

VALIDAÇÃO DE PERFIS ATMOSFÉRICOS DE RADIO-OCULTAÇÃO GPS 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 Satellite System*), em conjunto com os satélites LEO (*Low Earth Orbit*), surge a Rádio Ocultação GPS (RO-GPS), técnica essa que permite obter remotamente perfis atmosféricos com boas perspectivas para aplicações em modelagem numérica de tempo e clima. O satélite LEO CHAMP foi projetado, entre outros fins, para realizar medidas de RO GPS, e permite estudos para o domínio e aprimoramento dessa técnica de sondagem atmosférica. Nesse trabalho objetiva-se avaliar a qualidade de perfis atmosféricos obtidos com esse satélite sobre a América do Sul, comparando os com perfis provenientes de radiossondas e da condição inicial de modelo regional de Previsão Numérica de Tempo (PNT). Os dados de radiossondas utilizados nessa avaliação foram coletados durante uma campanha intensiva de coleta de dados com o emprego de 14 estações de radiossondagem, realizada nos meses de setembro e outubro de 2002. Quanto ao modelo de PNT utilizado foi o modelo regional ETA do CPTEC-INPE.

ABSTRACT – With the advent of GPS satellites, together with LEO (Low Earth Orbit) satellites, the GPS Radio Occultation (RO GPS) appears to allow obtaining atmospheric profiles remotely and opening new perspectives related to climate and weather forecast. The Champ LEO satellite was projected, among other proposes, to realize measurements of RO GPS and to become a large atmosphere research source. In this paper it is proposed to evaluate the quality of temperature profile obtained with the CHAMP satellite above the South America. These temperature profiles are compared with profiles from the radiosonde and from the initial condition of the regional model of Numerical Weather Prediction (PNT). The radiosonde data used in this evaluation were collected during the intensive campaign, which was realized in September and November of 2002, using 14 radiosonde stations. In relation to the PNT model, the regional model ETA from CPTEC-INPE was used.

1 INTRODUÇÃO

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 usado para estudar a sondagem atmosférica de outros planetas há vários anos. Inicialmente, verificaram-se as ocultações estelares, onde as estrelas eram observadas da Terra quando passavam por trás de um planeta (Fjeldbo et. al., 1971). Isso proporcionou a obtenção de um perfil de refração da atmosfera em torno do planeta observado, e consequentemente informações da atmosfera do mesmo.

Com o advento dos satélites artificiais GPS (*Global Satellite System*), os quais estão orbitando a Terra a aproximadamente 20.000 km, realizaram-se estudos da atmosfera utilizando um receptor GPS a bordo de um satélite LEO (*Low Earth Orbit*), analisando os efeitos da atmosfera terrestre nos sinais GPS. Os satélites LEO, estão localizados em uma órbita a aproximadamente 800

km de altitude, possuem a bordo um receptor GPS de dupla frequência, realizando medidas de fase da onda portadora e pseudodistância, entre ele e um satélite GPS (Kursinski, 1996). A partir dos dados coletados por esse receptor, é possível, através da técnica de Rádio Ocultação GPS (RO GPS, Figura 1), recuperar perfis atmosféricos (temperatura, pressão e vapor d'água).

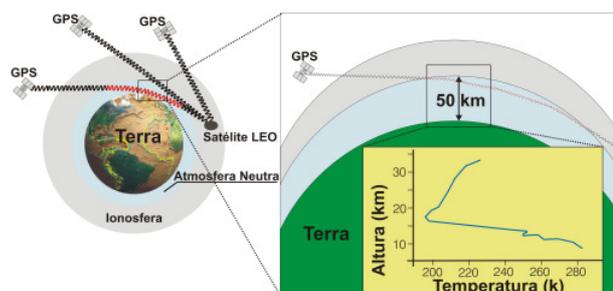


Figura 1 – Esquema do comportamento do sinal GPS em uma RO-GPS (LEE et al., 2000).

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. Neste caso, 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.

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 e é o satélite utilizado nesse estudo (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 são apresentados detalhes dos dados utilizados nessa validação. Na Seção 3 é apresentada a metodologia utilizada, enquanto que na seção 4 são apresentados os resultados obtidos. Na seção 5 os comentários finais e conclusões são apresentados.

2 DADOS UTILIZADOS

2.1 Perfis atmosféricos de Radiossondas

O LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia) é uma iniciativa de pesquisa internacional liderada pelo Brasil. Ele foi projetado para gerar novos conhecimentos para entender o funcionamento climatológico, ecológico, biogeoquímico e hidrológico da Amazônia, o impacto das mudanças no uso da terra nesses funcionamentos e as interações entre a Amazônia e o sistema biogeofísico global da terra (LBA, 2006). Visando contribuir nessa questão, em meados do segundo semestre de 2002 foi realizada a campanha denominada RACCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazonian during the DRY-TO-WET Transition Season*), tendo como objetivo geral entender os processos físicos que controlam a estação de transição na região sudoeste da Amazônia. Diversos equipamentos empregando diferentes técnicas foram utilizados durante essa campanha, entre eles foram lançadas diversas radiossondas. Tais radiossondas foram as 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 utilizamos dados de 14 estações de lançamento de RSO (Figura 2). As radiossondas lançadas nesse experimento são da marca Vaisala, modelo RS-80 15G.

Estes dados foram obtidos no site principal do RACCI (<http://www.lba.gov.br/RACCI>), os quais continham 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 à níveis de pressão predefinidos, denominados padrões, que são: 1000, 925, 850, 775, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 20, 10 e 3.

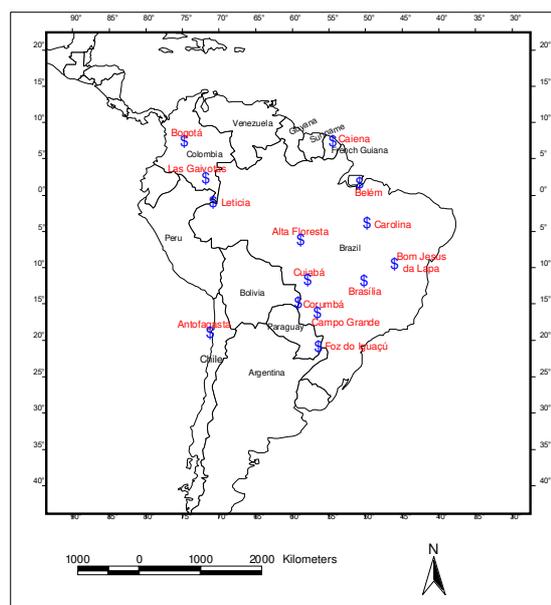


Figura 2 – Localização das estações de radiossondagens envolvidas na campanha RACCI.

2.2 Perfis atmosféricos de Radio 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 a 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 3 ilustra os 254 perfis coletados em uma área compreendida entre -90 e -40 de

longitude, -30 e 10 de latitude, localizados e 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.

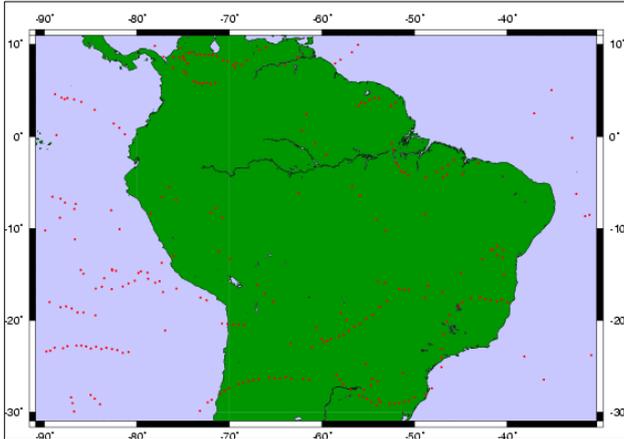


Figura 3 – Localização das 254 RO obtidas durante a campanha RACCI (pontos em vermelho). Fonte: <http://genesis.jpl.nasa.gov/zope/GENESIS/Atmosphere/AGAPE>.

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

Os perfis atmosféricos da PNT foram adquiridos juntos ao CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Estes perfis referem-se à dados de re-análise, para a qual utilizou-se o 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 da superfície, enquanto que para as outras cinco se referem a valores em altitude as quais são 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), conforme ilustra a Figura 4.

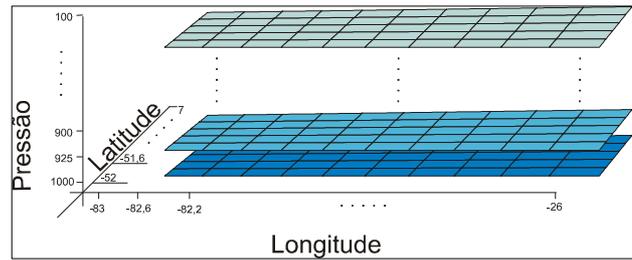


Figura 4 – Ilustração de um perfil proveniente da re-análise gerada pelo PSAS no CPTEC-INPE.

3 METODOLOGIA UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DOS PERFIS DE RO-GPS

Após a aquisição dos dados, iniciou-se o desenvolvimento de procedimentos computacionais para a comparação dos perfis, conforme descrito esquematicamente no fluxograma apresentado na Figura 5. 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.

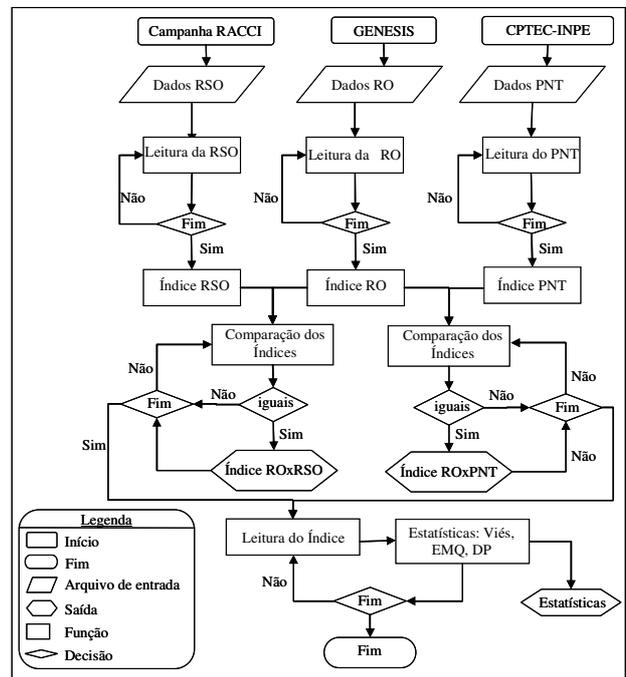


Figura 5 – Fluxograma do programa desenvolvido para a geração de estatísticas a partir dos dados de RO, RSO e PNT.

A dificuldade em encontrar uma janela adequada é uma tarefa difícil, uma vez que se possui muito poucos 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, pode-se comparar janelas com 1° x 1° e 2° x 2° 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.

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

Na comparação entre RO e RSO, constatou-se a necessidade de se usar janelas com localização dos perfis à aproximadamente 200 km de distância (2°x2°) 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 a mudanças temporais, pois o perfil de PNT está espaçado com 0,4° de latitude e 0,4° 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 Quadrado (EMQ) e o desvio padrão (σ). Calculando a diferença entre a comparação dos perfis, pode-se obter o erro médio, que é calculado através de:

$$EM = \frac{\sum dif}{n} \quad (1)$$

O desvio padrão dessas diferenças é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (dif - EM)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

sendo σ = dispersão em torno da media. Logo, o EMQ dos valores comparados é obtido a partir das quantidades

anteriores da seguinte forma (MIKHAIL e ACKERMANN, 1976):

$$EMQ = \sqrt{EM^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

4.1 Validação da Metodologia na comparação de perfis atmosféricos de RO x RSO

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, sendo encontrados 27 perfis atmosféricos de RO condizentes com os de RSO. Os resultados das estatísticas destas comparações são ilustradas na Figura 6, gráficos a, b e c.

Com relação aos valores 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 9km, uma tendencia nula entre 9 km até 12km e volta a apresentar uma tendencia de substimar 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 níveis mais elevados da atmosfera onde o DP é proximo de 3 K. De forma geral observa-se que a técnica de RO apresenta temperaturas mais frias em relação à RSO, o que corrobora com resultados advindos do GPS/MET para a atmosfera neutra (ROCKEN et. al., 1997).

Em uma análise geral dos valores da pressão do vapor d'água apresentados na Figura 6b, 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 mbar 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 circunstancias 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).

viabilizem a comparação, o que já não ocorre com relação as comparações de RO e PNT, que será apresentada a seguir.

4.2 Validação da Metodologia na comparação de perfis atmosféricos de RO x PNT

Para a comparação entre RO e PNT utilizou-se 126 perfis atmosféricos de RO condizentes com os do PNT, para uma janela de busca compreendida entre 1° de latitude, 1° de longitude e uma diferença temporal entre as coletas dos perfis de até 1 hora. As estatísticas destes resultados são ilustrados na Figura 7, *a-b-c*, respectivamente.

A temperatura apresenta maior discrepância entre as altitudes iniciais até 9 km, onde a diferença média é de 2,1°C e desvio padrão de 2,6°C. Porém, estes valores diminuem entre 9 – 15 km, com média e desvio padrão próximos a 1°C. Neste nível a técnica de RO superestima a temperatura em relação ao PNT e, conforme a altitude é incrementada, a discrepância vai aumentando entre os valores de temperatura.

Quando se compara 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 7, *d, g*), percebe-se que não ocorrem mudanças significativas. Porém, destaca-se a ocorrência de um aumento gradativo de 0,15°C, para cada janela diferente.

A pressão do vapor d'água apresentou uma discrepância significativa nos primeiros 2 km, com uma diferença média de 0,84 mbar e desvio padrão de 2,98 mbar. 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 mbar e desvio padrão próximo de 0,5 mbar. Este comportamento também é observado para as outras duas janelas de comparação sem grandes alterações (Figura 7, *e, h*).

A altura geopotencial apresentou discrepância 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 à 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 a PNT, conforme aumenta a diferença temporal entre os perfis.

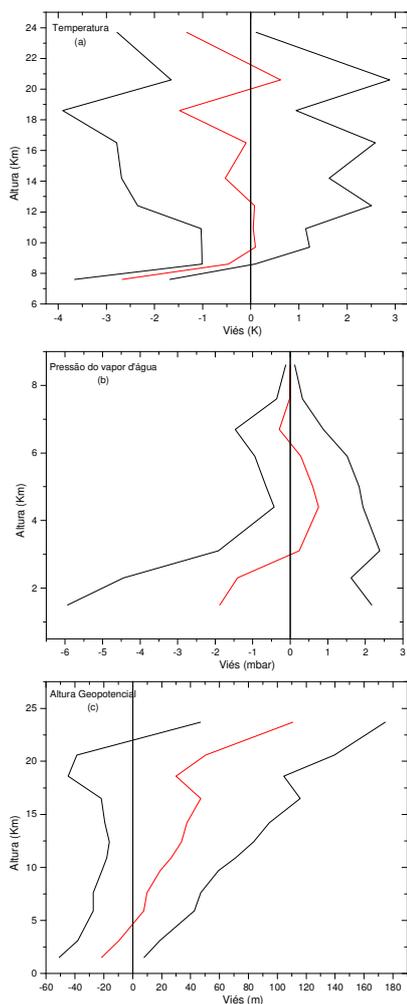


Figura 6 – Valores do erro médio (em vermelho) e desvio padrão (em preto) em função da altura gerados pela comparação dos Perfis de (a) temperatura, (b) pressão do vapor d'água e (c) altura geopotencial obtidos com a RO e RSO.

A comparação das alturas geopotenciais (Figura 6c), revela que o EM da RO GPS tende a ser menor que o da PNT 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. Deste ponto 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.

De modo geral, as comparações entre RO e RSO ainda são muito prejudicadas devido ao baixo número de perfis compatíveis, ou seja, perfis próximos entre si que

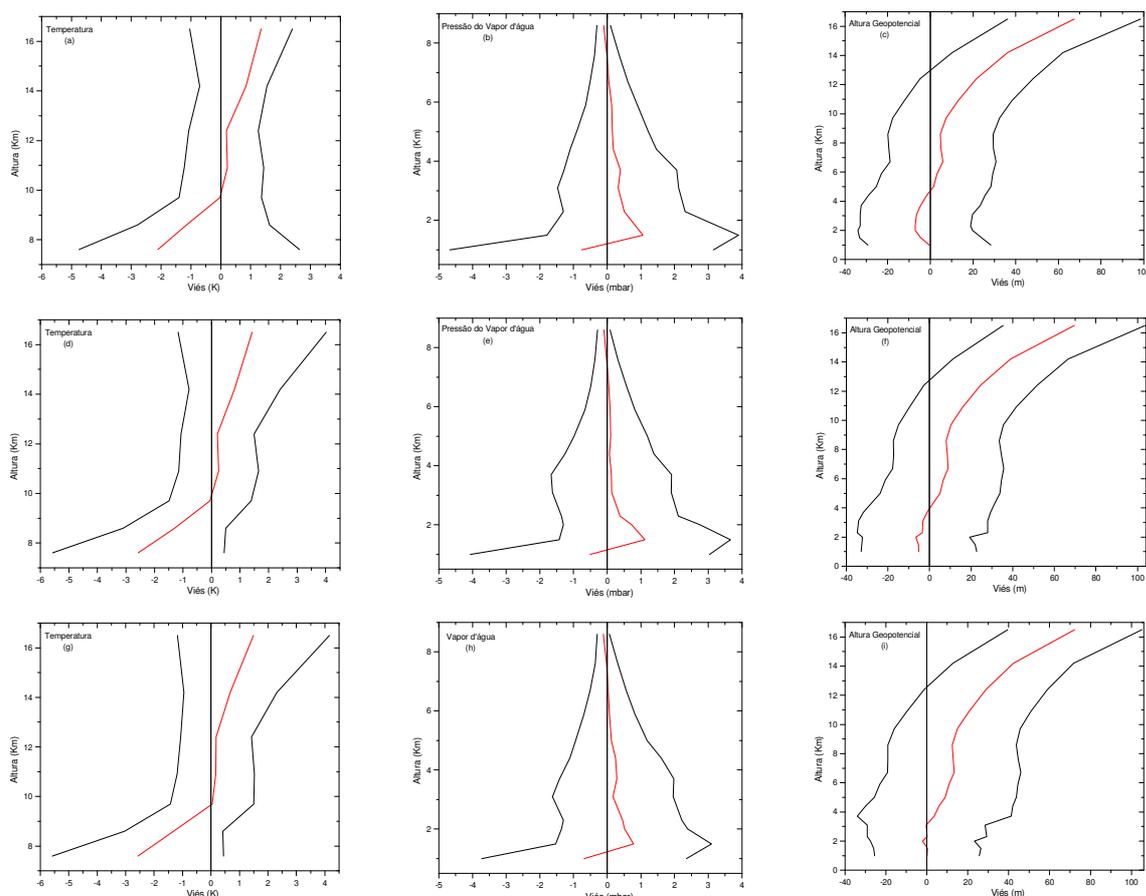


Figura 7 – Estatísticas das comparações de perfis obtidos com RO e PNT para (a, d, g) temperatura; (b, e, h) Pressão do Vapor d’água (c, f, i) Altura Geopotencial ao considerar áreas de comparação entre: $1^{\circ}x1^{\circ} \pm 1h$; $1^{\circ}x1^{\circ} \pm 2h$; $1^{\circ}x1^{\circ} \pm 3h$.

4 COMENTARIOS 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. 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 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 outras pesquisas como: Wickert et. al. (2001) e Rocken et. al. (1997), nas quais comparam perfis do satélite GPS/MET e do CHAMP.

A automatização do processo de comparação entre perfis de diferentes fontes (RSO, RO e PNT) é muito

importante, pois facilitará novas comparações. Um exemplo é a comparação entre dados dos satélites COSMIC com RSO e PNT, o que necessitará apenas de alterações no método de leitura dos dados de RO, que neste caso, reverem-se aos perfis obtidos com os satélites COSMIC.

Como atividades futuras, pretende-se utilizar os dados de RO para assimilação de dados, visando avaliar se a RO proporcionará melhores resultados para o modelo de Previsão Numérica de Tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores desta pesquisa agradecem a FAPESP pela concessão de uma bolsa de estudos, através do processo 03/09831-0, para o desenvolvimento da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

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 Eshleemann, V. R. The Astronomical Journal, **The neutral atmosphere of Vênus studied with the Mariner V radio occultation experiments**, 76(1): 123-140, Março 1971.

KURSINSKI, E. R. et al. **Initial Results of Radio 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.

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 Radio 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.