ENQUALAB-2010 – Congresso da Qualidade em Metrologia
Rede Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP
25 a 27 de maio de 2010, São Paulo, Brasil

PESQUISA APLICADA E IMPLEMENTAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DE SENSORES E MEDIDORES DE CHUVA

Márcio A. A. Santana [1, 2], *Patrícia L. O. Guimarães* [1], *Claudomiro M. Silva* [1, 3]

[1] INPE / CPTEC / Laboratório de Instrumentação Metereológica / Metrologia Ambiental,
Cachoeira Paulista - SP, Brasil, telefone: (12) 3186-9344 / 9477.
[2] UNESP / CTIG – Campus de Guaratinguetá – SP.
[3] UNITAU / Mestrando em Ciências Ambientais – Taubaté – SP.

Resumo: Atualmente uma das variáveis meteorológico/ambientais que requer uma rede maior de monitoramento com medições mais exatas é a precipitação, em especial, a pluviométrica no Brasil. Diferentes tipos de sensores e medidores estão sendo testados e colocados em campo para o monitoramento da chuva, porém raríssimos são os sistemas de calibração em operação que atendem aos requisitos metrológicos. Este artigo relata a pesquisa aplicada e a implementação da verificação e da calibração de pluviômetros na área de Metrologia Ambiental do INPE/CPTEC com a devida rastreabilidade evidenciada e cálculo da incerteza de medição na calibração, visando assim garantir a confiabilidade das medidas em campo. São apresentados também resultados da calibração de pluviômetros de báscula de diferentes marcas e modelos, análise das contribuições de incertezas e as atuais e futuras iniciativas com o objetivo de otimizar o processo de coleta de dados na calibração e atualizar o sistema para atender outros tipos de pluviômetros.

Palavras chave: Metrologia ambiental, meteorologia, chuva, pluviômetro, calibração.

1. INTRODUÇÃO

1.1 O MONITORAMENTO AMBIENTAL E A CHUVA

O ciclo hidrológico conforme ilustrado na figura 1, descreve a dinâmica da água na natureza e a precipitação é um processo fundamental que inclui a chuva, o granizo, a neve que cai das nuvens ou do ar sobre o chão. A precipitação é expressa em termos da profundidade vertical de água (ou água equivalente no caso de formas sólidas) para a qual cobriria uma projeção horizontal da superfície da Terra. As unidades de precipitação pluviométrica são: profundidade linear (quantidade ou acumulado), normalmente reportada em milímetros, resultante das seguintes expressões: l/m² (volume / área) ou kg/m² (massa / área) e a intensidade (ou taxa de chuva) é expressa em medida linear por tempo de unidade, normalmente milímetros por hora (mm/h). [1, 2 e 3]. Os índices pluviométricos normalmente referem-se à quantidade e intensidade de chuva em determinado local e específico período de tempo [4]. Há também sistemas que informam a distribuição dos tamanhos das gotas da chuva.

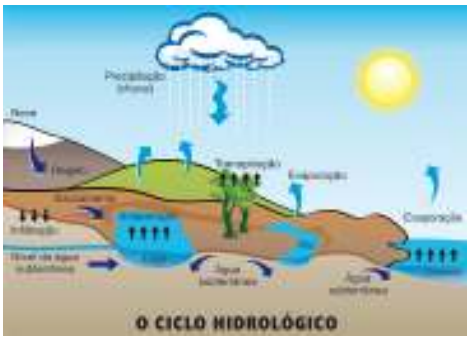

Fig.1. Ciclo hidrológico (ilustração: Rogério Castro / AEB Escola).

No Brasil, atualmente existem mais de cinco mil estações de monitoramento ambiental nas configurações meteorológicas, agrometeorológicas, hidrometeorológicas, hidrológicas, entre outras [5]. Os dados do monitoramento da precipitação, ou seja, as medidas de quantidade e intensidade de chuva são utilizadas por importantes setores da sociedade em geral, tais como abastecimento de água, aeroportuário, agronegócio, defesa civil, energético, entretenimento, industrial, etc.

Além destas estações, técnicas de observação de precipitação baseada em sensoriamento remoto fornecem informações no domínio espaço-tempo para chuva, porém é requerida a utilização de pluviômetros calibrados para *calibração* e validação das informações destes sistemas [6].

Sistemas de monitoramento ambiental também requerem conformidade aos requisitos metrológicos, porém a chuva é uma das variáveis pouco difundidas na área de Metrologia no País.

Este artigo traz um breve histórico sobre os resultados iniciais de uma das primeiras pesquisas aplicadas na área de Metrologia Ambiental do LIM – Laboratório de Instrumentação Meteorológica, pertencente ao INPE/CPTEC – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Neste

artigo são apresentados o sistema de calibração, os métodos, a rastreabilidade, o procedimento, as fontes de incertezas, as especificações dos fabricantes e os resultados da calibração de pluviômetros do tipo báscula, utilizados em monitoramento e experimentos ambientais. São apresentadas também as recomendações da OMM – Organização Meteorológica Mundial para esta instrumentação meteorológica inserida nos sistemas de observação [1].

1.2 TIPOS DE MEDIDORES DE CHUVA

Vários são os tipos de medidores de chuva disponíveis no mercado, desde simples recipientes para coleta da chuva até sistemas por sensoriamento remoto, tais como radar, satélites, etc. Uma das classificações deve-se aos seus princípios de funcionamento, podendo ser eletromecânicos, mecânicos, piezoelétricos, ópticos, entre outros [6, 16]. Um dos pluviômetros mais simples é o Ville de Paris, constituído de um recipiente para coleta da chuva, e quando não graduado tem-se uma proveta adicional com graduação em milímetro. Campanhas educativas ensinam a construir e utilizar pluviômetros com garrafas *PETs* recicladas. Exemplos destes medidores são mostrados na figura 2.

Fig. 2. Pluviômetro *Ville de Paris* (foto: *Hidrologia Ltda*) e pluviômetro didático.

Para utilização em embarcações e bóias em movimento podem ser utilizados pluviômetros constituídos de sensor por capacitância e mecanismo do tipo sifão [16].

1.2.1 Pluviômetros de báscula

O pluviômetro mais comumente utilizado é o de báscula (*Tipping Bucket Rain gauge – TBR*) ilustrado nas figuras 3 e 4. Há diferentes modelos, mas resumidamente o instrumento constitui-se de um funil ou bocal de captação e básculas que transmitem sinais elétricos a cada quantidade específica de chuva precipitada [4], normalmente enviam pulsos através de *reed switch* para um sistema de armazenamento de dados ou *datalogger*.

Diversos acessórios opcionais estão a disposição para os *TBR*s. Na figura 3 temos um modelo com termostato para derreter granizo e neve, em uma taxa que não haja evaporação e perda do material precipitado. Há modelos com telas para prevenir as folhas de árvores, dispositivos anti-pássaros, *reed switch especial e/ou* redundante, aletas para captação de chuva com vento, etc.

Fig. 3. Pluviômetro com termostato (foto: *MetOne*) e pluviômetro com sistema de pesagem (foto: *OTT*).

Fig. 4. Pluviômetro de báscula (ilustração: Érika Onodera)

Muitos fatores que ocasionam erros ou influenciam nas medidas podem ser observados nos pluviômetros [6, 7], tais como: sua construção; desenho que permite redução de turbulência; ângulos internos que não favorecem o respingo da chuva para fora do recipiente de captação; utilização de material com baixo coeficiente de atrito no seu revestimento interior impedindo a retenção da amostra; emprego de alumínio e/ou *ABS* na sua fabricação; básculas revestidas em aço inoxidável; utilização de rolamentos adequados que tem desgaste e atrito reduzidos; nível de bolha acoplado para auxiliar na instalação; etc.

1.2.2 Outros tipos de medidores

Os pluviômetros do tipo disdrômetro (por impacto ou óptico) permitem medir o total, a intensidade e o tamanho das partículas da precipitação.

O custo dos pluviômetros varia de acordo com a resolução, tipo, acessórios, etc em não há registro de laboratórios comerciais que realizam calibração de pluviômetros no Brasil.

Fig. 5. Disdrômetro óptico e estação meteorológica compacta com disdrômetro por impacto (fotos: JCTM e Vaisala)

1.4.1 REQUISITOS METEO-METROLÓGICOS

Diversas variáveis meteorológicas influenciam as medidas de precipitação, entre elas a temperatura e o vento e para buscar respostas às questões ambientais, o monitoramento requer um maior número de medidas com elevado nível de confiabilidade. A necessidade da homogeneização das medidas na investigação, bem como o estabelecimento de critérios para avaliar a qualidade dos dados é mais do que evidente [12].

Recomendações e requisitos básicos das áreas de meteorologia [1] e metrologia [8] para a instrumentação incluem: a realização da calibração, verificação e recalibração de toda a instrumentação com rastreabilidade evidenciada; a avaliação da incerteza de medição e a aceitação ou rejeição dos instrumentos caso não estejam adequados ao uso [9]. É através da rastreabilidade que se obtém a garantia que a unidade de uma variável tenha o mesmo valor em qualquer lugar do mundo [10] e a incerteza de medição é um parâmetro não negativo (qualitativamente) que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [11]. A figura 6 ilustra um diagrama de rastreabilidade voltado para a área de instrumentação meteorológica.

Fig. 6. Diagrama de rastreabilidade

A proposta deste trabalho é incentivar a Pesquisa Aplicada na área de Metrologia Ambiental através do desenvolvimento e validação de metodologias de calibração e de ensaios e disseminar a necessidade da calibração inicial, da verificação e da recalibração de todos os medidores, incluindo os sensores remotos, sendo a precipitação uma das variáveis mais importantes para a vida humana.

1.4 VERIFICAÇÃO, AJUSTE E CALIBRAÇAO DE PLUVIÔMETROS

Os termos ajuste, verificação e calibração, assim como outros aplicados à instrumentação meteorológica são definidos no *VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais de Termos Associados*, recomendado pela *OMM*. Porém no País, em geral, deposita-se excessiva credibilidade nas medidas de equipamentos novos ou fornecidos por tradicionais representantes, deixando-se de realizar procedimentos básicos que garantem o funcionamento normal destes sensores.

1.4.1 Ajustes

Para realizar um ajuste inicial costuma-se injetar água com uma seringa nas básculas e através de parafusos do tipo fim de curso ajustam-se os limites para o percurso da gangorra, permitindo-se que cada báscula tenha volumes idênticos. Os ajustes também denominados "calibração estática" por alguns autores, assume que o volume necessário de água para causar uma basculada pode ser independente da intensidade, sendo definido como resolução do pluviômetro [12], porém há trabalhos que os erros variam de 10 a 30 % para intensidades acima de 25 mm/h e há incremento não linear para intensidades maiores de chuva [13].

Fig. 7. Sistemas para verificação (fotos: *Rain Gauge Calibrator da Climatronics e Field Calibration Device (FCD) da Hydrological*)

1.4.2 Verificação em campo

Para uma simples verificação em campo, pode-se utilizar um volume conhecido e verificar a contagem de saída. Recomenda-se que se faça em diversas taxas de precipitação. No mercado existem dispositivos como o *Rain Gauge Calibrator*, fabricado pela *Climatronics Corporation* e o *TB320 Field Calibration Device for Tipping Buckets da Hydrological Services*, conforme ilustrados na figura 7. O primeiro dispositivo conta com um recipiente para armazenamento de 946 ml, um *dispenser* com orifícios intercambiáveis, para variar a taxa de precipitação e uma seringa de 10 ml para o teste estático, e o TB320 tem recipiente para volume de 653 ml de água com precisão de +/- 2%, conforme especificação do fabricante [14].

1.4.3 Calibração

A calibração de pluviômetro do tipo báscula costuma ser demorada e trabalhosa [12], pois consiste basicamente em comparar a entrada, saída ou entrada/saída de água (ou chuva) com as medidas realizadas pelo pluviômetro [17, 18]. A maioria dos métodos pesquisados não evidencia a rastreabilidade dos padrões de trabalho ou de referência

utilizados na calibração. Alguns sistemas realizam a calibração em duas etapas: a) levantamento do fluxo de água (calibração da bomba) e b) calibração do pluviômetro, porém mesmo com sistemas automatizados, a calibração em 10 pontos consome cerca de 8 horas [12]. Um exemplo de sistema de calibração é mostrado na figura 8, onde um dispositivo conectado a uma fonte de água distribui um volume específico para um ou dois *TBRs* e indica o número de basculadas [14].

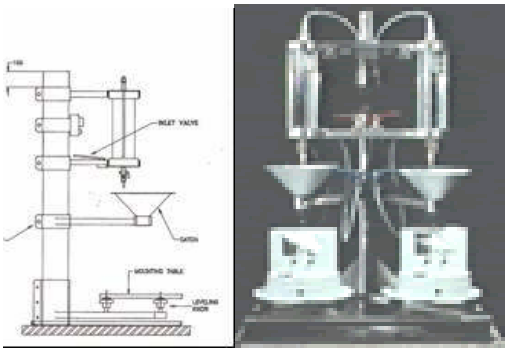

Figura 8 – Sistema de Calibração (foto: Hydrological)

A OMM tem realizado intercomparações de medidores de chuva, como a *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* no período de outubro de 2007 a abril de 2009, em *Vigna die Valle*, Itália. Foram realizados diversos testes em campo e laboratório para pluviômetros de diversas marcas, modelos e diferentes princípios de funcionamento. Para um conjunto de 24 pluviômetros, os erros relativos de intensidade ($I_{MEDIDA} - I_{REFERÊNCIA}$) variaram de –18 a 7,5 % para uma faixa de intensidade de 100,6 a 227,4 mm/h utilizando-se o *Portable Field Calibrator*, equipamento desenvolvido pelo *DICAT/ Laboratory of the University of Genoa* [15]

Mesmo realizando-se a calibração inicial, verificação, ajuste (se necessário) e recalibração, é fundamental a padronização da instalação em campo quanto à altura, ao nivelamento, às distâncias dos obstáculos, etc e primordial a limpeza periódica dos pluviômetros [1], para que o oneroso monitoramento de chuva seja eficiente.

2. RESULTADOS

2.1 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE PLUVIÔMETROS

A metodologia prática proposta utilizada na calibração baseia-se na comparação indireta das medidas do pluviômetro aos padrões de trabalho (*datalogger* e balança), utilizando-se um sistema de circulação de água como meio de calibração. O procedimento de calibração tem como referência a norma NBR/ISO/IEC 17025:2005 (Requisitos gerais para competência de laboratórios de calibração e ensaios) [8].

Para a quantidade e intensidade de chuva foram realizadas séries de 5 (cinco) medidas para cada ponto de calibração, sendo informado o valor médio. 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* [19] e EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração [20].

Para os cálculos de incertezas, foi considerada como mensurando a variável (grandeza) quantidade de chuva Q_x submetida às medições, ou seja, para cada mensurando ou grandeza de saída Y que depende de uma série de grandezas de entrada X_i (i=1, 2,..., N), temos:

$$Y=f(X1, X2, ..., N) \quad (1)$$

A função de medição f representa o procedimento de medição e o método de avaliação. A função de medição é a função de grandezas, que a partir de valores conhecidos das grandezas de entrada se obtém um valor medido da grandeza de saída através de cálculo utilizando-se um no modelo (matemático) de medição [9]. O modelo matemático de medição ou simplesmente modelo de medição é a relação matemática entre todas as grandezas que, sabidamente, estão envolvidas numa medição.

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

$$x_i(y) = c_i\, u(x_i) \quad (2)$$

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

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i}\Big|_{X_i = x_i \ldots X_N = x_N} \quad (3)$$

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

A incerteza padrão na calibração do pluviômetro obteve-se através da Equação 4. No modelo adotado a incerteza u tem-se associadas às incertezas do tipo A e as do tipo B. É considerado tipo A, incerteza devido análise estatística de uma série de observações e tipo B, as incertezas baseadas em outros conhecimentos científicos sobre o processo específico de medição [13].

$$u^2(y) = \sum c_i^2\, u^2(x_i) \quad (4)$$

No Certificado de Calibração, teremos para cada ponto de calibração: a intensidade média calculada, *I* [mm/h]; o número de basculadas, *B*; quantidade esperada, Q_E [mm]; quantidade medida, Q_M [mm]; a correção ou erro ($Q_M - Q_E$), E [%] e incerteza expandida de medição, *U* [%] descritas nas Equações 5, 6, 7 e 9. No Certificado de Calibração também são reportados o procedimento de calibração e a rastreabilidade de medição.

$$I = B / t \quad \text{[mm/h]} \quad (5)$$

$$Q_M = q_x \quad \text{[mm]} \quad (6)$$

$$Q_E = q_s = V / res \quad \text{[mm]} \quad (7)$$

$$E = 100 * (Q_M - Q_E) / Q_M \quad \text{[\%]} \quad (8)$$

Onde t = período de tempo em hora; V = volume de água em mm^3 e res = resolução da báscula.

A quantidade Q_X do objeto sob calibração (*pluviômetro*) para cada ponto de calibração é obtida pela Equação 9.

$$Q_X = \overline{q}_x + (\overline{q}_s + \sum_{j=1}^{3} \sigma q_{s_j} + \sum_{j=1}^{4} \sigma q_{m_j} - \overline{q}_x + \sigma q_{x_1} + \sigma q_{pm} + \sigma q_d + \sigma q_b) \quad (9)$$

Onde:

qs = quantidade esperada ou quantidade de referência;

δqs_1 = correção de quantidade obtida a partir da calibração do padrão (balança);

δqs_2 =correção de quantidade devido à resolução do padrão (balança);

δqs_3 = deriva do padrão (balança) desde sua última calibração;

δqm_1= correção da quantidade obtida a partir da calibração do padrão (*datalogger*);

δqm_2= correção da quantidade devido à resolução do padrão (*datalogger*);

δqm_3= deriva do padrão (*datalogger*) desde sua última calibração (especificação fabricante);

δqm_4= variação da quantidade (*datalogger*) em relação à variação da temperatura (condições ambientais do laboratório 23+/- 2 ^oC).

qx= quantidade medida do objeto sob calibração;

δq_{x1} = correção da quantidade devido à resolução do objeto sob calibração;

δq_{pm}= correção da quantidade devido ao modelo matemático para calibração de pluviômetro pelo método gravimétrico de saída.

δq_d= variação da quantidade em relação à variação da densidade da água.

δq_b= variação da quantidade em relação à variação da área de captação dos pluviômetros.

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

$$\overline{q}_s = \sum_{j=1}^{\upsilon+1} q_{s_j} \Big/ \upsilon + 1 \quad (10)$$

e

$$\overline{q}_x = \sum_{j=1}^{\upsilon+1} q_{x_j} \Big/ \upsilon + 1 \quad (11)$$

Teremos analogamente às Equações (10) e (11) para $\overline{i}_x$.

Para a incerteza expandida, teremos;

$$U = k \,.\, u(Q_x) \quad (12)$$

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

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

$$\nu_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^{N} \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (13)$$

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

2.2 PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DE PLUVIÔMETROS

Para quantificar a contribuição da variação da quantidade em relação à variação da área de captação dos pluviômetros, δq_b, adotou-se inicialmente +/- 0,3 mm de acordo com as especificações dos fabricantes, e posteriormente foi elaborado um procedimento de calibração de bocais de pluviômetros pela equipe da área de Metrologia da AEB – Aços Especiais Brasil / Gerdau de Pindamonhangaba-SP, dentro de um Programa Interlaboratorial com a área de Metrologia Ambiental do INPE.

Fig. 9 - "Calibração" do bocal de captação (Foto: AEB-Gerdau/Pindamonhangaba)

Para as medidas do diâmetro dos bocais, o procedimento prático adotado baseia-se na comparação do diâmetro do bocal com blocos padrões conhecidos, utilizando-se de um paquímetro digital. Realizou-se a montagem dos blocos padrões próximo à medida do bocal do pluviômetro, no qual o paquímetro foi devidamente referenciado. Foram realizadas séries de 3 medidas nas posições adotadas 0^o e 90^o com o auxílio de um transferidor de ângulos, sendo calculado o valor médio do diâmetro para cada uma dessas posições. As condições ambientais do laboratório durante a realização das calibrações foram: temperatura do ar 20,4 ± 0,3 °C, umidade relativa do ar 57,4 ± 10 % u.r.

Para precipitação (acumulado e intensidade) utilizou-se um sistema de calibração composto por: *Rain Gauge Test Equipment Theodor Friedrich & CO., 8800.0000 BG;* datalogger Campbell*, CR1000*; balança Marte, AC10k; *volumetric liquid flow meter Alicat Scientific*, L-1LPM-D, *além de rotâmetro,* vidraria*, termômetro para medir a temperatura da água e diferentes pluviômetros,* conforme mostrado na figura 10. O programa foi editado e compilado para o *datalogger* utilizando-se o *software Loggernet* da *Campbell Scientific*, que também serviu para a coleta de dados, através da interface de comunicação RS-232C (*Recommended Standard* 232) de um computador do tipo PC. As condições ambientais do laboratório durante as calibrações foram: temperatura do ar 23 ± 2 °C, umidade relativa do ar 50 ± 10 % e pressão atmosférica 945 ± 5 hPa.

Os pluviômetros não foram ajustados, pois assim os dados do monitoramento podem ser corrigidos e comparados.

Fig. 14 – Sistema de calibração de pluviômetros

Os padrões de trabalho/referência têm rastreabilidade à RBC – Rede Brasileira de Calibração. A balança foi calibrada no laboratório de Metrologia Mecânica do INPE/LIT e a calibração do datalogger foi resultado da iniciativa das equipes do LIM e do laboratório de Metrologia Elétrica e Tempo e Frequência do INPE/LIT [5].

2.3 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE PLUVIÔMETROS

A Tabela 1 mostra os resultados das calibrações/verificações dos bocais de quatro pluviômetros, realizadas na área de Metrologia da Gerdau, em março de 2010.

Tabela 1. Resultados da calibração dos bocais (diâmetros)

Pluviômetro	Cota	Valor nomimal [mm]	Valor Medido [mm]	Incerteza [mm]
Davis, Vantage Pro, n/s:B40923A96A	0º	165	164,613	0,022
	90º		164,370	0,017
Oregon, WMR918/RGR918, n/s:392860041	0º	100	99,663	0,022
	90º		99,726	
Sutron, 5600-0420-2, n/s:93029	0º	210	207,126	0,022
	90º		206,903	
Vaisala, 444A, n/s: 2419	0º	200	199,843	0,022
	90º		200,126	

Em quantidade e intensidade foram calibrados pluviômetros das marcas *Handar/Vaisala, Hydrological, Qualimetrics e Squitter* na área de Metrologia Ambiental do LIM, no período de abril de 2008 a fevereiro de 2010, totalizando 15 unidades. Na Tabela 2 temos as especificações dos fabricantes dos modelos testados ou em teste.

A quantidade esperada Q_E variou de 0,25 a 35,20 mm e Q_M de 0,22 a 34,16 mm para todos os pluviômetros e o erro ou a correção (Q_E - Q_M) variou de -15,28 a 10,01 %, em toda faixa para intensidades de 7,34 a 270,02 mm/h. A Tabela 3 mostra resumidamente as contribuições significativas na calibração de quantidade de chuva.

Os gráficos das figuras 11 e 12 mostram em mm a resposta da quantidade medida *versus* esperada para pluviômetros com básculas de 0,25 e 0,254 mm. O gráfico da figura 13 mostra os erros (Q_E - Q_M) na faixa calibrada e a figura 14 representa os erros de alguns pluviômetros em diferentes intensidades de chuva. Os valores das incertezas de medição para os *pluviômetros* calibrados estão representados no gráfico da figura 15.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos TBRs (fonte: fabricantes)

Marca, modelo	Diâmetro do bocal	Erro	Resolução
Handar/ Vaisala, 444A	200 mm	Para 50 mm/h: +/- 0,02 in (< 1 in); +/- 0,5 mm (< 20 mm); +/- 3% do total (> 1 in); +/- 3% do total (> 20 mm).	0,010 inch
Hydrological TB3/TB4	200 mm	+/- 2 % (0-2500 mm/h)	0,01"; 0,1; 0,2; 0,5 ou 1,0 mm
Oregon, WMR918/ PCR918N	100 mm	-	1 mm
Qualimetrics, 6011A	8"	0,5 % em 0,5"/h	0,01"
Squitter, S2163A	15,2 cm	1% (até 200 mm/h)	0,25 mm
Sutron, 5600-0420-2	210 mm	2 % para I=50 mm/h	0,2 mm

Tabela 3. Estimativas e contribuições de incerteza para a calibração de pluviômetro

Grandeza X_i	Estimativa x_i [mm]	Distribuição de probabilidade	Contribuição para a incerteza @ k=1,0 $u_i(y)$ [%]
δqs_1	-	normal	0,01 a 2,48
δqs_2	-	retangular	0,01 a 1,28
qx	0,22 a 34,16-	t-student	0,14 a 5,21
δq_{x1}	-	retangular	*
δq_d	-	retangular	0,29
δq_b	-	retangular	0,17
Qx			0,36 a 5,34

* Se considerarmos a resolução da báscula (0,25 ou 0,254 mm) como uma contribuição com distribuição de probabilidade retangular, teremos para a faixa de 1 a 80 basculadas, a incerteza de 58 a 1 %, respectivamente, para k=2,00@95,45%.

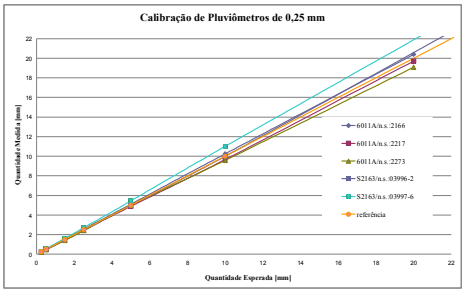

Fig. 11. Resposta em quantidade de chuva para *TBR*s de 0,25 mm

Os pontos de calibração devem ser selecionados conforme recomendações da OMM, ou seja, preferencialmente na

faixa das condições climatológicas do local onde será utilizado o instrumento ou de 0 a 500 mm, 0,02 a 2000 $mm.h^{-1}$. Os instrumentos, se possível, devem ter: resolução de 0,1 mm e 0,1 $mm.h^{-1}$; incerteza requerida de 0,1 mm para ≤ 5mm e 2% para > 5mm ou incerteza aceitável de 5% ou 0,1 mm (a maior dentro da faixa) e 1 minuto como tempo para a média da intensidade [1]

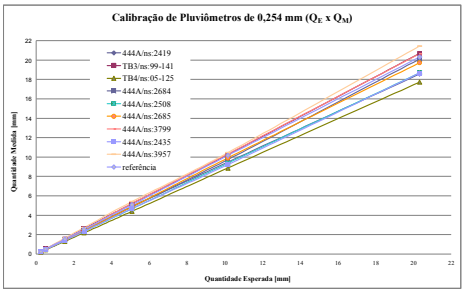

Fig. 12. Resposta em quantidade de chuva para *TBRs* de 0,254 mm

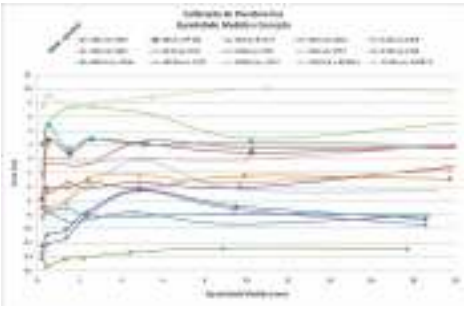

Fig. 13. Q_M [mm] *versus* Erro [%]

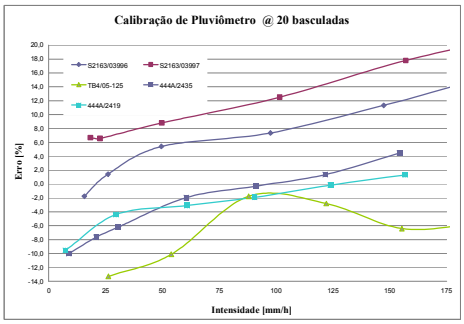

Fig. 14. Intensidade versus Erro $(Q_E - Q_M)/Q_E$ durante a calibração

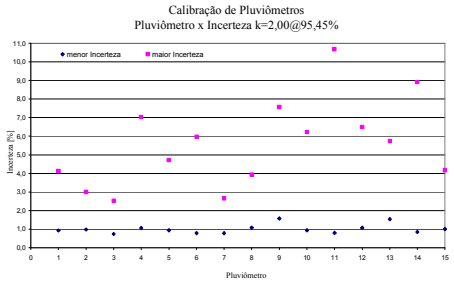

Fig. 15. Pluviômetro *versus* Incertezas

As figuras 16, 17 e 18 mostram alguns pluviômetros calibrados em utilização nos projetos *LBA, Oikos* e no monitoramento do arquipélago São Pedro São Paulo. Outros *TBR*s foram calibrados para importantes projetos de pesquisa e monitoramento ambientais, tais como o SONDA e MARSP. Os pluviômetros utilizados nas bóias do projeto *PIRATA* ainda são calibrados na *NOAA*, Estados Unidos.

Fig. 16. Pluviômetro instalado no topo da torre micrometeorológica (63m de altura), localizada no sítio de São Gabriel da Cachoeira - AM, dentro do Parque Nacional Pico da Neblina (foto: INPA/Projeto LBA).

Fig. 17. TBR instalado em Lorena-SP em um projeto em parceria Fehidro/Oikos/INPE/ICMBio (foto: Oikos)

Fig. 18. Pluviômetro adaptado para o arquipélago São Pedro São Paulo, utilizado pelo INPE/CPTEC/Oceanografia (adaptação e foto: LIM/Osvaldo)

3. DISCUSSÕES

Vimos que cada instrumento calibrado tem um comportamento específico, e os resultados caracteriza-se como assinaturas particulares.

Na calibração de *TBRs* o desbalanceamento das básculas aumenta a contribuição da incerteza do tipo A, ou seja, devido à repetitividade das medidas do objeto sob calibração há incremento do desvio padrão experimental.

Atualizações do sistema devem ser realizadas para diferentes métodos de calibração e para simular os ambientes em que a instrumentação meteorológica é utilizada. Outros desafios são: a implementação de calibração de pluviômetro/disdrômetros do tipo piezoelétrico e ópticos e a participação em programas de comparações interlaboratoriais de instituições nacionais e internacionais.

4. CONCLUSÃO

Com esta pesquisa aplicada na área de Metrologia Ambiental, o monitoramento de chuva começa ter a disposição a instrumentação calibrada de acordo com as recomendações e requisitos das áreas meteorológica e metrológica, fundamental também para a calibração e validação de sistemas remotos. Com os pluviômetros calibrados, as medidas dos dados ambientais podem ser corrigidas e sua rastreabilidade evidenciada. Diversas outras variáveis estão correlacionadas ou são influenciadas direta e/ou indiretamente com a variável precipitação pluviométrica, tais como: umidade relativa do ar, parâmetros da qualidade da água e do ar, fluxo de calor e umidade do solo, entre outras.

Os resultados das verificações e calibrações dos pluviômetros do tipo de báscula demonstraram que os testes devem ser realizados em uma grande faixa de trabalho (maior número de basculadas e de intensidade de chuva) necessitando de um período de tempo relativamente longo para a calibração, implicando que o perfil do Metrologista deva atender este requisito.

Com as calibrações, outras questões devem começar a ser estudadas e respondidas com ensaios e recalibrações em campo e laboratório, tais como o monitoramento e análise dos parâmetros físico-químicos, tais como temperatura e pH da água de chuva.

AGRADECIMENTOS

À equipe do LIM, aos pesquisadores do INPE, ao Fehidro no apoio ao projeto "Estudo da influência da recuperação e conservação ambiental na melhoria da água em micro bacias do rio Paraíba do Sul - SP" em parceria com Instituto Oikos de Agroecologia, INPE e ICMBio-Flona Lorena, à Squitter pela disponibilização de um pluviômetro para calibração/qualificação, à Gerdau Pindamonhangaba pela participação no I Programa Interlaboratorial INPE x GERDAU na área de Metrologia Ambiental, à Difusão do Conhecimento/CCST pelo livro AEB/Mudanças Climáticas, ao CNPQ, INMETRO, INPA, INPE, FINEP, MCT e à Metrologia do INPE/LIT pelo incentivo na implantação da área de Metrologia Ambiental, à CAPES e ao IME/CTEx pela disponibilização das normas técnicas e em especial ao físico Celso Thomaz pelo incentivo e desempenho em viabilizar equipamentos para o laboratório de pluviometria.

" ... são as águas de março fechando o verão ... (?)
é a promessa de vida no teu coração
... é pau, é pedra, é o fim do caminho..."

Tom Jobim

REFERÊNCIAS

[1] *World Meteorological Organization*, "*Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", seventh edition*, 2008.

[2] OLIVEIRA, Gilvan S., SILVA, Neilton F. HENRIQUES, Rachel, Coleção Explorando o Ensino: Mudanças Climáticas. Volume 13. MEC, SEB; MCT e AEB. Brasília, 2008.

[3] LIMA, W. P. Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.Piracicaba,SP: ESALQ, 2008.

[4] Revista Nova Escola. O que é e como se calcula o índice pluviométrico? Edição 223, Junho 2009.

[5] M. A. A. Santana, P. L. O. Guimarães, Carlos T.Assumpção, Michelly K. A.Santana, Jorge L. M. Nogueira, Paulo R. A. Arlino. "A demanda, os requisitos e a calibração de dataloggers utilizados no monitoramento ambiental no Brasil", METROLOGIA 2009, Salvador-BA, novembro de 2009.

[6] *L.G. Lanza and L. Stagi. Certified accuracy, standards and calibration in precipitation measurements. Geophysical Research*, Vol. 9, 06162, 2007. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU2007-A-06162. *European Geosciences U*nion 2007.

[7] *G. J. G. Upton and A. R. Rahimi. On-line detection of errors in tipping-bucket raingauges. Journal of Hydrology* Volume 278, *Issues* 1-4, 25 *July* 2003, *Pages* 197-212.

[8] ABNT, NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para competência de laboratórios de calibração e ensaios. 2005.

[9] M. A. A. Santana, P. L. O. Guimarães, J. C. T. Júnior, P.R. A. Arlino "Rastreabilidade Metrológica e os Critérios de Aceitação para a Instrumentação Meteorológica / Ambiental", ENQUALAB 2008, São Paulo-SP, junho de 2008.

[10] Santana, Márcio A. A., Guimarães, Patrícia L. O., Gielow, Ralf, Arraut, Eduardo M., Michiles, Alessandro A. S., Hess, Laura. Calibração de dataloggers iButtons utilizados no monitoramento de florestas inundadas na Amazônia central. Enqualab 2010, São Paulo. SP.

[11] 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.

[12] *M. D. Humphrey, J. D. Istok, J. Y. Lee, J. A. Hevesi, and A. L. Flint, A New Method for Automated Dynamic Calibration of Tipping-Bucket Rain Gauges, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 14, *Issue* 6 (*December 1997*), *Article*: pp. 1513–1519.

[13] *WMO. "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", fifth edition*, 1983.

[14] *Hydrological Services PTY LTD. Instruction Manual Laboratory Calibration Unit, model TB340.*

[15] *E. Vuerich, C. Monesi, L.G. Lanza. L. Stagi (Italy) e E. Lanzinger (Germany). Instruments And Observing Methods Report No. 99. WMO Intercomparison of rainfall intensity gauges. Vigna die Valle, Italy. October 2007 to april 2009. WMO, 2009.*

[16] *Serra, Y.L., P.A'Hearn, H.P. Freitag, and M.J. McPhaden, 2001: ATLAS self-siphoning rain gauge error estimates. J. Atmos. Ocean. Tech.,18, 1989-2002.*

[17] *Brandt, Amanda. Precipitation Monitoring Using Tipping Bucket RainGauges.DCN No. 1 toDocument No. IPLV-032, Revision 3,. University and Community College System of Nevada. December of 2003.*

[18] *Paul N Huysing. Instrument Test Report Number 630. Calibration of a Hydrological Services TB-3 TBRG. Physics Laboratory, OEB. 5 April, 1993.*

[19] *International Organization for Standardization*. ISO GUM *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Geneva,* 1995.

[20] EA / Inmetro; SBM. Expressão da incerteza de medição na calibração. Primeira edição brasileira do EA-4/02. Rio de Janeiro: INMETRO, ABNT, SBM, 1999. 34p.

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