



Balço de energia e evapotranspiração em subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja

Victor Proença do Amaral¹ e Felipe Gustavo Pilau^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP.

E-mails victor.proenca@usp.br e fgpilau@usp.br

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 12 de janeiro de 2024

Aceito em 8 de julho de 2024

Termos para indexação:

consumo hídrico

sistema sequeiro

razão de Bowen

RESUMO

O estudo do balanço de energia em superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, além de identificar as interações entre variáveis ambientais e a vegetação. Os objetivos do presente trabalho são particionar o balanço energético e calcular a evapotranspiração real da cultura (ET_r) em um cultivo de soja sob sistema de plantio direto em Londrina, PR. A área foi semeada com a variedade Coodetec – CD206, em regime de sequeiro. Na obtenção do balanço de energia e da ET_r, utilizou-se o método razão de Bowen. O fluxo de calor latente (LE), sensível (H) e do solo (G) observado e respectivamente, 56%, 36% e 8% do saldo de radiação (R_n). A ET_r total foi de 375,25 mm, sendo o valor máximo observado entre o florescimento e o início do enchimento de grãos (R1-R5) de 6,72 mm.dia⁻¹, é a partir da fase de enchimento e maturação dos grãos (R5-R7) ocorreu um declínio nos valores de ET_r causado pela senescência na cultura.

© 2024 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

O Brasil, atualmente é o maior produtor e exportador mundial de soja, alcançou uma produção de 154 milhões de toneladas na safra 2022/23, representando 41% da produção global, e produtividade média de 3.5 kg ha⁻¹, resultado esse possível com alto uso de tecnologia e condições climáticas favoráveis nas regiões produtoras (CONAB, 2023).

O déficit hídrico, agravado pela irregularidade da precipitação em algumas regiões produtoras, emerge como um dos principais fatores associados às oscilações na produtividade nacional da soja, é destaca a importância crítica das condições climáticas durante o ciclo da cultura (Farias et al., 2007). Dessa maneira, a utilização de sistemas de irrigação são ferramentas vitais na busca por produtividades mais elevadas dessa cultura (Kuss, 2006).

A expansão de novos campos irrigados, notadamente sob sistemas de pivô central, exige uma compreensão mais aprofundada da demanda hídrica da soja em diversos ambientes (Battisti et al., 2017; Silva et al., 2019). A quantificação dessa demanda não apenas possibilita a previsão da quantidade de água necessária para o planejamento de projetos de irrigação (Souza, 2022) como também permite o dimensionamento adequado dos sistemas irrigantes (Silva et al., 2015). O estudo da evapotranspiração, mesmo em condição de sequeiro, é muito importante, pois possibilita estratégias de manejo em função das condições climáticas da região e hídricas do solo (Lima et al., 2011).

O balanço de energia em superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, por meio do estudo da partição do saldo de radiação em processos evaporativo, de aquecimento do

ar e do solo e na fotossíntese (Tubelis et al., 1976; Souza et al., 2008; Lima et al., 2011). Esse método permite avaliações nas alterações no microclima do dossel, em função dos estágios de desenvolvimento da cultura e das condições de solo e atmosfera (Fontana et al., 1991).

Existem diversos trabalhos acerca do balanço de energia com o cultivo da soja (Anapalli et al., 2021; Oliveira et al., 2019; Souza et al., 2011). O conhecimento dos componentes do balanço de energia, em particular o fluxo de calor latente, oferece elemento significativo na identificação das necessidades hídricas desta cultura (Souza et al., 2008).

Neste contexto, algumas técnicas micrometeorológicas vêm sendo empregadas na mensuração das trocas de energia em superfície vegetada, sem alteração do meio (Biudes et al., 2009). O método razão de Bowen (Bowen, 1926) é um método micrometeorológico que calcula a partição de energia disponível em fluxos de calor latente e sensível, por meio de medidas realizadas diretamente no campo, como o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo, e estimativas dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água (Pezzopane & Pedro Júnior, 2003).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivos estimar a partição do balanço de energia e calcular a evapotranspiração real da cultura da soja nos seus subperíodos de desenvolvimento, utilizando o método razão de Bowen, no município de Londrina, PR.

Material e métodos

O estudo foi realizado em uma área experimental da Embrapa Soja, no município de Londrina, Paraná (23°11'S; 51°11'O e 597m). A classificação climática da região é Cfa - clima subtropical úmido mesotérmico de acordo com a classificação de Köppen, com verões quentes e geadas pouco frequentes, tendência de concentração de chuvas nos meses de verão e temperatura média de 21°C (Wrege et al., 2011; Alvares et al., 2014).

A área foi semeada em 05 de dezembro de 2005 com soja (*Glycine max (L.) Merrill*), cultivar Coodetec - CD206, em regime de sequeiro, espaçamento de 0,50 m entre linhas e 15-18 plantas por metro linear, em um bloco de 0,28 ha. Foi realizada uma adubação no momento da semeadura, utilizando 250 kg ha⁻¹ do adubo granulado NPK 0-28-20. O controle de ervas daninhas e os tratamentos fitossanitá-

rios foram realizados sempre que necessários, seguindo recomendações técnicas.

O monitoramento do desenvolvimento da soja foi feito utilizando a escala fenológica proposta por Fehr & Caviness (1977), definindo os estádios de emergência de plântula (E), segundo nó ou primeira folha trifoliada (V2), início do florescimento (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

Uma torre instrumentada de 2,5 m de altura foi montada na área, com sensores micrometeorológicos (Tabela 1) necessários ao cômputo do balanço de energia (Bowen, 1926), ligados a uma *datalogger* marca Campbell, modelo CR21X. Dados foram armazenados a cada 15 minutos.

A partir da temperatura do termômetro de bulbo seco foi calculada a pressão saturante de vapor d'água no ar (equação 1) para cada nível de medida indicada (Tabela 1):

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\frac{(7,5 \cdot t_s)}{237,3 + t_s}} \quad (\text{Eq 1})$$

sendo e_s a pressão de saturação de vapor (kPa); t_s é a temperatura do ar (°C).

Com os dados de temperatura dos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido foi calculada a pressão parcial de vapor de acordo com a equação 2:

$$e_a = e_{stu} - A \cdot P \cdot (t_s - t_u) \quad (\text{Eq 2})$$

sendo e_a a pressão parcial atual de vapor (kPa), e_{stu} é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa) calculada para a temperatura do ar medida no bulbo úmido (t_u), A é o coeficiente psicrométrico (°C⁻¹), P é a pressão atmosférica (kPa), t_s é a temperatura do ar medida no bulbo seco (°C), t_u a temperatura do termômetro de bulbo úmido (°C).

A constante psicrométrica (γ) foi calculado conforme a equação 3:

$$\gamma = \frac{cp}{0,622L} \quad (\text{Eq 3})$$

γ é a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); cp é o calor específico do ar à pressão constante 1,0313 kJ kg⁻¹; L calor latente de vaporização da água 2,45 MJ kg⁻¹.

A evapotranspiração real (E_{Tr}) foi obtida pelo método do balanço energia por intermédio da razão de Bowen (β),

Tabela 1. Instrumentação utilizada na estação micrometeorológica, em Londrina (PR).

Variável Meteorológica	Instrumento (Marca/Modelo)	Nível (m) / Posição de Instalação
Saldo de radiação (Rn)	REBS Net Radiometer, Q-7.1	2,0
Temperatura de bulbo seco (ts)	Psicrômetro ventilados (Marin et al., 2001)	0,65 e 1,65
Temperatura de bulbo úmido (tu)		0,65 e 1,65
Fluxo de calor no solo (G)	REBS Soil Heat Flux Plate, HTF 3.1	0,05 na Linha de Semeadura/Entrelinha de semeadura

em função do fluxo de calor latente (LE) entre a superfície e a atmosfera, de acordo com a equação 4:

$$ETr = \frac{LE}{\lambda} \quad (\text{Eq 4})$$

em que LE é o fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), é o calor de latente de evaporação da água (J kg^{-1}), obtido por meio da equação 5:

$$\lambda = [(2,501 \cdot 10^6) - (2,361 \cdot 10^3 T)] \quad (\text{Eq 5})$$

em que T é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Seguindo as recomendações de Arya (2001), o componente LE foi obtido por meio da razão de Bowen (β) medida através das relações do transporte vertical de calor e vapor d'água, assumindo que existe igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (K_H e K_{LE}) de acordo com as equações (6) e (7):

$$LE = \frac{Rn - G}{(1 + \beta)} \quad (\text{Eq 6})$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (\text{Eq 7})$$

onde Rn é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), γ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), ΔT ($^{\circ}\text{C}$) e Δe (kPa), ambos são a diferença da temperatura do ar e da pressão de vapor d'água entre dois níveis de medida (Tabela 1).

Para evitar possíveis inconsistências nos valores da razão de Bowen, adotou-se critérios de rejeição de dados, conforme a metodologia proposta por Perez et al. (1999). Foram eliminados gradientes menores que a resolução dos sensores, e foram estabelecidas classes de erro para os valores de β que se aproximam de -1, conforme as Tabelas 2

e 3. A evapotranspiração real da soja foi então obtida pela soma dos valores positivos de LE no intervalo do nascer ao pôr do sol.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) foi utilizado o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) equação 8, com dados obtidos da estação meteorológica da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Eq 8})$$

Resultados e Discussão

A temperatura média do ar durante o período de produção da soja foi de $23,3^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima não excedeu os 35°C e a mínima manteve-se superior aos 10°C (Figura 1), dentro da faixa térmica favorável à soja (Farias et al., 2007). Assim, efeitos térmicos adversos podem ser desconsiderados, já que a soja tem o florescimento induzido apenas em temperaturas superiores a 13°C , e temperatura maior que 40°C interfere negativamente no metabolismo, causando redução do crescimento da planta (Farias et al., 2007; Ely, 2018).

Análise da precipitação acumulada em cada um dos subperíodos (Tabela 4), observa-se que, entre os estádios V2-R1, foram acumulados 143 mm de chuva. Já nos 18 dias entre floração e início de formação dos grãos, estágios R1-R5, foram acumulados 241,6 mm, correspondendo a 66,6% do total do ciclo. Esse subperíodo (R1-R5) é considerado uma das fases críticas da soja, pois engloba o florescimento e a formação dos grãos, estádios nos quais a cultura apresenta elevada demanda hídrica e sensibilidade ao estresse (Tejo et al., 2019). Ao fim do ciclo, entre os estádios R7-R8

Tabela 2. Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen.

Energia Disponível	Diferença de Pressão de Vapor	Razão de Bowen	Fluxos de Calor Latente e Sensível
Rn - G > 0	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE > 0 e H ≤ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H > 0 para β > 0
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	LE < 0 e H > 0
Rn - G < 0	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	LE > 0 e H < 0
	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	LE < 0 e H ≥ 0 para -1 < β ≤ 0 ou H < 0 para β > 0

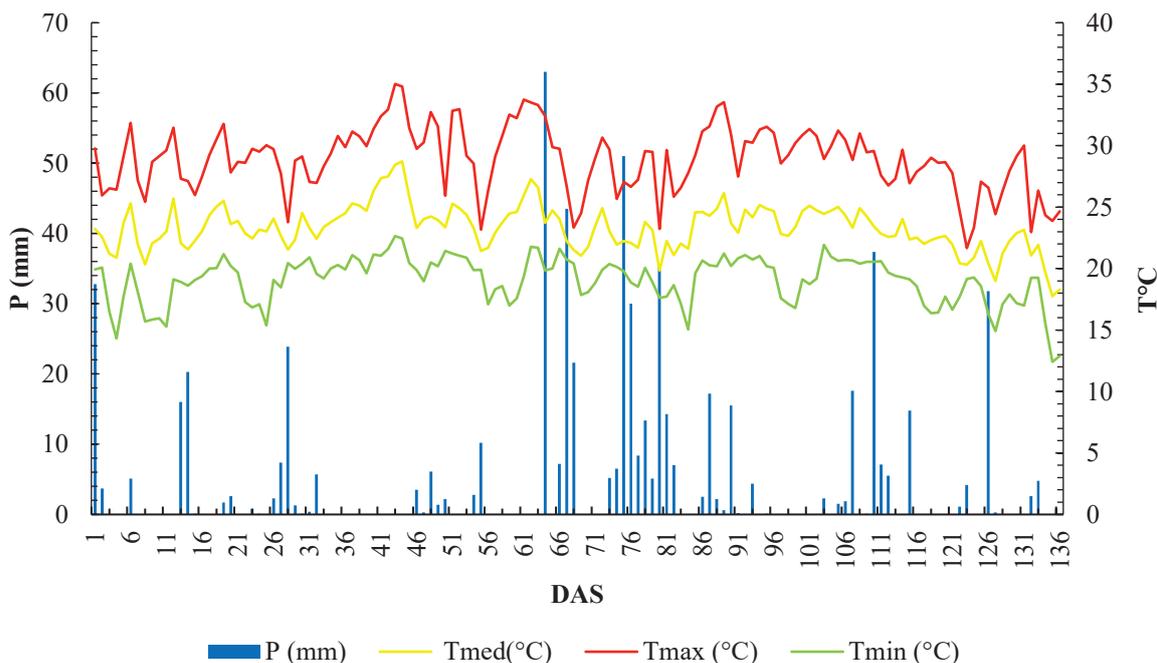
Fonte: Perez et al. (1999).

Tabela 3. Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen.

Classe de erro	Condição
A	$(Rn - G) > 0, \Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
B	$(Rn - G) > 0, \Delta e < 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
C	$(Rn - G) < 0, \Delta e > 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
D	$(Rn - G) < 0, \Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
E	Mudanças Rápidas em T e e

Fonte: Perez et al. (1999).

Figura 1. Condições meteorológicas no ciclo de desenvolvimento da soja.



(123 a 136 DAS), a redução das chuvas (43,7 mm acumulados) favoreceu a maturação.

O saldo de radiação (Tabela 5) variou proporcionalmente à radiação global (Tabela 4). No início do ciclo de desenvolvimento da soja, com Rn representando 56% de Qg, apresentou maior valor registrado no período estudado. Durante a fase R1-R5, o saldo de radiação representou 46% da radiação global, enquanto nas fases R5-R7 e R7-R8 os valores na relação Rn/Qg foram aproximadamente 43% e 46%, respectivamente. De maneira geral, notou-se uma

tendência de redução na razão Rn/Qg à medida que a cultura se desenvolvia. Segundo Souza & Escobedo (1997), esse comportamento decorre, em parte, de uma maior perda por reflexão de ondas curtas que pode ser favorecida por maior perda em ondas longas, graças a um maior aquecimento do dossel da cultura.

Ainda de acordo com a Tabela 5, nota-se que a razão G/Rn teve a menor partição no balanço de energia durante todo período estudado, provavelmente em consequência da cobertura da entrelinha relativamente elevada, por

Tabela 5. Subperíodos de desenvolvimento da soja com respectivos tempos de duração, chuva acumulada, fluxos e partição energética do cultivo da soja.

Subperíodo	Duração (dias)	Rn (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Rn/Qg	G	LE (MJ m ⁻² d ⁻¹)	H	G/Rn	LE/Rn	H/Rn
V2-R1	48	11,17	0,56	0,98	6,38	3,81	0,08	0,57	0,35
R1-R5	18	8,05	0,46	0,51	4,53	3,01	0,06	0,54	0,37
R5-R7	38	7,53	0,43	0,62	4,24	2,66	0,08	0,57	0,35
R7-R8	14	6,59	0,46	0,72	3,61	2,24	0,11	0,55	0,34
Ciclo ¹	118 ¹	8,34	0,48	0,71	4,69	2,93	0,08	0,56	0,36

¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de semeadura ao estágio V2.

Tabela 4. Subperíodos de desenvolvimento da soja com respectivos tempos de duração, dias chuvosos, chuva acumulada, radiação solar global (Qg) e evapotranspiração de referência (ETo) durante o ciclo da soja.

Subperíodo	Duração (dias)	Dias de chuva	Chuva (mm)	Qg (MJ m ⁻² d ⁻¹)	ETo (mm d ⁻¹)
V2-R1	48	15 (31,2%)	143,0	19,9	4,5
R1-R5	18	12 (66,6%)	241,6	15,6	3,4
R5-R7	38	14 (36,8%)	132,0	17,2	3,9
R7-R8	14	4 (28,5%)	43,7	12,7	3,1
Ciclo ¹	118 ¹	45 (38,1%)	560,3 ²	17,5 ³	3,9 ⁴

¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de semeadura (S) ao estágio V2. ²Chuva acumulada. ³Radiação solar global média durante o ciclo da soja.

⁴Evapotranspiração de referência média durante do ciclo da soja.

conta do desenvolvimento foliar da cultura e pela palha seca do sistema de plantio direto, que provocou menor incidência de radiação no solo (Righi, 2004). As condições de umidade no solo também tiveram efeito sobre a grandeza dos valores de G/R_n , entretanto uma análise mais profunda exigiria uma maior complexidade, devido à falta de informações necessárias das propriedades físicas e térmicas do solo, além de dados dos gradientes de temperatura e do conteúdo de umidade ao longo do experimento, os quais não foram mensurados.

A relação média H/R_n do ciclo ficou em torno de 36%, indicando que a maior parte da energia disponível foi utilizada no processo de evapotranspiração, cuja a relação LE/R_n foi de 56%. Isso ocorreu devido a soja ter sido conduzida sob regime de sequeiro, expondo a cultura ao déficit hídrico por longos períodos, uma vez que a precipitação ocorrida na área foi distribuída de forma irregular. Esses valores diferem daqueles encontrados por Souza et al. (2012) com $LE/R_n=0,71\%$, em área com cultivo de soja na cidade de Paragominas-PA e por Gebremedhin et al. (2022) com $LE/R_n=76\%$, em Haze Green, Alabama-USA.

Na comparação com os resultados de Souza et al. (2012) e Gebremedhin et al. (2022), é preciso considerar que esses autores realizaram seus estudos em regiões diferentes, adotando diferentes manejos, variedades de soja em condições climáticas distintas comparadas a este estudo.

A partir das 19 h (Figura 2), o fluxo de calor latente e sensível tenderam a se aproximar em seus valores. Esse processo é consequência do armazenamento durante o dia de energia do fluxo de calor latente e do solo, que é liberada à noite para a atmosfera, a qual busca equilibrar o gradiente de temperatura, que apresenta a temperatura do solo mais elevada do que a temperatura do ar (Pereira, 2018). Além disso, há o efeito do orvalho, que libera ener-

gia para transformar o vapor de água próximo à superfície do dossel em água líquida, aquecendo o ar próximo ao dossel da cultura.

A influência da sazonalidade e das características da cultura é evidente ao analisar os fluxos de energia horários por subperíodo de desenvolvimento (Figura 3). Durante o período estudado, o fluxo de calor no solo (G) durante o período estudado só se torna maior que 0 a partir das 10 h. Os valores de H decrescem mais rapidamente no período da tarde, passando a apresentar valores negativos após as 17 h, durante a maior parte do ciclo. Observou-se também que o R_n médio segue um padrão semelhante ao longo do ciclo, com valores negativos à noite e positivos durante o dia, atingindo valor máximo às 12 h.

Na Figura 4 é apresentado o fechamento do balanço de energia para todo o ciclo da cultura da soja, onde foi obtido um $R^2=0,98$. De acordo com Aubinet et al. (2001), não se espera o fechamento completo do balanço de energia, uma vez que a energia armazenada nas plantas e biomassa, além da ocorrência de outros fluxos turbulentos não verticais, como a advecção, não são contabilizados.

Observou-se que no subperíodo V2-R1 (Figura 5), a evapotranspiração real manteve valores diários oscilando entre 1,4 a 5,8 mm d^{-1} . Estes altos valores, porém, apresentam uma considerável contribuição da evaporação do solo, já que nesse período havia disponibilidade de água e a energia radiante era elevada (Souza et al., 2016). A alta demanda atmosférica, também afetou diretamente a evapotranspiração nesse período, fazendo com que a perda de água fosse alta mesmo com a cultura ainda em desenvolvimento foliar (Souza et al., 2016). Resultados semelhantes, embora com diferentes magnitudes, estão de acordo com os observados por Rossatto et al. (2022), que encontraram valores de evapotranspiração média na fase vegetativa de

Figura 2. Variação média horária dos fluxos de energia para todo o ciclo da soja.

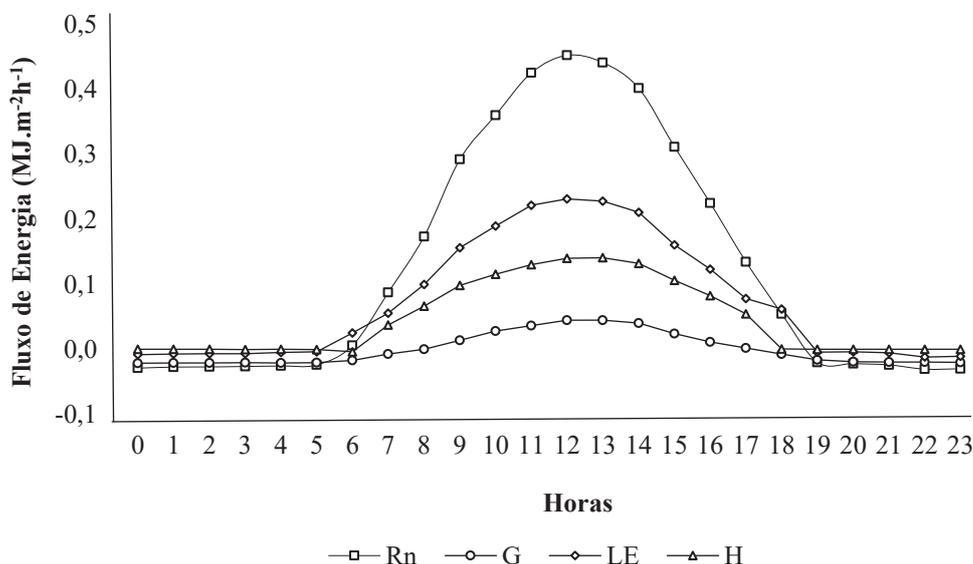
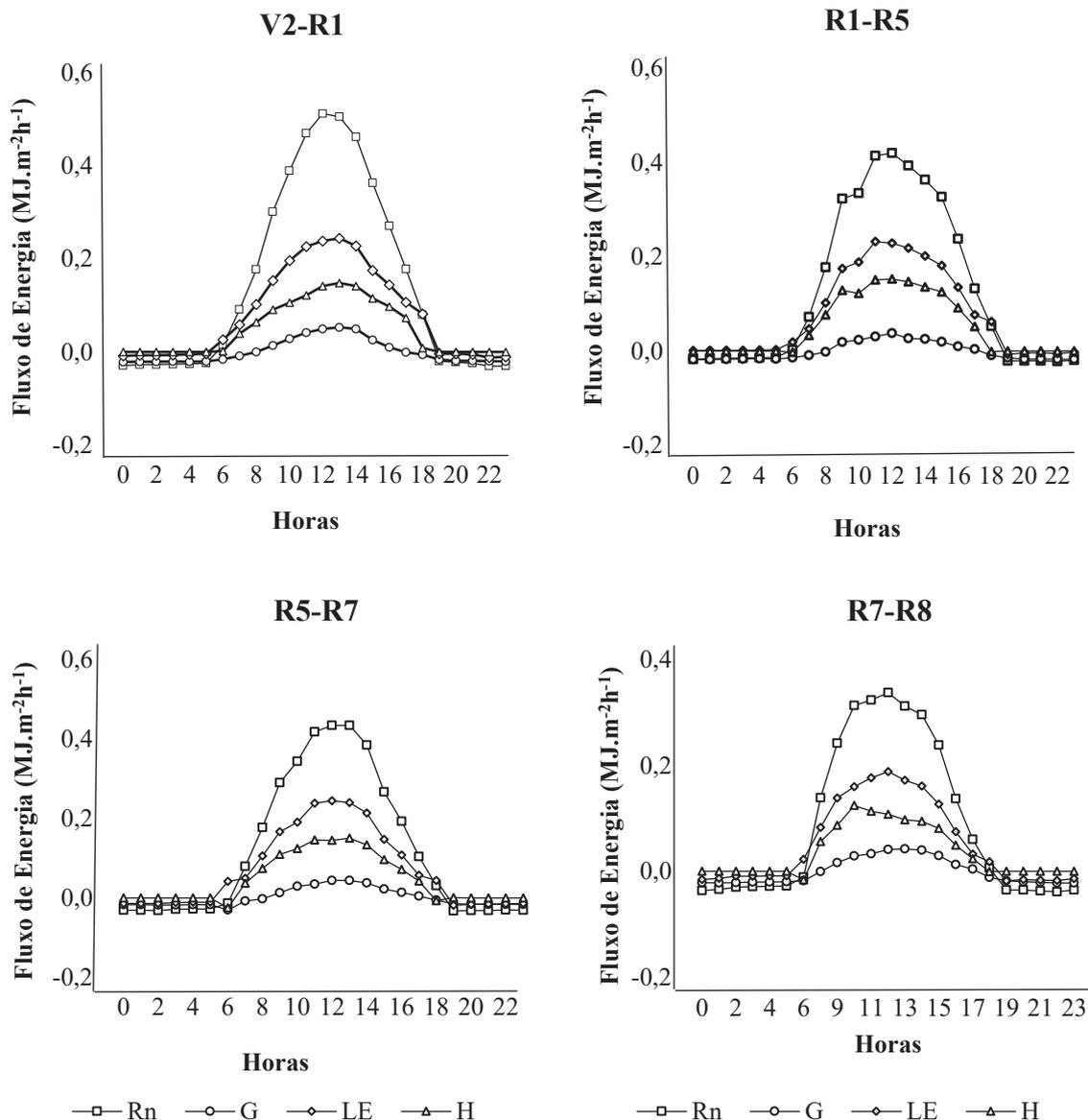


Figura 3. Variação média horária dos fluxos de energia nas fases de desenvolvimento da soja.



3,7 mm d⁻¹, e com os obtidos por Oliveira (2019) de 5 mm d⁻¹ em Piracicaba-SP.

A evapotranspiração real máxima foi observada no final da fase R1-R5 com valor de 6,7 mm d⁻¹ (Figura 5). Sauer et al. (2007) registrou valores máximos entre 4,9 e 7,5 mm d⁻¹, enquanto Suyker & Verma (2010) encontraram valores máximos de evapotranspiração da soja em condições de sequeiro e irrigado de 5,8 e 6,9 mm.d⁻¹, respectivamente. A necessidade de água na cultura da soja cresce à medida que a planta se desenvolve, atingindo o valor máximo durante o período entre o início do florescimento ao enchimento completo dos grãos (R1-R6) e diminuindo após essa fase (Berlato et al., 1986; Neto, 2020).

No entanto, a partir da fase R7-R8, observou-se um rápido declínio nos valores de ETr chegando a atingir valores abaixo de 1 mm.d⁻¹. Essa queda pode é influenciada pelo declínio fisiológico da cultura.

A evapotranspiração real acumulada totalizou 375,2 mm para o período analisado. Isso representou uma ETr acumulada durante o crescimento vegetativo e o início do período reprodutivo de 169,7 mm (V2-R1), com valor médio de 4 mm d⁻¹. A ETr durante o florescimento e o início do enchimento de grãos foi de 63,5 mm (R1-R5), com valor médio de 3,5 mm d⁻¹. Durante as fases de início do enchimento e maturação das sementes (R5-R7), a ETr tota foi de 109,8 mm, com valor médio de 3,2 mm d⁻¹. Já no período de maturação plena, foi observado o menor valor acumulado, 32,1 mm, com média de 2,4 mm d⁻¹.

Conclusões

O saldo de radiação teve valor médio de 8,34 MJ m⁻² d⁻¹, apresentando uma distribuição irregular da energia ao longo do período estudado. O particionamento da radia-

Figura 4. Fechamento do balanço de energia no ciclo da soja.

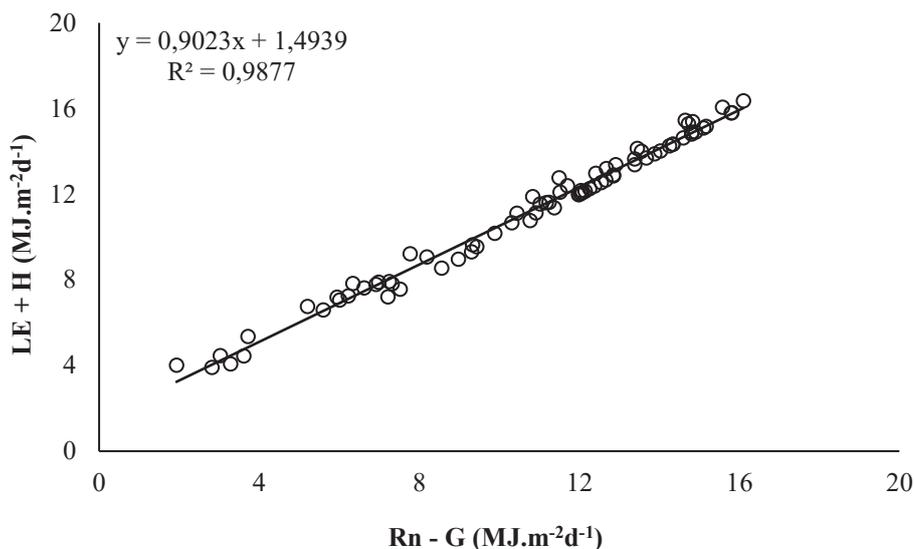
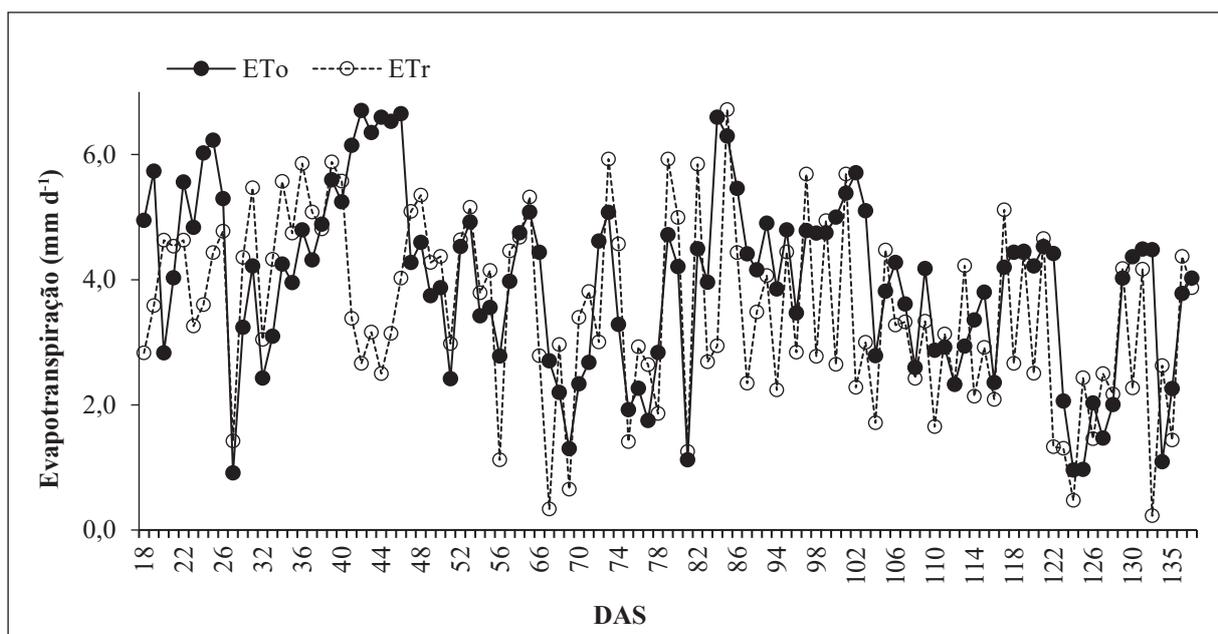


Figura 5. Variação diária da evapotranspiração real (ETr) e evapotranspiração de referência (ETo) na cultura da soja.



ção, em média, foi de 56% no fluxo de calor latente (LE), 36% como fluxo de calor sensível (H) e 8% como fluxo de calor no solo (G).

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que 45,2% da evapotranspiração real da soja no período estudado ocorreu durante o subperíodo V1-R1. Isso pode ser explicado pela oferta hídrica proveniente da precipitação e da radiação solar na região nessa fase.

A evapotranspiração real acumulada foi de 375,2 mm, com valor máximo de 6,7 mm.d⁻¹ sendo mensurado na fase V2-R1. Já o valor mínimo 0,23 mm.d⁻¹, foi medido na fase R7-R8.

Contribuição dos autores

F. G. PILAU concepção e orientação do projeto e condução do experimento e coleta dos dados. F. G. PILAU e V. P. AMARAL realização das análises estatísticas, análise dos dados, redação e revisão do manuscrito.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, e à Embrapa Soja pelo apoio científico.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, n.6, p. 711-728, 2014. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ANAPALLI, S. S. KRUTZ, J. L.; PINNAMANENI, S. R.; REDDY, K. N. Eddy covariance quantification of soybean (*Glycine max L.*) crop coefficients in a farmer's field in a humid climate. *Irrigation Science*, Chile, v.39, n.55, p.651-669, 2021. DOI: 10.1007/s00271-021-00742-2
- AUBINET, M.; CHERMANNE, B.; VANDENHAUTE, M.; LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; LAITAT, E.; Submitted long term measurements of water vapour and carbon dioxide fluxes above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest*, v.108, n.4, p.293-315, 2001.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York, Academic Press, 420p, 2001.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. *Agronomy Journal*, Madison, v. 109, n. 4, p.1612-1622, 2017. DOI: 10.2134/agronj2017.01.0023
- BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMACHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque "classe A" e radiação solar global. *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.22, n.2. 1986.
- BIUDES, M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H., NOGUEIRA, J. S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do Pantanal pelo método da razão de Bowen. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n.2, p.135-143, 2009.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physics Review*, v. 27, p. 779-787, 1926.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim de monitoramento agrícola**. Available at: <<https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safra/gaos/monitoramento-agricola>>. Accessed on: Nov. 2023.
- ELY, A. Redução da qualidade de grãos de soja durante o armazenamento em diferentes condições de umidade e temperatura. *Revista Thema*, v.15, n.2, p.506-520, 2018. DOI: 10.15536/thema.15.2018.506-520.859
- FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L., NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48). Available at: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/470308/ecofisiologia-da-soja>>. Accessed on: Dez. 2023.
- FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames: Cooperative Extension Service, 1977. (Special Bulletin, 80). Available at: <<https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/58c89bfe-844d-42b6-8b6c-2c6082595ba3>>. Accessed on: Out. 10. 2023.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.26, n.03, p.403410, 1991. Available at: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/105769/1/pab15mar91.pdf>>. Accessed on: Out. 10. 2023
- GEBREMEDHIN, M.; BROWN, J.; RIES, I. Soil management and microclimate effects on ecosystem evapotranspiration of winter wheat-soybean cropping in northern Alabama. *Atmosphere*. V.13, n.10, p.1653, 2022. DOI: 10.3390/atmos13101653
- KUSS, R. C.R. **Populações de plantas e estratégias de irrigação na cultura da soja**. 2006. 81p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria (UFMS), Santa Maria.
- LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011. DOI: 10.1590/S1806-66902011000100009
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; L. R., COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*, v.58, n.4, p.839-844, 2001.
- NETO, D. O. **Índice de vegetação, rendimento de grãos e seus componentes em soja, em área com avaliação de agentes de controle biológico**. 2020. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- OLIVEIRA, R. K., **Fluxos de CO₂, água e energia em área de renovação de canal com um cultivo de soja**. 2019. 61p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- PEREIRA, R. A. de A. **Balanço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro**. 2018. 96p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.97, p.141-150, 1999.
- PEZZOPANE, J. R. M.; PEDRO JÚNIOR, M.J. Balanço de energia em vinhedo de 'Niagara Rosada'. *Bragantia*, v.62, n.1, p.155-161, 2003.
- RIGHI, E. Z. **Balanço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 151p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.
- ROSSATO, A. A. P.; KIRCHNER, J. H.; MARTINS, J. D.; SANDER, L.S.; AMARAL, W. N. B. do.; PETRY M.T. Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. *IRRIGA. [S. I.]*, v.27, n.3, p. 477-492. 2022. DOI: 10.15809/irriga.2022v27n3p477-492
- SAUER, T. J.; SINGER, J. W.; PRUEGER, J. H.; DESUTTER, T. M.; HATFILED, J.L. Radiation balance and evaporation partitioning in a narrow-row soybean canopy. *Agricultura and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.145, p.206-214, 2007.
- SILVA, A. O. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, Pe. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, Tupã, v.9, n.1, p.30-38, 2015.
- SILVA, E. H. F. M.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A.; JÚNIOR, I. M. F.; SOBENKO, L. R.; MARIN, F. R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.218, n.1, p.1-7, 2019. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.03.003
- SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 32, n. 1, p. 1-15, 1997.
- SOUZA, P.J.O.P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; BOTELHO, M.N.; SOUSA, A.M.L.; SOUZA, E.B.; FARIAS, J.R.B. Impacts of soybean expansion on the Amazon energy balance: a case study. *Experimental Agriculture*, Cambridge, v.43, p.553-567, 2011. DOI: 10.1017/S0014479711000391
- SOUZA, P.J. O. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; ROCHA, E. J. P.; SOUSA, A.M.L.; SOUZA, E.B.S. Consumo hídrico da soja no nordeste Paraense. *Irriga*, Botucatu-SP, ad. Especial irrigação, p.218-231, 2016. DOI: 10.15809/irriga.2016v1n01p218-231.
- SOUZA, C.B.; SILVA, B.B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P.R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, n.12, p 400-4007, 2008. DOI:10.1590/S1415-43662008000400011

SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultura and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.149, p.443-452, 2009.

TEJO, D. P.; FERNANDES, C. H. dos S.; BURATTO, J. S. Soja: fenologia, morfologia e fatores que interferem na produtividade. **Revista Científica Eletrônica de XIXI da Faef**, Garça, v.35, n.1, p. 1-9, 2019.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L.; FOLION, L. L. Estimativa da radiação solar global diária em Botucatu, SP, a partir da insolação diária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.26, n.1, p.53-60, 1976.

WREGG, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de. (Ed.). Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 333 p.

REFERENCIAÇÃO

AMARAL, V. P.; PILAU, F. G. Balanço de energia e evapotranspiração em subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.32, e027571, 2024.



Energy balance and evapotranspiration during different growth stages of soybean cultivation

Victor Proença do Amaral¹ and Felipe Gustavo Pilau^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Av. Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP, Brazil.

E-mails victor.proenca@usp.br and fgpilau@usp.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 January 2024

Accepted 8 July 2024

Index terms:

water consumption

rainfed system

Bowen ratio

ABSTRACT

The study of energy balance in vegetated surfaces allows for the quantification of mass and energy exchanges in the soil-plant-atmosphere system, as well as the identification of interactions between environmental variables and vegetation. The objectives of the present work are to partition the energy balance and calculate the actual evapotranspiration of the crop (ET_r) in a soybean growing under direct planting system in Londrina, PR. The area was planted with the Coodetec-206 variety under rainfed conditions. In obtaining the energy balance and ETR, the Bowen ratio method was used. The latent heat flow (LE), sensitive (H) and soil (G) observed and 56%, 36% and 8% of the radiation balance, respectively (R_n). The total ETR was 375,25 mm, the maximum value observed being between the stage flowering and beginning of grain filling (R1-R5) of 6.72 mm.d⁻¹, from the filling and ripening phase of the grains (R5-R7) there was a decline in the ETR values caused by senescence in the crop.

© 2023 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

AMARAL, V. P.; PILAU, F. G. Balanço de energia e evapotranspiração em subperíodos de desenvolvimento da cultura da soja. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.32, e027571, 2024.