



"GPS APLICADO À QUANTIFICAÇÃO DO VAPOR D'ÁGUA ATMOSFÉRICO: APLICAÇÃO DA METROLOGIA NA DETERMINAÇÃO DAS INCERTEZAS DA TÉCNICA"

*Márcio A. A. Santana*¹, *Patrícia L. O. Guimarães*¹, *Cristiano C. Silva*¹, *Luiz F. Sapucci*¹,
*Paulo R. Couto*², *Luís H. P. Oliveira*², *João F. G. Monico*³

¹ INPE / CPTEC / LIM, Cachoeira Paulista - SP, Brasil, marcio.santana@cptec.inpe.br

² Inmetro / Lapre, Duque de Caxias - RJ, Brasil, prcouto@inmetro.gov.br

³ UNESP, Presidente Prudente - SP, Brasil, galera@fct.unesp.br

Resumo: As informações das condições ambientais, especialmente de pressão atmosférica junto à superfície, são utilizadas para a quantificação do vapor d'água atmosférico a partir de observações realizadas por receptores de navegação de sinais provenientes dos satélites do sistema GPS (*Global Positioning System*). O conhecimento da qualidade dessas informações é essencial para a determinação das incertezas dos resultados obtidos por essa técnica, as quais atualmente são tão importantes quanto às próprias medidas.

Este trabalho relata os requisitos meteo-metroológicos e todas as etapas da calibração de um conjunto de termobarohigrômetros, utilizados na pesquisa que investiga os vários aspectos envolvidos na tecnologia GPS para fins de monitoramento do vapor d'água presente na atmosfera. Através das calibrações iniciais, das recalibrações, da disseminação de pressão e da rastreabilidade metroológica é garantida a confiabilidade das medições das variáveis meteorológicas em uma rede de estações ambientais que estão em fase de implantação junto a uma rede de receptores GPS existente, com o objetivo de possibilitar que essa rede, inicialmente implantada para fins geodésicos, seja aplicada para o monitoramento do vapor d'água atmosférico com alta resolução temporal e com incertezas bem conhecidas.

Palavras chave: Metrologia ambiental, meteorologia, pressão atmosférica, *GPS*.

1. INTRODUÇÃO

1.1. A Pesquisa Ambiental

O objetivo principal da pesquisa, objeto dos estudos de cálculo de incertezas deste artigo, é investigar os vários aspectos envolvidos na tecnologia *GPS* - *Global Positioning System*, desde o desenvolvimento e avaliação de *softwares*, proposição e avaliação de metodologias para caracterização do desempenho de receptores em usos específicos, aplicações em estudos da atmosfera, avaliações e definições vinculadas ao sistema altimétrico (alturas geoidais, NMM - nível médio do mar e altitudes científicas) e outros métodos geodésicos. Um dos objetivos específicos é a investigação relacionada com a utilização de uma rede de receptores *GPS*

integrada com sensores meteorológicos para o monitoramento de valores de *IWV* (*Integrated Water Vapor*) sobre o estado de São Paulo visando sua assimilação nos modelos de PNT (*Previsão Numérica de Tempo*) e conseqüentes melhorias na modelagem da troposfera, bem como para validação e qualificação dos valores *IWV* obtidos a partir do satélite *GOES* (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) [1]. Integram também este projeto de pesquisa grupos da FCT/UNESP, EPUSP, INPE/CPTEC e ESALQ/USP.

1.2. Aspectos teóricos

Vários são os fatores que influenciam a exatidão das informações de um sistema GPS, entre eles o atraso zenital troposférico Z_{TD} (*Zenithal Tropospheric Delay*). A equação 1 mostra as componentes úmida e hidrostática, onde Z_{WD} (*Zenithal Wet Delay*) é formada pela influência do vapor d'água, e a Z_{HD} (*Zenithal Hydrostatic Delay*) formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera, respectivamente [2].

$$Z_{TD} = Z_{WD} + Z_{HD} \quad (1)$$

Assim, ao tomar um valor do Z_{TD} obtido a partir das observações *GPS* e subtrair da componente hidrostática Z_{HD} chega-se no valor do atraso zenital da componente úmida Z_{WD} .

A componente hidrostática depende apenas da densidade do ar atmosférico e, por isso, se considerado o equilíbrio hidrostático, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão à superfície (P_0), da latitude do local (φ) e da altitude (h) em quilômetros, segundo a seguinte equação [3]:

$$Z_{HD} = \frac{2,27671422 \cdot 10^{-3} P_0}{1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028h} \quad (2)$$

A relação entre os valores do Z_{WD} e a quantidade de vapor d'água atmosférico (*IWV*) existente no momento em que foram feitas as observações *GPS* é função da temperatura média troposférica (T_m). Essa relação pode ser expressa pela seguinte equação [4]:

$$IWV = Z_{WD} \cdot \frac{10^6}{R_w [k_2' + \frac{k_3}{T_m}]} \quad (3)$$

onde $R_w = 461,5181 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ é a constante específica para o vapor d'água, $k_2' = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $k_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ são as constantes da refratividade atmosférica, cujos valores foram determinados experimentalmente [5]. Os valores de T_m podem ser aproximados a partir de medidas de temperatura efetuadas à superfície [4], e estas assim como os valores de pressão atmosférica são medidas junto às estações *GPS*, em implantação no estado de São Paulo. Para regiões do território brasileiro uma modelagem que relaciona os valores de T_m com dados obtidos à superfície foi desenvolvida empregando-se 90.000 radiossondas [6].

Para esta pesquisa ambiental foram adquiridos dezoito termobarohigrômetros calibrados pelo fabricante, porém antes das instalações em campo, previstas para o primeiro semestre de 2011, esta instrumentação foi recalibrada no INPE/CPTEC. Neste artigo relata-se a interação entre as áreas de Metrologia e Ambiental, tendo as medições da instrumentação meteorológica em laboratório e em campo como elo e fonte inesgotável de informações a serem analisadas no País.



Fig. 1. Estação de monitoramento (*GPS* e *PTU*) de Ubatuba-SP e *PTU303* com "static pressure head", Vaisala (Fotos: CPTEC/Sapucci e LIM/Paulo Arlino)

1.2. Termobarohigrômetro *PTU300*

O termobarohigrômetro da família *PTU300* – *Combined Pressure, Humidity and Temperature Transmitter*, produzido pela Vaisala, utiliza uma membrana capacitiva como elemento sensor de pressão atmosférica, um *RTD* (detector de temperatura por resistência) para temperatura e um elemento capacitivo para umidade relativa do ar. São utilizados: uma cabeça de pressão estática, um protetor de radiação, uma grade de termoplástico *PPS* (polissulfeto de fenileno) e um filtro de aço inox de compensação para a ponta de temperatura e umidade, conforme ilustrado na Figura 1. A comunicação entre o *PTU* e o computador é realizada através da interface serial *RS232* ou *WLAN* (rede local sem fio). A taxa de comunicação de dados pode ser configurada até 115200 *bps* (*bits* por segundo).

O modelo calibrado foi o *PTU303* e suas principais características estão relacionadas na tabela 1, conforme informações do fabricante [7].

Tabela 1. Características do *PTU303*

Dispositivo	Descrição
Termômetro	Baseado no sensor do tipo Pt100 RTD 1/3 Class B IEC 751, faixa de trabalho de -40 a +60 °C e precisão de 0,4 °C @ -40 °C; 0,2 °C @ 20 °C e 0,3 °C @ +60 °C.
Higrômetro	Baseado no sensor capacitivo <i>Humicap</i> ® 180, com exatidão de ± (1,5 + 0,015 x leitura) % u.r. @ -40 a + 60 °C. Tempo de resposta de 20 segundos (90 % ur @ 20 °C).
Barômetro	Utiliza um sensor capacitivo <i>Barocap</i> ® na faixa de 500 a 1100 hPa, com exatidão de +/- 0,15 hPa (-40 a + 60 °C), sendo: ± 0,05 hPa (linearidade); ± 0,03 hPa (histerese); ± 0,03 hPa (repetitividade); ± 0,07 hPa (incerteza da calibração); ± 0,10 hPa (exatidão @ + 20 °C); ± 0,1 hPa (variação da temperatura) e ± 0,1 hPa/ano (estabilidade a longo prazo). Tempo de resposta de 2 segundos.

1.3. Requisitos Meteo-Metroológicos

O monitoramento ambiental é realizado utilizando-se diversos sistemas observacionais que exigem níveis de exatidão cada vez maiores, sendo de fundamental importância conhecer o grau de confiabilidade destas medições. Recomendações e requisitos básicos das áreas de meteorologia [8] e metrologia [9] para a instrumentação incluem: a) realizar a calibração inicial, verificação e recalibração do sistema completo de observação ambiental, ou seja, do conjunto sistema de coleta de dados incluindo o(s) sensor(es) utilizado(s) às ferramentas de software; b) evidenciar a rastreabilidade das medições e c) expressar a incerteza de medição.

Com as calibrações iniciais e as recalibrações dos sistemas é possível validar, qualificar e corrigir os dados das variáveis meteorológicas monitoradas. A Rastreabilidade é a propriedade de um resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição. E a incerteza de medição é o parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando ou o parâmetro não negativo (qualitativamente) que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [10 e 11].



Fig. 2. Rastreabilidade de Medição na área de Metrologia Ambiental.

Conforme ilustra a Figura 2, no topo da estrutura encontram-se as definições das unidades do SI – Sistema Internacional de Unidades e no patamar logo abaixo situa-se o *BIPM – Bureau International des Poids et Mesures*, organismo responsável pela guarda dos padrões internacionais de medida e disseminação das unidades do SI aos *NMIs – National Measurement Institutes*. Os laboratórios da Dimci - Diretoria de Metrologia Científica e Industrial do Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade, responsáveis pela realização, manutenção e disseminação das unidades do SI no Brasil, desempenha atividades de metrologia de mais alto nível e fornece as bases para a rastreabilidade dos padrões de referência dos laboratórios de calibração e ensaios do país (em especial aos pertencentes à RBC – Rede Brasileira de Calibração). Logo a seguir, vêm ao lado, outros *NMIs*. As redes nacionais de acreditação de laboratórios vêm no patamar abaixo. Em alguns casos, o *BIPM* ou um *NMI* designa outra Instituição para guardar e disseminar determinada grandeza ou unidade específica do SI, como por exemplo, o *World Radiation Center*, responsável pela manutenção da referência radiométrica mundial. Na base desta estrutura situam-se os usuários em geral, cujos padrões de referência e de trabalho tem suas rastreabilidades evidenciadas aos padrões dos laboratórios de calibração acreditados ou dos *NMIs* [12].

O LIM - Laboratório de Instrumentação Meteorológica do INPE/CPTEC, onde foram realizadas as calibrações dos termobarohigrômetros, tem suas medidas rastreadas ao Inmetro, através dos Laboratórios de Pressão, Higrometria e Termometria, que evidenciam sua rastreabilidade encaminhando os seus padrões nacionais aos laboratórios internacionais, onde através de comparações internacionais reportadas ao *BIPM* garantem a uniformidade mundial das medidas e a sua rastreabilidade ao SI. Em outras palavras, é através da rastreabilidade que se obtém a garantia de que a unidade de uma variável tenha o mesmo valor em qualquer lugar do mundo, e com isto pode haver a comparabilidade das medições.

No caso da técnica utilizada para obtenção do vapor d'água atmosférico nesta pesquisa ambiental, a variável pressão atmosférica é a principal fonte de contribuição para a incerteza do IWV e a disseminação desta grandeza é mostrada na Figura 3. O *PTB - Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (Alemanha) calibra o padrão do Lapre-Inmetro, que por sua vez calibra o padrão da área de Metrologia Ambiental do INPE/CPTEC e este último calibra a instrumentação de campo. Em cada etapa temos as incertezas e a Melhor Capacidade de Medição - MCM de cada laboratório para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %. O padrão de pressão utilizado pelo Lapre é mostrado na Figura 4.



Fig. 3. A disseminação da variável pressão atmosférica

Na área de Instrumentação Meteorológica, além dos procedimentos de instalação e dos fatores que influenciam

as medidas de campo, também se recomenda ter um critério definido para aceitação ou rejeição de uso dos dispositivos perante os resultados da calibração. Critérios de aceitação são parâmetros que servem como referência para verificar se o instrumento está adequado ao uso [13].



Fig. 4. Padrão Nacional de Pressão (Foto: Lapre/Inmetro)

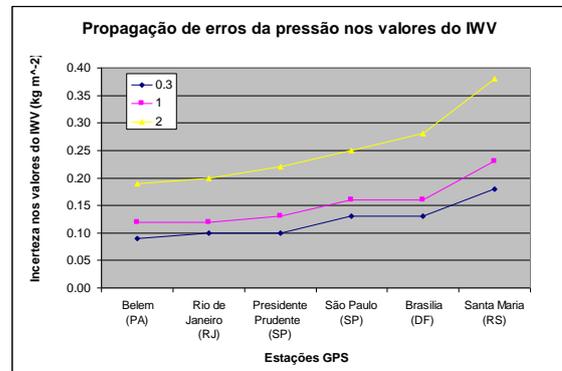


Fig. 5. Incertezas de pressão atmosférica versus incertezas nos valores de IWV

Para a aplicação *GPS* aplicado à quantificação do vapor d'água atmosférico, o critério de aceitação dos resultados da calibração para a incerteza expandida de medição U (nível de confiança de 95,45 %) dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar é de: $\pm 0,3$ °C (de 10 a 35 °C) e ± 3 % ur (de 30 a 90 % ur), respectivamente. Para a variável pressão atmosférica temos representadas na Figura 5 as propagações das incertezas do IWV em relação às incertezas de medições de $\pm 0,3$; ± 1 e ± 2 hPa para a faixa de 700 a 1050 hPa. As condições locais, tais como longitude, latitude e altitude interferem nas condições climáticas e consequentemente nas incertezas finais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Devido aos sensores de pressão serem equivalentes aos padrões do sistema de calibração de pressão atmosférica do CPTEC/INPE, todos os barômetros foram recalibrados e realizou-se uma análise para corroborar se o sistema tinha capacidade para atender, em especial, aos critérios de aceitação da instrumentação para esta aplicação meteorológica. Diante dos resultados das recalibrações verificou-se também a compatibilidade com os resultados das calibrações realizadas pelo fabricante. As condições ambientais do laboratório durante a realização das recalibrações dos *PTUs* foram: temperatura do ar = 23 ± 2 °C; umidade relativa do ar = 50 ± 10 % u.r. e pressão atmosférica = 945 ± 5 hPa .

2.1 Calibração dos PTU303

Os barômetros foram calibrados pelo fabricante em nove pontos na faixa de 500 a 1100 hPa. Estas calibrações foram realizadas nos meses de janeiro e fevereiro de 2010 na Finlândia e os padrões com rastreabilidade evidenciada ao *NIST - National Institute of Standards and Technology* e *FINAS - Finnish Accreditation Service*, e o resumo dos resultados estão descritos na Tabela 2.

Nos meses de setembro e outubro de 2010 foram recalibrados 16 (dezesseis) *PTUs303* e em fevereiro de 2011 outras 2 (duas) unidades nos laboratórios da área de Metrologia Ambiental do LIM com procedimentos de calibração baseados nas normas técnicas *DIN - Deutsches Institut für Normung* [14] e *ISO - International Organization for Standardization* [9].

Tabela 2 - Resultados da Calibração do Fabricante

Pressão atmosférica		
Faixa [hPa]	Correção (REF-OBJ) [hPa]	U (95% @k=2) [hPa]
500,03 a 1100,01	-0,01 a 0,01	+/- 0,07

Condições ambientais: temperatura do ar (23 ± 1) °C; umidade relativa do ar (36 ou 37) ± 5 % ur e pressão atmosférica (1009 ou 1033) ± 1 hPa .

Os pontos para a recalibração foram selecionados de acordo com as condições climatológicas da região onde serão instalados os instrumentos. No INPE utilizou-se um termohigrômetro Rotronic para o monitoramento ambiental do laboratório com rastreabilidade à RBC e a metodologia utilizada na calibração baseou-se na comparação direta ao padrão de referência de pressão atmosférica do INPE/CPTEC, utilizando-se uma câmara barométrica como meio de calibração.

Foram realizadas séries de 15 (quinze) medidas a cada minuto para cada ponto de calibração, sendo informados os valores médios. Utilizou-se o *software PuTTY (Vaisala/Simon Tatham)* para a coleta dos dados via interface serial. A incerteza expandida de medição relatada equivale à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência “ $k = 2,00$ ”, para um nível de confiança de 95,45%, e foi determinada de acordo com os documentos *ISO GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [15] e *EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração* [16].

2.1.1. Calibração de pressão atmosférica

Na Figura 6 temos o sistema de calibração de barômetros composto por câmara barométrica desenvolvida pelo LIM e Boc Edwards [17]; padrão de referência de pressão atmosférica *Vaisala, Digital Barometer, PTB220TS* e padrões de trabalho *Boc Edwards, Barocel, 655AB; Hameg, Programmable Power Supply, HM7044; Fluke, Precision Multimeter, 8846A* e *Edwards, Active Gauge Controller*.

O gás utilizado na calibração de pressão foi o nitrogênio com 99,999% de pureza e para verificar a histerese realizou-se o carregamento e o descarregamento do gás, ou seja, a calibração iniciou-se no valor mais baixo de pressão (~750 hPa), incrementando-se os pontos de calibração até atingir o limite superior (~1000 hPa) e depois reduziu-se até o limite inferior.



Fig. 6. Sistemas de calibração de pressão atmosférica do INPE/CPTEC/LIM

Para o cálculo de incerteza foi considerado como mensurando a variável (grandeza) pressão atmosférica P_x submetida às medições.

Para cada mensurando ou grandeza de saída Y que depende de uma série de grandezas de entrada X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), temos:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, N) \quad (3)$$

A função de medição f representa o procedimento de medição e o método de avaliação. A função de medição é a função de grandezas cujo valor, quando calculado a partir de valores conhecidos das grandezas de entrada no modelo (matemático) de medição, é um valor medido da grandeza de saída no modelo de medição [10]. O modelo de medição ou modelo matemático de medição é a relação matemática entre todas as grandezas que, sabidamente, estão envolvidas numa medição.

A grandeza $u_i(y)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) é a contribuição de incerteza padrão associada à estimativa de saída y , resultante da incerteza padrão associada à estimativa de entrada x_i :

$$x_i(y) = c_i u(x_i) \quad (4)$$

onde c_i é o coeficiente de sensibilidade associado com a estimativa de entrada x_i , isto é, a derivada parcial da função modelo f com relação à variável X_i , avaliada para as estimativas de entrada x_i

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1, \dots, X_N=x_N} \quad (5)$$

O coeficiente de sensibilidade c_i descreve o quanto a estimativa de saída y é influenciada por variações da estimativa de entrada x_i .

Para as calibrações dos PTUs utilizou-se:

$$u^2(y) = \sum c_i^2 u^2(x_i) \quad (6)$$

No modelo adotado para cada medida, ou conjunto de medidas P_x teremos a pressão p_x corrigida. A correção utilizada provém do Certificado de Calibração do padrão ou medidor utilizado, conferindo assim a rastreabilidade metrológica. U é a incerteza de medição, ou seja:

$$P_x = p_{\text{corrigida}} \pm U \quad (7)$$

onde

$$P_{\text{corrigida}} = P_x' + \text{correção}_2 \quad (8)$$

e

$$P_{\text{corrigida}} = P_x' + ((ps + \text{correção}_1) - px) \quad (9)$$

A pressão atmosférica P_x do objeto sob calibração para cada ponto de calibração é obtida pela Equação 10:

$$P_x = \bar{P}_x' + (\bar{P}_s + \sum_{j=1}^3 \sigma_{P_{s_j}} - \bar{P}_x + \sigma_{P_{a_1}} + \sigma_{P_b} + \sigma_{P_V} + \sigma_{P_g}) \quad (10)$$

Onde:

ps = pressão de referência;

δps_1 = correção de pressão obtida a partir da calibração do padrão PTB;

δps_2 = correção de pressão devido à resolução do padrão;

δps_3 = deriva do padrão PTB desde sua última calibração;

px = pressão do objeto sob calibração;

δp_{x1} = correção da pressão devido à resolução do objeto sob calibração;

δp_b = correção da pressão devido à não-uniformidade da câmara barométrica;

δp_V = gradiente espacial e temporal da câmara barométrica;

δp_g = correção da pressão devido ao gás utilizado.

Considerando o grau de liberdade $\nu = 4$ para as medidas dos padrões e dos objetos sob calibração em cada ponto de calibração, temos:

$$\bar{P}_s = \frac{\sum_{j=1}^{\nu+1} t_{s_j}}{\nu+1} \quad (11)$$

e

$$\bar{P}_x = \frac{\sum_{j=1}^{\nu+1} t_{x_j}}{\nu+1} \quad (12)$$

Para a incerteza expandida, teremos;

$$U = k \cdot u(P_x) \quad (13)$$

Onde k = fator de abrangência para diferentes graus de liberdade efetivos ν_{eff} .

Para calcular os graus de liberdade efetivos ν_{eff} da incerteza padrão $u(y)$, associada à estimativa de saída y utilizou-se da equação de Welch-Satterwaite:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (14)$$

Com o ν_{eff} obteve-se o fator de abrangência k através de uma distribuição *t-student* avaliada para um nível de confiança de 95,45%.

2.1.2 Comparação dos resultados da calibração inicial e da recalibração de pressão atmosférica

Como a utilização dos barômetros somente aconteceu após suas recalibrações, calculou-se o E_N – erro normalizado conforme equação 15 para a verificação da compatibilidade dos resultados das calibrações realizadas no LIM - Brasil com os da Vaisala – Finlândia.

$$E_N = \frac{LIM - OYJ}{\sqrt{U_{LIM}^2 + U_{OYJ}^2}} \quad (15)$$

Onde:

LIM = resultado da calibração no laboratório do INPE/CPTEC;

OYJ = resultado da calibração no laboratório da Vaisala Oyj;

$ULIM$ = incerteza expandida relatada pelo LIM;

$UOYJ$ = incerteza expandida relatada pela Vaisala Oyj.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração de pressão atmosférica

Um resumo dos resultados das recalibrações dos barômetros é mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos resultados das calibrações no INPE/CPTEC: Pressão atmosférica

Faixa [hPa]	Correção ($P_{\text{REF}} - P_{\text{MED}}$) [hPa]	U (95,45% @k=2,00) [hPa]
698,40 a 1008,32	0 a 0,13	0,07 a 0,09

3.2 Compatibilidade das calibrações

Os valores de E_N são mostrados na Tabela 4 para os sensores de pressão atmosférica. Os valores apresentados nessa tabela indicam que erro normalizado nos extremos do range é maior que nos valores intermediários (850 e 950 hPa). Apenas em 4 das 18 estações isso não foi observado (F0240008, F0240009, F0240010 e F052002). Os valores acima de 1 foram observados em apenas 4 casos, os quais estão assinalados com asterisco na tabela, dos quais 3 ocorreram em 750 hPa.

Tabela 4. Compatibilidade dos resultados da calibração Vaisala (Finlândia) x INPE/CPTEC (Brasil) – Valores de E_N .

Número série \ Pressão [hPa]	750	850	950	1000
F0240001	0,51	0,47	0,47	0,60
F0240002	0,91	0,85	0,66	0,85
F0240003	0,81	0,75	0,66	0,85
F0240004	0,61	0,66	0,47	0,75
F0240005	0,81	0,71	0,66	0,75
F0240006	1,01*	0,94	0,75	0,94
F0240007	1,21*	1,03*	0,75	0,94
F0240008	0,81	0,71	0,44	0,26
F0240009	0,00	0,19	0,09	0,19
F0240010	0,30	0,38	0,09	0,38
F0240011	0,70	0,66	0,56	0,66
F0240012	0,91	0,75	0,66	0,85
F0520001	1,01*	0,94	0,75	0,94
F0520002	0,40	0,47	0,38	0,56
F0520003	0,61	0,47	0,38	0,56
F0520004	0,91	0,75	0,56	0,75
F0520005	0,61	0,56	0,38	0,66
F0520006	0,71	0,66	0,47	0,66

4. CONCLUSÃO

A participação da Metrologia neste projeto de pesquisa ambiental atendendo também aos requisitos e recomendações da área Meteorológica proporcionou:

- a visualização da rastreabilidade e da disseminação da grandeza pressão atmosférica até a específica aplicação de monitoramento ambiental;
- a verificação da compatibilidade dos resultados das calibrações realizadas na Finlândia (Vaisala) e no Brasil (INPE/CPTEC) através dos dados dos Certificados de Calibração dos barômetros;
- a análise do sistema de calibração de barômetros que utiliza um padrão similar (1:1) em relação ao objeto sob calibração e a comprovação que este sistema pode ser utilizado para o acompanhamento (verificações e calibrações) destes sensores de campo durante o período desta pesquisa, porém recomenda-se que com o avanço tecnológico uma atualização do sistema tem que ser contemplada para atender à nova geração de sensores;
- a determinação da incerteza de medição ($\pm 0,3$ hPa) da técnica de monitoramento do *IWV* (*Integrated Water Vapor*) utilizando-se sensores meteorológicos e correlação com os valores de *IWV* obtidos indiretamente através de *GPS* e
- a interação multidisciplinar entre instrumentistas, metrologistas, meteorologistas, e multi-institucional (INPE, INMETRO, UNESP e USP).

Diante dos resultados, conclui-se que a metodologia utilizada para a comprovação metrológica nesta aplicação pode ser estendida para outros projetos de pesquisa ambiental no país, garantindo-se assim a confiabilidade das informações obtidas através do monitoramento das diversas variáveis meteorológicas.

AGRADECIMENTOS

Às equipes do LAPRE/Inmetro e LIM/CPTEC, aos pesquisadores da UNESP, USP e INPE/CPTEC. À FAPESP pelo apoio financeiro na implantação da rede (processo No. 2006/04008-2), ao MCT, FINEP, INPE e INMETRO pelo incentivo na implantação da área de Metrologia Ambiental e à CAPES pela disponibilização das normas técnicas.

“Bons dados não são necessariamente excelentes, é essencial conhecer e evidenciar a qualidade deles”.

OMM – Organização Meteorológica Mundial

REFERÊNCIAS

- [1] L. F. Sapucci, J. F. G. Monico, L. A. T. Machado, D. L. Herdies e R. A. F. Souza. “Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real”, Revista Brasileira de Geofísica, vol. 25(3), pp. 267-279, 2007.
- [2] SPILKER Jr JJ. 1996. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON BW & SPILKER Jr JJ (Ed.). Global Positioning System: Theory and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, p. 517–546.
- [3] DAVIS JL, HERRING TA, SHAPIRO I, ROGERS AE & ELGENED G. 1985. Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length. Radio Sci., 20: 1593–1607.
- [4] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING TA, ROCKEN C, ANTHES RA & WARE RH. 1992. GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. J. Geophys. Res., 97: 15787–15801.
- [5] BEVIS M, CHISWELL G, HERRING TA, ANTHES R, ROCKEN C & WARE RH. 1994. GPS Meteorology: mapping zenith wet delays into precipitable water. J. Appl. Meteor., 33: 379–386.
- [6] Sapucci, L. F., Machado, L. A. T., Monico, J. F. G. Modelagem da temperatura média troposférica no Brasil para quantificação do IWV utilizando GPS In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. Anais do CBMet, 2004.
- [7] Vaisala Oyj. Vaisala Combined Pressure, Humidity and Temperature Transmitter, PTU300. User’s Guide. Helsinki, Finland, 2009.
- [8] World Meteorological Organization, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”, seventh edition, 2008
- [9] ABNT, NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para competência de laboratórios de calibração e ensaios. 2005.
- [10] INMETRO. VIM 2008 - Vocabulário Internacional de Metrologia - Conceitos Fundamentais e Gerais de Termos Associados. Primeira edição brasileira do VIM 2008 (tradução autorizada pelo *BIPM* da terceira edição internacional do *VIM – International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms – JCGM 200:2008*). 2009.
- [11] M. A. A. Santana, P. L. O. Guimarães, R. Gielow, E. M. Arraut, A. A. S. Michiles, L. Hess. “Calibração de *dataloggers iButtons* utilizados no monitoramento de florestas inundáveis na Amazônia Central”, ENQUALAB 2010, Congresso da Qualidade em Metrologia, REMESP, São Paulo, Brasil, maio de 2010.
- [12] RODRIGUES, L. N. Metrologia das radiações ionizantes - Metrology of Ionizing Radiation. Revista Brasileira de Física Médica. 2009;3(1):69-75. Associação Brasileira de Física Médica.
- [13] SANTANA, M. A. A. ; GUIMARAES, P. L. O. ; Thomaz Jr., J. C. ; Arlino, P. R. A. . Rastreabilidade metrológica e os critérios de aceitação para a instrumentação meteorológica/ambiental. Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia, vol. 32,no.1, abril de 2008. ISSN 1676-014X.
- [14] DIN. DIN 28418 – Standard Method for Vacuum Gage Calibration by Direct Comparison with a Reference Vacuum Gage. Deutsches Institut für Normung, 1976.
- [15] International Organization for Standardization. ISO GUM *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. ISO, Geneva, 1995.
- [16] EA / Inmetro; SBM. Expressão da incerteza de medição na calibração. Primeira edição brasileira em língua portuguesa do EA-4/02. Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT, SBM, 1999. 34p.
- [17] SANTANA, M. A. A.; CARNEIRO, R. L. C.; NERES, N. L.; GUIMARÃES, P. L. O.; NOBRE, C. A.; ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; TATSCH, J. D.. Calibração e aplicação de protótipos de um sistema de coleta de dados ambientais para medir gradientes de temperatura, umidade relativa e pressão em perfil vertical dentro do dossel de floresta de mata Atlântica. Enqualab 2010, São Paulo, maio de 2010.

“A opinião dos autores não reflete necessariamente as opiniões das instituições inseridas neste trabalho.”