

## IMPACTO DE PERFIS DE RÁDIO OCULTAÇÃO GNSS NA QUALIDADE DAS PREVISÕES DE TEMPO DO CPTEC/INPE

LUIZ FERNANDO SAPUCCI, CARLOS FREDERICO BASTARZ, FLÁVIO CERQUEIRA, LUCAS AMARANTE AVANÇO, DIRCEU LUIS HERDIES

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, São Paulo, Brasil

luiz.sapucci@cptec.inpe.br, carlos.frederico@cptec.inpe.br, flacerca@yahoo.com,  
lucas.amarante@cptec.inpe.br, dirceu.herdies@cptec.inpe.br

Recebido Fevereiro de 2014 - Aceito Maio de 2014

### RESUMO

Estudos sobre a sensibilidade dos modelos de previsão numérica de tempo a erros nas condições iniciais têm evidenciado a contribuição da assimilação de dados na melhoria do desempenho dos mesmos em descrever o estado futuro da atmosfera. Entre outras fontes de dados, a assimilação de perfis atmosféricos obtidos por rádio ocultação *Global Navigation Satellite System* (GNSS) tem-se destacado como uma ferramenta adicional na redução das deficiências do sistema de coleta de dados meteorológicos. Com o intuito de explorar os benefícios dessa fonte adicional de dados na previsão numérica de tempo gerada pelo modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC/INPE, foram realizados experimentos assimilando perfis atmosféricos de altura geopotencial e umidade obtidos por rádio ocultação GNSS, utilizando dados da constelação *Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate* (COSMIC), para os meses de janeiro e julho de 2009. Os resultados mostraram que o impacto é significativamente positivo durante o verão em todas as variáveis de estado, com ganhos expressivos na extensão das previsões válidas (coeficiente de correlação de anomalia acima de 60%), os quais foram em alguns casos superiores a 48 horas. Esse impacto foi ainda maior sobre a América do Sul com resultados positivos mesmo durante o inverno.

**Palavras Chaves:** Rádio ocultação GNSS, Previsão Numérica de Tempo, Assimilação de Dados, MCGA-CPTEC/INPE.

### ABSTRACT: IMPACT OF GNSS RADIO OCCULTATION PROFILES ON THE QUALITY OF THE CPTEC/INPE WEATHER FORECASTS

Studies about the sensibility of numerical weather prediction (NWP) model to uncertainty in the initial conditions have revealed the actual contribution of the data assimilation on the description of future atmosphere state. Among other data sources, the atmospheric profiles obtained by radio occultation *Global Navigation Satellite System* (GNSS) have become an additional tool in the reduction of the meteorological data base deficiencies. In order to explore the benefits of that additional data source in the NWP generated by the CPTEC/INPE general circulation model, some experiments were carried out by assimilating geopotential height and humidity atmospheric profiles obtained by *Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate* (COSMIC) constellation data. The period of these experiments were the months of January and July of 2009. The results show that this data assimilation exhibits a significant positive impact during the summer on all the state variables. Results also show a positive improvement during the summer for all state variables, with expressive improvements in the valid forecasts time range (anomaly correlation above 60%), which were in some cases greater than 48 hours. This impact was still greater over South America with positive results even during the winter.

**Keywords:** GNSS radio occultation; Numerical Weather Prediction; Data Assimilation; GCM-CPTEC/INPE.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o número de aplicações militares, comerciais e científicas, alavancadas por informações precisas de posicionamento e tempo, cresceu significativamente (Gleason e Gebre-Egziabher, 2009). Com a evolução dos sistemas de navegação por satélite e a implantação de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) em satélites de órbita baixa (*LEO - Lower Earth Orbits*), surge a Rádio Ocultação GNSS, técnica que permite a obtenção de perfis atmosféricos com aplicação na Previsão Numérica de Tempo e Climatologia. GNSS é o termo utilizado para se designar um sistema de navegação baseado em satélites artificiais capaz de fornecer posicionamento geoespacial autônomo com cobertura global. Esse sistema integra todos os sistemas com essas características atualmente disponíveis. Dentre estes, destacam-se o sistema americano GPS (*Global Positioning System*); o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*) - sistema russo de navegação por satélite; o GALILEO - sistema de posicionamento da União Europeia (em fase de desenvolvimento) e o COMPASS - projeto de expansão do atual sistema de navegação regional Chinês.

A primeira missão que permitiu empregar a técnica de Rádio Ocultação GNSS (doravante tratado como ROGNSS) foi a que lançou o satélite GPS/MET, o qual gerou dados de sondagem da atmosfera neutra e da ionosfera. Em sequência ao sucesso do GPS/MET também foram lançados outros satélites LEO com receptores GPS a bordo, dentre os quais estão o CHAMP (*Challenging Minisatellite Payload of Geophysical Research and Application*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e TERRA-SAR da Alemanha, MetOP-A (*Meteorological Operational Satellite*) e MetOP-B da União Europeia e a constelação FORMOSAT-3/COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere & Climate*) do consórcio EUA e Taiwan (República de Formosa). China e Coreia estão trabalhando em futuros programas de rádio ocultação, respectivamente denominados ICESAT/GLAS e KOMPSAT-5 (Shuanggen et al., 2011) e a segunda geração da constelação COSMIC está sendo concebida com 12 satélites. Os atuais avanços e as projeções, em relação à quantidade e qualidade de perfis atmosféricos distribuídos ao redor do globo, revelam um futuro promissor para a ROGNSS dado ao já demonstrado significativo impacto nos resultados dos modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (eg., Cucurull et al., 2007; Kuo et al., 2000).

Grandes centros de PNT têm se utilizado dessa fonte de dados para aumentar a habilidade de previsão de seus modelos numéricos. Em um estudo preliminar conduzido por Cucurull et al. (2007), os resultados mostraram que a assimilação das observações ROGNSS produziu uma redução no viés da

temperatura e da umidade para todas as latitudes, em especial sobre o hemisfério sul e região tropical. Em setembro de 2006, o Met Office implementou a assimilação de perfis de refratividade fornecidos por ROGNSS em seu modelo de PNT global. Em um artigo intitulado “*Operational NWP Assimilation of GPS Radio Occultation Data*” (Buontempo et al. 2008), são apresentados dois experimentos com o objetivo de determinar o potencial impacto da assimilação de dados ROGNSS nos resultados da previsão numérica desse centro. Mesmo sob a limitação de uma pequena quantidade de dados, provenientes dos satélites CHAMP e GRACE-A, o experimento revelou um positivo impacto sobre os valores de temperatura, altura geopotencial, e pressão ao nível médio do mar no hemisfério sul.

A atual expansão dos sistemas GNSS e o crescente aprimoramento das técnicas de obtenção de dados tornam a ROGNSS promissora, com potencial de fornecer uma vasta base de dados de qualidade e globalmente distribuídos. Antevendo os benefícios dessa rede de dados para PNT, grandes centros de previsão têm se preparado e aplicado com sucesso a assimilação de perfis ROGNSS. Considerando os bons resultados obtidos por outros centros, e a pouca quantidade de dados meteorológicos da atmosfera superior disponíveis, sobretudo no hemisfério sul, o presente trabalho se propõe a caracterizar os benefícios obtidos com a inclusão desse sistema de observação no sistema de PNT global do CPTEC/INPE. O objetivo principal desse trabalho é avaliar o impacto da assimilação dos dados de perfis de altura geopotencial e umidade provenientes da ROGNSS, na melhoria do desempenho do Modelo de Circulação Geral Atmosférico (MCGA) usado operacionalmente nesse centro.

Para atingir tais objetivos, o trabalho apresenta na próxima seção uma descrição detalhada da técnica de ROGNSS. Na seção 3 são apresentados os detalhes da metodologia utilizada para a assimilação dos perfis de ROGNSS e os detalhes da estratégia utilizada para avaliar os resultados. Na seção 4 são apresentados os resultados e a respectiva análise dos mesmos, enquanto que na seção 5 são apresentadas as conclusões e comentários finais.

## 2. PERFIS ATMOSFÉRICOS A PARTIR DA ROGNSS

A técnica de rádio ocultação teve início a partir de meados da década de 1960, sendo utilizada progressivamente, e com grande sucesso, nas missões planetárias para medir perfis verticais de densidade e temperatura das atmosferas de Vênus, Marte e outros planetas. Com o advento do sistema de navegação por satélite, tais como o GPS e o GLONASS (ambos na década de 1970), que utilizam transmissores em órbita média, juntamente com receptores instalados em satélites LEO, tornou-se possível a obtenção de perfis atmosféricos com a

precisão necessária para aplicação na meteorologia operacional e na pesquisa climática.

Na obtenção de perfis atmosféricos, a técnica utilizada é baseada na variação do índice de refração observado nos sinais de rádio transmitidos do satélite GPS, por exemplo, para o satélite LEO, que perfila a atmosfera enquanto o satélite se movimenta ao redor do planeta no instante de ocultação. Um único evento de ocultação dura de 1 a 3 minutos e é capaz de fornecer cerca de 4000 medidas por perfil, que tipicamente começa em 100 km na ionosfera e se estende com dados úteis até aproximadamente um quilômetro de altura na troposfera.

A ocultação GPS ocorre quando a transmissão do satélite GPS é recebida pelo satélite LEO em modo ascendente ou descendente ao redor da Terra. As propriedades termodinâmicas atmosféricas são deduzidas com base em medidas precisas no atraso de fase e amplitude do sinal, ao atravessar a ionosfera e a atmosfera neutra.

Durante um evento de ROGNSS, a variação de fase do sinal é essencialmente devido a três fatores: erros induzidos pelo relógio do satélite, deslocamento Doppler (mudança de fase do sinal no decorrer do tempo durante a ocultação) em decorrência do movimento relativo entre o transmissor e o receptor, e devido ao atraso adicional de propagação causado pela redução da velocidade da luz no meio atmosférico. Os erros de relógio são corrigidos por meio da técnica de duplas diferenças (Alber et al., 2000). O deslocamento Doppler no vácuo pode ser calculado através do conhecimento das posições e velocidades dos satélites GPS e LEO. A contribuição atmosférica, ou seja, a variação Doppler em excesso no sinal recebido é obtida subtraindo-se o erro do relógio e o erro esperado no vácuo, do erro total observado.

Assim, a variação Doppler em excesso é descrita por meio de três quantidades geométricas nomeadas: ângulo de curvatura ( $\alpha$ ), parâmetro de impacto ( $a$ ) e ponto tangente ( $r_t$ ).

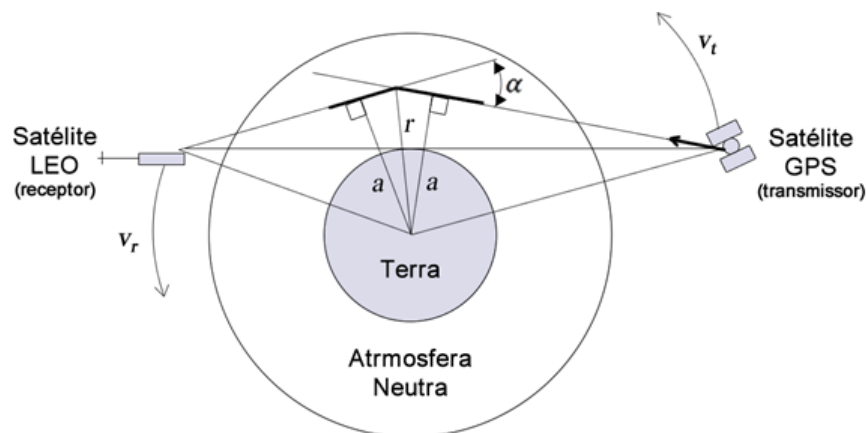
Esses parâmetros podem ser visualizados na Figura 1, a qual apresenta o conceito de forma ilustrativa. Embora tais conceitos sejam bastante difundidos nas ciências geodésicas, na meteorologia eles não são tão conhecidos, o que torna conveniente a apresentação dessa figura aqui. Mais detalhes sobre a metodologia e a geometria envolvida podem ser encontrados em Syndergaard (2000). À medida que a geometria do transmissor e do receptor muda, estando o sinal no modo ascendente ou descendente na atmosfera, a sequência de perturbações na frequência pode ser relacionada à sequência de pares ( $a$ ,  $\alpha(a)$ ) ligadas ao perfil do índice de refração ( $n$ ) pela equação (Kursinski et al., 1997):

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

onde  $r$  é a distância do centro de curvatura e a integral é sobre a porção da atmosfera acima do raio no ponto tangente ( $r_t$ ). A dependência do ângulo de curvatura ( $\alpha$ ) e do parâmetro de impacto ( $a$ ) em relação ao tempo durante uma ocultação, como visto anteriormente, é derivada a partir de medidas acuradas da frequência referentes à refração do sinal. A contribuição atmosférica na variação do sinal é combinada com a posição e as velocidades dos satélites envolvidos para estimar o ângulo de curvatura e o parâmetro de impacto. De posse desses dados, por meio de um processo denominado transformada de Abel, é possível obter a refração ( $r_t$ ) em termos de  $\alpha$  e  $a$  (Fjeldbo et al., 1971).

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

onde  $a_1 = r_t$  é o parâmetro de impacto para um feixe cujo raio tangente é  $r$ . Assim, dado  $\alpha(a)$ , a Equação 2 acima pode ser avaliada numericamente. A utilização da transformada de Abel



**Figura 1** - Geometria de uma ocultação instantânea do sinal emitida pelo satélite GNSS e recebido em um satélite LEO, na qual o ângulo de curvatura do sinal ( $\alpha$ ) o parâmetro de impacto ( $a$ ) e o ponto tangente ( $r_t$ ) são determinados pelo excesso doppler na frequência do sinal recebido e pelas posições e velocidades dos satélites envolvidos. Os vetores  $v_t$  e  $v_r$  são as velocidades do transmissor e receptor, respectivamente (Adaptado de Kuo et al., 2000).

para obter a Equação 2 a partir da Equação 1 é realizada sobre a suposição de que a simetria esférica local é satisfeita, ou seja, que a atmosfera não apresenta intensos gradientes horizontais em uma mesma camada. Essa suposição pode ser considerada válida na maioria dos casos (Syndergaard, 2000).

## 2.1 Refratividade (N)

O índice de refração ( $n$ ), em determinado meio é definido como a velocidade da luz no vácuo dividida pela velocidade da luz no meio. Contudo, na atmosfera, o índice de refração é muito próximo da unidade, sendo assim, é conveniente expressá-lo através da refratividade ( $N$ ), definida como  $N = (n-1)10^6$ . Na atmosfera eletricamente neutra, a refratividade é função da temperatura ( $T$ ), da pressão do ar seco ( $P$ ), da pressão do vapor d'água ( $P_w$ ), e da contribuição ionosférica, sendo expressa pela equação (Kursinski et al., 2000):

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 4.03 * 10^7 \frac{n_e}{f^2} \quad (3)$$

onde  $T$  é dada em Kelvin, as pressões  $P$  e  $P_w$  são dadas em hPa, a densidade de elétrons ( $n_e$ ) é expressa em  $m^{-3}$ , e a frequência ( $f$ ) do sinal GPS em Hz.

A Equação 3 apresenta a refratividade em três parcelas: a primeira denominada de componente seca, a segunda é a componente úmida e a terceira está relacionada com a contribuição da ionosfera (camada eletricamente carregada da atmosfera), a qual é função da frequência do sinal e da densidade de elétrons. Essa densidade de elétrons ( $n_e$ ) é normalmente apresentada em unidades de TECU (1 TECU corresponde a  $10^{16}$  elétrons  $m^{-2}$ ) (Matsuoka et al., 2009). Acima de aproximadamente 70 km o termo ionosférico é predominante e as demais contribuições podem ser desprezadas. Neste caso a refratividade é proporcional à densidade de elétrons. Contudo, a fim de se eliminar esse efeito, uma correção ionosférica é aplicada na análise dos valores de refratividade nos baixos níveis. Utilizando-se de uma combinação dos sinais nas duas frequências GPS disponíveis (L1 e L2), a componente ionosférica pode ser minimizada (Hajj et al., 2002).

Depois de minimizado o efeito da ionosfera e para perfis atmosféricos de ROGNSS nos níveis onde a contribuição do vapor d'água pode ser desprezada ( $T < 240K$ ), a expressão para  $N$  para uma dada altitude  $z$  se reduz a:

$$N(z) = 77.6 \frac{P(z)}{T(z)} \quad (4)$$

Considerando o equilíbrio hidrostático como uma suposição válida, e dada uma condição de contorno, como por exemplo:  $P=0$  a 150 km de altitude, obtêm-se os perfis de temperatura em função do perfil de pressão.

Na presença de umidade a Equação 4 fornece valores de temperatura mais baixos do que o real, visto que o vapor

d'água da atmosfera real está sendo computado como moléculas de ar seco. Dentro da comunidade usuária de dados de RO GPS esses perfis são conhecidos como “*Dry Temperature*”. Para se obter os verdadeiros valores de pressão e temperatura dentro da camada úmida, é necessário considerar a refratividade ( $N$ ) representada pela equação:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 * 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (5)$$

Quando a umidade exerce uma importante contribuição em  $N$ , na média e baixa troposfera, o sistema fica indeterminado. Tal fato torna necessário o conhecimento prévio e independente de uma das variáveis, a fim de se determinar as outras. Normalmente se utiliza valores de temperatura de uma fonte externa, como um modelo de PNT, para se obter a pressão e a pressão de vapor interativamente. De forma alternativa, podem-se utilizar as informações de pressão, temperatura e umidade específica ( $q$ ) do modelo com seus erros característicos (matriz variância e covariância) e encontrar a melhor estimativa para  $P$ ,  $T$  e  $q$  em um processo variacional. Esse processo é aplicado no tratamento dos dados de ROGNSS para a obtenção dos perfis de temperatura, pressão e umidade (Rodgers 2000). A qualidade desses perfis sobre a América do Sul foi avaliada usando dados de radiossondas e reanálise (Holzschuh et al., 2008).

## 3. INCLUSÃO DOS DADOS DE ROGNSS NO MODELO DE PNT DO CPTEC

O CPTEC iniciou suas atividades operacionais de PNT global em novembro de 1994 com a implementação da primeira versão de seu modelo, oriundo da versão 1.7 do modelo do *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA). Esta primeira versão do modelo global do CPTEC ficou conhecida como versão CPTEC/COLA. Depois disso, ao introduzir modificações no decorrer dos anos visando às necessidades operacionais do CPTEC, bem como melhorias na modelagem adaptadas para a América do Sul, esse modelo passou a apresentar diferenças substanciais em relação ao modelo original do COLA, passando a ter características próprias. Entre essas características cabe destacar a modificação no tratamento da interação atmosfera-biosfera, novas opções de parametrização da convecção profunda, novos esquemas de difusão horizontal, além da implementação de um pós-processamento diferenciado.

### 3.1 Modelo de circulação geral atmosférico do CPTEC/INPE

Conforme descrito por Cavalcanti et al. (2002), os processos dinâmicos e as parametrizações físicas do Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC/INPE (MCGA-CPTEC/INPE) são as mesmas aplicadas ao modelo COLA, com



esquema de convecção profunda Kuo (Kuo 1974), convecção rasa segundo Tiedtke (Tiedtke, 1983), esquema Mellor e Yamada aplicado à difusão vertical na camada limite planetária (Mellor e Yamada, 1982), e difusão tipo bi-harmônica para difusão horizontal, necessária ao controle de ruídos de pequena escala. As variáveis de superfície são temperatura da superfície do solo, umidade do solo, albedo da superfície e espessura da neve, as quais são introduzidas no início da integração com os valores climatológicos e ajustadas ao longo da integração. Os dados climatológicos de temperatura da superfície e umidade do solo são dados por Willmott et al. (1985).

### 3.1.1 Processos físicos parametrizados

De acordo com Bonatti (1996), a superfície da Terra é composta de uma variedade de diferentes plantas, solos e formações geográficas, as quais trocam massa, *momentum* e calor com a atmosfera em graus e modos variados. Esta versão do MCGA-CPTEC/INPE inclui uma formulação explícita da vegetação sobre a superfície da Terra e seus intercâmbios com a atmosfera e solo, os quais são baseados em um modelo biosférico simples (do inglês SSiB - *Simplified Simple Biosphere Model*, Xue et al., 1991). A camada limite planetária é parametrizada através de um esquema fechado de ordem 2.0 para a difusão vertical. Os efeitos da mistura de calor, *momentum* e umidade pela turbulência de pequena escala são representados por essa difusão vertical. A radiação é dividida em aquecimento devido às ondas curtas (radiação solar) e devido às ondas longas (radiação terrestre). A formulação do aquecimento solar inclui o aquecimento atmosférico devido a absorção de radiação solar pelo ozônio. Os processos úmidos incluem a condensação de grande escala, a convecção profunda e a convecção rasa. Atualmente, o MCGA-CPTEC/INPE é executado operacionalmente para PNT nas resoluções T126L28, T213L42 e T299L64, com previsões de até 7 e 15 dias. Nas especificações das resoluções do modelo, o T designa truncamento triangular nas ondas zonais que representam uma grade horizontal de aproximadamente 100km, 60km e 40km, respectivamente, próximo à linha do Equador, enquanto que o L designa o número de níveis na vertical.

### 3.1.2 Condição inicial

Além das características do modelo de PNT, a qualidade da previsão depende também de uma condição inicial que represente de forma mais adequada possível o estado da atmosfera no instante de sua inicialização, o qual é obtido em um processo denominado Assimilação de Dados. Esse processo determina as condições iniciais do modelo de PNT ao ajustar as previsões de curto prazo desse mesmo modelo com observações atualizadas,

levando-se em consideração os erros de ambos (modelo e observações). O sistema de assimilação utilizado nesse estudo é o denominado PSAS (*Physical-space Statistical Analysis System*), que foi desenvolvido no *Data Assimilation Office* (DAO) do *Goddard Space Flight Center* (GSFC) da NASA. Esse sistema apresenta as seguintes características (Cohn et al., 1998):

1- Resolve as equações de análises globalmente ao invés de localmente, eliminando a aproximação local (e consequentes descontinuidades) e a seleção de dados;

2- Sua formulação é realizada diretamente no espaço físico (espaço das observações), da mesma forma que os esquemas de Interpolação Ótima (um tipo de esquema de análise mais simples), mas diferentemente dos esquemas de análise variacional espectral (um tipo de esquema de análise mais sofisticado);

3- Tem custo computacional pequeno, considerando que a dimensão do espaço da observação ( $p \sim 10^5$ ) é uma ordem de magnitude menor que o espaço do modelo de previsão ( $n \sim 10^6$ ); além disso é independente da formulação do modelo de previsão, tornando-se um algoritmo adequado para diversas aplicações.

A completa formulação empregada nesse sistema pode ser obtida em detalhes em Cohn et al. (1998). Além das características do modelo e do esquema de assimilação de dados, a qualidade da condição inicial (análise) gerada está também diretamente relacionada com a quantidade e distribuição homogênea dos dados atmosféricos sobre o globo.

## 3.2 Dados convencionais e de satélites (não convencionais) utilizados nos experimentos

O sistema de assimilação PSAS está apto a assimilar observações em superfície, tais como: altura geopotencial, componentes do vento sobre os oceanos e valores do conteúdo de água precipitável; e em altitude, tais como: perfis de altura geopotencial, componentes do vento e umidade específica, considerando neste caso apenas os níveis padrão (Herdies et al., 2008).

A Organização Mundial de Meteorologia (WMO - *World Meteorological Organization*) mantém um sistema de disseminação de dados denominado *Global Telecommunication System* (GTS), no qual encontram-se disponíveis diversos tipos de observações convencionais e não convencionais, tanto de superfície como de altitude. Dentre as observações de superfície, destacam-se as realizadas por estações meteorológicas, sensores instalados em boias oceânicas e a bordo de navios. As principais observações de altitude são provenientes de estações de radiossondagem, balões piloto e sensores a bordo de aviões. Essas observações, classificadas como convencionais, são provenientes em sua grande maioria de estações terrestres, apresentando uma distribuição espacial muito irregular e concentradas sobre as áreas continentais. Por outro lado, as

observações ditas não convencionais, obtidas via satélites, permitem a obtenção de dados sobre oceanos e em regiões onde os dados convencionais são escassos. Dentre as informações de satélite utilizadas nesse trabalho citam-se: observações de vento à superfície sobre o oceano provenientes do sensor QuikScat (*Quik Scatterometer* da NASA), perfis verticais de temperatura e umidade inferidos pelo *Advanced TIROS-N/NOAA Operational Vertical Souder* (ATOVS), e observações da altura geopotencial e conteúdo de água precipitável provenientes de sondagens do sensor AIRS/AMSU (*Atmospheric InfraRed Sounder/Advanced Microwave Sounding Unit*). A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos dados convencionais e de satélites para um período de 6 horas, que corresponde a janela de dados utilizadas em um único ciclo de assimilação, o qual foi utilizado nos experimentos.

Com relação aos dados de ROGNSS utilizados adicionalmente para verificar o impacto na qualidade final das previsões do modelo MCGA-CPTEC/INPE, esses são provenientes do CDAAC (*COSMIC Data Analysis and Archival Center*), o qual processa medidas de fase da onda portadora dos sinais GNSS realizadas nos satélites LEO da constelação COSMIC e fornece perfis verticais quase em tempo real. Os dados dessa constelação foram selecionados, pois esses permitem uma maior penetração na baixa troposfera e têm-se mostrado capazes de observar a estrutura da camada limite da atmosfera tropical, fornecendo valiosas informações sobre o vapor d'água nos baixos níveis (Liou, 2008). Além disso, essa constelação fornece um maior número de perfis úmidos de ROGNSS do que os demais satélites.

A constelação COSMIC designa uma missão que teve seu lançamento em 14 de abril de 2006, através de uma parceria científica entre os EUA e *Taiwan*, com o intuito de demonstrar a utilidade dos dados ROGNSS na previsão de tempo operacional e análise climática. A missão colocou seis pequenos satélites em órbita baixa da Terra, cada um carregando avançados receptores GPS, a 800 km acima da superfície terrestre. Com a habilidade de realizar ocultações, tanto ascendentes como descendentes, o COSMIC tem produzido atualmente 2500 sondagens diárias da atmosfera, uniformemente distribuídas ao redor do globo, desde 2007. Noventa por cento dos perfis obtidos são disponibilizados operacionalmente aos centros de previsão em até 3 horas após as observações. Os perfis de ROGNSS utilizados no presente trabalho, foram obtidos em <http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/> no formato NetCDF, contendo dados de pressão, temperatura e pressão de vapor, todos em função da altura geométrica acima do nível médio do mar, para cada ponto de observação com sua respectiva latitude e longitude. A Figura 3 mostra a distribuição espacial típica diária dos perfis atmosféricos gerados pela constelação COSMIC sobre o globo terrestre. Essa densidade de dados de ROGNSS foi a utilizada nos experimentos realizados na presente pesquisa.

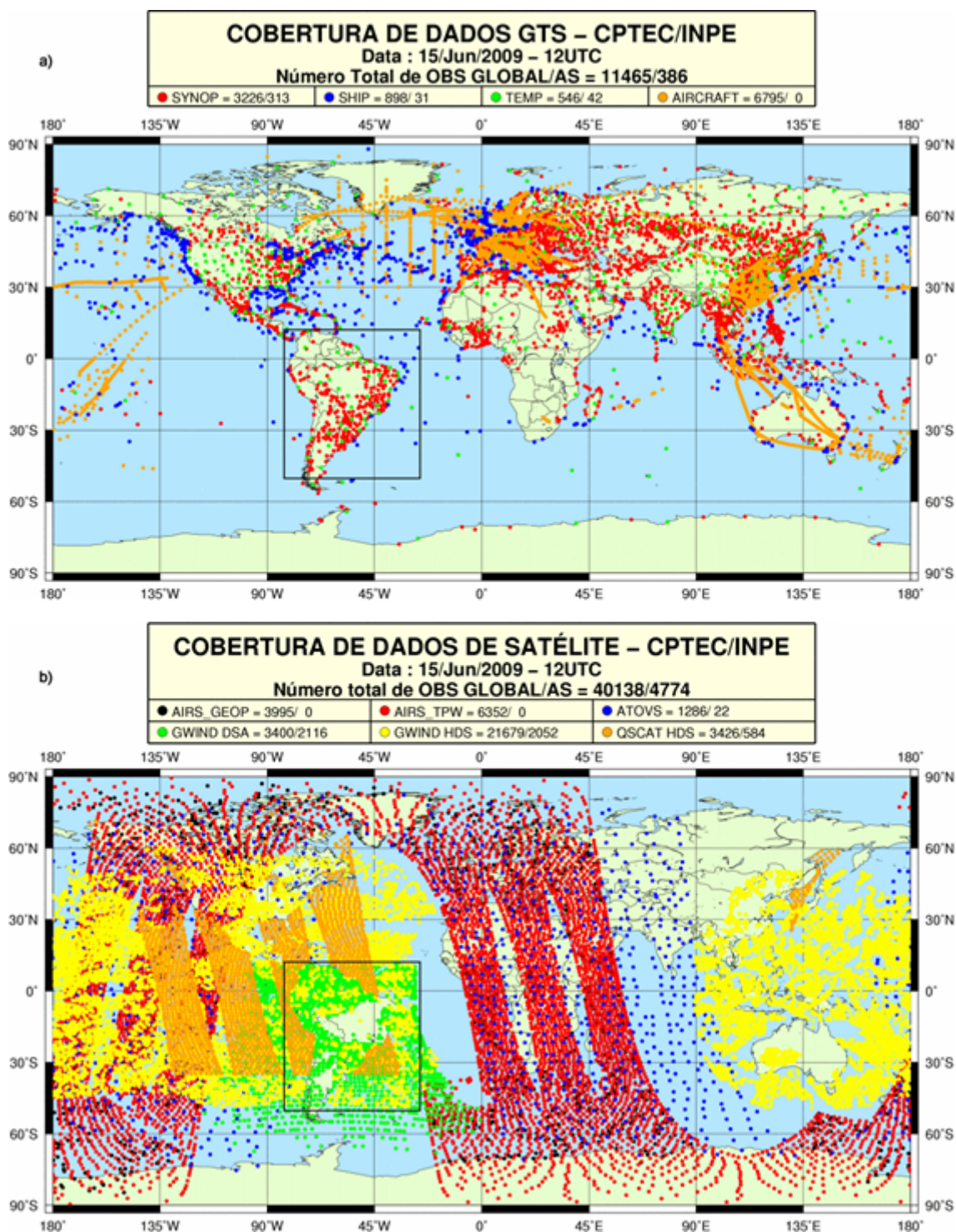
### 3.3 Assimilação de dados de ROGNSS no MCGA do CPTEC

Os dados de ROGNSS apresentam diferentes níveis de processamento, os quais podem ser listados a seguir:

Nível 0: medidas de distância entre os satélites LEO e GNSS obtidas a partir das observações de fase do sinal GNSS feitas pelo receptor no satélite LEO;

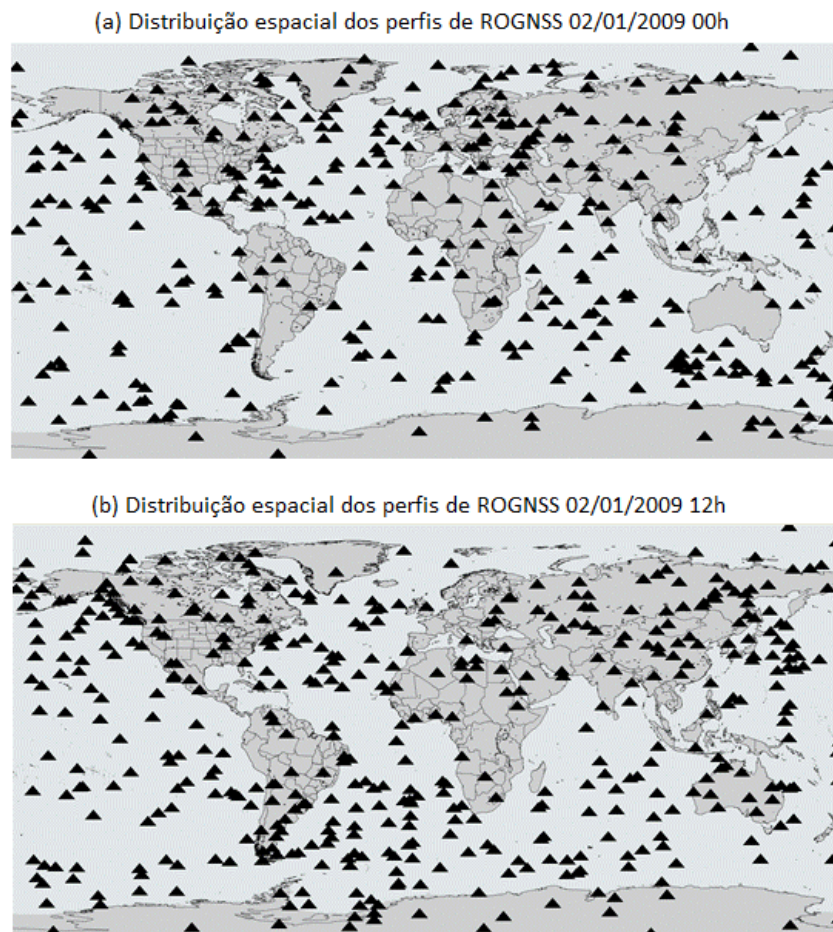
- Nível 1: Ângulos de curvatura ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) referentes às frequências L1 e L2;
- Nível 2a: Perfis do ângulo de curvatura da atmosfera neutra ( $\alpha$ ) em função do parâmetro de impacto ( $a$ ), pós-correção ionosférica;
- Nível 2b: Perfis de refratividade (N) em função da altura geométrica;
- Nível 2c: Perfis de temperatura (T) e pressão de Vapor d'água ( $P_w$ ) em função da altura geométrica;

Para a assimilação sabe-se que dados brutos (menos processados) produzem melhores resultados, pois os diferentes estágios de processamento envolvem aproximações, e consequentemente, a inclusão de incertezas nos valores obtidos. Contudo, utilizar medidas brutas na assimilação exige um operador mais complexo dentro do processo de assimilação impactando o custo computacional para a determinação da análise, o que torna o processo inviável ao utilizar o PSAS. Assim observações dos níveis 0 e 1 não são praticáveis, dada a complexidade do operador (Cucurull, 2009). A assimilação do ângulo de curvatura ( $\alpha$ ) (Nível 2a) e perfis de refratividade (Nível 2b) é bastante explorada em diversos centros operacionais, pois apresenta a vantagem de ter um operador observacional menos complicado. Os perfis de T, altura geopotencial e umidade também são uma boa opção na assimilação, pois apresentam uma vantagem significativa de não exigirem que o operador de observações seja modificado. Na literatura há diversos trabalhos mostrando que a assimilação de retrievals é uma opção. Por exemplo, Joiner e Da Silva (1998) mostram que os resultados da assimilação de retrievals foram quase idênticos à assimilação de radiâncias. Migliorini (2012) apresenta um rigoroso trabalho que discute em que circunstâncias a assimilação de dados brutos e processados produzem resultados semelhantes, e especifica os casos em que retrievals são vantajosos. Hoffman (2011) usando uma metodologia de processamento por ensemble mostrou que retrievals podem produzir impacto semelhante aos dados de radiância. Além disso, uma vantagem adicional está no fato de que essas variáveis são as mesmas variáveis do modelo (variáveis que são analisadas), impactando-as diretamente. Dada a necessidade de investigar o potencial dessa técnica para a melhoria do desempenho do MCGA, associado ao fato de que o operador de observação do PSAS já está apto para assimilar dados de altura geopotencial e umidade, e levando em



**Figura 2** - Distribuição espacial típica dos dados provenientes de instrumentos (a) em bases terrestres e (b) em sensores em satélites, rotineiramente assimilados no CPTEC-INPE.





**Figura 3** - Distribuição espacial típica diária dos perfis de ROGNSS sobre todo o globo terrestre, a qual consiste na base de dados utilizada para avaliar o impacto desses tipos de dados nas previsões do MCGA.

consideração os pontos discutidos acima, optou-se por fazer a assimilação dos dados de ROGNSS no Nível 2c.

Alguns ajustes adicionais foram necessários para a realização dos experimentos, pois o PSAS assimila altura geopotencial e umidade específica nos níveis padrão. Assim os valores de temperatura foram convertidos em valores de altura geopotencial, e os valores de pressão de vapor foram convertidos em umidade específica, ambas interpoladas para os níveis padrão. Mais detalhes sobre esses procedimentos são apresentados em Souza et al. (2011). Como os dados de ROGNSS podem apresentar uma queda de qualidade na baixa troposfera, devida principalmente pelo gradiente horizontal, o qual não é considerado na obtenção da refratividade, uma vez que a simetria esférica é uma suposição aceita como válida na formulação utilizada, como já visto na seção 2. Quando significativos gradientes horizontais ocorrem em determinadas alturas, a suposição de simetria esférica não é válida e ruídos contaminam os perfis de refratividade da ROGNSS, e consequentemente, os perfis atmosféricos também são afetados.

Em função disso, centros operacionais de PNT restringem esses dados para alturas superiores a 4 km (Cucurull et al., 2007; Buontempo et al., 2008). Visando explorar o limite desses dados, no presente estudo optou-se por aplicar um controle de qualidade, ao invés de determinar um limite inferior do perfil. O controle de qualidade implementado para o presente trabalho é baseado nos trabalhos de Poli (2009), no qual o gradiente de refratividade  $dN/dz$  é calculado, e os valores são utilizados para identificar observações muito ruidosas. Seguindo essa metodologia, valores onde os gradientes foram menores que  $-50\text{km}^{-1}$ , foram excluídos dos experimentos, os quais representaram um total de 5% dos dados.

Para a inclusão dos perfis de ROGNSS no PSAS houve a necessidade de determinar as incertezas desses valores, as quais são utilizadas como pesos (inversamente proporcional às incertezas) no processo de ajuste para a determinação do estado ótimo da atmosfera. Valores inapropriadamente superestimados (incerteza muito baixa) podem gerar ruídos indesejáveis no processo, que ocasionam previsões piores do que com a



ausência desses dados. Por outro lado, incertezas muito grandes fazem com que a informação não contribua com o processo, inalterando os resultados gerados pelo modelo. Para essa tarefa foi feito inicialmente um estudo comparativo das previsões de 6 horas do modelo, utilizadas como background (previsão de curto prazo) pelo sistema de assimilação, e os valores dos perfis de geopotencial e umidade da ROGNSS. Essa análise é denominada OmF (Observação menos First guess) e com ela foram calculados os valores de desvio padrão para cada um dos níveis padrão da atmosfera onde é feita a assimilação dos dados. Todos os dados do mês de janeiro de 2009 foram considerados nessa análise. A Figura 4 mostra os valores obtidos nesse processo, os quais foram utilizados para a assimilação dos dados. Os valores de desvio padrão foram convenientemente separados por faixas de latitude para melhor avaliação, em função da diferente distribuição de dados e resposta do modelo.

### 3.4 Configuração dos experimentos

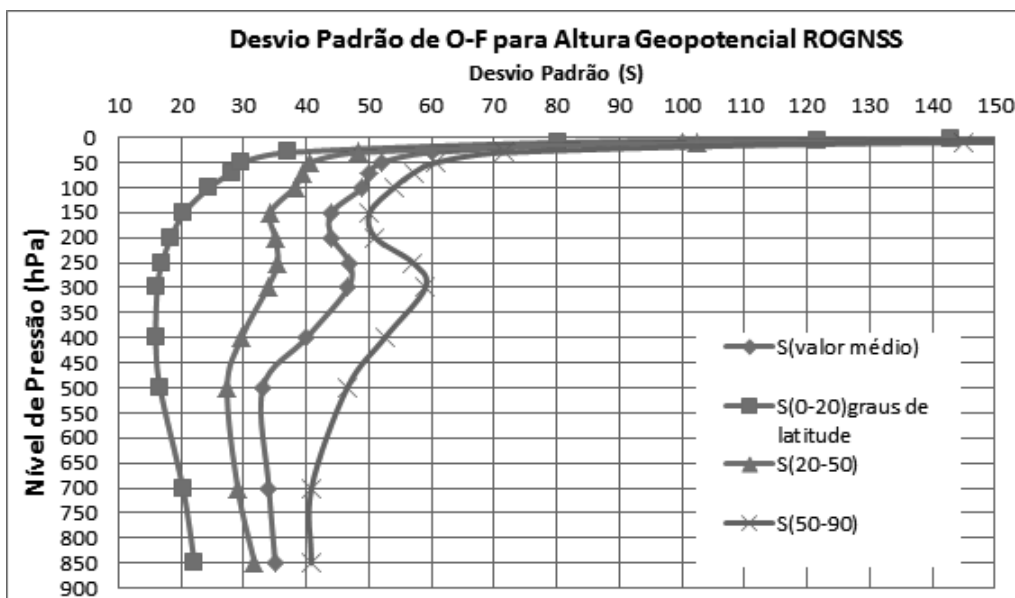
Para avaliar o impacto da assimilação de dados de ROGNSS na qualidade das previsões do MCGA-CPTEC/INPE, foram realizados experimentos com e sem a inclusão desses dados e uma análise de desempenho foi aplicada para acessar os benefícios gerados com a inclusão desses dados. O período escolhido para realizar tais experimentos foram os meses de janeiro e julho de 2009 para verificar o impacto em períodos de inverno e verão, semelhante ao que foi realizado em trabalhos envolvendo o modelo global de PNT do NCEP (Cucurull et al., 2007) e o do *MetOffice* (Buontempo et al., 2008).

Em cada um dos experimentos realizados foi executado todo o sistema de assimilação PSAS e o MCGA-CPTEC/INPE em modo cíclico, no qual as previsões de 6 horas do modelo são utilizadas como background para gerar a próxima análise ao assimilar todos os dados disponíveis em uma janela de 6 horas em torno dos horários sinóticos 00UTC, 06UTC, 12UTC e 18UTC. Dessa forma a janela de dados do ciclo realizado às 12UTC tem início às 09UTC e seu término às 15UTC, horário onde se inicia a janela de dados do ciclo das 18UTC, e assim sucessivamente todos os dados disponíveis são assimilados.

Para verificar o impacto isolado dos perfis de altura geopotencial da ROGNSS um experimento adicional foi realizado no qual os perfis de umidade não foram assimilados. Os experimentos realizados e sua respectiva denominação são:

- **CNTR:** com assimilação de dados rotineiramente empregados na assimilação de dados operacional no MCGA-CPTEC/INPE, envolvendo dados convencionais e não convencionais já descritos na seção 3.2;
- **GPRO:** experimento com assimilação dos mesmos dados contidos no experimento de controle com a inclusão de perfis de altura geopotencial provenientes da ROGNSS;
- **GURO:** experimento com assimilação dos mesmos dados contidos no experimento de controle com a inclusão de perfis de altura geopotencial e de razão de mistura provenientes da ROGNSS.

Cada um desses experimentos foi realizado duas vezes: a primeira para o mês de janeiro de 2009 e a segunda para julho desse mesmo ano. A partir de cada análise gerada



**Figura 4** - Perfil vertical do desvio padrão dos valores da altura geopotencial da ROGNSS em comparação com os campos de Background (Previsão de 6 horas) do MCGA em diferentes faixas de latitudes.

em cada um dos experimentos, o MCGA-CPTEC/INPE foi integrado até 120 horas gerando previsões para até cinco dias após essa análise. Para avaliar o impacto da assimilação dos dados ROGNSS nessas previsões, métricas estatísticas como RMS (Erro Quadrático Médio), viés e coeficiente de correlação de anomalia (CCA) foram calculadas usando a própria análise obtida em cada um dos experimentos como referência, da forma como convencionalmente é feito. O coeficiente de correlação de anomalia é normalmente utilizado como um indicador de desempenho dos modelos de PNT e é dado pela fórmula:

$$CCA = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [(v_{i,j}^P - v_{i,j}^C)(v_{i,j}^A - v_{i,j}^C)]}{\left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (v_{i,j}^P - v_{i,j}^C)^2 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (v_{i,j}^A - v_{i,j}^C)^2 \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

na qual o símbolo  $v$  representa uma variável de estado qualquer, os índices  $A$ ,  $P$  e  $C$  representam as análises, as previsões e a climatologia, respectivamente. Os índices  $i$  e  $j$  representam as coordenadas do ponto de grade nas direções latitudinal e longitudinal, respectivamente de cada recorte.

O cálculo das métricas estatísticas foi feito utilizando um software de avaliação denominado SCAMTEC (Sistema de Avaliação de Modelos de Tempo e Clima) (Sapucci et al., 2011) e as variáveis escolhidas foram as utilizadas como prognósticas na integração do modelo, que são: altura geopotencial e velocidade do vento nos níveis de 250, 500 e 850 hPa, umidade relativa em 250, 300, 500, 700, 850 e 925 hPa e água precipitável integrada na coluna vertical atmosférica. Nessa avaliação, três diferentes regiões foram consideradas: Hemisfério Norte (HN), entre 80°N-20°N; Hemisfério Sul (HS), entre 80°S-20°S; Região Tropical (RT), entre 20°S-20°N e América do Sul (AS), entre 50°S-10°N e 80°W-30°W.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISE

A Figura 5 apresenta os valores do CCA e RMS para a altura geopotencial em 500 hPa para o Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, Região Tropical e América do Sul nos meses de Janeiro e Julho de 2009. Nos resultados apresentados nessa figura diversas constatações podem ser obtidas. Observa-se claramente que a inclusão dos perfis de geopotencial e umidade da ROGNSS (experimento GURO) apresenta um impacto significativamente positivo, pois os valores da CCA apresentados nesse experimento são bem maiores que os apresentados no experimento controle (CNTR), bem como nos valores do RMS, nos quais o mesmo impacto positivo é observado com a diminuição do erro. Como observado em outros trabalhos (Cucurull et al. 2007, entre outros) o impacto é mais significativo no Hemisfério Sul do que no Hemisfério Norte. Enquanto no

HN os resultados apresentados pelos diferentes experimentos foram semelhantes, no HS observa-se em janeiro um ganho na extensão das previsões válidas (previsão com CCA acima de 0.6) de 24 horas quando os perfis de ROGNSS são considerados. Com relação aos demais recortes, embora na região tropical também seja observado uma sutil melhoria, ao considerar o recorte da América do Sul esse impacto é preponderante em especial durante o mês de janeiro, período em que se observa um ganho de 62 horas (2,5 dias) na extensão das previsões válidas.

Em uma análise sazonal observa-se que o impacto da assimilação de perfis de ROGNSS no desempenho do MCGA é maior durante Janeiro (verão austral) do que durante o Julho (inverno) em todos os recortes considerados. Isso inclui o HN onde se observa uma melhora nos resultados maior em Janeiro do que em Julho, o que pode ser um reflexo do bom desempenho sobre o Hemisfério Sul durante o verão. A combinação do processo de assimilação e as previsões geradas pelo modelo em um processo cíclico permite que o balanço termodinâmico obtido através das observações seja transportado entre diferentes regiões. Um outro fato que pode ter contribuído para esse resultado é a matriz de erros dos perfis de radio ocultação GNSS calculada com dados apenas de janeiro. Como esses erros são usados para ponderar as correções realizadas no background eles podem ser mais adequados para o verão, e portanto, tais resultados não podem ser conclusivos.

Uma análise dos resultados apresentados pelo experimento, onde apenas perfis de geopotencial foram assimilados (GPRO), observa-se que o desempenho obtido não foi tão significativo quanto ao obtido no experimento onde perfis de umidade foram usados (GURO). Para o mês de julho (inverno austral), onde o experimento GURO apresentou resultados mais sutis, observa-se que o desempenho nesse caso foi até inferior do que o controle, o que é observado na região tropical e no hemisfério Sul, bem como na América do Sul. Os valores do RMS no HS e AS durante o mês de Julho denunciam claramente esse padrão. Esse resultado mostra que ao assimilar os perfis de ROGNSS deve-se utilizar toda a informação neles contidos, ou seja, geopotencial e umidade. Uma explicação para esse resultado pode ser sugerida pela Equação 5, na qual as medidas de refratividade estão associadas com os valores de pressão, temperatura e umidade. Quando se assimila apenas os valores da altura geopotencial, a observação é utilizada parcialmente, o que permite que o sistema modifique os valores da umidade em função dos valores de geopotencial assimilados, gerando um resultado diferente da real contribuição que a refratividade poderia fornecer. A utilização de perfis de altura geopotencial, em conjunto com valores de umidade, permite que toda a observação de refratividade seja absorvida, contribuindo de forma mais eficiente para a obtenção de uma melhor condição inicial.

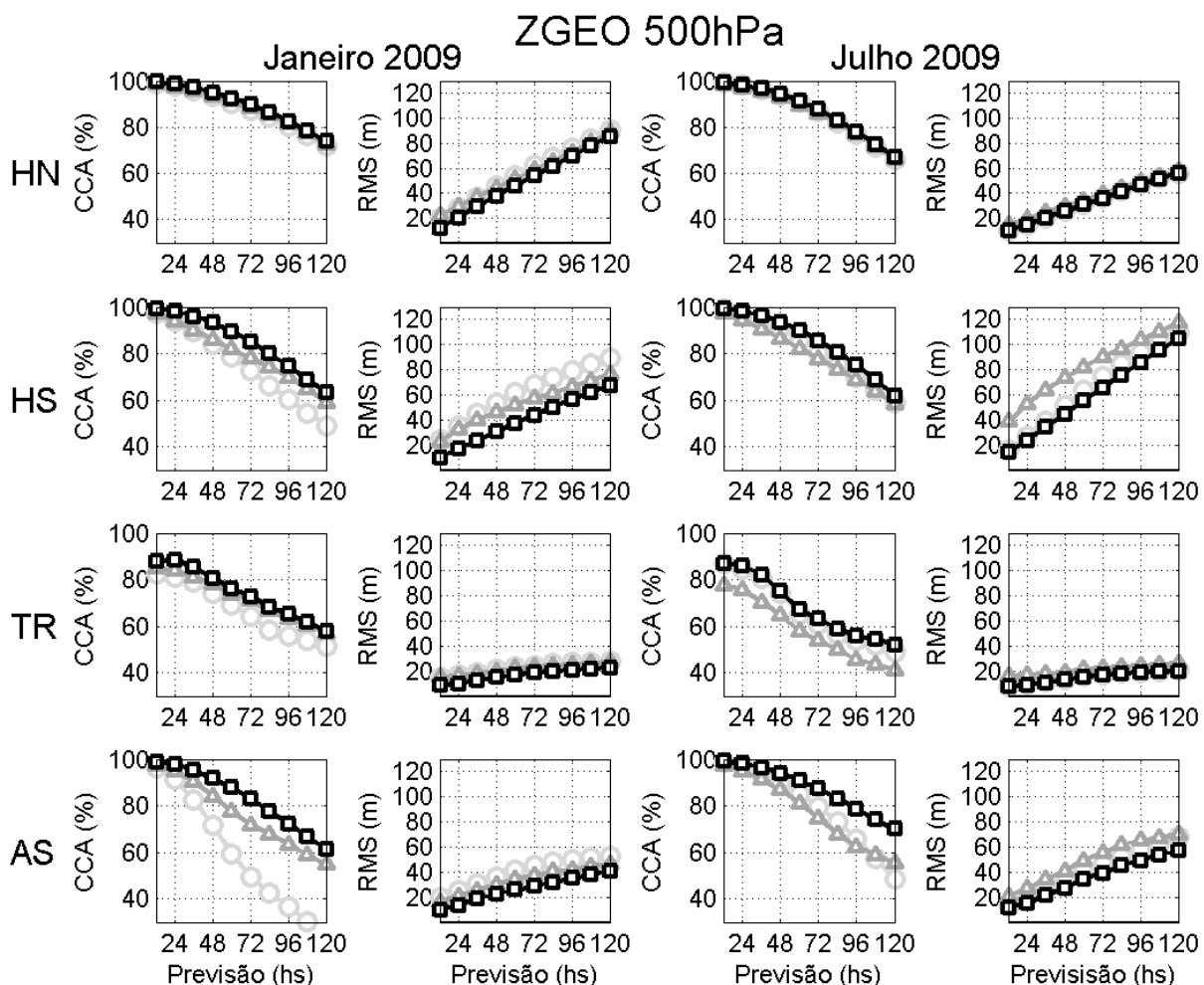
Como os resultados apresentados na Figura 5 são valores médios mensais os mesmos mascararam oscilações temporais ocorridas durante o período avaliado. Para acessar essas oscilações, a Figura 6 apresenta séries temporais do CCA da altura geopotencial em 500hPa apenas para as previsões de 36 horas de integração do MCGA-CPTEC/INPE, para o mês de janeiro nos diferentes recortes em avaliação. As previsões de 36 horas foram selecionadas nessa análise por serem as mais utilizadas em aplicações operacionais, pois representam as previsões de 12 horas do dia seguinte a sua divulgação pelos meteorologistas.

Os valores apresentados na Figura 6 mostram que com a assimilação dos perfis de geopotencial e umidade (GURO), as oscilações no CCA observadas no experimento controle, bem como, com a assimilação apenas do geopotencial de ROGNSS, são minimizadas significativamente. Isso é observado em todos os recortes, embora seja mais significativo sobre a América do Sul. Em alguns casos observou-se que o experimento

em que apenas os perfis de geopotencial foram assimilados (experimento GPRO), oscilações negativas foram observadas em praticamente todos os recortes. Nesse aspecto, especial atenção deve ser dada para os resultados apresentado no HS durante o período de 7 a 12 de janeiro. Esse resultado reforça que apenas perfis de geopotencial da ROGNSS não devem ser assimilados sem que perfis de umidade também o sejam.

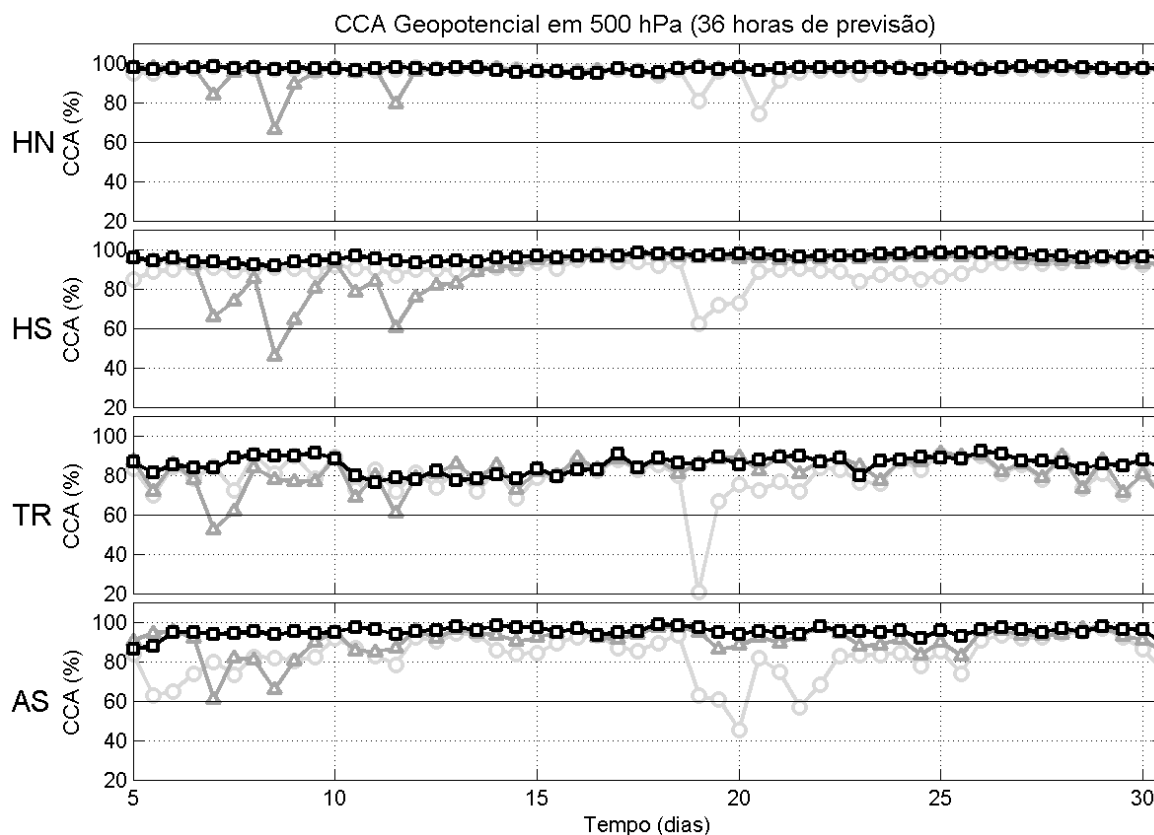
Para apresentar os resultados com relação às demais variáveis, níveis nos diferentes recortes, bem como nos meses de janeiro e julho em uma análise global, a Figura 7 mostra o ganho percentual nos valores do CCA e RMS em todas as variáveis avaliadas em função do tempo de integração do modelo. Nessa análise apenas o experimento GURO é comparado com o CNTR. O ganho percentual no CCA de uma variável  $v$  qualquer no tempo de integração  $t$  é obtido ao aplicar a seguinte fórmula:

$$GANHO_{v_i}^{CCA} = \frac{(CCA_{v_i}^{GURO} - CCA_{v_i}^{CNTR})}{(0 - CCA_{v_i}^{CNTR})} \cdot 100 \quad (7)$$



**Figura 5** - Valores do CCA e RMS da altura geopotencial em 500 hPa sobre o Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, região tropical e América do Sul nos meses de Janeiro e Julho de 2009.





**Figura 6** - Séries temporais do CCA da altura geopotencial em 500hPa para as previsões de 36 horas de integração do MCGA durante o mês de janeiro sobre o Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, região tropical e América do Sul.

Para o RMS a mesma fórmula é usada, podendo esse ganho ser positivo ou negativo. No último caso tais valores representam uma perda de qualidade do experimento com relação ao controle. Para o caso em questão com a assimilação de ROGNSS, houve perdas em alguns casos, em especial sobre o HN. No entanto, os valores foram menores do que 0.5%, como foram proporcionalmente muito menores do que o ganho (valores acima de 25%), esses foram desconsiderados nessa análise.

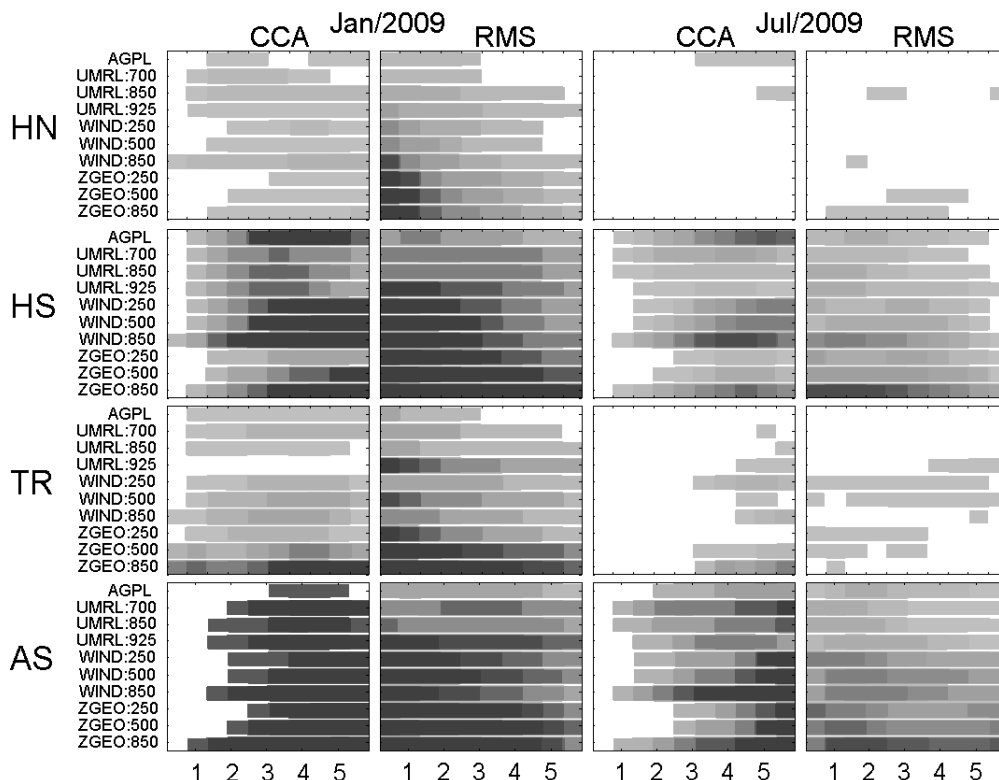
Nota-se nos resultados apresentados no painel da Figura 7, que os padrões semelhantes aos da análise da altura geopotencial em 500 hPa são observados nas demais variáveis, os quais são reforçados. Em uma avaliação global dos resultados, observa-se claramente que a contribuição dos perfis de ROGNSS é muito maior no verão do que no inverno, embora sobre o HS e principalmente sobre a América do Sul esse impacto é significativo, mesmo no inverno. O fato dos erros dos perfis de radio ocultação GNSS terem sido obtidos usando apenas o período de janeiro deve ser considerado nessa análise. Em uma análise por região têm-se os seguintes resultados:

- **Hemisfério Norte:** observa-se que em janeiro o impacto dos perfis de ROGNSS foi maior nos primeiros dois

dias de integração na variável geopotencial em todos os níveis avaliados, bem como, no vento em 850 hPa. Ganhos acima de 20% foram registrados nos valores do RMS nesses casos. O impacto nas previsões geradas no mês de julho foi menor do que 1% em praticamente todas as variáveis, não excedendo a 5%.

- **Região tropical:** é observado o mesmo ganho no RMS em Janeiro no Geopotencial em 850 hPa, o vento em 500 hPa e na umidade em 925hPa. No geopotencial em 500 e 850 hPa ganhos acima de 25% no RMS são observados mesmo após 4 dias de integração do modelo. Em Julho os resultados não merecem destaques.

- **Hemisfério Sul:** o impacto dos perfis de ROGNSS é significativo em todas as variáveis e níveis avaliados, tanto no verão, como no inverno, com valores acima de 10%. Esse impacto é maior na velocidade do vento e altura geopotencial nos três níveis e na umidade em 925 durante janeiro e nos primeiros 3 dias de integração do modelo. Nessas circunstâncias, o impacto foi acima de 20%. Esse é um resultado bastante expressivo, e evidencia a importância de considerar tais observações para a melhoria do desempenho do MCGA-CPTEC/INPE, uma vez que sobre o HS todos os modelos apresentam deficiências em bem representar a



**Figura 7** - Ganho percentual nos valores do CCA e RMS em todas as variáveis avaliadas (representadas no eixo das ordenadas) em função do tempo de integração do modelo (5 dias, representados no eixo das abscissas) sobre o Hemisfério Norte, Hemisfério Sul, região tropical e América do Sul durante os meses de janeiro e julho de 2009.

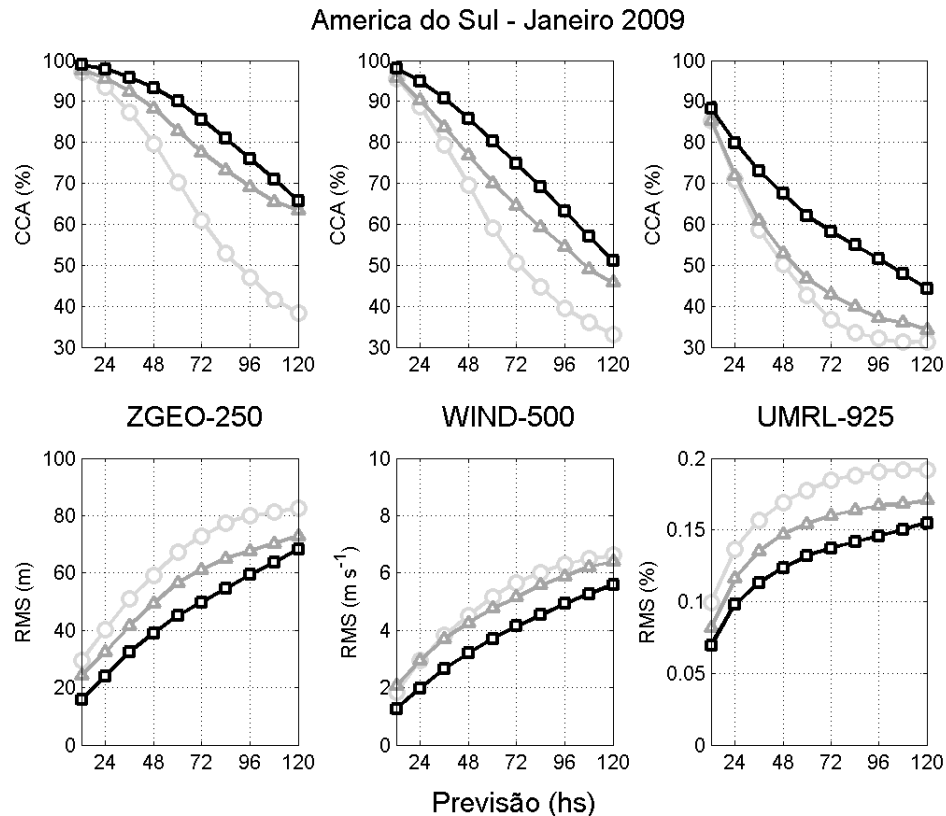
atmosfera, tendo como principal justificativa a base pobre de dados. Durante o mês de Julho o ganho, embora menor que o observado em janeiro, ainda é significativo ficando acima de 10% em praticamente todas as variáveis consideradas;

**- América do Sul:** O impacto dos perfis de ROGNSS nas demais variáveis sobre a América do Sul é muito semelhante ao observado sobre o Hemisfério Sul, nas mesmas variáveis níveis e valores. Algo adicional e significativo que merece destaque é que no ganho do CCA observa-se um maior ganho nessa região em todas as variáveis, do que o observado no HS depois de 24 horas de integração, com valores acima de 20% de ganho. Esse resultado é consequência do melhor desempenho do modelo em regiões distantes da América do Sul, mas que depois de algumas horas de integração, impactam positivamente as previsões de mais longo prazo. Uma região de grande importância nesse aspecto é a região do oceano Pacífico que tem forte influência sobre a América do Sul (Aravequia, 2003), e esse é um indicativo que com a assimilação de perfis de ROGNSS essa região é melhor representada pelo modelo.

Para detalhar os melhores resultados apresentados sobre a América do Sul, a Figura 8 mostra os valores do CCA e RMS da altura geopotencial em 250 hPa, da velocidade do vento em 850 hPa e da umidade relativa em 925 hPa. Os valores

apresentados mostram um ganho na extensão das previsões válidas em todas essas variáveis acima de 24 horas. No caso da altura geopotencial em 250 hPa, esse ganho é superior a dois dias, semelhante ao observado em 500 hPa (Figura 5) e no vento em 850 hPa a extensão foi de 30 horas.

No caso da umidade relativa em 850 hPa as previsões válidas (CCA acima de 60%) apresentadas pelo controle eram apenas até 36 horas de integração. Com a inclusão dos perfis de ROGNSS esse limiar é atingido apenas depois de 60 horas (2 dias e meio) de integração. Para as variáveis associadas à umidade esse ganho é muito importante, pois essas estão diretamente relacionadas com a ocorrência da precipitação, cuja previsão com qualidade é um dos mais importantes produtos da PNT, com impacto direto para os usuários finais. A obtenção de previsões de precipitação de melhor qualidade sobre a América do Sul é um grande desafio para o MCGA-CPTEC/INPE, em especial por se tratar de uma região tropical com bastante atividade convectiva. Em função dessa importância, a Figura 9 apresenta a distribuição espacial do RMS médio da umidade relativa em 925 sobre a América do Sul, específico para as previsões de 36 horas. Uma comparação do experimento de controle com o experimento GURO é realizada, mostrando o ganho percentual obtido com a assimilação dos dados de



**Figura 8** - Valores médios do CCA e RMS da altura geopotencial em 250hPa da velocidade do vento em 850 hPa e da umidade relativa em 925 hPa sobre a América do Sul durante o mês de janeiro de 2009.

ROGNSS, bem como a intensidade e a localização das perdas percentuais geradas nesse processo.

A Figura 9 mostra que o erro nos campos de umidade relativa em 925 hPa diminui significativamente em grande parte do recorte, com especial impacto sobre as porções do oceano Pacífico e Atlântico Sul nele contidos. Essa diminuição do erro é destacada na figura do ganho percentual (Figura 9, segunda linha à esquerda) onde se observam as regiões onde a inclusão dos dados e ROGNSS impactaram positivamente. Nessa mesma figura, observa-se que nas regiões oceânicas destacadas o ganho é em torno de 50%. Esse ganho também é significativo sobre a região Amazônica onde a coleta de dados à superfície é mais escassa. Com relação as perdas percentuais, é possível identificar as regiões onde os perfis de ROGNSS não contribuíram para a melhoria da qualidade das previsões dos campos de umidade em 925 hPa. Essas regiões se concentram sobre a porção sul da cordilheira dos Andes e sobre a Costa do Atlântico no território brasileiro. Além dessas regiões há outras de menor intensidade e dimensão sobre a região Sudeste e Centro Oeste do Brasil. Para determinar as causas e possíveis explicações para tais perdas, estudos adicionais são necessários envolvendo outros tipos de dados e um período maior, bem como, testar outras configurações do modelo para identificar a relação do impacto

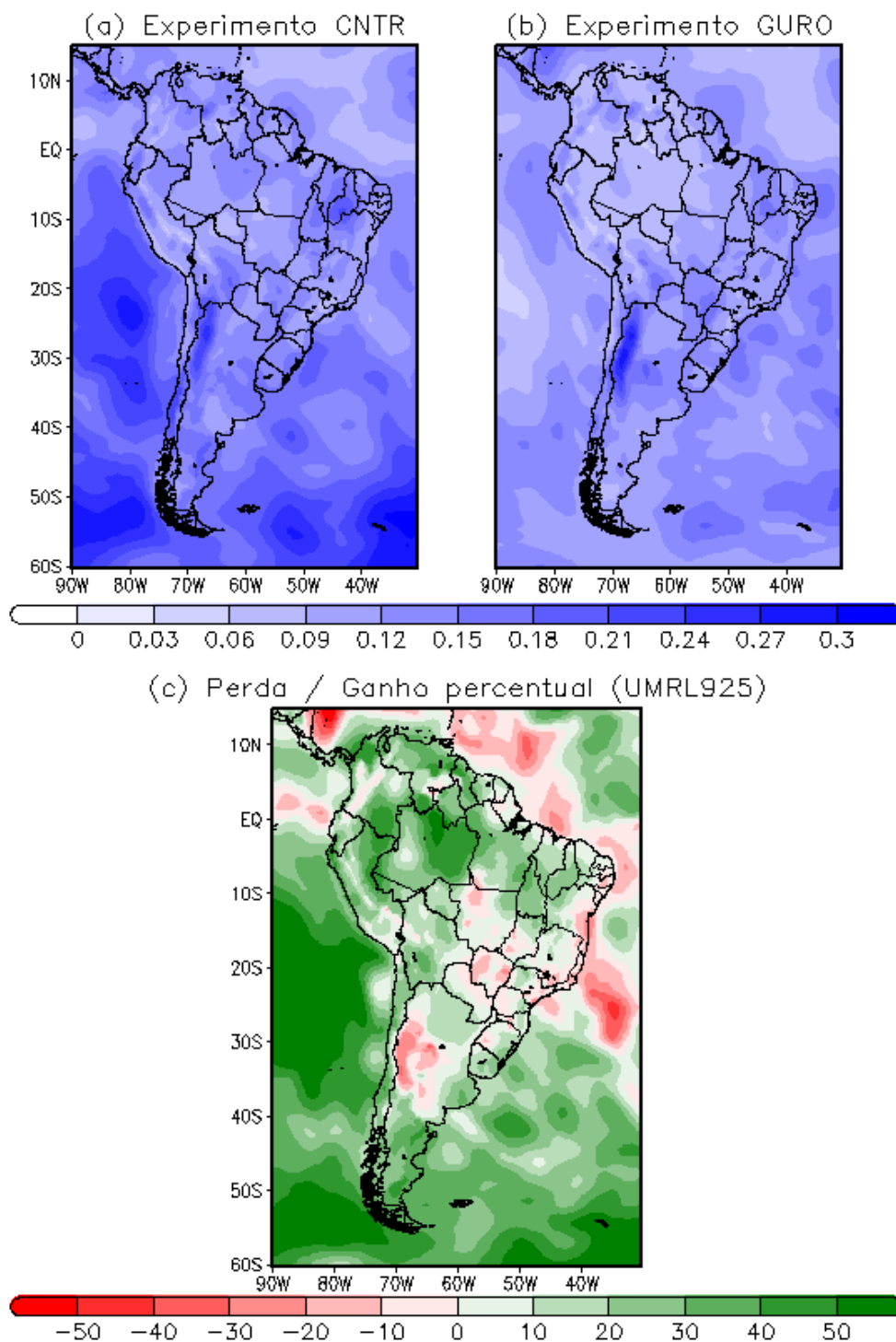
dos perfis de ROGNSS com outros esquemas de parametrizações físicas envolvidos na modelagem, e conseqüentemente com a melhoria das previsões da precipitação sobre a América do Sul.

## 5. CONCLUSÕES

A Rádio Ocultação GNSS tem surgido como uma técnica inovadora e altamente promissora em face à qualidade dos dados por ela obtidos, ao seu baixo custo e a distribuição global das observações. O presente trabalho investigou o impacto da assimilação de perfis ROGNSS na melhoria da qualidade das previsões do MCGA-CPTEC/INPE. Para isso foram realizados três experimentos nos meses de Janeiro e Julho de 2009: o primeiro com assimilação de apenas dados rotineiramente usados na assimilação operacional usando o PSAS, o segundo com assimilação desses mesmos dados e perfis da altura geopotencial provenientes da ROGNSS, e o terceiro com os mesmos dados do primeiro e com perfis de altura geopotencial e umidade da ROGNSS. Na análise dos resultados diferentes recortes, variáveis e níveis foram considerados.

Os resultados obtidos mostram claramente que o impacto da assimilação dos dados de ROGNSS na melhoria das previsões do MCGA é significativamente positivo, aumentando





**Figura 9** - Distribuição espacial do RMS médio da umidade relativa em 925 sobre a América do sul das previsões de 36 horas do MCGA: (a) sem a assimilação de ROGNSS (CNTR), (b) com a assimilação desses dados (GURO) e (c) ganho percentual (em verde) e perda percentual (em vermelho) obtidos com a assimilação de perfis da ROGNSS.

a correlação das anomalias previstas com as anomalias das análises. Foi observado um ganho na extensão das previsões válidas de 24 horas quando os perfis de ROGNSS são considerados. Esse impacto pode ser bem dimensionando com a diminuição do RMS das variáveis consideradas na avaliação no experimento onde dados de ROGNSS foram utilizados com relação ao experimento onde os mesmos não foram incluídos. Esse impacto é muito mais significativo no Hemisfério Sul do que no Hemisfério Norte.

Os resultados evidenciaram que ao assimilar os perfis de ROGNSS deve-se utilizar toda a informação neles contidos, tanto os perfis de geopotencial, como os de umidade. Quando essa informação é desacoplada, o impacto é pouco significativo, e pode em alguns casos gerar resultados piores do que os obtidos em sua ausência.

Sobre a América do Sul o impacto nas previsões do MCGA-CPTEC/INPE é preponderante em especial durante o verão, onde um ganho de 62 horas (dois dias e meio) na extensão das previsões válidas foi observado na altura geopotencial em 500 hPa. Esse ganho configura um resultado muito positivo que deve ser destacado nesse processo, uma vez que representa melhoria das previsões do MCGA-CPTEC/INPE sobre a América do Sul, durante o período mais chuvoso no Brasil onde a densidade demográfica é maior, período e região onde se espera seus melhores resultados. Uma melhoria do desempenho do MCGA-CPTEC/INPE sobre a América do Sul com a assimilação da ROGNSS é observado depois de 24 horas de integração, o que pode ser consequência do melhor desempenho do modelo em regiões oceânicas distantes, que depois de algumas horas de integração, impactam positivamente as previsões de mais longo prazo nessa região. A diminuição dos erros na umidade relativa ao nível de 925hPa se concentra sobre regiões oceânicas próximas à América do Sul e sobre a região central da Amazônia.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Dérek Schubert pelo importante apoio no desenvolvimento dos experimentos com o MCGA, à FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo), processo FAPESP nº 2010/15974-2 (Projeto ROGNSS) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) processos CNPq nº 481379/2010-0 (Projeto universal 2010: SCAMTEC) e nº 302810/2012-9 (bolsa PCI) pelo apoio financeiro a essa pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBER, C.; WARE, R. H.; ROCKEN, C.; BRAUN, J. J. Obtaining single path delays from GPS double differences. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 7, p. 2661-2664, 2000.
- ARAVÉQUIA, J. A. **Funções de influência com dependência temporal: aplicações na interpretação da deriva de prognósticos de tempo e da gênese de anomalias climáticas.** Tese de doutorado em Meteorologia. Universidade de São Paulo, USP, Brasil. 2003.
- BONATTI, J. P. **Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC.** In: *Climanálise Especial. Edição Comemorativa de 10 anos.* Cachoeira Paulista, SP: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, cap. 26, p. 198–202. 1996.. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/bonatti.html> Acesso: em 9 outubro de 2013.
- BUONTEMPO, C.; JUPP A.; RENNIE M. Operational NWP assimilation of GPS radio occultation data. *Atmospheric Science Letters*, v. 9, p. 129-133, 2008.
- CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; PRAKKI, S.; NOBRE, C. A.; TROSNIKOV, I.; CAMARGO JUNIOR, H.; CASTRO, C.; SANCHES, M. B.; SAMPAIO, G. Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. *Journal of Climate*, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.
- COHN, E.; DA SILVA A.; GUO, J.; SIENKIEWICZ, M.; LAMICH, D. Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. *Monthly Weather Review*, v. 126, p. 2913–2926, 1998
- CUCURULL, L.; DERBER, C. J.; PURSER, R. J. Assimilation of global positioning system radio occultation observations into NCEP's global data assimilation system. *Monthly Weather Review*, v. 135, p. 3174-3193, 2007.
- CUCURULL, L. **Global Positioning System (GPS) Radio Occultation (RO) Data Assimilation.** In: *Summer Colloquium on Data Assimilation, 2009*, Stevenson, Washington. Proceedings... Stevenson, WA: JCSDA.
- FJELDBO, G.; ESHLEMAN, V. R.; KLIORE, A. J. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments. *Astronomical Journal*, v. 76, p. 123- 140, 1971.
- GLEASON, S.; GEBRE-EGZIABHER, D. GNSS applications and methods. *Artech House*, p.491. ISBN-13: 978-1-59693-329-3, 2009.
- HAJJ, G. A.; KURSINSKI, E. R.; ROMANS, L. J.; BERTIGER, W. I.; LEROY, S. S. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation, *Journal of Atmosphere and Solar-Terrestrial Physics*, v. 64, p. 451-469, 2002.
- HERDIES, D. L.; ARAVÉQUIA, J. A.; FERREIRA, S. H. S.; ANDREOLI, R. V.; SAPUCCI, L. F.; MATTOS, J. G. Z. A assimilação de dados no CPTEC/INPE. *Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 57-64, 2008.

- HOFFMAN, R. N. **A retrieval Strategy for Interactive Ensemble Data Assimilation**, pp. 1–16. arXiv:1009.1561, v. 2, 2011. [physics.ao-ph]. <<http://arxiv.org/abs/1009.1561>>.
- HOLZSCHUH, M. L.; SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Avaliação de perfis atmosféricos de rádio-ocultação GPS do Satélite Champ sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 147-155, 2008.
- JOINER, J.; Da SILVA, A. M. Efficient methods to assimilate remotely sensed data based on information content. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 124: p. 1669–1694. DOI: 10.1002/qj.49712454915, 1998.
- KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 1232-1240, 1974.
- KUO, Y. H.; SOKOLOVSKIY, S.; ANTHES, R. A.; VANDENBERGHE, F. Assimilation of GPS Radio Occultation Data for Numerical Weather Prediction. Special issue of **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science**, v. 11, n. 1, p. 157-186, 2000.
- KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; SCHOFIELD, J. T.; LINFIELD, R. P.; HARDY, K. R. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 23429-23465, 1997.
- KURSINSKI, E. R.; HAJJ, G. A.; LEROY, S. S.; HERMAN, B. The GPS radio occultation technique. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 11, n. 1, p. 53-114, 2000.
- LIU, Y. A.; WANG, C.; YEH, T. Impact of surface meteorological measurements on GPS height determination. **Geophysical Research Letters**, v. 35, p. L23809, 2008.
- MATSUOKA, M. T.; CAMARGO, P. O.; BATISTA, I. S. Análise da ionosfera usando dados de receptores GPS durante um período de alta atividade solar e comparação com dados de digissondas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 565-582, 2009.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, p. 851-875, 1982.
- MIGLIORINI, S. On the equivalence between radiance and retrieval assimilation. **Monthly Weather Review**, v. 140, p. 258–265. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR-D-10-05047.1>, 2012.
- POLI, P.; MOLL, P.; PUECH, D.; RABIER, F. HEALY, S. Quality control, error analysis, and impact assessment of FORMOSAT-3/COSMIC in numerical weather prediction. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 20, n. 1, p. 101-113, 2009.
- RODGERS, C. D. **Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice**, Ed. World Scientific. Singapore. 2000.
- SAPUCCI, L.F.; DE MATTOS, J. G. Z.; DE GONÇALVES, L. G. G.; BASTARZ, C. F.; SANTOS, A. F. **Investigação de métricas estatísticas e implementação no Sistema Comunitário de Avaliação de Modelos Numéricos de Previsão de Tempo e Clima – SCAMTEC**. Projeto de pesquisa Universal CNPQ. Divisão de Desenvolvimento e Modelagem CPTEC-INPE. 2011.
- SHUANGGEN, J.; FENG, G. P.; GLEASON, S. Remote sensing using GNSS signals: current status and future directions. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 10, p. 1645-1653, 2011.
- SOUZA, D. S. V.; SAPUCCI, L. F.; CERQUEIRA, F. S. **Operacionalização da assimilação de dados GNSS no PSAS: Parte I**. São José dos Campos: INPE, v. 1, 78 p. (sid. inpe.br/mtc-m19/2011/03.30.12.48-NTC). 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39E2M5L>>. Acesso em: 09 outubro 2013.
- SYNDERGAARD, S. On the ionosphere calibration in GPS radio occultation measurements, **Radio Science Journal**., v. 35, p. 865–88, 2000.
- TIEDTKE, M. **The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model**. In: ECMWF Workshop on Convection in Large-Scale Models, 1983, Reading, England. Proceedings. Reading, England: ECMWF.
- WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; PHILPOT, W. D. Small-scale climate maps: A sensitivity analysis of some common assumptions associated with grid-point interpolation and contouring. **The American Cartographer**, v. 12, p. 5-16, 1985.
- XUE, Y.; SELLERS, P. J.; KINTER III, J. L.; SHUKLA, J. A. Simplified Biosphere Model for Global Climate Studies **Journal of Climate**, v. 4, p. 345-364. 1991.