

APLICAÇÕES DOS VALORES DO IWV PROVENIENTES DAS REDES DE RECEPTORES GPS PARA SUPORTE A PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO NO BRASIL.

Sapucci¹, L.F.; L. A. T. Machado¹; J. F. G. Monico²; D.L. Herdies¹; J.A. Aravéquia¹; R.V. Andreoli¹; R. A. F. Souza¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (CPTEC)
Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista - SP, Brasil.

²Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)
Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, SP, Brasil

lsapucci@cptec.inpe.br

1. Introdução

Na Previsão Numérica de Tempo (PNT), baseando-se nas leis de evolução do estado da atmosfera e no estado inicial num instante $t-1$, obtém-se o estado dessa atmosfera em um instante t . O sucesso na previsão está, portanto, relacionado à capacidade de modelar, com maior eficiência, a atmosfera terrestre e descrever com precisão seu estado inicial. A obtenção do estado inicial é desempenhada pelo sistema de assimilação, cuja eficiência está altamente relacionada com a abundância de observações meteorológicas coletadas na região de interesse. Uma das observações importantes para esse processo é o vapor d'água integrado na atmosfera (IWV-Integrated Water Vapor), pois a distribuição da umidade na atmosfera está associada com a concentração de nuvens e ocorrência dos principais fenômenos atmosféricos, tais como: precipitação, tempestade severa, geada, nevoeiro, nevasca, etc.

Entre as diversas formas de quantificar o IWV, a técnica que emprega as observações efetuadas pelas redes de receptores GPS (*Global Satellite System*) (Bevis et al., 1992) destaca-se por fornecer continuamente valores com alta resolução temporal (taxa de amostragem de 5 minutos) com custos relativamente baixos. Essa técnica fornece uma fonte adicional de medidas da umidade atmosférica que, devido à importância do papel que o vapor d'água desempenha na atmosfera, deve ser explorada pelas ciências atmosféricas para fins de pesquisas e atividades operacionais. Apesar da grande eficácia dos satélites sondadores de

umidade, a disponibilidade de observações independentes, como os valores do IWV a partir das observáveis GPS (tratado daqui para frente de IWV-GPS), tem também significativa contribuição à Previsão de Tempo em dois aspectos. O primeiro se refere ao fato de que se dispendo de várias fontes alternativas de observações, minimiza-se os prejuízos causados pela eventual descontinuidade dos dados provenientes dos principais sistemas utilizados. O segundo é que ao explorar a alta resolução temporal dos valores IWV-GPS e integrá-los aos resultados de outras técnicas, podem-se obter produtos de maior confiabilidade e até mesmo de melhor qualidade. A continuidade, confiabilidade e a qualidade das observações são fatores igualmente relevantes para a assimilação de dados e, conseqüentemente, para melhoria da previsão de tempo.

Visando evidenciar os benefícios em potencial que podem ser obtidos com a utilização dos valores do IWV provenientes das redes de receptores GPS na previsão de tempo, no presente trabalho são apresentados resultados relacionados aos dois aspectos mencionados acima. Com relação ao primeiro aspecto são apresentados os resultados obtidos com os primeiros testes de assimilação dos valores do IWV-GPS no modelo de PNT do Centro de Previsão Numérica de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE). No que se refere ao segundo, são apresentados resultados preliminares de possíveis aplicações dos valores IWV-GPS no território brasileiro, explorando sua alta resolução temporal ao integrá-los com outros sensores. Na próxima seção são apresentados os experimentos de assimilação dos valores IWV-GPS realizados e os resultados obtidos, enquanto que na seção 3 são apresentadas as possíveis aplicações desses valores ao integrá-los com observações obtidas com o uso de outros sensores de umidade. Na seção 3 são apresentadas também a situação atual e a futura das redes de receptores GPS no Brasil, para evidenciar o potencial da integração dessas redes com outras técnicas para a PNT. Na seção 4 são apresentadas algumas considerações finais.

2. Resultados Preliminares Obtidos com a Assimilação do IWV-GPS no CPTEC/INPE

Os valores do IWV utilizados nesses experimentos são provenientes da campanha RACCI (*Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season*) (IAG-USP, 2007) realizada em 2002. Receptores GPS de alta precisão foram instalados nos sítios localizados nos municípios de Ouro Preto do Oeste, Guajará Mirim e Porto Velho, todos em Rondônia, denominados aqui por ABRA, GJMI e PTVE,

respectivamente. A metodologia utilizada para a obtenção dos valores do IWV a partir das observações GPS é apresentada detalhadamente em Monico et al., 2001.

Para investigar os benefícios obtidos com a inclusão do IWV-GPS na PNT do CPTEC/INPE foram realizados dois experimentos cíclicos de assimilação de dados, para o mesmo período, sendo que no primeiro experimento os valores do IWV-GPS nas estações do RACCI foram assimilados e no segundo não (rodada de controle). O sistema de assimilação utilizado nesses experimentos foi a versão 2003 do PSAS (*Physical-space Statistic Analysis System*) (da Silva e Guo, 1996; Cohn et al., 1998) e o modelo de circulação geral atmosférico utilizado foi o CPTEC-COLA T126L28 (Kinter et al., 1997), com resolução horizontal aproximada de 100km próximo ao equador. O período em que tais experimentos foram realizados se referem aos dias entre 25 (às 0:00 UTC) e 30 (às 18:00 UTC) de setembro de 2002. Em ambas as rodadas além dos dados do IWV-GPS foram também assimilados valores de diversas variáveis de diferentes fontes, tais como: altura geopotencial proveniente dos satélites NOAA; componentes zonal e meridional do vento sobre os oceanos (QuickScat); e água precipitável do SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*); valores de altura geopotencial, temperatura, pressão, umidade específica, vento zonal e meridional obtidas a partir de medidas diretas realizadas por diversos tipos de sensores e disponíveis no GTS (*Global Telecommunication System*). A figura 1 apresenta uma comparação dos valores do IWV das análises provenientes das rodadas com e sem a assimilação do IWV-GPS com os valores observados nas três estações do RACCI. Nessa comparação os valores do IWV-GPS observados são considerados como a “verdade”.

Nos valores apresentados na figura 1, observa-se que pontualmente a rodada com a assimilação dos valores do IWV-GPS gerou na maioria dos casos considerados uma condição inicial mais próxima dos valores observados do que na rodada de controle. Nas três estações observa-se que no período inicial, em que as discrepâncias entre os valores da rodada de controle e as observações foram pequenas, a contribuição dos valores assimilados foi modesta. Porém, no período onde essas discrepâncias eram elevadas e havia a tendência do controle em subestimar a umidade, a contribuição dos valores assimilados foi muito significativa. As discrepâncias entre os valores observados e os gerados no experimento com a assimilação do IWV-GPS foram reduzidas drasticamente com relação às discrepâncias geradas na rodada de controle, principalmente durante o dia 27.

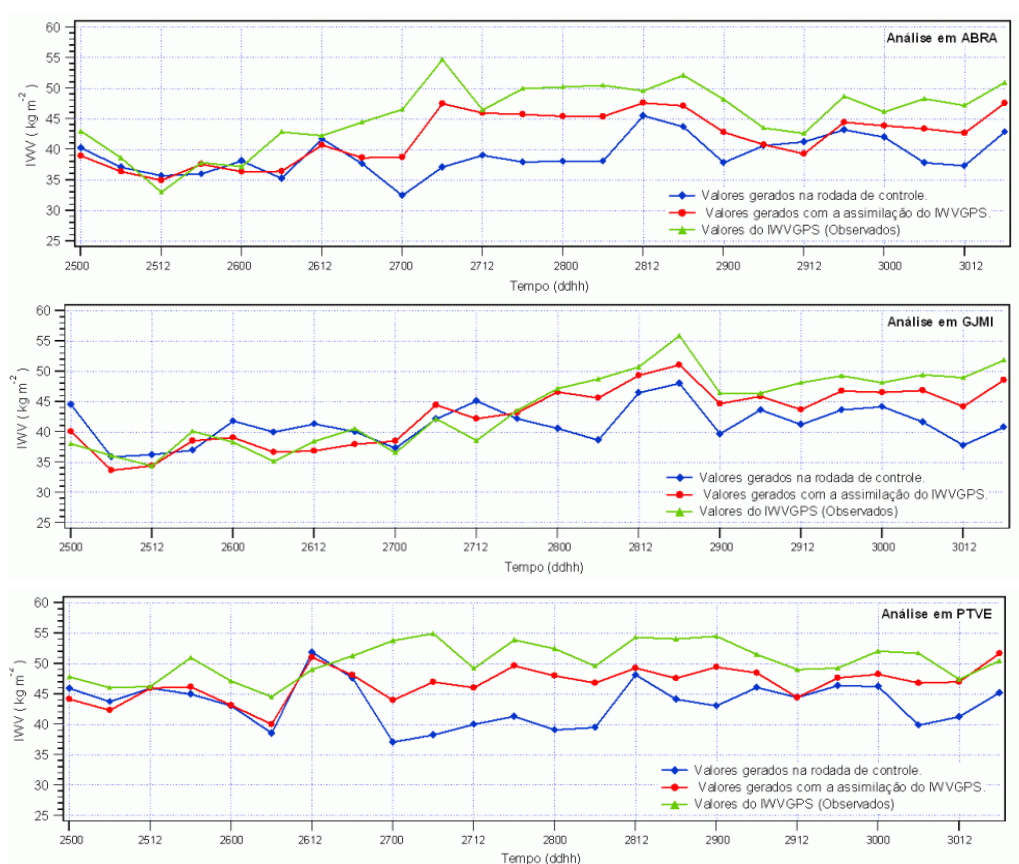


Figura 1 – Valores do IWV gerados nas rodadas de controle e na rodada com assimilação IWV-GPS nas 3 estações do RACCI comparados com a série temporal do IWV observado.

3. Potencialidade para a PNT da integração das estimativas do IWV provenientes das redes GPS com valores de outras técnicas de quantificação da umidade

A densidade das observações disponíveis para a assimilação de dados é um fator relevante para a obtenção de uma condição inicial que represente adequadamente a realidade física. Nesse aspecto, os sensores em bases terrestres tornam-se menos atrativos do que os sensores a bordo de satélites. Isso é devido ao fato de que as outras técnicas que empregam sensores infravermelho fornecem, além de boa resolução espacial, perfis de umidade com boa resolução vertical. Porém, apesar de ser uma medida pontual, nenhuma outra técnica é capaz de conciliar alta resolução temporal e o baixo custo, como os receptores GPS em bases terrestres. A alta resolução temporal aliada a outras técnicas, como radiossondas e satélites sondadores de umidade, faz das redes de receptores GPS uma fonte adicional de informação da umidade em potencial para a PNT.

3.1. Integração com Radiossondagens Operacionais

Medidas diretas do perfil vertical atmosférico com a melhor resolução são obtidas com a aplicação das radiossondas. No entanto, devido o seu alto custo, geralmente essas são lançadas apenas nos horários sinóticos, e em muitos locais apenas nos horários das 00 e 12 horas UTC. Como as oscilações diárias da umidade são acentuadas, essa taxa de lançamento, com dois, ou mesmo quatro lançamentos diários, não é capaz de discretizar adequadamente tais oscilações. Para as localidades onde são encontradas estações de lançamento de radiossondas e de receptores GPS, a integração dessas técnicas pode gerar perfis de umidade com alta resolução temporal. Nesse processo, as diferentes concentrações da umidade ao longo dos perfis verticais atmosféricos, gerados pelas radiossondas, podem ser interpoladas no tempo. Os valores da série temporal do IWV-GPS são distribuídos verticalmente seguindo essas concentrações interpoladas para as épocas em que eles se referem. Obtêm-se assim, perfis verticais de umidade com alta resolução temporal. Para os casos em que as variações verticais do vapor d'água atmosférico são insignificativas, os perfis obtidos nesse processo podem ser considerados boas estimativas do perfil de umidade, uma vez que o conteúdo total está ancorado em valores observados. Para ilustrar os resultados que podem ser obtidos com a integração das radiossondas com os receptores GPS, a figura 2 apresenta os perfis de umidade gerados na estação GJMI do RACCI. A resolução temporal apresentada nessa figura é de 30 minutos. O perfil de uma radiossonda adicional que foi lançada às 4:00 UTC também é apresentado nessa figura para comparar com os resultados obtidos. Na PNT tais perfis podem ser utilizados para avaliar o desempenho de modelos em prever a estrutura vertical da umidade em horários não sinóticos, bem como na assimilação de dados em processos não operacionais para pesquisa ou desenvolvimento. Em processos de reanálises, por exemplo, esses perfis podem ser utilizados para minimizar o impacto gerado pela ausência das radiossondas operacionais nos horários sinóticos em que não houveram lançamentos.

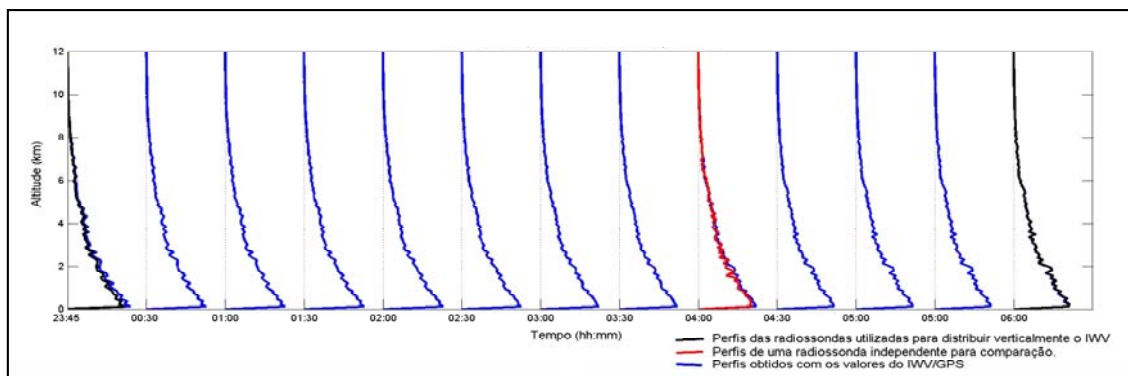


Figura 2 - Perfis de umidade com alta resolução temporal obtidos a partir dos valores IWV-GPS e os perfis de umidade das radiossondas lançadas no dia 18/10/2002 em Guajará Mirim (RACCI).

3.2. Integrao com Satélites Sondadores de Umidade

Em termos de densidade de medidas de umidade sabe-se que as técnicas que empregam sensores a bordo de satélites são as que apresentam o maior potencial em minimizar a deficiência dessas medidas na extensa área do território brasileiro, pois eles fornecem boa cobertura espacial. Grandes investimentos no desenvolvimento de novas técnicas e metodologias empregadas na sondagem remota da atmosfera terrestre têm sido realizados nos últimos anos com o lançamento de satélites carregando sensores bastante sofisticados. Tanto na calibrao inicial como no uso operacional desses sensores  importante o emprego de sensores em bases terrestres para se obter os melhores ajustes iniciais do sensor operando no espaço e para avaliar a sanidade do mesmo durante sua vida útil. Para esse fim freqüentemente são utilizados dados de radiossondas em campanhas específicas para a calibrao dos sensores e as radiossondas operacionais para avaliar a sanidade dos sensores durante sua vida útil. No entanto, no primeiro caso, o custo de tais campanhas  elevado, e no segundo, a utilizao de radiossondas operacionais  pouco eficiente, pois a taxa em que os lançamentos, os quais são realizados nos horários sinóticos, coincidem com as passagens dos satélites  muito baixa. Neste contexto, as estimativas do IWV-GPS provenientes das redes de receptores em terra podem contribuir servindo de pontos de controle para os campos de umidade gerados. A alta resoluo temporal das estimativas IWV-GPS assegura que haverá disponibilidade de medidas para todas as passagens dos satélites em avaliao, e, além disso, podem minimizar o custo com campanhas adicionais. O

ganho principal nessa integração é o aumento da confiabilidade das informações de umidade disponibilizadas pelas passagens dos satélites sobre o território brasileiro.

3.3. Situação Atual e Futura das Redes de Receptores GPS no Brasil

O emprego da infra-estrutura disponível nas redes de receptores para monitoramento contínuo dos sinais GPS, que fora inicialmente implantada para fins geodésicos, na quantificação do IWV é uma prática que já vem sendo explorada em diversos países (BEVIS et al., 1992; DUAN et al., 1996; WARE et al., 1997; ROCKEN et al., 1997, EMARDSON, 1998, TSUDA et al., 1998, REIGBER et al., 2001, entre outros). No Brasil, tem-se disponível a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos satélites GPS) (FORTES, 1997). Essa rede, desde o início da fase operacional e devido à sua característica multifinalitária, tem sido densificada com a inclusão de novas estações ou com a aglutinação de redes locais. Com a inclusão dos receptores da Companhia de Energia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG), essa rede conta hoje com 20 receptores em operação (IBGE, 2007). Cinco receptores do SIVAM (Serviço de Vigilância da Amazônia) em fase de implantação foram integrados à RBMC. Mais recentemente, a Rede INCRA de Base Comunitárias (RIBAC) está sendo modernizada, com a inclusão de mais de 80 receptores que representam o estado da arte em estações de referência. No final desse processo, a RBMC contará com mais de 100 receptores.

Além da RBMC, há outras redes que podem ser utilizadas para a PNT. Um exemplo é uma rede em fase de implantação no estado de São Paulo, encabeçada pelo Departamento de Cartografia da UNESP de Presidente Prudente, que envolve diversas instituições. A rede formada pelas estações GPS disponíveis no Estado de São Paulo em conjunto com as da RBMC, formarão uma rede mais densa e, portanto, mais apropriada para a assimilação, com benefícios mais diretos para a região sudeste do Brasil. Há outras redes operacionais que não são consideradas aqui por trabalharem com receptores de simples frequência, os quais não atendem aos requisitos básicos para a estimativa do IWV (Monico et al., 2001).

Para que uma determinada estação GPS seja empregada na PNT, há duas exigências principais quanto à configuração utilizada na coleta, armazenamento e processamento dos dados. A primeira é que as estimativas do IWV devem ser obtidas quase que em tempo real e a segunda é que, para os valores do IWV serem obtidos com alta qualidade, devem ser feitas observações de temperatura e pressão atmosférica, próximo à antena GPS (Monico et al.,

2001). Esses dois aspectos limitam o número de receptores disponíveis para aplicações na PNT, pois atualmente são poucos os receptores que atualmente apresentam tais características. No entanto, como o processamento dos dados em tempo real tem também uma série de outras aplicações, em especial para navegação e levantamento, o número de receptores pertencentes à essas redes com essa configuração tende a aumentar nos próximos anos.

A figura 3 exemplifica um campo obtido com o emprego dos dados de um dos satélites da série NOAA [sensores HIRS (*High Resolution Infrared Spectrometer*) e o MSU (*Microwave Sounding Units*)]. Nessa figura estão representadas as estações GPS disponíveis bem como aquelas que possuem radiossondagens operacionais. Apesar de pouco densa, as estações disponíveis tem uma distribuição relativamente homogênea sobre o território brasileiro, o que propicia a integração dessa técnica, tanto dos satélites sondadores de umidade como das radiossondas.

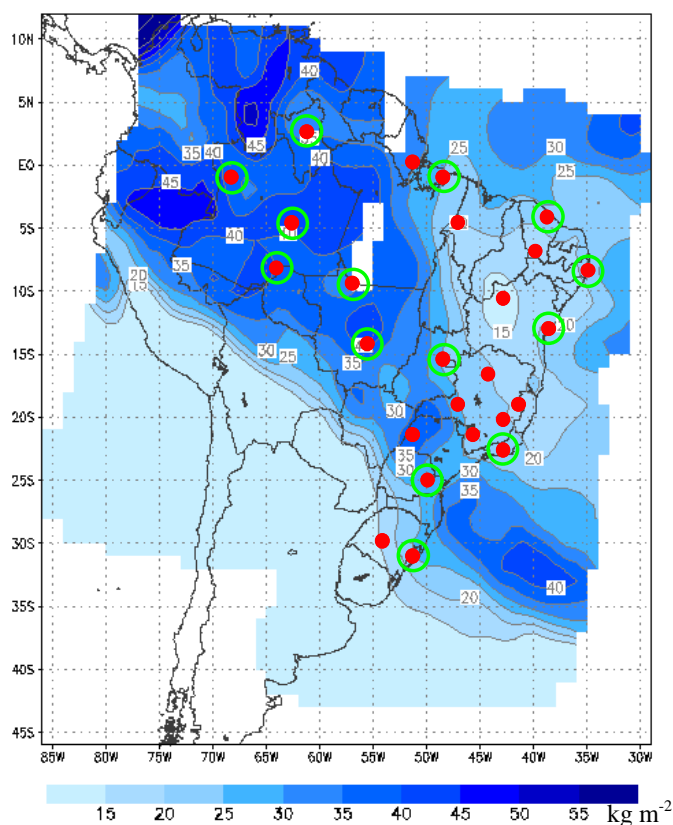


Figura 3 - Campo dos valores do IWB sobre o Brasil obtido a partir da sondagem remota da atmosfera realizada pelos satélites da série NOAA (Fonte: DSA, 2007). Os pontos em vermelho indicam a localização dos receptores GPS disponíveis e os círculos em verde indicam a localização das radiossondas operacionais.

4. Considerações Finais

No presente trabalho são destacadas algumas aplicações dos valores do IWV obtidos a partir das observações GPS para a previsão numérica de tempo. Os primeiros testes com a assimilação desses dados em modelos de PNT foram apresentados bem como algumas possibilidades de integração com outras técnicas de quantificação da umidade atmosférica, como radiossondas e satélites sondadores de umidade.

Os resultados preliminares obtidos com a assimilação dos valores do IWV-GPS mostraram que pontualmente a contribuição é positiva fazendo com que as condições iniciais geradas sejam mais próximas dos valores observados. Na integração com as radiossondas foi destacada a possibilidade de se obter perfis de umidade com alta resolução temporal. No caso dos sensores a bordo de satélites meteorológicos, a maior vantagem em relação à utilização de informações de radiossondagens é a certeza de ter valores disponíveis em todas as passagens, permitindo aferições e por consequência valores mais confiáveis. Na assimilação de dados, além da boa resolução espacial, a confiabilidade das observações também é um fator relevante, pois nos sistemas de assimilação diferentes pesos, os quais devem ser proporcionais a sua confiabilidade, podem ser atribuídos as observações de forma a se obter um melhor ajuste. Um tratamento adequado das observações, ponderado pela confiabilidade, contribui significativamente para a obtenção de uma condições inicial de melhor qualidade.

Em um estudo da situação atual e das perspectivas futuras de densificação das redes de receptores GPS dentro do território brasileiro observa-se que tais redes, integradas à outras técnicas de quantificação do IWV, apresentam-se como uma fonte alternativa de medidas de umidade atmosférica que pode contribuir com a PNT. Cabe ainda salientar que coleta adicional utilizando sensores de temperatura, pressão e umidade na altura das antenas GPS é recomendada para se obter a melhor qualidade nas estimativas do IWV.

Agradecimentos

Os autores agradecem: À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (processo N° 01/12761-9) pelo suporte financeiro durante o período em que os experimentos foram feitos.

Referências Bibliográficas

- BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T. A.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H: GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. Journal of Geophysical Research. v. 97, p.15.787-15.801, October, 1992.
- COHN, S. E.; SILVA, A.; GUO J.; SIENKIEWICZ, M.; LAMICH, D.: Assessing the effects of data selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. Mon. Wea. Rev., v.126, p.2913-2926, 1998.
- DSA-DIVISÃO DE SATÉLITES E SISTEMAS AMBIENTAIS. Sondagem atmosférica utilizando Satélites artificiais. Cachoeira Paulista, 2007. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/sondagens/>. Acessado em: 30 jul. de 2007.
- DA SILVA, A.; GUO, D J.: 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>], 1996.
- DUAN, J.; BEVIS, M.; FANG, P.; BOCK, Y.; CHISWELL, S.; BUSINGER, S.; ROCKEN, C.; SOLHEIM, F.; HOVE, T.; WARE, R.; MCCLUSK, S.; HERRING, T. A.; KING, R. W. GPS meteorology: Direct Estimation of the absolute Value of Precipitable Water. Journal of Applied Meteorology, v. 35, p.830-838, 1996.
- EMARDSON, T. R. Studies of atmospheric water vapor using the Global Positioning System. School of Electrical and Computer Engineering Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden. Technical Report n. 339, 1998.
- FORTES, L.P.S. Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC). 1997. 152 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Computação), Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.
- IAG-USP. [Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas](#) da Universidade de São Paulo. RACCI - Radiation, Cloud, and Climate Interactions in the Amazon during the DRY-TO-WET Transition Season. São Paulo: 2007. Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br/lba/index.php>>. Acessado em: 30 de jul. de 2007.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Rede Brasileira de Monitoramento contínuo. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/>>. Acessado em 24 de jul. de 2007.
- KINTER, J. L. et al. The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model. Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report v.1, n. 51. Calverton, USA, 1997.
- MONICO, J F G ; SAPUCCI, L. F.; TOMMASELLI, J. T. G. O GPS no Suporte à Meteorologia: Perspectivas de Aplicações no Brasil. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, São José dos Campos, v. 25, n. 3, p. 7-15, 2001
- REIGBER, C.; GENDT G.; DICK, G.; TOMASSINI M. Near real- time water vapor monitoring in a German GPS network and assimilation into weather forecast model. In: IONGPS INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING of Institute of Navigation, n 14 2001, Salk Lake City- Utah, 2001.
- ROCKEN, C.; VAN HOVE, T.; WARE, R. H. Near Real-Time GPS Sensing of Atmospheric Water Vapor. Geophys. Res. Lett., v.24, p.3221-3224, 1997.
- TSUDA, T.; HEKI, K.; MIYAZAKI, S.; AONASHI, K.; HIRAHARA, K; NAKAMURA, H.; TOBITA, M.; KIMATA, F.; TABELI, T.; MATSUSHIMA, T.; KIMURA, F.; SATOMURA, M.; KATO, T.; NAITO, I. GPS meteorology project of Japan - exploring frontiers of geodesy. Research News Earth Planets Space, 50(10). 1998.
- WARE, R.; ALBER, C.; ROCKEN, C.; SOLHEIM, F. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths. Geophys. Res. Lett., v.24, p.417-420, 1997.