

# DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM FEIJOEIRO.

## II. BALANÇO DE ENERGIA<sup>1</sup>

HOMERO BERGAMASCHI<sup>2</sup>, JOSÉ C. OMETTO<sup>3</sup>, HAMILTON J. VIEIRA<sup>4</sup>,  
LUIZ R. ANGELOCCI e PAULO L. LIBARDI<sup>3</sup>

**RESUMO** - Em trabalho, realizado em condições de campo em 1983, em Piracicaba, SP, à latitude de 22°43'33" sul, longitude 47°38'00" W e altitude de 576 m, foram avaliados os componentes do balanço de energia em cultura de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetida a condições variáveis de disponibilidade hídrica no solo e de demanda evaporativa da atmosfera. Os tratamentos constaram de três épocas de semeadura (07.07, 22.07 e 04.08) e dois níveis de disponibilidade de água no solo (com e sem interrupção nas irrigações durante uma estiagem de 18 dias -25.09 a 12.10). A quantidade de energia destinada aos processos de evapotranspiração foi maior em níveis mais elevados de índice de área foliar, de disponibilidade hídrica e de demanda evaporativa da atmosfera; o inverso ocorreu com relação à energia utilizada no aquecimento do ar e do solo. A evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman (ETp) e a evaporação de tanque "classe A" (ECA) foram altamente correlacionadas com o fluxo de calor latente de evaporação (LE) determinado pelo método do balanço de energia. A ETp demonstrou estimar com boa aproximação LE em parcelas irrigadas e com índice de área foliar elevado, enquanto a ECA não corrigida superestimou valores de LE.

Termos para indexação: área foliar, épocas de semeadura, irrigação, *Phaseolus vulgaris*, evapotranspiração.

## WATER DEFICIT IN COMMON BEANS.

### II. ENERGY BALANCE

**ABSTRACT** - Energy balance components were evaluated in 1983, in a common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) crop subjected to varying conditions of soil water availability and atmospheric evaporative demand, in a field experiment conducted at Piracicaba, SP, Brazil, at 22°43'33" south latitude, 47°38'00" W longitude, and 576 m altitude. The crop was sown in three dates (July 7, July 22 and August 4), each one submitted to two levels of soil water availability: with continued irrigation and with a period of water stress caused by a 18-day period without rain fall (Sept. 25 to Oct. 12). The amounts of energy used in evapotranspiration increased with leaf area index, soil water availability, and atmospheric evaporative demand; the contrary occurred with the fractions of radiation used in air and soil heating. Reference evapotranspiration by Penman method (ETp) and evaporation from "class A" pan (ECA) were highly correlated with the flux of latent heat of evaporation (LE) calculated by the energy balance method. In plots with irrigation and high leaf area index, ETp appeared to estimate with high approximation LE, whereas unadjusted ECA overestimated LE.

Index terms: leaf area, sowing dates, irrigation, *Phaseolus vulgaris*, evapotranspiration.

## INTRODUÇÃO

O método do balanço de energia pressupõe que a energia líquida disponível na superfície da terra se reparte em fluxo de calor para o solo, fluxo de calor sensível para o ar, fluxo de calor latente de

evaporação, fotossíntese e trocas devidas a atividades metabólicas e ao armazenamento nos tecidos das plantas. Considerando que estes dois últimos componentes são, em geral, inferiores ao erro experimental na medida dos componentes principais, o balanço de energia considera, geralmente, apenas os três primeiros processos (Rosenberg 1974).

A divergência horizontal representa o ganho líquido de energia advectiva por uma cultura. Este termo pode ser grande em clima árido ou em uma pequena lavoura irrigada em clima úmido. Apesar disso, o ganho de energia por advecção é, geralmente, omitido, em face das dificuldades em quantificá-lo, podendo causar incorreções na aplicação do método do balanço de energia. Entretanto,

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 15 de fevereiro de 1988  
Parte da tese de doutorado do primeiro autor, ESALQ/USP, nov./84.

<sup>2</sup> Eng. - Agr., Dr., Fac. de Agronomia/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Caixa Postal 776, CEP 90001 Porto Alegre, RS. Bolsista do CNPq.

<sup>3</sup> Eng. - Agr., Dr., ESALQ/Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, SP.

<sup>4</sup> Eng. - Agr., M.Sc., CPPP/EMPASC, CEP 89800 Chapecó, SC.

to, o termo divergência pode ser minimizado quando as medidas são feitas próximo à superfície da cultura e com uma apreciável bordadura de altura uniforme a barlavento (Chang 1974).

A radiação líquida (saldo de radiação) e o fluxo de calor no solo podem ser medidos facilmente. Entretanto, os fluxos de calor sensível e de calor latente de evaporação são de difícil medição direta. A determinação da razão de Bowen, que relaciona estes dois componentes do balanço de energia, é um artifício que possibilita obtê-los, constituindo-se em uma alternativa eficiente de determinação da evapotranspiração real das culturas em condições de campo. Deste modo, o método de Bowen, baseado no princípio da conservação da energia aplicado aos mecanismos físicos envolvidos no fenômeno da evapotranspiração, permite determinar as perdas de água das culturas, independentemente da natureza da superfície evaporante e sem, no entanto, recorrer a hipóteses simplificadoras (Ometto 1981).

Sabe-se que as perdas de água pelas culturas, mesmo em condições de ótima disponibilidade hídrica, variam muito entre espécies, épocas e locais. Nestas condições, os fatores que mais influenciam essas perdas são, basicamente, a quantidade de energia solar interceptada e a arquitetura da cultura, as condições do ar em contato com as plantas (temperatura, umidade e velocidade do vento), e a extensão e as características da superfície transpirante (Monteny 1972). Em função das variações destes fatores, os valores absolutos de consumo de água para uma mesma espécie cultivada encontrados na literatura diferem bastante.

O emprego de coeficientes relacionando a evapotranspiração da cultura e parâmetros meteorológicos de referência permite a comparação ou a reprodução dos valores em outros locais ou épocas. A evaporação de tanque "classe A" (U.S. Weather Bureau) e a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman (1948), citado por Ometto (1981), são os dois parâmetros mais freqüentemente utilizados e citados na literatura. Com efeito, Ritchie (1981) descreveu que, em avaliação feita pela Sociedade Americana de Engenharia Civil, em 1973, a equação combinada de Penman e outras duas dela derivadas se desta-

caram em relação aos demais métodos de estimativa da evapotranspiração. Por seu turno, Chang (1974) destacou que o tanque de evaporação incorpora os efeitos de todos os elementos meteorológicos ou climáticos que atuam no processo e, por isto, permite estimativas a curto prazo mais acuradas da evapotranspiração do que as fórmulas empíricas que utilizam apenas alguns destes parâmetros do meio. Chang (1974) descreveu, em tabelas, resultados de trabalhos envolvendo a relação entre a evapotranspiração de dezenas de culturas e a evaporação de tanque "classe A", a qual é baixa nos estádios iniciais (0,2 a 0,5), aumenta com o crescimento da área foliar (freqüentemente ultrapassa a unidade) e diminui ao final do ciclo.

Em culturas semeadas em linha, a maior parte das perdas de água nos estádios iniciais de desenvolvimento se dá por evaporação direta do solo. Na ausência de chuva ou irrigação, a taxa de evaporação na superfície do solo é reduzida acentuadamente pela formação de uma camada de solo seco que atua semelhantemente a uma cobertura morta. Por isso, quando a cultura é jovem o seu consumo de água é muito influenciado pela freqüência de chuva ou irrigação. Com o seu desenvolvimento aumenta a evapotranspiração, reduzindo-se na frutificação, causada pela senescência (Chang 1974, Doorenbos & Pruitt 1975). Entretanto, em quaisquer condições, a deficiência hídrica no solo reduz o consumo de água das culturas e, por conseguinte, a sua relação com parâmetros meteorológicos, como demonstraram Stansell & Smittle (1980), com feijoeiro.

Em um experimento em condições de campo com feijoeiro, no qual foram avaliadas, de forma global e conjunta, as relações hídricas solo-planta-atmosfera, foram determinados os componentes do balanço de energia em cultura de feijoeiro submetida a condições variáveis de disponibilidade hídrica no solo e de demanda evaporativa da atmosfera.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Características do experimento

O experimento foi conduzido em condições de campo, na área experimental do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, em Piracicaba, SP,

a uma latitude de  $22^{\circ}43'33''$  sul, longitude de  $47^{\circ}38'00''$  oeste e altitude de 576 m.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo fundamental Cwa, denominado subtropical úmido com estiagem de inverno (Camargo et al. 1974). O solo do local foi descrito e classificado por Ranzani et al. (1966) como terra roxa estruturada, série "Luiz de Queiróz", oriundo de rochas básicas; pela classificação americana de solos (Estados Unidos, Department of Agriculture 1975), trata-se de um "oxic paleudalf".

A cultivar de feijoeiro utilizada foi Aroana 80, cujas características principais são as seguintes, de acordo com o boletim de lançamento: hábito de crescimento indeterminado, tipo arbustivo, internódios curtos, maturação praticamente uniforme, grupo comercial "chumbinho", início da floração entre 35 e 40 dias após a emergência e ciclo total (semeadura à colheita) entre 90 e 100 dias (Instituto Agrônômico 1982).

Toda a condução do experimento foi feita em nível de manejo adequado e recomendado pela extensão rural. A semeadura foi feita manualmente, em sulcos com 50 cm de espaçamento, procurando-se obter em torno de 200.000 plantas/ha ou dez plantas por metro de fila, após estabilizada a emergência. Durante todo o ciclo, a cultura foi mantida isenta de competição com plantas daninhas e pragas, por meio de capinas manuais e de aplicações de inseticidas, respectivamente, sempre que necessário. Do mesmo modo, foram feitas aplicações de fungicida específico para controle de ferrugem do feijoeiro.

Dois parcelas de 60 m x 30 m cada constituíram os tratamentos de disponibilidade de água no solo, a saber:

(I) - sem interrupção nas irrigações - a cultura foi mantida em condições de boa disponibilidade de água durante todo o ciclo, sendo irrigada (por aspersão) sempre que o potencial da água no solo, a 15 cm de profundidade, atingisse em torno de  $-0,05$  MPa (aproximadamente  $-0,5$  atm);

(D) - com deficiência hídrica - a cultura foi submetida a um período com interrupção nas irrigações durante 17 dias, a partir do dia 25 de setembro, sem nenhuma aplicação de água.

As subparcelas, com dimensões de 30 m x 20 m cada e dispostas de forma contígua, dentro de cada tratamento de água, consistiram em três épocas de semeadura:

Primeira época - 07.07.83;

Segunda época - 22.07.83;

Terceira época - 04.08.83.

Através de observações em nível diário, foi caracterizada a fenologia da cultura, adotando-se o método descrito por Fehr & Caviness (1977) para a cultura da soja, posteriormente adaptada à escala proposta por Centro Internacional de Agricultura Tropical (1983) para feijoeiro. A estiagem, durante a qual foram dados tratamentos diferenciados de água no solo, ocorreu durante o final do enchimento de grãos e maturação fisiológica na primeira época; formação e desenvolvimento de legumes, na

segunda época; formação de botões florais e floração, na terceira época de semeadura.

Ao longo de todo o ciclo da cultura, o potencial matricial da água no solo foi medido, diariamente às 7 h, em conjuntos de tensiômetros de mercúrio, instalados em profundidades distanciadas de 15 cm até 150 cm, no interior de cada subparcela. Semanalmente, a umidade do solo também foi medida por gravimetria, em quatro repetições por subparcela, a cada 15 cm de profundidade, até 75 cm abaixo da superfície do solo. A gravimetria também foi utilizada para determinar a umidade do solo, em nível diário, nas profundidades em que foi rompida a coluna de mercúrio dos tensiômetros, no tratamento (D), durante o período em que este foi aplicado. Também semanalmente, foram determinados o peso da matéria seca e o índice de área foliar em cada tratamento, utilizando-se três repetições de  $0,25$  m<sup>2</sup> de área em cada subparcela; as respectivas curvas, bem como a fenologia, são apresentadas em Bergamaschi et al. (1986).

### Balanco de energia

Com a finalidade de avaliar os parâmetros resultantes da repartição da energia líquida dentro da cultura, em especial estimar a evapotranspiração ao longo do dia, foi utilizado o método do balanço de energia, seguindo princípios e procedimentos descritos por Webb (1965), Villa Nova (1973), Rosenberg (1974) e Ometto (1981). As medidas foram efetuadas em dias anteriores e durante o período de estiagem, procurando-se obter resultados com a cultura em diferentes estádios de desenvolvimento (índice de área foliar), diferentes condições de disponibilidade de água no solo e condições variáveis de demanda evaporativa da atmosfera. Devido à limitação de equipamento, em cada dia foram feitas medidas em apenas duas subparcelas, portanto, avaliando uma condição variável apenas, por dias.

O equipamento foi instalado no centro das subparcelas, e as leituras foram feitas a intervalos de, aproximadamente, 30 min, alternadamente, em dois conjuntos, constando de.

Radiação global - piranômetro tipo "Eppley radiometer", modelo PSP, constante  $10,48 \cdot 10^{-6}$  V/W.m<sup>2</sup>.

Radiação líquida (saldo de radiação) - radiômetro tipo "net radiometer" inflável, marca Middleton, constante  $28,173$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>, instalado a cerca de um metro acima do topo da cultura.

Fluxo de calor no solo - placas medidoras de fluxo de calor no solo, marca Middleton, de constante média (superior e inferior) de  $16,80$  mV/cal.cm<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>, instalada a cerca de 1 cm abaixo da superfície do solo, uma em cada subparcela de medida, à meia distância entre a linha de plantas e o centro de entrelinha.

Gradientes de temperatura e umidade do ar acima da cultura - psicrômetros de pares termoeletrônicos cobre-constantan, instalados às alturas de zero e 20 cm acima do topo da cultura, em microabrigos abertos de PVC branco para evitar que a radiação solar direta atingisse os senso-

res, colocados à meia distância entre a linha de plantas e o centro de entrelinha.

Cada conjunto de sensores foi acoplado a uma chave comutadora (uma em cada subparcela de medida) a fim de facilitar e tornar o mais rápido possível cada bloco de leituras. As medidas dos sinais elétricos foram feitas instantaneamente com potenciômetro de leitura direta ("Cambridge portable potentiometer"), com 0,01 mV de resolução e mais um dígito estimado.

O cálculo dos balanços de energia foi baseado no procedimento de Bowen, descrito por Villa Nova (1973). Considerando que: se as medidas forem tomadas a baixa altura e dentro de uma área-tampão suficientemente extensa, as divergências horizontais de calor latente e de calor sensível são desprezíveis; se os termos armazenamento de calor latente e de calor sensível dentro da cultura (de porte baixo) também são desprezíveis; se a fração de energia utilizada em sínteses biológicas quase nunca ultrapassa 2% da radiação líquida, a equação do balanço de energia pode ser escrita da seguinte forma:

$$R_L + C + S + LE \cong 0$$

onde:

$R_L$  = radiação líquida disponível

$C$  = fluxo de calor no solo (condução)

$S$  = fluxo de calor sensível (aquecimento do ar)

$LE$  = fluxo de calor latente (evapotranspiração)

No cálculo do balanço de energia, os fluxos que chegam ao sistema (comunidade de plantas) foram considerados positivos, enquanto os fluxos que saem do sistema foram considerados negativos. No caso, os limites superior e inferior do sistema foram considerados o topo da cultura e a superfície do solo, respectivamente. Assim, acima da cultura, fluxos ascendentes eram negativos, e vice-versa; no interior do solo, fluxos ascendentes eram positivos, e vice-versa.

A relação entre os fluxos de calor sensível e de calor latente é chamada razão de Bowen ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{S}{LE}$$

Admitindo que, em condições de atmosfera próxima à neutralidade, os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível, calor latente e de momentum tendem a se igualar, calculou-se a razão de Bowen pela expressão.

$$\beta = \frac{1}{\left(\frac{s+\gamma}{\gamma}\right) \left(\frac{\Delta T_u}{\Delta T}\right) - 1}$$

onde:

$\Delta T_u$  = diferença de temperatura dos termômetros úmidos nos dois níveis

$\Delta T$  = diferença de temperatura dos termômetros secos nos dois níveis

$s$  = tangente à curva de tensão de saturação de vapor sobre a água à temperatura úmida média dos dois níveis

$\gamma$  = constante psicrométrica.

Com a razão de Bowen calculada, determinou-se o fluxo de calor latente pela fórmula:

$$LE = -\frac{R_L - C}{1 + \beta}$$

Calculado o fluxo de calor latente, pela fórmula  $S = \beta \cdot LE$  foi obtido o fluxo de calor sensível.

### Evapotranspiração de referência

Para cada dia, foi determinada a evapotranspiração de referência, pelo método de Penman (1948), citado por Ometto (1981), cuja equação é a seguinte:

$$ET_p = \frac{s}{s+\gamma} \cdot R_L + \frac{\gamma}{s+\gamma} \cdot E_c \text{ (mm.dia}^{-1}\text{)}$$

onde:

$ET_p$  = evapotranspiração de referência

$s$  = tangente à curva de tensão de saturação de vapor sobre a água à temperatura média do ar

$\gamma$  = constante psicrométrica

$R_L$  = radiação líquida disponível ao sistema, transformada em mm.dia<sup>-1</sup>

$E_c$  = termo aerodinâmico

Para a obtenção dos valores de  $\frac{s}{s+\gamma}$  e  $\frac{\gamma}{s+\gamma}$  foram utilizadas tabelas em Ometto (1981), entrando com valores médios diários de temperatura do ar em abrigo meteorológico, determinados em termogramas.

A radiação líquida diária ( $R_L$ ) foi obtida através de uma regressão linear simples calculada a partir de totais diários de 15 dias de balanço de radiação sobre o feijoeiro, sem limitação de água no solo e em condições de elevado desenvolvimento vegetativo. A partir da função determinada, estimou-se a radiação líquida dos demais dias, utilizando a radiação global medida com piranômetro tipo Eppley modelo "branco e preto", dez junções, e constante de  $3,55 \cdot 10^{-6} \text{ V/W.m}^2$ , acoplado a um sistema de registro. A regressão linear obtida e utilizada foi a seguinte:

$$R_L = 9,51 + 0,617 R_G$$

onde:

$R_L$  = radiação líquida sobre o feijoeiro

$R_G$  = radiação solar global

O coeficiente de determinação da função foi  $r^2 = 0,964$ .

O termo aerodinâmico da fórmula de Penman foi calculado pela expressão:

$$E_c = (0,35 + 0,284 U) (e_s - e_a)$$

onde:

$E_c$  = termo aerodinâmico

$U$  = velocidade média diária do vento a 2 m acima da superfície ( $m.s^{-1}$ )

$e_s - e_a$  = déficit de saturação de vapor d'água do ar (mm Hg)

A velocidade do vento a dois metros da superfície foi obtida em estação meteorológica próxima ao experimento, com anemômetro totalizador marca Fuess ( $km.dia^{-1}$ ). O déficit de saturação de vapor d'água do ar foi calculado a partir de diagramas de termo-higrógrafo instalado em abrigo meteorológico.

### Evaporação de tanque

Valores diários de evaporação de tanque "classe A" foram determinados em tanque de nível constante, equipado com sistema de bóia alimentadora, recipiente medidor e sistema de descarga de excesso. Este conjunto foi instalado dentro da área experimental, anexo ao experimento. As leituras foram feitas diariamente às 7 horas, considerando o valor obtido como sendo a evaporação do dia anterior.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições termo-pluviométricas ocorridas durante o período experimental foram descritas por Bergamaschi et al. (1986), com ênfase especial à estiagem durante a qual foi coletada a maior parte dos resultados deste trabalho. Na Fig. 1 estão representados potenciais matriciais da água no solo, durante o período em que a cultura foi submetida a tratamentos diferenciais de disponibilidade hídrica. Conforme discutiu Bergamaschi (1984), o emprego de potenciais matriciais a diferentes profundidades, obtidos em tensiômetros de mercúrio, mostrou-se mais apropriado do que a fração de água disponível para este tipo de avaliação, mesmo ficando limitado até próximo a  $-0,1$  MPa.

Nas Fig. 2, 3 e 4 estão representados balanços de energia em diferentes condições de demanda evaporativa atmosférica, de disponibilidade hídrica no solo e de desenvolvimento da cultura. Na Fig. 2

são apresentados resultados relativos ao dia 28.09, de demanda elevada ( $ET_p = 6,56$  mm), sem limitação de disponibilidade hídrica no solo, visto que precipitações intensas ocorreram quatro dias antes, tendo as segunda e terceira épocas índices de área foliar diferentes (IAF em torno de 1,80 e 1,25, respectivamente). Os resultados da Fig. 3 correspondem ao dia 09.10, portanto, 15 dias após as últimas chuvas intensas, com diferentes disponibilidades de água entre os tratamentos I e D, diferentes IAF em decorrência do efeito do tratamento diferencial de irrigação (IAF de aproximadamente 2,00 no tratamento irrigado e 1,30 no não irrigado) e elevada demanda evaporativa ( $ET_p = 5,88$  mm). O balanço de energia da Fig. 4 corresponde ao dia 11.09, totalmente nublado e, portanto, com baixa demanda evaporativa ( $ET_p = 1,80$  mm); este balanço foi efetuado em parcela da segunda época de semeadura, com IAF de aproximadamente 1,30 e sem limitação de disponibilidade hídrica do solo.

Na Tabela 1 são apresentados os totais diários dos componentes do balanço de energia, bem como as suas relações com a radiação líquida e a relação entre o fluxo de calor latente com a evapotranspiração de referência e com a evaporação de tanque "classe A".

Na Fig. 2 e na Tabela 1 observam-se diferenças nos componentes do balanço da energia em função do estágio de desenvolvimento (IAF). Na parcela correspondente à segunda época de semeadura (IAF = 1,80), 87% da energia líquida foi utilizada como calor latente de evaporação (evapotranspiração), 7% como calor sensível (aquecimento do ar) e 6% como calor destinado ao aquecimento do solo, ao longo de todo o dia. Na parcela da terceira época de semeadura (IAF = 1,25) 77% da energia líquida foi utilizada como calor latente de evaporação, 16% como calor sensível, e 7% como fluxo de calor para o solo. Portanto, a diferença de cobertura do solo em decorrência da área foliar determinou que, na parcela cujas plantas estavam mais desenvolvidas, maior quantidade de energia fosse destinada à evapotranspiração, com menor utilização no processo de aquecimento do ar, em relação à parcela cujas plantas apresentavam menor área foliar.

Pelo menor desenvolvimento das plantas da

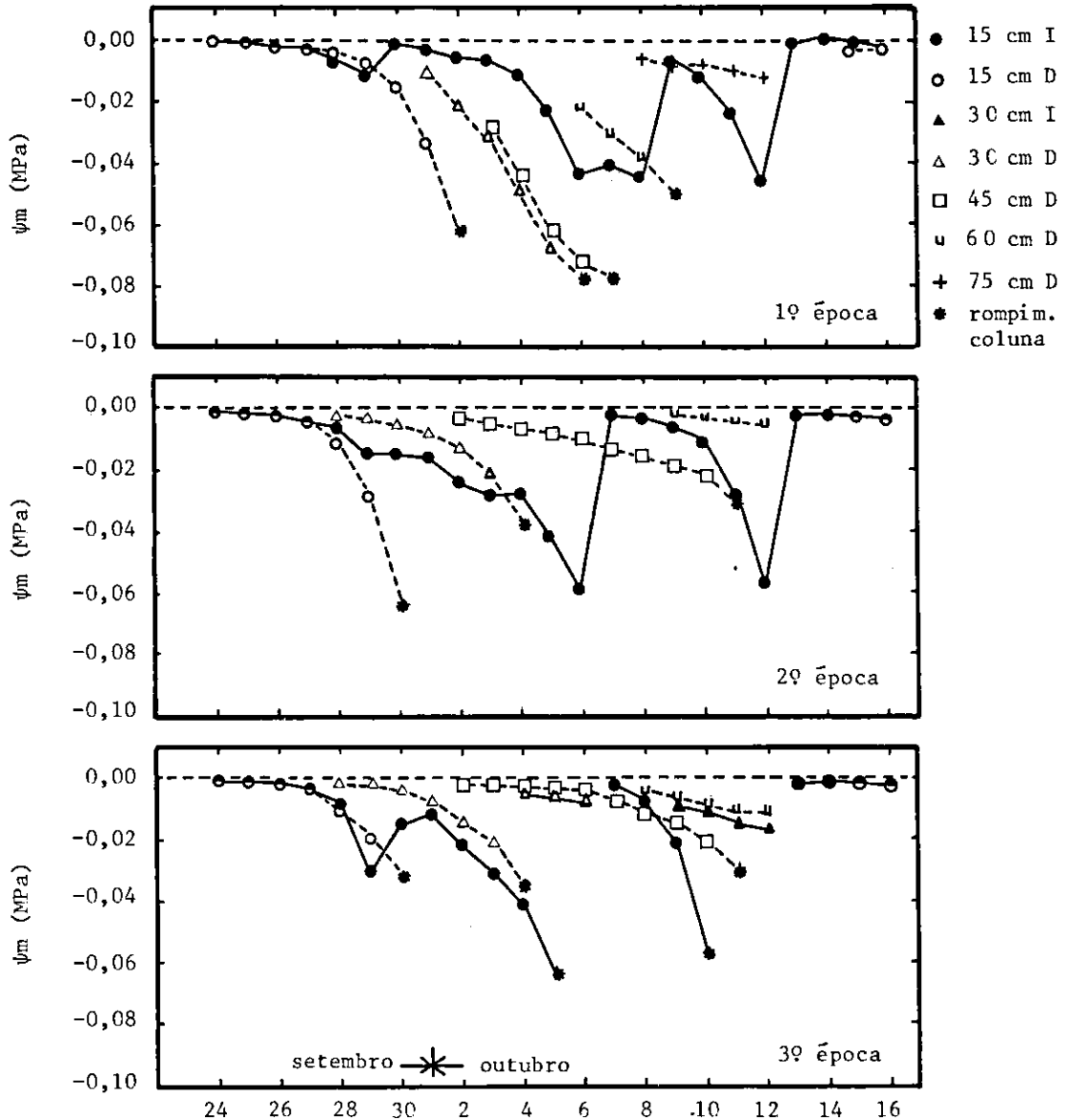


FIG. 1. Potenciais matriciais da água no solo ( $\psi_m$ ), medidos com tensiômetros às 7 horas em diferentes profundidades, ao longo do período de diferenciação dos tratamentos irrigado (I) e com suspensão da irrigação (D), para três épocas de semeadura de feijoeiro cultivar Aroana 80. Piracicaba, 1983.

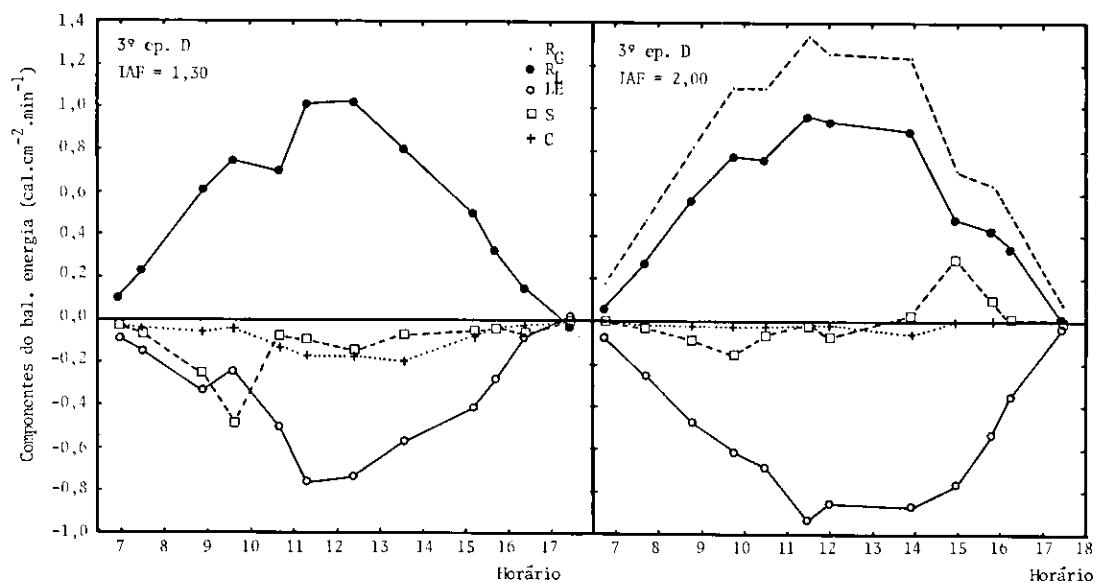


FIG. 2. Radiação solar global ( $R_G$ ), radiação líquida ( $R_L$ ), fluxo de calor latente de evaporação (LE), fluxo de calor sensível (S) e fluxo de calor no solo (C) em feijoeiro cultivar Aroana 80, em duas épocas de semeadura, em estágio inicial de secamento do solo e alta demanda evaporativa atmosférica (dia 28.9) Piracicaba, 1983.

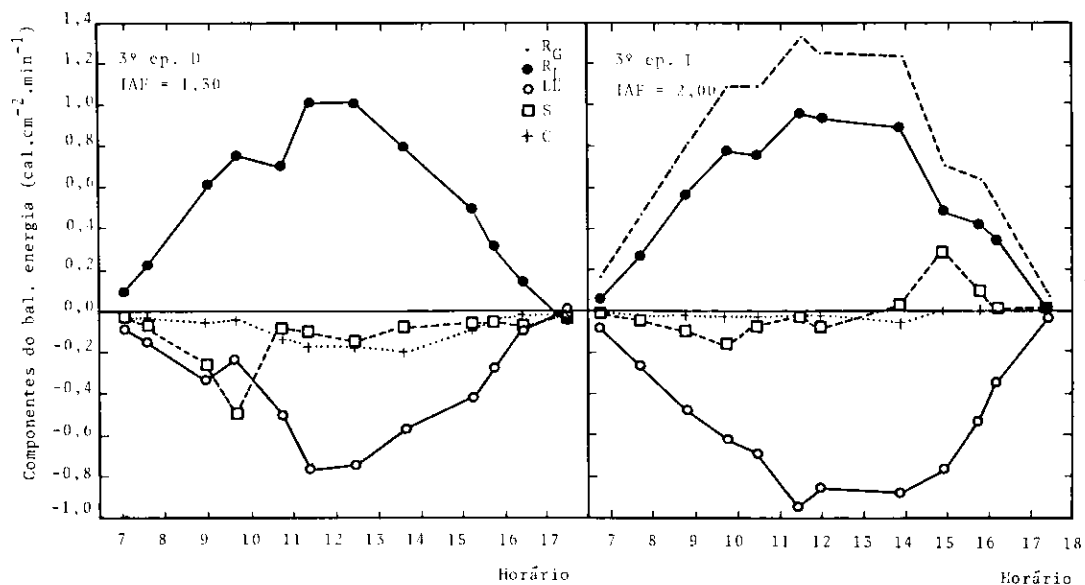


FIG. 3. Radiação solar global ( $R_G$ ), radiação líquida ( $R_L$ ), fluxo de calor latente de evaporação (LE), fluxo de calor sensível (S) e fluxo de calor no solo (C) em feijoeiro cultivar Aroana 80, em parcelas irrigadas (I) e com suspensão da irrigação (D) e em dia de alta demanda evaporativa atmosférica (9.10). Piracicaba, 1983.

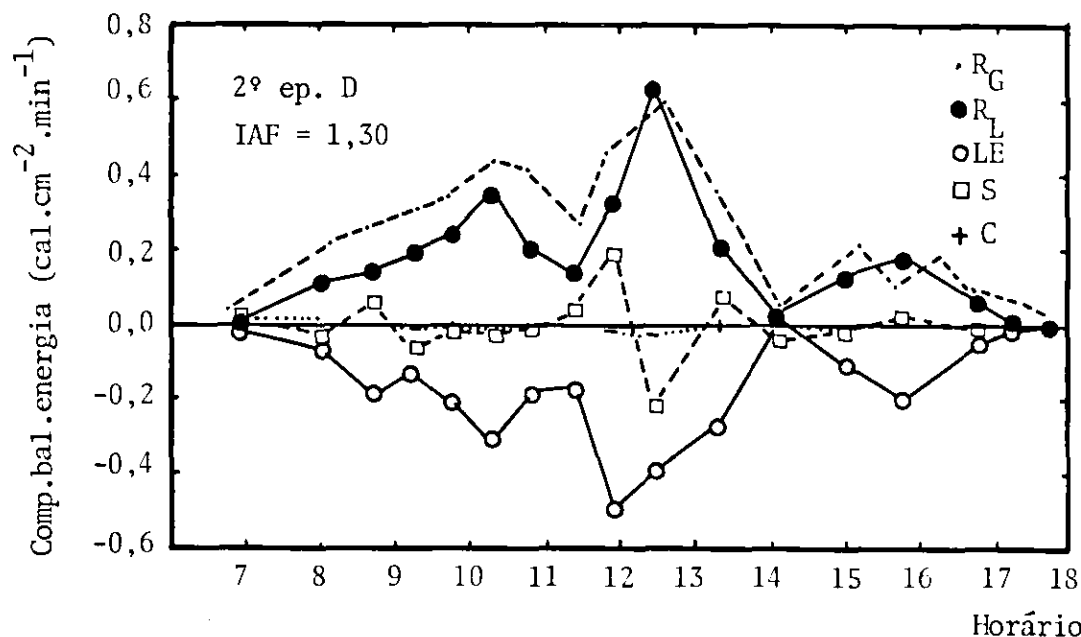


FIG. 4. Radiação solar global ( $R_G$ ), radiação líquida ( $R_L$ ), fluxo de calor latente de evaporação (LE), fluxo de calor sensível (S) e fluxo de calor no solo (C) em feijoeiro cultivar Aroana 80, em dia nublado e de baixa demanda evaporativa atmosférica (11.9). Piracicaba, 1983.

TABELA 1. Parâmetros absolutos e derivados do balanço de energia calculados no período diurno, com diferentes condições hídricas e de desenvolvimento de feijoeiro cultivar Aroana 80. Piracicaba, 1983.

Dia tratamento	11.09	28.09		09.10	
	2º ep.	2º ep.	3º ep.	3º ep.I	3º ep.D
$R_L$ (cal.cm <sup>-2</sup> )	114,6	369,3	395,4	371,7	370,2
C (cal.cm <sup>-2</sup> )	-1,8	-23,4	-26,1	-9,0	-54,0
LE (cal.cm <sup>-2</sup> )	-102,3	-321,3	-306,6	-377,1	-242,4
S (cal.cm <sup>-2</sup> )	-5,1	-27,9	-61,8	+2,1	-75,3
LE/ $R_L$ + C	-0,91	-0,93	-0,83	-1,04	-0,77
C/ $R_L$	-0,02	-0,06	-0,07	-0,02	-0,15
LE/ $R_L$	-0,93	-0,87	-0,77	-1,01	-0,65
S/ $R_L$	-0,04	-0,07	-0,16	+0,01	-0,20
ETp (mm)	1,80	6,56	6,56	5,88	5,88
ECA (mm)	2,3	8,7	8,7	8,2	8,2
IAF	1,30	1,80	1,25	2,00	1,30
LE (mm)	1,81	5,45	5,20	6,39	4,11
LE/ETp	1,01	0,83	0,79	1,09	0,70
LE/ECA	0,79	0,63	0,60	0,78	0,50

$R_L$  = radiação líquida.

C = fluxo de calor no solo;

LE = fluxo de calor latente de evaporação.

S = fluxo de calor sensível para o ar.

ETp = evapotranspiração de referência (Penman).

ECA = evaporação de tanque "classe A".



terceira época de semeadura, maior quantidade de radiação solar atingiu diretamente a superfície do solo e, como já se encontrava seca, em razão dos quatro dias decorridos após a última precipitação pluvial, o processo de evaporação direta da água do solo foi limitado, e maior quantidade de energia foi destinada para o aquecimento do ar, estando de acordo com Tanner (1960). Na Tabela 1, observa-se que a razão  $LE/R_L + C$  foi inferior a 1 nas duas parcelas, no dia 28.09 e, portanto, não houve efeito da advecção sobre o processo de evapotranspiração, segundo critério de Rosenberg (1974).

Os percentuais de radiação líquida utilizados para o aquecimento do solo em 28.09, nas duas parcelas avaliadas, estão dentro da faixa estabelecida por Sellers (1969), que é de 5% a 10% para culturas em dias claros. Citando diversos trabalhos de pesquisa, Chang (1974) indicou que, na ausência de advecção, a evapotranspiração em nível potencial consome 80% a 90% do saldo de radiação; deste modo, o fluxo de calor latente para a parcela da segunda época de semeadura em 28.09 esteve dentro destes limites, ao passo que o da terceira época demonstrou alguma limitação ao processo de evapotranspiração. Esta limitação pode ser atribuída ao fato de a área foliar não cobrir totalmente o terreno, ao mesmo tempo em que a superfície seca do solo limitou a perda por evaporação direta.

Na Fig. 3 e na Tabela 1, constata-se que a interação entre a disponibilidade de água no solo e o índice de área foliar em relação ao balanço de energia foi acentuada no dia 09.10. É importante ressaltar que a diferença de IAF entre as duas parcelas comparadas (I e D) foi decorrente do próprio tratamento diferencial de água no solo, descrita na análise de crescimento (Bergamaschi et al. 1986). Pode-se verificar que na parcela irrigada (I), cujo IAF estava em torno de 2, o fluxo de calor latente de evaporação total do dia foi 1% superior ao saldo de radiação e 4% maior do que a soma  $R_L + C$ , o que demonstra que a advecção constitui uma fonte secundária de energia, na forma de calor sensível (Rosenberg 1974). Pela Fig. 2, verifica-se que o fluxo de calor sensível na parcela irrigada foi negativo durante a manhã, ou seja, o sistema solo-planta-atmosfera cedeu

energia para o ar na forma de calor; à tarde ocorreu o inverso, isto é, o ar alimentou o sistema, aumentando a quantidade de energia destinada à evapotranspiração. Villa Nova (1973) observou e descreveu situação semelhante em arroz. De acordo com Tanner (1960), este efeito de advecção é típico em culturas irrigadas circundadas por áreas secas. Com efeito, passados 15 dias praticamente sem chuvas e com alta demanda evaporativa na maioria dos dias, as áreas próximas ao experimento já se encontravam bastante secas no dia 09.10, única data de medida em que o balanço de energia acusou efeito de advecção.

Ao mesmo tempo em que a perda de calor latente foi superior ao saldo de radiação na parcela irrigada, apenas 65% de  $R_L$  foram utilizados em evapotranspiração na parcela não irrigada. O inverso ocorreu com a energia destinada ao aquecimento do ar e do solo, que corresponderam a 20% e 15%, respectivamente, na parcela com deficiência hídrica no solo. Estando o solo mais descoberto (menor IAF) e mais seco na parcela não irrigada (Fig. 1), a sua superfície se aqueceu mais, transferindo mais calor para o ar e para as suas camadas mais profundas. Observa-se que o aquecimento do ar se deu principalmente pela manhã; na parcela irrigada houve inversão do gradiente térmico vertical à tarde, ou seja, o ar tendeu a se resfriar, cedendo calor ao sistema solo-planta. Enquanto isto, na parcela não irrigada essa inversão somente foi iniciada ao final da tarde, em função do maior aquecimento diurno do sistema solo-planta e, portanto, do maior gradiente térmico junto a ele (Villa Nova 1973).

Na Fig. 5 são representadas as variações da razão de Bowen ( $\beta$ ) calculadas nas parcelas irrigada e não irrigada da terceira época de semeadura em 09.10. Segundo Landsberg & Butler (1980), este parâmetro serve para analisar o modo pelo qual a radiação líquida é utilizada. Sendo  $\beta$  a relação entre os fluxos de calor sensível e de calor latente, pode-se visualizar com facilidade a maior quantidade de energia utilizada para o aquecimento do ar na parcela não irrigada, especialmente pela manhã. Ao mesmo tempo, observa-se que, na parcela irrigada, uma pequena quantidade de energia foi destinada ao aquecimento do ar pela manhã; os valores negativos da tarde indicam a

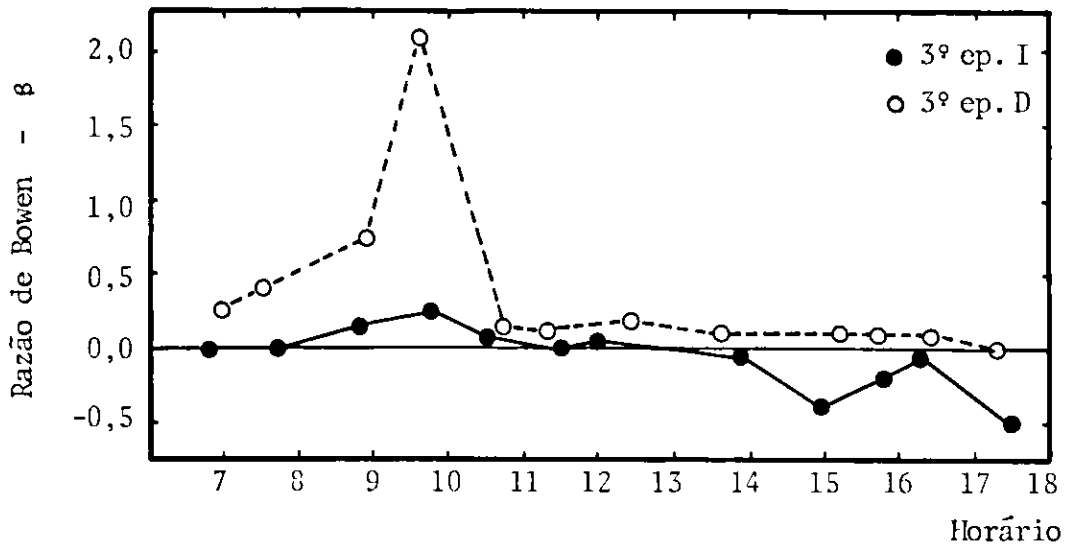


FIG. 5. Razão de Bowen ( $\beta = S/LE$ ) em feijoeiro cultivar Aroana 80, em parcela irrigada (I) e com suspensão da irrigação (D) e em dia de alta demanda evaporativa atmosférica (9.10). Piracicaba, 1983.

inversão do fluxo de calor sensível, ou seja, energia proveniente do ar ambiente alimentando o sistema (advecção), somando-se à energia proveniente do saldo de radiação e incrementando o processo de evapotranspiração (Tanner 1960, Sellers 1969, Monteny 1972, Villa Nova 1973, Chang 1974, Rosenberg 1974).

É possível observar, na Fig. 3, que, em razão da cobertura praticamente completa do solo na parcela irrigada, em 09.10, o fluxo de calor no solo foi pequeno e variou muito pouco. Porém, na parcela não irrigada este fluxo foi bem maior, graças à menor área foliar e, como as linhas de plantas foram orientadas na direção norte-sul, a incidência direta da radiação solar sobre o solo determinou maior transferência de energia para o seu interior durante os horários próximos do meio-dia.

A Fig. 4 e a Tabela 1 demonstram que, em um dia totalmente nublado (11.09), todos os valores absolutos dos componentes do balanço de energia foram reduzidos; portanto, os processos de aquecimento do ar e do solo e de evapotranspiração foram menos intensos. Embora o IAF fosse apenas 1,30, não cobrindo totalmente o terreno, a superfície do solo se encontrava úmida; assim, a parcela de energia utilizada em evapotranspiração foi

elevada (93%) em relação à que foi destinada para aquecer o ar e o solo (4% e 2%, respectivamente).

Em termos de efeitos simples, observa-se, na Tabela 1, que o valor absoluto de fluxo de calor latente de evaporação foi 5% maior com IAF de 1,80, em relação ao IAF de 1,25 (dia 28.09); LE diminuiu em 26% quando a fração de água disponível do solo passou de 0,55 (terceira época D em 28.09) para 0,23 (terceira época D em 09.10); LE aumentou em 187% com a evapotranspiração de referência passando de 1,80 mm (segunda época em 11.09) para 6,56 mm (terceira época em 28.09). Estas comparações podem ser consideradas grosseiras, visto que a proporção de variação dos fatores não foi a mesma e as interações não foram perfeitamente eliminadas. No entanto, elas demonstram, pela quantidade de energia destinada ao fluxo de calor latente de evaporação em diferentes IAF, disponibilidade hídrica no solo e demanda evaporativa do ar, que a evapotranspiração da cultura foi muito mais dependente das condições atmosféricas do que do solo e das plantas, concordando com afirmativas de Gardner (1965). Obviamente, se forem avaliadas as interações destes três fatores considerados sobre a evapotranspiração, as respostas seriam ainda mais evidentes, na medida em que

dois ou mais deles possam combinar seus efeitos.

Na Tabela 2 estão apresentados totais diários de fluxo de calor latente de evaporação calculados em diversos dias, em parcelas sem grande limitação de disponibilidade hídrica no solo. A Fig. 5 representa as relações destes resultados de LE com os respectivos valores de evapotranspiração de referência e evaporação de tanque "classe A" para os dias correspondentes. Pode-se observar que ambos os parâmetros meteorológicos estiveram bem correlacionados com os valores de LE. A evapotranspiração de referência demonstrou superestimar um pouco os valores de LE, enquanto a evaporação de tanque "classe A" não corrigida superestimou ainda mais. Certamente, se os dados de tanque de evaporação fossem corrigidos, haveria melhor aproximação com o fluxo de calor latente; a correção da evaporação de tanque "classe A" por um coeficiente, geralmente em torno de 0,70 (Berlato & Molion 1981), aproximaria bastante os coeficientes angulares das duas funções encontradas.

Estas superestimativas de LE pelos parâmetros meteorológicos utilizados também podem ser devidas à cobertura incompleta do terreno (baixo IAF) ocorrida em quase todos os casos; além

disso, em alguns dias a superfície do solo deve ter limitado a evaporação direta da água, por se encontrar seca, funcionando como se fosse uma cobertura morta (Chang 1974). Conforme afirmou Tanner (1960), se a cultura se encontra em condições de evapotranspiração máxima (cobrindo totalmente o solo e sem limitações no suprimento hídrico), o seu consumo de água se aproxima, em valor absoluto, à radiação líquida. Pela Fig. 6, observa-se que o IAF mostrou influenciar a relação LE/ETp, especialmente em dias de elevada ETp; esta relação foi mais baixa com menor área foliar, sendo próxima a 1 com IAF acima de 1,5. Assim, pode-se deduzir que, muito provavelmente, não haveria superestimativa do fluxo de calor latente de evaporação por ETp e ECA, se a cultura estivesse plenamente desenvolvida e se os dados de tanque de evaporação tivessem sido corrigidos. Com efeito, a utilização de pontos com IAF superior a 1,5 modificou as funções para  $Y = 0,34 + 1,005X$ , com  $r^2 = 0,89$ , para a evapotranspiração de referência de Penman e  $Y = 0,03 + 0,678X$ , com  $r^2 = 0,85$ , para a evaporação de tanque não corrigida. Leite (1978), empregando o método do balanço de energia em feijoeiro, no mesmo local, concluiu que o fluxo de calor latente

TABELA 2. Totais diários de fluxo de calor latente de evaporação (LE), evapotranspiração de referência (ETp-Penman) e evaporação de tanque "Classe A" (ECA) em diferentes condições atmosféricas e de desenvolvimento do feijoeiro cultivar Aroana 80. Piracicaba, 1983.

Dia	ETp (mm)	ECA (mm)	Tratamento	IAF	LE (mm)
10.09	3,46	4,6	2º ep.	1,30	3,18
11.09	1,80	2,3	2º ep.	1,30	1,81
15.09	2,51	3,4	1º ep.	2,45	1,99
			2º ep.	1,75	1,99
21.09	3,94	5,2	2º ep.	1,90	3,50
			3º ep.	1,10	3,85
22.09	3,86	4,5	2º ep.	1,90	3,26
			3º ep.	1,15	3,06
27.09	6,38	8,8	2º ep. D	1,85	5,77
			3º ep. D	1,25	5,10
28.09	6,56	8,7	2º ep. D	1,80	5,44
			3º ep. D	1,25	5,20
29.09	5,77	6,8	2º ep. D	1,75	5,40
			3º ep. D	1,25	4,35
30.09	4,83	8,4	2º ep. I	1,80	4,71
04.10	4,62	6,6	2º ep. I	1,60	5,21
09.10	5,88	8,2	3º ep. I	2,00	6,39

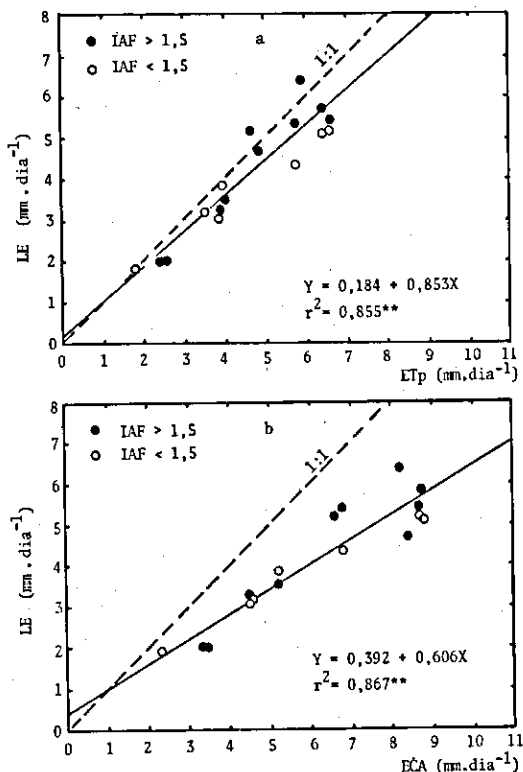


FIG. 6. Análises de regressões simples para totais diários de evapotranspiração medida pelo método do balanço de energia (LE) em feijoeiro cultivar Aroana 80, em diversos dias e estágios diferentes, em função da evapotranspiração de referência de Penman (ETp) e da evaporação de tanque "classe A" não corrigida (ECA). Piracicaba, 1983.

de evaporação foi superior à evapotranspiração de referência calculada segundo o método de Penman, quando a cultura estava com pleno desenvolvimento e irrigada; porém, o autor cita que, dos cinco dias de medição, houve efeito de advecção em três deles, elevando os valores de perda de água pelo sistema solo-planta:

Os resultados apresentados demonstraram que, apesar das limitações impostas pelo próprio erro conceitual, o método do balanço de energia se mostrou prático e acurado para determinações da evapotranspiração em nível diário, concordando com observações de Villa Nova (1973), Rosenberg (1974) e Perrier et al. (1976).

## CONCLUSÕES

1. A quantidade de energia destinada ao fluxo de calor latente de evaporação (evapotranspiração) foi influenciada positivamente pelo índice de área foliar, pela disponibilidade hídrica no solo e pela demanda evaporativa atmosférica; o inverso ocorreu com o fluxo de calor sensível (aquecimento do ar) e com o fluxo de calor para aquecimento do solo.

2. Dentro dos limites testados de índice de área foliar, disponibilidade hídrica do solo e demanda evaporativa do ar, a evapotranspiração da cultura mostrou-se muito mais dependente das condições atmosféricas do que do solo e das plantas.

3. A evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman (ETp) e a evaporação de tanque "classe A" (ECA) foram altamente correlacionadas com o fluxo de calor latente de evaporação (LE) determinado pelo método do balanço de energia. A ETp demonstrou estimar com boa aproximação LE em parcelas irrigadas e com IAF elevado, enquanto a ECA não corrigida superestimou valores de LE.

## REFERÊNCIAS

- BERGAMASCHI, H. Perda de água e desenvolvimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições da disponibilidade hídrica no solo e da atmosfera. Piracicaba, ESALQ, 1984. 204p. Tese Doutorado.
- BERGAMASCHI, H.; VIEIRA, H.J.; OMETTO, J.C.; ANGELOCCI, L.R. & LIBARDI, P.L. 1986. Deficiência hídrica em feijoeiro. 1. Análise de crescimento e fenologia. Brasília, EMBRAPA. Pesq. agropec. bras., Brasília, 23(7):733-43, 1988.
- BERLATO, M.A. & MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre, IPAGRO, 1981. 95p. (Boletim técnico, 7)
- CAMARGO, A.P. de; PINTO, H.S.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A. Clima do Estado de São Paulo. In: SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura. Zoneamento agrícola do Estado de São Paulo. São Paulo, 1974. v.1, cap. 2, p.51-87.
- CHANG, J.H. Climate and agriculture an ecological survey. 3. ed. Chicago, Aldine, 1974. 304p.
- CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL, Cali, Colômbia. Una escala de desarrollo

- para el frijol propone el CIAT. Cali, 1983. 2p. (Hoja informativa del Programa del Frijol del CIAT. vol. 5, n.2)
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. Roma, FAO, 1975. 178p. (Irrigation and drainage paper, 24)
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. *Soil taxonomy; a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Washington, U.S. Government Printing Office, 1975. (Agriculture handbook, 436)
- FEHR, W.R. & CAVINESS, C.E. *Stages of soybeans development*. Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1977. 11p. (Special report, 80)
- GARDNER, W.R. Dynamic aspects of soil-water availability to plants. *Annu. Rev. Plant. Physiol.*, 16:323-42, 1965.
- INSTITUTO AGRONÔMICO, Campinas, SP. Novas cultivares. *O Agrônomo*, 34(único):1-26, 1982.
- LANDSBERG, J.J. & BUTLER, D.R. Stomatal response to humidity: implications for transpiration. *Plant Cell Environ.*, 3:29-33, 1980.
- LEITE, A.C. Aplicação do método do balanço de energia e do método aerodinâmico de Thornthwaite e Holzman na estimativa da evapotranspiração em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Piracicaba, ESALQ, 1978. 65p. Tese Mestrado.
- MONTENY, B.A. Evapotranspiration of different crops in a mediterranean semi-arid region. *Agric. Meteorol.*, 10(1/2):19-38, 1972.
- OMETTO, J.C. *Bioclimatologia vegetal*. São Paulo. Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- PERRIER, A.; ITIER, B.; BERTOLINI, J.M.; KATERJI, N. A new device for continuous recording of the energy balance of natural surface. *Agric. Meteorol.*, 16:71-84, 1976.
- RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. *Carta de solos do município de Piracicaba*. Piracicaba. ESALQ, 1966. 85p.
- RITCHIE, J.T. Water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Plant Soil*, 58:81-96, 1981.
- ROSENBERG, N.J. *Microclimate; the biological environment*. New York, J. Wiley, 1974. 315p.
- SELLERS, W.D. *Physical climatology*. 3. ed. Chicago, University of Chicago Press, 1969. 271p.
- STANSELL, J.R. & SMITTLE, D.A. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 105(6): 869-73, 1980.
- TANNER, C.B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24(1): 1-9, 1960.
- VILLA NOVA, N.A. *Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz*. Piracicaba, ESALQ, 1973. 89p. Tese Livre-Docência.
- WEBB, E.K. Aerial microclimate. *Meteorol. Monogr.*, 6(28):27-58, 1965.