

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 DOSEL DE FLORESTA DE MATA ATLÂNTICA

Márcio Antonio Aparecido Santana¹ - marcio.santana@cptec.inpe.br, Rogério Lessa de Castro Carneiro² - rogerio.carneiro@cptec.inpe.br, Nilson Luiz Neres³ - nilsonlu@usp.br, Patricia Lúcia de Oliveira Guimarães¹ - patricia.guimaraes@cptec.inpe.br, Carlos Afonso Nobre⁴ - carlos.nobre@inpe.br, Humberto Ribeiro da Rocha³ - humberto@model.iag.usp.br, Helber Custodio de Freitas³ - helbercf@model.iag.usp.br, Jônatan Dupont Tatsch³ - jonatan@model.iag.usp.br

¹ INPE / CPTEC / LIM, Cachoeira Paulista - SP, Brasil, telefone: (12) 3186-9344 / 9477.

² INPE / CPTEC, Cachoeira Paulista - SP, Brasil, telefone: (12) 3186-9538.

³ USP / IAG, São Paulo - SP, Brasil, telefone: (11) 3091-2746

⁴ INPE / CCST, São José dos Campos - SP, Brasil, telefone: (12) 3186-9400.

Resumo: Cada vez mais as pesquisas ambientais requerem expressivas quantidades de dados meteorológicos com alto grau de exatidão. Sistemas convencionais têm custo elevado e nem sempre o *hardware* e/ou o *software* são flexíveis ou modulares. A partir da necessidade de monitorar gradientes verticais de temperatura, umidade relativa e pressão em uma floresta de Mata Atlântica surgiu a iniciativa do desenvolvimento de um protótipo para um sistema de coleta de dados ambientais alternativo. Optou-se pela utilização de componentes de fácil aquisição no mercado. O sistema é composto por: microcontrolador de 8 bits, 12 Kbytes de memória *Flash*, 2 kbytes de memória EEPROM, oscilador de 24 MHz, 32 kbytes de memória externa, 8 canais com conversor analógico digital de 14 bits e interface de comunicação *USB*, possibilitando armazenamento em tempo real dos dados diretamente em um dispositivo tipo *pen drive*. Este trabalho apresenta as etapas de projeto, calibração e os testes preliminares em campo. Com os resultados da calibração de seis protótipos nas variáveis: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar foi possível avaliar o sistema, assim como as incertezas, a confiabilidade das medições e o atendimento aos requisitos metrológicos e meteorológicos.

Palavras chave: Metrologia ambiental, meteorologia, dados ambientais, *datalogger*, calibração.

1. INTRODUÇÃO

1.1. A Pesquisa Ambiental

Os cientistas há muito tempo estão interessados em estudar o dossel, pois estimam que 70 a 90% da vida na floresta tropical é encontrada sobre as árvores, fazendo com que o dossel seja o mais rico habitat para a vida das plantas e

animais. Durante o dia, o dossel, que é o resultado da sobreposição dos galhos e folhas das árvores é mais seco e mais quente do que outras partes da floresta e pode ter mais de 25 metros de altura. O dossel é apenas uma das camadas verticais da floresta tropical [1].

Na pesquisa ambiental, em andamento, espera-se quantificar algumas das componentes físicas da vegetação de Floresta Ombrófila de Mata Atlântica, possibilitando assim representar adequadamente alguns dos aspectos funcionais do ecossistema com maior acurácia, auxiliando desta maneira na descrição de alguns parâmetros necessários em modelos de previsão numérica de tempo e clima.

O experimento micrometeorológico visa determinar os padrões das circulações locais do tipo brisa vale-montanha, acima e abaixo das copas das árvores, na tentativa de verificar a formação de células de circulação induzidas termicamente. O monitoramento ambiental está sendo realizado utilizando-se mastros com 25 metros de altura, onde são efetuadas medidas acima e abaixo das copas (perfilagem). Na Figura 1 temos os sistemas de coleta de dados para as variáveis velocidade e direção do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

O sítio experimental localiza-se sobre uma microbacia com área de aproximadamente 2,5 km², altitude de 900 a 1000 m, definida entre 23°17' a 23° 24' S, e 45°03' a 45°11' W no Ribeirão das Posses, localizado no Núcleo Santa Virgínia pertencente ao Parque Estadual da Serra do Mar (*PESM*), Instituto Florestal de São Paulo, conforme ilustrado na Figura 2. O *PESM* possui a maior porção contínua preservada de Floresta de Mata Atlântica do Brasil, o relevo é constituído de escarpas com típica borda de planalto, nivelada pelo topo em altitudes de 800 a 1200 m, marcada por morros e vales, que se alternam sob amplitudes de 50 a

100 m [2]. O clima é tropical temperado, precipitação anual superior a 2.000 mm, com estação seca de junho a agosto e nunca inferior a 60 mm /mês [3].



Fig. 1. O dossel e o sistema de coleta de dados ambientais

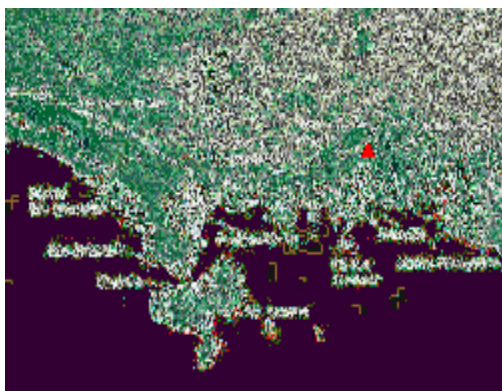


Fig. 2. Localização do Parque Estadual da Serra do Mar, Núcleo Santa Virgínia.

1.2 A estação meteorológica minilogger

O projeto de uma Estação Meteorológica denominada *Minilogger* foi desenvolvido no Laboratório do IAG/USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo) para coletar dados de pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar. Através da implementação de um dispositivo que permite o uso de memória *Flash Drive* do tipo *pen drive* para armazenar os dados coletados, a capacidade de armazenamento de dados pode ser expandida. Os valores medidos são organizados e armazenados em arquivo no formato do tipo *TXT*, sendo facilmente lidos por planilhas eletrônicas e editores de texto. Através da interface de comunicação *USB (Universal Serial Bus)*, o *Minilogger* tem um grande recurso tecnológico com uma boa relação custo-benefício. O sistema ainda é capaz de agregar outros sensores meteorológicos, tais como sensor de temperatura, umidade e fluxo de calor no solo, velocidade e direção do vento, saldo radiômetro e pluviômetro. O diagrama em blocos está representado na Figura 3.

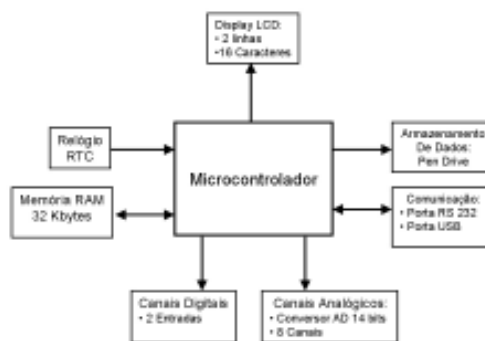


Fig. 3. – Diagrama em blocos do *Minilogger*.

Para cada “sensor” foi desenvolvida uma placa de circuito impresso independente, com seus respectivos circuitos eletrônicos amplificadores, podendo ser utilizada em outros *dataloggers* como transdutores de pressão atmosférica e de temperatura e umidade relativa do ar. As placas do termohigrômetro, barômetro e do *logger* estão ilustradas nas Figuras 4, 5 e 6. Na Tabela 1 temos as principais características do Sistema de coleta de dados *Minilogger*.

Tabela 1. Características do sistema *Minilogger*:

Dispositivo	Descrição
Termômetro	Baseado no sensor de temperatura <i>National Instruments LM35C</i> , faixa de trabalho de -40 a 110 °C e precisão de 0,5 °C @ 25 °C, conforme informações técnicas do fabricante [4].
Higrômetro	Baseado no sensor de umidade relativa do ar <i>Honeywell</i> , série <i>HIH4000</i> , opera na faixa de -40 a 80 °C e de 0 a 100% u.r. sem condensação, com precisão de 3,5 % u.r. @ 25 °C, conforme informações técnicas do fabricante [5].
Barômetro	Baseado no sensor de pressão absoluta <i>Motorola</i> , série <i>MPX4115</i> , mede pressão atmosférica entre 15 e 115 kPa, com erro máximo de 1,5 %. Este sensor pode operar com temperatura entre 0 e 85°C, conforme informações técnicas do fabricante [6].
Logger	Utiliza microcontrolador da <i>Atmel AT89S8253</i> para o gerenciamento das funções de controle das entradas analógicas e digitais, armazenamento dos dados coletados, apresentação de data e hora em <i>display</i> e comunicação com o computador. O <i>Minilogger</i> possui: <i>display LCD</i> para apresentação de data e hora; <i>Real Time Clock</i> , mantido por bateria de lítio; oito canais analógicos de 14 bits, com entrada entre 0 e 4 volts, com precisão de aproximadamente 2 mV, sendo possível sua expansão para até 16 canais [7]; memória expansível de acordo com a capacidade do <i>pen drive</i> para o armazenamento dos dados coletados, em arquivo no formato de texto; porta de comunicação <i>USB</i> , opcionalmente podendo ser alterada para os padrões <i>RS232</i> , <i>RS422</i> , ou <i>RS485</i> , se necessário e intervalo de tempo programável entre as medidas. Na versão atual, o <i>Minilogger</i> utiliza <i>pen drive</i> com capacidade maior que 8 Gbytes e o tempo entre as medidas é de 1 minuto.



Fig. 4. Placa do termohigrômetro.



Fig. 5. Placa do barômetro.



Fig. 6. Placa do *Minilogger*.

A Tabela 2 mostra a composição dos custos relacionados aos componentes de uma estação meteorológica *Minilogger*, orçada em R\$ 2.313,59. Neste valor não estão incluídos o *pen drive*, gabinete, cabos e material para montagem mecânica.

Para garantir confiabilidade aos dados obtidos durante o monitoramento pelo sistema e às argumentações científicas através da propagação destes dados, obteve-se a rastreabilidade da medição e avaliou-se a incerteza de medição do *Minilogger* através da calibração dos módulos de aquisição de dados em conjunto com os sensores envolvidos.

A “Rastreabilidade” ou “Rastreabilidade Metrológica” 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 [8, 9], ou seja, na prática a unidade °C (ou qualquer outra unidade) deve ter o mesmo valor em qualquer lugar do planeta, e isto é assegurado através da calibração em Laboratórios que tem a rastreabilidade evidenciada através da calibração dos seus padrões de referência junto aos Institutos Nacionais de Metrologia ou nas Redes de Laboratórios Acreditados.

Tabela 2. Composição de custo dos componentes do sistema

Componentes	Composição no custo final do sistema
Semicondutores	15 %
Sensor de temperatura do ar	1 %
Sensor de umidade relativa do ar	3 %
Sensor de pressão atmosférica	3 %
Soquetes para circuitos integrados	3 %
Capacitores	8 %
Resistores	2 %
Potenciômetros	5 %
Chaves	1 %
Conversor <i>USB</i>	3 %
<i>Driver</i> para o <i>pen drive</i>	5 %
Conectores	37 %
Placas de circuito impresso	14 %

A incerteza de medição é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando [10] ou parâmetro não negativo (qualitativamente) que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [8].

A proposta deste trabalho é incentivar o desenvolvimento de sistemas de coleta de dados para o monitoramento ambiental, incluindo a realização da calibração de acordo com as recomendações meteorológicas [11] e os requisitos metrológicos [12].

2. CALIBRAÇÃO DOS PROTÓTIPOS MINILOGGERS

Foram calibrados 6 (seis) *Miniloggers* nas variáveis: pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, nos laboratórios da área de Metrologia Ambiental do LIM - Laboratório de Instrumentação Meteorológica do INPE/CPTEC, no período de outubro de 2009 a fevereiro de 2010. Os procedimentos de calibração utilizados são baseados nas normas técnicas: *ASTM International - American Society for Testing and Materials* [13], *ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* [14], *DIN - Deutsches Institut für Normung* [15] e *ISO - International Organization for Standardization* [12].

Para temperatura e umidade relativa do ar utilizou-se a *ITS-90 - International Temperature Scale of 1990* e um sistema de calibração composto por: câmara climática CSZ, *Temperature/Humidity Chamber*, ZPH-16-1.5H/AC; padrão de referência de ponto de orvalho *Michell Instruments Ltd*,

Optical Dew Point Transmitter, *Optidew/ST2*; padrão de referência de temperatura *Fluke - Hart Scientific, SPRT-Standard Platinum Resistance Thermometer, 5699*; padrão de referência de pressão atmosférica *Vaisala, Digital Barometer, PTB220TS* e um microohmímetro padrão *Agilent, Nano Volt - Micro Ohm Meter, 34420A*, conforme ilustrado na Figura 9.

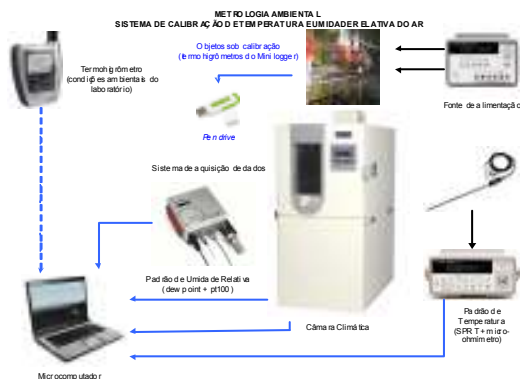


Fig. 9. Sistema de calibração de temperatura e umidade relativa do ar

Na Figura 10 temos o sistema de calibração de barômetros composto por: câmara barométrica desenvolvida pelo LIM e Boc Edwards [16]; padrão de referência de pressão atmosférica *Vaisala, Digital Barometer, PTB220T* e padrões de trabalho *Boc Edwards, Barocel, 655AB*; *Hameg, Programmable Power Supply, HM7044*; *Fluke, Precision Multimeter, 8846A* e *Edwards, Active Gauge Controller*.



Fig. 10. Sistema de calibração de pressão atmosférica

Todos os padrões de referência estão rastreados ao Inmetro, Laboratórios de Higrometria, Pressão e Termometria. Outros padrões estão rastreados à RBC – Rede Brasileira de Calibração, através dos laboratórios do INPE/LIT e Salcas. Foi utilizado um termohigrômetro Rotronic para o monitoramento ambiental do laboratório durante as calibrações, com rastreabilidade à RBC.

A metodologia utilizada na calibração baseia-se nas comparações diretas aos padrões de referência de temperatura (Escala Internacional de Temperatura de 1990), umidade relativa do ar e de pressão atmosférica do INPE/CPTEC, utilizando-se uma câmara climática e uma câmara barométrica, como meios de calibração.

As condições ambientais do laboratório durante a realização das calibrações foram: temperatura do ar 23 ± 2 °C, umidade relativa do ar 50 ± 10 % u.r. e pressão atmosférica 945 ± 5 hPa. O gás utilizado na calibração foi o nitrogênio com 99,999 % de pureza.

Foram realizadas séries de 5 (cinco) medidas a cada minuto 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* [17] e EA-4/02 - *Expressão da Incerteza de Medição na Calibração* [18].

Para verificar a histerese na calibração de pressão, realizou-se o carregamento e o descarregamento do gás, ou seja, a calibração iniciou-se no valor mais baixo de pressão, incrementando os pontos de calibração até atingir o limite superior (~1000 hPa) e depois reduziu-se até o limite inferior (~750 hPa).

Para os cálculos de incertezas, foram considerados como mensurandos as variáveis (grandezas) temperatura do ar T_x , umidade relativa do ar H_x e pressão atmosférica P_x submetidas 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:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

A função de medição f representa o procedimento de medição e o método de avaliação. A função de medição é a função de grandezas cujo valor, quando calculado a partir de valores conhecidos das grandezas de entrada no modelo (matemático) de medição obtém-se um valor medido da grandeza de saída deste modelo [8]. 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 :

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

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

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \Big|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (3)$$

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

Para as calibrações do minilogger utilizou-se:

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

No modelo adotado para cada medida, ou conjunto de medidas T_x teremos a temperatura t_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:

$$Tx = t_{\text{corrigida}} \pm U \quad (5)$$

$$t_{\text{corrigida}} = t'_x + \text{correção}_2 \quad (6)$$

$$t_{\text{corrigida}} = t'_x + ((ts + \text{correção}_1) - tx) \quad (7)$$

Analogamente as equações 5, 6 e 7 são utilizadas para os modelos de umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

A temperatura T_x , a umidade relativa do ar H_x e a pressão atmosférica P_x dos objetos sob calibração (termohigrômetro e barômetro) para cada ponto de calibração são obtidas pelas Equações 8, 9 e 10, respectivamente:

$$T_x = \bar{t}'_x + (\bar{t}_s + \sum_{j=1}^3 \sigma_{t_{s_j}} + \sum_{j=1}^4 \sigma_{t_{m_j}} - \bar{t}_x + \sigma_{x_1} + \sigma_F + \sigma_{\nabla}) \quad (8)$$

$$H_x = \bar{h}'_x + (\bar{h}_s + \sum_{j=1}^3 \sigma_{h_{s_j}} + \sum_{j=1}^4 \sigma_{h_{m_j}} - \bar{h}_x + \sigma_{h_{x_1}} + \sigma_{h_F} + \sigma_{h_{\nabla}} + \sigma_{h_{dpm}}) \quad (9)$$

$$P_x = \bar{p}'_x + (\bar{p}_s + \sum_{j=1}^3 \sigma_{p_{s_j}} - \bar{p}_x + \sigma_{p_{x_1}} + \sigma_{p_b} + \sigma_{p_{\nabla}} + \sigma_{p_g}) \quad (10)$$

Onde:

ts ; hs ; ps = temperatura, umidade relativa e pressão de referência;

δt_{s1} ; δh_{s1} ; δp_{s1} = correções de temperatura, temperatura do ponto de orvalho e pressão obtidas a partir da calibração dos padrões *SPRT*, *Optidew* e *PTB*;

δt_{s2} ; δh_{s2} ; δp_{s2} = correções de temperatura, umidade relativa e pressão devido às resoluções dos padrões;

δt_{s3} ; δh_{s3} ; δp_{s3} = derivas dos padrões *SPRT*, *Optidew* e *PTB* desde suas últimas calibrações, respectivamente;

δt_{m1} = correção da temperatura obtida a partir da calibração do padrão *DMM - Digital Multimeter*;

δt_{m2} = correção da temperatura devido à resolução do padrão *DMM*;

δt_{m3} = deriva do padrão *DMM* desde sua última calibração (especificação fabricante);

δt_{m4} = variação da temperatura (*DMM*) em relação à variação da temperatura (condições ambientais do laboratório 23±/± 2oC).

tx ; hx ; px = temperatura, umidade relativa e pressão do objeto sob calibração;

δt_{x1} ; δh_{x1} ; δp_{x1} = correções da temperatura, umidade relativa e pressão devido às resoluções dos objetos sob calibração;

δt_F = correção da temperatura devido à não-uniformidade da temperatura na câmara climática;

δt_{∇} = gradiente espacial e temporal da câmara climática

δh_{dpm} = correção da umidade relativa devido ao modelo matemático para umidade relativa [11].

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

δp_{∇} = 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 do padrão e dos objetos sob calibração em cada ponto de calibração, temos:

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

e

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

Teremos analogamente às Equações (11) e (12) para \bar{h}_s ; \bar{h}_x ; \bar{p}_s e \bar{p}_x .

Para a incerteza expandida, teremos;

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

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%.

3. RESULTADOS

A faixa de temperatura $T_{\text{ref}90}$ ($t_{\text{corrigida}}$) variou de 5,65 a 35,63 °C; T_{ind} de 5,52 a 35,76 °C e o erro ou a correção ($T_{\text{ref}90} - T_{\text{ind}}$) a ser utilizada nos medidores, em toda a faixa, variou de -0,02 a 2,56 °C. A incerteza de medição na calibração, U , foi estimada de 0,17 e 0,26 °C, conforme o resumo dos resultados da calibração de temperatura mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Estimativas e contribuições de incerteza para a calibração de temperatura

Grandeza X_i	Estimativa x_i [°C]	Distribuição de probabilidade	Contribuição para a incerteza $k=1,0@68,27\%$ $u_i(y)$ [°C]
t_s	5,65 a 35,63	<i>t-student</i>	0,0005 a 0,01
δt_{s1}	-0,011 a -0,019	normal	0,0075 a 0,0065
δt_{s2}	-	retangular	0,00058
δt_{s3}	-	retangular	0,00028 a 0,00014
δt_{m1}	-	<i>t-student</i>	0,002
δt_{m3}	-	retangular	0,002
t_x	5,52 a 35,76	<i>t-student</i>	0,0052 a 0,043
δt_{x1}	-	retangular	0,0058
δt_{∇}	-	retangular	0,087 a 0,13
T_x			0,087 a 0,13

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram as planilhas de incerteza com as contribuições significativas nas calibrações dos *Miniloggers* identificados como: *M1B*, *M1T*, *M2B*, *M2T*, *M3B* e *M3T*. Os gráficos das Figuras 11 e 12 mostram a resposta em temperatura dos dois lotes de *Miniloggers* calibrados versus padrão *SPRT*. O primeiro lote (*M1T*, *M3B* e *M3T*) foi calibrado em 13 pontos: 5 °C @ (80 e 90) % u.r.; 10 °C @ (60; 70 e 80) % u.r.; 15 °C @ (50 e 80) % u.r.; 25 °C @ (30; 50 e 90) % u.r. e 30 °C @ (50; 70 e 90) % u.r.

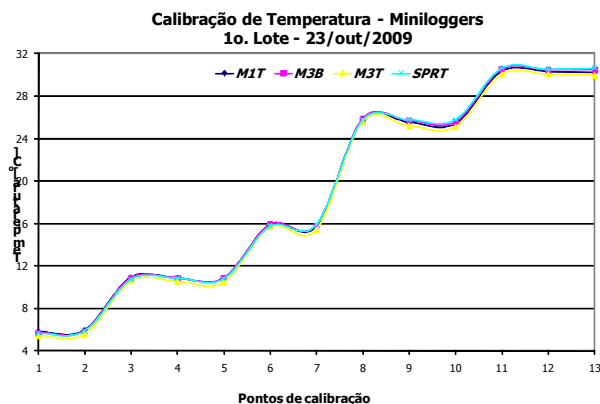


Fig. 11. Respostas dos *Miniloggers* (1º lote) x padrão *SPRT*

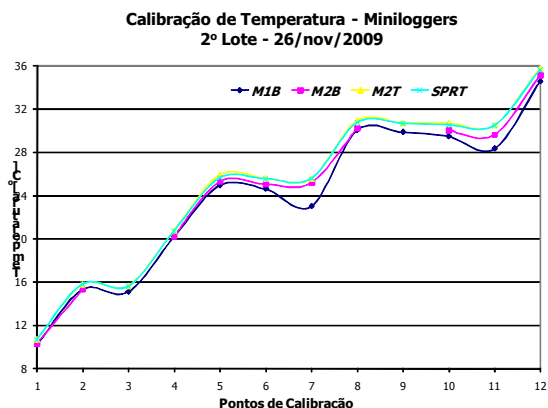


Fig. 12. Respostas dos *Miniloggers* (2º lote) x padrão *SPRT*

O gráfico da Figura 13 mostra os erros ($T_{ref90} - T_{ind}$) em toda a faixa calibrada. As equações foram obtidas a partir das curvas de calibração, utilizando o aplicativo *Microsoft/Excel* estão apresentadas na Figura 14.

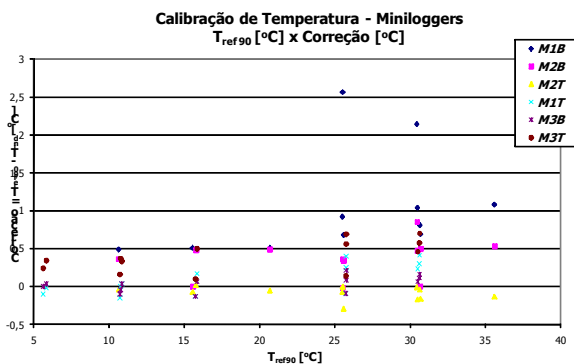


Fig. 13. Erro ou correção ($T_{ref90} - T_{ind}$) durante a calibração

As faixas de umidade H_{ref90} (hcorrigida), H_{ind} e da U estão apresentadas na Tabela 3. O erro ou correção ($H_{ref90} -$

H_{ind}) variou de -12,6 a 10,5 % u.r., conforme Figura 18. Os gráficos das Figuras 15, 16 e 17 mostram a resposta dos higrômetros versus padrão *Optidew*.

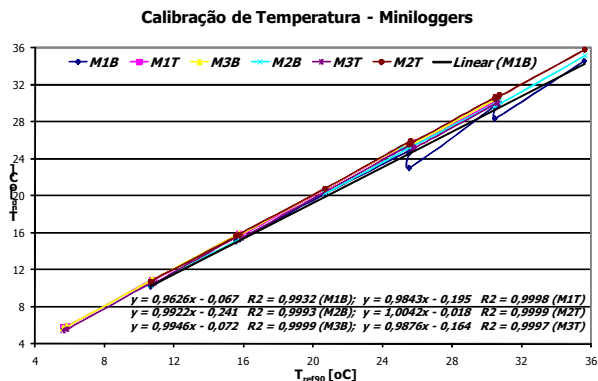


Fig. 14. Curvas de calibração de temperatura.

Tabela 3. Estimativas e contribuições de incerteza para a calibração de umidade relativa do ar

Grandeza X_i	Estimativa x_i [% u.r.]	Distribuição de probabilidade	Contribuição para a incerteza $k=1,0@68,27\%$ $u_i(y)$ [% u.r.]
h_s	29,2 a 92,7	<i>t-student</i>	0,020 a 0,85
δh_{s1}	-1,06 a 1,12	normal	0,012 a 0,88
δh_{s2}	-	retangular	0,058
h_x	20,4 a 98,4	<i>t-student</i>	0,056 a 1,16
δh_{x1}	-	retangular	0,058
δt_F	-	retangular	0,75
δh_{dpm}	-	retangular	0,058
H_x	-	-	0,80 a 1,60

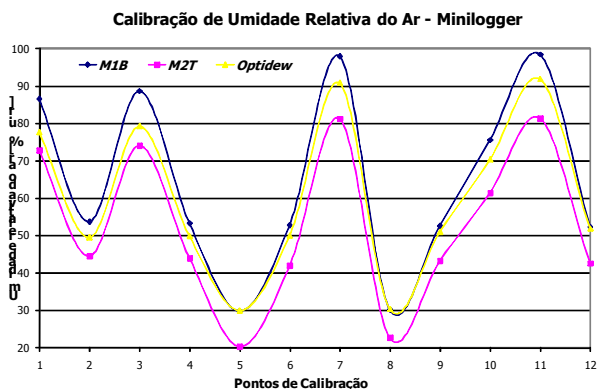


Fig. 15. Respostas dos *Miniloggers* *M1B*, *M2T* x padrão *Optidew*

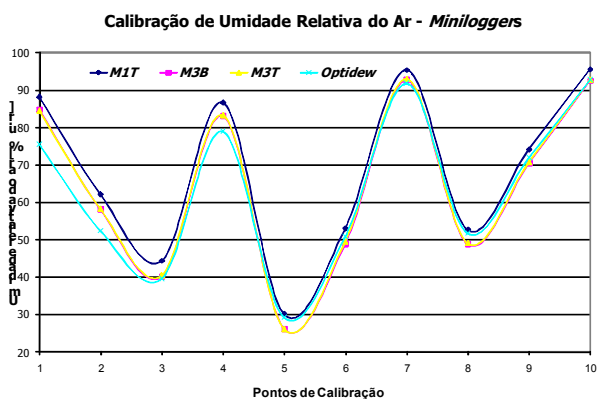


Fig. 16. Respostas dos *Miniloggers* *M1T*, *M3B* e *M3T* x padrão *Optidew*

A correção ($P_{ref90} - P_{ind}$) durante a calibração dos barômetros variou de -46,09 a 9,99 hPa, conforme Figura 19. As faixas de pressão P_{ref90} , P_{ind} e de U estão apresentadas na Tabela 4.

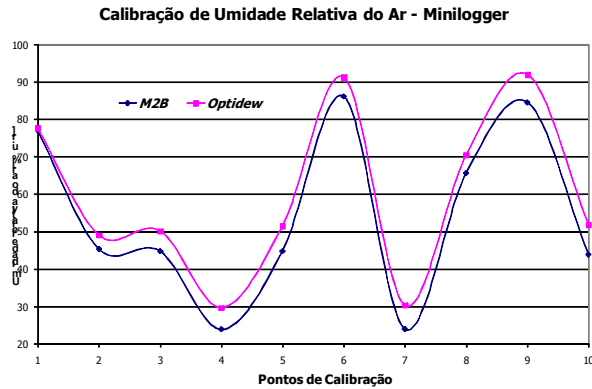


Fig. 17. Resposta do Minilogger M2B x padrão Optidew

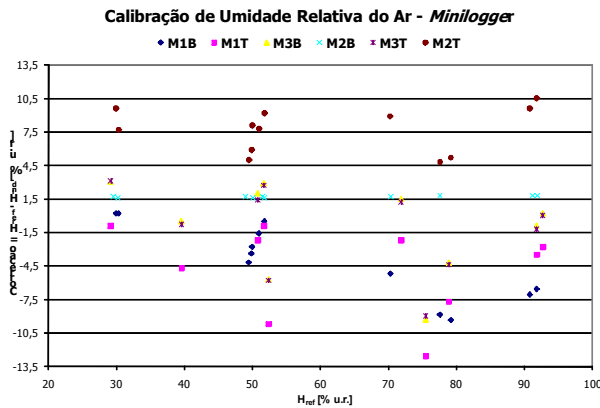


Fig. 18. Erro ou correção ($H_{ref} - H_{ind}$) durante a calibração

Tabela 4. Estimativas e contribuições de incerteza para a pressão barométrica

Grandeza X_i	Estimativa x_i [hPa]	Distribuição de probabilidade	Contribuição para a incerteza $k=1,0@68,27\%$ $u_i(y)$ [hPa]
p_s	748,29 a 998,39	<i>t-student</i>	0 a 0,13
δp_{s1}	-0,075 a -0,050	normal	0,0035 a 0,0044
δp_{s2}	-	retangular	0,0058
p_x	728,2 a 979,9	<i>t-student</i>	0,020 a 0,42
δp_{x1}	-	normal	0,058
P_x	-	-	0,07 a 0,44

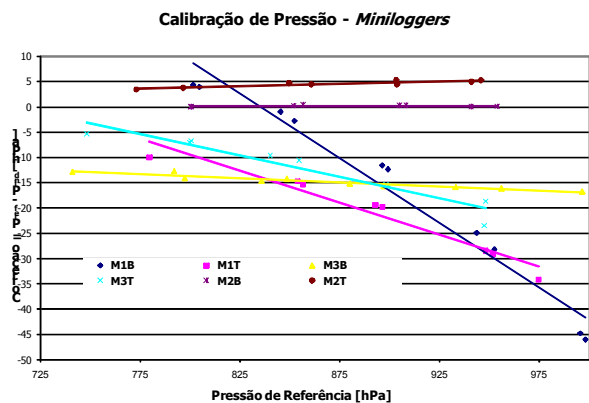


Fig. 19. Erro ou correção ($P_{ref90} - P_{ind}$) durante a calibração. Os gráficos da Figura 20 mostram uma parcela das medidas de monitoramento de campo com e sem correção.

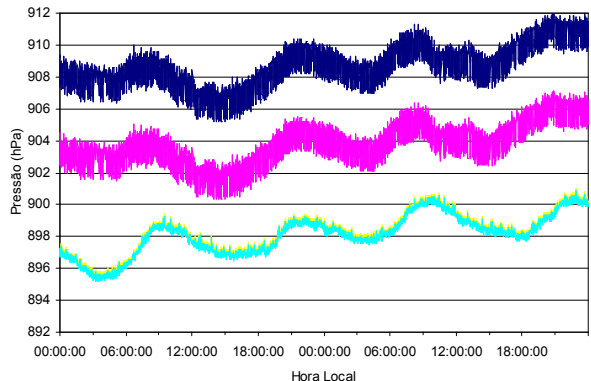
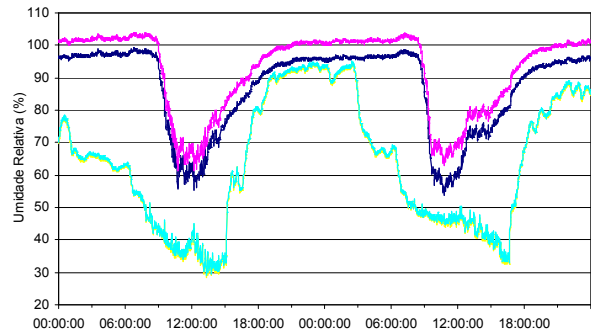
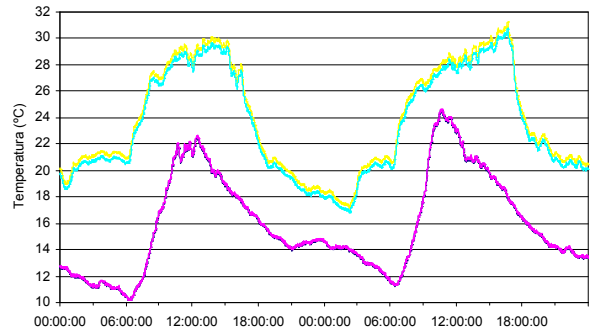


Fig. 20. Dados de campo referente aos dias 13/04/10 e 14/04/2010

4. DISCUSSÃO

As recomendações da *OMM* e os requisitos metroológicos para que o resultado da calibração de cada sistema de observação ou de monitoramento não deva ser extensivo a outro, mesmo que similar, são devidamente comprovados nestes experimentos.

Considerando as correções como erros sistemáticos e corrigindo as medidas de campo com os valores reportados nos Certificados de Calibração, temos as incertezas compatíveis com as especificações dos fabricantes dos sensores. Estatisticamente as correções podem ser realizadas através das interpolações dos dados ou outra metodologia, porém as incertezas expandidas de medição, U , declaradas

nos Certificados de temperatura não levam em consideração a incerteza relativa às equações de ajuste das curvas de calibração.

Como os transdutores são modulares, e avaliando-se economicamente o *Minilogger*, sensores de outros fabricantes podem ser testados, em especial os de pressão atmosférica, que se mostraram heterogêneos nas suas respostas (P_{ind} e *span*).

Para a pesquisa ambiental em andamento, os resultados da calibração contribuíram para uma melhor precisão nas variáveis observadas abaixo e acima do dossel. A marcha diária de temperatura, umidade relativa e pressão nos dois níveis medidos mostraram-se ser diferentes, portanto um erro sistemático nas medidas ocasionado pela não calibração dos equipamentos poderia levar a conclusões errôneas no final da pesquisa.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados destas calibrações, das medidas de campo e das próximas recalibrações previstas, os *Miniloggers* podem ser reavaliados para possíveis atualizações e os custos de produção podem ser reduzidos, produzindo-se um conjunto maior de dispositivos.

No caso da aplicação dos sensores para levantamento de perfil é fundamental ter as medidas corrigidas utilizando-se os resultados contidos nos Certificados de Calibração com rastreabilidade evidenciada, garantindo-se assim a confiabilidade nos dados ambientais.

Nesta pesquisa que envolve o estudo do dossel de floresta da Mata Atlântica agregando o desenvolvimento de um sistema de coleta de dados e a realização das calibrações na área de Metrologia Científica Ambiental, a tríade *P&D&I - Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação* mostrou-se de forma relevante, podendo ser utilizado como exemplo de proposta de metodologia para novos projetos de monitoramento ambiental.

AGRADECIMENTOS

Às equipes dos laboratórios IAG/USP e LIM/CPTEC e aos pesquisadores do INPE e USP. À FAPESP pelo apoio no projeto 2008/50285-3 - Controles da floresta de Mata Atlântica no clima local e regional. Ao MCT, FINEP, INPE e INMETRO pelo incentivo na implantação da área de Metrologia Ambiental e à CAPES pela disponibilização das normas técnicas.

“Good data are not necessarily excellent, but it is essential that their quality is known and demonstrable”

WMO – World Meteorological Organization

REFERÊNCIAS

- [1] BUTLER, R. H. A. “Diversities of Image - Rainforest Biodiversity.” *A Place Out of Time: Tropical Rainforests and the Perils They Face*. Mongabay 9 January 2006.
- [2] ALMEIDA, F. F. M., Carneiro, C. D., 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências* 28(2):135-150.

- [3] SETZER, J., 1966. Atlas climatológico do estado de São Paulo. Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Paraguai. CESP, São Paulo –SP.
- [4] National Semiconductor: Datasheet of LM35 – Precision Centigrade Temperature Sensors. December 1994.
- [5] Honeywell. Datasheet - HIH-4000-001 - Series Integrated Circuitry Humidity Sensor. 2006.
- [6] Motorola Freescale Semiconductor, Inc. Semiconductor Technical Data. MPX4115A/D. Integrated silicon pressure sensor for manifold absolute pressure, altimeter or barometer applications on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated. REV 4, 2001.
- [7] ATMEL. Manual of 8-bit Microcontroller with 12 kbyte Flash AT89S8253 - 3286N–MICRO – 2010.
- [8] 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.
- [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] Inmetro, “Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia”, 3ª ed, INMETRO, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] World Meteorological Organization, “Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation”, seventh edition, 2008
- [12] ABNT, NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para competência de laboratórios de calibração e ensaios. 2005.
- [13] ASTM. Annual Book of ASTM Standards. Section fourteen. General Methods and Instrumentation. Volume 14.03 - Temperature Measurement. 2008.
- [14] ASHRAE Standards. Method for Measurement of Moist Air Properties. ANSI/ASHRAE 41.6-1994.
- [15] DIN. DIN 28418 – Standard Method for Vacuum Gage Calibration by Direct Comparison with a Reference Vacuum Gage. Deutsches Institut für Normung, 1976.
- [16] M. A. A. Santana, P. L. O. Guimarães, “A Metrologia Científica na Área Ambiental e a Instrumentação Meteorológica no INPE/CPTEC”, METROLOGIA 2009, Salvador - BA, novembro de 2009.
- [17] International Organization for Standardization. ISO GUM Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. ISO, Geneva, 1995.
- [18] 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.

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