

Perfis atmosféricos: Estudo comparativo entre radiossondagens convencionais e sondagens do satélite NOAA-16

Elton Rafael Alves¹
Carlos Tavares da Costa Júnior¹
Brígida Ramati Pereira da Rocha^{1,2}
Márcio Nirlando Gomes Lopes²
José Alberto Silva de Sá³

¹ Universidade Federal do Pará - UFPA/PPGEE
Caixa Postal 479 – 66075-110 - Belém - PA, Brasil
eltonrafaelalves@gmail.com
cartav@ufpa.br

² Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM
CEP 66617-420 - Belém - PA, Brasil
{brigida.rocha, marcio.lopes}@sipam.gov.br

³ Universidade do Estado do Pará – UEPA/CCNT
CEP 66050-540 - Belém - PA, Brasil
prof.albertosa@gmail.com

Abstract. The vertical temperature profiles contribute to important analyses on atmospheric behavior of a region. However the number of altitude weather stations (AWS) that perform such measurements, especially in the Amazon, is extremely reduced, taking some difficulties to the thermodynamic analyses of the atmosphere in places that do not have an AWS. The use of soundings instruments aboard satellites constitutes a good alternative, operationally viable and lower cost. However, it is essential to validate the information obtained by satellites by confronting them with the measurements performed by radiosondes. This work made nonparametric hypothesis testing using data from soundings over Belém, state of Pará, located in Eastern Amazon, the period from February to May 2014, to assess statistically the information collected by the ATOVS sensor aboard NOAA-16 satellite, with the purpose of accepting or rejecting the hypothesis of similarity between the data from this sensor with the radiosonde, thus obtaining valuable information on the performance of satellite sounders about the Amazon region. The results showed that air temperature profile, calculated by satellite is very close to that measured by radiosonde. While to the dew point temperature presented greater variation between the measured data (radiosonde) and calculated (satellite), but kept acceptance standards according to statistical criteria.

Palavras-chave: Sondagem, ATOVS, NOAA-16.

1. Introdução

A Amazônia Legal possui uma extensa área que cobre 5.217.423 km², abrangendo nove estados do Brasil. Embora a região seja muito grande, o número de estações meteorológicas de altitude (EMA) situadas na Amazônia é extremamente pequeno, não sendo suficiente para atender as necessidades de cobertura plena da região. As EMA realizam sondagens atmosféricas convencionais, por meio de radiossondas acopladas a balões que são lançados duas vezes ao dia, às 00 e 12 UTC, para obtenção de dados de perfis atmosféricos verticais, que incluem temperatura do ar e do ponto de orvalho, umidade, pressão atmosférica e, direção e velocidade do vento. Tais informações auxiliam os meteorologistas em suas análises sobre as condições de estabilidade atmosférica, além de alimentarem os modelos numéricos de previsão do tempo. A condição de instabilidade do ar favorece a ocorrência de tempestades, muita delas com características de severidade e elevado potencial destrutivo, e por isso, o conhecimento desta informação adquire tamanha relevância.

As EMA possuem indiscutível importância na geração de informações úteis para análise e previsão do tempo, porém algumas limitações podem ser elencadas quanto à utilização exclusiva de estações meteorológicas de altitude convencionais, como a baixa densidade de cobertura na região Amazônica, o seu elevado custo de operação, visto que o equipamento (radiossonda) é perdido após cada sondagem, além do risco que apresenta para o operador a manipulação do gás que alimenta o balão que leva a radiossonda. Diante de tais circunstâncias e dificuldades, uma alternativa que se apresenta viável, bastante econômica e que permite maior densidade de cobertura consiste na utilização de sensores do tipo sondadores instalados em plataformas orbitais. Visto que os sensores são instalados em satélites de órbita polar, cuja trajetória dura aproximadamente 100 minutos, uma mesma área pode ser visitada, em média, duas vezes ao dia, por um único satélite. Utilizando-se uma constelação de satélites, o dado pode ser obtido várias vezes ao dia, em diferentes horários.

Os satélites da série NOAA possuem sensores do tipo sondadores, conhecidos por ATOVS (*Advanced TIROS Operational Vertical Sounder*), capazes de traçar perfis verticais de temperatura ao longo de suas trajetórias. A sondagem vertical obtida por meio de satélites apresenta características vantajosas para sua utilização operacional, especialmente na Amazônia, não apenas pelo baixo custo operacional, mas, principalmente, pela densidade de pontos que pode cobrir. Porém, é fundamental que os dados obtidos por sensores orbitais possuam representatividade e fidelidade em suas medições, semelhante ao que se tem através de radiossondas convencionais. A avaliação de sondagens verticais por satélite já foi efetuada em escala global (Li et al., 2000), porém na Amazônia este ainda é um assunto pouco explorado e este trabalho busca validar e qualificar o desempenho do sensor ATOVS embarcado no satélite NOAA-16 para Belém-PA, confrontando as suas medições com radiossondagens provenientes da estação situada no aeroporto Internacional de Belém.

2. Satélites de órbita polar

Os satélites de órbita polar estão posicionados relativamente próximos da Terra em uma distância de até 800 km. Possuem uma inclinação de 99° em relação à linha do equador para que o satélite possa orbitar próximo aos polos Norte e Sul. À medida que o satélite orbita ao redor da Terra, realiza a varredura da atmosfera e da superfície terrestre abaixo dele. Estes dados são transmitidos para uma estação de recepção.

O SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) possui três estações de recepção de dados de satélites ambientais de órbita polar, incluindo os satélites da série NOAA, situadas em Porto Velho-RO, Manaus-AM e Belém-PA. Cada estação terrestre do SIPAM pode visualizar e manipular os dados satélites através do software TeraScan® v4.0. A Figura 1 apresenta a interface gráfica do TeraScan viewer, utilizada para visualizar as faixas de varredura do satélite e as respectivas coordenadas de sondagens (pontos verdes).

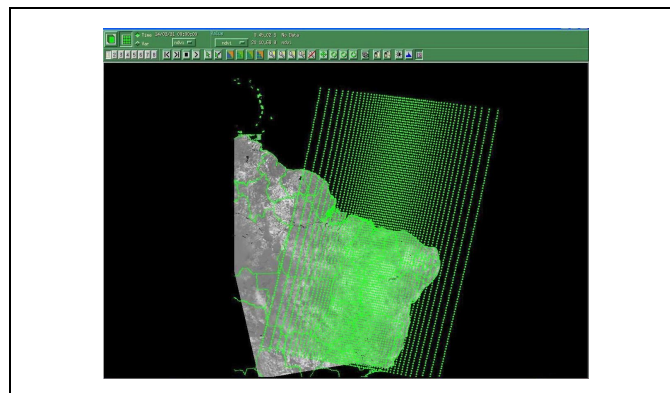


Figura 1. Interface gráfica do TeraScan® viewer.

O satélite NOAA-16, lançado em 21 de setembro de 2000, apresenta uma órbita que cruza o equador próximo à região de Belém durante o dia em torno de 12 UTC. Esta é uma condição bastante favorável, pela proximidade de horário, para efetuar comparações com as radiossondagens convencionais realizadas pela EMA do aeroporto internacional de Belém.

O sensor ATOVS integra a plataforma de coleta de dados do satélite NOAA-16, o que permite a realização de sondagem atmosférica vertical. O sondador ATOVS do NOAA-16 é na verdade um conjunto formado pelos sensores: AMSU (*Advanced Microwave Sounding Unit*) e o HIRS/3 (*High Resolution Infrared Radiation Sounder Version 3*), os quais operam no espectro de micro-ondas e infravermelho, respectivamente.

O AMSU é composto por dois módulos, o AMSU-A e o AMSU-B. O primeiro, formado por dois outros módulos (AMSU-A1 e AMSU-A2), consistem em um radiômetro de micro-ondas multicanal usado para medir perfis de temperatura atmosférica global e fornecer informações da água atmosférica em todas as suas formas (exceto pequenas partículas de gelo, as quais são transparentes às frequências de micro-ondas). O segundo, é um radiômetro de micro-ondas de 5 canais, cujo propósito é receber e medir a radiação de diferentes camadas da atmosfera para obter dados globais de perfis de umidade. Assim, os instrumentos AMSU-A e AMSU-B funcionam em conjunto para formar um radiômetro de micro-ondas de 20 canais, variando de 50 a 183,31 GHz.

O HIRS/3 é um instrumento de varredura em linha projetado para medir a radiação da cena em 20 bandas espectrais de modo a permitir o cálculo do perfil de temperatura vertical a partir da superfície terrestre até cerca de 40 km. Os dados multiespectrais do HIRS/3 consistem em um canal do visível (0,69 μm), sete canais de ondas curtas (3,7 a 4,6 μm), e doze canais de ondas longas (6,5 a 15 μm).

3. Materiais e Métodos

Para comparar os dados de sondagem do ATOVS a partir do NOAA-16 com os dados de radiossondagem convencional, foram aplicados testes de hipóteses entre duas amostras, com a finalidade de realizar uma análise comparativa entre os dados de sondagens, provenientes de fontes diferentes.

Foram obtidos dados de radiossondagem do aeroporto internacional de Belém, produzidos pela estação meteorológica de altitude situada nas coordenadas 1,38°S e 48,48°W, e sondagens por satélite para a mesma coordenada. Os dados de radiossondagens estão disponíveis no *website* da Universidade de Wyoming (*University of Wyoming*, 2014), enquanto os dados dos perfis verticais provenientes do NOAA-16 foram obtidos da estação de recepção do SIPAM CR-BE. A análise realizada empregou dados diários de sondagens efetuadas às 12 UTC e compreendeu o período de fevereiro a maio de 2014.

As variáveis meteorológicas testadas foram: temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, selecionadas a partir dos níveis padrões de pressão: 1000 hPa, 925 hPa, 850hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa, 300 hPa, 250 hPa, 150 hPa, 100 hPa, 70 hPa e 50 hPa. A adoção destes níveis de referência de pressão para comparação foi necessária, porque garantia a existência de dados tanto nas sondagens convencionais, quanto nas sondagens satelitais, nas mesmas alturas.

Uma radiossondagem dura cerca de cinquenta minutos. Por outro lado, a órbita do satélite apresenta pequenas variações diárias nos horários de passagem. Por isso, foram utilizadas apenas as sondagens do NOAA-16 nos horários mais próximos de 12 UTC, porque as sondagens convencionais iniciam exatamente neste horário, sendo, portanto selecionadas dezesseis sondagens para análise (Tabela 1).

Para testar a semelhança dos dados e verificar a existência ou não de diferenças estatísticas significativas entre os dados de sondagem do satélite NOAA-16 e radiossondagem convencional, foi utilizado um teste de hipótese não paramétrico conhecido como teste de

Mann-Whitney ou teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, que consiste em um teste comparativo com base em duas amostras independentes e não parte da suposição de normalidade dos dados (Barbetta et al., 2010). Dessa forma os testes para os dados de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho foram definidos da seguinte forma:

- PASSO1: consistiu na definição da hipótese nula (H_0) e hipótese alternativa (H_1) dos testes.

As hipóteses foram determinadas da seguinte maneira:

$$H_0 : \eta_1 - \eta_2 = 0 \quad (1)$$

$$H_1 : \eta_1 \neq \eta_2 \quad (2)$$

Sendo:

η_1 a mediana dos dados de temperatura do ar e ponto de orvalho para os dados de sondagem por satélite;

η_2 a mediana dos dados de temperatura do ar e ponto de orvalho para os dados de radiossondagem.

- PASSO 2: Cálculo da estatística do teste.

Esse cálculo foi realizado através do teste de Wilcoxon da soma dos postos:

$$W_1 + W_2 = \frac{(n_1 + n_2 + 1)}{2} \quad (3)$$

Onde:

W_1 é a soma dos postos das amostras de sondagem por satélite;

W_2 é a soma dos postos da amostra de radiossondagem.

- PASSO3: Regra de decisão.

Adotou-se como regra de decisão dos testes estatísticos, a seguinte comparação:

Se $p > \alpha$. Então H_0 é aceita, isto é, não há diferenças significativas entre os dados;

Se $p \leq \alpha$. Então H_0 é rejeitada, isto é, há diferenças significativas entre os dados.

Onde:

- p é a probabilidade de significância obtida para os dados;

- α é o nível de significância adotado nos testes.

Os procedimentos dos testes estatísticos e as análises estatísticas descritivas foram realizados utilizando-se o software Matlab R2012a.

4. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados de alguns testes de hipóteses obtidos e análises da estatística descritiva para os dados de temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho, relativo ao horário comparativo de referência (12 UTC).

Para a realização dos testes, foi adotado um valor de $\alpha = 0.01$ como regra de decisão.

4.1 Temperatura do ar

A tabela 1 apresenta os resultados dos testes de hipóteses para os dados de temperatura do ar para a cidade de Belém-PA.

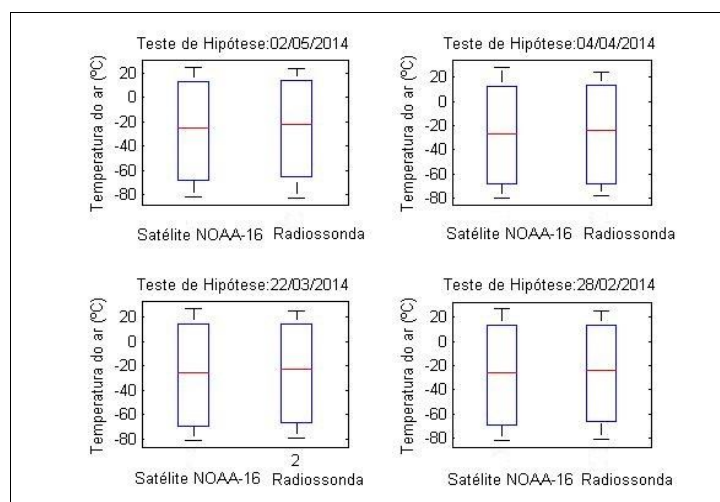
Nota-se pela Tabela 1 que as probabilidades de significâncias (p) obtidas em todos os testes foram maiores que o valor do nível de significância (α) estipulado, isto é, de 1%. Isto mostra forte evidência de aceitação da hipótese H_0 . Logo, pode-se admitir preliminarmente que as temperaturas do ar obtidas pela sondagem do satélite NOAA-16, podem ser consideradas estatisticamente equivalentes em relação às medições de radiossondagens.

Tabela 1. Resultados dos Testes de hipóteses comparativos entre as temperaturas do ar em Belém- PA.

Data	p	α	Decisão de H_0
26/02/2014	0,7508	0,01	Aceita
27/02/2014	0,7950	0,01	Aceita
28/02/2014	0,8398	0,01	Aceita
19/03/2014	0,8398	0,01	Aceita
20/03/2014	0,8852	0,01	Aceita
22/03/2014	0,9310	0,01	Aceita
30/03/2014	0,8852	0,01	Aceita
06/04/2014	0,9081	0,01	Aceita
08/04/2014	0,8399	0,01	Aceita
13/04/2014	0,9310	0,01	Aceita
14/04/2014	0,8852	0,01	Aceita
15/04/2014	0,8852	0,01	Aceita
16/04/2014	0,7728	0,01	Aceita
17/04/2014	0,8625	0,01	Aceita
29/04/2014	0,9080	0,01	Aceita
02/05/2014	0,8399	0,01	Aceita

Na Figura 2 são apresentados os gráficos para quatro resultados aleatórios dos testes de hipóteses, visualizados na Tabela 1. Esses gráficos são referentes às datas: 02/05/2014, 04/04/2014, 22/03/2014 e 28/02/2014. Utilizando dados de dias e meses distintos, ainda assim os resultados mostraram que não houve diferença significativa para todos os testes executados.

A Figura 2 mostra que há pouca diferença entre as medições de temperatura do ar obtidas por satélite e por radiossonda e, aparentemente, as medições apresentam os mesmos valores de temperatura nos níveis padrão de pressão atmosférica, variabilidade e simetria, o que reforça os resultados dos testes de hipóteses não paramétricos exibidos na Tabela 1.

**Figura 2.** Gráficos comparativos (satélite e radiossonda) para temperatura do ar.

A Tabela 2 mostra medidas estatísticas que sintetizam informações exibidas na Figura 2. Nota-se que há uma grande semelhança entre as medições de temperatura do ar em termos de medidas de tendência central, ou seja, possuem médias e medianas bem próximas. Em termos de dispersão (desvio padrão) dos dados, observa-se uma grande similaridade, e também para os valores de extremo inferior (mínimo), extremo superior (máximo). A proximidade entre os valores de 1º e 3º quartil avigora que os dados possuem medidas de simetrias parecidas.

As análises das medidas estatísticas caracterizam que os dados possuem distribuições muito próximas. Portanto, a temperatura do ar medida pela sondagem do satélite NOAA-16 não apresenta diferenças estatísticas significativas quando comparada com a temperatura do ar medida pela radiossonda.

Tabela 2. Medidas estatísticas comparativas dos dados de temperatura do ar.

Data	Sondagem	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
02/05/2014	NOAA-16	-27,1	-25,5	40,4	-82,0	25,0	-68,8	15,0
	Radiossonda	-25,2	-22,5	39,9	-82,9	24,0	-66,7	16,5
04/04/2014	NOAA-16	-27,0	-27,0	40,2	-80,0	28,0	-68,0	14,5
	Radiossonda	-26,5	-23,9	39,9	-78,3	24,0	-69,7	14,8
22/03/2014	NOAA-16	-26,6	-25,5	41,2	-81,0	27,0	-69,5	16,8
	Radiossonda	-25,3	-22,2	40,0	-79,5	25,2	-67,5	16,0
28/02/2014	NOAA-16	-27,2	-26,0	41,1	-82,0	-26,0	-69,0	15,8
	Radiossonda	-26,1	-24,1	40,0	-81,1	-24,1	-66,3	15,9

4.2 Temperatura do ponto de orvalho

A Tabela 3 apresenta os resultados dos testes de hipóteses para os dados de temperatura do ponto de orvalho do ar para a cidade de Belém-Pa.

Tabela 3. Resultados dos Testes de hipóteses comparativos entre as temperaturas do ponto de orvalho em Belém-Pa.

Data	p	α	Decisão de H_0
26/02/2014	0,9310	0,01	Aceita
27/02/2014	0,8852	0,01	Aceita
28/02/2014	0,9310	0,01	Aceita
20/03/2104	0,9310	0,01	Aceita
22/03/2014	0,9770	0,01	Aceita
30/03/2014	0,8852	0,01	Aceita
06/04/2014	0,8398	0,01	Aceita
08/04/2014	0,9770	0,01	Aceita
13/04/2014	0,9770	0,01	Aceita
14/04/2014	0,9770	0,01	Aceita
15/04/2014	0,8852	0,01	Aceita
16/04/2014	0,9310	0,01	Aceita
17/04/2014	0,9770	0,01	Aceita
23/04/2014	0,8398	0,01	Aceita
29/04/2014	0,7508	0,01	Aceita
03/05/2014	0,9770	0,01	Aceita

Nota-se pela Tabela 3 que as probabilidades de significâncias (p) de todos os testes foram maiores que o valor do nível de significância (α) estipulado, isto é, 1%. Isso demonstra que há forte evidência estatística de que seja verdadeira a suposição da hipótese nula (H_0), isto é, existem semelhanças estatísticas entre as temperaturas do ponto de orvalho nos níveis padrão de pressão atmosférica inferida pelo satélite NOAA-16 e medida pela radiossondagem.

Na Figura 3 são apresentados os gráficos comparativos que resumem informações relativas à distribuição dos dados para quatro testes de hipóteses, conforme exibidos na Tabela 3. Os gráficos são referentes às datas: 03/05/2015, 15/04/2014, 20/03/2014 e 28/02/2014. Embora o teste de Mann-Whitney tenha acusado uma suposição de aceitação da hipótese nula, analisando-se os gráficos da Figura 3, nota-se uma maior diferença em termos de medidas de tendência central, dispersão e assimetria entre as medições.

Observa-se que há maior desigualdade entre os valores de mediana, com valores maiores para as medições da radiossonda. Enquanto os dados de temperatura do ponto de orvalho do satélite NOAA-16 apresentam uma distribuição mais simétrica, os dados de radiossonda tenderam a apresentar uma assimetria à esquerda, com maior deslocamento de dados abaixo da mediana.

Em termos de dispersão, os dados do satélite NOAA-16 apresentaram menor variabilidade em relação aos dados da radiossonda. Onde nota-se que os dados da radiossonda apresentaram maior espalhamento em torno de medida de centralidade.

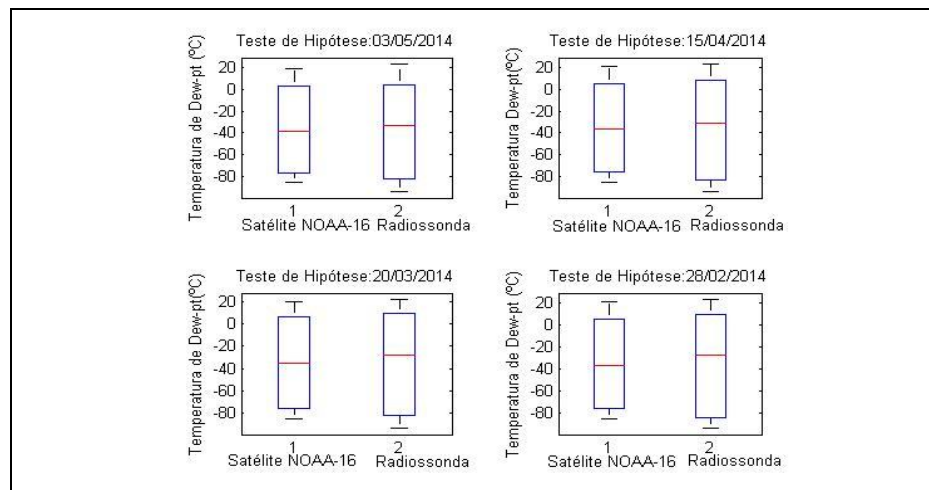


Figura 3. Gráficos comparativos para temperatura do ponto de orvalho.

A Tabela 4 apresenta as medidas descritivas dos dados ilustrados na Figura 3. Esses valores reforçam que embora o teste de Mann-Whitney tenha acusado a aceitação da hipótese nula (H_0) para os dados de temperatura do ponto de orvalho, mas comparando-se individualmente os dados em termos de medições de tendência central (média e mediana), dispersão (desvio padrão), extremo inferior, extremo superior, 1º quartil e 3º quartil, constatou-se maiores diferenças de valores dessas medidas.

Percebe-se maior diferença entre os valores de média e mediana, desvio padrão, extremo inferior, extremo superior, 1º e 3º quartil, como visualizado na Figura 3.

Portanto, atentou-se que há uma maior diferença entre as medições de temperatura do ponto de orvalho na região amazônica, utilizando-se dados de sondagem do satélite NOAA-16 em comparação com os dados de radissondagens convencionais.

Tabela 4. Medidas estatísticas comparativas dos dados temperatura do ponto de orvalho.

Data	Sondagem	Média	Mediana	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
03/05/2014	NOAA-16	-36,0	-38,5	39,5	-85,0	19,0	-78,8	6,0
	Radiossonda	-36,1	-33,2	44,4	-93,5	22,9	-83,5	7,9
15/04/2014	NOAA-16	-34,8	-36,5	40,1	-85,0	21,0	-78,5	7,8
	Radiossonda	-35,5	-31,0	44,3	-93,5	23,0	-85,9	10,2
20/03/2014	NOAA-16	-35,9	-37,0	38,5	-85,0	16,0	-78,3	5,0
	Radiossonda	-35,2	-29,0	45,7	-95,3	22,7	-86,5	12,6
28/02/2014	NOAA-16	-34,8	-37,0	40,5	-85,0	21,0	-79,3	8,8
	Radiossonda	-34,2	-27,8	46,0	-93,9	22,9	-87,3	10,9

5. Conclusão

Os resultados dos testes de hipóteses para temperatura do ar e ponto de orvalho em Belém-PA mostraram evidências que permitem a aceitação da hipótese de semelhanças estatísticas entre a sondagem do satélite NOAA-16 e a radiossondagem. Entretanto, análises de estatísticas descritivas mostraram que há uma maior diferença entre as medições de temperatura do ponto de orvalho e uma semelhança muito grande entre as temperaturas do ar. Duas questões importantes podem estar relacionadas com estes resultados. A primeira é que a radiossondagem convencional dura cerca de cinquenta minutos, período em que o balão sofre derivações de local em razão das correntes de vento, obtendo valores de locais já distantes da coordenada inicial e em horário defasado daquele realizado pelo satélite. Outro ponto mais relevante ainda, diz respeito ao sensor AMSU que, aparentemente, tem alguma dificuldade para calcular a umidade atmosférica e sofre interferências em suas leituras pelos fatores atmosféricos, como presença de nuvens, por exemplo.

Ainda assim, os dados de sondagens satelitais usando o sensor ATOVS são extremamente importantes para as análises meteorológicas e incorporação de informações em modelos numéricos de previsão e mostraram-se coerentes com as medições, embora variações tenham sido observadas, porém dentro de limites aceitáveis.

Aprimoramentos no sensor ATOVS já foram realizados e os satélites NOAA-18 e NOAA-19 já empregam instrumentos com estes aperfeiçoamentos. Todavia, a validação para a região Amazônica utilizando dados destes satélites é mais difícil, porque os horários de suas passadas sobre a região de cobertura da estação do SIPAM CR-BE é bastante distinta das radiossondagens existentes na região. Porém, os resultados obtidos com o satélite NOAA-16, que encerrou suas operações em maio deste ano, certamente contribuirão para a adoção de metodologias que permitirão o uso das informações de sondagens satelitais dos novos satélites da série NOAA, o que enseja desafios para uma próxima abordagem.

6. Referências

- Barbeta, P. A.; Reis, M. M.; Borna, A. C. **Estatística: para cursos de engenharia e informática**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- Li, J.; Wolf, W. W.; Menzel, W. P.; Zhang, W.; Huang, H. L.; Achtor, H. T. Global sounding of the atmosphere from atovs measurements: the algorithm and validation. **Journal of Applied Meteorology**, v. 39, p. 1248 – 1268, 2000.
- Reale, A; Tilley, F.; Ferguson, M.; Allegrino, A. NOAA operational sounding products for advanced TOVS **International Journal of Remote Sensing**, Volume 29, Issue 16, pages 4615-4651. 2008
- Universidade de Wyoming. Disponível em: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Acessado em: 13. Maio. 2014.