

# BRAGANTIA

Revista Científica do Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo

Vol. 34

Campinas, maio de 1975

N.º 9

## BALANÇO DE ENERGIA NUMA CULTURA DE ARROZ EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO (1)

NILSON AUGUSTO VILLA NOVA, *Departamento de Física e Meteorologia, E. S. A. L. Q., U. S. P.*, ANTONIO ROBERTO PEREIRA (2) e MÁRIO JOSÉ PEDRO JÚNIOR, *Seção de Climatologia Agrícola, Instituto Agrônomo*

### SINOPSE

São apresentados resultados da determinação quantitativa, em cultura de arroz em condições de sequeiro, da distribuição da radiação líquida entre os diferentes componentes do balanço de energia, com e sem advecção.

### 1 — INTRODUÇÃO

É indiscutível a necessidade do conhecimento da perda de água por evapotranspiração de diferentes superfícies em condições naturais. São numerosos os métodos desenvolvidos para tal estimativa. Apesar da diversidade desses métodos somente os baseados em medidas lisimétricas e em determinações do balanço de energia fornecem resultados satisfatórios. Considerando que a instalação de um lisímetro de precisão é difícil e onerosa, e que seu campo de operação se restringe ao local de instalação, o método do balanço de energia pela sua versatilidade e precisão oferecida é o ideal (3).

(1) Recebido para publicação em 22 de janeiro de 1975.

(2) Com bolsa de suplementação do C.N.Pq.

(3) TEORIA — Aplicando-se o princípio de conservação de energia para uma superfície vegetada tem-se que:

$R_n + G + LE + H + P = 0$  ..... (1)  
onde,  $R_n$  = radiação líquida disponível à superfície;  $G$  = fluxo de calor para o solo;  $LE$  = fluxo convectivo de calor latente;  $H$  = fluxo convectivo de calor sensível;  $P$  = energia utilizada nos processos fotossintéticos. Desde que a energia química envolvida na fotossíntese raramente excede 2-3% da radiação incidente, exceto por curtos períodos (1),  $P$  pode ser omitido sem acarretar erros significativos. Portanto, a energia disponível à superfície, isto é,  $(R_n + G)$ , se reparte entre os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ). Bowen (2) expressou esses termos em forma de uma razão (de BOWEN):

$$\beta = H/LE$$
 ..... (2)

Desde que os fluxos verticais de calor sensível e latente sejam do tipo convectivo forçado (fluxo turbulento em condições de atmosfera neutra), podem ser estimados em função dos gradientes médios de temperatura ( $T$ ) e umidade específica ( $q$ ), de acordo com as equações:

O presente trabalho teve por objetivos: a) determinar em cultura de arroz em condições de sequeiro, como se reparte, entre os processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e aquecimento do solo, a energia solar líquida recebida durante o período diurno; b) determinar a influência dos efeitos de advecção nos diversos processos referidos no item a.

## 2 — MATERIAL E MÉTODOS

O campo experimental foi instalado numa área do Centro Experimental de Campinas, SP, classificada como latossolo roxo. Foi utilizada a variedade IR-665, cultivada no espaçamento de 0,60 m entre linhas, com aproximadamente 70 sementes por metro linear. Das observações realizadas, foram utilizadas aquelas obtidas em 21/dez/72, 24/jan/73, 25/jan/73 e 23/mar/73, respectivamente 29, 63, 64 e 118 dias após o plantio. As três primeiras observações foram feitas após chuvas generalizadas onde tanto a área cultivada como as áreas adjacentes não apresentavam restrição hídrica. A última observação (20/mar/73) foi feita após um período de estiagem (19 dias) onde somente a área cultivada recebeu irrigação (20 mm).

No centro da área cultivada foi instalado um mastro amostrador com movimento rotativo alternado, no qual foram colocados: a) radiômetro líquido (4) acoplado a um potenciômetro (5) para a medida da radiação líquida a 0,80 m acima do nível do solo; b) conjuntos psicrométricos de ferro-constantan (0,50 m e 0,80 m acima do nível do solo) acoplados a um

$$H = -\rho C_p K_h (T/\beta Z) \dots \dots \dots (3a)$$

e,  $LE = -\rho L K_e (q/\beta Z) \dots \dots \dots (3b)$   
 onde,  $\rho$  = densidade do ar úmido;  $C_p$  = calor específico à pressão constante do ar úmido;  $L$  = calor latente de vaporização da água;  $K_h$  = coeficiente de transferência turbulenta de calor;  $K_e$  = coeficiente de transferência turbulenta de vapor d'água. Em condições de atmosfera próxima da neutralidade  $K_h = K_e$ . Substituindo-se as equações (3a) e (3b) na equação (2) obteremos a expressão de  $\beta$  usada por Webb (5):

$$\beta = [(s+\gamma)/\gamma] (\Delta T_u/\Delta T) - 1 \dots \dots \dots (4)$$

onde,  $s$  = tangente à curva de tensão de saturação de vapor sobre água no ponto temperatura média úmida entre os níveis de medida;  $\gamma$  = constante psicrométrica reduzida;  $\Delta T_u$  = diferença de temperatura de bulbo úmido e,  $\Delta T$  = diferença de temperatura de bulbo seco, entre os níveis de medida ( $Z_1$  e  $Z_2$ ).

Substituindo-se, também, a equação (2) em (1), tem-se:

$$LE = - (Rn + G)/(1 + \beta) \dots \dots \dots (5a)$$

$$e, H = -[(Rn + G)/(1 + \beta)] \dots \dots \dots (5b)$$

As equações (2), (4), (5a) e (5b), constituem a formulação do método de balanço de energia e nos permitem estimar os fluxos turbulentos de calor latente e calor sensível sobre uma superfície natural evaporante.

A evaporação potencial mínima possível (LEm) para um dado (Rn + G) ocorrerá quando sobre uma superfície úmida o déficit de saturação nos níveis  $Z_1$  e  $Z_2$  for nulo. Nesta situação, os gradientes de temperatura de bulbo úmido e de bulbo seco se igualam ( $\Delta T_u = \Delta T$ ). De acordo com as equações (5a) e (5b) tem-se que:

$$LEm = -[s/(s+\gamma)] (Rn + G) \dots \dots \dots (6a)$$

$$e, H = [\gamma/(s+\gamma)] (Rn + G) \dots \dots \dots (6b)$$

Conseqüentemente, o valor resultante de  $\beta$  será dado por:  
 $\beta = \gamma/s$  (7)  
 que é o valor máximo positivo de  $\beta$  nestas condições. Deste modo, toda vez que LE observado for menor que LEm, existirá a certeza de que o processo evaporativo foi limitado, ou por falta de umidade, ou devido a problemas de condutividade hidráulica do solo e planta.

(4) Middleton & Co. Pty. Ltd. — Austrália.

(5) Kipp & Zonen — Flatbed Recorder BD7 — Holanda.

potenciógrafo de 24 canais (6). A 1 cm de profundidade, na projeção do arco descrito pelo radiômetro líquido, nas linhas e entre-linhas foram instaladas quatro placas medidoras de fluxo de calor no solo (4) ligadas em série, acopladas a um potenciógrafo (7).

### 3 — RESULTADOS

Os resultados obtidos são mostrados nos quadros 1 a 4.

### 4 — DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Quando a evapotranspiração observada (LE) é menor que a evapotranspiração potencial mínima (LE<sub>m</sub>) nota-se que a razão de Bowen ( $\beta$ ) assume valores positivos elevados, o que pode determinar erros significativos na estimativa da evapotranspiração, visto que durante o processo evaporativo sem restrição hídrica  $\beta$  é geralmente menor que 0,20 e pode ser negativo (3). O valor de  $\beta$  será negativo quando o fluxo de calor sensível (H) for positivo, isto é, quando houver transferência de energia do ar para a superfície evaporante. Isto foi observado no dia 21/dez/72 das 13:00 às 18:00 horas; no dia 24/jan/73 das 14:00 às 15:00 horas; no dia 25/jan/73 das 8:00 às 9:00 horas; e, durante todo o dia 20/mar/73.

Quando não existem efeitos de advecção, calor sensível é transferido para o ar desde as primeiras horas da manhã, podendo retornar para a superfície nas primeiras horas da tarde devido à inversão de gradiente, contribuindo para aumento de LE. Tal fenômeno ocorreu no dia 21/dez/72.

No caso específico do dia 20/mar/73, quando todas as áreas adjacentes estavam secas e somente a área experimental havia sido irrigada, o balanço de energia não foi somente vertical, mas houve também contribuição advectiva das áreas adjacentes. A evapotranspiração diária foi cerca de duas vezes o valor da radiação líquida (LE/R<sub>n</sub> = 1,97), relação esta que também foi detectada por Tanner (4). O balanço de energia deste dia é típico "de oásis". Para os demais, a relação LE/R<sub>n</sub> foi 0,72, 0,86 e 0,68 para os dias 21/dez/72, 24/jan/73 e 25/jan/73, respectivamente.

Nota-se que não há perfeita concordância de fase entre LE e R<sub>n</sub>, isto pelo fato de LE depender primariamente do balanço de energia ao nível da superfície, que é defasado de seu valor ao nível 0,80 m. Quando a evaporação for limitada, maior fração de R<sub>n</sub> é utilizada para o aquecimento do ar (H) e para o aquecimento do solo (G).

(6) Honeywell Controls Ltd. — Eletronic 15 — U.S.A.

(7) Metrohm Herisau — Labograph E-428 — Suíça.

QUADRO 1. — Valores médios horários dos componentes do balanço de energia, em calorias/cm<sup>2</sup> / .min., para o dia 21 de dezembro de 1972, estimados através da razão de Bowen, em cultura de arroz de sequeiro em latossolo roxo do Centro Experimental de Campinas, SP

HORA	Rn	G	H	LE	$\beta$	LEm
07:00 .....	0,169	0,000	— 0,058	— 0,111	0,515	— 0,111
08:00 .....	0,324	— 0,061	— 0,029	— 0,234	0,124	— 0,176
09:00 .....	0,486	— 0,100	— 0,041	— 0,345	0,119	— 0,262
10:00 .....	0,650	— 0,153	— 0,270	— 0,227	0,190	— 0,343*
11:00 .....	0,810	— 0,168	— 0,261	— 0,381	0,684	— 0,449*
12:00 .....	0,810	— 0,170	— 0,064	— 0,576	0,112	— 0,448
13:00 .....	0,875	— 0,169	0,054	— 0,760	— 0,072	— 0,494
14:00 .....	0,778	— 0,172	0,036	— 0,643	— 0,057	— 0,424
15:00 .....	0,551	— 0,118	0,052	— 0,485	— 0,108	— 0,303
16:00 .....	0,389	— 0,078	0,024	— 0,335	— 0,071	— 0,214
17:00 .....	0,292	— 0,048	0,025	— 0,269	— 0,094	— 0,168
18:00 .....	0,097	0,000	0,015	— 0,112	— 0,134	— 0,067
TOTAL .....	6,231	— 1,237	— 0,517	— 4,478	—	— 3,459

(\*) LE < LEm

LE/Rn = 0,72

QUADRO 2. — Valores médios horários dos componentes do balanço de energia, em calorias/cm<sup>2</sup> / .min., para o dia 24 de janeiro de 1973, estimados através da razão de Bowen, em cultura de arroz de sequeiro em latossolo roxo do Centro Experimental de Campinas, SP

HORA	Rn	G	H	LE	$\beta$	LEm
07:00 .....	0,065	0,018	— 0,044	— 0,039	1,120	— 0,058*
08:00 .....	0,353	— 0,023	0,141	— 0,471	— 0,299	— 0,236
09:00 .....	0,344	— 0,027	— 0,044	— 0,273	— 0,160	— 0,218
10:00 .....	0,687	— 0,080	— 0,082	— 0,525	0,156	— 0,469
11:00 .....	0,833	— 0,085	— 0,196	— 0,542	0,362	— 0,541
12:00 .....	1,050	— 0,133	— 0,143	— 0,774	0,185	— 0,683
13:00 .....	1,083	— 0,133	— 0,173	— 0,777	0,223	— 0,708
14:00 .....	0,869	— 0,080	0,115	— 0,904	— 0,127	— 0,588
15:00 .....	0,995	— 0,067	0,028	— 0,956	— 0,030	— 0,650
16:00 .....	0,350	0,053	— 0,046	— 0,357	0,128	— 0,218
17:00 .....	0,227	0,032	— 0,012	— 0,257	0,048	— 0,134
18:00 .....	0,162	0,033	— 0,027	— 0,168	0,160	— 0,089
TOTAL .....	7,018	— 0,492	— 0,483	— 6,043	—	— 4,592

(\*) LE < LEm

LE/Rn = 0,86

QUADRO 3. — Valores médios horários dos componentes do balanço de energia, em calorias/cm<sup>2</sup> / min., para o dia 25 de janeiro de 1973, estimados através da razão de Bowen, em cultura de arroz de sequeiro em latossolo roxo do Centro Experimental de Campinas, SP

HORA	Rn	G	H	LE	$\beta$	LEm
07:00 .....	- 0,016	0,020	- 0,001	- 0,003	0,292	- 0,003
08:00 .....	0,366	- 0,011	0,114	- 0,469	- 0,244	- 0,253
09:00 .....	0,674	- 0,047	0,480	- 1,107	- 0,434	- 0,454
10:00 .....	0,772	- 0,113	- 0,286	- 0,373	0,787	- 0,487*
11:00 .....	0,904	- 0,107	- 0,245	- 0,552	0,444	- 0,593*
12:00 .....	1,075	- 0,147	0,088	- 1,010	- 0,087	- 0,691
13:00 .....	1,004	- 0,187	- 0,401	- 0,416	0,892	- 0,609*
14:00 .....	1,092	- 0,187	- 0,616	- 0,289	2,130	- 0,674*
15:00 .....	0,817	- 0,113	- 0,342	- 0,362	0,942	- 0,493*
16:00 .....	0,600	- 0,080	- 0,237	- 0,283	0,840	- 0,382*
17:00 .....	0,567	- 0,053	- 0,084	- 0,430	0,196	- 0,380
18:00 .....	0,195	0,013	0,008	- 0,216	- 0,037	- 0,133
TOTAL ..	8,050	- 1,012	- 1,522	- 5,510	-	- 4,522

(\*) LE &lt; LEm

LE/Rn = 0,68

QUADRO 4. — Valores médios horários dos componentes do balanço de energia, em calorias/cm<sup>2</sup> / min., para o dia 20 de março de 1973, estimados através da razão de Bowen, em cultura de arroz de sequeiro em latossolo roxo do Centro Experimental de Campinas, SP

HORA	Rn	G	H	LE	$\beta$	LEm
08:00 .....	0,210	0,010	0,567	- 0,787	- 0,720	- 0,157
09:00 .....	0,333	0,000	0,369	- 0,702	- 0,526	- 0,241
10:00 .....	0,634	- 0,069	0,619	- 1,184	- 0,523	- 0,417
11:00 .....	0,465	- 0,034	0,472	- 0,903	- 0,523	- 0,318
12:00 .....	0,710	- 0,056	0,933	- 1,587	- 0,588	- 0,487
13:00 .....	0,711	- 0,060	1,085	- 1,736	- 0,625	- 0,490
14:00 .....	0,549	- 0,024	0,458	- 0,983	- 0,466	- 0,388
15:00 .....	0,582	- 0,015	0,378	- 0,945	- 0,400	- 0,422
16:00 .....	0,624	- 0,018	0,400	- 1,006	- 0,398	- 0,451
17:00 .....	0,331	0,000	0,099	- 0,430	- 0,232	- 0,248
18:00 .....	0,129	0,010	- 0,009	- 0,130	0,084	- 0,101
TOTAL .....	5,278	- 0,256	5,371	- 10,393	-	- 3,720

LE/Rn &lt; 1,97

---

**ENERGY BALANCE OVER RICE GROWN UNDER UPLAND CONDITIONS****SUMMARY**

The main objective of this study was to quantify, in a rice field grown under upland conditions, how the net radiation is partitioned among the various energy balance components, such as: latent heat, sensible heat, and soil heat fluxes, with and without advection.

**LITERATURA CITADA**

1. BONNER, J. The upper limit of crop yield. *Science* 137:11-15, 1962.
2. BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27:779-787, 1926.
3. SLATYER, R. O. Plant-water relationships. London, Academic Press, 1967. 366p.
4. TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 24:1-9, 1960.
5. WEBB, E. K. Aerial microclimate. *Met. Monogr., Boston* 6(28):27-58, 1965.