

APLICAÇÃO DO MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA E DO
MÉTODO AERODINÂMICO DE THORNTHWAITTE E HOLZMAN
NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTURA
DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.)

ALAN DE CASTRO LEITE
Engenheiro-Agrônomo
Pesquisador da Empresa Maranhense de
Pesquisa Agropecuária (EMAPA)

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Ometto

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universi-
dade de São Paulo, para obtenção do título
de Mestre em Agrometeorologia.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro, 1978

*ã memõria de minha mãe
ao meu pai
aos meus irmãos*

Dedico

A G R A D E C I M E N T O S

O autor expressa a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho os mais sinceros agradecimentos, e em especial:

- Ao Prof. Dr. José Carlos Ometto, pelo reconhecimento ao estímulo, eficácia e destreza com a qual orientou o presente estudo.
- À Secretaria de Agricultura do Estado do Maranhão (SAGRIMA) pela oportunidade concedida.
- À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela bolsa de estudos concedida.
- À Empresa Maranhense de Pesquisa Agropecuária (EMAPA), pelo apoio e incentivo recebidos.
- Aos Colegas, Engenheiro-Agrônomo Milcíades Gadelha de Lima e o Químico Industrial José Henrique F. Carreira, pelo incentivo e compreensão recebidos no decorrer do curso.
- Aos Professores Dr. Jesus Mardem dos Santos e Dr. Afonso Decico, pelas críticas e sugestões apresentadas.
- Ao Professor Dr. Nilson Augusto Villa Nova, pela colaboração prestada quando da análise dos dados.
- Aos Colegas, Engenheiros-Agrônomos Wilmar Wendt, Leocadio Grodzki e Bernardo Yasuhiro Ide, pela eficiente e dedicada colaboração durante a fase experimental.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear pelo auxílio recebido através do Projeto Feijão do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelas facilidades oferecidas e doação dos equipamentos de medida .

Aos demais colegas do Curso de Pós-Graduação em Agrometeorologia e aos funcionários do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização desta pesquisa.

Í N D I C E

| | Página |
|---|--------|
| 1 - RESUMO | 1 |
| 2 - INTRODUÇÃO | 3 |
| 3 - REVISÃO DELITERATURA | 5 |
| 4 - MATERIAL E MÉTODOS | 11 |
| 4.1 - Material | 11 |
| 4.1.1 - Caracterização das condições do experimento | 11 |
| 4.1.1.1 - Local | 12 |
| 4.1.1.2 - Solo e cultura | 12 |
| 4.1.1.3 - Época das observações | 12 |
| 4.1.1.4 - Índices pluviométricos do período das observações | 14 |
| 4.1.2 - Instrumental | 14 |
| 4.1.2.1 - Psicrômetros | 14 |
| 4.1.2.2 - Placas de fluxo | 15 |
| 4.1.2.3 - Anemômetros | 16 |
| 4.1.2.4 - Radiômetro | 17 |
| 4.1.2.5 - Sistema de leitura direta .. | 18 |
| 4.2 - Métodos | 18 |
| 4.2.1 - Balanço de energia | 19 |
| 4.2.2 - Aerodinâmico | 20 |

| | Página |
|---|--------|
| 5 - RESULTADOS | 22 |
| 5.1 - Relativos ao Método de Balanço de Energia. | 22 |
| 5.2 - Relativos ao Método Aerodinâmico | 23 |
| 6 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 47 |
| 6.1 - Relativos ao Método do Balanço de Energia. | 47 |
| 6.1.1 - Interpretação de sinais | 47 |
| 6.1.2 - Valor da razão de Bowen | 48 |
| 6.1.3 - Relações entre LE , H e Rn | 48 |
| 6.1.4 - Fluxo de calor do solo | 49 |
| 6.1.5 - Fluxo de calor latente | 50 |
| 6.2 - Relativos à Equação Aerodinâmica | 51 |
| 6.2.1 - Relação entre E , Δe e ΔU | 51 |
| 7 - CONCLUSÕES | 52 |
| 8 - SUMMARY | 54 |
| 9 - LITERATURA CITADA | 56 |
| 10 - APÊNDICE | 63 |
| 10.1 - Símbolos e Unidades Utilizados | 64 |

1 - RESUMO

A água constitui um dos fatores de produção agrícola e o conhecimento das necessidades hídricas das plantas é essencial aos projetos de irrigação.

Utilizando a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade Carioca, o presente estudo teve como finalidades: a aplicação do método do balanço de energia e do método aerodinâmico na determinação da taxa horária de evapotranspiração, e a determinação do valor da razão LE/R_n e da taxa máxima diária de fluxo de calor no solo.

Para as condições e período em que foi conduzido o experimento, os resultados mostraram que o valor médio da evapotranspiração da cultura, estimado pelo método do balanço de

energia, foi superior em 19% ao estimado pelo método aerodinâmico.

O valor médio da razão LE/R_n foi de 0,73 e a taxa máxima diária de fluxo de calor para o solo foi de 0,119 cal/cm².minuto.

2 - INTRODUÇÃO

O conhecimento da perda de água de uma superfície vegetada, através dos processos de evaporação da água do solo e transpiração das plantas (evapotranspiração), é de fundamental importância para os projetos de irrigação.

A determinação da evapotranspiração, por meio de medidas em lisímetros ou evapotranspirômetros, é uma operação de difícil execução em condições de campo. Visando abreviar esse transtorno, vários pesquisadores procuraram desenvolver métodos para estimativa desse parâmetro, procurando relacionar a perda de água de superfícies naturais com dados meteorológicos mais facilmente disponíveis.

Dentre os inúmeros métodos desenvolvidos para estimativa da evapotranspiração, figuram os dois métodos aqui aplicaca

dos, ou seja, o do balanço de energia e o aerodinâmico.

O primeiro mede a energia disponível em um sistema, fracionando-a entre os diferentes processos de evaporação e aquecimento do ar e do solo. Ao segundo, enquadra-se a equação aerodinâmica proposta por Thornthwaite e Holzman em 1939 para cálculo do fluxo de vapor d'água em função dos gradientes de tensão de vapor e de vento.

Os objetivos do presente trabalho visam à aplicação do método do balanço de energia para determinação da taxa horária de evapotranspiração ; aplicação do método aerodinâmico, através do uso da equação aerodinâmica de Thornthwaite e Holzman para estimativa da taxa horária de evapotranspiração; determinação do valor médio da razão LE/R_n para a cultura do feijão e a determinação da taxa máxima diária de fluxo de calor para o solo.

3 - REVISÃO DE LITERATURA

Abbe em 1905 , citado por OMETTO (1974), foi quem iniciou os estudos sobre perdas de água de uma superfície vegetada ao publicar uma informação sobre as relações entre clima e cultura.

A partir da década de 20 , vários métodos para a estimativa da evapotranspiração potencial foram propostos, dentre eles, o método do balanço de energia e o método aerodinâmico e muitos têm sido os trabalhos desenvolvidos, visando determinar o grau de eficiência de cada método, através de comparações dos valores de evapotranspiração estimados com os medidos em lisímetros ou evapotranspirômetros.

THORNTHWAITE e HOLZMAN (1939) derivaram a primeira equação aerodinâmica para cálculo de evapotranspiração em vege-

tações baixas, em função de gradientes de tensão de vapor e do perfil logarítmico do vento.

Segundo PASQUILL (1949), a equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN superestimou a evapotranspiração em condições de instabilidade. Verificou ainda que a evapotranspiração foi tanto maior quanto maior o grau de instabilidade atmosférica.

RIDER (1954) concluiu em seus trabalhos que a taxa de evapotranspiração de superfícies cultivadas pode ser obtida com oscilação de 15% dos valores medidos, quando simples fórmulas aerodinâmicas são aplicadas. Utilizando a equação aerodinâmica para cálculo de evapotranspiração em aveia, encontrou resultados bastante condizentes com os valores medidos. Resultados semelhantes, sob condições neutras, foram obtidos por HOUSE *et alii* (1960).

Budyko em 1956, citado por NKEMDIRIM e HALEY (1973), e CHANG (1965) têm demonstrado que onde o suprimento de água não é limitado, a maior parte da energia disponível é usada nos processos de evaporação.

Segundo SUOMI e TANNER (1958), TANNER (1960) e McILROY (1971) a evapotranspiração, estimada a partir da energia disponível na superfície da cultura em estudo, é bastante precisa, quando se usa o método do balanço de energia.

Apesar das limitações do M. B. E., discutidas por DEACON *et alii* (1958), o mesmo tem sido usado sucessivamente por

FRITSCHEN (1966) , STORR *et alii* (1970) , NKEMDIRIM e YAMASHITA (1972) , CHIN CHOI *et alii* (1974) , GRANT (1975) e outros para determinação da evapotranspiração.

DEACON *et alii* (1958), utilizando a equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN em estudos de evapotranspiração, concluem que ela funciona razoavelmente bem para culturas de baixo porte sob certas condições, mas não oferece bons resultados para culturas de alto porte, como trigo, cana, etc., ...

STANHILL (1958) aplica o método do balanço de energia para estimativa de evapotranspiração em grama e confronta os resultados com valores de evaporação medidos em tanque de evaporação.

TANNER (1960) usou o M.B.E. para estimativa de evapotranspiração em alfafa, encontrando divergência muito pequenas, quando comparou os resultados com valores medidos em lisímetros.

PRUITT *et alii* (1960) compararam evapotranspiração medida em lisímetros com valores estimados pelo M.B.E., encontrando excelente consonância entre ambos os dados. A conclusão semelhante chegou FRITSCHEN (1965), ao usar o mesmo método para estimativa de evapotranspiração em arroz. Os valores estimados estiveram dentro de 2% das medidas efetuadas em lisímetros.

PRUITT (1963) utilizando a equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN para cálculo de evapotranspiração, encontrou valores bastante distantes dos medidos em lisímetros ,

exceto quando a velocidade do vento excedeu de 3 para 4 metros por segundo. Verificou, ainda, que uma possível desigualdade dos coeficientes de transferência turbulenta, o que ocorre em condições de atmosfera não neutra, determina erros nas estimativas pelo uso dessa equação aerodinâmica, como também no M. B.E. onde causam erros devidos a grandes valores da razão de BOWEN. A resultados semelhantes, chegaram PRUITT *et alii* (1965) ao testarem a equação aerodinâmica, o método do balanço de energia e outras equações para estimativa da evapotranspiração em grama. Para velocidade de vento de 4 m/seg encontraram valores de evapotranspiração bastante próximos dos medidos em lisímetros ao usarem a equação aerodinâmica. Consideraram a mesma equação inadequada para velocidades de vento inferiores a 4 m/seg. Concluíram ser o método do balanço de energia como o que apresentou melhores resultados.

Em seus estudos BERNARD (1965) concluiu que o método do balanço de energia, em nível micrometeorológico, foi o que apresentou melhores resultados. A conclusões semelhantes chegou BLACKWEL (1965) ao analisar os resultados de seus experimentos. Pelas análises, verificou que o M.B.E. e o método aerodinâmico podem dar ótimos resultados se correções forem feitas para as condições atmosféricas.

DENMEAD (1965) usa o método do balanço de energia para estimativa da evapotranspiração de um cultivo de trigo. Ao comparar os valores estimados com os obtidos, através de medidas lisimétricas, não encontra diferenças entre ambos maio -

res que 0,1 mm/hora. A resultados semelhantes, chegaram GERBER *et alii* (1960) ao utilizarem o mesmo método para determinação de evapotranspiração em cultura de milho. Encontraram uma perfeita concordância entre os valores estimados e os medidos, principalmente, em períodos úmidos.

MUKAMMAL *et alii* (1966), utilizando o M.B.E. e três fórmulas aerodinâmicas para estimativa de evapotranspiração potencial em cereais, verificaram que, para as equações aerodinâmicas quando aplicadas para cálculo da E.T.P. com a cultura em sua fase final de crescimento, os resultados não foram satisfatórios. No início, os valores estimados se aproximaram dos medidos e no fim, se distanciaram em 40% dos valores medidos. Recomendaram o uso do método do balanço de energia, cujos resultados subestimaram a E.T.P. medida em apenas 11%.

LOURENCE *et alii* (1971), aplicando o M.B.E. para determinação da evapotranspiração em cultura de arroz, na Califórnia, encontraram diferenças de apenas 3,5% em relação aos valores medidos. Em cultura de milho, WILSON *et alii* (1972), encontraram, mesmo em condições de moderada umidade, diferenças máximas de apenas 6%. DAVIES (1972), em cultura de feijão, encontrou erros de apenas 10% na determinação da evapotranspiração em condições de solo moderadamente seco.

BLAD e ROSENBERG (1973) utilizam o M. B. E. para determinar evapotranspiração em soja, encontrando valores superiores aos medidos em lisímetros, em torno de 20%.

ANDRÉ (1973), ao comparar valores acumulados de evaporação potencial medida com dados estimados pelo M.B.E., não encontra relação linear entre ambos.

GRANT (1975), utilizando o M.B.E. e o método aerodinâmico para estimativas de evapotranspiração em cevada, concluiu ser o primeiro o melhor método para o cálculo de E.T.P.. Em cereais, GRAHM *et alii* (1961) encontraram valores estimados pelo M.B.E. bem próximos dos medidos.

Segundo PERRIER *et alii* (1975), o método do balanço de energia é utilizado, classicamente, para determinar os fluxos de calor latente e sensível, a partir de medidas dos fluxos de radiação líquida e de calor no solo, dos gradientes de vapor d'água e de temperatura do ar, acima da cultura.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 - Material

4.1.1 - Caracterização das condições do experimento

4.1.1.1 - Local

O experimento foi conduzido em área da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", localizada na cidade de Piracicaba, SP, situada a 22°42'39" latitude Sul, longitude 47°38' W e a 573 metros de altitude. O clima local é, segundo a classificação de Wilhelm Koeppen, sub-tropical com inverno seco (Cwa) e, segundo a classificação de Thornthwaite, é do tipo úmido com pequena deficiência de água, megatérmico,

com pequena oscilação térmica no ano (C₂rA'a') .

Na Figura 1 , é apresentada a orientação e dimensões da área e a disposição dos equipamentos utilizados.

4.1.1.2 - Solo e cultura

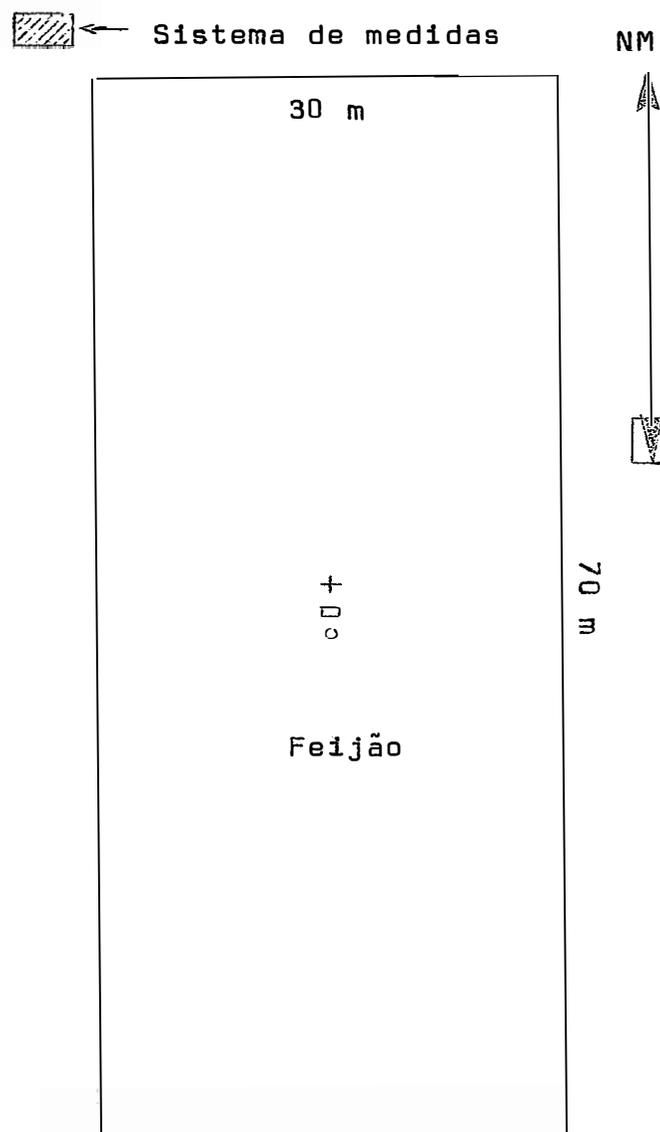
O solo utilizado para o experimento é de terra roxa estruturada, série "Luiz de Queiroz" (Alfisol), segundo a 7.^a aproximação, RANZANI *et alii* (1966).

A cultura utilizada no local foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. "Carioca". É uma planta classificada como de crescimento indeterminado, com ciclo vegetativo em torno de noventa dias. Segundo D'ARTAGNAN *et alii* (1971), é uma variedade de elevada produtividade e bastante resistente a moléstias.

O plantio foi efetuado no dia 1º de março de 1977, em linhas no sentido norte-sul, e no espaçamento de 30 cm entre linhas e 10 cm entre plantas.

4.1.1.3 - Época das observações

As observações foram efetuadas durante um período de seis dias, sendo selecionados os dias 08/06/77 , 09/06/77 , 10/06/77 , 11/06/77 e 13/06/77 correspondendo, respectivamente, a 68 , 69 , 70 , 71 e 73 dias após o plantio.



- + medidores de temperaturas
- medidores de gradientes de vento
- medidores de fluxo de calor no solo e radiação líquida

Fig. 1 - Área do experimento e localização dos instrumentos. Escala 1:500

4.1.1.4 - Índices pluviométricos do período das observações

O regime pluviométrico que antecedeu as observações foram:

- a) Chuva de 35,5 mm no dia 05/06/77 ;
- b) Chuva de 4,8 mm no dia 06/06/77 .

As observações foram feitas no posto meteorológico do Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" em pluviógrafos ali já instalados.

Durante o período da coleta de dados não houve ocorrência de chuva.

4.1.2 - Instrumental

4.1.2.1 - Psicrômetros

Os psicrômetros foram construídos com pares termoeletrônicos de cobre e constantan, diâmetro de 0,51 milímetros e protegidos por uma placa de PVC móvel contra a incidência direta de luz solar.

Das duas junções, uma foi colocada em um recipiente contendo gelo (0°C), e outra posicionada nas alturas de 40 e 80 cm acima da superfície do solo. A diferença de potencial en-

tre as duas junções (efeito Seebeck) ^{*}, medida por meio de um potenciômetro, é proporcional à diferença de temperatura entre a junção em gelo fundente e a das respectivas alturas acima citadas. As medidas foram lidas em mV e, posteriormente, convertidas em °C através de tabelas especiais de conversão.

Os conjuntos psicrométricos foram instalados em um mastro, permanecendo acima da superfície do solo sempre dos níveis de 40 e 80 cm, o que corresponde a 5 e 45 cm acima da cultura. Os mesmos serviram para as determinações dos gradientes de temperatura do bulbo seco e úmido, a cada intervalo de meia hora.

4.1.2.2 - Placas medidoras de fluxo de calor no solo

Para medidas de fluxo de calor no solo, foram instaladas duas placas de fluxo, ambas de 0,01 m de profundidade. Uma delas foi colocada na linha de plantio e a outra entre duas linhas do plantio, estando as duas na projeção do radiômetro. As medidas foram tomadas a cada meia hora.

(*) Efeito Seebeck expressa a propriedade que tem junções de certos metais de natureza diferente de produzir tensão quando submetidas a temperaturas desiguais.

O potencial, surgido entre os terminais das placas formadas por junções de cobre e constantan e medido por um potenciômetro, é proporcional à diferença de temperatura entre as junções da parte superior e inferior das placas.

As placas foram fabricadas por Middleton & Co. Pty. Ltda., Austrália, marca CSIRO, com as dimensões de $1\frac{7}{8}$ " x $1\frac{1}{8}$ " x $\frac{3}{16}$ " e sensibilidades de 16,95 e 17,50 mV/cal/cm². min. para a face superior e 16,97 e 18,14 para a inferior. A precisão de calibração das placas é de $\pm 5\%$.

4.1.2.3 - Anemômetros

Foram usados dois anemômetros de caneca, fabricação C. W. Thornthwaite Associates.

O princípio de funcionamento se baseia na incidência de raios de luz produzidos por uma pequena lâmpada, sobre uma fotogélula que emite um sinal que é amplificado e registrado em um contador a cada rotação do anemômetro.

A transformação do número de contagem por minuto para cm/seg. foi feita com auxílio de tabela especial de conversão que acompanha o sistema.

Os referidos anemômetros foram montados em um mastro vertical situado na área do experimento, conforme Figura 1, nos níveis de 40 e 80 cm acima da superfície do solo. Isto corresponde a 5 e 45 cm acima da cultura. A finalidade foi medir o

gradiente de vento entre as duas alturas e as medidas foram tomadas a cada intervalo de dez minutos.

4.1.2.4 - Radiômetro

O radiômetro utilizado foi de marca CSIRO, fabricação Middleton & Co. Pty. Ltda., Austrália, nº 672 e cuja resposta é de $28,173 \text{ mV/cal/cm}^2 \cdot \text{min.}$ e precisão de calibração de $\pm 5\%$. O mesmo foi montado em suporte apropriado a uma altura de 80 cm acima da superfície do solo. A finalidade foi medir o fluxo de radiação líquida ao nível de 80 cm e as medidas foram feitas em intervalos de meia hora.

O princípio de funcionamento é baseado no efeito termoeletrico, ou seja, o aquecimento diferencial produz uma força eletromotriz proporcional à quantidade de radiação recebida.

O elemento sensível do radiômetro fica situado entre duas cúpulas de polietileno. Esse material evita que haja incidência direta de vento sobre as placas e, por sua vez, deixa passar todo o espectro solar e terrestre de ondas eletromagnéticas. A resposta medida por um potenciômetro é proporcional à diferença dos fluxos que incidem sobre as faces do radiômetro.

4.1.2.5 - Sistema de leitura direta

Os sistemas de leituras foram instalados em um abrigo especial próximo ao local do experimento, Figura 1, e eram compostos de:

- a - Potenciômetro para medidas diretas, em mV, do fluxo de radiação líquida, das temperaturas do bulbo seco e úmido, e do fluxo de calor no solo. O potenciômetro usado foi de fabricação Cambridge Instrument Ltd., nº L - 296996, de fundos de escala de 0-20 e 0-100 mV., sensibilidade de 0,01 milivolt e precisão de calibração de $\pm 1\%$.
- b - Sistema de registro constituído de amplificador e contador de sinais conjugados, fabricação C. W. Thornthwaite Associates, modelo WPRS 106 - CWT 677-A. O número de sinais ou contagens por minuto registrado é convertido em cm/seg. através de tabela de conversão que acompanha o sistema.

4.2 - Métodos

Foram utilizados os métodos do balanço de energia e o aerodinâmico.

4.2.1 - Balanço de energia

O método do balanço de energia é o que se utiliza da razão de Bowen medida sobre uma superfície evaporante, definida pelas equações (1), (2) e (3).

$$B = \frac{S}{LE} \quad (1)$$

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

$$B = \left[\frac{\Delta + \gamma}{\gamma} \cdot \frac{\Delta T W}{\Delta T} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

onde:

S = fluxo de calor sensível ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{min.}^{-1}$)

LE = fluxo de calor latente ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{min.}^{-1}$)

R_n = radiação líquida ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{min.}^{-1}$)

G = fluxo de calor no solo ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{min.}^{-1}$)

B = razão de Bowen (adimensional)

Δ = tangente à curva de tensão de saturação de vapor d'água na temperatura do termômetro úmido, medida sobre superfície ($\text{mmHg } ^\circ\text{C}^{-1}$)

γ = constante psicrométrica ($0,5 \text{ mmHg } ^\circ\text{C}^{-1}$)

Δ T W = T_{2W} - T_{1W} = gradiente de temperatura úmida entre os níveis Z₁ e Z₂ ($^\circ\text{C}$)

Δ T = T₂ - T₁ = gradiente de temperatura entre os níveis Z₁ e Z₂ ($^\circ\text{C}$).

Através das equações (1) , (2) e (3) podemos calcular os fluxos de calor latente (LE) e sensível (S) sobre uma superfície, desde que sejam conhecidos os valores dos termos das equações.

4.2.2 - Aerodinâmico

Este método se utiliza do perfil aerodinâmico do vento para determinar os coeficientes de transferência turbulenta de vapor d'água, calor e momentum, em condições de neutralidade atmosférica.

Neste método, enquadra-se a equação (4) proposta por THORNTON e HOLZMAN em 1939, para cálculo do fluxo de vapor d'água em função dos gradientes de tensão de vapor e do perfil logarítmico do vento.

$$E = \frac{\rho K^2 \cdot (U_2 - U_1) \cdot (q_1 - q_2)}{\left(1 + n \frac{z_2}{z_1}\right)^2} \quad (4)$$

Pela definição de umidade específica,

$$q = 0,622 \frac{e}{p} \quad (5)$$

$$\Delta q = \frac{0,622}{p} (e_1 - e_2) \quad (6)$$

Substituindo-se (6) e (4) ,

$$E = \frac{\rho K \cdot 0,622 \cdot (U_2 - U_1) \cdot (e_1 - e_2)}{P \left(1 + \frac{z_2}{z_1}\right)^2} \quad (7)$$

onde:

E = evapotranspiração (mm/h)

ρ = densidade do ar úmido ($1,292 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

K = constante de von Karman (0,41)

P = pressão atmosférica local (mmHg)

$\Delta U = U_2 - U_1$ = diferença de velocidade de vento nas alturas z_1 e z_2 ($\text{cm} \cdot \text{seg.}^{-1}$)

$\Delta e = e_1 - e_2$ = tensão de vapor d'água entre as alturas z_1 e z_2 (mmHg)

5 - RESULTADOS

5.1 - Relativos ao Método de Balanço de Energia

Os valores médios horários dos componentes do balanço de energia (Cal./cm².min.) foram calculados com o auxílio das equações (1) , (2) e (3). Para aplicação de tais equações, utilizamos dados de gradientes psicrométricos e valores médios de radiação líquida (Rn) e fluxo de calor para o solo (G). Os resultados numéricos são apresentados nas Tabelas de 2 a 6 e, graficamente, nas Figuras de 2 a 6 . Os valores da taxa de evapotranspiração (LE), totais diários estimados, estão na Tabela 12.

Valores do coeficiente $\frac{\gamma + \Delta}{\gamma}$ utilizados na determi

nação da razão de Bowen são mostrados na Tabela 1 .

5.2 - Relativos ao Método Aerodinâmico

A estimativa da evapotranspiração horária (E) foi obtida através da equação (7) (equação aerodinâmica proposta por THORNTHWAITE e HOLZMAN, em 1939). Os valores numéricos de E , estimados em função dos gradientes de tensão de vapor d'água, entre as alturas z_1 e z_2 (Δe) , e gradientes de velocidade de vento nas mesmas alturas (Δu) , são apresentados nas Tabelas de 7 a 11 e, graficamente, nas Figuras de 7 a 11 . Os valores totais diários estimados estão na Tabela 12.

TABELA 1 - Valores do coeficiente $\frac{\gamma + \Delta}{\gamma}$ utilizados na determinação da razão de Bowen para valores de 10°C a 30°C

| | 10° | 11° | 12° | 13° | 14° | 15° | 16° | 17° | 18° | 19° | 20° | 21° | 22° |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 00 | 2,09 | 2,16 | 2,23 | 2,29 | 2,42 | 2,47 | 2,54 | 2,62 | 2,73 | 2,81 | 2,92 | 3,03 | 3,14 |
| 01 | 2,09 | 2,16 | 2,23 | 2,31 | 2,43 | 2,47 | 2,55 | 2,64 | 2,73 | 2,84 | 2,93 | 3,03 | 3,14 |
| 02 | 2,09 | 2,16 | 2,24 | 2,38 | 2,43 | 2,47 | 2,55 | 2,65 | 2,74 | 2,84 | 2,94 | 3,05 | 3,16 |
| 03 | 2,12 | 2,18 | 2,24 | 2,38 | 2,45 | 2,47 | 2,57 | 2,65 | 2,74 | 2,84 | 2,95 | 3,06 | 3,16 |
| 04 | 2,12 | 2,20 | 2,25 | 2,38 | 2,45 | 2,49 | 2,57 | 2,66 | 2,75 | 2,86 | 2,95 | 3,06 | 3,18 |
| 05 | 2,12 | 2,20 | 2,25 | 2,38 | 2,45 | 2,49 | 2,59 | 2,67 | 2,77 | 2,87 | 2,97 | 3,08 | 3,19 |
| 06 | 2,12 | 2,20 | 2,25 | 2,39 | 2,47 | 2,51 | 2,59 | 2,67 | 2,77 | 2,88 | 2,99 | 3,08 | 3,20 |
| 07 | 2,14 | 2,20 | 2,27 | 2,39 | 2,47 | 2,51 | 2,59 | 2,69 | 2,78 | 2,88 | 2,99 | 3,10 | 3,22 |
| 08 | 2,14 | 2,21 | 2,27 | 2,41 | 2,49 | 2,51 | 2,61 | 2,70 | 2,78 | 2,90 | 3,01 | 3,13 | 3,22 |
| 09 | 2,15 | 2,21 | 2,29 | 2,41 | 2,49 | 2,53 | 2,61 | 2,70 | 2,81 | 2,90 | 3,01 | 3,13 | 3,26 |

Δ = tangente à curva da tensão de saturação do vapor sobre a água, calculada por meio da Smithsonian Meteorological Tables.

γ = constante psicrométrica reduzida, ou seja, produto da constante psicrométrica para psicrômetros não ventilados ($80 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) pela pressão barométrica local [712 mm Hg], dando o valor de 0,57 mm Hg./°C .

TABELA 1 - Continuação

| | 23º | 24º | 25º | 26º | 27º | 28º | 29º | 30º |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 00 | 3,26 | 3,39 | 3,49 | 3,63 | 3,78 | 3,93 | 4,06 | 4,22 |
| 01 | 3,27 | 3,39 | 3,52 | 3,78 | 3,79 | 3,93 | 4,10 | 4,24 |
| 02 | 3,27 | 3,40 | 3,53 | 3,78 | 3,80 | 3,95 | 4,10 | 4,26 |
| 03 | 3,29 | 3,40 | 3,53 | 3,80 | 3,82 | 3,96 | 4,12 | 4,28 |
| 04 | 3,30 | 3,43 | 3,55 | 3,82 | 3,82 | 3,97 | 4,13 | 4,29 |
| 05 | 3,39 | 3,43 | 3,56 | 3,84 | 3,84 | 3,99 | 4,14 | 4,32 |
| 66 | 3,32 | 3,45 | 3,58 | 3,84 | 3,86 | 4,01 | 4,16 | 4,33 |
| 07 | 3,34 | 3,45 | 3,59 | 3,86 | 3,88 | 4,02 | 4,19 | 4,34 |
| 08 | 3,34 | 3,49 | 3,62 | 3,88 | 3,88 | 4,06 | 4,20 | 4,36 |
| 09 | 3,36 | 3,49 | 3,62 | 3,89 | 3,93 | 4,06 | 4,21 | 4,37 |

TABELA 3 - Gradiente psicrométrico observado (°C) e componentes do balanço de energia (cal. cm⁻² . min⁻¹), em cultura de feijão, do dia 09/06/77

| HORA | T ₂ | T ₁ | T _{2W} | T _{1W} | ΔT | ΔT _W | $\frac{\Delta T W}{\Delta T}$ | MTW | $\frac{Y+\Delta Y}{Y}$ | Rn | G | S | B | LE |
|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-------------------------------|------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | | | | | | | | | | | | | | |
| 10:00 | 14,6 | 14,9 | 13,4 | 13,6 | -0,3 | -0,2 | 0,67 | 13,5 | 2,47 | 0,287 | -0,059 | -0,137 | 1,546 | -0,089 |
| 11:00 | 17,9 | 18,7 | 15,7 | 16,1 | -0,8 | -0,4 | 0,50 | 15,9 | 2,53 | 0,419 | -0,091 | -0,256 | 3,773 | -0,068 |
| 12:00 | 21,7 | 21,8 | 18,7 | 18,3 | -0,1 | 0,4 | -4,00 | 18,5 | 2,77 | 0,675 | -0,110 | 0,051 | -0,083 | -0,616 |
| 13:00 | 21,6 | 22,0 | 18,9 | 19,1 | -0,4 | -0,2 | 0,50 | 19,0 | 2,81 | 0,557 | -0,119 | -0,311 | 2,467 | -0,126 |
| 14:00 | 24,9 | 25,0 | 20,2 | 20,1 | -0,1 | 0,1 | -1,00 | 20,2 | 2,94 | 0,475 | -0,080 | 0,134 | -0,254 | -0,529 |
| 15:00 | 26,0 | 26,1 | 20,0 | 19,7 | -0,1 | 0,3 | -3,00 | 19,8 | 2,90 | 0,290 | -0,069 | 0,025 | -0,103 | -0,242 |
| 16:00 | 25,7 | 25,8 | 19,9 | 18,8 | -0,1 | 1,1 | -1,10 | 19,4 | 2,86 | 0,147 | -0,018 | 0,004 | -0,031 | -0,132 |
| 17:00 | 24,6 | 24,5 | 19,5 | 18,6 | 0,1 | 0,9 | 9,00 | 19,0 | 2,81 | 0,091 | -0,011 | -0,003 | 0,041 | -0,076 |

TABELA 4 - Gradiente psicrométrico observado (°C) e componentes do balanço de energia (cal. cm⁻² . min⁻¹), em cultura de feijão, do dia 10/06/77

| HORA | T ₂ | T ₁ | T _{2W} | T _{1W} | ΔT | ΔT _W | $\frac{\Delta T W}{\Delta T}$ | MTW | $\frac{Y+\Delta Y}{Y}$ | Rn | G | S | B | LE |
|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------|-----------------|-------------------------------|------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 08:00 | 12,2 | 12,8 | 11,7 | 12,0 | -0,6 | -0,3 | 0,50 | 11,8 | 2,21 | 0,035 | -0,004 | -0,028 | 9,523 | -0,003 |
| 09:00 | 14,5 | 14,8 | 13,3 | 13,5 | -0,3 | -0,2 | 0,67 | 13,4 | 2,47 | 0,145 | -0,013 | -0,080 | 1,545 | -0,052 |
| 10:00 | 19,4 | 19,9 | 16,1 | 16,2 | -0,5 | -0,1 | 0,20 | 16,2 | 2,55 | 0,412 | -0,050 | 0,708 | -2,041 | -0,347 |
| 11:00 | 22,4 | 22,7 | 19,0 | 18,5 | -0,3 | 0,5 | -1,68 | 18,8 | 2,80 | 0,548 | -0,091 | 0,097 | -0,176 | -0,554 |
| 12:00 | 24,2 | 25,0 | 20,1 | 19,6 | -0,8 | 0,5 | -0,63 | 19,8 | 2,90 | 0,636 | -0,119 | 0,284 | -0,355 | -0,801 |
| 13:00 | 25,4 | 25,1 | 20,1 | 19,6 | 0,3 | 0,5 | 1,68 | 19,8 | 2,90 | 0,508 | -0,114 | -0,081 | 0,260 | -0,312 |
| 14:00 | 25,5 | 25,7 | 20,5 | 20,1 | -0,2 | 0,4 | -2,00 | 20,3 | 2,95 | 0,416 | -0,071 | 0,058 | -0,145 | -0,403 |
| 15:00 | 26,1 | 26,0 | 20,6 | 20,2 | 0,1 | 0,4 | 4,00 | 20,3 | 2,95 | 0,345 | -0,054 | -0,024 | 0,092 | -0,266 |
| 16:00 | 24,4 | 24,1 | 19,7 | 19,5 | 0,3 | 0,2 | 0,67 | 19,6 | 2,88 | 0,149 | -0,007 | -0,074 | 1,086 | -0,068 |
| 17:00 | 23,8 | 23,6 | 19,2 | 18,8 | 0,2 | 0,4 | 2,00 | 19,0 | 2,81 | 0,072 | +0,008 | -0,014 | 0,216 | -0,065 |

TABELA 5 - Gradiente psicrométrico observado ($^{\circ}\text{C}$) e componentes do balanço de energia ($\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$), em cultura de feijão, do dia 11/06/77

| HORA | T_2 | T_1 | T_{2W} | T_{1W} | ΔT | ΔTW | $\frac{\Delta TW}{\Delta T}$ | MTW | $\frac{Y+\Delta Y}{Y}$ | Rn | G | S | B | LE |
|-------|-------|-------|----------|----------|------------|-------------|------------------------------|------|------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | 16,7 | 16,4 | 14,7 | 14,9 | 0,3 | -0,2 | -0,67 | 14,8 | 2,57 | 0,154 | -0,012 | 0,062 | -0,368 | -0,224 |
| 10:00 | 21,7 | 22,1 | 17,2 | 17,5 | -0,4 | -0,3 | 0,75 | 17,4 | 2,66 | 0,277 | -0,059 | -0,105 | 1,005 | -0,105 |
| 11:00 | 22,9 | 24,2 | 18,0 | 18,7 | -1,3 | -0,7 | 0,54 | 18,4 | 2,76 | 0,432 | -0,070 | -0,243 | 2,062 | -0,118 |
| 12:00 | 23,1 | 23,2 | 17,9 | 18,5 | -0,1 | -0,6 | 6,00 | 18,2 | 2,75 | 0,507 | -0,099 | -0,024 | 0,064 | -0,383 |
| 13:00 | 25,2 | 25,2 | 19,9 | 19,5 | -0,1 | 0,4 | -4,00 | 19,7 | 2,89 | 0,504 | -0,096 | 0,035 | -0,079 | -0,443 |
| 14:00 | 25,6 | 25,5 | 19,9 | 19,5 | 0,1 | 0,4 | 4,00 | 19,7 | 2,89 | 0,432 | -0,084 | -0,029 | 0,094 | -0,318 |
| 15:00 | 25,1 | 25,2 | 20,6 | 20,2 | -0,1 | 0,4 | -4,00 | 20,4 | 2,95 | 0,375 | -0,058 | 0,026 | -0,078 | -0,344 |
| 16:00 | 22,8 | 22,9 | 19,1 | 19,2 | -0,1 | -0,1 | 1,00 | 19,2 | 2,84 | 0,146 | -0,008 | -0,048 | 0,543 | -0,089 |
| 17:00 | 20,0 | 20,4 | 16,7 | 16,9 | -0,4 | -0,2 | 0,50 | 16,8 | 2,62 | 0,062 | -0,006 | -0,042 | 3,226 | -0,013 |

TABELA 6 - Gradiente psicrométrico observado ($^{\circ}\text{C}$) e componentes do balanço de energia ($\text{cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$), em cultura de feijão, do dia 13/06/77

| HORA | T_2 | T_1 | T_2 | T_1 | T_1 | ΔT | ΔT | ΔT | $\frac{\Delta T}{\Delta T}$ | MTW | $\frac{\gamma + \Delta}{\Delta}$ | Rn | G | S | B | LE |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|-----------------------------|------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|----|
| 08:00 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | 13,8 | 14,1 | 13,5 | 13,8 | 13,8 | -0,3 | -0,3 | 1,00 | 13,6 | 2,47 | 0,127 | -0,012 | -0,046 | 0,680 | -0,068 | |
| 10:00 | 18,0 | 18,2 | 16,9 | 17,1 | 17,1 | -0,2 | -0,2 | 1,00 | 17,0 | 2,62 | 0,276 | -0,037 | -0,074 | 0,617 | -0,121 | |
| 11:00 | 22,0 | 22,5 | 19,6 | 19,5 | 19,5 | -0,5 | 0,1 | -0,20 | 19,6 | 2,88 | 0,372 | -0,066 | 0,530 | -0,634 | -0,836 | |
| 12:00 | 24,1 | 24,2 | 20,6 | 20,5 | 20,5 | -0,1 | 0,1 | -1,00 | 20,6 | 2,99 | 0,519 | -0,104 | 0,138 | -0,250 | -0,553 | |
| 13:00 | 27,7 | 28,0 | 21,7 | 22,7 | 22,7 | -0,3 | -1,0 | 3,33 | 22,3 | 3,17 | 0,499 | -0,102 | -0,037 | 0,104 | -0,359 | |
| 14:00 | 27,8 | 28,0 | 22,7 | 22,8 | 22,8 | -0,2 | -0,1 | 0,50 | 22,8 | 3,22 | 0,359 | -0,076 | -0,174 | 1,639 | -0,107 | |
| 15:00 | 27,8 | 28,1 | 23,1 | 22,8 | 22,8 | -0,3 | 0,3 | -1,00 | 23,0 | 3,26 | 0,299 | -0,068 | 0,070 | -0,234 | -0,301 | |
| 16:00 | 27,1 | 27,0 | 23,0 | 22,3 | 22,3 | 0,1 | 0,7 | 7,00 | 22,7 | 3,22 | 0,137 | -0,026 | -0,001 | 0,046 | -0,021 | |
| 17:00 | 25,2 | 24,9 | 20,6 | 20,1 | 20,1 | 0,3 | 0,5 | 1,67 | 20,4 | 2,95 | 0,065 | -0,018 | -0,009 | 0,255 | -0,037 | |

TABELA 7 - Gradientes de pressão atual de vapor e de velocidade horizontal de vento e evapotranspiração calculada pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOZMAN, em cultura de feijão, no dia 08/06/77

| HORA | T ₂ (°C) | T ₁ (°C) | T ₂ ^W (°C) | T ₁ ^W (°C) | e ₁ (mm.Hg) | e ₂ (mm.Hg) | Δe (mm.Hg) | U ₂ (cm.-1) seg ⁻¹ | U ₁ (cm.-1) seg ⁻¹ | ΔU (cm.-1) seg ⁻¹ | E (mm/h.) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|--|--|------------------------------------|--------------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | | | | | | | | | | | |
| 10:00 | 18,2 | 18,5 | 16,7 | 17,0 | 13,67 | 13,41 | 0,26 | 112 | 95 | 17 | 0,063 |
| 11:00 | 22,4 | 22,9 | 18,6 | 19,2 | 14,58 | 13,90 | 0,68 | 122 | 92 | 30 | 0,290 |
| 12:00 | 23,5 | 25,1 | 19,2 | 19,8 | 14,30 | 14,24 | 0,06 | 128 | 98 | 30 | 0,026 |
| 13:00 | 24,0 | 24,1 | 19,1 | 18,9 | 13,41 | 13,79 | -0,38 | 123 | 97 | 26 | 0,140 |
| 14:00 | 24,9 | 24,8 | 20,2 | 20,1 | 14,96 | 15,07 | -0,11 | 158 | 117 | 41 | 0,064 |
| 15:00 | 23,8 | 23,7 | 20,1 | 19,6 | 14,77 | 15,53 | -0,76 | 152 | 116 | 36 | 0,388 |
| 16:00 | 24,1 | 24,3 | 19,1 | 19,2 | 13,78 | 13,73 | 0,05 | 133 | 103 | 30 | 0,021 |

TABELA 8 - Gradientes de pressão atual de vapor e de velocidade horizontal de vento e evapotranspiração calculada pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN, em cultura de feijão, no dia 09/06/77

| HORA | T ₂ (°C) | T ₁ (°C) | T _{2W} (°C) | T _{1W} (°C) | e ₁ (mm.Hg) | e ₂ (mm.Hg) | Δe (mm.Hg) | U ₂ (cm.-1) seg | U ₁ (cm.-1) seg | ΔU (cm.-1) seg | E (mm/h.) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | | | | | | | | | | | |
| 10:00 | 14,6 | 14,9 | 13,4 | 13,6 | 10,94 | 10,65 | 0,09 | 76 | 65 | 11 | 0,014 |
| 11:00 | 17,9 | 18,7 | 15,7 | 16,1 | 12,84 | 12,13 | 0,11 | 79 | 66 | 13 | 0,020 |
| 12:00 | 21,7 | 21,8 | 18,7 | 18,3 | 13,78 | 14,46 | -0,68 | 88 | 74 | 14 | 0,135 |
| 13:00 | 21,6 | 22,0 | 18,9 | 19,1 | 14,93 | 14,83 | 0,10 | 86 | 71 | 15 | 0,021 |
| 14:00 | 24,9 | 25,0 | 20,2 | 20,1 | 14,65 | 15,07 | -0,22 | 88 | 70 | 18 | 0,056 |
| 15:00 | 26,0 | 26,1 | 20,0 | 19,7 | 13,56 | 14,12 | -0,56 | 150 | 116 | 34 | 0,271 |
| 16:00 | 25,7 | 25,8 | 19,9 | 18,8 | 12,28 | 14,12 | 1,84 | 128 | 94 | 32 | 0,837 |
| 17:00 | 24,6 | 24,5 | 19,5 | 18,6 | 12,71 | 14,09 | -1,38 | 54 | 40 | 14 | 0,275 |

TABELA 9 - Gradientes de pressão atual de vapor e da velocidade horizontal de vento e evapotranspiração calculada pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN, em cultura de feijão, no dia 10/06/77

| HORA | T ₂ (°C) | T ₁ (°C) | T ₂ ^W (°C) | T ₁ ^W (°C) | e ₁ (mm.Hg) | e ₂ (mm.Hg) | Δe (mm.Hg) | U ₂ (cm. ⁻¹) seg ⁻¹ | U ₁ (cm. ⁻¹) seg ⁻¹ | ΔU (cm. ⁻¹) seg ⁻¹ | E (mm/h.) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---|---|---|--------------|
| 08:00 | 12,2 | 12,8 | 11,7 | 12,0 | 10,06 | 10,02 | 0,04 | 66 | 53 | 13 | 0,018 |
| 09:00 | 14,5 | 14,8 | 13,3 | 13,5 | 10,86 | 10,76 | 0,10 | 65 | 52 | 13 | 0,018 |
| 10:00 | 19,4 | 19,9 | 16,1 | 16,2 | 11,70 | 11,84 | -0,14 | 67 | 53 | 14 | 0,028 |
| 11:00 | 22,4 | 22,7 | 19,0 | 18,5 | 13,57 | 14,54 | -0,97 | 105 | 84 | 21 | 0,289 |
| 12:00 | 24,2 | 25,0 | 20,1 | 19,6 | 14,03 | 15,30 | -1,27 | 96 | 82 | 14 | 0,258 |
| 13:00 | 25,4 | 25,1 | 20,1 | 19,6 | 13,96 | 14,62 | -0,66 | 107 | 85 | 22 | 0,206 |
| 14:00 | 25,5 | 25,7 | 20,5 | 20,1 | 14,45 | 15,24 | -0,79 | 116 | 95 | 21 | 0,236 |
| 15:00 | 26,1 | 26,0 | 20,6 | 20,2 | 14,44 | 15,06 | -0,62 | 140 | 109 | 31 | 0,273 |
| 16:00 | 24,0 | 24,1 | 19,7 | 19,5 | 14,38 | 14,53 | -0,15 | 183 | 142 | 41 | 0,087 |
| 17:00 | 23,8 | 23,6 | 19,2 | 18,8 | 13,53 | 14,07 | -0,54 | 176 | 136 | 40 | 0,307 |

TABELA 10 - Gradientes de pressão atual de vapor e de velocidade horizontal de vento e evapotranspiração calculada pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN, em cultura de feijão, no dia 11/06/77

| HORA | T ₂ (°C) | T ₁ (°C) | T _{2W} (°C) | T _{1W} (°C) | e ₁ (mm.Hg) | e ₂ (mm.Hg) | Δe (mm.Hg) | U ₂ (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | U ₁ (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | ΔU (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | E (mm/h.) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---|---|---|--------------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | 16,7 | 16,4 | 14,7 | 14,9 | 11,86 | 11,40 | 0,46 | 48 | 41 | 07 | 0,046 |
| 10:00 | 21,7 | 22,1 | 17,2 | 17,5 | 12,38 | 12,16 | 0,22 | 83 | 69 | 14 | 0,044 |
| 11:00 | 22,9 | 24,2 | 18,0 | 18,7 | 13,04 | 12,68 | 0,36 | 231 | 187 | 44 | 0,225 |
| 12:00 | 23,1 | 23,2 | 17,9 | 18,5 | 13,29 | 12,42 | 0,87 | 251 | 209 | 42 | 0,519 |
| 13:00 | 25,2 | 25,2 | 19,9 | 19,5 | 13,74 | 14,41 | -0,67 | 263 | 202 | 61 | 0,581 |
| 14:00 | 25,6 | 25,5 | 19,9 | 19,5 | 13,58 | 14,18 | -0,60 | 250 | 193 | 57 | 0,486 |
| 15:00 | 25,1 | 25,2 | 20,6 | 20,2 | 14,90 | 15,64 | -0,74 | 255 | 197 | 58 | 0,610 |
| 16:00 | 22,8 | 22,9 | 19,1 | 19,2 | 14,58 | 14,47 | 0,11 | 350 | 264 | 86 | 0,134 |
| 17:00 | 20,0 | 20,4 | 16,7 | 16,9 | 12,44 | 12,38 | 0,06 | 345 | 246 | 99 | 0,084 |

TABELA 11 - Gradientes de pressão atual de vapor e de velocidade horizontal de vento e evapotranspiração calculada pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN, em cultura de feijão, no dia 13/06/77

| HORA | T ₂ (°C) | T ₁ (°C) | T _{2W} (°C) | T _{1W} (°C) | e ₁ (mm.Hg) | e ₂ (mm.Hg) | Δe (mm.Hg) | U ₂ (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | U ₁ (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | ΔU (cm. ⁻¹ seg ⁻¹) | E (mm/h.) |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|---|---|---|--------------|
| 08:00 | | | | | | | | | | | |
| 09:00 | 13,8 | 14,1 | 13,5 | 13,8 | 11,66 | 11,43 | 0,23 | 134 | 108 | 26 | 0,085 |
| 10:00 | 18,0 | 18,2 | 16,9 | 17,1 | 13,99 | 13,81 | 0,18 | 137 | 111 | 26 | 0,066 |
| 11:00 | 22,0 | 22,5 | 19,6 | 19,5 | 15,29 | 15,74 | -0,45 | 146 | 117 | 29 | 0,185 |
| 12:00 | 24,1 | 24,2 | 20,6 | 20,5 | 15,98 | 16,20 | -0,22 | 158 | 126 | 32 | 0,100 |
| 13:00 | 27,7 | 28,0 | 21,7 | 22,7 | 17,67 | 16,05 | 1,62 | 149 | 118 | 31 | 0,714 |
| 14:00 | 27,8 | 28,0 | 22,7 | 22,8 | 17,87 | 17,78 | 0,09 | 130 | 103 | 27 | 0,034 |
| 15:00 | 27,8 | 28,1 | 23,1 | 22,8 | 17,80 | 18,52 | -0,72 | 105 | 88 | 17 | 0,174 |
| 16:00 | 27,1 | 27,0 | 23,0 | 22,3 | 17,51 | 18,73 | -1,22 | 61 | 50 | 11 | 0,191 |
| 17:00 | 25,2 | 24,9 | 20,6 | 20,1 | 14,90 | 15,59 | -0,69 | 58 | 45 | 13 | 0,127 |

TABELA 12 - Valores diários de evapotranspiração potencial medida (E.T.P.), evapotranspiração calculada segundo o método do balanço de energia (LE) e equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN (E).

| Dias | E.T.P. medida (mm/dia) | LE (mm/dia) | E (mm/dia) |
|----------|------------------------------|----------------|---------------|
| 08/06/77 | 0,861 | 1,235 | 1,028 |
| 09/06/77 | 1,191 | 1,883 | 1,629 |
| 10/06/77 | 1,231 | 2,871 | 1,704 |
| 11/06/77 | 1,526 | 2,037 | 2,729 |
| 13/06/77 | 1,611 | 2,403 | 1,676 |

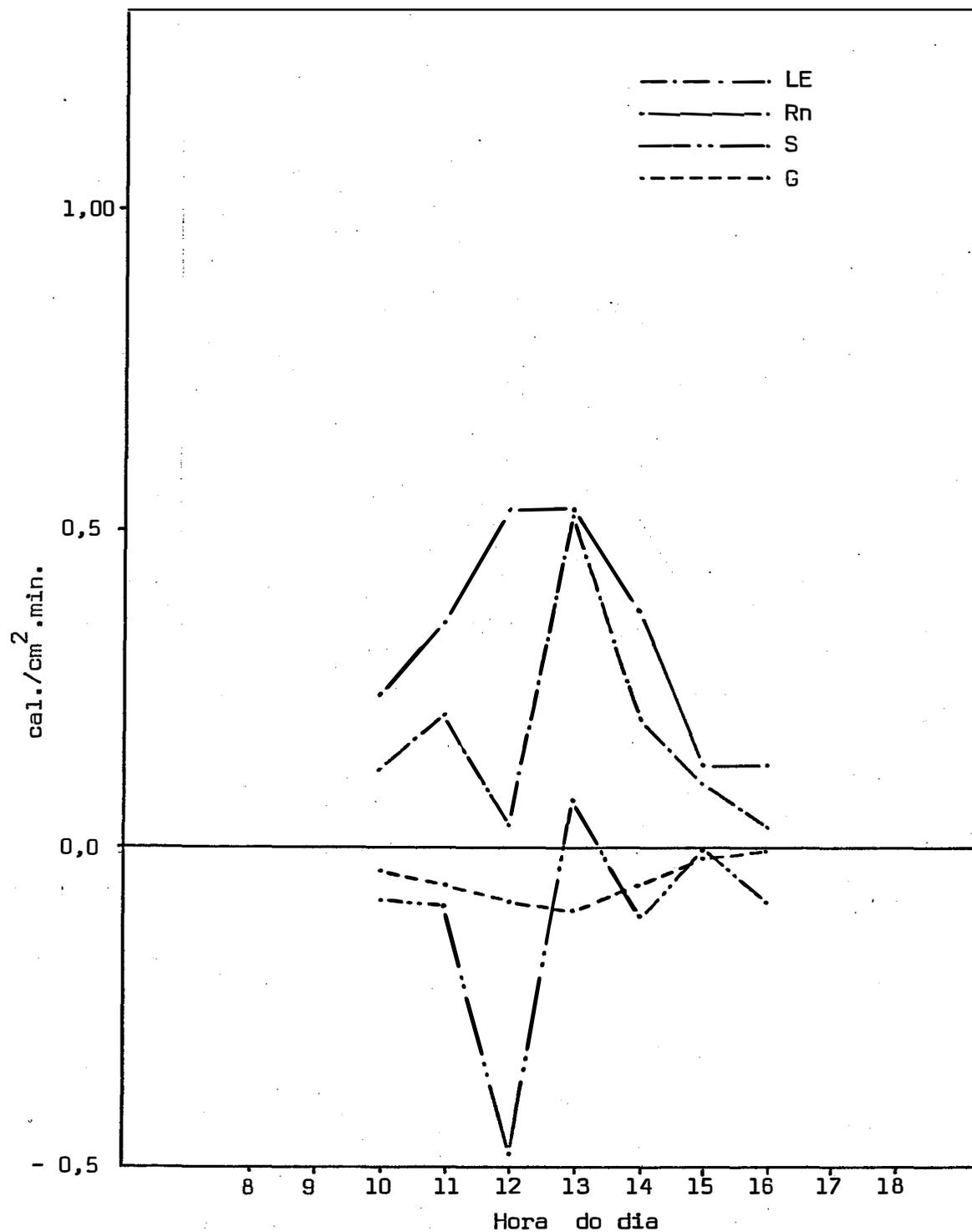


Fig. 2.- Distribuição horária da radiação líquida (Rn) e dos fluxos de calor sensível (S) , de calor no solo (G) e calor latente (LE) no dia 08/06/77 em cultura de feijão

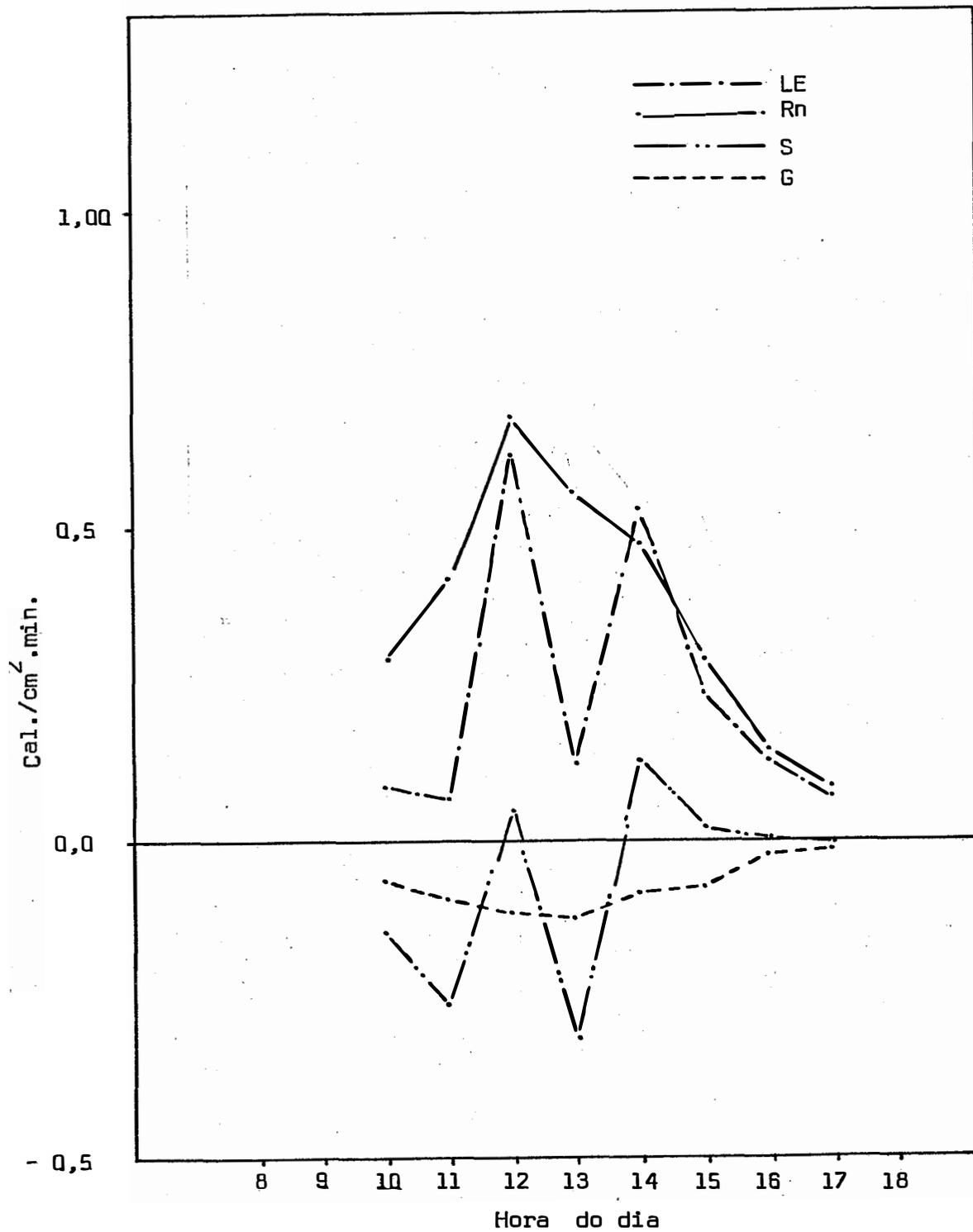


Fig. 3 - Distribuição horária da radiação líquida (Rn) e dos fluxos de calor sensível (S) , de calor no solo (G) e calor latente (LE) no dia 09/06/77 em cultura de feijão

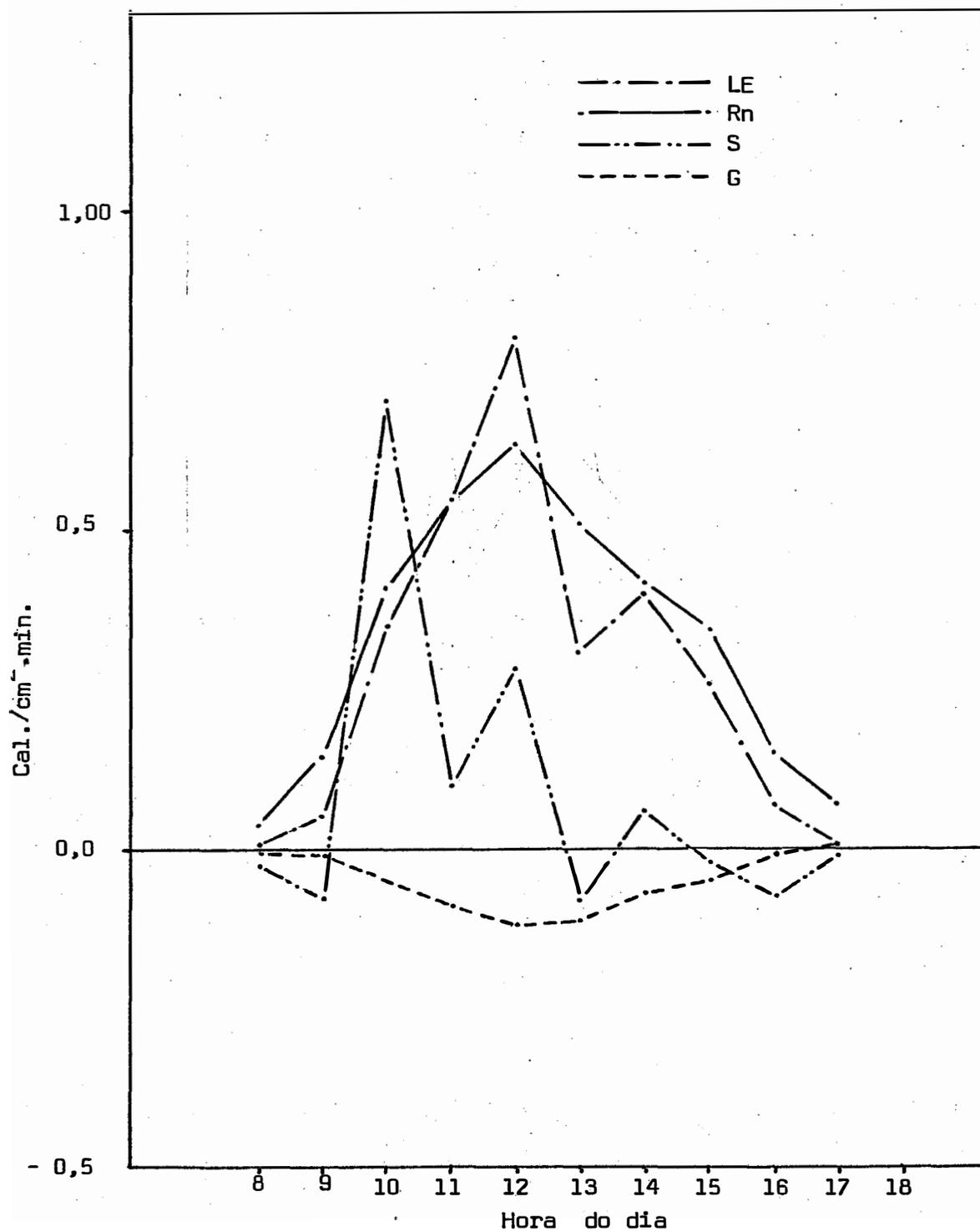


Fig. 4 - Distribuição horária da radiação líquida (Rn) e dos fluxos de calor sensível (S), de calor no solo (G) e calor latente (LE) no dia 10/06/77 em cultura de feijão

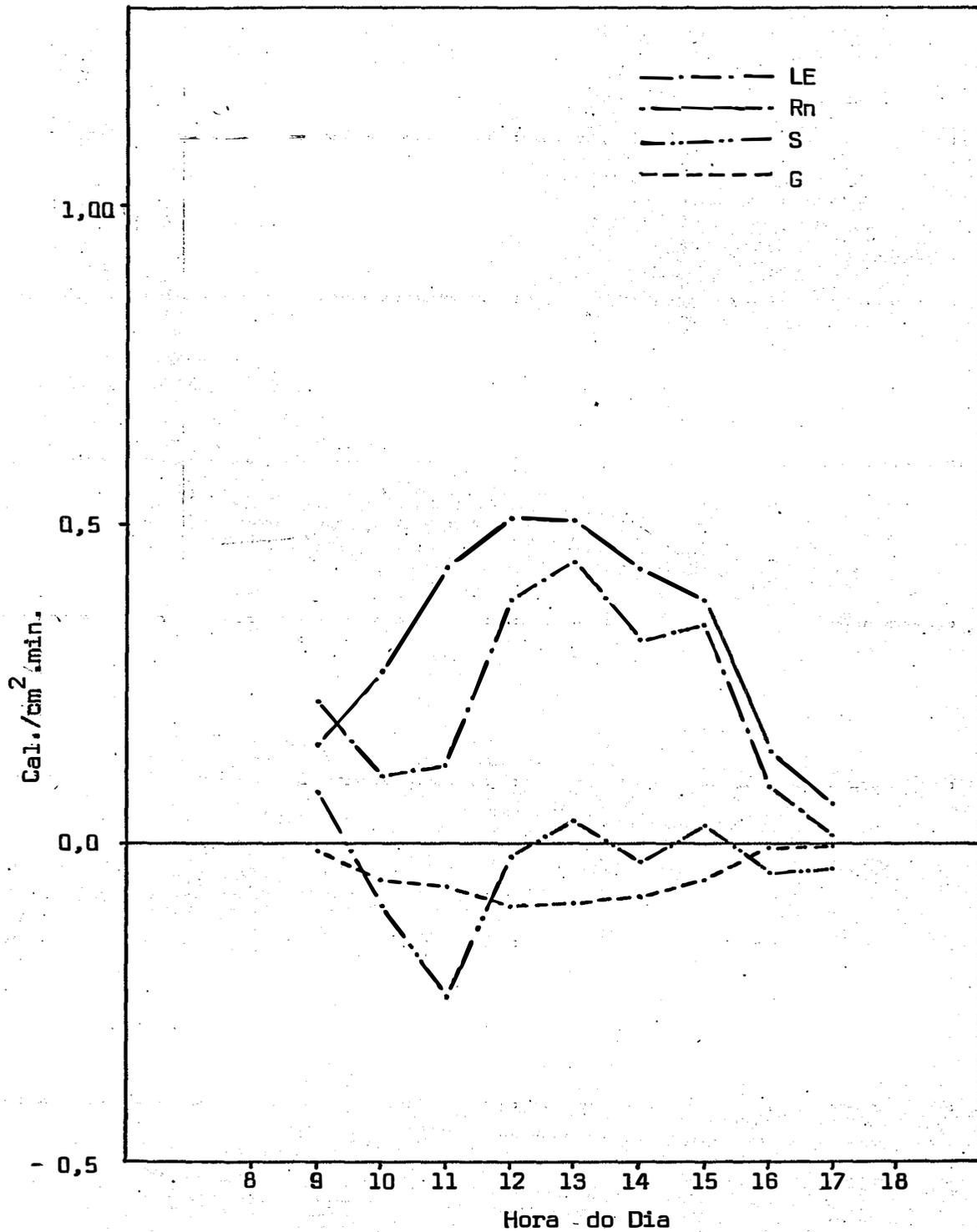


Fig. 5 - Distribuição horária da radiação líquida (Rn) e dos fluxos de calor sensível (S), de calor no solo (G) e calor latente (LE) no dia 11/06/77 em cultura de feijão

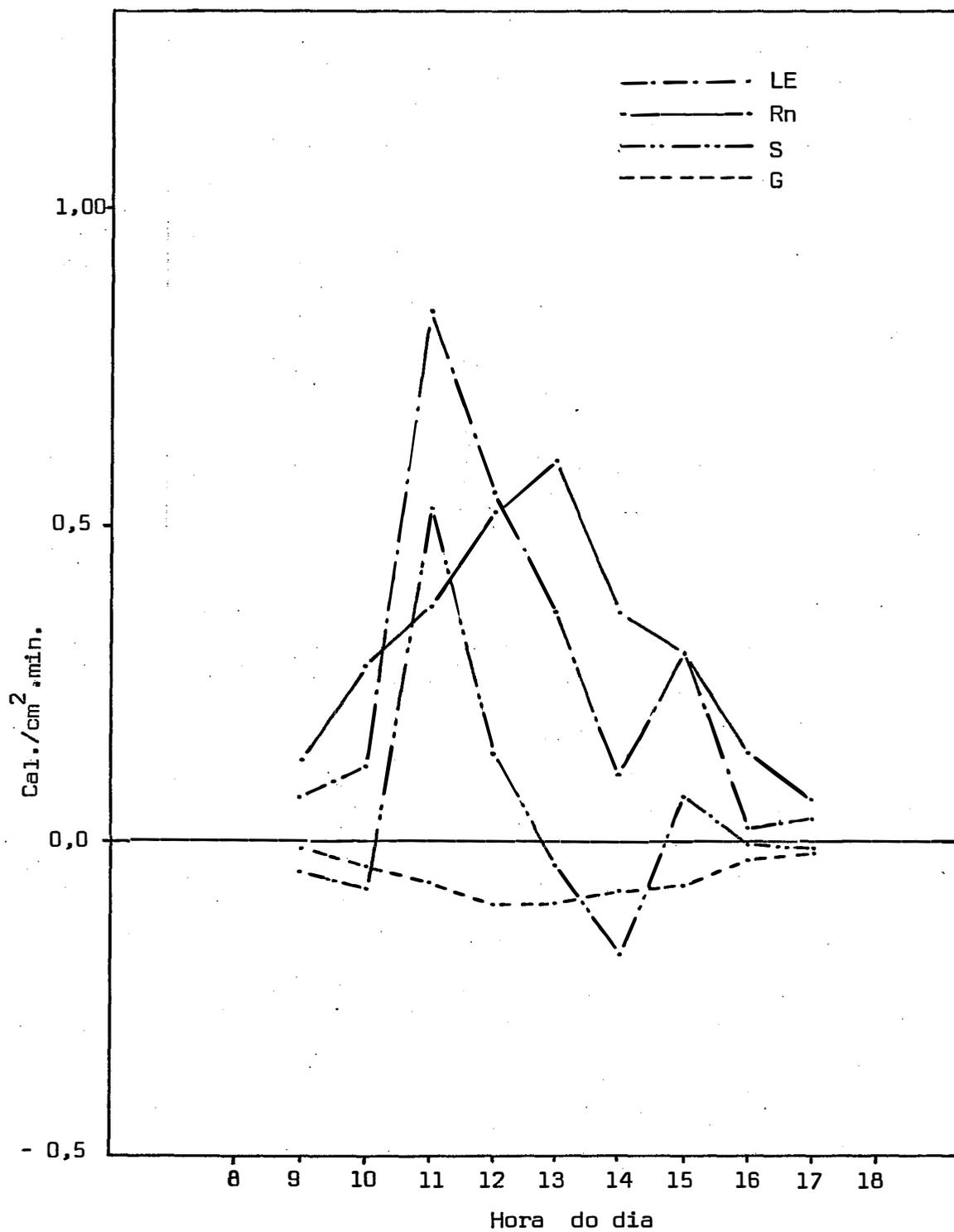


Fig. 6 - Distribuição horária da radiação líquida (Rn) e dos fluxos de calor sensível (S), de calor no solo (G) e calor latente (LE) no dia 13/06/77 em cultura de feijão

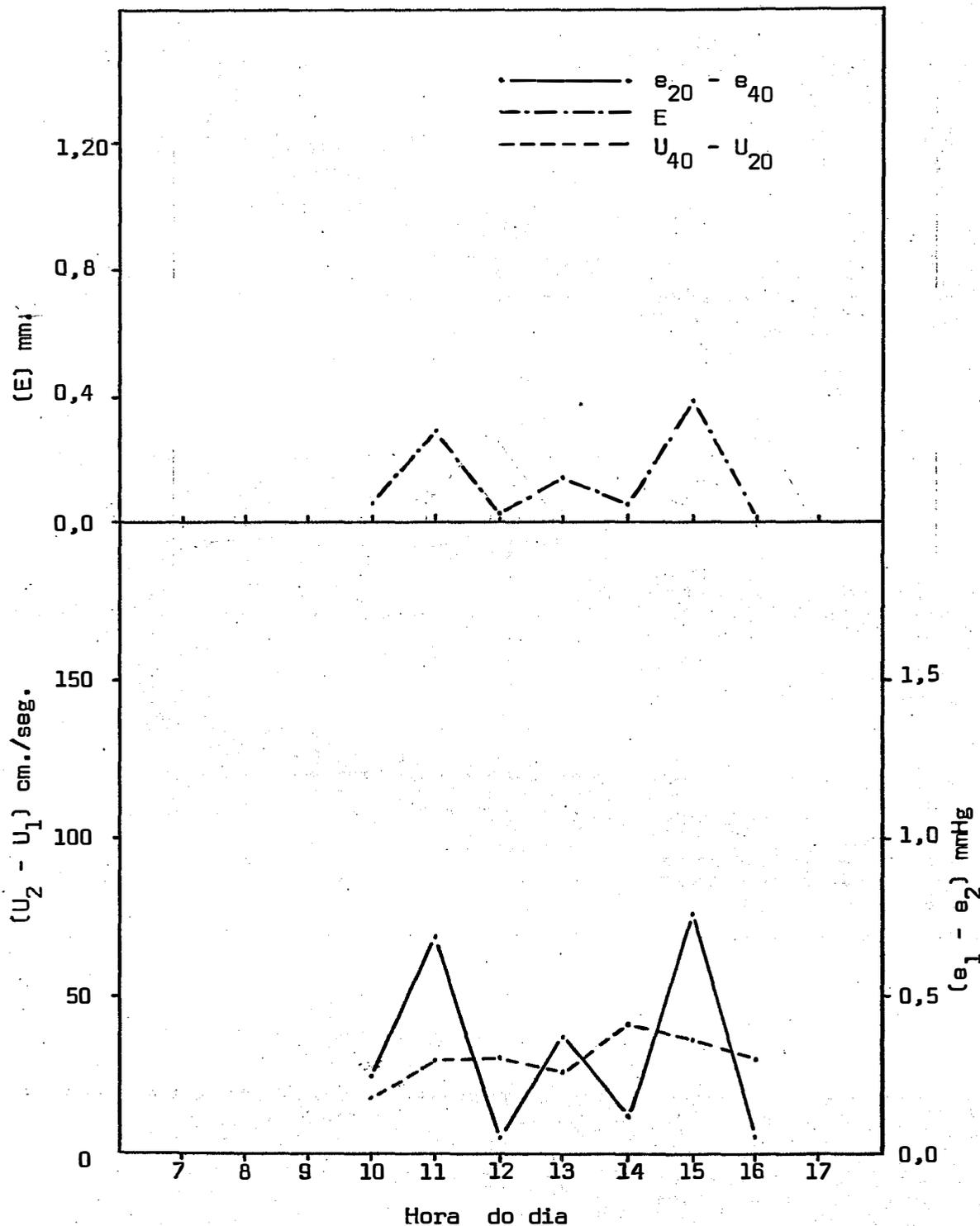


Fig. 7 - Valores horários de evapotranspiração (E), diferenças de pressão de vapor ($e_1 - e_2$) e de velocidade de vento ($U_2 - U_1$) no dia 08/06/1977 em cultura de feijão

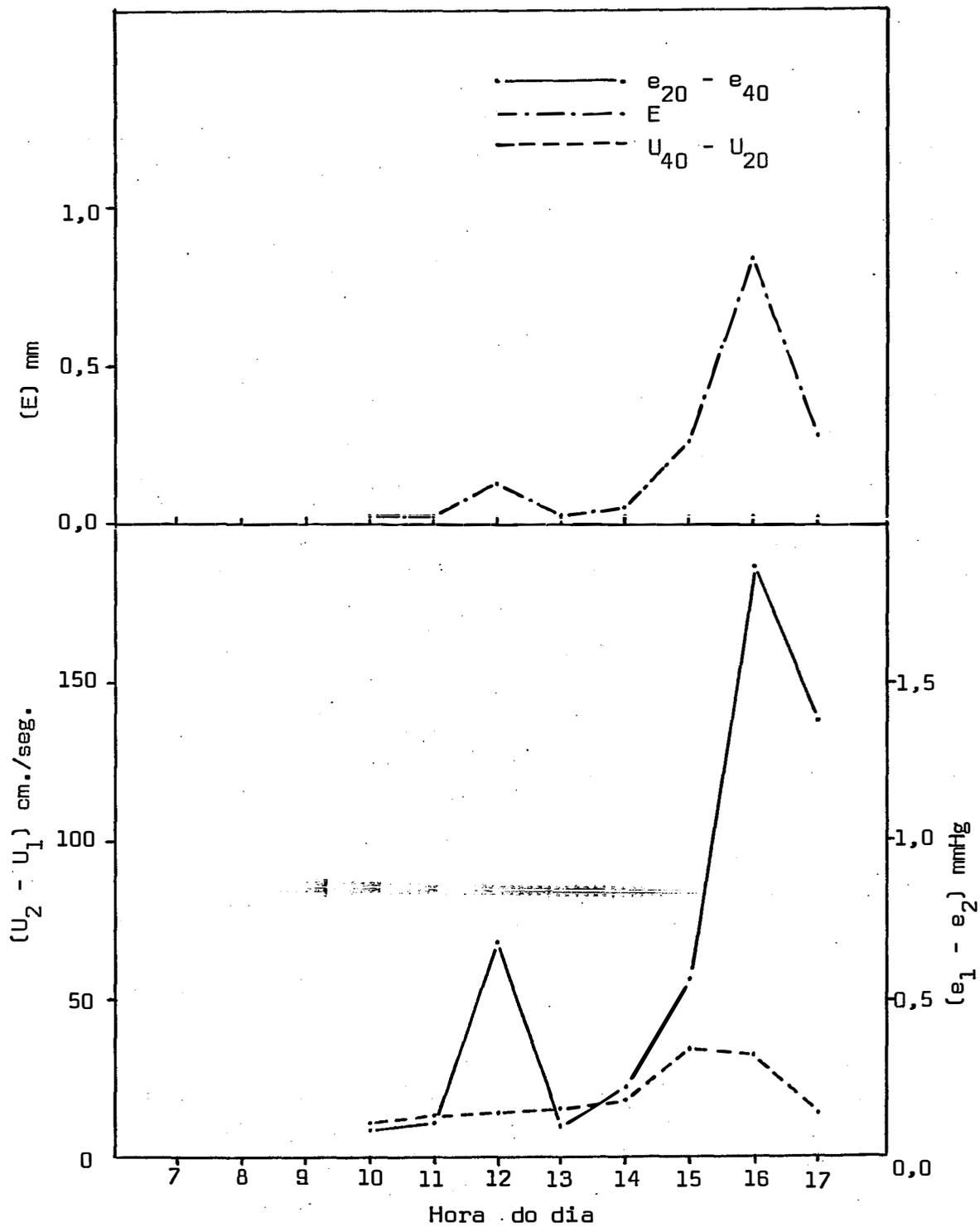


Fig. 8 - Valores horários de evapotranspiração (E) , diferenças de pressão de vapor ($e_1 - e_2$) e de velocidade do vento ($U_2 - U_1$) no dia 09/06/1977 em cultura de feijão

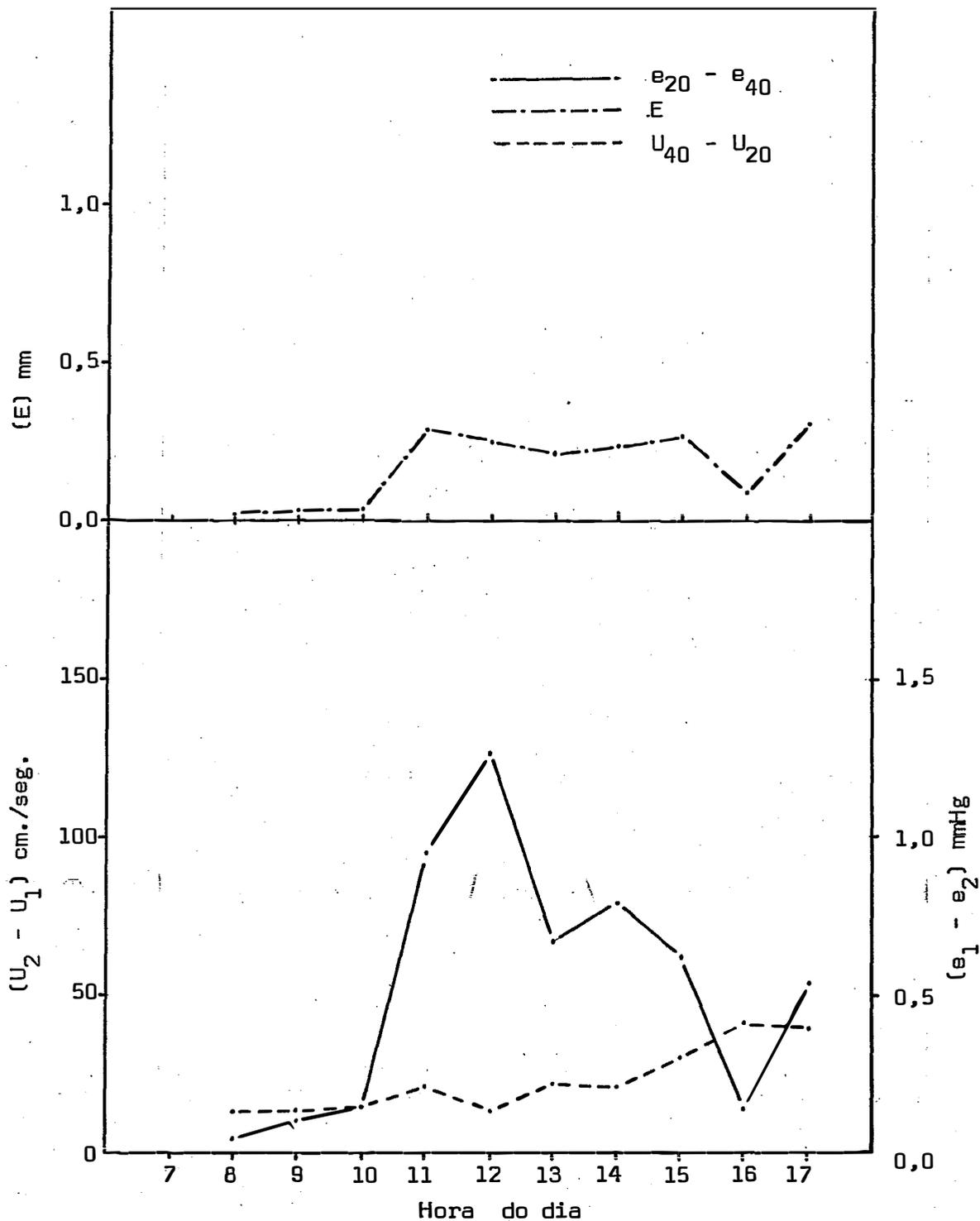


Fig. 9 - Valores horários de evapotranspiração (E), diferenças de pressão de vapor ($e_1 - e_2$) e de velocidade de vento ($U_2 - U_1$) no dia 10/06/1977 em cultura de feijão

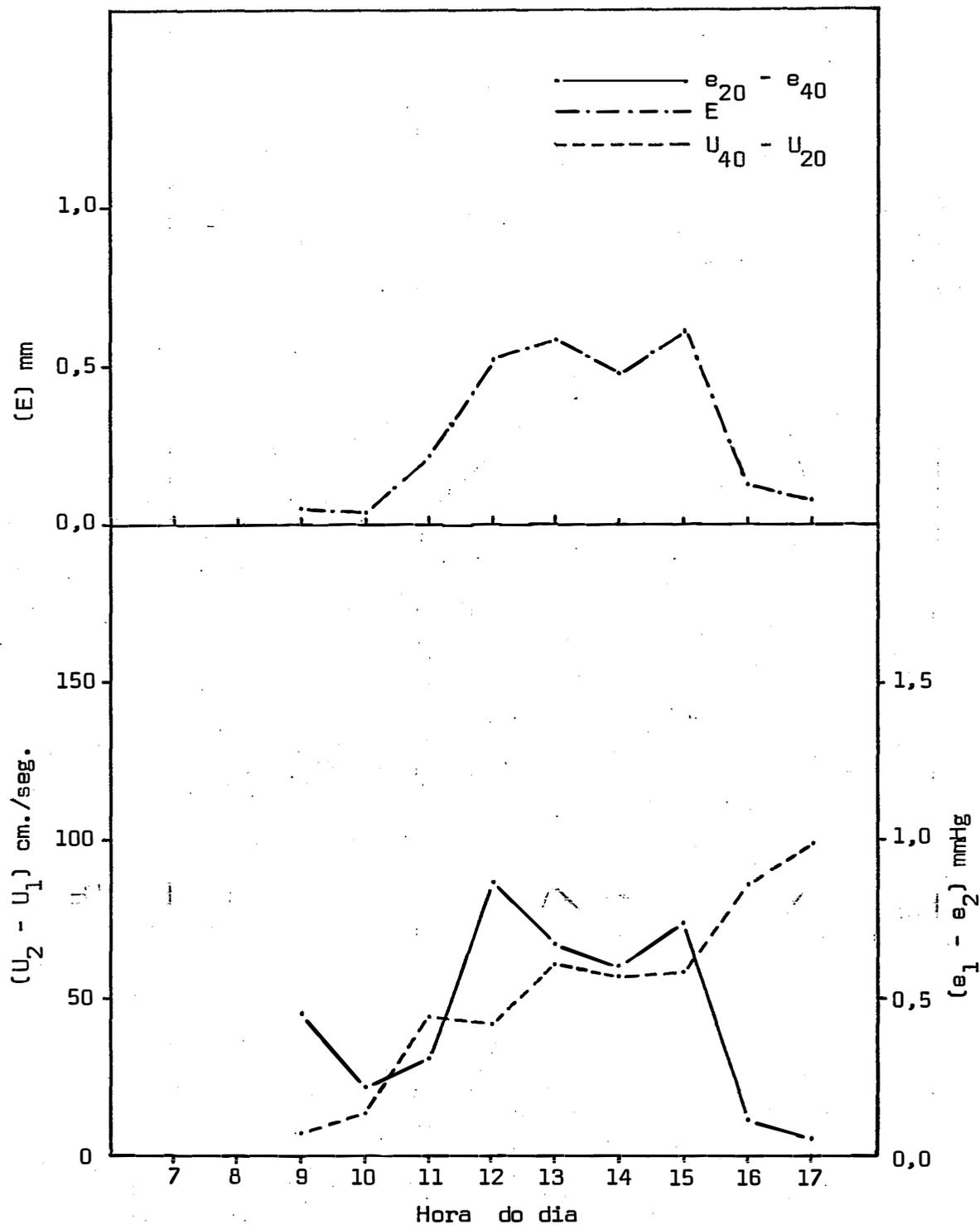


Fig. 10 - Valores horários de evapotranspiração (E), diferenças de pressão de vapor ($e_1 - e_2$) e de velocidade de vento ($U_2 - U_1$) no dia 11/06/1977 em cultura de feijão

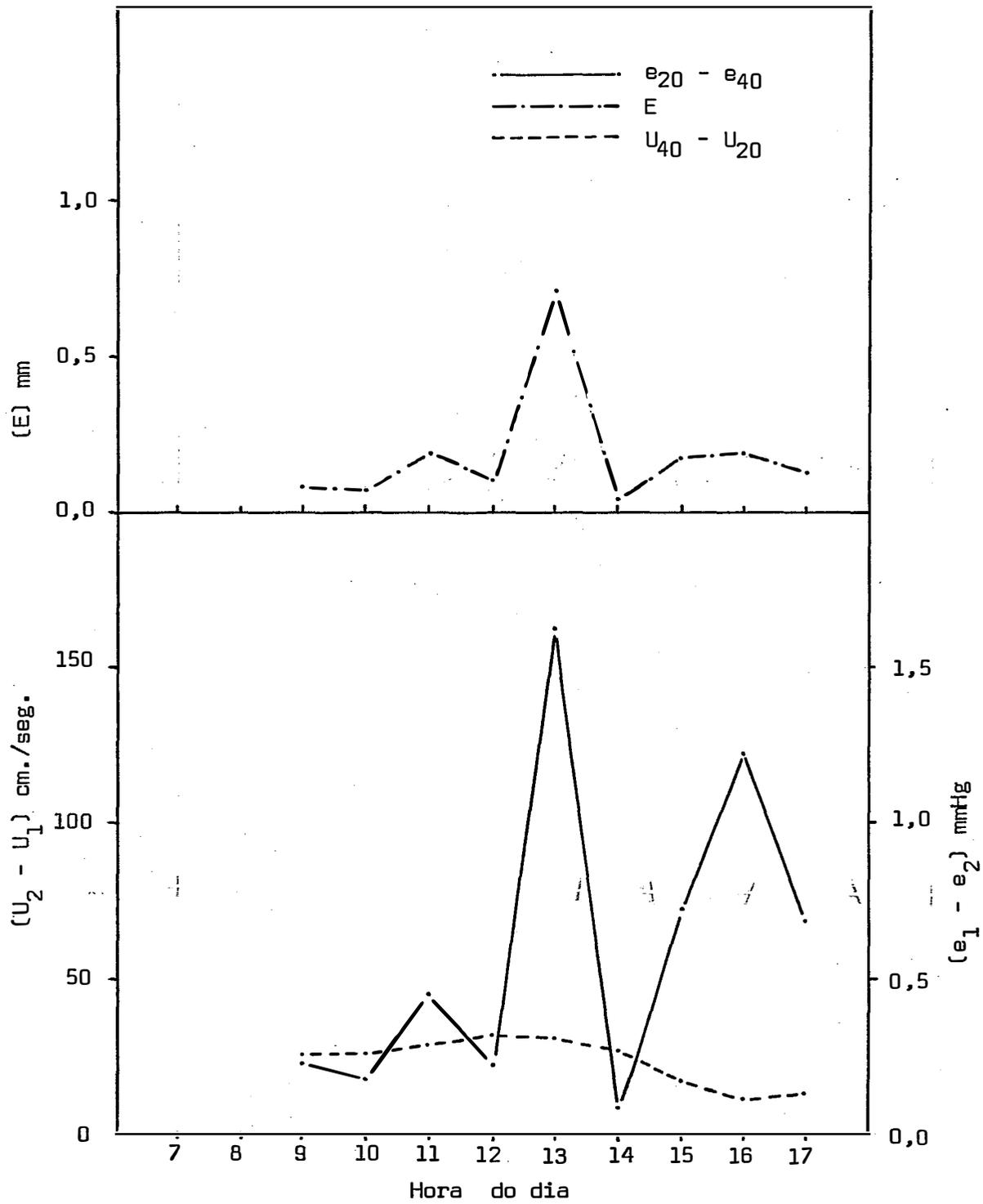


Fig. 11 - Valores horários de evapotranspiração (E), diferenças de pressão de vapor ($e_1 - e_2$) e de velocidade de vento ($U_2 - U_1$) no dia 13/06/1977 em cultura de feijão

6 - DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1 - Relativos ao Método do Balanço de Energia

6.1.1 - Interpretação dos sinais

Considerando a cultura de feijão como sistema em estudo, foi convencionado como positivos todos os fluxos que entram e negativos os que deixam o sistema. Assim:

S (-) = fluxo de calor sensível que deixa o sistema para o ar ;

S (+) = fluxo de calor sensível entrando no sistema, contribuindo para um incremento em LE ;

LE (-) = fluxo de vapor d'água ;

LE (+) = condensação ;

G (-) = fluxo de calor deixando a superfície do solo ;

G (+) = fluxo de calor no solo dirigindo-se à superfície.

6.1.2 - Valor da razão de Bowen (B)

O valor de B será negativo quando, no processo evaporativo, o fluxo S for positivo. Isso acontece quando uma certa quantidade de energia é transferida do ar para o sistema, o que pode se manifestar de duas maneiras:

- a - Em condições de inversão térmica, o que acontece quando a energia é transferida do ar para o sistema, havendo uma evaporação levemente superior à energia líquida disponível. Tal condição foi observada no dia 11/06/77 às nove horas da manhã e quinze horas da tarde.
- b - Em condições de advecção, o que ocorre quando há movimentos laterais de energia, estimulando o fluxo evaporativo. Tais condições, embora em pequena escala, foram observadas nos dias 05/06 , 10/06 e 13/06/77.

6.1.3 - Relação entre LE , S e Rn

Os valores de evapotranspiração encontrados nas Tabelas 1 a 5 são dados em mm/hora , uma vez que 59 cal. cm^{-2} corres

pondem, aproximadamente, a 1 mm de água evaporada.

Em condições de inversão de gradiente, o que ocorre nas primeiras horas da manhã e, às vezes, à tarde, o calor sensível S pode contribuir para um incremento em LE. Foi o que pôde ser observado nos dias 10/06 e 13/06/77 representados, respectivamente, nas Figuras 5 e 7. Nos referidos dias, pôde-se verificar que, durante o período da manhã, houve uma considerável transferência de calor sensível do ar para o sistema ocasionando um incremento em LE.

Segundo PEDRO JUNIOR (1977), a relação LE/Rn pode representar uma boa estimativa da evapotranspiração para dias sem advecção.

Para as condições e período em que foi conduzido o experimento, os valores desta relação foram: 0,54 , 0,64 , 0,88, 0,71 e 0,90 , dando um valor médio de 0,73 , o que corresponde ao valor observado para a maioria das culturas que se encontra em torno de 0,75. Isso significa que, de toda a energia líquida disponível ao sistema, 73% foi usada no processo de evapotranspiração.

6.1.4 - Fluxo de calor no solo

Os valores extremos de fluxo de calor no solo, encontrados por vários autores, para diversas culturas foram: TANNER (1960) : $0,15 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{min.}^{-1}$; VAN BAVEL e EHRLER (1968) :

0,20 cal.cm⁻².min⁻¹ ambos para alfafa ; VILLA NOVA *et alii* (1975) : 0,19 cal.cm⁻².min⁻¹ para arroz de sequeiro ; LOURENCE *et alii* (1970) : 0,40 cal.cm⁻².min⁻¹ para arroz.

Para as condições e o período em que foi conduzido o experimento, pôde-se verificar, através dos dados constantes das Tabelas 2 a 6 , que esse valor extremo foi de 0,119 cal.cm⁻².min⁻¹ e está coerente com os valores encontrados na literatura.

6.1.5 - Fluxo de calor latente (LE)

Pelos resultados constantes das Tabelas 2 a 6 , verifica-se que os valores de LE (evapotranspiração estimada da cultura), variaram de 0,003 para 0,836 mm/hora.

Valores de evapotranspiração potencial registrados em evapotranspirômetros com cobertura de *Paspalum notatum*, instalados a aproximadamente 150 metros do local do experimento, são dados na Tabela 12. Pelos dados, verifica-se que os valores de evapotranspiração da cultura de feijão, estimados pelo método do balanço de energia, estiveram acima daqueles de evapotranspiração potencial ocorrido em grama batatais.

Segundo trabalhos desenvolvidos por FRITSCHEN (1966), e BLAD e ROSENBERG (1974), diferenças na taxa de consumo de água para a maioria das plantas, podem ser explicadas, pelo menos em parte, por suas propriedades físicas. Folhas largas como

as do feijão, sendo aerodinamicamente diferentes das folhas estreitas (grama) ocasiom condições de turbulência forçada, possibilitando um incremento na taxa de transpiração, aumentando assim a evapotranspiração.

6.2 - Relativos à Equação Aerodinâmica

6.2.1 - Relação entre E , Δe e ΔU

A taxa de evapotranspiração, estimada por meio da equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN , é função direta dos gradientes de pressão de vapor, o qual depende do gradiente de temperatura e do gradiente de velocidade horizontal do vento. Valores altos desses gradientes conduzem a estimativas bastante elevadas da taxa de evapotranspiração horária, o inverso acontecendo para os valores baixos dos referidos gradientes. É o que pode ser observado pelas Tabelas 7 a 11 e, graficamente , nas Figuras de 7 a 11.

Pelos resultados constantes das Tabelas de 7 a 11, pôde-se verificar que os valores estimados de evapotranspiração da cultura (E), variaram de 0,007 a 0,837 mm/hora.

As considerações tecidas em 6.1.5 são válidas também para os valores de evapotranspiração estimados pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN.

7 - CONCLUSÕES

De acordo com as condições e período em que foi conduzido o experimento, tem-se as seguintes conclusões:

- 1 - Os valores horários de evapotranspiração, estimados pelo método do balanço de energia, estiveram entre 0,003 e 0,836 mm , e os estimados pela equação aerodinâmica de THORNTHWAITE e HOLZMAN entre 0,11 e 0,837 mm.
- 2 - O valor médio da evapotranspiração, estimado pelo método do balanço de energia, foi 19% maior do que aquele estimado pela equação aerodinâmica.
- 3 - O valor médio da razão LE/R_n , para a cultura do feijão , foi de 0,73 e a taxa máxima de fluxo de calor para o solo foi de 0,119 cal./cm².min.

- 4 - Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se a realização de outros experimentos, no caso em condições de otimização e os resultados correlacionados com medidas de evapotranspiração, a fim de que ~~se~~ possa obter o grau de eficiência dos referidos métodos.

8 - SUMMARY

Water is one of the factors of agricultural production, and the knowledge of plants hydric needs is basic for irrigation projects.

The present research aimed the following goals: the utilization of the energy balance method and of the aerodynamic method in the determination of the evapotranspiration time rate and also, the determination of the relation LE/R_n and of the daily maximum rate of heat transfer from soil.

The experiment results, according to the energy balance method, showed that the culture evapotranspiration medium was 19% higher the one reached by the aerodynamic method.

The relation LE/R_n medium was 0.73 and the daily maximum rate of heat transfer was $0.119 \text{ cal./cm}^2 \cdot \text{min.}$

9 - LITERATURA CITADA

- ANDRÉ, R. G. B., 1973. Obtenção da razão de Bowen para estimativa da evaporação potencial em condições micrometeorológicas. São Carlos, EESC/USP, p. 66 (Tese de Doutorado).
- BERNARD, E. A., 1965. Theorie et mesure de l'evapotranspiration. UNESCO, Paris (Arizona Research, 25:).
- BLACKWELL, M. J., 1965. Measurement of natural evaporation comparizon of gravimetric and aerodynamic methods. UNESCO, Paris (Arizona Research, 25:).
- BLAD, B. L. e N. J. ROSENBERG, 1974. Lysimetric calibration of the Bowen ratio-energy balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great plains. Journal of Applied Meteorology, Boston, 13(2): 227-236.

- BLAO, B. L. e N. J. ROSENBERG, 1974. Evapotranspiration by su
birrigated alfafa and pasture in the east Central Great
Plains. Agronomy Journal, Madison, 66: 248-252.
- BENCI, J. F. ; J. K. AASE e A. H. FERGUSON, 1972. Aerodynamic
and energy balance comparison between and nonawned barley.
Agronomy Journal, Madison, 65(3): 373-377.
- CHIN CHOI, E. W. e E. T. KANEMASU, 1974. Energy balance compa
rison of wide and narrow row spacing in sorghum. Agronomy
Journal, Madison, 66(1): 98-100.
- D'ARTAGNAN, A. L. ; M. F. LEITÃO e S. MIYASAKA, 1971. Feijoei
ro no Estado de São Paulo. Campinas, Instituto Agronômico
de Campinas, 8 p. (Circular nº 7).
- DAVIES, J. A., 1972. Actual potential and equilibrium evapora
tion for a bean field in Southern Ontário. Agric. Meteorol-
ogy, Amsterdam, 10(4-5): 331-48.
- DEACON, E. L., 1949. Vertical difusion in the lowest layers
of the atmosphere. Quart. J. R. Met. Soc. London, 75:
89-103.
- DEACON, E. L. ; C. B. PRIESTLEY e W. C. SWINBANK, 1958. Evapo
ration and the water balance. In: Climatology, Reviews
of Research, Paris, UNESCO, p. 9-34.
- DENMEAD, O. T., 1966. The energy balance of plant communities.
In: Agricultural Meteorology. Proceedings of the WMO Semi
nar. Austrália, 1: 71-105.

- DENMEAD, O. T. e I. C. McILROY, 1970. Measurement of non potential evaporation from wheat. Agric. Meteorology, Amsterdam, 7(4): 285-302.
- FRITSCHEN, L. J., 1965. Accuracy of evapotranspiration determination by the Bowen ratio method. Bull. Intern. Assoc. Sci. Hydrology, 10(2): 38-48.
- FRITSCHEN, L. J., 1966. Evapotranspiration rates of field crops determined by the Bowen ratio method. Agronomy Journal, Madison, 58(3): 339-42.
- GERBER, J. F. e W. L. DECKER, 1960. A comparison of evapotranspiration as estimated by the heat budget and mesured by the water balance from a cornfield. Columbia, University of Missouri. (Final Report USWB Contract CWB - 1956).
- GRAHM, W. G. e K. M. KING, 1961. Fraction of net radiation utilized in evapotranspiration from a corn. Proc. Soil Sci. Soc. Am., Washington, 25: 158-60.
- GRANT, D. R., 1975. Comparisons of evapotranspiration measurement using different methods. Quart. J. R. Met. Soc., London, 161(229): 543-50.
- HANKS, R. J. ; H. R. GARDNER e R. L. FLORIAN, 1968. Evapotranspiration climate relations for several crops in the Central Great Plains. Agronomy Journal, Madison, 60(5): 538-542.
- HOUSE, G. J. ; N. E. RIDER e C. P. TUGWELL, 1960. A surface energy balance computer. Quart. J. R. Met. Soc., London, 86: 215-231.

- LEMON, E. R., 1963. Energy and water balance of plant communities. In: EVANS, L. T. (ed.). Environmental Control of Plant Growth. New York, Academic Press, 449 p.
- LOURENCE, F. J. e W. O. PRUITT, 1971. Energy balance and water use of rice grown in the Central Valley of California. Agronomy Journal, Madison, 63: 827-832.
- McIROY, I. C., 1971. An instrument for continuous recording of natural evaporation. Agric. Meteorology, Amsterdam, 9: 93-100.
- MUKAMMAL, E. I. ; K. M. KING e H. F. CORK, 1966. Comparisons of aerodynamic and energy budget techniques in estimating evapotranspiration from a cornfield. Archiv-fur Meteorologie, Viena, 14(314): 384-395.
- NKEMDIRIM, L. C. e S. YAMASHITA, 1972. Energy balance over prairie grass. Canadian J. Plant. Sci., Canadá, 52: 215-255.
- NKEMDIRIM, L. G. e P. F. HALEY, 1973. An evaluation of grassland evapotranspiration. Agric. Meteorology, Amsterdam, 11: 373-383.
- OMETTO, J. C., 1974. Uma equação para a estimativa da evapotranspiração potencial. Sua aplicação no cálculo das necessidades hídricas e do rendimento agro-industrial da cana de açúcar na região de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, p. 4 (Tese de Livre-Docente).
- PASQUILL, F., 1949. Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground. Proc. R. Soc. Ser. A., London, 198: 116-122.

- PECK, N. H. ; M. T. VITTUM e G. H. GIBBS, 1968. Evapotranspiration rates for irrigated crops at Geneva, New York. Agronomy Journal, Madison, 60(1): 23-26.
- PEDRO JUNIOR, M. J., 1977. Balanço de energia em soja (*Glycine max* (L) Merr.). Piracicaba, ESALQ/USP, 82 p. (Tese de MS).
- PERRIER, A. ; B. ITIER ; J. M. BERTOLANI e A. BLANCO DE PABLOS, 1975. Mesure automatique du bilan d'energie d'une culture. Exemples d'application. Ann. Agron., Paris, 26: 19-40.
- PRUITT, W. O. e D. E. ANGUS, 1960. Large weighing lysimeters for measuring evapotranspiration. Transactions Am. Soc. of Agric. Engineers, Michigan, 18(3): 13-15.
- PRUITT, W. O., 1963. Application of several energy balance and aerodynamic evaporation equations under a wide range of stability. In: Investigation of energy and mass transfer near the ground including influences of the soil-plant. Final Report, nº DA - 36-039- SC -80334. University of California, Davies, California, p. 107-124.
- PRUITT, W. O. e F. J. LOURENCE, 1965. Tests of aerodynamic, energy balance and other evaporation equations over a grass surface. In: Investigation of energy, momentum and mass transfers near the ground. Final Report, nº DA - AMC - 28 - 043 - 65 - G 12. University of California, Davies, California, p. 37-63.
- RANZANI, G. ; D. FREIRE e T. KINJO, 1966. Carta de solos do Município de Piracicaba, ESALQ, Piracicaba, Centro de Estudos de Solo, 85 p.

- ROSE, C. W., 1966. The physical environment of agriculture. In: Agricultura Physics. New York, Pergamon Press, p. 31.
- ROSENBERG, N. J., 1969. Seasonal patterns in evapotranspiration by irrigation alfalfa in the Central Great Plains. Agronomy Journal, Madison, 61: 879-886.
- RIDER, N. E., 1954. Evaporation from a oat field. Quart. J. R. Met. Soc., London, 344(80): 198-211.
- RIDER, N. E., 1957. Water losses from various land surfaces. Quart. J. R. Met. Soc., London, 356(83): 181-93.
- STANHILL, M. J., 1958. Evapotranspiration from different crops exposed to same weather. Nature Kosm. Phys., Hamburg, 12 (4.628): 125-181.
- STORR, D. ; J. TOMLAIN ; H. F. CORK e R. E. MUNN, 1970. An energy budget study above the forest canopy at Marmot Creek, Alberta. Water Resource Res., Virginia, 6(3): 705-716.
- SUOMI, V. E. e C. B. TANNER, 1958. Evapotranspiration estimates from heat budget measurement over a field crop. Trans. Am. Geophys. Vn., Washington, 39: 298-304.
- SWINBANK, W. C., 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapour and momentum in the lower atmosphere with some results. Journal Meteorol., 8: 135-145.
- TANNER, C. B., 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Proc. Soil Sci. Soc. Am., Washington, 24 (1): 1-9.

TANNER, C. B., 1968. Evaporation of water from plants and soil. In: KOZLOWSKI, T. T. (ed.). Water Deficits and Plant Growth. New York, Academic Press, 1: 73-106.

THORNTHWAITE, C. W. e B. HOLZMAN, 1939. The determination of evaporation from land and water surfaces. Mon. Weath. Res. U. S. Dep. Agric., Washington, 67: 4-11.

VILLA NOVA, N. A., 1973. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, ESALQ/USP, p. 1-3 (Te se de Livre-Docente).

VILLA NOVA, N. A. ; R. PEREIRA e M. J. PEDRO JUNIOR, 1975. Balanço de energia numa cultura de arroz em condições de sequeiro. Bragantia, Campinas, 34: 171-176.

WILSON, R. G. e W. R. ROUSE, 1972. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. J. Applied Met., Boston, 11(3): 436-442.

10 - A P E N D I C E

10.1 - Símbolos e Unidades Utilizados

| | | |
|----------|---|--|
| T_2 | = | Temperatura do bulbo seco no nível Z_2 ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_1 | = | Temperatura do bulbo seco no nível Z_1 ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_2^W | = | Temperatura do bulbo úmido no nível Z_2 ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_1^W | = | Temperatura do bulbo úmido no nível Z_1 ($^{\circ}\text{C}$) |
| T_{MW} | = | Temperatura média do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$) |
| G | = | Fluxo de calor no solo ($\text{cal./cm}^2 \cdot \text{min.}$) |
| R_n | = | Fluxo de radiação líquida ($\text{cal./cm}^2 \cdot \text{min.}$) |
| LE | = | Fluxo de calor latente ($\text{cal./cm}^2 \cdot \text{min.}$) |
| S | = | Fluxo de calor sensível ($\text{cal./cm}^2 \cdot \text{min.}$) |
| B | = | Razão de Bowen (adimensional) |
| Δ | = | Tangente à curva da tensão de saturação do vapor sobre a água em função da temperatura ($\text{mmHg } ^{\circ}\text{C}$) |
| e | = | Tensão de vapor d'água (mmHg) |
| P | = | Pressão atmosférica (mmHg) |
| q | = | Umidade específica (g - vapor d'água/g. ar) |
| e_1 | = | Tensão atual de vapor d'água no nível Z_1 (mm Hg) |
| e_2 | = | Tensão atual de vapor d'água no nível Z_2 (mm Hg) |
| e'_1 | = | Tensão de saturação do vapor d'água no nível Z_1 (mm Hg) |
| e'_2 | = | Tensão de saturação do vapor d'água no nível Z_2 (mm Hg) |
| ρ | = | Densidade do ar úmido (g. cm^{-3}) |
| C_p | = | Calor específico à pressão constante do ar úmido ($\text{cal./g } ^{\circ}\text{C}$) |

- L = Calor latente de vaporização d'água (cal./g.)
- U = Velocidade do vento na direção da horizontal
(cm/seg.)
- γ = Constante psicrométrica (mm Hg/°C)
- K = Constante de Von Karman (adimensional)
- E T P = Evapotranspiração potencial (mm)
- M B E = Método do balanço de energia.