

AVALIAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS DE RÁDIO- OCULTAÇÃO GPS DO SATÉLITE CHAMP SOBRE A AMÉRICA DO SUL

MARCELO LEANDRO HOLZSCHUH¹

LUIZ FERNANDO SAPUCCI²

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO³

¹Universidade Estadual do Mato Grosso, Departamento de Licenciatura em Computação, Colíder – MT

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, CPTEC, Cachoeira Paulista – SP.

³Universidade Estadual Paulista-UNESP, Departamento de Cartografia da FCT, Presidente Prudente – SP

mlholz@gmail.com, lsapucci@cptec.inpe.br, galera@fct.unesp.br

RESUMO – Com o advento dos satélites artificiais GPS (*Global Positioning System*), em conjunto com os satélites LEO (*Low Earth Orbiting*), surge a Rádio Ocultação GPS (RO-GPS), técnica que permite obter remotamente perfis atmosféricos com boas perspectivas para aplicações em modelagem numérica do tempo. Nesse trabalho objetiva-se avaliar a qualidade dos perfis atmosféricos obtidos com o satélite LEO CHAMP sobre a América do Sul, comparando os com os perfis provenientes de radiossondagens e da condição inicial de um modelo regional de Previsão Numérica de Tempo (PNT). Os dados das radiossondagens utilizados nessa avaliação foram coletados por 14 estações operacionais de radiossondagem, realizadas nos meses de setembro e outubro de 2002. O modelo de PNT utilizado foi o modelo regional ETA do CPTEC-INPE. Os resultados da comparação entre os perfis obtidos por RO e por Radiossondas (RSO) apontam uma diferença média abaixo de 1°C para os perfis distantes entre si de 2° em latitude e 2° em longitude e coletados com até 6 horas de diferença, e um desvio padrão de até 3°C, distribuídos entre uma altura de 9 a 18 km. Os resultados da comparação entre os perfis de temperatura advindos de RO e PNT, apresentaram discrepância média e desvio padrão abaixo de 1°C.

Palavras-chaves: Perfis atmosféricos; Rádio Ocultação GPS; meteorologia GPS.

EVALUATION OF ATMOSPHERIC PROFILE FROM GPS RADIO OCCULTATION USING CHAMP SATELLITE OVER SOUTH OF AMERICAN

ABSTRACT – With the advent of satellites GPS (Global Satellite System), together the LEO (Low Earth Orbiting) satellites, it appears the Radio Occultation GPS (RO-GPS), a technique that allows to get remotely atmospheric profiles with promising perspectives to applications in atmospheric numerical models. In this paper it is proposed to evaluate the quality of atmospheric profiles obtained by the LEO CHAMP satellites over South of America, compare them with profiles from radiosondes and the initial condition of the regional model of Numerical Weather Prediction (PNT). The radiosonde data used in this comparison was collected during an intensive campaign with the employment of 14 radiosonde station, performed from September to November 2002. The PNT model used was the regional the ETA model from CPTEC-INPE. Results of comparison accomplished between RO and RSO profiles pointed out a mean difference under 1° C to profiles apart themselves by 2° in latitude and 2° in longitude and collected lagging up to 6 hours, and a standard deviation up to 3° C, distributed in altitudes from 9 to 18 km. The results from the comparison between temperature profiles obtained by RO and by PNT hat presented mean discrepancy and standard deviation below 1°C.

Key-words: Atmospheric profiles, Radio Occultation GPS, GPS meteorology.

1 INTRODUÇÃO

Em astronomia a ocultação é um fenômeno pelo qual um corpo celeste deixa de ser visto em razão da sobreposição de um outro. Tal fenômeno começou a ser estudado há vários anos com o intuito de obter informações da atmosfera de outros planetas. Esses estudos se iniciaram com as ocultações estelares. As estrelas eram observadas da Terra quando passavam por detrás de um planeta (FJELDBO et. al., 1971). A partir da posição da estrela, em um determinado instante, é possível calcular a refração da atmosfera do planeta em um ponto específico, sendo que a variação de posição do corpo celeste permite a obtenção de um perfil de refração da atmosfera, e conseqüentemente, informações sobre a atmosfera desse planeta. Com os lançamentos dos satélites artificiais, foi possível a realização de diversos testes empregando essa técnica com os sinais de radiofrequência com o objetivo de se obter perfis da atmosfera terrestre. No entanto, com a operacionalização do sistema de posicionamento global (*Global Positioning System*) e a precisão final obtida, a rádio ocultação passou a ser viabilizada ao envolver receptores a bordo de satélites de órbita baixa.

O GPS é um sistema de posicionamento global, e o princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distância entre o usuário e quatro satélites. O GPS é formado por uma constelação de 24 satélites, dispostos de modo que o receptor obtenha sinais de pelo menos quatro satélites simultaneamente, permitindo determinar de maneira precisa e acurada a posição de um objeto em tempo real (MONICO, 2000). Apesar do GPS ter sido projetado e desenvolvido pela força aérea e a marinha dos Estados Unidos para auxiliar na navegação, a comunidade civil buscou utilizá-lo para muitas atividades que requeriam precisão tais como: navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas, etc. (HOFMANN-WELLENHOF et. al., 2001).

Com o advento de satélites LEO (*Low Earth Orbiting*), que estão localizados em uma órbita a aproximadamente 800 km de altitude, passou-se a utilizar um receptor GPS embarcado no satélite para determinação precisa da posição do satélite. A partir dos dados coletados por esse receptor, é possível, através da técnica de Rádio Ocultação GPS (RO GPS), recuperar perfis atmosféricos (temperatura, pressão e vapor d'água) da atmosfera terrestre (KURSINSKI, 1996).

A primeira missão que permitiu empregar a técnica de RO GPS foi a que lançou o GPS/MET, a qual gerou dados de sondagem da atmosfera neutra e da ionosfera. Em seqüência também foram lançados outros satélites LEO, entre eles está o CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application*), com o objetivo principal de determinar a gravidade e o campo magnético da Terra, o qual permite estudos com RO GPS (WIKERT et. al., 2001). A nova geração dos satélites LEO para estudos atmosféricos se insere no projeto COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate*) que tem como objetivo principal proporcionar melhorias no desempenho de modelos de PNT (Previsão Numérica de Tempo), especialmente em regiões polares e oceânicas, bem como em locais com florestas muito densas, como é o caso da floresta amazônica.

No presente estudo pretende-se apresentar uma validação dos perfis atmosféricos obtidos com RO-GPS comparando-os com perfis provenientes de PNT, e Radiossondas (RSO). Na próxima seção será apresentada uma descrição sobre a obtenção dos perfis atmosféricos. Na seção 3 serão apresentados detalhes dos dados utilizados na validação, a metodologia utilizada, os resultados obtidos e uma análise dos mesmos. Na seção 4 serão apresentados os comentários finais e as conclusões.

2. Perfis atmosféricos a partir da Radio ocultação GPS

Na RO GPS, os sinais que são enviados pelos satélites GPS e recebidos no satélite LEO sofrem os efeitos da troposfera e da ionosfera ao atravessarem a atmosfera terrestre. A troposfera se estende da superfície terrestre até aproximadamente 50 km, e comporta-se, como um meio não-dispersivo, isto é, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera é um meio dispersivo, ou seja, a refração depende da frequência. A ionosfera abrange aproximadamente a região que vai de 50 até 1.000 km acima da superfície terrestre.

Devido aos efeitos da parte superior da troposfera, da estratosfera e da ionosfera, a propagação do sinal se dá na forma de uma linha curva, entre o transmissor e o receptor, fazendo com que os satélites, mesmo não estando visíveis entre si, consigam enviar e receber os sinais (Figura 1). Isso permite que, através de uma seqüência de sinais emitidos pelo transmissor (GPS) e recebidos pelo receptor (LEO), obtenha-se um perfil de refratividade.

Os efeitos da atmosfera podem ser caracterizados pelo ângulo de curvatura, α , pelo parâmetro de impacto, a , e pelo raio, r (Figura 2), que representa a geometria da ocultação instantânea entre os satélites GPS-LEO. Durante a ocultação, estando o sinal tanto no modo ascendente como no descendente na atmosfera, a variação de α com r ou a depende primeiramente de um perfil do índice de refração. Este perfil pode ser obtido a partir de medidas de α em função de a durante a ocultação.

$$\alpha = \alpha(a) = 2 \int_{r_1}^{\infty} d\alpha = 2a \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr \quad (1)$$

A dependência do ângulo de curvatura e do parâmetro de impacto em relação ao tempo, durante uma ocultação, pode ser derivada a partir de medidas acuradas da frequência referentes à refração do sinal, tanto do transmissor como do receptor. A variação no sinal é determinada pela projeção da velocidade dos satélites em relação ao caminho percorrido pelo sinal entre o transmissor e receptor. Assim, o ângulo da refração atmosférica contribui para a medida da variação do sinal. Os dados obtidos dos outros satélites GPS, não ocultados, podem ser utilizados para determinar, com precisão, a posição e a velocidade dos satélites GPS e LEO envolvidos e para o cálculo da variação esperada durante a ausência da curvatura no sinal. A contribuição atmosférica na variação do sinal, obtida pela subtração da variação na medida esperada e da real, pode ser combinada com a posição e as velocidades dos satélites envolvidos para estimar o ângulo de curvatura e o parâmetro de impacto. O resultado que se obtém é n em função de a , e o que se irá utilizar é o inverso. Para isso utiliza-se o método de inversão de Abel (ou inversa de Abel), segundo Gorbunov e Lauritsen (2002).

$$n(r) = \exp \left\{ \frac{1}{\pi} \int_{a_1}^{\infty} \frac{\alpha}{\sqrt{(a^2 - a_1^2)}} da \right\} \quad (2)$$

Sabe-se que o índice de refração (n) é a razão entre as velocidades da onda no vácuo e a sua velocidade em um meio qualquer. Como n tem valores muito próximos da unidade, é conveniente expressá-lo através de uma outra grandeza, denominada refração (N), dada por $N = (n - 1)10^6$. Na atmosfera neutra, a refração é dada em função da temperatura, da pressão do ar seco, da pressão do

vapor d'água e da contribuição ionosférica (equação 3), que é eliminada através da utilização de receptores de dupla frequência.

$$N = 77.6 \frac{P(hPa)}{T(K)} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w(hPa)}{T^2(K)} - 40.3 * 10^6 \frac{n_e(m^{-3})}{f^2(Hz)} \quad (3)$$

Porém, como em qualquer outra tecnologia, existem algumas vantagens e restrições no uso da RO GPS.

Entre as vantagens da RO GPS destacam-se: a sondagem atmosférica sob qualquer condição de tempo, principalmente em regiões da alta troposfera e baixa estratosfera; a distribuição global dos perfis atmosféricos; a alta resolução vertical (aproximadamente 1 km na estratosfera até 100 m da superfície onde os índices de refatividade são maiores); sob condições onde os gradientes horizontais são pequenos a resolução vertical pode ser aumentada para além do limite da difração de Fresnel; o comprimento das ondas envolvidas na RO GPS (aproximadamente 20 cm) não apresenta problemas de dispersão e absorção por outros meios; possibilidade de calibração a partir de medidas precisas de fase e monitoramento a longo prazo sem considerar a variação de sensibilidade dos equipamentos envolvidos.

Em relação às desvantagens, destacam-se: a necessidade de valores iniciais de temperatura e pressão advindos de fonte externa; perfis de ocultação iniciam a aproximadamente 2 km de altitude; a maior parte do vapor d'água está concentrado nos primeiros quilômetros, onde os perfis de RO GPS não alcançam, ou apresentam ineficiência e a existência de vários fatores que causam erros nas medidas de RO GPS.

3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO E DADOS UTILIZADOS

A validação dos perfis atmosféricos foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na aquisição dos perfis atmosféricos e a segunda no desenvolvimento e implementação da metodologia para a comparação entre perfis atmosféricos de Radiossondas (RSO), Radio Ocultação (RO) e do modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT), o que permitiu a análise dos resultados obtidos.

3.1 Perfis atmosféricos de Radiossondas

Como parte do projeto LBA (LBA, 2006), em meados do segundo semestre de 2002 foi realizada a campanha RACCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazonia during the DRY-TO-WET Transition Season*) com o objetivo de entender os processos físicos que controlam a estação de transição seca-úmida na região sudoeste da Amazônia, apoiando-se no emprego de diversos equipamentos e diferentes técnicas, entre eles o lançamento de diversas radiossondas. Foram organizados diversos lançamentos realizados em estações operacionais localizadas sobre o território brasileiro durante o período desse experimento e, também, disponíveis para a campanha RACCI. Tais radiossondagens foram aqui utilizadas para validar os perfis atmosféricos obtidos com a RO - GPS.

A campanha RACCI foi realizada entre os meses de setembro e outubro de 2002, e abrangeu toda a América do Sul, da qual extraímos dados de 14 estações de lançamento de radiossondas (Figura 3). As radiossondas lançadas nesse experimento eram da marca Vaisala, modelo RS-80 15G. Estes dados estão disponíveis no *site* principal do RACCI (<http://www.lba.gov.br/RACCI>) e contém as seguintes variáveis: tempo de ascensão, altura geopotencial, pressão, temperatura, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, direção e velocidade do vento, temperatura potencial e razão de mistura. A resolução vertical dos perfis atmosféricos das radiossondas é bastante alta sendo fornecidos valores a cada 2 minutos de ascensão. Em alguns casos as radiossondas participaram de redes operacionais e os valores armazenados se referem aos níveis de pressão predefinidos, denominados padrões, que são: 1000, 925, 850, 775, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 e 3 hPa.

3.2 Perfis atmosféricos de Rádio Ocultação (RO)

A aquisição dos dados de RO do satélite CHAMP foi realizada através do site do GENESIS (*Global Environmental & Earth Science Information System*), devido à praticidade na disponibilização dos mesmos. Neste site a disponibilização é feita através de um programa denominado AGAPE (*Atmospheric Grid Analysis and Profile Extraction*), que é executado no próprio site, permitindo a escolha dos perfis através das latitudes e longitudes, máximas e mínimas respectivamente. A Figura 4 mostra a localização dos 254 locais de coleta dos perfis em uma área compreendida entre -90 e -40 de longitude, -30 e 10 de latitude, distribuídos sobre a América do Sul.

Os dados referem-se ao período de 01/09/2002 a 31/10/2002. Cada perfil apresenta sete variáveis: altura geopotencial, latitude, longitude, temperatura, pressão e pressão do vapor d'água. Segundo Wickert et. al. (2004) os perfis obtidos através do satélite CHAMP apresentam uma resolução vertical aproximada de 0,5 km na troposfera e 1,5 km na estratosfera.

3.3 Perfis atmosféricos provenientes do modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT)

Os perfis atmosféricos da PNT foram obtidos junto ao CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Estes perfis referem-se a dados de re-análise pelo sistema de assimilação de dados PSAS (Physical-space Statistical Analysis System) (da Silva e Guo, 1996). Os dados possuem resolução espacial de 40 x 40 km, referindo-se ao período de 01/09/2002 até 30/10/2002. Estes dados são disponibilizados com intervalos de 6 horas, sendo eles referentes às 0, 6, 12 e 18 horas, referenciados ao tempo UTC. Cada perfil apresenta nove variáveis, sendo elas: pressão atmosférica, temperatura, umidade específica, água precipitável, altura geopotencial, vento zonal, vento meridional, temperatura e umidade relativa. As quatro primeiras variáveis referem-se a dados de superfície e as outras cinco se referem a valores em altitude apresentadas em 19 níveis de pressão atmosférica (100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900, 925, 1000 hPa).

3.4 METODOLOGIA UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DOS PERFIS DE RO-GPS

Após a aquisição dos dados, iniciou-se o desenvolvimento dos procedimentos computacionais para a comparação dos perfis. O primeiro passo foi realizar um algoritmo que gerasse um arquivo de índices, contendo o ano, mês, dia, hora, nome da estação e a localização de cada perfil armazenado. De posse destes arquivos de índice, é possível definir as janelas de comparações a serem utilizadas.

A dificuldade em encontrar uma janela adequada é uma tarefa difícil, face à escassez de perfis, principalmente de RSO, o que implica em perfis distantes uns dos outros, e com instantes de coleta diferentes. Deste modo, a implementação das janelas a serem utilizadas foi realizada de maneira a tornar

possível e prático a variação da latitude e longitude entre as janelas de comparação. Deste modo, podem-se comparar janelas com $1^\circ \times 1^\circ$ e $2^\circ \times 2^\circ$ de latitude e longitude, bem como cada janela destas com um intervalo de: 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, de diferença. Ressalta-se também que todos os arquivos comparados referem-se ao mesmo ano, mês e dia. Os resultados destas comparações são apresentados na Tabela 1.

Na comparação entre RO e RSO, constatou-se a necessidade de se utilizar janelas com localização dos perfis à aproximadamente 200 km de distância ($2^\circ \times 2^\circ$) devido à baixa ocorrência de perfis concomitantes. Com relação à comparação entre RO e PNT, ressalta-se que as diferenças não ocorrem devido às mudanças espaciais e sim, devido às mudanças temporais, pois o perfil de PNT está espaçado com $0,4^\circ$ de latitude e $0,4^\circ$ de longitude, o que faz com que para cada perfil de RO exista pelo menos um ou mais perfis de PNT.

De posse dos índices de cada perfil a ser utilizado, bem como da definição da metodologia de comparação a ser empregada, gerou-se um índice com o resultado das comparações. Encontrados os perfis concomitantes, realizou-se a recuperação dos valores referentes a cada perfil indicado no índice dos resultados da comparação, bem como a interpolação dos valores que eram inválidos.

A partir dos dados interpolados, desenvolveu-se um algoritmo para geração das estatísticas advindas da comparação, sendo elas: número de perfis comparados, somatório dos erros, erro médio (EM), erro médio quadrático (EMQ) e o desvio padrão (PD).

3.5 Comparação de perfis atmosféricos de RO com os de radiossondas

Para a primeira comparação foi utilizada uma janela de busca de 2° de latitude, 2° de longitude e uma diferença temporal entre as coletas dos perfis de até 6 horas. Nessas circunstâncias foram encontrados 27 pares de perfis atmosféricos de RO e RSO. Os resultados obtidos das medidas estatísticas, em função da altitude obtidos nessa comparação são apresentados na Figura 5, com gráficos de: (a) temperatura, (b) pressão do vapor d'água e (c) altura geopotencial.

Com relação aos valores dos perfis de temperatura (Fig. 6a) observa-se que a RO-GPS apresenta uma tendência de subestimar em até 2 K na camada de 7,5 km até 9 km, uma tendência nula entre 9 km até 12 km e volta a apresentar uma tendência de subestimar para alturas acima de 12 km. Com relação aos valores do desvio padrão, observa-se que a incerteza é menor (DP de 1 K) para altitudes menores que 11

km do que para níveis mais elevados da atmosfera (DP próximo de 3 K). De forma geral observa-se que a técnica de RO apresenta temperaturas mais frias em relação à RSO, o que corrobora os resultados advindos do GPS/MET para a atmosfera neutra (ROCKEN et. al., 1997).

Em uma análise geral dos perfis de pressão do vapor d'água apresentados na Figura 5b, observa-se que os valores do EM tendem a ser menores com o aumento da altitude, e o mesmo ocorre com o desvio padrão. O EM é de -2 hPa em 1,5 km de altitude e chega a zero na alta troposfera depois de oscilar entre valores positivos e negativos. O aumento da incerteza das medidas de umidade nas camadas inferiores da troposfera está associado com o aumento do ruído nos sinais GPS que chegam ao satélite LEO. Esse ruído é devido a diversos fatores como o multicaminho do sinal, a influência da camada ionosférica que nessas circunstâncias tem seu pico de máxima e a própria variabilidade espacial da umidade associada com sua alta concentração na baixa troposfera. Esses resultados vem a corroborar com outros trabalhos publicados a respeito (ANTHES, ROCKEN e KUO, 2000; WICKERT et. al., 2001). A comparação dos perfis de alturas geopotenciais (Figura 5c), revela que o EM da RO GPS tende a ser menor que o da radiossonda na baixa troposfera (10 km iniciais), onde o EM é de 20 m, com um DP próximo aos 40 m. Próximo aos 5 km de altitude, as diferenças entre as duas técnicas são praticamente nulas. Desta altitude em diante, a RO GPS passa a superestimar os valores da altura geopotencial, sendo que o EM e o DP tendem a ser maiores com o aumento da altitude, atingindo discrepâncias máximas de 100 m.

3.6 Comparação de perfis atmosféricos de RO com perfis de PNT

Para a comparação entre RO e PNT utilizou-se 126 pares de perfis atmosféricos de RO e da PNT, para uma janela de busca compreendida entre 1° de latitude, 1° de longitude e uma diferença temporal entre as ocorrências dos perfis e as análises da PNT de até 1 hora. As estatísticas destes resultados são apresentadas na Figura 6, *a-b-c*, respectivamente.

Os perfis de temperatura apresentam maior discrepâncias na camada abaixo de 9 km, onde a diferença média é de $2,1^\circ\text{C}$ e desvio padrão de $2,6^\circ\text{C}$. Porém, estes valores diminuem entre 9 – 15 km, com média e desvio padrão próximos a 1°C . Nesse nível a técnica de RO superestima a temperatura em

relação à PNT e, conforme a altitude é incrementada, o viés vai aumentando entre os valores de temperatura.

Quando se comparam dados referentes a uma janela de busca de 1° latitude e 1° longitude e $\pm 2h$ e outra janela de busca de 1° latitude e 1° longitude e $\pm 3h$, resultando em 180 e 254 perfis, respectivamente (Figura 6, *d, g*), percebe-se que não ocorrem mudanças significativas. Porém, destaca-se a ocorrência de um aumento gradativo de $0,15^\circ\text{C}$, para cada janela distintamente.

Os perfis de pressão do vapor d'água apresentaram uma discrepância significativa nos primeiros 2 km, com uma diferença média de 0,84 hPa e desvio padrão de 2,98 hPa. Estes valores vão decrescendo conforme a altitude vai sendo incrementada, bem como sua concentração na atmosfera vai diminuindo, tornando as diferenças entre as comparações menores e, entre 5 – 8 km, estas diferenças são menores que 0,1 hPa e desvio padrão próximo de 0,5 hPa. Este comportamento também é observado para as outras duas janelas de comparação sem grandes alterações (Figura 6, *e, h*).

Os perfis de altura geopotencial apresentaram discrepâncias de 8 m entre 1 – 10 km de altitude, com um desvio padrão de até 26 m. Estas discrepâncias aumentam conforme aumenta a altitude, atingindo uma magnitude de 70 m a 17 km de altitude. Quando comparadas janelas com diferenças de $\pm 2h$ e $\pm 3h$, é possível notar que a RO superestima a altura geopotencial em relação à PNT, conforme aumenta a diferença temporal entre os perfis.

4 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

O satélite CHAMP coleta até 300 ocultações por dia distribuídas pelo mundo todo, mas ainda são poucos os perfis coincidentes com os de RSO, resultando em uma quantidade muito limitada de dados que possam ser comparados com uma distância espacial e temporal adequada. Espera-se que com a constelação COSMIC estes problemas sejam minimizados, sendo que com o aumento do número de perfis, será possível o uso de janelas mais apropriadas para a comparação de perfis de RO e RSO.

A comparação entre os dados de RO e PNT demonstrou bons resultados, principalmente entre 8 e 16 km, para os perfis de temperatura, pressão do vapor d'água e altura geopotencial. Abaixo de 8 km e

acima de 16 km as discrepâncias vão aumentando, demonstrando a necessidade de maiores avanços na recuperação de perfis nestas regiões.

Em geral, os resultados encontrados são compatíveis com os obtidos por experimentos de outros trabalhos como: Wickert et. al. (2001) e Rocken et. al. (1997), nas quais compararam perfis do satélite GPS/MET do CHAMP.

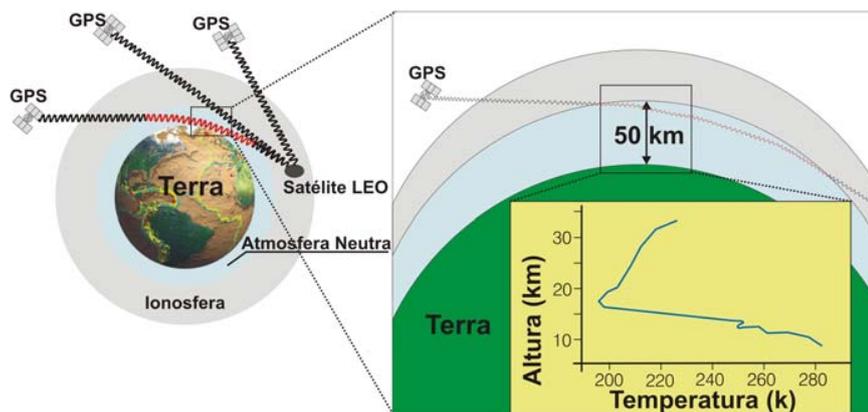


Figura 1 – Esquema do comportamento do sinal GPS em uma RO-GPS (LEE et al., 2000).

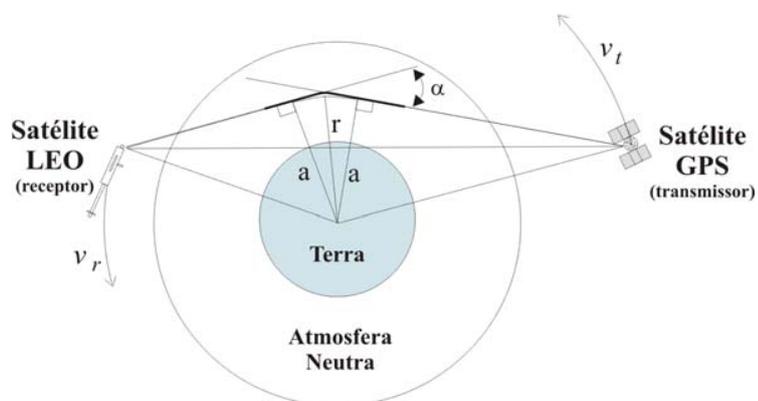


Figura 2 – Geometria básica da ocultação para um satélite GPS e um satélite LEO.

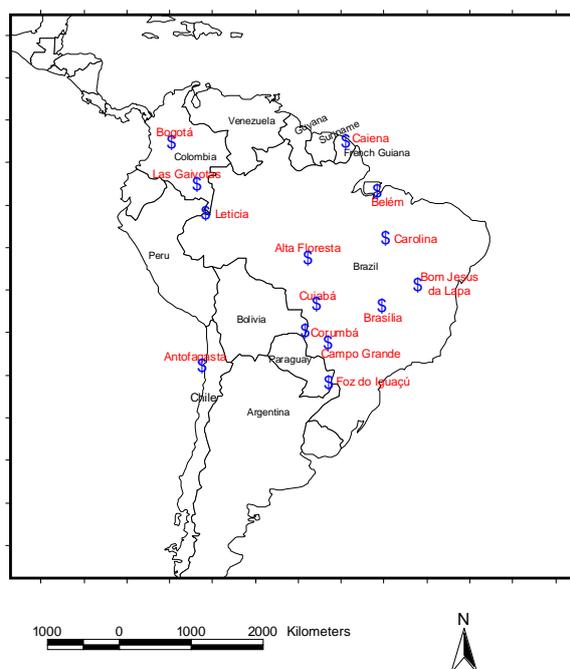


Figura 3 – Localização das estações de radiossondagens envolvidas na campanha RACCI.

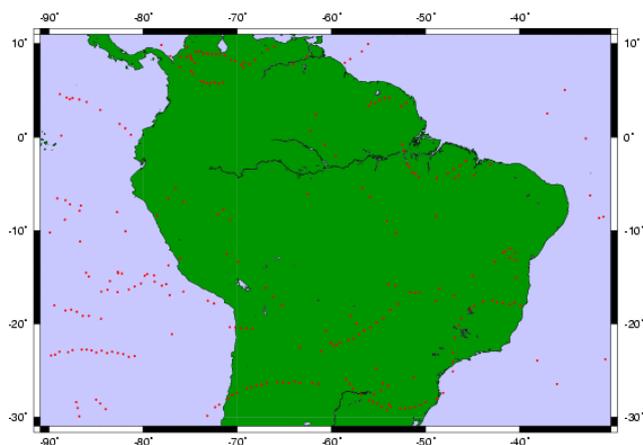


Figura 4 – Localização das 254 RO obtidas durante a campanha RACCI (pontos em vermelho). Fonte:

<http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Atmosphere/AGAPE>.

Tabela 1 – Dados de RO, RSO e PNT coletados durante 01/09/e 30/10/2002 sobre a América do Sul.

Comparações		
Janela de Comparação	RO x RSO	RO x PNT
1°x1°1h	0	126
1°x1°2h	0	180
2°x2°1h	0	126
2°x2°2h	2	180
2°x2°4h	5	239
2°x2°6h	27	254

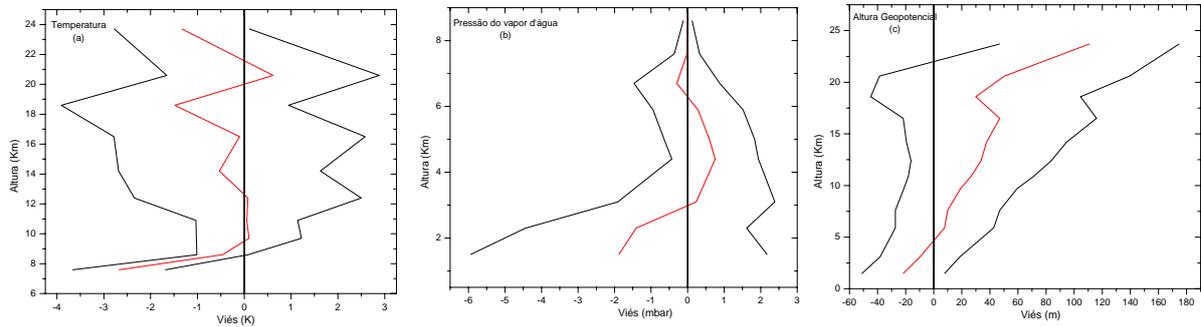


Figura 5 – Valores do erro médio (em vermelho) e desvio padrão (em preto) em função da altura gerados pela comparação dos perfis de (a) temperatura, (b) pressão do vapor d'água e (c) altura geopotencial obtidos com a RO e RSO.

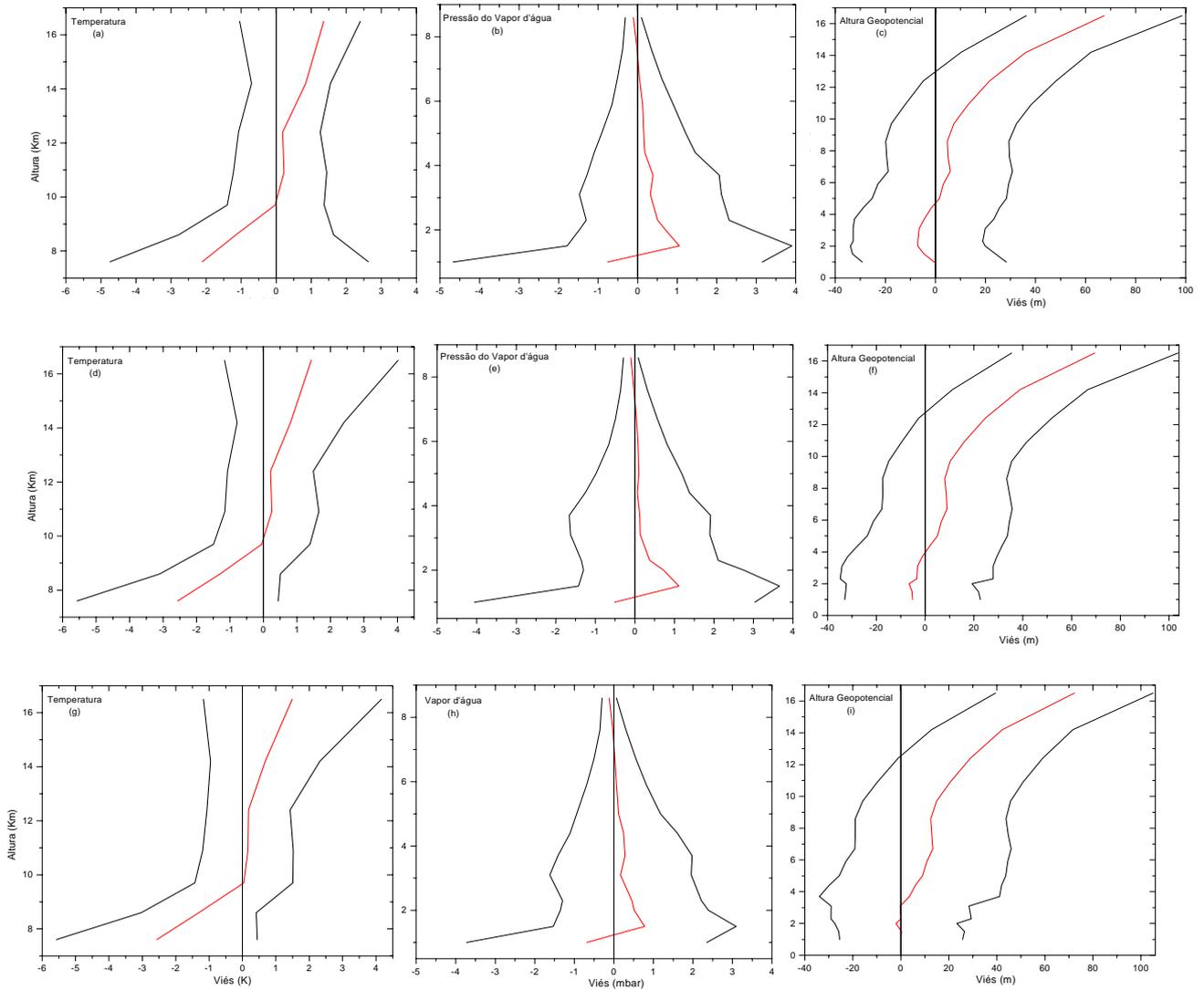


Figura 6 – Estatísticas das comparações de perfis obtidos com RO e PNT para (a, d, g) temperatura; (b, e, h) Pressão do Vapor d'água (c, f, i) Altura Geopotencial ao considerar áreas de comparação entre: $1^{\circ} \times 1^{\circ} \pm 1h$; $1^{\circ} \times 1^{\circ} \pm 2h$; $1^{\circ} \times 1^{\circ} \pm 3h$.

REFERÊNCIAS

GEMAEL, C.; ANDRADE, J. B. **Geodésia Celeste**. Curitiba: UFPR, 2004, 389 p.

ANTHES, Richard, ROCHEN, Christian, KUO, Ying-Hwa. Application of COSMIC to Meteorology and Climate. In: LEE, Lou-Chuang; ROCKEN, Christian; KURSINSKI, Robert. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag. Capítulo 4. 2000. p. 115-156.

DA SILVA, A.; GUO, D J. 1996: **Documentation of the Physical-space Statistical Analysis System (PSAS) Part I: The Conjugate Gradient Solver Version PSAS-1.00**. DAO Office Note 96-02, 66 pp. [Disponível no Data Assimilation Office, GSFC, Greenbelt, MD 20771 e no endereço eletrônico <http://dao.gsfc.nasa.gov/subpages/office-notes.html>.

FJELDBO, G. Kliore, A. J. e Eshlemann, V. R. The Astronomical Journal, **The neutral atmosphere of Vênus studied with the Mariner V radio occultation experiments**, 76(1): 123-140, Março 1971.

GORBUNOV, M. E.; LAURITSEN, K. B. **Canonical transform methods for radio occultation data**. Scientific Report – Danish Meteorological Institute, Copenhagen, 2002.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **Global Positioning System Theory and Practice**. New York: Spring-Verlag, 2001, 382 p.

KURSINSKI, E. R. et al. **Initial Results of Rádio Occultation Observations of Earth's Atmosphere using the Global Positioning System (GPS)**. Science. 271(1): 1107-1110, Fevereiro 1996.

LBA, **Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia**. Disponível

em: <<http://www.lba.cptec.inpe.br/lba/index.html>>. Acessado em: 10/07/2006.

LEE, Lou-Chuang; ROCKEN, Christian; KURSINSKI, Robert. **Applications of Constellation: Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate**. Hong Kong: Springer-Verlag. 2000. 384p.

MIKHAIL, E.; ACKERMANN, F. **Observation and Least Square**. IEP A Dun Donnelley Publisher, New York, 1976.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações**. Editora Unesp, 2000.

ROCKEN, C. et. al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. **Journal Geophysic Research**, vol. 102, p. 29849 – 29866, 1997.

WICKERT, J.; REIGBER, Ch.; BEYERLE, R.; MARQUARDT, C.; SCHMIDT, T.; MEEHAM, T.; GRUNWALDT, L.; GALAS, R. GPS Rádio Occultation with CHAMP: Initial results. In: **Proc. Beacon Satellite Symposium**, Boston, junho de 2001.

WICKERT, Jens et. al. Three years of space based atmosphere sounding with CHAMP: Results, highlights and future prospects. Procedure: **Join CHAMP/GRACE Science Meeting**, GFZ, Potsdam - Alemanha, julho de 2004.