

Diretrizes para Redes Automáticas e Telemétricas de Superfície

Selma R. Maggiotto, Nelson L. Dias, Sandro Vissotto, Celso L. Prevedello, Ernani L. Nascimento

Lemma – Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental, UFPR

selmarm@ufpr.br, nldias@ufpr.br, svissotto@ufpr.br, clpreve@ufpr.br, elnascimento@ufpr.br;

Leocádio Grodzki

IAPAR – Instituto Agronômico do Paraná

lgrodzki@ufpr.br;

Moisés F. de Souza

Instituto Tecnológico SIMEPAR

moises@simepar.br

Recebido: 09/11/06 – revisado: 20/04/07 – aceito: 28/08/07

RESUMO

São discutidos os tipos de sensores e medidas feitas por estações de superfície automáticas com diferentes objetivos, assim como as dificuldades de medição de algumas variáveis. Neste contexto, a micro escala de tempo de Kolmogorov τ é introduzida formalmente para caracterizar uma medida “instantânea”. A definição da Organização Meteorológica Mundial (OMM) de uma medida instantânea, para o que na verdade é uma média de pelo menos 1 minuto, é revisada com a introdução do termo “medição momentânea” para médias de um minuto. Discute-se as escalas de tempo de medição e de transmissão de dados, propondo-se que se adote uniformemente um intervalo de tempo de 10 minutos tanto para médias quanto para a transmissão de dados, o que é possível com as tecnologias de transmissão de dados atualmente disponíveis. Propõe-se um esquema de classificação de estações de monitoramento baseada nos seus múltiplos propósitos, e que generaliza os antigos conceitos de estação “fluviométrica”, “pluviométrica”, “meteorológica” e “agrometeorológica”. A nova classificação é capaz de cobrir os tipos mais amplos de uso atualmente atribuídos a estações automáticas.

Palavras-chave: *redes automáticas; medida instantânea.*

INTRODUÇÃO

O advento de estações de monitoramento hidrológico e meteorológico totalmente automáticas nos anos 80 representou uma mudança quantitativa e qualitativa importante na capacidade de fazer medições na atmosfera e nos corpos d’água. Na década de 90, numerosas redes automáticas de superfície surgiram no Brasil com os mais diversos objetivos, incluindo-se: redes de pesquisa (Gash et al., 1996), redes hidrológicas, e meteorológicas (Dias e Marcellini, 1997).

Ao mesmo tempo em que tornaram a cobertura de dados potencialmente muito mais ampla, as redes automáticas e telemétricas (isto é: redes que transmitem os dados coletados para um centro operacional em tempo quase real) trouxeram consigo um grande número de novos problemas e desafios, alguns deles já normatizados pela Organização Me-

teorológica Mundial (OMM), e outros ainda em discussão. Alguns exemplos são:

- o que fazer com medições cuja automação é difícil ou problemática, como por exemplo a de evaporação em tanques Classe A;
- como fazer a medição da rajada de vento, que encontra problemas conceituais para sua definição e limitações instrumentais para sua medição;
- como uniformizar o tipo de medição, já que a leitura automática de dados gera um grande número de alternativas (por exemplo: deve-se medir uma temperatura do ar observada momentaneamente antes de um horário sinótico, ou a real média horária — ou ambas?);
- como compatibilizar as demandas diferentes de diversos usuários (por exemplo, dados momentâneos imediatamente antes dos ho-

- rários sinóticos são úteis para a previsão de tempo em diversas escalas de tempo, enquanto que médias de 10, 15, 30 ou 60 min são comumente usadas em agrometeorologia, estudos ambientais e hidrologia);
- como redefinir o papel de operadores humanos nas tarefas de manter os equipamentos em funcionamento, estabelecendo freqüências e rotinas adequadas de manutenção preventiva.

A existência de diferentes padrões de procedimentos de medição em estações automáticas tem levado a uma disseminação indesejável de formas de medição que acabam se tornando incompatíveis entre si. Além disso, diferentes usuários programam suas estações para necessidades específicas, diminuindo muito a sua utilidade para as comunidades meteorológica e hidrológica como um todo.

Note-se que atualmente existem bons padrões para estações automáticas (WMO, 2006), mas a sua efetiva implementação nas redes existentes ainda é pouco disseminada. Casos de boa implementação destes padrões podem ser encontrados já em operação; por exemplo, a rede *Mesonet*, dos estados de Oklahoma (Brock et al., 1995; Shafer, et al., 2000) e do Texas (Schroeder et al, 2005), nos Estados Unidos, ou a rede meteorológica automática do KNMI – *Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut*, na Holanda (KNMI, 2000). Um dos objetivos deste trabalho é incentivar a correta observância dos padrões existentes.

Tem havido, também, um distanciamento gradativo das equipes técnicas de empresas e órgãos, públicos e privados, da atividade de instalação, manutenção e operação de redes, a qual freqüentemente é contratada de terceiros. Isto representa uma mudança qualitativa importante do padrão que existia até o fim da década de 70, quando o envolvimento técnico com as redes de medição (nesta época predominantemente convencionais) era muito maior.

O fato é que uma rede de monitoramento é a base essencial de informação sem a qual nenhuma atividade de previsão, projeto de engenharia ou pesquisa pode se desenrolar, e a idéia de que seus dados podem ser obtidos de maneira fácil, sem um continuado esforço de operação e de manutenção (equipamentos “deixados a si próprios”) é exageradamente otimista. Além disso, algumas variáveis presentes em modelos numéricos hidrológicos e meteorológicos atuais, como por exemplo a temperatura da superfície ou a umidade do solo, apresentam dificuldades formidáveis de definição e medição

que muitas vezes não são totalmente compreendidas pelos usuários finais dos dados.

Neste sentido, este trabalho representa um esforço de (a) ressaltar a importância fundamental da existência de redes de monitoramento de alta qualidade para as atividades operacionais e de pesquisa que delas dependem, e para o desenvolvimento sustentável; (b) propor um formato de medição que ao mesmo tempo seja flexível, respeite a realidade de numerosas redes e instituições de monitoramento coexistindo no espaço, e atenda às necessidades atuais e previsíveis de todos os seus usuários potenciais; (c) restabelecer a importância de operadores humanos treinados e dedicados para a manutenção da qualidade e prontidão das redes.

Nas seções seguintes, procura-se definir um conjunto mínimo de conceitos e classificações que atenda ao objetivo proposto acima. Alguns destes conceitos são relativamente elementares, mas entende-se que é importante que estejam presentes. Outros são novos (e alguns relativamente ousados), mas foram considerados igualmente essenciais para que as redes automáticas e telemétricas brasileiras atinjam em um futuro não muito distante tanto uma utilidade quanto uma disponibilidade consideravelmente maiores que as atuais.

SENSORES E TEMPOS DE RESPOSTA

Um sensor é um dispositivo sensível à presença de uma grandeza física, à qual ele reage com uma resposta. Em Hidrologia e em Meteorologia, a resposta é analógica, ou seja: é uma outra grandeza física que pode ser lida em uma escala, ou convertida em um número binário armazenável em memória de computador. Este último processo denomina-se conversão analógico-digital, ou simplesmente conversão A-D.

Assim, pode-se medir a temperatura do ar com um termômetro de mercúrio, cuja resposta analógica é o comprimento de uma coluna de mercúrio, ou com um termistor (uma resistência elétrica termo-sensível), cuja resposta é o valor da resistência elétrica ou, por meio de um circuito elétrico, uma voltagem equivalente. A figura 1 mostra um resumo deste processo, e ilustra o conceito de tempo de resposta T: dada uma mudança instantânea em degrau na variável medida, T é o tempo que o sensor leva para alcançar $1 - 1/e \approx 0,632$ do valor do degrau (Brock e Richardson, 2001).

Os sensores hidrológicos e meteorológicos em geral possuem tempos de resposta da ordem de poucos segundos ou minutos, e portanto muito menores do que as escalas de tempo da maioria dos fenômenos físicos relevantes. A notável exceção é a turbulência, que requer sensores especialmente rápidos (tempos de resposta da ordem de 0,01 a 0,1 s).

EXEMPLO 1 - É inútil tentar medir uma flutuação turbulenta de temperatura no ar com um termômetro de mercúrio, pois seu tempo de resposta é da ordem de 1 min \gg 0,01 s, que é a ordem da micro-escala de tempo de Kolmogorov para flutuações turbulentas de temperatura (Tennekes e Lumley, 1972, p. 20, eqs 1.5.11 e 1.5.12).

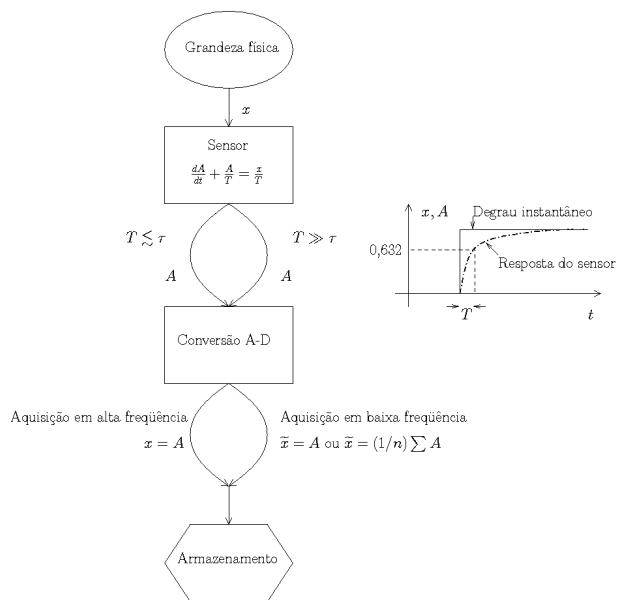


Figura 1 - Processo de medição automática de uma grandeza física.

EXEMPLO 2 - É errado usar o valor de velocidade do vento $\sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}$ lido instantaneamente (mas que representa uma média de alguns segundos) de um anemômetro de hélice na equação de Dalton, $\bar{E} = f(\sqrt{u^2 + v^2})(\bar{e}_0 - \bar{e}_a)$

a qual pressupõe o uso de médias turbulentas (sobre períodos de 10 a 60 min, tipicamente) de velocidade do vento, pressão de vapor d'água à superfície, e pressão de vapor d'água no ar, $\sqrt{u^2 + v^2}, \bar{e}_0, \bar{e}_a$ (Note que, em Meteorologia Sinótica, a palavra *vento* significa sempre o vetor *horizontal* (u,v). O vetor

(u,v,w) é denominado “campo de velocidade 3D”. Em Micrometeorologia, por outro lado, é comum o uso do termo “velocidade vertical do vento” para a componente w. Neste trabalho usa-se a convenção da Meteorologia Sinótica).

Isto significa que um mesmo sensor pode gerar medidas em diversas escalas de tempo. Note também que uma leitura instantânea não é o mesmo que uma medida instantânea; toda leitura representa uma média

$$A(t) = \int_{\eta=0}^t G_T(t, \eta) x(\eta) d\eta \quad (1)$$

da grandeza x(t) via a função de resposta G_T do sensor (a qual depende, obviamente, do seu tempo de resposta). A rigor, como todo sensor possui T > 0, nenhuma leitura é estritamente instantânea. Estações de superfície automáticas possuem sistemas de aquisição de dados que na prática são uma combinação de sistemas de conversão A-D com microprocessadores com razoável capacidade de processamento numérico. Isto dá a estas estações a capacidade de reportar diretamente múltiplas medidas geradas a partir de um sensor ou de um conjunto de sensores.

É usual representar o processo por meio do qual um sensor converte uma grandeza física em uma resposta analógica por uma equação diferencial e uma função de resposta associada. Para um grande número de sensores em meteorologia e hidrologia, é suficiente supor que o sensor é de primeira ordem, ou seja: sua resposta é representável pela equação diferencial

$$\frac{dA}{dt} + \frac{A}{T} = \frac{x}{T}, \quad G_T(t, \eta) = \frac{\exp[-(t-\eta)/T]}{T}, \quad (2)$$

onde A é a resposta analógica do sensor à grandeza x (Lumley e Panofsky, 1964). Casos em que (2) foi aplicada direta ou implicitamente para modelar a resposta de um sensor incluem anemômetros de hélice (Hicks, 1972) e analisadores infra-vermelhos de CO₂ (Horst, 1997). Moore (1986) e mais recentemente Massman (2000) (ver também: Rannik (2001); Massman (2001)) propõem correções bastante gerais para sensores de turbulência todas elas baseadas em (2). É importante notar, entretanto, que nem sempre é possível modelar a resposta do sensor com uma equação tão simples quanto (2); nestes casos, pode ser necessário incluir parâmetros adicionais (Dias et al., 2006) e/ou utilizar equações diferenciais de ordem superior. Para os propósitos de classificação de medidas, entretanto, é suficiente o

conceito geral de tempo de resposta como o tempo necessário para o sensor atingir um certo valor de mudança instantânea em degrau de x , independentemente do tipo de sensor e dos detalhes de sua modelagem. Neste trabalho, supõe-se que A já foi convertido às mesmas unidades de x por meio de uma curva de calibração.

Na figura 1, se o tempo de resposta for menor do que ou da mesma ordem que τ , que é a micro-escala de tempo de Kolmogorov da turbulência do meio (ar ou água) – $T \leq \tau$ –, então a leitura proporcionada pelo sensor é praticamente igual ao real valor instantâneo da grandeza sendo lida, e $x = A$. Caso contrário, quando $T \gg \tau$, a resposta do sensor é um valor atenuado, e representa algum tipo de “média” sobre os valores instantâneos. Finalmente, o sistema de aquisição de dados pode realizar ainda algum processamento digital sobre os dados medidos. Por exemplo, ele pode ler dados $n = 60$ vezes por minuto e em seguida calcular uma média; neste caso, $\tilde{x} = (1/n) \sum A$. Fisicamente, portanto, \tilde{x} significa um valor “momentâneo” (tal como um observador humano o leria no painel de instrumentos de uma estação convencional), *porém com as flutuações turbulentas removidas*. Neste trabalho \tilde{x} significa uma média de um minuto de x , obtida da forma mais fidedigna possível. O responsável pela implementação da medição de \tilde{x} deve garantir que isto seja verdade.

EXEMPLO 3 – Se o sensor de temperatura for um termistor com um tempo de resposta especificado pelo fabricante de 10 s, um programa adequado para a obtenção de \tilde{T}_a realiza 6 leituras dentro do minuto, e calcula sua média aritmética. Se o sensor de temperatura do ar for um termopar de fio fino com um tempo de resposta de 0,01 s, um programa adequado realiza pelo menos 60 leituras (preferivelmente 600 se o sistema de aquisição for suficientemente rápido), e calcula sua média aritmética.

Quando a medição é feita com sensores suficientemente rápidos, $T \leq \tau$, e a freqüência de aquisição também é da ordem de τ^1 (ou no máximo uma ordem de grandeza menor), é possível adquirir os dados de turbulência de x em “alta freqüência” (≥ 10 Hz) e armazená-los diretamente, ou então processá-los em tempo real e armazenar suas estatísticas.

ESCALAS DE MEDIÇÃO

Neste estudo, uma medição será classificada de acordo com as suas escalas de tempo em:

- Turbulenta ou instantânea: Representa a medição de x , em alta freqüência (10 Hz ou mais), utilizando um sensor cujo tempo de resposta é $T \leq \tau$, onde τ é a microescala de tempo de Kolmogorov associada a x .
- Momentânea: Representa a medição de uma média \tilde{x} de 1 minuto, da qual as flutuações turbulentas foram removidas. No caso de intensidade de precipitação, \tilde{I} deve representar exatamente a altura de água precipitada em 1 minuto.
- Média: Representa a medição de uma média de $\mathfrak{I} = 10$ minutos (ou do valor empregado para \mathfrak{I}) de x .
- MaxMin: Representa o máximo ou mínimo do período de $\mathfrak{I} = 10$ minutos (ou do valor empregado para \mathfrak{I}), \tilde{x}_{\max} ou \tilde{x}_{\min} . Rajadas de vento serão tratadas em separado a seguir.

É muito importante enfatizar que a nomenclatura aqui adotada é *diferente* da utilizada pela OMM (WMO, 2006 – Part I, Annex 1.B, pag. I.1.20). Para a OMM, uma medição instantânea corresponde a uma média de 1 minuto de uma grandeza atmosférica. Infelizmente, esta nomenclatura inviabiliza a consideração de medições realmente instantâneas, isto é, realizadas por instrumentos com constantes de tempo da mesma ordem que τ , como é o caso de termopares de fio fino ou de anemômetros sônicos. Portanto, neste trabalho o termo “momentâneo” é cunhado para representar aquilo que a OMM denomina “instantâneo”, enquanto que o termo “instantâneo” é usado para indicar medições capazes de capturar as flutuações turbulentas.

A partir dos valores lidos de x ou de \tilde{x} é possível definir médias

$$\bar{x} = \frac{1}{\mathfrak{I}} \int_{t=0}^{\mathfrak{I}} x(t) dt, \quad \text{ou} \quad \bar{x} = \frac{1}{\mathfrak{I}} \int_{t=0}^{\mathfrak{I}} \tilde{x}(t) dt \quad (3)$$

onde $\mathfrak{I} = 10$ min. Conforme veremos na seqüência, \mathfrak{I} deve ser entendido como o intervalo de tempo tanto para o cálculo das médias quanto para transmissão de dados, no caso de estações telemetrizadas. A igualdade dos dois, embora obviamente não seja obrigatória, simplifica bastante os procedimentos operacionais e a programação dos sistemas de aquisição de uma rede de monitoramento de superfície.

EXEMPLO 4 – No EXEMPLO 3, o termistor possui tempo de resposta igual a 10 s; portanto, não é ne-

cessário ler com uma freqüência maior do que esta para obter a média de 10 minutos. Um programa adequado de medição de \bar{T}_a faz uma leitura a cada 10 segundos durante 10 minutos (num total de $10 \times 6 = 60$ medições), e calcula sua média aritmética.

EXEMPLO 5 – No EXEMPLO 3, supondo-se que o sistema de aquisição seja suficientemente rápido, deve-se ler o termopar 10 vezes por segundo, ou seja: fazer um total de $10 \times 60 = 600$ medições, e tirar a média aritmética para obter \bar{T}_a .

Note que não é recomendável usar dados de \tilde{x} para o cálculo de momentos de segunda ordem de turbulência. Os momentos de segunda ordem mais importantes são os fluxos cinemáticos de *momentum*, temperatura e vapor d'água (Stull, 1988). Eles são obtidos por meio de uma separação de Reynolds,

$$x = \bar{x} + x' \quad (4)$$

e do cálculo subsequente de covariâncias:

$$\overline{x'y'} = \frac{1}{\mathfrak{I}} \int_{t=0}^{\mathfrak{I}} x'(t) y'(t) dt \quad (5)$$

Finalmente, deve-se definir o máximo e o mínimo de uma variável x dentro de um período de duração \mathfrak{I} ; para todas as variáveis deste artigo *exceto* a rajada de vento, a definição será o máximo (mínimo) dos valores momentâneos:

$$\tilde{x}_{\max} \equiv \max_{0 \leq t \leq \mathfrak{I}} \tilde{x}, \quad \tilde{x}_{\min} \equiv \min_{0 \leq t \leq \mathfrak{I}} \tilde{x} \quad (6)$$

Isto não é possível para a rajada de vento em \mathfrak{I} minutos. Segundo a OMM (WMO, 2006), a rajada de vento deve ser interpretada como uma média de 3 s do módulo da velocidade instantânea do vento. Em princípio, ela pode ser obtida a partir de um anemômetro Pitot, um anemômetro de hélice ou de um anemômetro sônico desde que corretamente lidos. Se esta definição for interpretada estritamente, a rajada será

$$\tilde{s}_{\max} \equiv \max_{0 \leq t \leq \mathfrak{I}} \left[\frac{1}{\Delta t_3} \int_{\eta=t}^{t+\Delta t_3} \sqrt{u^2(\eta) + v^2(\eta)} d\eta \right] \quad (7)$$

onde $\Delta t_3 = 3$ s. Entretanto, (7) exige o recálculo de uma média móvel a cada instante t de leitura, para uma aquisição realizada em alta freqüência (da ordem de 10 Hz); na prática, esta demanda é demasi-

ada para os atuais sistemas de aquisição disponíveis. Neste trabalho é sugerida uma alternativa de observação de rajada *por amostragem* ao longo de um intervalo \mathfrak{I} . Considerando $t = 0$ no início do intervalo, define-se:

$$t_i = i\Delta t_{10} \Rightarrow s_i = \frac{1}{\Delta t_3} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_3} \sqrt{u^2(\eta) + v^2(\eta)} d\eta, \quad (8)$$

$$s_{\max} = \max_{0 < t_i \leq \mathfrak{I}} s_i \quad (9)$$

onde $\Delta t_3 = 3$ s, e $\Delta t_{10} = 10$ s; dessa forma, em lugar de se calcular (por exemplo) 6000 médias móveis de 3 s, ao longo de 10 minutos (supondo uma freqüência de aquisição de 10 Hz), calcula-se 60 médias móveis de 3 s (uma vez a cada 10 s), e então extraí-se o máximo dessas 60 como representativo da “rajada de vento”. A direção da rajada é obtida da seguinte maneira: o vetor velocidade de vento médio de 3 s é

$$(\bar{u}_i, \bar{v}_i) = \frac{1}{\Delta t_3} \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_3} (u(\eta), v(\eta)) d\eta \quad (10)$$

e a direção da rajada é a direção (isto é: o azimute α_{\max}) deste vetor para o índice i (entre 1 e 60) em que s_i foi máximo.

Observe-se que nesta alternativa continua sendo necessário fazer a aquisição de dados em alta freqüência: apenas a amostragem das *médias móveis* se torna menos freqüente.

EXEMPLO 6 – No caso de se estar utilizando um sistema de aquisição de dados cuja freqüência máxima de aquisição seja de 1 s, é impossível fazer o cálculo das médias móveis usando (8) devido à impossibilidade de medir em alta freqüência. Supondo-se então que o anemômetro seja de hélice ou concha, com saída de pulsos, e que o sistema de aquisição de dados tenha uma freqüência de aquisição de 1 s, deve-se programar o sistema de aquisição para, a cada 10 s, acumular os pulsos do anemômetro correspondentes aos últimos 3 s, assim como a direção da rajada de vento correspondente.

Por que 4 escalas?

Porque elas servem a propósitos ou aplicações diferentes. Medições instantâneas servem essencialmente para o cálculo de fluxos turbulentos. Por exemplo, a medição da evapotranspiração \bar{E} de uma superfície por meio do método de medição de covariâncias turbulentas (MCT) é dada por

$$\bar{E} = \overline{w' \rho_v'}, \quad (11)$$

onde w' é a flutuação turbulenta de velocidade vertical, e ρ_v' é a flutuação de densidade de vapor d'água.

Medições momentâneas são muito úteis para meteorologia sinótica e de mesoescala, e para estudos hidrológicos em bacias pequenas ou muito pequenas, entre outros. Por exemplo, é importante conhecer a temperatura máxima \tilde{T}_{\max} num período de 10 minutos para estudar o seu efeito sobre uma linha de transmissão, ou sobre o conforto térmico de um rebanho. Uma grandeza muito importante que ocorre na escala de 1 minuto é a intensidade de precipitação — I , geralmente em mm/min, é fundamental para estudos hidrológicos e de erosão (Bonell et al., 2005). Por este motivo, sugere-se que intensidades de chuva a cada minuto passem a ser reportadas em todas as estações automáticas pluviométricas e meteorológicas brasileiras.

Finalmente, medições médias são muito importantes em hidrologia, agrometeorologia, micrometeorologia, etc.. Um exemplo é a equação de Penman, cuja interpretação micrometeorológica correta é (Brutsaert, 1982)

$$L\bar{E}_p = \frac{\Delta}{\Delta+\Gamma} \bar{R}_l + \frac{\Gamma}{\Delta+\Gamma} L f \left(\sqrt{u^2+v^2} \right) \left(e^*(\bar{T}_a) - \bar{e}_a \right) \quad (12)$$

onde L é o calor latente de evaporação, R_l é a irradiação líquida, Δ é a derivada da curva de pressão de saturação de vapor d'água e e^* calculada no ponto \bar{T}_a , Γ é a constante psicrométrica, u e v são as componentes do vento, f é uma função da velocidade do vento, T_a é a temperatura do ar e e_a é a pressão parcial de vapor d'água no ar.

Por que 10 minutos?

Porque este é um intervalo de tempo que serve bem às aplicações de meteorologia de mesoescala e de micrometeorologia (e suas aplicações em hidrologia, agrometeorologia, etc.). Em um cenário ideal, um centro operacional de meteorologia poderia receber a cada 10 minutos diversas informações importantes para o acompanhamento em tempo quase real de sistemas de tempo de mesoescala. Portanto, 10 minutos é uma boa escala para compatibilizar a medição e a transmissão de dados.

EXEMPLO 7 – A intensidade de precipitação \tilde{I} pode ser medida a cada minuto dentro dos 10 minutos. E a cada 10 minutos, 10 valores devem ser transmitidos.

EXEMPLO 8 – As temperaturas máxima e mínima \tilde{T}_{\max} e \tilde{T}_{\min} devem ser calculadas a partir de medições contínuas de \tilde{T}_a a cada 10 minutos. Devem ser transmitidas também a cada 10 minutos.

EXEMPLO 9 – As temperaturas momentâneas do ar \tilde{T}_a devem ser medidas e transmitidas uma vez a cada 10 minutos.

Uma suíte operacional completa desejável será detalhada a seguir; por enquanto, os exemplos acima são suficientes para dar uma boa idéia de como um bom sistema de monitoramento poderia funcionar. Muitas vezes, limitações na capacidade de medição ou de transmissão impedirão a medição/transmissão a cada 10 minutos. Neste caso, sugere-se aumentar correspondentemente o valor de \mathfrak{I} para 30 minutos ou para 60 minutos.

E as demais escalas?

Todas as estatísticas e médias sobre escalas de tempo maiores que 10 minutos podem ser obtidas por pós-processamento. Por exemplo, a partir de 10 valores de intensidade de chuva \tilde{I} a cada minuto é elementar reconstruir os totais de precipitação em 1 hora, 1 dia ou 1 mês. Recomenda-se, portanto, que apenas os dados de 10 minutos sejam reportados, deixando-se para os usuários a tarefa de gerar dados médios em escalas de tempo mais longas.

CLASSIFICAÇÃO DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

Neste trabalho sugere-se que as estações de monitoramento sejam classificadas de acordo com seus *propósitos*, e assim uma proposta de classificação é apresentada na Tabela 1. Um mesmo sensor pode ser usado para vários propósitos, e uma mesma estação também pode ser usada para vários propósitos. Neste último caso ela será classificada pela seqüência em ordem alfabética das letras que descrevem os seus propósitos. As classificações K e Q, embora listadas na Tabela 1, não serão discutidas neste artigo, cujo foco são medições físicas em hidrologia e meteorologia. A letra 'A' indica alguns sensores

Tabela 1 - Classificação de estações de monitoramento.

Código	Nome	Descrição
A	Agrícolas	Para a medição específica de grandezas usadas apenas em agrometeorologia, tais como a irradiação fotossinteticamente ativa e o índice de molhamento foliar, além do vento médio de 10 min a 2 m de altura
B	Razão de Bowen/Perfis	Para a medição de pelo menos 2 níveis de temperatura e umidade do ar ou temperatura da superfície da água e temperatura e umidade do ar em 1 nível, com acurácia suficiente para o cálculo da razão de Bowen
F	Fluviométricas	Para a medição de níveis d'água em rios (e cálculo da vazão com o uso da curva-chave) ou reservatórios (sem curva-chave)
G	Hidrogeológicas	Para a medição do nível do lençol freático ou da carga hidráulica do aquífero artesiano
K	Qualidade do ar	Para a medição de parâmetros de qualidade do ar
M	Meteorológicas	Para a medição de velocidade do vento, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, irradiação solar incidente e precipitação
N	Balanço de energia	Para a medição de irradiação líquida e do fluxo de calor no solo
P	Pluviométricas	Para a medição de precipitação
Q	Qualidade da água	Para a medição de parâmetros de qualidade da água
R	Radiométricas	Para a medição acurada de irradiação incidente em ondas curtas e longas
S	Sedimentológicas	Para a medição sedimentos em suspensão e (opcionalmente) vazão sólida de fundo
T	Fluxos	Para a medição de fluxos turbulentos
U	Umidade e temperatura do solo	Para a medição de perfis de umidade e de temperatura do solo
V	Perfis de vento	Para a medição das componentes horizontais do vento em pelo menos 2 níveis
X	Extraordinárias	Para a medição de um conjunto não-padronizado de grandezas

específicos para uma estação “agrícola”; o papel das estações “agrometeorológicas” convencionais, e a questão de sua dependência do tipo de solo e cobertura vegetal, serão discutidos posteriormente.

EXEMPLO 10 – Uma estação que mede nível d’água em um rio com um linímetro de pressão e precipitação com um pluviômetro *tipping-bucket* é do tipo FP.

EXEMPLO 11 – Uma estação meteorológica que também mede a irradiação de onda longa incidente (também chamada de irradiação térmica: radiação com comprimento de 4 a 100 µm emitida por qualquer corpo com temperatura acima de 0 K) utilizando um pirômetro é do tipo MR.

EXEMPLO 12 – Uma estação montada em uma torre metálica sobre um lago que mede as 3 componentes do vento com um anemômetro sônico tridi-

mensional, densidade de vapor d’água e de CO₂ com um analisador infra-vermelho e temperatura do ar com um termopar de fio fino, e que também possui medição da temperatura da superfície da água com um termistor flutuante é do tipo BT, pois além dos fluxos turbulentos é possível calcular a razão de Bowen usando a temperatura da água e as medições de temperatura e umidade do ar.

EXEMPLO 13 – Uma estação com um anemômetro sônico tridimensional, um termopar de fio fino e um sensor de umidade de resposta rápida, um pirâmetro de silício, um barômetro, um pluviômetro, um sensor capacitivo/resistivo de umidade do ar e temperatura é do tipo MT. Nesta estação, o anemômetro sônico pode ser usado tanto para medir fluxos turbulentos como para medir \bar{u} e \tilde{u} , por exemplo.

Tabela 2 - Tipos de sensores obrigatórios e sugestão de alguns sensores opcionais para cada tipo de estação.

Símbolo	Tipo de estação*	Descrição	Sensor típico	Altura nominal**
C _s	S	concentração de sedimentos em suspensão	turbidímetro	-0 a -50 m
G	N	fluxo de calor no solo	placa de fluxo de calor no solo	-0 a -5 m
I _{i_{MF}}	F*, K, M, P, U*	intensidade de precipitação	pluviômetro digital	2,0 m
i _{MF}	A	índice de molhamento foliar	sensor de umidade foliar	0,1 m a 2,0 m
L _↓	M*, N*, R	irradiância incidente em ondas longas	pirgeômetro	2,0 m
L _↑	N*, R*	irradiância refletida em ondas longas	pirgeômetro	2,0 m
R _i	N, R*	irradiância líquida	radiômetro líquido	2,0 m
R _{FA} ↓	A	irradiância incidente fotossinteticamente ativa	sensor de R _{FA}	2,0 m
Q↓	K, M, N*, R	irradiância incidente em ondas curtas	piranômetro	2,0 m
Q↑	N*	irradiância refletida em ondas curtas	piranômetro	2,0 m
T ₀	A, B*, F*, T*, V*	temperatura da superfície	termistor ou termômetro infra-vermelho	0 a 30 m
T _a	B, K, M, P*, T	temperatura do ar	termistor ou termopar	0,5 a 30 m
T _s	U	temperatura do solo	termistor	-0 a -5 m
T _v	M*, K*, T, V*	temperatura virtual	anemômetro sônico bi- ou tridimensional	0,5 a 30 m
W	U	umidade do solo	refletômetro no domínio do tempo (RDT)	-0 a -5 m
Z _s	F, S	cota da superfície da água superficial	linímetro de pressão ou bóia/contra-peso	0 m
Z _g	G	cota do nível do lençol subterrâneo	linímetro de pressão ou bóia/contra-peso	-0 a -5 m
p _v	B, K, M, P*, T	densidade de vapor d'água no ar	higrômetro de bulbo úmido, capacitivo ou infra-vermelho	0,5 a 30 m
p _u	F*, K*, M, T*	pressão atmosférica	barômetro digital	2,0 m
	K, M*, T, V	componente x do campo de velocidade	anemômetro sônico bi- ou tridimensional	0,5 a 30 m
v	K, M*, T, V	componente y do campo de velocidade	anemômetro sônico bi- ou tridimensional	0,5 a 30 m
w	K, M*, T	componente z do campo de velocidade	anemômetro sônico tridimensional	0,5 a 30 m
s _{max}	M	intensidade da rajada de vento	anemômetro de concha ou sônico	10 m
α _{max}	M	direção da rajada	anemômetro de concha ou sônico	10 m

* sugestão de sensor opcional na estação

** os limites superior e inferior (30 m e -50 m) foram definidos por serem estas estações de superfície

CLASSIFICAÇÃO DE VARIÁVEIS MONITORADAS E SENSORES

Para classificar variáveis monitoradas e sensores, é suficiente classificá-los em sensores de resposta rápida capazes de medir diretamente a turbulência no ar ou na água (x), e em sensores de resposta mais lenta capazes de medir valores momentâneos (\tilde{x}). Como visto, algumas vezes será indicado algum processamento de \tilde{x} no próprio sistema de aquisição da estação para aproximar a medida de uma média de 1 minuto. A Tabela 2 fornece a lista de sensores obrigatórios e opcionais em cada tipo de estação de monitoramento.

MEDIÇÕES OBRIGATÓRIAS POR TIPO DE ESTAÇÃO

Como apresentado anteriormente, sensores e medições são coisas diferentes, já que um sensor pode se prestar a diversos tipos de medição dependendo da escala de tempo em que o sensor é interrogado e das estatísticas destas leituras que são calculadas. É importante definir, portanto, uma notação que indique:

- a altura (ou profundidade: quando se tratar de uma profundidade, o valor será negativo) nominal de medição,
- escala de tempo da medição,
- os instantes de medição.

Algumas convenções são essenciais para a correta especificação das medições. Em primeiro lugar, o instante da medição indica o final do período em relação ao qual a medição foi feita.

EXEMPLO 14 – O valor de \bar{p}_v das 10:30 UTC significa a média de p_v entre 10:20₊ e 10:30 UTC.

EXEMPLO 15 – O valor de \tilde{T}_{\max} das 10:30 significa o máximo valor de 10 leituras de \tilde{T} (e não de T) entre 10:20₊ e 10:30 UTC.

EXEMPLO 16 – O valor de \tilde{T}_a das 10:40 significa uma média de um minuto de T_a entre 10:39₊ e 10:40 UTC (e portanto é uma medida momentânea).

A notação ${}^z x(t)$ significa a medição de x na altura z no instante $h - 10 + t$, onde h é o final do período de 10 minutos (h varia de 10 a 1440 com incrementos de 10 em 24 horas), e t é o instante em minutos desde o início do período de 10 minutos.

EXEMPLO 17 – ${}^2 \tilde{T}_a(10)$ é a temperatura momentânea do ar medida a uma altura de 2,0 m, 10 minutos após o início do período. Se o período for 10:40 UTC, então ${}^2 \tilde{T}_a(10)$ foi medido e transmitido às 10:40 UTC.

EXEMPLO 18 – ${}^{z_1, z_2} \tilde{W}(10)$ significa a umidade do solo medida ao final do período de 10 minutos em pelo menos 2 níveis de profundidade.

O indicador de nível de medição será suprimido quando não fizer sentido (por exemplo, para a temperatura da superfície da água, ou para o nível d'água de um rio).

Agora pode-se definir as medições obrigatórias para cada tipo de estação da Tabela 1; isto é feito na Tabela 3 para a maioria dos tipos de estação proposta neste trabalho. O objetivo de uma estação de tipo T é o cálculo das covariâncias do tipo $x_i' x_j'$, onde x' é um vetor de flutuações turbulentas. Por exemplo, uma estação de fluxo consistindo de um anemômetro sônico tri-dimensional que mede as 3 componentes da velocidade do vento e a temperatura virtual, temperatura do ar com um termopar de fio fino, a densidade de vapor d'água e a densidade de CO₂ com um analisador infra-vermelho deve reportar a cada 10 minutos a matriz de covariância C 7 × 7 do vetor

$$\mathbf{x} = [u \ v \ w \ T_v \ \rho_v \ \rho_{CO_2}]^T \quad (13)$$

destas 7 medidas. Na Tabela 3 isto é indicado genericamente por $x_i' x_j'$. A Tabela 4 lista as variáveis obrigatórias para uma estação meteorológica de mesoescala à parte da Tabela 3, devido ao grande número de medições geradas pelas estações M.

MEDIÇÕES QUE EXIGEM CUIDADOS ESPECIAIS

Temperatura da superfície da água

A medida da temperatura da superfície da água apresenta algumas dificuldades. Quando um

sensor de contato é utilizado (um termistor, por exemplo), e em situações de variação de nível, é necessário encontrar formas de manter o sensor de temperatura sempre na superfície pela utilização de bóias. Uma alternativa interessante é a utilização de sensores radiométricos.

Tabela 3 - Medições obrigatórias por tipo de estação.

Tipo	Medições
A	${}^2\bar{R}_{FA} \downarrow(10)$, ${}^2\tilde{I}_{MF}$, ${}^2\bar{u}(10)$, ${}^2\bar{v}(10)$, $\bar{T}_0(10)$ $\tilde{T}_{0,min}(10)$
B	${}^{z_1,z_2}\bar{T}_a(10)$, ${}^{z_1,z_2}\bar{p}_v(10)$
F	$\tilde{Z}_s(10)$
G	$\tilde{Z}_g(10)$
N	${}^2\bar{R}_l(10)$, ${}^z\bar{G}(10)$
P	${}^2\tilde{I}(1)$, ${}^2\tilde{I}(2)$, ..., ${}^2\tilde{I}(10)$
R	${}^2\bar{Q} \downarrow(10)$, ${}^2\bar{L} \downarrow(10)$
S	$\tilde{Z}_s(10)$, $\tilde{C}_s(10)$
T	${}^z\overline{x'_i x'_j}(10)$
U	${}^z\tilde{W}(10)$, ${}^z\tilde{T}_s(10)$
V	${}^{z_1,z_2}\bar{u}(10)$, ${}^{z_1,z_2}\bar{v}(10)$

Dados evaporimétricos

Os dois tipos de evaporímetro que mais uso encontrados no Brasil (e possivelmente, também, no mundo) são o tanque Classe A, e o evaporímetro Piché. Inegavelmente, os tanques evaporimétricos Classe A têm até hoje grande utilidade em hidrologia (Brutsaert e Parlange, 1998) e agrometeorologia (Stanhill, 2002). Por outro lado, sua aplicação sem calibrações específicas que na prática envolvem medições independentes de evapotranspiração ou de evaporação é virtualmente impossível (Brutsaert e Yeh, 1976). Ao mesmo tempo, a evaporação de Penman é altamente correlacionada com a evaporação de tanque Classe A, pelo menos na escala mensal (Morton, 1966); isto significa que, na prática, é possível substituir o uso de tanques evaporimétricos Classe A pelo da equação da Penman, cujos valores \bar{E} por sua vez podem ser calculados a partir dos dados padrão médios de 10 minutos listados na Tabela 4 para uma estação meteorológica (vide equação (12)). Portanto, propõe-se neste trabalho que as séries de evaporação potencial Penman, ou Penman-Monteith, sejam utilizadas quando necessário como

sucedâneos da evaporação em tanque Classe A, eventualmente utilizando-se regressões entre ambas para a extensão de séries de dados. A automação das medidas de evaporação em tanques é demasiadamente difícil de ser efetivada na prática em larga escala, de forma que sua medição precisará continuar a ser feita de forma manual.

Umidade do solo

O desenvolvimento de modelos matemáticos e técnicas de simulação numéricas na tentativa de descrever e melhor compreender a dinâmica da água no sistema solo-vegetação-atmosfera tem feito com que o monitoramento automático contínuo da umidade do solo seja cada vez mais importante.

Tabela 4 - Medições obrigatórias de uma estação M.

Tipo	Medições
temperatura momentânea	${}^2\tilde{T}_a(10)$
temperatura min	${}^2\tilde{T}_{max}(10)$, ${}^2\tilde{T}_{min}(10)$
temperatura média	${}^2\bar{T}_a(10)$
umidade momentânea	${}^2\tilde{p}_v(10)$
umidade média	${}^2\bar{p}_v(10)$
vento momentâneo	${}^{10}\tilde{u}(10)$, ${}^{10}\tilde{v}(10)$
vento de rajada	${}^{10}s_{max}(10)$ (vide equação (9))
direção da rajada	${}^{10}\alpha_{max}(10)$
vento médio	${}^{10}\bar{u}(10)$, ${}^{10}\bar{v}(10)$
pressão momentânea	${}^2\tilde{p}(10)$
pressão média	${}^2\bar{p}(10)$
irradiância solar média	${}^2\bar{Q} \downarrow(10)$
precipitação momentânea	${}^2\tilde{I}(1)$, ${}^2\tilde{I}(2)$, ..., ${}^2\tilde{I}(10)$

A tecnologia instrumental para o monitoramento contínuo da umidade do solo é modernamente toda centrada no uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR, sigla em inglês para *Time-Domain Reflectometry*). São instrumentos versáteis, seguros e fáceis de serem operados, embora não dispensem a necessidade de calibração. As equações de calibração sugeridas pelos fabricantes desses sensores normalmente são do tipo linear ou polinomial.

Todavia, algumas experiências (EMBRAPA, 1996, p.ex.) têm mostrado que as curvas de calibração de sensores TDR não ficam isentas de discussão quando se pretende universalizá-las. Isso é particularmente verdadeiro em solos tropicais, onde os altos teores de ferro no solo influenciam sua constante dielétrica. Assim sendo, torna-se necessário fazer uma calibração para cada solo específico. Tem-se observado, entretanto, que as curvas de calibração específicas para cada solo apresentam-se de modo geral paralelas às fornecidas pelos fabricantes, o que tem simplificado a sua correção a partir de medidas experimentais da umidade *in situ* e respectivos valores de leituras do instrumento (Figura 2). A diferença entre os valores de umidade esperado e medido representa, assim, o coeficiente linear que deve ser adicionado ou subtraído da equação original para se obter a específica (real).

Rajadas de vento

A equação (8) subentende a medição de (u, v) em alta freqüência para que seja possível obter médias de $\Delta t = 3$ s confiáveis. Uma freqüência mínima de cerca de 10 s é necessária para o processo de aquisição conforme discutido no EXEMPLO 6. A Figura 3 ilustra os riscos de se tentar medir “rajadas” com uma freqüência de aquisição demasiadamente baixa. As medidas feitas em estações convencionais utilizam anemógrafos, equipamentos que registram a velocidade instantânea do vento, conforme apresenta a Figura 3a. Se a programação da estação automática não for adequada, pode-se perder o momento do vento de rajada. A Figura 3b apresenta medições de “rajada” na mesma estação – e para o mesmo evento meteorológico – com um sistema de aquisição de dados programado para realizar uma medida de velocidade de vento por minuto, indicando como os valores resultantes ficam significativamente sub-estimados.

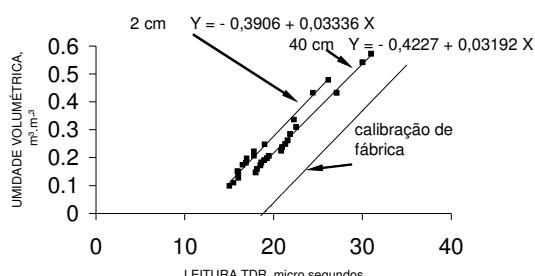


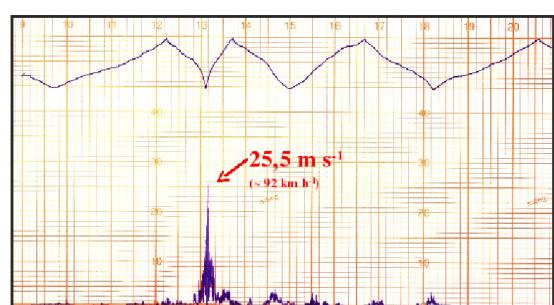
Figura 2 - Exemplo de curva de calibração de um TDR.

Umidade do ar

O sensor hoje em dia universalmente utilizado para a medição da umidade do ar é o do tipo capacitivo que mede a umidade relativa — y , em geral acoplado com um termistor para a medição da temperatura do ar T_a em um mesmo aparelho. Existe uma longa tradição em meteorologia sinótica no Brasil de reportar dados de umidade relativa. Como o seu nome diz, entretanto, a umidade relativa sozinha não fornece uma medida da umidade absoluta do ar ou densidade de vapor d'água ρ_v . Dada uma medição acoplada de y e de T_a , é elementar obter a pressão de vapor do ar e_a e a densidade absoluta ρ_v por meio de

$$e_a = y e^*(T_a) = \rho_v R_v T_a, \quad (14)$$

onde R_v é a constante de vapor do vapor d'água.



(a)

Data	Horário	Vel. rajada (m/s)
18/03/05	06:00	2,3
18/03/05	07:00	2,0
18/03/05	08:00	1,7
18/03/05	09:00	2,5
18/03/05	10:00	2,8
18/03/05	11:00	4,7
18/03/05	12:00	3,2
18/03/05	13:00	—
18/03/05	14:00	14,1
18/03/05	15:00	4,9
18/03/05	16:00	3,9
18/03/05	17:00	3,5

(b)

Figura 2 - Medições de rajadas de vento realizadas para o mesmo episódio meteorológico no dia 18 de março de 2005. (a) anemograma da estação meteorológica convencional do IAPAR (Londrina, PR), utilizando anemógrafo, e (b) velocidade de rajada horária medida pela estação automática do SIMEPAR (Londrina, PR) utilizando anemômetro de hélice.

Faz muito mais sentido medir e reportar $\bar{\rho}_v$ e $\tilde{\rho}_v$ do que \bar{y} ou \tilde{y} , devido à não-linearidade da curva de pressão de saturação de vapor e^{*} (Malleiros et al., 2005). Portanto, recomenda-se adotar ρ_v em lugar de y para reportar a umidade do ar nas estações de monitoramento brasileiras, fazendo a reconstituição das séries históricas onde for necessário ou recomendável. É importante notar que a partir das medições momentâneas ou médias de 10 min de ρ_v , T_a e p listadas na Tabela 4 é possível recuperar todas as outras grandezas indicadoras de umidade: temperatura de ponto de orvalho, temperatura de bulbo úmido, umidade específica, pressão de vapor d'água e a própria umidade relativa.

NOVOS TIPOS DE ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

Diretrizes específicas para uma nova geração de estações agrometeorológicas: ANMU

Embora historicamente as estações agrometeorológicas possuíssem “sensores de solo” (principalmente termômetros), seu uso sempre foi extremamente restrito. O principal motivo é que é muito difícil relacionar as medidas em um tipo de solo/vegetação/superfície com os demais. Isto já era perfeitamente compreendido pela FAO em seu guia para estações agrometeorológicas de 1976 (Doorenbos, 1976, p. 29):

Soil cover is usually grass but it may be desirable to measure soil temperature under both bare and cropped conditions. Measurements are often taken within the enclosure of the meteorological station but the soil type and the soil cover may not be representative for the area for which the data will be used. Soil temperature should therefore preferably be taken at representative sites in terms of soil type, land preparation, depth of groundwater and soil cover.

Parece, portanto, inútil medir grandezas que dependem da superfície como se elas fossem independentes da mesma. Desta forma, sugere-se que o papel das estações agrometeorológicas “históricas” (assim como descritas pelo guia da FAO) seja substituído por estações do tipo ANMU segundo a classificação proposta no presente trabalho. Os motivos para esta sugestão são dados a seguir.

Medidas que são independentes do tipo de superfície incluem as diversas irradiações incidentes, e a precipitação. Grandezas tais como a temperatura e a umidade do ar, e a velocidade do vento, certamente dependem do tipo de superfície: basta

verificar as previsões da teoria de similaridade de Monin-Obukhov para seus perfis junto ao solo (Brutsaert, 1982). No entanto, em uma rede sinótica ou de mesoescala elas possuem uma variabilidade espacial e uma dependência da superfície em que se encontram relativamente fracas, o que justifica a interpretação de que sua medição é (na prática) “independente” do tipo de superfície em que a estação meteorológica está instalada.

Suponha agora que se realizem medições de R_l , T_s e de W em um “gramado” OMM; neste caso, não há metodologias disponíveis para relacioná-las com os reais valores destas variáveis nos ecossistemas regionais mais representativos. Se a estação está localizada em uma região coberta por milho e pastagens, a medição de R_l e de W no gramado da estação meteorológica é problemática para representar os seus respectivos valores sobre tais ecossistemas. Mais que isto, a existência do dado sem a devida referência ao ecossistema sobre o qual foi medido pode conduzir a erros graves na sua utilização.

A conclusão é que estações dos tipos A, B, N, T e U são específicas para a superfície e o ecossistema que estão medindo. Portanto, os seus dados sempre devem estar associados ao máximo de informação possível sobre os ecossistemas e o tipo de solo respectivos. Somente assim estas estações (tipicamente usadas em agrometeorologia e micrometeorologia) e suas medições associadas podem ser corretamente utilizadas.

Portanto, recomenda-se fortemente que não se meçam grandezas tais como: umidade do solo, temperatura do solo, fluxo de calor no solo, radiação líquida, fluxos turbulentos de calor latente e sensível ou *momentum*, etc., a não ser em estudos de ecossistemas específicos. Isto não impede, obviamente, que tais estações adquiram um caráter permanente como parte de uma rede de monitoramento, em cujo caso suas medidas de I , p , T_a , ρ_v , etc. têm valor idêntico ao de estações M em “gramados” OMM e as complementam naturalmente.

Fica claro, portanto, que diversas das medidas historicamente associadas às estações agrometeorológicas são dependentes do tipo de solo e da cobertura vegetal. Note-se que no caso de uma estação A, a grandeza que possui maior dependência do tipo de superfície é a temperatura da superfície, T_0 . A melhor alternativa atualmente disponível para a medição robusta da temperatura da superfície (que substituiria a “temperatura de relva” das estações agrometeorológicas clássicas) é o uso de termometria infra-vermelha.

Tabela 5 - Medições feitas atualmente na estação do Lemma em Marechal Cândido Rondon, PR. Estação do tipo AT.

Tipo	Equipamento utilizado	Medições
Medições a 10 Hz		
Temperatura do ar momentânea e média	Termopar de fio fino, termistor (medidas independentes)	${}^{10}\tilde{T}_a(10), {}^{10}\bar{T}_a(10)$
Temperatura virtual	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}\bar{T}_v(10)$
Componentes horizontal e vertical do vento	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}\bar{u}(10), {}^{10}\bar{v}(10), {}^{10}\bar{w}(10)$
Umidade absoluta momentânea e média	Higrômetro capacitivo	${}^{10}\tilde{p}_v(10), {}^{10}\bar{p}_v(10)$
variâncias e covariâncias	todos acima	matriz de covariância de $\mathbf{x} = [u' v' w' T_v' T_a' \rho_v']$
Medições a 0,1 Hz		
Temperatura momentânea	Termistor	${}^2\tilde{T}_a(10)$
Temperatura max min	Termistor	${}^2\tilde{T}_{\max}(10), {}^2\tilde{T}_{\min}(10)$
Temperatura média	Termistor	${}^2\bar{T}_a(10)$
Umidade momentânea	Higrômetro capacitivo	${}^2\tilde{p}_v(10)$
Umidade média	Higrômetro capacitivo	${}^2\bar{p}_v(10)$
Vento momentâneo	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}\tilde{u}(10), {}^{10}\tilde{v}(10)$
Vento de rajada	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}s_{\max}(10)$
Direção de rajada	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}\alpha_{\max}(10)$
Vento médio	Anemômetro sônico tri-dimensional	${}^{10}\bar{u}(10), {}^{10}\bar{v}(10)$
Pressão atmosférica momentânea	Barômetro digital	${}^2\tilde{p}(10)$
Pressão atmosférica média	Barômetro digital	${}^2\bar{p}(10)$
Irradiância solar média	Piranômetro de silício	${}^2\bar{Q}\downarrow(10)$
Irradiância líquida	Radiômetro Líquido	${}^2\bar{R}_l(10)$
Precipitação momentânea	Pluviômetro <i>tipping bucket</i>	${}^2\tilde{I}(1), {}^2\tilde{I}(2), \dots, {}^2\tilde{I}(10)$
Fluxo de calor no solo	Placa de fluxo de calor	$-0,02\bar{G}(10)$
Temperatura do solo momentânea	Termistor	$-0,02\tilde{T}_s(10), -0,225\tilde{T}_s(10), -0,375\tilde{T}_s(10), -0,525\tilde{T}_s(10), -0,675\tilde{T}_s(10)$
Umidade do solo momentânea	TDR	$-0,02\tilde{W}_s(10), -0,225\tilde{W}_s(10), -0,375\tilde{W}_s(10), -0,525\tilde{W}_s(10), -0,675\tilde{W}_s(10)$

Monitoramento hidrológico *in situ* da umidade e da temperatura do solo: PU

Uma alternativa muito atraente para as futuras redes de monitoramento hidrometeorológico é acoplar estações P e U. O esforço de telemetria é praticamente igual, e existe suficiente liberdade para instalar os pluviômetros sobre solos e coberturas vegetais regionalmente representativos; com isto, seria possível aumentar consideravelmente a cobertura de dados de umidade do solo com um impacto considerável para a previsão numérica de tempo, a agrometeorologia e a hidrologia operacional. O benefício seria ainda maior se também fosse possível incluir medições de temperatura e umidade médias do ar neste tipo de estação.

TRANSMISSÃO DOS DADOS

A transmissão dos dados em tempo real, ou quase real, é ainda um desafio para muitas redes telemétricas. Atualmente são utilizadas principalmente a transmissão via rádio ou via satélite, cada uma com suas vantagens e dificuldades. A transmissão de dados por satélite sofre ou de altos custos de transmissão, ou de uma baixa taxa de transmissão. Por exemplo, a transmissão de dados a cada 3 horas ainda é o padrão para o satélite GOES; o número máximo de dados independentes que podem ser transmitidos a cada 3 horas é da ordem de 150. Esta freqüência de transmissão é adequada para a previsão sinótica, mas não para o *nowcasting* (previsão de curto prazo) e a previsão de mesoescala, ou para a previsão hidrológica em pequenas bacias. Com isso, o ganho em automação e em densidade espacial de estações muitas vezes é perdido no “gargalo” da freqüência de transmissão.

Uma forma de transmissão dos dados que tem emergido como alternativa bastante atraente é a transmissão por telefonia celular. Neste sistema, com a programação adequada da estação, é possível a transmissão de dados assim que são coletados/processados. Os custos de transmissão são relativamente baixos quando comparados à compra de um sistema de transmissão via rádio ou mesmo do sinal de satélite. Obviamente uma limitação ainda existente é a disponibilidade do sinal da operadora de celular em todos os locais onde se deseja instalar uma estação, seja ela de qualquer tipo. Para localidades mais distantes, ou mesmo em situação de relevo que não favoreçam a captação do sinal da operadora de celular, este sistema pode não ser viável. De qualquer forma, com o crescimento dos

sistemas de telefonia celular em todo o Brasil, esta opção de transmissão deverá se tornar cada vez mais comum e capaz de fornecer dados em tempo quase real para rede hidrológicas e meteorológicas de mesoescala.

ESTUDO DE CASO

O Lemma - Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental - mantém uma estação MNT instalada no município de Marechal Cândido Rondon, região oeste do estado do Paraná. Esta estação está muito próxima também de se tornar (na classificação do presente trabalho) AMNTR, bastando a inclusão da medição de $L \downarrow$, $R_{FA} \downarrow$, T_0 e i_{MF} .

A programação da estação foi feita em um sistema de aquisição de dados *Campbell Sci CR23X* para que sejam coletados dados em alta freqüência (10 Hz) e em baixa freqüência (0,1 Hz), conforme descrito na Tabela 5. A cada 10 min, são calculadas diversas estatísticas com os dados de alta freqüência – médias, variâncias e covariâncias – e os dados são transmitidos para o Lemma, no Centro Politécnico da UFPR em Curitiba, PR, por telefonia celular utilizando um transmissor da marca *Duodigit*. O fluxo de calor latente da estação é dado por (11) com um fator de correção devido ao uso de um higrômetro capacitivo de resposta lenta, conforme descrito por Dias et al. (2002) e mais recentemente adaptado para uso com um anemômetro sônico por Duarte (2006) e Dias et al. (2006).

Conforme pode ser verificado na Tabela 5, há dois conjuntos termistor-higrômetro capacitivo, um a 10 m funcionando a 10 Hz com o conjunto de medição de fluxos, e um a 2 m funcionando a 0,1 Hz no papel regular em que é utilizado em estações meteorológicas.

O sistema de transmissão por telefonia celular foi programado em linguagem Java para que, se alguma transmissão não ocorrer por falta de sinal da operadora de celular, os dados sejam transmitidos na transmissão seguinte, assim que o sinal for restabelecido. O sistema está em funcionamento desde abril de 2006 com resultados satisfatórios.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As tecnologias atualmente disponíveis para a medição e a transmissão de dados hidrológicos e meteorológicos permitem um avanço considerável

nas formas de medição. Um efeito indesejável do progresso tecnológico foi a disseminação de formas de programar os sistemas de aquisição de dados incompatíveis entre si, e que não têm sido sujeitas a nenhuma padronização. O presente trabalho representa um esforço de classificação e uniformização de procedimentos.

Tal esforço de uniformização não poderá ser imposto simplesmente por normatização: seu sucesso depende sobretudo da adesão voluntária dos responsáveis pela implementação e operação de redes automáticas e telemétricas. Neste trabalho procurou-se fazer recomendações totalmente compatíveis com os padrões já existentes na literatura, tanto da OMM quanto da FAO. Ao se seguir os padrões propostos neste trabalho, portanto, estar-se-á automaticamente seguindo padrões internacionais existentes. Por outro lado, foi necessário redefinir termos e estabelecer explicitamente as diferenças entre valores “instantâneos” (medidos por sensores com constantes de tempo inferiores à micro-escala de tempo de Kolmogorov), “momentâneos” (médias de 1 minuto antes do horário nominal de medição) e “médios” (médias de 10 minutos antes do horário nominal de medição).

A proposta aqui feita de realizar medição de chuva com resolução de um minuto, e medições em geral em intervalos de 10 minutos, é relativamente ousada quando comparada com o estado atual de funcionamento das redes automáticas brasileiras (onde o mais comum é a medição horária). Entretanto, como mostra o estudo de caso apresentado em uma estação real, é perfeitamente possível evoluir para este padrão em pouco tempo a partir de um esforço concentrado principalmente em dois pontos: reprogramação dos sistemas de aquisição de dados, e transmissão com grande largura de banda, tipicamente usando-se telefonia celular.

Finalmente, é indispensável enfatizar a importância de recursos humanos bem treinados para a manutenção das redes. Neste sentido, vê-se que existe agora claramente uma distinção entre um “zelador” que deve realizar tarefas simples tais como manter os instrumentos nivelados, os pluviômetros desobstruídos, a grama cortada (quando for o caso), etc., com grande frequência (pelo menos uma vez por semana), residindo próximo à estação; e um “operador”, um profissional adequadamente treinado, que deve ser capaz de tarefas mais complexas tais como a reprogramação em campo dos sistemas de aquisição, se necessário, a reposição de sensores, etc., e que pode visitar a estação com menor frequência, vindo de distâncias maiores. Sem nenhuma dúvida, o investimento mais importante (e infeliz-

mente muitas vezes negligenciado) que se pode fazer na qualidade dos dados hidrológicos e meteorológicos é na formação e manutenção de zeladores e operadores de grande capacitação, e não simplesmente na aquisição de equipamentos.

REFERÊNCIAS

- BONELL, M.; CALLAGHAN, J.; CONNOR, G. *Forests, water and people in the humid Tropics*. Cambridge University Press, 2005.
- BROCK, F. V.; RICHARDSON, S. J. *Meteorological Measurement Systems*. Oxford University Press, 290 p., 2001.
- BROCK, F. V.; CRAWFORD, K. C.; ELLIOTT, R. L.; CUPERUS, G. W.; STADLER, S. J.; JOHNSON, H. L.; EILTS, M. D. The Oklahoma Mesonet: a technical overview. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 12, p. 5, 1995.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere*. Dordrecht: D. Reidel, 1982.
- BRUTSAERT, W.; PARLANGE, M. B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, v. 396, p. 30, 1998.
- BRUTSAERT, W.; YEH, G.-T. Implications of a type of empirical evaporation formula for lakes and pans. *Water Resources Research*, v. 6, p. 1202-1208, 1976.
- DIAS, N. L.; KAN, A.; GRODZKI, L.; SANCHEZ, S. D.; VIS-SOTTO, D. O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, p. 143-160, 2002.
- DIAS, N. L.; DUARTE, H. F.; MAGGIOTTO, S. R.; GRODZKI, L. An attenuated eddy covariance method for latent heat flux measurements. *Water Resources Research*, v. 43 p. W04415. 2006.
- DIAS, N. L.; MARCELLINI, S. S. Implementação do sistema de controle de qualidade de dados objetivo do SIME-PAR: testes preliminares. In: CD-ROM do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.
- DUARTE, H. F. Um método para medições de fluxo de calor latente a partir de sensores de umidade capacitivos. Tese MSc, UFPR, 2006.
- DOORENBOS, J. *Agro-meteorological field stations*. Irrigation and drainage paper 27, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1976
- EMBRAPA. *Instrumentação Agropecuária*. São Carlos, EMBRAPA-CNPDI, 1996. 291p.

- GASH, J.; NOBRE, C.; ROBERTS, J.; VICTORIA, R. (Eds.). *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: Wiley, 1996.
- HICKS, B. B. Propeller anemometers as sensors of atmospheric turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 3, p. 214-228. 1972.
- HORST, T. W. A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first-order response scalar sensors. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 82, p. 219-233. 1997.
- KNMI. *Handbook for the Meteorological Observation*. Koninklijk Nederlands Meterologisch Instituut. 2000. 112 p.
- LUMLEY, J. L.; PANOFKSY, H. A. *The structure of atmospheric turbulence*. New York: Interscience, 1964.
- MALHEIROS, A. L.; DIAS, N. L.; CONSELVAN, A. O efeito da promediação sobre a pressão de vapor média medida em estações meteorológicas automáticas. In: CD-ROM, XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.
- MASSMAN, W. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 104, p. 185-198. 2000.
- MASSMAN, W. Reply to comment by Rannik on "A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems". *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 107, p. 247-251. 2001.
- MOORE, C. J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 37, p. 17-35. 1986.
- MORTON, F. I. Potential evaporation and river basin evaporation. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 91, n. HY6, p. 67-97. 1966.
- RANNIK, Ü. A comment on the paper by W. J. Massman "A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems". *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 107, p. 241-245. 2001
- SCHROEDER, J. L.; BURGETT, W. S.; HAYNE, K. B.; SONMEZ, I.; SKWIRA, G. D.; DOGGETT, A. L.; LIPE, J. W. The West Texas Mesonet: a technical overview. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 22, p. 211, 2005.
- SHAFER, M. A.; FIEBRICH, C. A.; ARNDT, D. S.; FREDERICHSON, S. E.; HUGHES, T. W. Quality assurance procedures in the Oklahoma Mesonet network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 17, p. 474, 2000.
- STANHILL, G. Is the Class A evaporation pan still the most practical and accurate meteorological method for determining irrigation water requirements? *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 112, p. 233-236, 2002.
- STULL, R. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer, 1988.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. *A first course in turbulence*. Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1972.
- WMO. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization, Geneva, 7. ed. (2006).

Guidelines for Automatic and Telemetric Surface Networks

ABSTRACT

Types of sensors and associated measurements performed by automatic stations are discussed for a variety of station roles, as well as the difficulties encountered by several of those measurements. In this context, the Kolmogorov's microscale τ is used to define formally an "instantaneous" measurement. WMO's (World Meteorological Organization) definition of an instantaneous measurement is revised, since it is actually a 1-minute average. Instead, the use of the term "momentary" is proposed for such 1-minute averages. The timescales for data measurement and transmission are studied, and it is proposed to adopt a uniform 10-minute interval which is in accordance with the WMO standards. Finally, a broad new classification scheme for naming stations according to their specific purposes is put forth, in a way that provides a natural generalization for the traditional concepts of fluvimetric, pluviometric, meteorological and agrometeorological stations.

Key-words: automatic networks, instantaneous measurement.