

## CUIDADOS E ESTRATÉGIAS NA OBTENÇÃO DE PERFIS PSICROMÉTRICOS DE QUALIDADE NA SUPERFÍCIE

EVANDRO ZANINI RIGHI<sup>1</sup>, DAIANE DE VARGAS BRONDANI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eng. Agrônomo, Prof. da Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen-RS, Fone: 55 3744 8964, e-mail: [ezrighi@yahoo.com](mailto:ezrighi@yahoo.com); <sup>2</sup>Acadêmica do Curso de Meteorologia da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS.

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de Setembro de 2009  
– GranDarrell Minas Hotel, Eventos e Convenções – Belo Horizonte – MG.

**RESUMO:** Fez-se uma simulação e análise do impacto dos erros de medidas psicrométricas sobre as estimativas da razão de Bowen e do fluxo de calor latente obtido pelo método do balanço de energia – razão de Bowen. São discutidas as condições de maior impacto dos erros de medida, apontando maneiras de anulá-los ou reduzi-los e de diminuir o seu efeito sobre as estimativas. Destaca-se o cuidado na realização da manutenção dos conjuntos psicrométricos, especialmente com relação à troca da gase do termômetro de bulbo úmido e as estratégias de aumento da distância vertical entre os conjuntos, quando possível, e da variação do posicionamento dos conjuntos durante as medidas. São também discutidas algumas vantagens e dificuldades desses métodos.

**Palavras-chave:** psicrometria, erros de medida, razão de Bowen

**Abstract:** A simulation and analysis of the impact of psychrometric measurements errors on the Bowen ratio and latent heat flux estimates by the energy balance – Bowen ratio method was did. The conditions of psychrometric measurements errors of major impact are discussed and solutions are appointed for nulling or reducing them and for diminish your effect on the Bowen dependent estimates. Is remarkable the care in the psychrometric ensemble maintenance, specially for wick replacement of the wet bulb thermometer, and some strategies of increase ensembles distances when possible and the position change of the ensemble along the measures. Also, are discussed some advantages and disadvantages of the solutions appointed.

**INTRODUÇÃO:** Os métodos micrometeorológicos balanço de calor – razão de Bowen e Aerodinâmico para determinação dos fluxos de calor latente ( $LE$ ) e sensível ( $H$ ) são baseados nas relações de fluxo-gradiente. Para sua aplicabilidade, são necessários perfis de umidade e temperatura do ar dentro da camada atmosférica em equilíbrio com a superfície de interesse e preferencialmente acima da sub-camada superficial de rugosidade, significando uma camada estreita para realização das medidas (MONTEITH & UNSWORTH, 1990). Dependendo das condições de “bordadura”, esta situação pode ser agravada, confinando as medidas numa camada atmosférica mais estreita, com a instalação dos equipamentos psicrométricos próximos um do outro, o que resulta em pequenas diferenças de temperatura e torna necessário maior controle dos erros instrumentais.

Vários trabalhos estão disponíveis na bibliografia com respeito aos cuidados que devem ser tomados nas medidas psicrométricas a campo para se obter medidas de temperatura de bulbo seco ( $T$ ) e principalmente de bulbo úmido ( $Tu$ ) com erro minimizado, destacando-se os trabalhos de VISSCHER (1995) e de SIMÕES-MOREIRA (1999) em laboratório e os apontamentos de SOARES et al. (1996), MARIN et al. (2001) e RIGHI (2004) a campo, não sendo ainda matéria de consenso. Portanto, o presente trabalho apresenta uma análise do efeito relativo dos erros de medida de  $T$  e  $Tu$  sobre as estimativas micrometeorológicas pelo método do Balanço de energia –

Razão de Bowen, discutindo algumas formas de minimizar esses erros. É dado enfoque sobre os erros nas medidas de  $Tu$  pela maior dificuldade em se obter valores precisos (VISCHER, 1995; MONTEITH & UNSWORTH, 1990).

**MATERIAL E MÉTODOS:** O trabalho foi baseado em informações bibliográficas e em simulações realizadas em computador (planilhas eletrônicas – Excell<sup>®</sup>) através da atribuição de valores de  $T$ ,  $Tu$  e do déficit de saturação de vapor do ar ( $D$ ) e seus respectivos erros. Quando conveniente,  $D$  foi obtido pela diferença entre a pressão de saturação de vapor na temperatura do ar e a pressão atual de vapor ( $D = es - ea$ ), sendo  $ea$  calculado pela equação psicrométrica com um coeficiente psicrométrico de  $0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$  (psicrômetro ventilado). Seguiu-se as metodologias utilizadas por FUCHS & TANNER (1970) e PEREZ et al. (1999). Os níveis hipotéticos de obtenção das variáveis são identificados pelo número 1 para o nível inferior e o número 2 para o nível superior.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Na Figura 1A são apresentados os erros relativos em  $\beta$  ( $\delta\beta/\beta$ ) em função da diferença de pressão de vapor ( $\Delta e$ ) para duas diferenças de temperatura ( $\Delta T$ ) entre dois níveis adjacentes, considerando-se  $\delta\Delta e = 0,04 \text{ kPa}$  como erro absoluto em  $\Delta e$  e  $\delta\Delta T = 0,04^\circ\text{C}$  como erro absoluto em  $\Delta T$  (RIGHI, 2004). Nota-se que a medida que o gradiente de umidade tende a zero,  $\delta\beta/\beta$  adquire valores elevados. Os erros são maiores com um gradiente de temperatura menor ( $-0,5^\circ\text{C}$ ), pois  $|\delta\beta/\beta| = \delta\Delta T/|\Delta T| + \delta\Delta e/|\Delta e|$  significa que a medida que  $\Delta T$  e  $\Delta e$  diminuem, o efeito dos erros é amplificado.

Na Figura 1B são mostrados os erros  $\delta LE/LE$  em função de  $\Delta e$  para duas diferenças de temperatura entre os níveis hipotéticos 2 e 1 ( $T_2 - T_1 = -0,5$  e  $T_2 - T_1 = -3,0$ ) onde fica claro que quando ocorrem os maiores erros em  $\beta$ , nas proximidades de  $\Delta e = 0$ , ocorrem os maiores erros relativos em  $LE$ . Esta resposta de  $\delta LE/LE$  em função de  $\Delta e$  significa que conforme a superfície perde umidade (valores de  $\beta$  aumentando), os erros em  $LE$  são amplificados, tanto pela redução de  $|\Delta e|$ , quanto pelo aumento de  $|\Delta T|$ , pois conforme a equação  $|\delta\beta/\beta| = |1 + \beta| \cdot |\delta\Delta Tu/\Delta Tu + \delta\Delta T/\Delta T|$ , os maiores valores de  $\beta = H/LE$  amplificam os erros de medida por ser multiplicativo. De acordo com ANGUS & WATTS (1984), conforme  $\beta$  aumenta, sua determinação torna-se instável e pequenos erros em  $\Delta T$  e  $\Delta Tu$  resultam em grandes erros em  $LE$ . Como em psicrometria se trabalha com  $\Delta Tu$ , a Figura 1C mostra a relação entre os erros relativos em  $LE$  e erros absolutos  $\delta\Delta Tu$  de  $0,05^\circ\text{C}$  e  $0,10^\circ\text{C}$ . Como quando em função de  $\Delta e$ , a medida que  $\Delta Tu$  tende a zero,  $\delta LE/LE$  assume valores elevados e o erro de  $0,10^\circ\text{C}$  é amplificado com maior intensidade conforme  $\Delta Tu$  se aproxima de zero.

Nessa análise, fica evidente que quanto menores forem os gradientes naturais, principalmente de umidade, mais significativo é o efeito dos erros de medida, podendo ser um fator limitante ao uso de determinados instrumentos na determinação de perfis de umidade e temperatura. RIGHI (2004) e RIGHI et al. (2007) evidenciaram menores gradientes de umidade no ar durante períodos secos, estimando erros relativos mais elevados. Esse resultado implica na necessidade de rigorosa manutenção dos psicrômetros, especialmente o sensor de bulbo úmido, o qual acumula sujeira pela presença de umidade e é sensível à diferenças geométricas da gase (maiores informações em VISCHER (1995) e SIMÕES-MOREIRA (1998)), impicando em padronização do amarrio das gazes nos bulbos.

Como é difícil construir conjuntos psicrométricos rigorosamente iguais, normalmente existem diferenças entre os aparelhos situados nos diferentes níveis, ocorrendo erros sistemáticos. Nesses

casos, tendo-se uma camada limite em equilíbrio com a superfície consideravelmente alta (grande extensão de “bordadura”), pode-se trabalhar com maiores espaçamentos verticais entre os psicrômetros para ter-se maiores valores de  $|\Delta T|$  e  $|\Delta Tu|$  e tornar os erros relativos menores (SPITTLEHOUSE & BLACK, 1980; ASTON, 1985; UNLAND et al., 1996), pois o erro na medida de  $T$  e  $Tu$  é fixo. Outra forma, mais eficiente, é a correção das diferenças invertendo-se os psicrômetros durante o período de amostragem (FUCHS & TANNER, 1970; SPITTLEHOUSE & BLACK, 1979; 1980; REDFORD et al., 1980; MUNRO, 1980; McCAUGHEY & BRINTNELL, 1984; ASTON; 1985). ROSEMBERG & BROWN (1974) propuseram dispor os conjuntos psicrométricos periodicamente num mesmo nível, onde, considerando-se condições homogêneas horizontalmente, as diferenças de medida se devem aos equipamentos, as quais são algebricamente adicionadas às diferenças de temperatura. A inversão completa dos conjuntos apresenta a vantagem de potencialmente anular as diferenças entre eles, pois não é garantido que exista uma condição horizontal realmente homogênea, entretanto, tornaria a montagem do mastro micrometeorológico mais complicada e dispendiosa e seria necessário um maior número de canais nos sistemas de aquisição e armazenamento de dados, por ter-se que adicionar 1 psicrômetro para cada nível de medida intercalar. Outro recurso que pode ser utilizado para corrigir essas diferenças é intercomparando-se os diferentes conjuntos com uma mesma tomada de ar, numa certa periodicidade (DUGAS et al., 1991).

Devido à maior deposição de sujeira sobre os sensores nos aparelhos situados mais próximos ao solo, a constante psicrométrica varia de forma diferente ao longo do tempo nos diferentes níveis de medida. Portanto, é muito importante a manutenção dos psicrômetros e substituição ou limpeza das gazes, utilizando-se luvas limpas de gorduras e outras sujeiras e ao final da troca lavar a gaze para retirada de alguma sujeira que tenha sido depositada sobre o bulbo. O bulbo seco também deve ser limpo periodicamente, pelo acúmulo de poeira aumentar o tempo de resposta às variações ambientais. Se a gaze for de algodão, deve-se assegurar um bom contato entre o mesmo e o sensor, o que pode ser feito através do amarrão, de modo que os diferentes bulbos úmidos fiquem com geometria semelhante (MARIN et al., 2001). Isso pode ser parcialmente contornado com sensores de tamanho igual e amarrão uniforme. SOARES et al. (2003) constataram que a partir de cerca do 5º dia de funcionamento do psicrômetro, iniciou-se uma diminuição da depressão psicrométrica, com uma gaze de cadarço de algodão. Eles atribuíram esta redução ao acúmulo de poeira, à formação de colônias de fungos e a algum efeito da tintura do tecido. MARIN (2003) substituiu os gazes de algodão a cada 3 dias, pelo fato de se ter observado pesado acúmulo de sujeira dentro desse período, metodologia seguida por RIGHI (2004).

Durante a coleta dos dados, é recomendável proceder-se um acompanhamento diário da evolução dos valores de  $T$  e  $Tu$ , verificando possíveis problemas, como secamento da gaze do bulbo úmido, falta de energia no abastecimento dos propulsores de ar, obstrução da entrada de ar por acúmulo de sujeira etc.. Especialmente na determinação de perfis, é interessante verificar se os erros sobre as medidas não estão sendo comprometedores para a aplicação desejada, principalmente quando não se dispõe de sistemas de comparação entre os diferentes aparelhos.

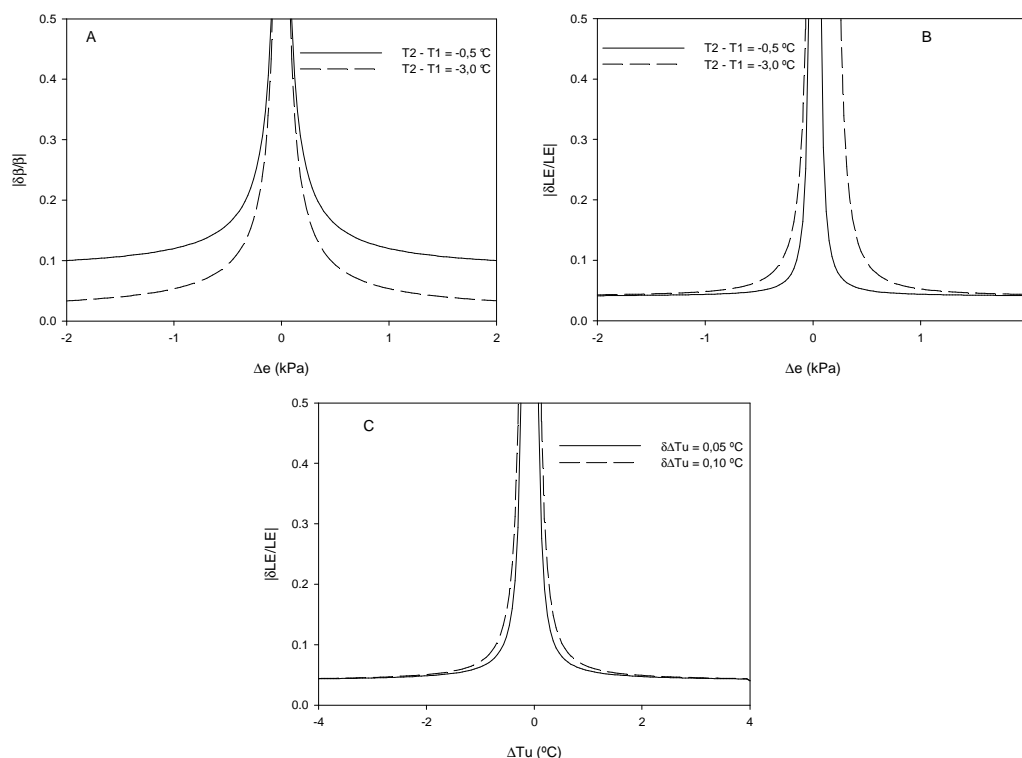


Figura 1: Erro relativo sobre a razão de Bowen ( $\delta\beta/\beta$ ) em função de  $\Delta e$  para duas diferenças de temperatura entre níveis adjacentes ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ):  $-0,5$  e  $-3,0^\circ\text{C}$ , considerando-se um erro absoluto em  $\Delta e$  ( $\delta\Delta e$ ) de  $0,04$  kPa e em  $\Delta T = T_2 - T_1$  ( $\delta\Delta T$ ) de  $0,04$   $^\circ\text{C}$  (A); erro relativo em  $LE$  ( $\delta LE/LE$ ) em função  $\Delta e$  para  $\Delta T = -0,5$  e  $\Delta T = -3,0^\circ\text{C}$  considerando-se  $\delta\Delta e = 0,04$  kPa e  $\delta\Delta T = 0,04^\circ\text{C}$  (B) e;  $\delta LE/LE$  em função da diferença da temperatura de bulbo úmido  $\Delta Tu$  com  $\delta\Delta T = 0,04^\circ\text{C}$  e erros nas diferenças de temperatura de bulbo úmido  $\delta\Delta Tu = 0,05^\circ\text{C}$  e  $\delta\Delta Tu = 0,10^\circ\text{C}$ .  $T_2$  e  $T_1$  são, respectivamente, as temperaturas do ar no nível superior 2 e inferior 1.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration – how good is the Bowen ratio method? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.8, p.133-150, 1984.
- ASTON, A. R. The effect of vertical separation of psychrometers on the determination of Bowen ratios over young eucalypt forest, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.35, p.299-307, 1985.
- DUGAS, W. A.; FRITSCHEN, L. J.; GAY, L. W.; HELD, A. A.; MATTHIAS, A. D.; REICOSKY, D. C.; STEDUTO, P.; STEINER, J. L. Bowen ratio, eddy correlation and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.56, p.1-20, 1991.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry, **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.7, p.329-334, 1970.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO FILHO, M. A.; VILLA NOVA, N. A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar, **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.58, n.4, p.839-844, 2001.

- MARIN, F. R. Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado. Piracicaba, 2003. 118p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- McCAUGHEY, J. H.; BRINTNELL, D. M. Evaluation of a Bowen ratio measurement system over forest and clear-cut sites at Ptawawa, Ontario, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v.1, p.276-282, 1984.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics**, New York: Edward Arnold. 1990. 290p.
- MUNRO, D. S. A portable differential psychrometer system, **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.19, p.206-214, 1980.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.97, p.141-150, 1999.
- REDFORD, T. G.; VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J. Humidity fluctuations over a vegetated surface measured with a Lyman-Alpha hygrometer and a fine-wire thermocouple psychrometer, **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v.19, p.860-867, 1980.
- RIGHI, E.Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada e sua partição nos renques e nas entrelinhas**. Piracicaba, 2004. 168p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2004.
- RIGHI, E.Z.; ANGELOCCI, L.R.; MARIN, F.R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, v.15, n.3, p.267-279, 2007.
- ROSEMBERG, N. J.; BROWN, K. W. “Self-checking” psychrometer system for gradient and profile determinations near the ground, **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.13, p.215-226, 1974.
- SIMÕES-MOREIRA, J. R. A thermodynamic formulation of the psychrometer constant, **Measurement Science & Technology**, Bristol, v.10, p.302-311, 1999.
- SOARES, J. M.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Influência do erro psicrométrico no balanço de energia pela razão de Bowen em um parreiral sob irrigação localizada no submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003, Santa Maria, RS. **Resumos...**, Santa Maria, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/Universidade Federal de Santa Maria, 2003. CD-Rom.
- SPITTLEHOUSE, D. L.; BLACK, T. A. Determination of forest evapotranspiration using Bowen ratio and eddy correlation measurements, **Journal of Applied Meteorology**, Oxford, v.18, p.647-653, 1979.
- SPITTLEHOUSE, D. L.; BLACK, T. A. Evaluation of Bowen ratio/energy balance method for determining forest evapotranspiration, **Atmosphere Ocean**, Downsview, v.18, p.98-116, 1980.
- UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; YANG, Z. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site, **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.82, p.119-153, 1996.
- VISSCHER, G. J. W. Standard psychrometers: a matter of (p)references, **Measurement Science & Technology**, Bristol, v.6, p.1451-1461, 1995.