

## Validação dos totais de água precipitável gerados a partir de perfis termodinâmicos recuperados pelo satélite GOES-10 sobre a região tropical da América do Sul

Weber Andrade Gonçalves<sup>1</sup>  
Simone Sievert da Costa<sup>1</sup>  
Jurandir Ventura Rodrigues<sup>1</sup>  
Rodrigo Augusto Ferreira de Souza<sup>2</sup>  
Carlos Frederico de Angelis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 01 – 12630000 - Cachoeira Paulista - SP, Brasil  
{weber.goncalves, simone.sievert, jurandir.rodrigues, carlos.angelis}@cptec.inpe.br

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Amazonas - UEA  
Manaus - AM, Brasil  
souzaraf@gmail.com

**Abstract.** This paper presents the first validation of total precipitable water obtained from thermodynamic profiles generated by the GOES-10 satellite retrieval algorithm for South America. The validation is performed using the original covariance matrix, made by CIMSS, and with a new covariance matrix adapted to the weather conditions of South America tropical region. The dataset used was a total of 1095 radiosonde observations located in the South America tropical region at 00 and 12 UTC, as well as thermodynamic profiles from 12h forecasts of the Global Weather Forecast Model T213L42, used as firstguess, and upwelling radiances of 18 infrared channels from the GOES-10 satellite for the period from July to November 2007. The results obtained with the new covariance matrix were better than with the old one. RMSE (Root Mean Square Error) and Bias reduced reasonably from 5.7 and 1.2 to 4.1 and -0.3 mm respectively. On the other hand correlation coefficient between the precipitable water values from the GOES-10 and radiosonde increased considerable from 0.75 to 0.88. This study shows that the GOES-10 soundings are able to provide support for many meteorological fields, mainly supplying the lack of data from upper air observations in good time and space scales.

**Palavras-chave:** retrieval, validation, precipitable water, recuperação, validação, água precipitável.

### 1. Introdução

Os satélites meteorológicos oferecem uma oportunidade única de obtenção de perfis termodinâmicos em regiões do globo que não apresentam uma densa rede de estações meteorológicas de ar superior, como no Hemisfério Sul por exemplo. Além disso, permitem que os perfis sejam obtidos em intervalos de tempo muito menores do que quando obtidos por radiossondagens convencionais.

Atualmente, a DSA/CPTEC/INPE (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) oferece para a comunidade produtos relacionados a sondagens atmosféricas obtidos a partir de diversos satélites meteorológicos, como os das séries TIROS/NOAA (*Television Infrared Observation Satellite/National Oceanic and Atmospheric Administration*), TERRA e AQUA, além do GOES-10 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*).

O satélite GOES-10 destaca-se dos demais por ser um satélite de órbita geoestacionária, oferecendo a possibilidade de cobertura da América do Sul de maneira contínua. O instrumento sondador do GOES-10 é composto por 19 canais, dos quais 18 operam na faixa do infravermelho e 1 na faixa do visível, com uma resolução de 8.7 km no nadir (Kidder e Haar (1995); NASA (1996)). Dos canais no infravermelho 7 estão na faixa de ondas longas, 5

em ondas médias e 6 em ondas curtas, proporcionando a recuperação de diversos parâmetros meteorológicos em vários níveis atmosféricos.

A obtenção dos perfis termodinâmicos gerados por satélites meteorológicos é realizada de maneira indireta a partir da inversão da ETR (Equação de Transferência Radiativa). O processo de inversão da ETR é dito um problema mal-posto, e o primeiro algoritmo construído para sua resolução foi apresentado por King (1956), mesmo não existindo satélites meteorológicos naquele período. Com o passar dos anos outros autores obtiveram algoritmos para a realização desse processo, como Kaplan (1959), Wark (1961), Smith (1967), Chahine (1970), entre outros.

O algoritmo de inversão do GOES-10 é um algoritmo físico baseado no método clássico Gauss-Newton. Esse algoritmo foi desenvolvido pelo CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies*) na Universidade de Wisconsin nos Estados Unidos. Contudo, alguns de seus parâmetros devem ser mudados para a adaptação à América do Sul, como a matriz de covariância, que é essencial para um bom desempenho do algoritmo. O modelo de inversão do GOES-10 necessita de um *firstguess* (do inglês primeira adivinhação), que são perfis de temperatura e razão de mistura gerados a partir de previsões de um modelo numérico de tempo. Esse *firstguess* servirá como uma espécie de ancoragem para os perfis termodinâmicos gerados pelo algoritmo. A matriz de covariância tem como objetivo corrigir os erros do *firstguess* em relação às radiossondagens convencionais. Contudo, a versão original do algoritmo, desenvolvido nos Estados Unidos, apresenta a matriz de covariância adaptada para as condições meteorológicas daquele país, haja visto que para sua confecção foram utilizadas radiossondagens sobre a América do Norte assim como *firstguess* do modelo GFS (*Global Forecast System*). Operacionalmente na DSA o *firstguess* é obtido a partir de previsões do Modelo Global T213L42 do CPTEC, fazendo-se necessária a construção de uma nova matriz de covariância assumindo dados de radiossondas sobre a América do Sul.

Neste sentido, o foco científico dessa pesquisa é o de apresentar uma validação preliminar dos totais de água precipitável obtidos a partir dos perfis termodinâmicos gerados pelo algoritmo de inversão do satélite GOES-10 sobre a América do Sul, dando destaque as melhorias alcançadas com a utilização da nova matriz de covariância adaptada às condições meteorológicas da América do Sul e também ao modelo gerador do *firstguess*.

## 2. Dados Utilizados

Para a realização da presente pesquisa foi utilizado um total de 1095 radiossondagens realizadas na região tropical da América do Sul, nos horários das 00:00 e 12:00 UTC dos meses de julho à novembro de 2007, disponibilizadas a partir de um banco de dados presente na DSA/CPTEC/INPE. Do total de radiossondas, 1016 referentes aos meses de julho e agosto, serviram como base para a construção da matriz de covariância e 79, concentradas entre setembro e outubro, para as validações.

Utilizou-se previsões de 12 horas do modelo de previsão de tempo Global T213L42 do CPTEC, modelo esse que tem uma resolução espacial de  $0.5 \times 0.5^\circ$  e 26 níveis verticais. Para a determinação da matriz de covariância foram utilizados perfis de temperatura e razão de mistura para os meses de julho e agosto de 2007. Como *firstguess*, foram usados os campos de temperatura superficial do solo (do inglês *tskin*) e perfis de temperatura e razão de mistura para os meses de setembro, outubro e novembro de 2007.

Por fim, foram utilizados os 18 canais na faixa do infravermelho do instrumento sondador do satélite GOES-10 para os horários das 00:30 e 12:30 UTC para o período de setembro, outubro e novembro de 2007.

É importante ressaltar que a escolha dos horários e da região de estudo deve-se essencialmente a disponibilidade simultânea de dados de radiossondagens e satélite. As

radiossondas são rotineiramente lançadas nos horários das 00:00 e 12:00 UTC, enquanto que o GOES-10 realiza sondagens sobre a América do Sul dividida em 4 setores distintos, e leva cerca de uma hora em cada um, coincidindo com o setor tropical as 00:30 e 12:30 UTC.

### 3. Metodologia de Trabalho

A metodologia do presente trabalho será apresentada em duas partes distintas. A primeira é dedicada à obtenção da matriz de covariância adaptada as condições meteorológicas da América do Sul. A segunda etapa refere-se aos métodos realizados para a validação dos totais de água precipitável gerados a partir dos perfis termodinâmicos obtidos pelo satélite GOES-10.

#### 3.1 Matriz de Covariância

Um dos primeiros passos do algoritmo de inversão do GOES-10 é uma interpolação dos níveis de pressão do *firstguess* de 26 para 101. Sabendo disso, os perfis de temperatura e razão de mistura das radiossondagens e das previsões do Modelo Global foram interpolados linearmente para os 101 níveis de pressão, variando desde 1100 a 0.004 hPa. Os perfis de razão de mistura foram modificados para perfis do logaritmo natural da razão de mistura, pois segundo Jun (1994) a determinação das funções peso relacionadas à umidade são melhor representadas quando se utiliza valores do logaritmo natural da razão de mistura do que o próprio valor da razão de mistura.

Após a interpolação foram feitos cálculos das diferenças entre os perfis de temperatura obtidos pelas previsões do Modelo Global e pelas radiossondagens para cada nível, assim como também foi realizado para os perfis do logaritmo natural da razão de mistura. Com o término desse passo pôde-se então ser determinada uma matriz erro, onde as linhas representam os pontos coincidentes de radiossondagens e do Modelo Global e as colunas as diferenças em cada nível, tendo essa matriz uma configuração de 2032 linhas por 101 colunas. As primeiras 1016 linhas representam as diferenças de temperatura e as outras 1016 as diferenças do logaritmo natural de razão de mistura.

Com base na matriz erro, foram calculadas as covariâncias dos erros de temperatura e dos erros do logaritmo da razão de mistura entre os 101 níveis de pressão. Após esse passo foram obtidas duas matrizes de covariância, uma para a temperatura e outra para o logaritmo da razão de mistura, onde cada uma se apresentou com 101 linhas e 101 colunas. Essas duas matrizes foram dispostas uma abaixo da outra e formaram a matriz de covariância adaptada para a América do Sul.

#### 3.2 Validação

Assim como em diversos trabalhos encontrados na literatura, as validações realizadas na presente pesquisa foram feitas através de comparações entre os valores de água precipitável determinados a partir dos perfis termodinâmicos obtidos remotamente por satélites meteorológicos, nesse caso o GOES-10, e radiossondagens convencionais. Contudo, antes de serem realizados os cálculos estatísticos se fez necessária uma interpolação dos níveis de pressão das 79 radiossondas utilizadas para validação para 40 níveis verticais. Essa interpolação se fez necessária, pois embora o algoritmo do GOES-10 trabalhe com 101 níveis na vertical suas saídas são interpoladas novamente, apresentando apenas 40 níveis. É importante ressaltar que o número reduzido de radiossondas utilizadas para a validação é devido ao fato de que três fontes de dados deveriam coincidir, o *firstguess*, os dados dos canais do GOES-10 e as próprias radiossondas. Além disso, algumas radiossondagens

apresentaram falhas nos níveis próximos à superfície ou na média troposfera e foram descartadas pelo fato do cálculo do total de água precipitável ser um valor integrado em quase toda a troposfera.

A estimativa do total de água precipitável tanto pelos dados provenientes do GOES-10 como pelas radiossondas foi determinado pela Equação 1, abaixo:

$$w = (10^4 / g) \int_{pt}^{ps} r dp \quad (1)$$

Em que,

$w$  é o total de água precipitável em mm;

$g$  é a aceleração da gravidade em  $\text{cm/s}^2$ ;

$r$  é a razão de mistura em  $\text{kg/kg}$ ;

$p$  é a pressão em  $\text{g/cm}^2$ ;

$ps$  e  $pt$  são pressão à superfície e pressão à 300 hPa, respectivamente.

Para a validação das estimativas de água precipitável foram utilizados índices estatísticos padrões, como: Viés, Correlação, REMQ (Raiz do Erro Médio Quadrático). Por fim, foi realizado o cálculo do ACI (Aprimoramento sobre a condição inicial), que segundo Fuelberg e Olson (1991) representa quanto o valor de uma dada variável determinada pelo satélite se aproxima/distancia da realidade (radiossonda) com relação ao *firstguess*. A determinação do ACI foi realizada segundo a Equação 2 abaixo:

$$ACI = |FG - RD| - |SAT - RD| \quad (2)$$

Em que,

$ACI$  é o Aprimoramento sobre a Condição Inicial em mm;

$FG$  é o valor de  $w$  proveniente do *firstguess* em mm;

$RD$  é o valor de  $w$  obtido pelas radiossondagens;

$SAT$  é o valor de  $w$  gerado a partir dos dados do GOES-10.

Segundo a Equação (2), observa-se que valores positivos de ACI indicam que os valores recuperados pelo satélite estão mais próximos da realidade do que o *firstguess*, e os valores negativos indicam o contrário.

É importante ressaltar que as validações foram realizadas para as rodadas do GOES-10 com a matriz de covariância original, determinada no CIMSS, e com a matriz de covariância adaptada para condições meteorológicas da América do Sul. Esta última matriz é referida neste estudo como matriz de covariância corrigida. Adicionalmente, é importante destacar que a distância entre a localização do lançamento das radiossondagens e os pixels do GOES-10 utilizados na validação foi determinada pela mínima distância euclidiana com um parâmetro máximo de corte de  $0.5^\circ$ .

#### 4. Resultados e Discussão

Na literatura podem ser encontrados diversos trabalhos onde são comparados valores de água precipitável derivados de perfis obtidos remotamente com valores provenientes de perfis medidos por radiossondas. Alguns autores preferem esse tipo de validação pelo fato de que os satélites realizam medições volumétricas, enquanto que nas radiossondas são pontuais.

Portanto, validações de parâmetros integrados em camadas atmosféricas, como água precipitável, podem apresentar resultados estatisticamente mais consistentes do que quando são comparados valores de temperatura e/ou umidade em determinados níveis de pressão (Fuelberg e Olson, 1991).

As Figuras 1 e 2 apresentam os índices estatísticos associados a comparação de água precipitável entre os dados observacionais via radiossondagem e aqueles inferidos via satélite utilizando a matriz de covariância original. Apesar dessa matriz covariância não considerar os erros associados ao *firstguess* em relação às condições meteorológicas da América do Sul, a correlação entre os valores de água precipitável obtidos por radiossondagens e os valores estimados via GOES-10 foi maior que 81% com uma inclinação da reta ajustada de 0,75 (Fig. 1a). Embora tenha sido considerada alta, a correlação foi inferior à encontrada por outros autores na literatura, como Rao e Fuelberg (1998) que realizaram validações com o satélite GOES-8 e encontraram valores acima de 90%. Os valores da REMQ e Viés foram superiores aos encontrados por outros autores. Schmit et al. (2002) obtiveram valores de Viés entre 0 e -1mm e de REMQ da ordem de 2 mm, em validações para o satélite GOES-10 sobre os Estados Unidos.

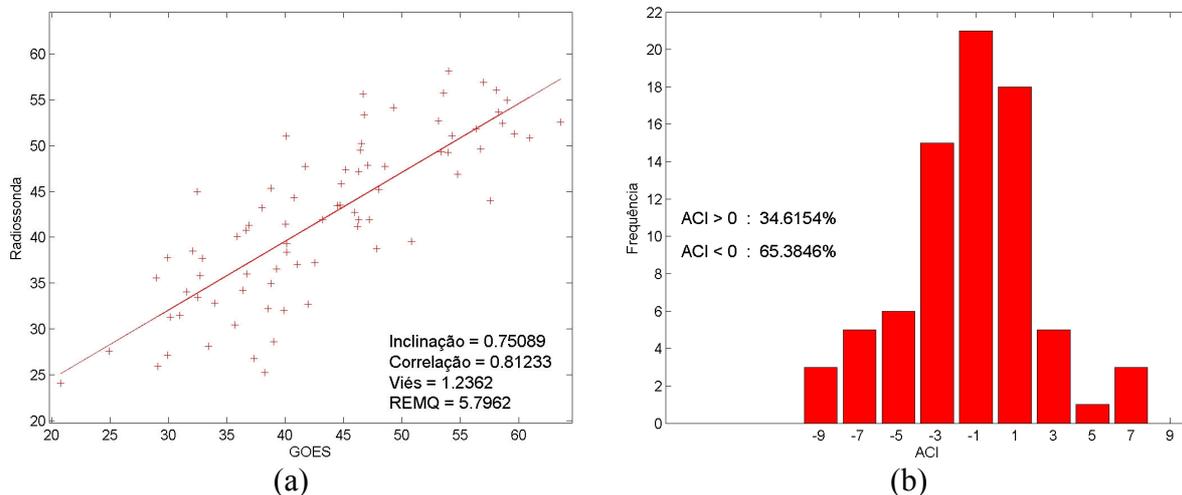


Figura 1. (a) Diagrama de dispersão entre valores de água precipitável (em mm) obtidos por radiossondagens e pelo GOES-10; (b) Histograma do ACI, frequência de ocorrência versus os pontos centrais das classes (em mm). Validação com o uso da matriz de covariância original.

Baseado em Fuelberg e Olson (1991) foi construído um gráfico de barras da frequência dos ACI calculados (Figura 1b). Pode-se observar que em apenas 34% dos casos o satélite GOES-10 conseguiu melhorar os valores de água precipitável em relação aos valores obtidos a partir do *firstguess*, ocorrendo uma piora em 65% dos casos. Esse resultado vem a elucidar que embora os valores de correlação e inclinação tenham se apresentado altos, o Viés e a REMQ elevados podem ter influenciado diretamente para grande diferença entre os ACI's negativos e os positivos, predominando valores negativos.

Na Figura 2 são apresentados os valores de ACI em relação ao módulo da diferença entre o *firstguess* e as radiossondagens. A inclinação positiva da reta de ajuste indica que quanto maior for a diferença  $|FG-RD|$  maior será o ACI, ou seja, quanto pior for o *firstguess* o algoritmo do GOES-10 conseguirá reproduzir valores de água precipitável mais próximos das radiossondagens. Contudo, pode-se notar que para pequenas diferenças  $|FG-RD|$  os valores de ACI são negativos, o que já era de se esperar a partir da análise da Figura 1b.

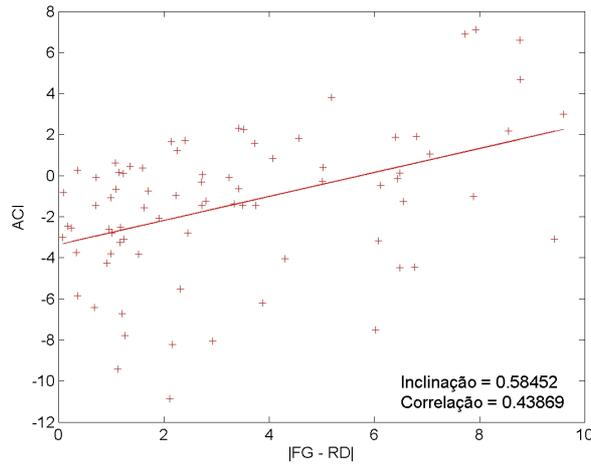


Figura 2. Diagrama de dispersão entre os valores de ACI e o módulo da diferença |FG-RD|, em mm, para rodadas do algoritmo do GOES-10 com a matriz de covariância original.

Com a utilização da matriz de covariância corrigida para a América do Sul, foi observada uma melhoria considerável nas estatísticas calculadas (Figuras 3 e 4). Na Figura 3a pode-se notar que a correlação passou de 81 para 88% e que a inclinação de 0,75 para 0,95. Também foram observadas mudanças significativas no Viés e no REMQ, que passaram a apresentar valores de -0,31 e 4,16, respectivamente. Os valores de Viés, Correlação foram similares aos encontrados na literatura, contudo, os valores do REMQ se apresentaram superiores, indicando que outros ajustes além da matriz de covariância devem ser feitos para a melhoria do algoritmo do GOES-10.

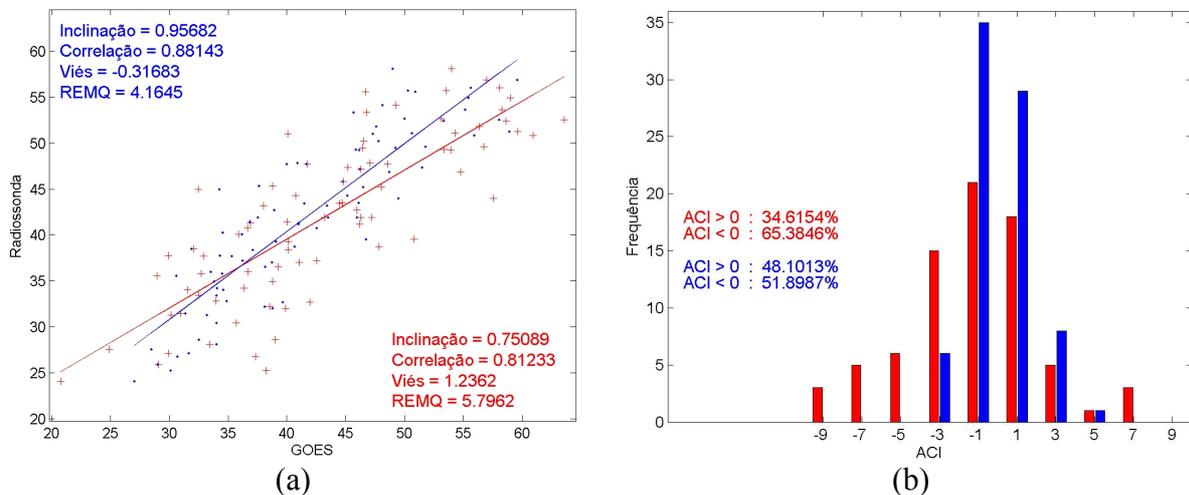


Figura 3. (a) Diagrama de dispersão entre valores de água precipitável, em mm, obtidos por radiossondagens e pelo GOES-10; (b) Histograma do ACI, freqüência de ocorrência versus os pontos centrais das classes, em mm. Comparação entre as rodadas com a matriz de covariância original (em vermelho) e com a matriz de covariância corrigida (em azul).

Nos histogramas de ocorrência de ACI (Figura 3b) pode-se notar um aumento considerável dos valores de ACI positivos, e conseqüentemente a diminuição dos valores negativos, evidenciando uma melhoria dos resultados de água precipitável obtidos a partir dos dados provenientes das sondagens do GOES-10. Embora tenham predominado valores de ACI negativos, pode-se notar que a maior quantidade desses valores concentram-se na classe próxima de zero, enquanto que tem-se ocorrência de ACI's positivos em classes mais distantes de zero. Essa predominância de ACI's negativos mesmo com o uso da matriz de

covariância corrigida pode estar associada ao fato de que o algoritmo do GOES-10 ainda não está utilizando nenhuma técnica para realização do mascaramento de nuvens, e erros nos valores de água precipitável podem estar associados à presença de nuvens principalmente em níveis baixos na troposfera.

Na Figura 4, são apresentados gráficos similares a Figura 2, porém em comparação com os valores obtidos com o uso da matriz de covariância corrigida. Nota-se uma diminuição tanto nos valores da inclinação como de correlação. Contudo, observa-se que o posicionamento da reta de ajuste se mostrou com valores de ACI predominantemente positivos, o que pode ser considerado uma melhoria no algoritmo, concordando com as Figuras 3a e 3b. Nota-se ainda que as retas se cruzam por volta de 7,5 da diferença  $|FG-RD|$ , porém não deve-se tirar nenhum resultado conclusivo pois nessa região do gráfico tem-se uma baixa densidade de pontos, comparando-se com as demais.

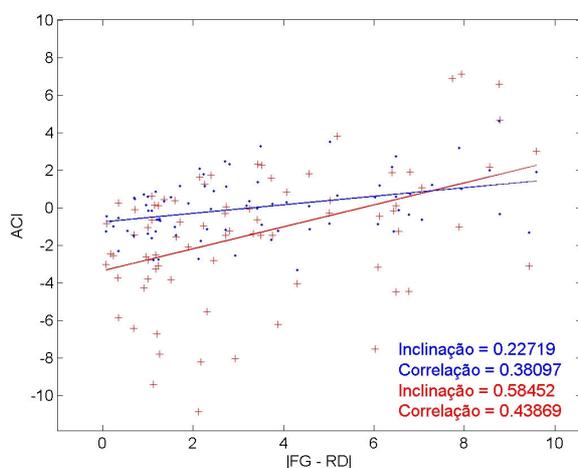


Figura 4. Diagrama de dispersão entre os valores de ACI e o módulo da diferença  $|FG-RD|$  para rodadas do algoritmo do GOES-10 com a matriz de covariância original (em vermelho) e com a matriz de covariância corrigida (em azul).

## 5. Conclusões

Os resultados mostraram a grande capacidade de recuperação de totais de água precipitável a partir de perfis termodinâmicos inferidos pelo satélite GOES-10, que com um grau de qualidade considerável podem ser utilizados por diversos ramos operacionais da meteorologia, como a assimilação de dados e o *nowcasting*, assim também como para pesquisas que necessitam de dados onde não existam lançamentos de radiossondagens.

Os totais de água precipitável obtidos com a utilização da matriz de covariância original apresentaram valores altos de correlação quando comparados com os valores obtidos pelas radiossondas, contudo, o Viés e REMQ foram elevados, concordando com valores predominantemente negativos de ACI.

Com a utilização da matriz de covariância adaptada para a América do Sul, os resultados foram estatisticamente mais consistentes, pois foram observados aumento na correlação entre os valores recuperados pelo GOES-10 e por radiossondagens, assim também como diminuições consideráveis no Viés e REMQ, além de aumento nos valores de ACI positivos.

É importante ressaltar que embora os resultados tenham se apresentado melhores com a utilização da matriz de covariância corrigida, estudos visando à melhoria dos produtos gerados a partir dos perfis termodinâmicos obtidos pelo GOES-10 continuam a ser realizados, sobretudo relacionados ao uso de técnicas de mascaramento de nuvens.

## Agradecimentos

O presente trabalho faz parte dos resultados da dissertação de mestrado em meteorologia desenvolvida no INPE pelo 1º autor. Sendo assim, os agradecimentos são à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES pela concessão da bolsa de estudos, e ao INPE, que através da DSA disponibilizou suporte técnico e científico para o desenvolvimento da pesquisa. Adicionalmente, os autores agradecem a Zhenglong Li da Universidade de Wisconsin pelas discussões sobre o código de inferência de perfis do GOES-10 e a construção da matriz de covariância.

## Referências Bibliográficas

Chahine, M. T. Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters, **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.27, p. 960-967, 1970.

Fuelberg, H. E.; Olson, S. R. An assessment of VAS-derived retrievals and parameters used in thunderstorm forecasting. **Monthly Weather Review**, v. 119, p. 795-814, 1991.

Jun, L. Temperature and water vapor weighting functions from radiative transfer equation with surface emissivity and solar reflectivity. *Advances in Atmospheric Sciences*, v.11, n.4, p. 421-426, 1994.

Kaplan, L. D. Inferences of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements. **Journal of the Optical Society of America**, v. 49, p. 1004, 1959.

Kidder, S. Q.; Vonder, T. H. **Satellite meteorology an introduction**. Academic Press, 1995.

King, J. I. F. The radiative heat transfer of planet Earth. **Van Allen, J. A.. (ed). Scientific uses of earth satellites**. Ann arbor: The University of Michigan Press, p. 133-136, 1956.

NASA. GOES I-M DataBook. 1996. Disponível em:  
<<http://goes.gsfc.nasa.gov/text/goes.databook.html>>. Acesso em: 10 de março de 2008.

Rao, P. A.; Fuelberg, H. E. An evaluation of GOES-8 retrievals. **Journal of Applied Meteorology**, v. 37, p. 1577-1587, 1998.

Schmit, T. J; Feltz, W. F.; Menzel, W.P.; Jung, J.; Noel, A. P; Heil, J. N.; Nelson, J. P.; Wade, G. S. NOTES AND CORRESPONDENCE. Validation and use of GOES sounder moisture information. **Weather and Forecasting**, v. 17, 139-154, 2002.

Smith, W. L. An iterative method for deducing tropospheric temperature and moisture profiles from satellite radiation measurements. **Monthly Weather Review**, v. 95, n. 6, p. 363-369, 1967.

Wark, D. Q. On indirect temperature soundings of the stratosphere from satellites. **Journal of Geophysics Research**, v. 66, n. 1, p. 77-82, 1961.