

ESTIMATIVAS DE DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR SENSÍVEL E LATENTE ATRAVÉS DO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

Fabiano Chaves da SILVA¹, Raquel Aparecida FURLAN², Marcos Vinicius FOLEGATTI³

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estimar a densidade de fluxo de calor sensível (H) e de calor latente (LE), através do método da razão de Bowen e avaliar o efeito da variação da posição dos sensores em vários níveis de medidas na estimativa destes fluxos para a localidade de Davis – Ca. A concordância entre os valores medidos e estimados para os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), de maneira geral, foi alta com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,90. Os resultados encontrados indicaram melhora nas estimativas quando aumentarmos a distância entre os sensores. No entanto ao elevarmos o primeiro nível de medida em relação a superfície ocorreu uma divergência nas estimativas em relação aos valores medidos.

PALAVRAS-CHAVE: Razão de Bowen, fluxo de calor e grama

INTRODUÇÃO

O método da razão de Bowen (1926) tem se tornado padrão para mensurar os fluxos de calor latente e sensível de acordo com o balanço de energia. A validade do método tem sido verificada em diversos estudos (Tanner, 1960; Villa Nova, 1973; Sinclair et al., 1975; Bergamaschi et al., 1988 e Cunha et al., 1996). A estimativa de densidade de fluxo verticais através do método da razão de Bowen, baseia-se na resolução do balanço de energia da superfície, onde o saldo de radiação (R_n), se reparte entre os processos de evaporação (calor latente - LE), aquecimento do ar (calor sensível - H) e aquecimento do solo (G). O principal requerimento do método da razão de Bowen é que os gradientes de temperatura e umidade do ar sejam mensurados dentro da camada limite superficial e de preferência na porção da camada limite que está em equilíbrio com a superfície. O objetivo deste trabalho foi estimar a densidade de fluxo de calor sensível (H) e de calor latente (LE), através do método da razão de Bowen e avaliar o efeito da variação da posição dos sensores em vários níveis de medidas na estimativa destes fluxos para a localidade de Davis – Ca.

MATERIAL E MÉTODOS:

Foram utilizados dados de temperatura do ar (K) e umidade absoluta (g/cm^3) para os níveis de 0,35; 0,50; 0,70; 1,00; 1,40 e 2,0 m acima da superfície, saldo de radiação (R_n) em W/m^2 , medidos em dois dias distintos (02/06 e 29/09). Estes dados foram obtidos por Morgan et al. (1971). Os fluxos de calor sensível e latente em (W/m^2) foram medidos, nos referidos dias, na camada de

¹ Eng. Agrônomo, MsC, Doutorando, Bolsista FAPESP, DER/ESALQ/USP, E-mail: fcdsilva@carpa.ciagri.usp.br

² Eng. Agrônomo, MsC, Doutoranda, Bolsista CAPES, DER/ESALQ/USP, E-mail: rafurlan@carpa.ciagri.usp.br

³ Prof. Assoc., Dr. – DER/ESALQ/USP, E-mail: mvfolega@carpa.ciagri.usp.br

0,35 a 2,0 m. Detalhes sobre o esquema experimental e o instrumental utilizado podem ser vistos neste mesmo trabalho.

O método de balanço de energia é um método micrometeorológico baseado no princípio da conservação de energia, ou seja, o ganho de energia é igual à perda de energia. O balanço de energia vertical na superfície em W/m^2 pode ser apresentado como:

$$R_n - G - H - LE = 0 \quad (1)$$

Sendo R_n o saldo de radiação, G o fluxo de calor no solo medidos diretamente; H o fluxo de calor sensível e LE o fluxo de calor latente de evaporação.

O método da razão de Bowen (1926) determina o fluxo de calor sensível e latente baseado na resolução da equação balanço de energia considerando a razão de Bowen ($\beta = H / LE$)

$$LE = - \frac{(R_n + G)}{(1 + \beta)} \quad (2)$$

O autor considera os transportes de calor sensível e de vapor de água similares, concluindo que a razão entre os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e latente é igual à unidade.

A razão de Bowen foi estimada pela equação:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3)$$

sendo: γ a constante psicrométrica; ΔT a variação da temperatura entre os níveis de medidas; Δe a determinação da diferença da pressão de vapor d'água. O fluxo de calor sensível foi determinado por diferença na equação 1.

Os valores de fluxos de calor sensível e latente, estimados e medidos, foram correlacionados em gráficos do tipo dispersão com os respectivos coeficientes de correlação. Utilizou-se na análise do efeito da variação do gradiente na estimativa dos fluxos, as seguintes camadas: (0,35 – 0,50; 0,35 – 0,70; 0,35 – 1,00; 0,35 – 1,40; 0,35 – 2,00); (0,50 – 0,70; 0,50 - 1,00; 0,50 – 1,40; 0,50 – 2,00); (0,70 – 1,00; 0,70 – 1,40; 0,70 – 2,00); (1,00 – 1,40; 1,00 – 2,00).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os componentes do balanço de energia medidos e utilizados como padrão nas correlações analisadas neste trabalho para dois dias distintos (2/06 e 29/09) sobre uma superfície gramada, encontram-se na tabela 1. Bem como os valores do coeficiente de rugosidade da superfície (z_0) e deslocamento do plano zero (d) também se encontram na mesma.

Tabela 1 – Componentes do balanço de energia em $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ medidos para uma superfície gramada, deslocamento do plano zero (d) e rugosidade da superfície (Z_0) para dois distintos dias. Davis-CA.

Período	Rn	G	H	LE	LE/Rn	H/Rn	G/Rn	d	Zo	Observação
02/Jun/66 07-17h	10.073	-0.485	-2.015	-7.805	-0.956	-0.01	-0.034	10.5	0.94	Céu claro
29/Set/67 06-18h	6.020	-0.202	-0.057	-5.760	-0.775	-0.20	-0.048	15.0	0.88	Céu incoberto

As condições de disponibilidade de umidade no solo, na área experimental, foram mantidas ótimas para evitar restrições à evapotranspiração (Morgan et al. 1971).

As figuras 1A e 1C mostram a partição do balanço de energia em seus componentes em uma superfície gramada para os dias 2/06 e 29/09, respectivamente. No dia 2/06 o saldo de energia disponível (Rn) foi maior em relação ao dia 29/09 (Tabela 1).

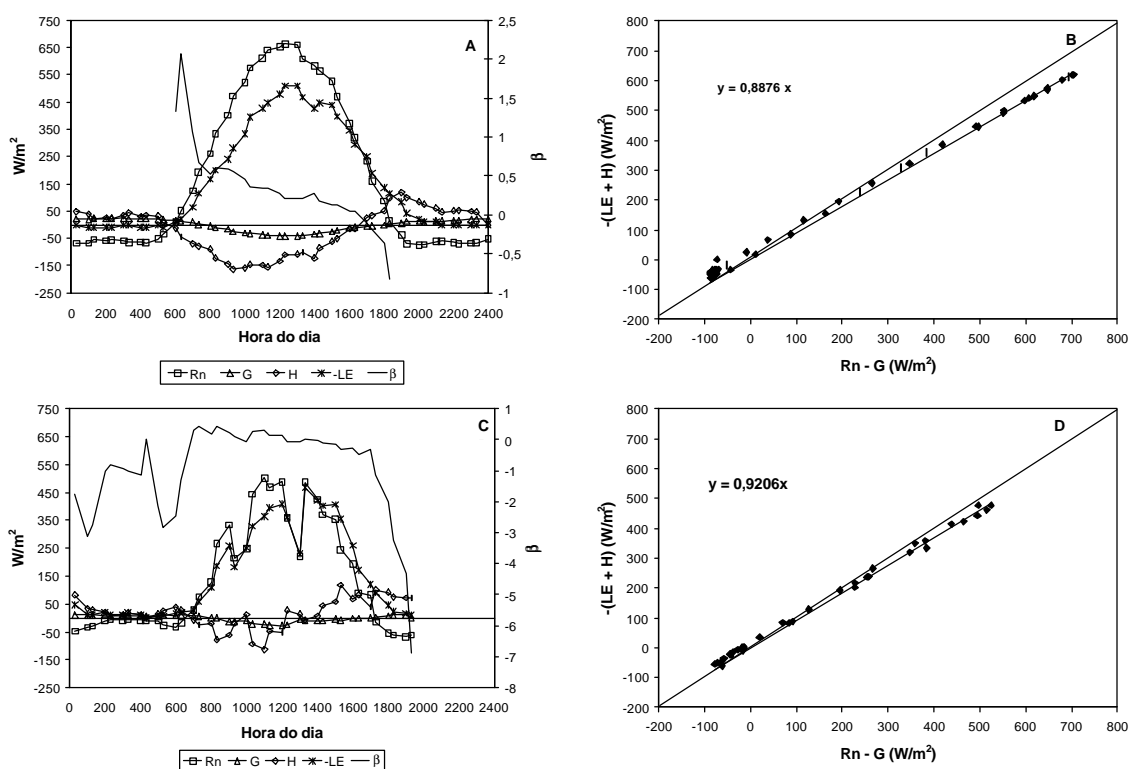


Figura 1 – Componentes do balanço de energia (W/m^2) em uma superfície gramada e razão de Bowen (β), para os dias 2/06 (A) e 29/09 (C). Relação entre a energia disponível ($Rn - G$) e fluxos de calor latente e sensível ($LE+H$), para os dias 2/06 (B) e 29/09 (D). Davis, CA.

Sempre que mensurações do balanço de energia são realizadas, a validade destas mensurações deve ser avaliada. Um método simples é verificar a relação entre o somatório do fluxo de calor latente e sensível ($LE+H$) e a energia disponível ($Rn - G$). As figuras 1B e 1D mostram o desvio dos valores medidos abaixo da linha 1:1 para ambos os dias (2/06 e 29/09). Isto pode ter sido causado por uma subestimativa dos fluxos de LE e H. Prueger et al. (1998) realizaram uma análise similar e encontraram uma razão de 0,85 para $LE+H/Rn-G$. Segundo estes autores este valor é aceitável considerando as restrições físicas dos sensores. Portanto os resultados encontrados no nosso estudo, (0,89 e 0,92) para os dias 02/06 e 29/09, respectivamente garantem a validade do balanço de energia.

No dia 2/06 a razão de Bowen foi positiva durante todo o período de luz (Figura 1A). Este fato determinou que, proporcionalmente ao fluxo de calor latente (LE) o fluxo de calor sensível (H) tivesse sido elevado. Analisando a variação da razão de Bowen (Figura 1A) e os perfis de temperatura (Figura 2A) para o dia 2/06, observa-se que não ocorreu transferência de energia do meio para o sistema. Não foi observado valores de β negativo e a ocorrência de inversão térmica. O saldo de radiação (Rn) foi utilizado em 78% no fluxo de calor latente e 20% no sensível (Tabela 1).

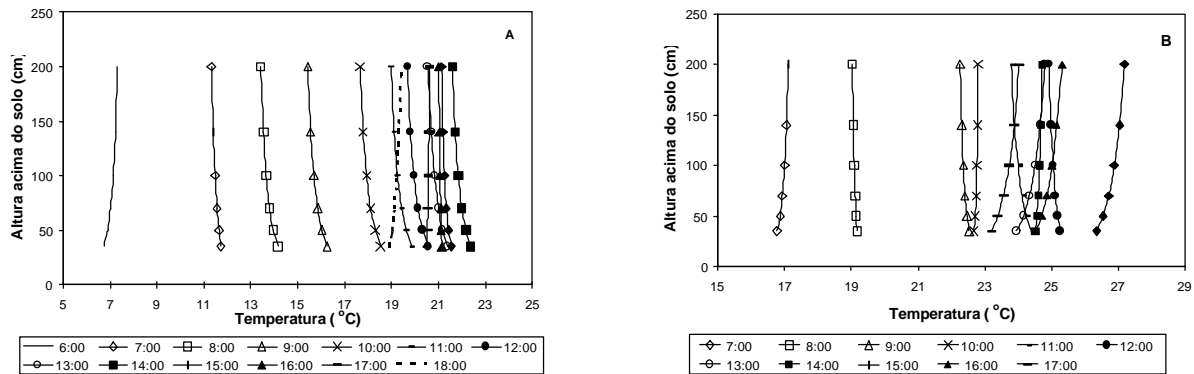


Figura 2 – Perfis de temperatura do ar (°C) em superfície gramada, em diferentes horários, nos dias 2/06 (A) e 29/09(B). Davis, CA.

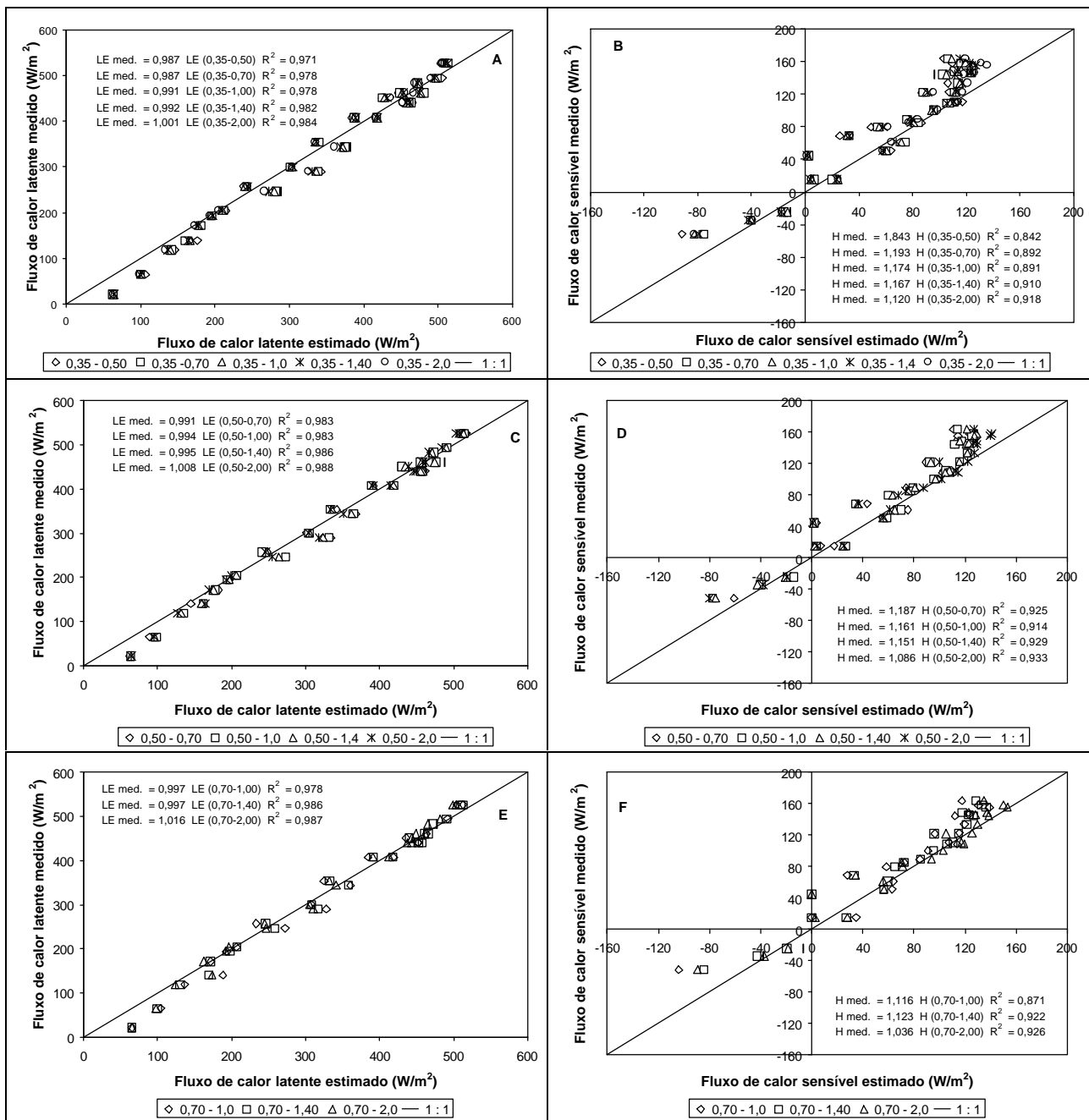
O dia 29/09 caracterizou-se como parcialmente nublado, e em razão disso, apresentou menor disponibilidade de energia (Tabela 1). Neste dia ocorreu valores de β negativos (Figura 1C), indicando transferência de calor sensível do meio para o sistema. Observa-se que a partir das 13:00h o fluxo de calor latente tornou-se igual ou superior a Rn. Isto representa qualitativamente a divergência horizontal de energia. Na figura 2B verifica-se a inversão térmica sobre a superfície nos perfis de temperatura das 13:00 às 17:00h. Um outro aspecto que se constata no dia 29/06 (Figura 1C) é que em alguns horários, β se iguala a zero, implicando na inexistência do fluxo de calor sensível. Valores de β igual a zero foi consequência de uma isoterмия. Valores de β igual a zero também foram encontrados por Cunha et al. (1997). Em comparação ao fracionamento de energia do dia 2/06, o segundo dia apresentou uma relação diferente. O saldo de energia (Rn) para o dia 29/09 foi utilizado em 96% no fluxo de LE e 0,95% no fluxo de calor sensível (H) (Tabela 1).

Na tabela 1 constata-se que dentre os componentes do balanço de energia, o fluxo de calor no solo apresentou sempre o menor valor em termos absolutos. Proporcional ao saldo de radiação (Rn) o fluxo calor no solo foi de 4,82% e 3,37% nos dias 2/06 e 29/09, respectivamente.

As figuras 3 e 4 mostram, para cada intervalo, as dispersões dos pontos em torno da linha 1:1, as equações de regressão entre os valores medidos e estimados e os coeficientes de determinação (R^2) para os dias 2/06 e 29/09, respectivamente. A equação de regressão linear foi forçada a passar pela origem. De maneira geral, a estimativa do fluxo de calor latente apresentou resultados satisfatórios em todos os intervalos analisados com coeficientes de determinação acima de 0,90 (Figuras 3A-C-E-G e 4A-C-E-G). O dia 2/06 apresentou resultados ligeiramente superiores

em relação ao dia 29/09. Neste dia a estimativa do fluxo de calor latente apresentou resultados sobreestimados em relação aos valores medidos (Figura 4A-C-E-G).

A estimativa do fluxo de calor sensível apresentou resultados inferiores em relação a estimativa do calor latente em todos os intervalos analisados. Em relação a estimativa do fluxo de calor sensível, podemos também observar que o dia 2/06 apresentou melhores resultados em relação ao dia 29/09 (Figuras 3 e 4).



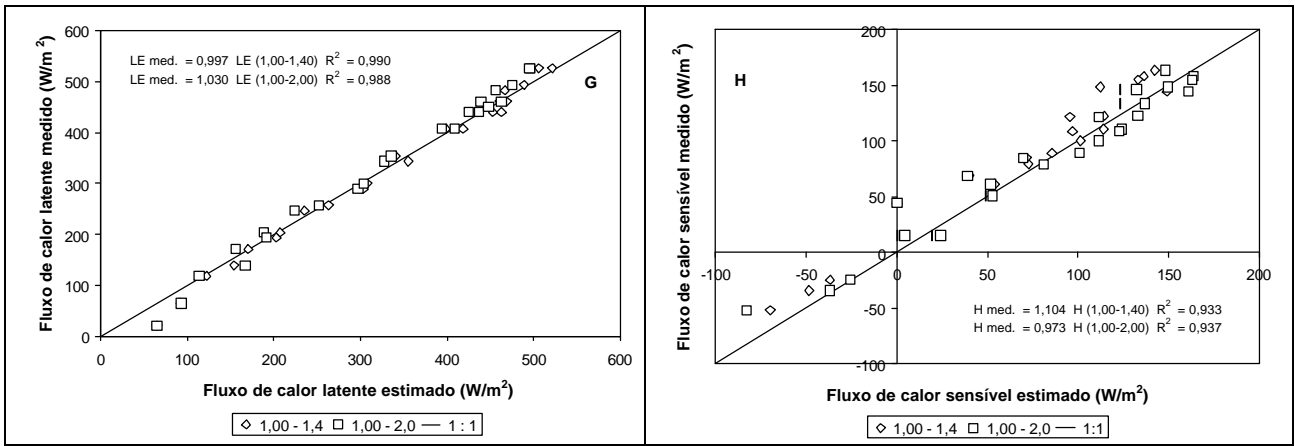
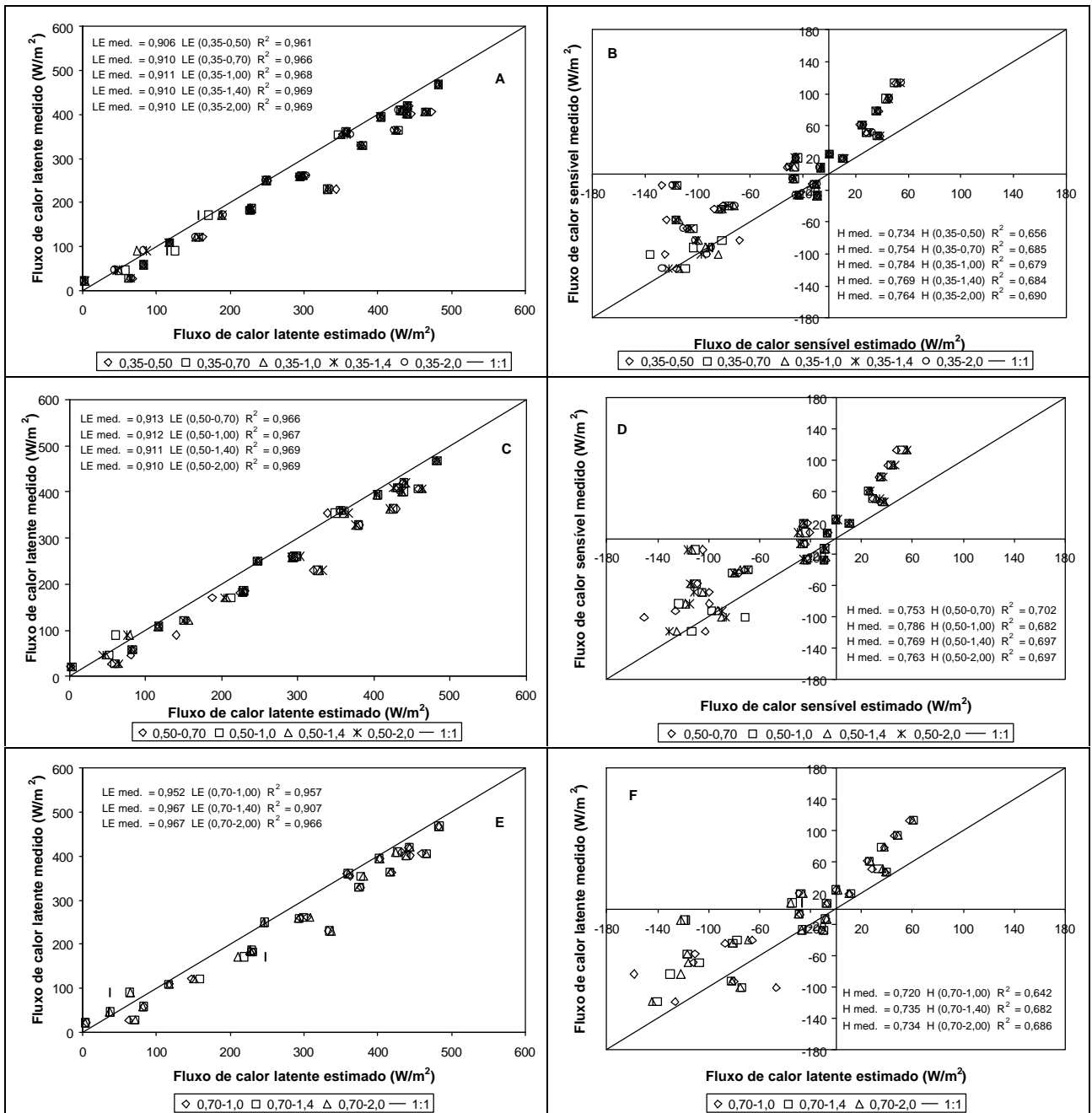


Figura 3 – Comparação entre fluxo de calor latente medido e estimado (A-C-E-G) e fluxo de calor sensível medido e estimado (B-D-F-H) para todos os intervalos estudados no dia 2/06.



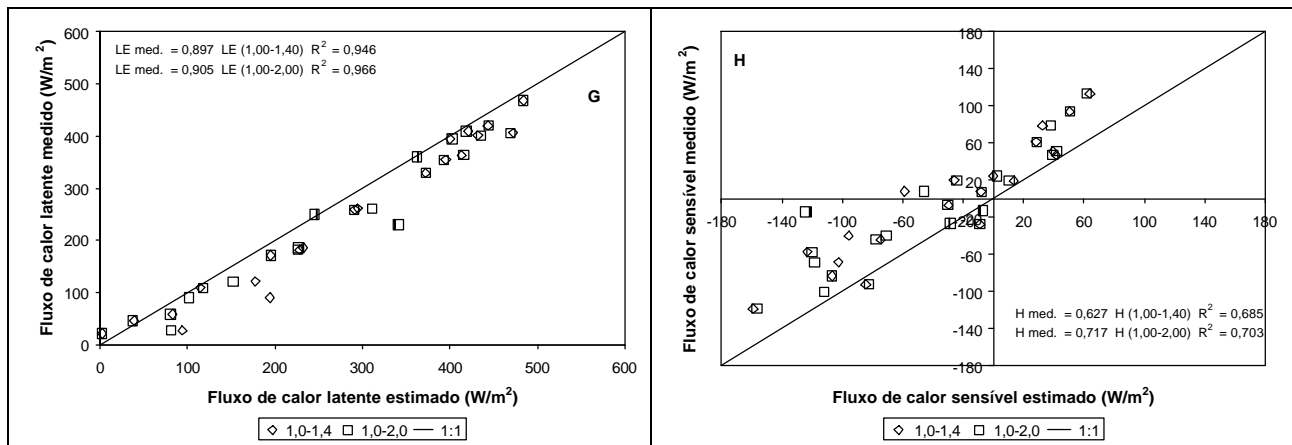


Figura 4 - Comparação entre fluxo de calor latente medido e estimado (A-C-E-G) e fluxo de calor sensível medido e estimado (B-D-F-H) para todos os intervalos estudados no dia 29/09. Davis-CA.

Se um ou mais níveis psicrométricos forem localizados acima da camada limite ajustada, a superfície, os gradientes de temperatura e vapor podem não ser representativos da superfície em estudo. Podemos observar, que por exemplo considerando o nível inicial de medida 0,35 m (Figura 3A), conforme aumentamos o intervalo entre os níveis de medida de (0,35-0,50) para (0,35-2,00) o coeficiente angular aumenta de 0,987 para 1,001 e o R^2 aumenta de 0,971 para 0,984. Comportamento semelhante pode ser observado para o fluxo de calor sensível (Figura 3B). Considerando o dia 29/09, a medida que elevamos o nível do primeiro sensor a sobreestimativa do fluxo de calor latente (Figura 4A-C-E-G) e do fluxo de calor sensível (Figura 4B-D-F-H) aumenta. O mesmo pode ser observado para o dia 2/06 (Figura 3).

CONCLUSÕES

A concordância entre os valores medidos e estimados para os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), de maneira geral, foi alta com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,90. Os resultados encontrados indicaram melhora nas estimativas quando aumentarmos a distância entre os sensores. No entanto ao elevarmos o primeiro nível de medida em relação a superfície ocorreu uma divergência nas estimativas em relação aos valores medidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGAMASCHI, H.; OMETTO, J. C.; VIEIRA, H. J. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro, II Balanço de energia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.1, n.1, p. 745-757. 1988
- BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface, *Physical Review*. New York, v. 27, p. 779-787. 1926.
- CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultura de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, 1996.
- MORGAN, D. L.; PRUITT, W. O.; LOURENCE, F.J. Analyses of energy, momentum and mass transfers above vegetative surfaces. *University of California*. Final Report 1971, California. 142 p. 1971.

PRUEGER, J. H.; SAUER, T. J.; HATFIELD, J. L. Turbulence flux of sensible and latent heat near shelterbelts during low wind conditions. **Transactions of the ASAE**. Sant Joseph. Vol. 41, n. 6, p. 1643-1650. 1998.

SINCLAIR, T. R.; ALLEN, Jr. L. H.; LEMON, E. R. An analysis of erros in the calculation of energy flux densities above vegetation by a Bowen ratio profile method. **Boundary-Layer Meterology**, vol. 8, p.129-139. 1975.

TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science Society of America. Proceedings**. Madison, vol. 24, n.1, p.1-9. 1960.

VILLA NOVA, N. A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba., Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1973. 89p. Tese de Livre Docência.