overline{T'}}{\overline{T}}\right)^2 \right] \quad (4)$$

na qual  $E_k$  e  $E_p$  representam as energias cinética e potencial por unidade de massa, respectivamente. Estas energias podem ser reescritas da seguinte forma:

$$E_k = \frac{1}{2} \left[ \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right] \quad (5)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{g}{N}\right)^2 \left(\frac{\overline{T'}}{\overline{T}}\right)^2 \right] \quad e, \quad (6)$$

$$N^2 = \frac{g}{T} \left[ \frac{dT}{dz} + \frac{g}{C_p} \right] \quad (7)$$

Os termos  $u'$ ,  $v'$  e  $w'$  representam as componentes perturbadas do vento, nas direções zonal, meridional e vertical, respectivamente;  $g$  é a aceleração devido a gravidade;  $N$  é a frequência de Brünt-Väisälä;  $\overline{T}$  e  $\overline{T'}$  são as componentes média e perturbada da temperatura;  $C_p$  é o calor específico a pressão constante do ar seco. De acordo com a teoria linear das ondas de gravidade, a razão entre a energia cinética e potencial ( $E_k/E_p$ ) é constante e igual 5/3, e representa o índice espectral  $p$  da Equação 3. Portanto, é possível estimar  $E_0$  apenas a partir das observações da temperatura (Tsuda et al., 2000), e assim, o cálculo da energia potencial depende principalmente da estimativa da flutuação

da temperatura causada pela propagação de ondas de gravidade através da atmosfera.

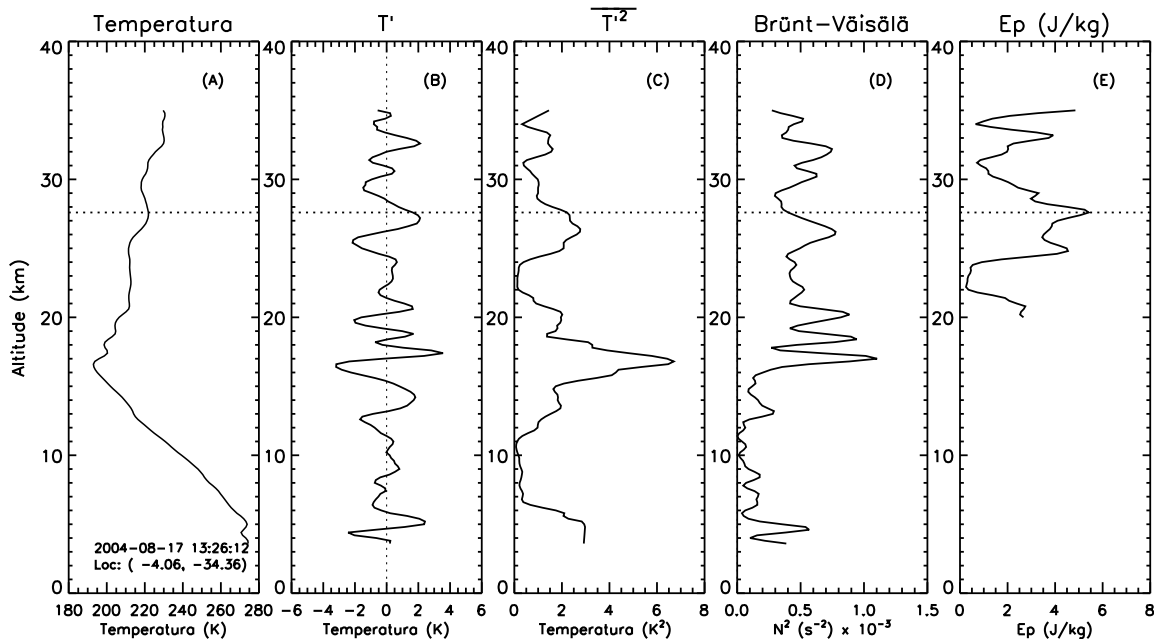
## INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA PARA DETERMINAR A ATIVIDADE DE ONDAS DE GRAVIDADE

O satélite alemão CHAMP foi lançado de Plesetsk, Rússia (62,5°N, 40,3°L), em 15 de julho de 2000 às 11:00 UT pelo foguete russo COSMOS. O CHAMP possui uma órbita polar com inclinação de 87,2° e uma altitude inicial de 454 km. A vida útil do satélite foi estimada até o final de 2007, quando um conjunto de dados de rádio ocultação sem precedentes já terá sido registrado (Wickert et al., 2001).

Os experimentos do CHAMP incluem medidas do campo gravitacional (Reigber et al., 2003) e magnético da Terra (Maus et al., 2002), além de informação precisa do perfil de refratividade, temperatura, umidade e densidade de elétrons em escala global (Jakowski et al., 2002; Wickert et al., 2001). Para um satélite de baixa órbita terrestre, como é o caso do CHAMP, uma rádio ocultação ocorre quando um satélite GPS nasce ou se põe atrás do limbo da Terra, e o caminho do raio de seu transmissor atravessa a atmosfera terrestre. Quando o sinal passa através da atmosfera ele é refratado e retardado pelas variações no índice de refração, produzindo variações distintas na amplitude e fase do sinal recebido. Como a geometria muda, as ondas de rádio sondam camadas atmosféricas sucessivamente mais profundas e densas. A partir das variações na amplitude e fase do sinal, estas sondagens podem ser usadas para se obter um perfil de índice de refração, e a partir deste pode-se derivar alguns dos parâmetros atmosféricos tais como: densidade, pressão, temperatura, vapor d'água e densidade de elétrons. As medidas por rádio ocultação são quase instantâneas (1~2 minutos) e sondam toda a atmosfera a partir da superfície, em comparação, por exemplo, a um perfil por radiossondagem que é realizado em cerca de 90 minutos para uma altura máxima de 30 km (Melbourne et al., 1994).

As primeiras medidas de rádio ocultação com o CHAMP foram realizadas em 11 de fevereiro de 2001 entre 19:04 e 20:04 UT. Nesta ocasião foram registradas sete ocultações de boa qualidade, cada uma com mais de 30 segundos de duração. Atualmente, são registrados em torno de 150 a 200 rádio ocultações por dia com o satélite CHAMP. Os perfis de temperatura utilizados neste estudo, correspondentes à versão 005, foram processados e disponibilizados pela GeoForschungsZentrum (GFZ) da Alemanha.

Para determinar a energia potencial,  $E_p$ , é necessário conhecer, além do perfil de temperatura, a flutuação da temperatura, a variância da flutuação e a frequência de Brünt-Väisälä.



**Figura 1** – (A) Perfil vertical de temperatura observado no dia 17/08/2004 na região nordeste do Brasil (4,06°S, 34,36°O) em torno das 13:26 UT. (B) Perturbação do perfil de temperatura. (C) Variância da flutuação do perfil de temperatura. (D) Frequência de Brünt-Väisälä ao quadrado e (E) perfil de energia potencial ( $E_p$ ).

O perfil de temperatura atmosférico,  $T(z)$ , pode ser considerado como sendo formado pela temperatura básica,  $\overline{T(z)}$ , e pela componente da flutuação,  $T'(z)$ . A flutuação da temperatura é determinada através da filtragem do perfil de temperatura, utilizando um filtro “passa-alta” com uma frequência de corte de 10 km. Procedimentos semelhantes foram realizados nas análises de perfis dos parâmetros atmosféricos obtidos por foguetes (Eckermann et al., 1995). A frequência de Brünt-Väisälä ao quadrado,  $N^2$ , pode ser determinada através da diferenciação do perfil de temperatura em relação a três alturas adjacentes.

A variância da flutuação da temperatura,  $\overline{T'^2(z)}$ , é determinada através da seguinte relação (Tsuda et al., 2000):

$$\overline{T'^2(z)} = \frac{1}{z^{\max} - z^{\min}} \int_{z^{\min}}^{z^{\max}} T'^2(z) dz \quad (8)$$

onde,  $z^{\max}$  e  $z^{\min}$  representam o topo e a base da região onde é realizado o cálculo da energia potencial.

A Figura 1(A) apresenta um exemplo de perfil de temperatura obtido pelo satélite CHAMP na região nordeste do Brasil (4,06°S, 34,36°O) no dia 17/08/2004 em torno das 13:26 UT. O perfil de temperatura foi filtrado com um filtro “passa-baixa” para a remoção de ruídos. A tropopausa, região onde ocorre a inflexão do perfil de temperatura, pode ser observada em torno

de 16,5 km de altura. O perfil de flutuação da temperatura, mostrado na Figura 1(B), apresenta as oscilações presentes no perfil de temperatura causadas pela propagação das ondas de gravidade. Entretanto, observa-se que na altura da tropopausa ocorre uma variação de temperatura em torno de  $-3$  K, a qual é causada pela inversão do gradiente do perfil de temperatura e, portanto, não pode ser atribuída às ondas de gravidade.

A Figura 1(C) apresenta a variância da flutuação da temperatura  $\overline{T'^2}$ . Este perfil realça as principais flutuações da temperatura causadas pelas ondas de gravidade, como por exemplo entre 25 e 28 km de altitude onde se observa valores em torno de 2 a 3  $K^2$ . Na Figura 1(D) é apresentado o perfil da frequência de Brünt-Väisälä ao quadrado, obtido a partir das medidas de temperatura do satélite CHAMP. O valor de  $N^2$  é pequeno na troposfera e devido à inversão do gradiente de temperatura apresenta um aumento abrupto na altura da tropopausa; na região da estratosfera ( $\sim 17$  a 35 km de altitude) é onde se observa os maiores valores de  $N^2$ . O perfil da energia potencial,  $E_p$ , determinado entre 20 e 35 km de altitude é apresentado na Figura 1(E). Observa-se que o cálculo de  $E_p$  depende diretamente do valor da variância da flutuação da temperatura  $\overline{T'^2}$  e é inversamente proporcional à frequência de Brünt-Väisälä, isto se torna evidente entre 25 e 28 km de altitude, onde o perfil de  $E_p$  varia entre  $\sim 3$  e 6  $J/kg$ . A linha tracejada em 27,4 km de altura destaca o maior valor de

$E_p$ ,  $\sim 6 J/kg$ , associado a uma variação de  $\sim 2 K$  no perfil de  $T'$  e de  $\sim 3 K^2$  no perfil de  $\overline{T'^2}$ , Figuras 1(B) e 1(C) respectivamente. Por outro lado, em torno de 26 km de altura, observa-se um decréscimo do valor de  $E_p$ , isto se deve ao aumento de  $N^2$  nesta altura, uma vez que  $\overline{T'^2}$  se mantém aproximadamente constante,  $\sim 3 K^2$ , entre 25 e 28 km de altitude. Portanto, pode-se afirmar que a energia potencial,  $E_p$ , pode ser utilizada como um indicativo da atividade de ondas de gravidade, uma vez que depende diretamente da flutuação da temperatura presente nos perfis de temperatura obtidos pela técnica de rádio ocultação.

Como exemplo da aplicação desta metodologia, a Figura 2(A) apresenta um mapa com a distribuição de rádio ocultações realizadas pelo satélite CHAMP sobre a América do Sul durante o mês de dezembro de 2002, perfazendo um total de 439 eventos. A energia potencial é determinada utilizando cada um dos pontos do mapa, o qual representa um perfil de temperatura obtido através da técnica de rádio ocultação. Os resultados da energia potencial integrada, entre 24 e 34 km de altitude, sobre a América do Sul estão apresentados na Figura 2(B). Neste trabalho, as regiões nos mapas que apresentam valores de  $E_p$  entre 0 e  $3 J/kg$  serão considerados como regiões com baixa atividade de ondas de gravidade; para valores de  $E_p$  entre 3 e  $7 J/kg$  atividade moderada de ondas; e para as regiões com valores de  $E_p$  acima de  $7 J/kg$  serão consideradas com alta atividade de ondas de gravidade. Deste modo, observa-se na Figura 2(B) uma baixa atividade de ondas de gravidade principalmente sobre o Pacífico Sul, Atlântico Sul e em grande parte do continente americano. Regiões com atividade moderada de ondas de gravidade podem ser observadas principalmente entre  $\pm 10^\circ$  em torno do Equador tanto sobre o continente como sobre os oceanos. Regiões isoladas com alta atividade de ondas de gravidade são observadas sobre o estado de Minas Gerais no Brasil e sobre o oceano Pacífico equatorial.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta o número de rádio ocultações observadas sobre a América do Sul entre ( $30^\circ N$ - $60^\circ S$ ) e ( $100^\circ O$ - $20^\circ O$ ), para cada estação do ano entre 2001 e 2005.

**Tabela 1** – Número de rádio ocultações ocorridas sobre a América do Sul.

	2001	2002	2003	2004	2005
Primavera	582	1729	1471	1450	528
Verão	–	947	1406	1403	1276
Outono	–	1336	1508	1398	1382
Inverno	1045	1531	1550	1377	1326

Este conjunto de dados foi utilizado para o cálculo da energia potencial sobre a América do Sul para cada estação do ano entre 2001 e 2005, de forma análoga à apresentada na Figura 2. Para ressaltar a variação interanual na energia potencial sobre a América do Sul, a Figura 3 apresenta os resultados da energia potencial determinada somente na primavera para os anos de 2001 a 2005.

A Figura 3(A) apresenta a distribuição da energia potencial na primavera no ano de 2001, na qual se observa uma baixa atividade de ondas de gravidade abaixo de  $10^\circ S$ , tanto sobre o continente quanto oceanos. Também é possível notar uma atividade moderada de ondas de gravidade principalmente sobre a América Central e oceano Atlântico em torno de  $\pm 10^\circ$  da linha equatorial. A maior atividade de ondas de gravidade pode ser observada em pontos isolados no Hemisfério Norte, principalmente sobre o oceano Atlântico e em algumas regiões isoladas sobre o Pacífico Sul.

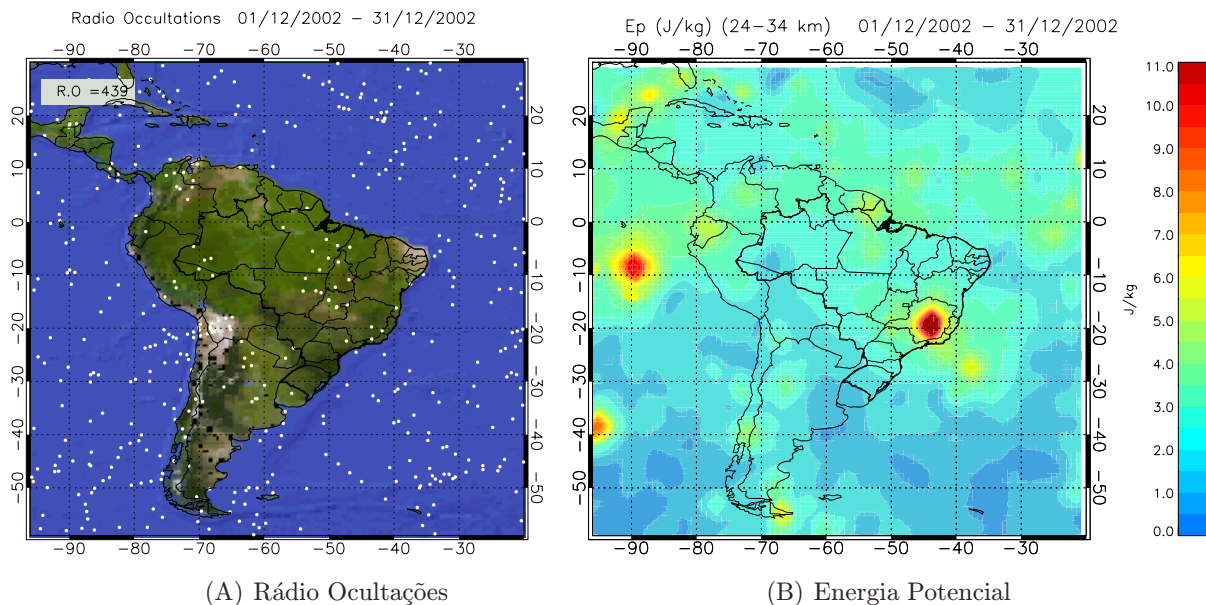
Em 2002, Figura 3(B), percebe-se um aumento da atividade de ondas de gravidade sobre a América do Sul, com maior concentração em  $\pm 20^\circ$  em torno do Equador. Esta atividade de ondas ocorre tanto sobre o continente quanto sobre os oceanos. Contudo, destacam-se ainda algumas regiões com maior atividade de ondas no sul do Brasil, região equatorial e norte do oceano Atlântico.

Durante o ano de 2003, Figura 3(C), ocorreu uma diminuição da atividade de ondas de gravidade, principalmente no sul do continente americano e Pacífico Sul. Porém, observa-se uma atividade de ondas moderada sobre o oceano Atlântico. A região com maior atividade de ondas de gravidade está concentrada em  $\pm 10^\circ$  em torno do Equador, principalmente sobre o continente.

No ano de 2004, Figura 3(D), ocorreu um grande aumento na atividade de ondas de gravidade em  $\pm 10^\circ$  em torno do Equador, principalmente sobre o oceano Pacífico. Esta atividade de ondas está bem distribuída sobre o continente e oceanos. Focos isolados onde a energia potencial é maior podem ser claramente observados, por exemplo, na costa do Brasil.

Para o ano de 2005, Figura 3(E), comparado com o ano anterior, observa-se uma pequena diminuição na atividade de ondas de gravidade na região equatorial. Porém, esta atividade de ondas está distribuída em  $\pm 20^\circ$  em torno do Equador, tanto sobre o continente quanto sobre os oceanos.

Observa-se a partir da Figura 3 que durante os anos de 2001 e 2002 a atividade de ondas foi mais intensa sobre o oceano Atlântico, enquanto que em 2003 e 2005 esta atividade de ondas predominou sobre o oceano Pacífico. Para o ano de 2004 a atividade de ondas de gravidade apresentou uma distribuição



**Figura 2** – (A) Número de rádio ocultações ocorridas durante o mês de dezembro de 2002. (B) Energia potencial integrada entre 24 e 34 km de altitude.

uniforme entre o continente e os oceanos. Também é possível observar que existe uma variação interanual da energia potencial, e por consequência, na atividade de ondas de gravidade sobre a América do Sul.

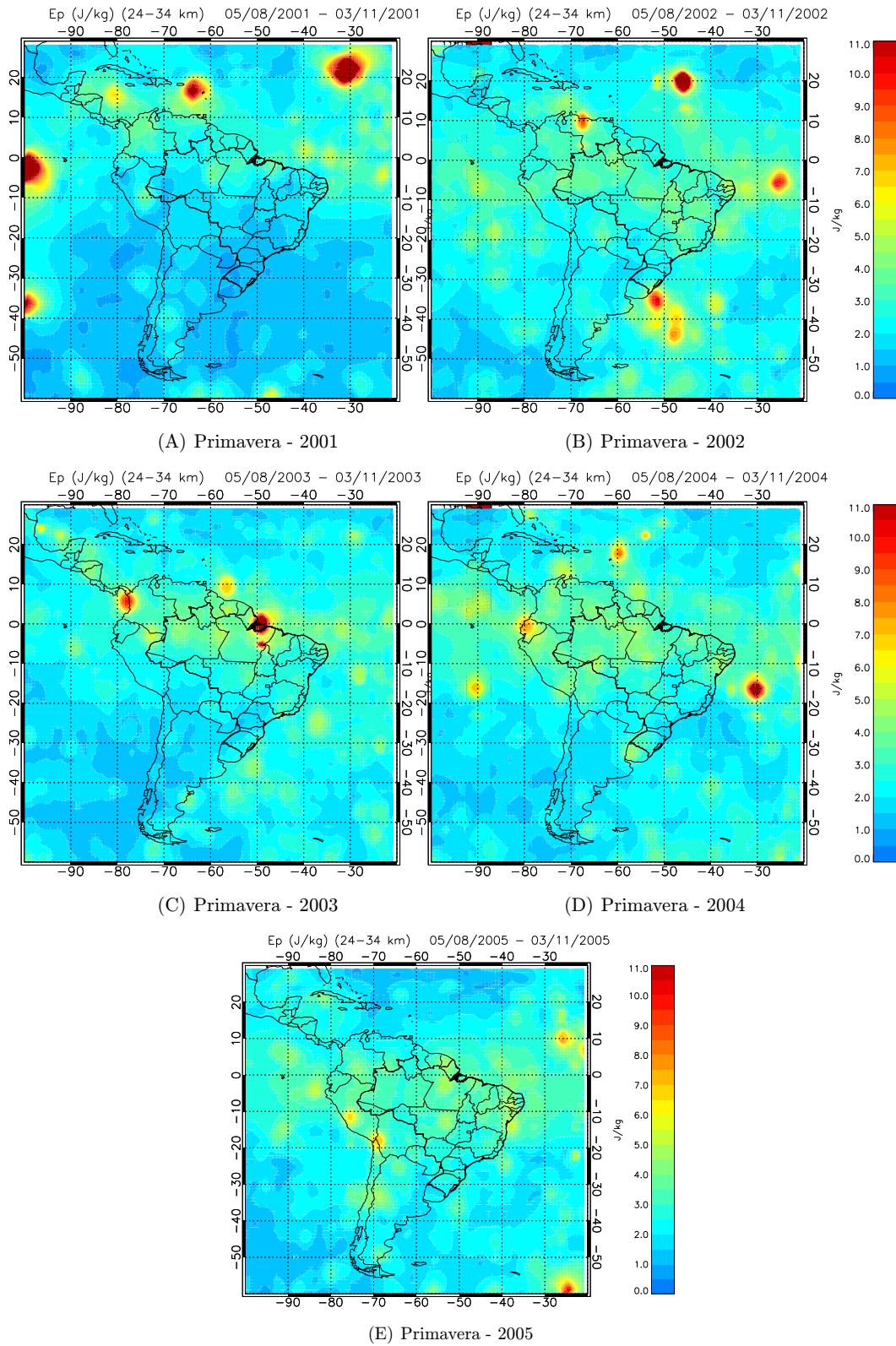
A Figura 3 também ressalta que a maior atividade de ondas de gravidade está concentrada em torno do Equador. Desta forma, para melhor caracterizar a variação da energia potencial, a Figura 4 apresenta os resultados da energia potencial média ( $\overline{E_p}$ ), integrada entre ( $10^\circ\text{N}$ - $10^\circ\text{S}$ ) e ( $100^\circ\text{O}$ - $20^\circ\text{O}$ ) para os anos de 2001 a 2005. Os resultados mostram uma sazonalidade na atividade de ondas de gravidade na faixa equatorial. Observa-se que durante o inverno ocorrem os menores valores de energia potencial média, e assim uma menor atividade de ondas de gravidade nesta região. Os resultados encontrados para a primavera mostram um aumento da energia potencial média entre os anos de 2001 a 2004, com uma pequena diminuição no ano de 2005. Para o verão e outono há uma alternância dos valores da energia potencial média ( $\overline{E_p}$ ), onde os maiores valores ocorrem durante os anos de 2002 e 2004 e os menores nos anos de 2003 e 2005. A partir dos resultados da energia potencial média ( $\overline{E_p}$ ) se observa que a maior atividade de ondas de gravidade ocorreu durante os anos de 2002 e 2004, enquanto que a menor atividade de ondas de gravidade foi observada nos anos de 2003 e 2005.

Allen & Vincent (1995) mostraram que a atividade de ondas de gravidade na baixa atmosfera é maior no inverno em latitudes médias e na primavera e outono em baixas latitudes. Os autores

também sugerem que em baixas latitudes, as convecções seriam as principais fontes de geração das ondas de gravidade entre dezembro e fevereiro. Resultados similares também foram encontrados por Tsuda et al. (2000) e Ratman et al. (2004). Portanto, os resultados encontrados no presente estudo corroboram os resultados apresentados por aqueles autores.

As convecções profundas nos trópicos são as principais fontes de geração de ondas, dentre elas destacam-se as ondas de gravidade, ondas de Kelvin, ondas de gravidade inerciais e ondas de Rossby (Baldwin et al., 2001). Em baixas latitudes, a circulação zonal é dominada pelas oscilações quase-bienais (QBO) e pelas oscilações semi-anuais (SAO), também conhecidas como oscilações equatoriais. A QBO, com períodos entre 22 e 34 meses predomina na baixa estratosfera (Reed, 1965; Reed, 1966) mas também tem sido observada na mesosfera superior (Burrage et al., 1996). As oscilações semi-anuais, por outro lado exercem maior domínio na estratosfera superior e mesosfera (Hirota, 1980; Hamilton et al., 1995), interagindo com QBO.

A teoria descrita por Lindzen & Holton (1968) e Holton & Lindzen (1972) demonstrou que as ondas de escala planetária podem acelerar a circulação zonal de modo a produzir as oscilações quase-bienais (*Quasi-Biennial Oscillation* – QBO) que são observadas em baixas latitudes (Mayr et al., 1998). Considerando as ondas de Kelvin observadas por satélite Hitchman & Leovy (1988) concluíram que estas ondas contribuem de 20% a 70% nas oscilações semi-anuais (*Semi-Annual Oscillation* – SAO) na



**Figura 3** – Distribuição da energia potencial sobre a América do Sul na primavera para os anos de 2001 a 2005.

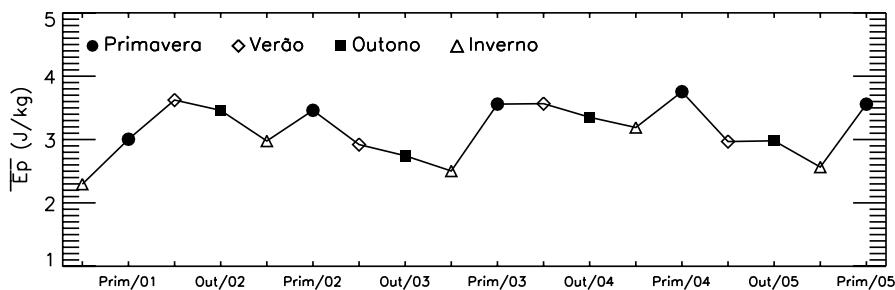


Figura 4 – Energia potencial média integrada entre (10°N-10°S) e (100°O-20°O).

estratosfera e que, desta forma as ondas de gravidade provavelmente também seriam importantes. Estas conclusões foram confirmadas principalmente por Takahashi & Boville (1992) e por Hamilton et al. (1995), os quais utilizaram modelos de circulação geral (*General Circulation Models* – GCM's) para mostrar que as ondas planetárias equatoriais unicamente não poderiam reproduzir as amplitudes observadas da QBO. Desta forma, as ondas de gravidade observadas na troposfera desempenham um importante papel no transporte de energia e momentum entre a baixa e a média atmosfera, alterando a estrutura térmica e a circulação geral nestas regiões (Takahashi et al., 1999). Portanto, a atividade de ondas de gravidade apresentada neste estudo sobre a região equatorial pode contribuir de forma significativa nas oscilações semi-anuais e na QBO observadas nos campos de temperatura e vento da estratosfera.

## CONCLUSÕES

A partir dos perfis de temperatura obtidos através da técnica de rádio ocultação de GPS com o satélite CHAMP foi possível determinar a atividade de ondas de gravidade na região da baixa estratosfera sobre a América do Sul para os anos de 2001 a 2005.

Os resultados encontrados para a energia potencial integrada, entre 24 e 34 km de altura, mostraram uma variação interanual na atividade de ondas de gravidade sobre a América do Sul. A partir dos critérios estabelecidos para a atividade de ondas de gravidade, observou-se que esta atividade está mais concentrada em torno da região equatorial. A energia potencial média ( $\overline{E_p}$ ), determinada em torno do Equador, apresentou uma clara variação sazonal sobre a América do Sul. O inverno foi a estação do ano com a menor atividade de ondas, enquanto que a primavera apresentou um aumento na atividade de ondas. Os resultados da energia potencial média também mostraram um aumento da atividade de ondas de gravidade nos anos de 2002 e 2004 e uma diminuição nos anos de 2003 e 2005. Estes resultados mostram que a técnica

de rádio ocultação é bastante útil para o monitoramento global da atividade de ondas de gravidade na baixa atmosfera.

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível graças ao apoio da Fapesp e do CNPq, processos 05/50482-5 e 150039/2004-2, respectivamente. Também gostaríamos de agradecer a GFZ da Alemanha por disponibilizar os dados de rádio ocultação do satélite CHAMP.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN SJ & VINCENT RA. 1995. Gravity-Wave Activity in the Lower Atmosphere – Seasonal and Latitudinal Variations. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 100(D1): 1327–1350.
- BALDWIN MP, GRAY LJ, DUNKERTON TJ, HAMILTON K, HAYNES PH, RANDEL WJ, HOLTON JR, ALEXANDER MJ, HIROTA I, HORINOUCHE T, JONES DBA, KINNERSLEY JS, MARQUARDT C, SATO K & TAKAHASHI M. 2001. The quasi-biennial oscillation. *Reviews of Geophysics*, 39(2): 179–230.
- BURRAGE MD, VINCENT RA, MAYR HG, SKINNER WR, ARNOLD NF & HAYS PB. 1996. Long-term variability in the equatorial middle atmosphere zonal wind. *Journal of Geophysical Research*, 101(D8): 12847–12854.
- ECKERMAN SD, HIROTA I & HOCKING WK. 1995. Gravity wave and equatorial wave morphology of the stratosphere derived from long-term rocket sounding. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 121(521): 149–186.
- FOELSCH U, GOBIET A, STEINER AK, KIRCHENGAST G, BORSCHE M, SCHMIDT T & WICKERT J. 2004. Climate Monitoring With CHAMP Radio Occultation Data: The CHAMPCLIM Project. In: *American Geophysical Union. Proceedings...* San Francisco: AGU, p. A728.
- FRITTS DC & NASTROM GD. 1992. Sources of Mesoscale Variability of Gravity-Waves, Part II: Frontal, Convective, and Jet-Stream Excitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49(2): 111–127.



- FRITTS DC & VANZANDT TE. 1993. Spectral estimates of gravity wave energy and momentum fluxes, Part I: energy dissipation, acceleration and constraints. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(22): 3685–3694.
- HAJJ GA, KURSINSKI ER, ROMANS LJ, BERTIGER WI & LEROY SS. 2002. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(4): 451–469.
- HAMILTON K, WILSON RJ, MAHLMAN JD & UMSCHIED LJ. 1995. Climatology of the SKYHI troposphere-stratosphere-mesosphere general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(1): 5–43.
- HEALY SB & THÉPAUT JN. 2006. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(615): 605–623.
- HIROTA I. 1980. Observational evidence of the semiannual oscillation in the tropical middle atmosphere—a review. *Pure and Applied Geophysics*, 118 (1-2): 217–238.
- HITCHMAN MH & LEOVY CB. 1988. Estimation of the Kelvin wave contribution to the semiannual oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 45(9): 1462–1475.
- HOLTON JR & LINDZEN RS. 1972. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(6): 1076–1080.
- JAKOWSKI N, KUTIEV IS, HEISE S & WEHRENPENNIG A. 2002. GPS Radio Occultation Measurements of the Ionosphere from CHAMP: Early Results. *Geophysical Research Letters*, 29(10): 95–1.
- LINDZEN RS & HOLTON JR. 1968. A theory of the quasi-biennial oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 25(6): 1095–1107.
- MAUS S, ROTHER M, HOLME R, LÜHR H, OLSEN N & HAAK V. 2002. First scalar magnetic anomaly map from CHAMP satellite data indicates weak lithospheric field. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 1702, doi:10.1029/2001GL013685.
- MAYR HG, MENGEL JG, REDDY CA, CHAN KL & PORTER HS. 1998. Variability of the equatorial oscillations induced by gravity wave filtering. *Geophysical Research Letters*, 25(14): 2629–2632.
- MEDEIROS AF, TAKAHASHI H, BURITI RA, PINHEIRO KM & GOBBI D. 2005. Atmospheric gravity wave propagation direction observed by airglow imaging in the South American sector. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 67(17-18): 1767–1773.
- MELBOURNE W, DAVIS ES, DUNCAN CB, HAJJ GA, HARDY KR, KURSINSKI ER, MEEHAN TK, YOUNG LE & YUNCK TP. 1994. The application of spaceborne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring. Publication 94-18, JPL, Pasadena, California.
- NAKAMURA T, TSUDA T, YAMAMOTO M, FUKAO S & KATO S. 1993. Characteristics of Gravity-Waves in the Mesosphere Observed with the Middle and Upper-Atmosphere Radar: 2. Propagation Direction. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 98(D5): 8911–8923.
- RANDEL WJ & WU F. 2005. Kelvin wave variability near the equatorial tropopause observed in GPS radio occultation measurements. *Journal of Geophysical Research*, 110(D9): 3102–3115.
- RATNAM MV, TETZLAFF G & JACOBI C. 2004. Global and seasonal variations of stratospheric gravity wave activity deduced from the CHAMP/GPS satellite. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61(13): 1610–1620.
- REED RJ. 1965. The quasi-biennial oscillation of the atmosphere between 30 and 50 km over Ascension Island. *Journal of Atmospheric Science*, 22: 331–333.
- REED RJ. 1966. Zonal wind behavior in the equatorial stratosphere and lower mesosphere. *Journal of Geophysical Research*, 71(18): 4223–4233.
- REIGBER C, BALMINO G, SCHWINTZER P, BIANCALE R, BODE A, LEMOINE J, KÖNIG R, LOYER S, NEUMAYER H, MARTY J, BARTHELMES F, PEROSANZ F & ZHU SY. 2003. Global gravity field recovery using solely GPS tracking and accelerometer data from Champ. *Space Science Reviews*, 108: 55–66.
- TAKAHASHI H, BATISTA PP, BURITI RA, GOBBI D, TSUDA T & FUKAO S. 1999. Response of the airglow OH emission, temperature and mesopause wind to the atmospheric wave propagation over Shigaraki, Japan. *Earth Planets and Space*, 51(7-8): 863–875.
- TAKAHASHI M & BOVILLE BA. 1992. A three-dimensional simulation of the equatorial quasi-biennial oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49(12): 1020–1035.
- TSUDA T, NISHIDA M, ROCKEN C & WARE RH. 2000. A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the GPS occultation data (GPS/MET). *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 105(D6): 7257–7273.
- VANZANDT TE. 1982. A Universal Spectrum of Buoyancy Waves in the Atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 9(5): 575–578.
- WICKERT J, GALAS R, BEYERLE G, KÖNIG R & REIGBER C. 2001. GPS ground station data for CHAMP radio occultation measurements. *Physics and Chemistry of the Earth (A)*, 26(6-8): 503–511.
- WRASSE CM, NAKAMURA T, TSUDA T, TAKAHASHI H, MEDEIROS AF, TAYLOR MJ, GOBBI D, SALATUN A, SURATNO, ACHMAD E & ADMIRANTO AG. 2006. Reverse ray tracing of the mesospheric gravity waves observed at 23°S (Brazil) and 7°S (Indonesia) in airglow imagers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(2): 163–181.
- WU DL & WATERS JW. 1996. Satellite observations of atmospheric variances: A possible indication of gravity waves. *Geophysical Research Letters*, 23(24): 3631–3634.

## NOTAS SOBRE OS AUTORES

**Cristiano Max Wrasse.** Licenciado em Física pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 1997. Mestre e Doutor em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000 e 2004 respectivamente. Áreas de interesse: Aeronomia Polar e Equatorial, Rádio Ocultação de GPS.

**Hisao Takahashi.** Físico pela Universidade de Niigata, Japão, 1968. Mestre em Atmosfera Superior pela Universidade de Niigata, Japão, 1970. Doutor em Ciências Espaciais pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1980. Área de interesse: Aeronomia Óptica.

**Joaquim Fechine.** Bacharel em Física pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 1998. Mestre em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2004. Doutorando em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), desde 2004. Áreas de interesse: Aeronomia equatorial, Ocultação de GPS.

**Clezio Marcos Denardini.** Referenciado como DENARDINI CM, concluiu o doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em 2003. Atualmente é Pesquisador Adjunto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atua na área de Geociências, com ênfase em Aeronomia.

**Jens Wickert.** Ph.D em Meteorologia e Geofísica na Graz University, Áustria, 2002. Áreas de interesse: Rádio ocultação de GPS da atmosfera neutra e ionosfera.