

ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE CALOR LATENTE E SENSÍVEL EM CAFEZAL IRRIGADO POR GOTEJAMENTO PELO MÉTODO DA RAZÃO DE BOWEN

LUIZ R. ANGELOCCI¹, SHIGUEKAZU KARASAWA², JOSÉ L. FAVARIN³

¹Professor Associado do Departamento de Ciência Exatas - ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11- CP 9 - Piracicaba/SP-CEP13418-900, Fone: 3429-4283 R: 226, Bolista do CNPq. E-mail: lrangel@esalq.usp.br, ² Engenheiro Agrônomo Dr., Programa de Pós-Graduação em Física do Ambiente Agrícola, ESALQ/USP, ³ Professor Associado do Departamento de Produção Vegetal - ESALQ/USP, Piracicaba, SP

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju -SE

RESUMO: Foram realizadas medidas de setembro de 2004 a outubro de 2005, com interrupção de junho a agosto de 2005, do saldo de radiação R_n e do fluxo de calor G no solo e, também, pelo uso da razão de Bowen, da partição de R_n-G em fluxos de calor latente (LE) e calor sensível em um cafezal com 3 a 4 anos de idade, irrigado por gotejamento, em Piracicaba, SP. As relações mensais de $LE/(R_n-G)$ e $H/(R_n-G)$ são discutidas dando-se ênfase à aspectos do uso do método da razão de Bowen, incluindo-se: variabilidade espacial da medida dos perfis de temperatura das termojunções secas e úmidas do psicrômetro; necessidade de realização das medidas de temperatura e pressão de vapor subcamada ajustada do cafezal; exigência de similaridade nos perfis das duas variáveis, ou seja, dos coeficientes de troca turbulenta para LE e H; efeitos advectivos nas medidas; contribuição das linhas de plantio e entrelinhas para o fluxo de LE. Apesar da heterogeneidade micrometeorológica do cafezal, o método levou a resultados coerentes, exceto em setembro/2004, discutindo-se possíveis causas para desse fato.

Palavras Chave: evapotranspiração, balance de energia, micrometeorologia

ESTIMATING LATENT AND SENSIBLE HEAT FLUXES IN A DRIP IRRIGATED COFFEE CROP BY THE BOWEN RATIO METHOD

ABSTRACT: Measurements of net radiation R_n , soil heat flux G and the partition of R_n-G in latent LE and sensible heat H fluxes by the energy balance-Bowen ratio method (EB-BR) were carried out from September 2004 to October 2005 (excepting June to August 2005), in a drip-irrigated coffee crop, in Piracicaba, São Paulo State. The observed monthly ratios $LE/(R_n-G)$ and $H/(R_n-G)$ are discussed regarding some problems of the use of the BERB method: spatial variability of the measurements of wet and dry thermojunctions temperatures; requirement of measurements of profiles of air temperature and vapor pressure to be taken within the adjusted surface layer; non-existence of similarity between the coefficients of turbulent fluxes; advective effects; contribution of hedgerows and interrows to the latent heat fluxes. Despite of the heterogeneity of the surface, the use of the BERB method in a coffee crop led to coherent results, excepting in September 2004, being discussed the possible causes for this exception.

Keywords: crop energy balance, evapotranspiration, micrometeorology

INTRODUÇÃO: A expansão da cafeicultura no Brasil para áreas onde a irrigação se mostra necessária ou conveniente exige maior conhecimento sobre as exigências hídricas da cultura. Ao lado de coeficientes de cultura (GUTIERREZ & MEINZER, 1994a; VILLA NOVA et al., 2002), tem sido conduzidos estudos com uso de técnicas como lisimetria e métodos térmicos de medida de fluxo de seiva, além de métodos micrometeorológicos como o do balanço de energia razão de Bowen -*BERB* (GUTIERREZ & MEINZER, 1994, GUTIERREZ et al., 1994; RIGHI,

2004; PEZZOPANE, 2005), para determinar a partição da energia e do fluxo de vapor d'água dos componentes vegetativos, linhas de plantio e entrelinhas. O manejo de um cafezal quanto à distribuição das plantas e da água de irrigação cria grande heterogeneidade das trocas de massa e de energia com a atmosfera, o que torna necessário uso de várias técnicas para se ter um melhor conhecimento do consumo hídrico. Além disso, o uso do método BERB exige cuidados, como representatividade da medida de saldo de radiação da cobertura e dos perfis de temperatura e pressão de vapor, obtenção dos perfis na subcamada ajustada do dossel e similaridade dos coeficientes de transporte turbulento para os fluxos de calor latente e sensível. Também exige uma bordadura ("fetch") adequada e cautela quanto à ocorrência de fluxos advectivos (RIGHI, 2004). Os objetivos deste trabalho foram determinar a participação os fluxos globais de calor latente e de calor sensível em cafezal irrigado na região de Piracicaba, SP e fazer uma discussão sobre o desempenho do método BERB nas determinações.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi realizado entre setembro/2004 a maio/2005 e em setembro e outubro de 2005 em cafezal de *C. arabica* cv. Obatã IAC 1669-20, no Campus "Luiz de Queiroz", da ESALQ/USP (lat. 22°42'30"S; long. 47°30'00"W, alt. 546m), implantado em outubro/2001 em pé franco e espaçamento de 3,5m x 0,9m, irrigado por gotejamento, com irrigações realizadas quando o potencial mátrico do solo a 0,2m de profundidade se aproximava de -30 kPa. O solo das entrelinhas foi coberto por espécies de invasoras, predominando capins "colchão" e "massambará", "caruru" e "caruru de mancha", tendo atingido 1,5m de altura por 40 dias no início de 2005, quando foi impossível realizar as roçadas periódicas que mantinham as invasoras em altura máxima de 0,4 m. Os tratos culturais consistiram de adubações de dezembro/2004 a fevereiro/2005, e uma aplicação de herbicida, de inseticida e de fungicida. A área do cafezal era aproximadamente retangular, com comprimento e largura máximas de 290m x 120m, com linhas de plantio no maior sentido (azimute de cerca de 330° a partir do N), sendo circundada por um cafezal (0,4 ha) de *C. arabica* cv. Mundo Novo e pastagem à SE e NE, um seringal (12m de altura) e um pupunhal à W, por gramado com a estação meteorológica e pastagens à N e NE, e por 100 m de vegetação baixa à S e SW.

Para as determinações dos fluxos de calor latente e sensível, foram instalados três mastros de ferro com altura de 5,50 m acima do nível do solo, próximos a três linhas de plantio intercaladas. Os mastros localizavam-se com leve deslocamento a NE do centro da área, permitindo bordadura ("fetch") de aproximadamente 170m na direção predominante dos ventos. Em cada mastro foram instalados seis psicrômetros aspirados de termopar (MARIN et al.; 2001), nas seguintes alturas acima do solo: 0,7m; 1,4m; 2,1m; 3,0m; 3,9m; 4,8m. A partir de fevereiro/2005 essas alturas foram modificadas para 0,7m, 1,4 m, 1,8m, 2,4m, 3,5m e 4,90m. Foram realizadas medidas de saldo de radiação por dois saldo-radiômetros Kipp & Zonen mod. NR Lite, instalados a 3,50 acima do solo, um posicionado sobre a linha de cafeeiros e outro na entrelinha. O fluxo de calor no solo foi medido com placas de fluxo REBS mod, HFT3 na linha de plantio do mastro 1, sendo uma no centro da entrelinha e duas sob a copa, uma próxima de um gotejador, outra no centro de dois deles, à profundidade de 0,02 m, calculando-se um valor médio ponderado G de acordo com RIGHI (2004):

$$G=0,286 ((G_{EL}(3,5-L_L) + 0,5 L_L (G_{L1}+G_{L2}))$$

sendo G_{EL} , G_{L1} e G_{L2} os valores medidos pelas placas situadas, respectivamente, na entrelinha, na linha próxima a um gotejador e na linha entre dois gotejadores; L_L é a largura da linha de cafeeiros, 3,5 m é o espaçamento entre linhas e os outros valores são fatores de ponderação.

Os sinais dos sensores foram registrados a cada segundo e os valores médios de cada 15 min

armazenados em "datalogger" CR 10 e multiplexador AM-416, da Campbell Scientific, Inc. O saldo de radiação Rn foi considerado repartido entre os fluxos de calor latente LE, sensível H e no solo G, com LE e H obtidos a partir da razão de Bowen β (PEREIRA et al., 1997):

$$\beta = H/LE = [((\Delta T_u/(1-W) \Delta T_s))-1]^{-1}$$

sendo ΔT_u e ΔT_s , a respectivamente, a diferença de temperatura das termojunções úmidas e secas em dois níveis de medida, e W o fator de ponderação dependente da temperatura:

$$W = 0,407 + 0,0145 T_u \rightarrow (0^\circ\text{C} \leq T_u \leq 16^\circ\text{C})$$

$$W = 0,483 + 0,01 T_u \rightarrow (16,4^\circ\text{C} \leq T_u \leq 32^\circ\text{C})$$

Os critérios de PEREZ et al. (1999) foram usados para excluir valores inaceitáveis, usando-se os limites de resolução dos psicrômetros propostos por RIGHI (2004). Quando houve rejeição de um dado, foi adotado no seu lugar um valor médio entre o antecedente e o subsequente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A área foliar dos cafeeiros e o índice de área foliar (IAF), no início da retomada do crescimento são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Área foliar média (AF) por cafeeiro (m²) e índice de área foliar (IAF)

Mês	set/04	out/04	nov/04	fev/04	abr/05	set/04
AF	1,9	2,7	8,6	17,4	18,7	14,1
IAF	0,6	0,8	2,7	5,5	5,9	4,5

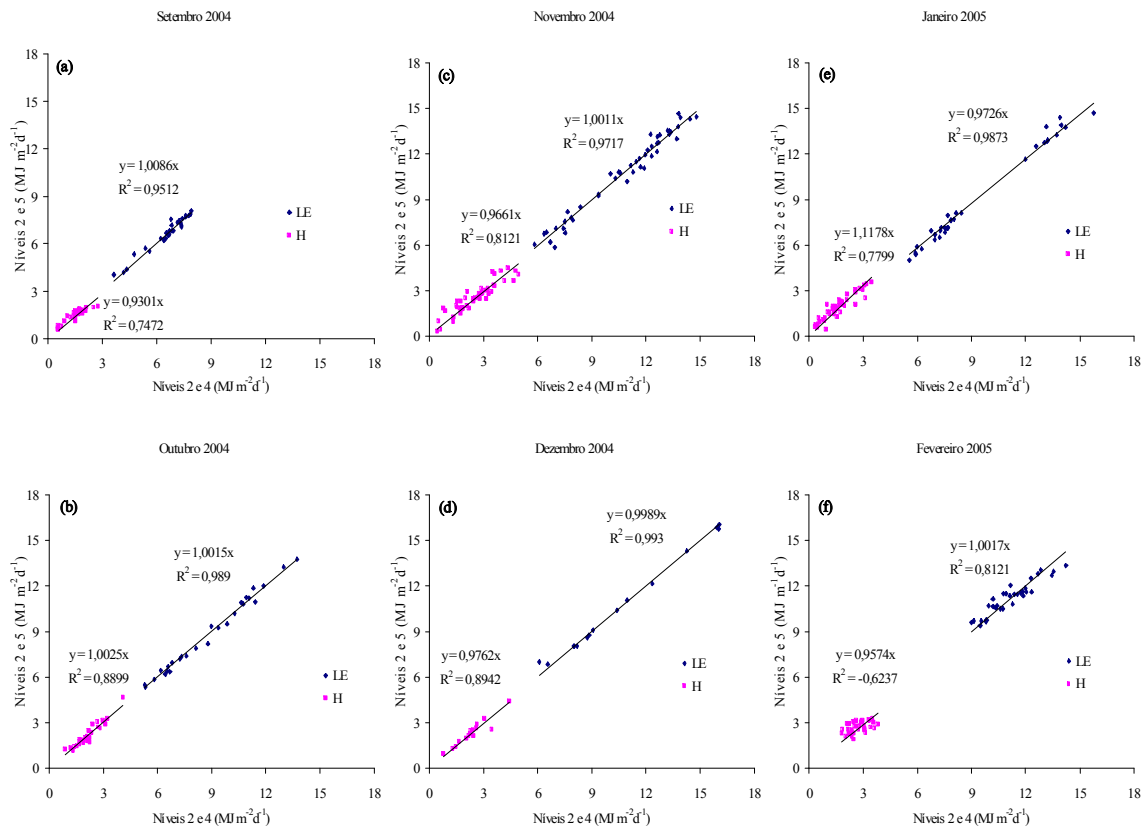
Na Figura 1 são observadas as relações encontradas para LE e H estimadas a partir da diferença de temperaturas das junções seca e úmida medida entre dois níveis acima do solo, tomando-se valores de três mastros e, no limite dois. Por falta de espaço, são mostrados apenas os

seis primeiros meses. O nível inferior de medida foi sempre 1,4 m de altura, próximo da altura final dos cafeeiros. Os níveis superiores foram 3,0m e 3,9 m até janeiro e 2,4m e 3,5m a partir de fevereiro. São comparados valores acumulados para o período entre 9 e 16 horas, pois os maiores problemas de valores de β ocorreram no início da manhã e final da tarde, descartando-se ambos esses períodos. Em todos os casos, mesmos para os meses não mostrados, a concordância entre as medidas a partir da diferença em níveis diferentes da atmosfera foi excelente para ambos os fluxos, sendo indicativo de que as medidas foram feitas na subcamada ajustada do cafezal. Quando são comparados os valores dos coeficientes angulares das retas passando pela origem e os respectivos valores de R² (Tabela 2), verificam-se diferenças muito pequenas entre os mastros de medidas em todos os meses, indicando que um só mastro permitiria medidas representativas.

Quando foram calculados valores médios mensais da relação LE/(Rn-G) e H/(Rn-G), observou-se que variaram muito pouco entre os diferentes mastros, o que é esperado em função dos dados da tabela 2. Mas, observou-se, também, que os valores médios dessas relações variaram muito pouco em todos os meses, sendo que LE/(Rn-G) variou de 0,73 em set/2004 a 0,79 em out/2005, tendo os meses intermediários com variação entre 0,74 e 0,77. GUTIERREZ & MEINZER (1994b) ao trabalharem no Havá com o método BERB em cafezais irrigados por gotejamento e com IAF entre 1,4 e 7,5 encontraram relações LE/(Rn-G) bem menores que esses para IAF entre 1,4 e 4,2, obtendo valores próximos daqueles do presente estudo somente quando o IAF estava igual ou maior que 5,3. As entrelinhas podem ter participação importante no fluxo de LE do cafezal quando estão ativas e a umidade do solo é elevada, mas essa participação depende, também, da fração da superfície do solo ocupada pela vegetação. No Havá verificou-se que os cafeeiros responderam pela maior fração (72 a 85%) de LE para IAF

a partir de 4,2, mas que as entrelinhas participaram com 2/3 do fluxo total de LE dos cafezais para IAF até 3,0.

Figura 1. Relações entre os fluxos de calor latente LE e calor sensível H para os seis primeiros



meses de medida, calculados entre os níveis 2 (1,40 m), 4 (3,0 m até janeiro, 2,4 m em fevereiro) e 5 (3,9 m até janeiro, 3,5 m em fevereiro).

Tabela 1. Coeficientes angulares e coeficientes R^2 (parêntesis) da regressão entre os valores de LE e de H calculados a partir das diferenças das temperaturas das termojunções secas e úmidas entre os níveis de medida 2-4 e 2-5.

Mês	Mastro 3		Mastro 2		Mastro 1	
	LE	H	LE	H	LE	H
Set/04	0,992(0,97)	1,018(0,82)	1,001(0,99)	0,989(0,93)	1,049(0,96)	0,830(0,55)
Out/04	0,989(0,98)	1,045(0,88)	1,017(1,00)	0,914(0,94)	0,998(1,00)	1,014(0,97)
Nov/04	1,028(0,99)	0,898(0,94)	1,016(0,98)	0,923(0,93)	0,966(0,97)	1,125(0,77)
Dez/04	0,999(1,00)	0,998(0,96)	0,987(1,00)	1,068(0,98)	1,007(0,99)	0,903(0,70)
Jan/05	0,961(0,99)	1,177(0,87)	0,978(0,98)	1,040(0,67)	0,976(0,99)	1,125(0,82)
Fev/05	0,997(0,97)	1,007(0,70)	0,960(0,95)	1,194(-0,65)	1,064(0,94)	0,792(0,83)
Mar/05	1,005(0,98)	0,973(0,80)	1,016(0,99)	0,938(0,90)	1,016(0,97)	0,921(0,83)
Abr/05	0,940(0,90)	1,309(-0,18)	1,032(0,98)	0,880(0,56)	1,029(0,95)	0,889(0,17)
Mai/05	0,971(0,97)	1,034(0,70)	1,048(0,48)	0,819(0,92)	1,015(0,95)	0,952(0,90)
Set/05	0,970(0,99)	1,139(0,98)	0,998(1,00)	0,978(0,97)	0,992(0,84)	1,024(0,43)
Out/05	0,997(0,98)	0,997(0,82)	0,999(1,00)	1,002(0,92)	0,978(1,00)	1,166(0,96)
Média	0,986	1,054	1,004	0,977	1,008	0,976

A) LE/(Rn-G) entre setembro e dezembro, quando o IAF e a fração do solo coberta pelos cafeeiros eram menores. A grande participação de LE pode ser, também, causada por fluxos

advectivos, que seriam mais esperados em set/2004, pelo baixo IAF e por ter sido um mês extremamente seco (chuva de 7 mm). Medidas lisimétricas em vários dias permitiram concluir que LE das linhas da cultura participaram com 25% a 36% do LE total quando o IAF aumentou ao longo dos meses, indicando que as entrelinhas tiveram participação grande no fluxo de LE. Entretanto, para set/2004 o valor de LE/(Rn-G) igual a 73% merece discussão, com várias possibilidades para explicá-lo: 1º) grande evaporação do solo irrigado nas linhas de cafeeiro em setembro, pelo pequeno IAF e maior exposição à radiação solar; 2º) as entrelinhas, apesar de ser um período seco, poderiam estar evapotranspirando a taxas próximas da potencial, por terem água disponível em um sistema radicular profundo; 3º) ocorrência de advecção de calor. Não é possível confirmar a segunda hipótese. A primeira, é aceitável, pelo suporte das medidas lisimétricas. Para a advecção, foram estudados valores da razão $(T5-T2/T4-2)/(e5-e2/e4-e2)$, a qual, segundo VERMA et al. (1978), permite inferir se ocorreu similaridade dos perfis de temperatura (T) e de pressão de vapor (e); quanto mais a razão se aproxima de 1, maior similaridade, a advecção a faz se afastar de 1. Adotando valores da razão fora da faixa entre 0,7 e 1,3 como indicativos de advecção (RIGHI, 2004), verificou-se que somente 6% dos casos em setembro estiveram fora dela faixa, não evidenciando condições acentuadas de advecção. Mas, a ocorrência de 43% das medidas com valores fora da faixa em janeiro, mês com baixa probabilidade de ter ocorrido advecção, deixa em dúvida a validade de uso desse critério.

CONCLUSÃO: Apesar da heterogeneidade micrometeorológica da superfície do cafezal irrigado, pode-se concluir que, de modo geral, o método da razão de Bowen permitiu boas estimativas dos fluxos de LE e H diários, com possível exceção do mês de setembro 2005.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- GUTIERREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. *J. of American Society of Horticultural Science*, v. 119, p. 652-657, 1994a.
- GUTIERREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 68, p. 173-186, 1994b.
- GUTIERREZ, M.V., HARRINGTON, R.A.; MEINZER, F.C.; FOWNES, J.H. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiology*, v. 82, p. 179-190. 1994.
- MARIN, F.R., ANGELOCCI, L.R., COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de um psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agrícola*, v. 58, p.839-844, 2001.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N., SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração, Piracicaba, FEALQ, 1997, 183 p.
- PEZZOPANE, J.R. Avaliação microclimáticas, fenológicas e agronômicas em café cultivado a pleno sol e consorciado com banana ‘prata anã’, 2004, 136 p. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 1995.
- RIGHI, E.Z. Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada. 2004, 151 p. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- VERMA, S.B.ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. Turbulent exchange coefficients for sensible and water vapor under advective conditions. *J. of Applied Meteorology*, v. 7, p.330-338, 1973.
- VILLA NOVA, N., FAVARIN, J.L., ANGELOCCI, L.R., DOURADO NETO, D. Estimativa do coeficiente de cultura do cafeeiro em função de variáveis climatológicas e fitotécnicas. *Bragantia*, v. 61, p. 81-88, 2002.